

Thomas Glade / Martin Mergili / Katrin Sattler (Hg.)

Extrema 2019

Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen
alpiner Naturgefahren in Österreich

Vienna University Press





unipress

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

Thomas Glade / Martin Mergili /
Katrin Sattler (Hg.)

ExtremA 2019

Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen
alpiner Naturgefahren in Österreich

Mit 150 Abbildungen

V&R unipress

Vienna University Press



universität
wien

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <https://dnb.de> abrufbar.

**Veröffentlichungen der Vienna University Press
erscheinen bei V&R unipress.**

Vorgeschlagene Zitierweise:

Gesamtes Buch:

Glade, T., Mergili, M., Sattler, K. (Hrsg.), 2020. ExtremA 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. Vienna University Press, 776 S.

Beispiel eines Buchkapitels:

Sattler, K., Mehlhorn, S., 2020. Überblick alpiner Naturgefahren in Österreich. In: T. Glade, M. Mergili, K. Sattler (Hrsg.), ExtremA 2019. Aktueller Wissensstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich. Vienna University Press, S. 45–58.

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Theaterstraße 13, D-37073 Göttingen
Dieses Werk ist als Open-Access-Publikation im Sinne der Creative-Commons-Lizenz BY-NC-ND International 4.0 (»Namensnennung – Nicht kommerziell – Keine Bearbeitungen«) unter dem DOI 10.14220/9783737010924 abzurufen. Um eine Kopie dieser Lizenz zu sehen, besuchen Sie <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.

Jede Verwertung in anderen als den durch diese Lizenz zugelassenen Fällen bedarf der vorherigen schriftlichen Einwilligung des Verlages.

Umschlagabbildung: Ablagerungen am Schwemmkegel des Tronitzerbachs, Gemeinde Afritz am See./Debris flow deposits on the fan of the Tronitzer creek, community Afritz am See.

Quelle: GLB Kärnten Nordost, WLW

Abbildungs- und Fotorechte liegen bei den angeführten Quellen.

Vandenhoeck & Ruprecht Verlage | www.vandenhoeck-ruprecht-verlage.com

ISBN 978-3-7370-1092-4

Inhalt

Vorwort des Auftraggebers	21
Vorwort der Herausgeber*innen	25
Zusammenfassung/Abstract	29
Synthese	31
Die Situation	31
Terminologie Extremereignisse	32
Mögliche zukünftige Entwicklungen	35
Herausforderungen und Handlungsoptionen	37
Teil I: Ausgangssituation	
1 Überblick alpiner Naturgefahren in Österreich	45
1.1 Land der Berge, Land am Strome ... Land mit alpinen Naturgefahren	46
1.2 Terminologie und Definitionen	46
1.3 Arten alpiner Naturgefahren in Österreich	48
1.4 Herausforderung alpine Naturgefahr	52
1.5 Umgang mit alpinen Naturgefahren	53
Literatur	56
2 Was sind Extremereignisse?	59
2.1 Hintergrund	60
2.2 Naturwissenschaftlicher Kontext	61
2.3 Gesellschaftswissenschaftlicher Kontext	63
2.4 Herausforderungen	64
Literatur	67
3 Ziele des ExtremA Berichts	71

Teil II: Extremereignisse einzelner Prozesse und Prozessbereiche

A Meteorologische Extremereignisse

4	Extremtemperaturen und Trockenheit	77
4.1	Definition und Terminologie des Sachverhaltes	78
4.1.1	Naturgefahren durch Extremtemperaturen	78
4.1.2	Quantitative Beschreibung von Temperaturextremen mittels Kenngrößen	80
4.1.3	Naturgefahren durch Trockenheit (Dürre)	81
4.1.4	Quantitative Beschreibung von Trockenheit (Dürre) – Extremereignisse	81
4.2	Historische Entwicklung	83
4.2.1	Historische Entwicklung von Temperaturextremen in Österreich	83
4.2.2	Historische Entwicklung von Trockenheit in Österreich.	86
4.2.3	Fallbeispiele	90
4.3	Einschätzung des Sachstandes und Unsicherheiten	91
4.4	Mögliche zukünftige Entwicklungen und Herausforderungen . .	93
4.5	Perspektiven für Handlungsoptionen	93
	Literatur	94
5	Schnee- und Eislast	97
5.1	Definition und Terminologie des Sachverhalts	98
5.1.1	Schneelast	98
	5.1.1.2 Schneedichte, Wasserwert und Schneelast	98
5.1.2	Eislast	104
5.2	Historische Entwicklung	108
5.2.1	Entwicklung der Normen in Österreich	109
5.2.2	Entwicklung der Erfahrungen und Maßnahmen	111
5.3	Fallbeispiele	112
5.3.1	Schneelast	112
5.3.2	Eislast	113
5.4	Einschätzung des Sachstands, Unsicherheiten	114
5.4.1	Schneelast	114
5.4.2	Eislast	117
5.5	Mögliche zukünftige Entwicklung	118
5.6	Handlungsoptionen	119
5.6.1	Schneelast	119
5.6.2	Eislast	120
	Literatur	121

6	Stürme	123
6.1	Einführung	124
6.1.1	Definition und Terminologie	124
6.1.2	Stürme als Extremereignisse	125
6.2	Bemessung, Warnungen und Unsicherheiten	127
6.3	Historische Entwicklungen	128
6.4	Mögliche zukünftige Entwicklungen und Herausforderungen	131
6.5	Handlungsempfehlungen	134
	Danksagung	136
	Literatur	136
7	Starkniederschlag und Hagel	141
7.1	Einleitung	142
7.2	Definition	144
7.2.1	Starkregen	144
7.2.2	Hagel	145
7.3	Ursachen und Bedingungen	145
7.3.1	Stabilität der Luftschichtung	145
7.3.2	Vertikale Windscherung	147
7.4	Zeitliche und räumliche Verteilung, historische Fallbeispiele	148
7.4.1	Starkregen	149
7.4.2	Hagel	152
7.5	Vergangene und zukünftige Trends	153
7.5.1	Starkregen	154
7.5.2	Hagel	155
7.6	Diskussion und aktuelle Forschungsfragen	157
7.6.1	Weiterführung und Ausbau von Messsystemen	158
7.6.2	Sammlung von Informationen über die Auswirkung von Unwettern	159
7.6.3	Rekonstruktion historischer Unwetter und Vergleich mit heutigen Ereignissen	160
7.6.4	Fortschritte in numerischer Modellierung	162
7.6.5	Fortschritte im Prozessverständnis	163
7.7	Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen	164
7.7.1	Starkregen	165
7.7.2	Hagel	166
	Danksagung	167
	Literatur	167

8	Auswirkungen von Waldbränden auf die Schutzfunktionalität alpiner Wälder	173
8.1	Charakteristika von Waldbränden in Österreich	174
8.1.1	Definition eines Waldbrandes	174
8.1.2	Definition von Extremereignissen	175
8.1.3	Arten von Waldbränden	176
8.1.4	Historische Entwicklung in Österreich	177
8.1.5	Ursachen von Waldbränden in Österreich	180
8.1.6	Zeitliche Verteilung	182
8.1.7	Regionale Verteilung	184
8.1.8	Waldbrand beeinflussende Faktoren	184
8.1.9	Anomalien und Tendenzen in Österreich	186
8.2	Einschätzung des Sachstandes und der Unsicherheiten	188
8.2.1	Vorbeugung von Waldbränden	188
8.2.2	Dokumentation von Waldbränden	192
8.2.3	Bekämpfung von Waldbränden	193
8.2.4	Wiederherstellung von Waldbrandflächen	194
8.3	Mögliche zukünftige Entwicklungen und Herausforderungen	196
8.4	Perspektiven für Handlungsoptionen	197
8.4.1	Forstliche Vorbeugemaßnahmen	197
8.4.2	Waldbrandwarnsystem	197
8.4.3	Waldbranddokumentation	198
8.4.4	Bewusstseinsbildung	198
8.4.5	Waldbrandforschung	198
8.4.6	Waldbrandbekämpfung	199
	Literatur	199

B Hydrologische Extremereignisse

9	Niederwasser	205
9.1	Einleitung	206
9.2	Niederwasserprozesse und ihre Veränderungen	207
9.3	Berechnung von Niederwasserabflüssen	212
9.3.1	Niederwasserkenngrößen	212
9.3.2	Bestimmung aus Langzeitbeobachtungen	214
9.3.3	Ermittlung aus kurzen Messreihen	214
9.3.4	Ermittlung für Stellen ohne Abflussbeobachtung	215
9.3.5	Rekonstruktion historischer Niederwasserverhältnisse	217
9.3.6	Prognose zukünftiger Niederwässer	218
9.4	Möglichkeiten des Niederwassermanagements	220
	Danksagung	224

Literatur	224
10 Hochwasser	229
10.1 Einleitung	230
10.2 Aktuelle Gefahrensituation und ihre Veränderungen	231
10.3 Berechnung von Hochwasserabflüssen	235
10.4 Möglichkeiten des Hochwasserrisikomanagements	240
10.5 Zusammenfassung	243
Literatur	243
11 Sturzfluten	247
11.1 Definition/Terminologie	249
11.1.1 Abgrenzung	249
11.1.2 Relevanz und Historische Entwicklung	253
11.2 Bemessung, Hochwasserwahrscheinlichkeit und Schutzziele	256
11.2.1 Genereller Überblick	256
11.2.2 Pluviale Sturzfluten/Oberflächenwasser/Hangwasser	257
11.3 Datengrundlagen und Einschätzung von Unsicherheiten	259
11.3.1 Niederschlagsdaten zur Ereignisrekonstruktion	259
11.3.2 Bemessung – Bemessungsniederschläge	260
11.3.3 Einfluss Klimawandel	260
11.3.4 Abflussbildung – Ermittlung von Abflussbeiwerte	263
11.3.5 Methoden zur Abfluss bzw. Überflutungserfassung	265
11.4 Fallbeispiele	268
11.4.1 Pluviale Sturzflut/Hangwasser Schwertberg	268
11.4.2 Kombinierte pluviale/fluviatile Sturzflut Innsbruck-Land 2016	271
11.5 Ausblick, Perspektiven für Handlungsoptionen und resultierende Herausforderungen	272
11.5.1 Erarbeitung von Grundlagen zur Einschätzung der Hangwassergefährdung	273
11.5.2 Maßnahmenplanung	274
11.5.3 Umsetzung von Maßnahmen – rechtliche Rahmenbedingungen und Fördermöglichkeiten	276
11.5.4 Fördermöglichkeiten für Maßnahmen des Hangwassermanagements	277
Literatur	279
12 Fluviatile Feststoffereignisse	287
12.1 Einleitung	289

12.2	Definitionen und Terminologie	290
12.2.1	Prozessbeschreibung	290
12.2.2	Vorkommen und Abgrenzung zu anderen Verlagerungsprozessen in Gewässern	291
12.2.3	Extremereignis – Begriffsdefinition und Beschreibung .	292
12.3	Ausprägung von fluviatilen Feststoffgefahrenprozessen	294
12.3.1	Übersicht	294
12.3.2	Ablagerung infolge Sedimentüberschuss	294
12.3.3	Tiefenerosion infolge Sedimentdefizit	295
12.3.4	Ufer- und Seitenerosion	296
12.4	Ausgewählte Beispiele extremer fluviatiler Feststoffereignisse . .	297
12.4.1	Übersicht	297
12.4.2	Alpiner Wildbach – Schnannerbach (Stanzertal, Tirol) .	297
12.4.3	Alpiner Gebirgsfluss – Urslau (Pinzgau, Salzburg) . . .	300
12.4.4	Alpiner Talfluss – Inn (sowie Zubringer, Tirol)	301
12.5	Umgang mit fluviatilen Feststoffgefahrenprozessen	304
12.5.1	Historischer Abriss des praktischen Schutzwasserbaus .	304
12.5.2	Aktueller Stand	305
12.6	Abschätzbarkeit fluviatiler Feststoffgefahrenprozesse	306
12.6.1	Berechnung fluviatiler Transportprozesse	306
12.6.2	Abschätzung von Ereignisintensität und Gefahrenpotential	308
12.7	Herausforderungen im Umgang mit extremen fluviatilen Feststoffereignissen	309
12.7.1	Verbesserung der Abschätzbarkeit fluviatiler Feststoffgefahrenprozesse	309
12.7.2	Einfluss von Klimawandel und Landnutzung auf fluviatile Feststoffgefahrenprozesse	310
12.7.3	Meidung verbleibender Gefahrenggebiete	311
12.8	Perspektiven für den Umgang mit fluviatilen Feststoffgefahrenprozessen	313
12.8.1	Operative Planungsebene	313
12.8.2	Strategische Planungsebene	315
	Literatur	316
13	Über das Erwartete hinaus – der Umgang mit Überlastfällen	323
13.1	Einleitung	325
13.2	Terminologie	328
13.3	Die Rolle von Schutzzielen und den verbleibenden Risiken im Umgang mit Überlastfällen	331

13.4 Ansätze zum Umgang mit Überlastfällen im Alpenraum und in Österreich	334
13.5 Herausforderungen und Handlungsoptionen	336
13.6 Schlussbetrachtungen	339
Literatur	340
14 Bodenerosion	343
14.1 Terminologie des Sachverhaltes	344
14.1.1 Abgrenzung zu Naturgefahren	346
14.1.2 Der Begriff »Extremereignis« im Kontext der Bodenerosion	347
14.2 Einflussfaktoren des Erosionsgeschehens	348
14.2.1 Klima	348
14.2.2 Geomorphologische Randbedingungen	349
14.2.3 Boden	350
14.2.4 Nutzung und Management	350
14.2.5 Räumliche Differenzierung	351
14.3 Typische und extreme Bodenerosion unter verschiedenen Landnutzungs- und Umweltbedingungen	352
14.3.1 Bodenerosion forstlich genutzter Gebiete	352
14.3.2 Ackerbau im Alpenvorland	352
14.3.3 Grünland- und Almwirtschaft im alpinen Raum	353
14.4 Fallbeispiel	354
14.5 Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen	355
14.5.1 Prozessanforderungen und Modellvorhersagen	355
14.5.2 Neue Ansätze zur Gewinnung prozessrelevanter Daten	356
14.5.3 Das Problem der on-site und off-site Schäden	357
14.5.4 Erosion unter der Perspektive des Klimawandels	358
14.6 Perspektiven für Handlungsoptionen	358
Danksagung	359
Literatur	359

C Gravitative Extremereignisse

15 Gravitative Massenbewegungen – Terminologie und Charakteristika	367
15.1 Hintergrund	368
15.2 Typen gravitativer Massenbewegungen	369
15.3 Aktivitätsstatus gravitativer Massenbewegungen	375
15.4 Beeinflussende Faktoren	378
15.5 Bedeutung für Extreme	380
Literatur	381

16 Felsgleitung, Felslawine und Erd-/Schuttstrom	383
16.1 Einführung	385
16.1.1 Definitionen, Klassifikation und Nomenklatur	385
16.1.2 Was sind Extremereignisse im Kontext von Felsgleitungen, Felslawinen und Erd-/Schuttströmen?	386
16.2 Zeitliche Entwicklung von Großmassenbewegungen	387
16.2.1 Darstellung von Ereignissen im Spätglazial und Holozän	387
16.2.2 Implikationen für rezente und künftige Ereignisse	391
16.3 Einschätzung des Sachstandes anhand von Fallbeispielen	393
16.3.1 Langsame tiefgründige Felsgleitungen	393
16.3.2 Schnelle tiefgründige Felsgleitungen und Felslawinen	398
16.3.3 Erd- und Schuttströme	401
16.4 Mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen	406
16.4.1 Schwer prognostizierbare Prozesse und Prozessänderungen auf Grund von Veränderungen des natürlichen Systems	406
16.4.2 Mögliche Veränderung von Frequenz und Magnitude durch fortschreitende Umweltveränderungen im Hochgebirge	409
16.5 Handlungsoptionen	410
16.5.1 Verbesserung des Prozessverständnisses	410
16.5.2 Anwendung eines umfassenden und innovativen Methodenspektrums	411
16.5.3 Monitoring- und Frühwarnsysteme	413
16.5.4 Raumplanung und bauliche Maßnahmen	414
Literatur	415
17 Steinschlag und Felssturz	425
17.1 Einleitung	427
17.1.1 Definition Steinschlag	427
17.1.2 Definition Felssturz	428
17.2 Vom Prozess Steinschlag ausgehende Gefahr und ausgehendes Risiko und deren Beurteilung in Österreich und international (z. B. in der Schweiz)	430
17.2.1 Österreich	430
17.2.2 Schweiz	435
17.3 Was ist ein Extremereignis?	437
17.3.1 Allgemein	437
17.3.2 In Bezug auf Steinschlag	437

17.3.3	In Bezug auf Felssturz	438
17.4	Entwicklung von Extremereignissen im alpinen Raum	438
17.4.1	Aufzeichnungen	438
17.4.2	Schutzmaßnahmen	439
17.5	Fallbeispiele	440
17.5.1	Einzelereignisse/Steinschlag	440
17.5.2	Felsstürze	442
17.6	Einschätzung des Sachstandes und der Unsicherheiten	445
17.6.1	Stand der Technik	445
17.6.2	Unsicherheiten	451
17.6.3	Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen	454
17.7	Perspektiven für Handlungsoptionen	455
	Literatur	456
18	Extreme bei Hangrutschungen und Hangmuren	461
18.1	Einleitung und Prozessgrundlagen	462
18.2	Historischer Kontext und deren Dokumentation	467
18.3	Österreichische Fallbeispiele	469
18.3.1	Regionale Extremereignisse	469
18.3.2	Lokale Einzelextremereignisse	472
18.4	Einschätzung des Sachstandes und Unsicherheiten	475
18.4.1	Prozessdatenerhebung und -management	475
18.4.2	Prozessdatenanalyse und Erstellung von gefahrenpräventiven Planungsgrundlagen	477
18.5	Mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen	480
18.6	Perspektiven für Handlungsoptionen	482
	Literatur	483
19	Muren	489
19.1	Definition und Charakteristika	490
19.1.1	ONR 24800	491
19.1.2	Extremereignisse im Zusammenhang mit Muren	492
19.2	Historische Entwicklung	492
19.3	Fallbeispiele	494
19.3.1	Schallerbach (See in Tirol)	495
19.3.2	Lorenzerbach (St. Lorenzen im Paltental)	495
19.3.3	Tronitzerbach (Afritz am See)	496
19.3.4	Sattelkar, Obersulzbachtal (Neukirchen am Grossvenediger)	497

19.4	Einschätzung des Sachstandes	498
19.4.1	Auftreten von Muren	498
19.4.2	Gefahrenanalyse Muren	501
19.5	Mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen	503
19.5.1	Entwicklungen Naturraum	503
19.5.2	Entwicklungen Lebensraum	504
19.6	Perspektiven für Handlungsoptionen	504
19.6.1	Analyse	504
19.6.2	Schutzmaßnahmen	505
	Danksagung	506
	Literatur	506
20	Lawinen	511
20.1	Definition/Terminologie des Sachverhaltes	513
20.2	Historische Entwicklung	514
20.2.1	Lawinenergebnisse in den Alpen	514
20.2.2	Gefahrenzonenplanung in Österreich	515
20.2.3	Entwicklung der Lawinenwarnung	517
20.3	Fallbeispiele, fokussierend auf den österreichischen Alpenraum.	518
20.3.1	Der Lawinenwinter 1998/99	518
20.3.2	Steiermark, Februar 2005 – über 300 Katastrophenlawinen	519
20.3.3	Winter 2008/09 in der Steiermark	520
20.3.4	Kärnten 2014	521
20.3.5	Eine der lawinenreichsten Perioden seit Jahrzehnten: 09.03. bis 10.03.2017	521
20.3.6	Katastrophensituation vom 22.01. bis 24.01.2018	522
20.4	Einschätzung des Sachstandes und Unsicherheiten	523
20.4.1	Beurteilung der Lawinengefahr	524
20.4.2	Modelle in der Bewertung der Lawinengefahr	525
20.4.3	Schneemodellierung	526
20.5	Mögliche zukünftige Entwicklungen und daraus resultierende Herausforderungen	527
20.5.1	Problematik der Nassschneelawinen im Zuge des Klimawandels	527
20.5.2	Prognosemodelle	528
20.5.3	Sensor-Technik	528
20.5.4	Kommunikation	528
20.6	Perspektiven für Handlungsoptionen	529
	Literatur	531

D Glaziale und periglaziale Extremereignisse

21 Permafrostgefahren	537
21.1 Einführung	539
21.1.1 Permafrost und Extremereignisse	542
21.1.2 Permafrostforschung in Österreich	543
21.2 Permafrostverbreitung in Österreich	544
21.3 Permafrost und Naturgefahren	546
21.3.1 Entstehung von Fels- und Bergstürzen im Permafrostbereich	546
21.3.2 Entstehung von Murgängen im Permafrostbereich	549
21.4 Permafrost und Klimawandel – mögliche zukünftige Entwicklungen	551
21.5 Einschätzung des Sachstandes und Unsicherheiten	553
21.6 Handlungsoptionen und Risikomanagement in Permafrostgebieten	555
Literatur	557
22 Gletschergefahren	563
22.1 Einleitung	564
22.2 Definition/Terminologie Gletschergefahren	566
22.2.1 Gletscher und glaziale Prozesse	566
22.2.2 Gletscherbedingte Naturgefahren und ihre Modellierung	568
22.2.3 Stand und Zustand österreichischer Gletscher	571
22.2.4 Begriffsdefinitionen Extremereignisse im System Gletscher	572
22.3 Fallbeispiele in den österreichischen Alpen	573
22.3.1 Seeausbrüche	573
22.3.2 Eisstürze, Felsstürze und andere Instabilitäten	575
22.3.3 Glazial-bedingte Hochwässer	575
22.4 Unsicherheiten und Herausforderungen für die Zukunft	576
Danksagung	578
Literatur	578

E Weitere Extremereignisse

23 Erdbeben	587
23.1 Einleitung	588
23.2 Historische Entwicklung der Erdbebenerfassung	591
23.2.1 Historische Erdbebenforschung	591
23.2.2 Messtechnik	592

23.2.3	Baunorm	592
23.3	Fallbeispiele	593
23.3.1	Kärnten – 04.05.1201	593
23.3.2	Kindberg?/Steiermark – 08.05.1267	594
23.3.3	Ried am Riederberg/Niederösterreich – 15.09.1590	594
23.3.4	Hall in Tirol – 17.07.1670	594
23.3.5	Innsbruck bis Hall in Tirol – 22.12.1689	595
23.3.6	Nassereith/Tirol – 28.11.1886	595
23.3.7	Schwadorf/Niederösterreich – 08.10.1927	595
23.3.8	Namlos/Tirol – 07.10.1930	596
23.3.9	Seebenstein/Niederösterreich – 16.04.1972	596
23.4.	Sachstand	596
23.5	Zukünftige Entwicklungen und Herausforderungen	600
23.6	Perspektiven von Handlungsoptionen	602
	Danksagung	603
	Literatur	603
24	Multi-Hazards und Kaskadeneffekte	605
24.1	Einleitung	606
24.2	Historischer Abriss über empirische Untersuchungen von Multi-Hazards und Kaskadeneffekten im Alpenraum – von Einzelbeobachtungen hin zu räumlichen Modellierungen	610
24.3	Fallbeispiel aus dem österreichischen Alpenraum – Extremereignis im Schwarzenzeeseebachtal	613
24.4	Einschätzung des Sachstandes und der Unsicherheiten, mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen	616
	Danksagung	618
	Literatur	618
 Teil III: Weitere gesellschaftsrelevante Aspekte		
25	Schutzwald und Extremereignisse	623
25.1	Einleitung	624
25.2	Der Schutzwald – Schutz durch Wald	626
25.2.1	Extreme Waldentwicklung – ein historischer Abriss	626
25.2.2	Fazit: Herausforderungen für das Schutzwaldmanagement	631

25.3	Forstschutz im Schutzwald – Klimawandel, Extremereignisse und »extreme Schädigungen«	631
25.3.1	Großflächige Borkenkäfermassenvermehrungen im Bergwald	632
25.3.2	Schädigung von Bodenschutzwäldern in den Tieflagen	633
25.3.3	Bedrohung von Schutzwaldbaumarten durch invasive Schadorganismen	633
25.3.4	Wildverbiss an der Naturverjüngung	634
25.4	Schutzwald und Naturgefahren	635
25.4.1	Schutzwald und Hochwasser	635
25.4.2	Schutzwald und Rutschungen	637
25.4.3	Schutzwald und Steinschlag	641
25.4.4	Schutzwald und Wind	643
25.4.5	Schutzwald und Lawinen	646
25.5	Herausforderungen und Handlungsoptionen für die Zukunft	650
25.5.1	Klimawandel und Waldentwicklung: Extrema in der Waldverbreitung und Auswirkung auf den derzeitigen Schutzwald	650
25.5.2	Mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen für das Schutzwald-Management	651
25.5.3	Anpassung von Rahmenbedingungen	653
25.5.4	Verbesserung von Grundlagen und Methoden für ein ökosystembasiertes Risikomanagement	653
25.5.5	Notwendige Optimierung des forstlichen Managements.	654
	Literatur	656
26	Schutz kritischer Infrastrukturen	667
26.1	Schutz kritischer Infrastrukturen als sicherheitspolitisches Konzept	668
26.1.1	Moderne Sicherheitspolitik	668
26.1.2	Resilienz als Konzept der modernen Sicherheitspolitik	669
26.2	Das Österreichische Programm zum Schutz kritischer Infrastrukturen	671
26.3	Risiken für kritische Infrastrukturen im alpinen Raum	673
26.3.1	Risikoanalyse 2017	673
26.3.2	Vulnerabilität kritischer Infrastrukturen im Alpenraum	674
26.4	Handlungsempfehlungen	675
	Literatur	676

27	Vulnerabilität	677
27.1	Einführung	678
27.2	Unterschiedliche Dimensionen von Vulnerabilität	680
27.2.1	Physische Vulnerabilität	682
27.2.2	Institutionelle Vulnerabilität	684
27.2.3	Ökonomische Vulnerabilität	688
27.2.4	Soziale Vulnerabilität	693
27.3	Vorhandene Studien für das österreichische Staatsgebiet	697
27.3.1	Hitze und Dürre	698
27.3.2	Sturm	699
27.3.3	Starkniederschläge und Hagel	699
27.3.4	Sturzfluten	699
27.3.5	Überschwemmungen	700
27.3.6	Bodenerosion	700
27.3.7	Sedimentkatastrophen, Feststoffereignisse	700
27.3.8	Rutschungen und Erdschuttströme	702
27.3.9	Murgänge	702
27.3.10	Felsgleitung und Bergsturz	702
27.3.11	Steinschlag und Felssturz	703
27.3.12	Lawinen (Fließ- und Staublawinen)	703
27.3.13	Permafrostgefahren	703
27.3.14	Gletschergefahren	704
27.3.15	Schutzwald	704
27.3.16	Waldbrand	704
27.3.17	Erdbeben	705
27.3.18	Kaskadeneffekte	705
27.4	Herausforderungen	705
27.5	Empfehlungen	706
27.6	Fazit	708
	Danksagung	708
	Literatur	709
28	Ökonomische Dimensionen alpiner Naturgefahren	717
28.1	Einleitung und Problemstellung	718
28.2	Schadereignisse, Schäden, Schadenregulierung und Schadenprävention	720
28.2.1	Schadereignisse im alpinen Raum und Ansätze zum Management	720
28.2.2	Schäden	721
28.2.3	Schadenprävention	725

28.3 Schadenursachen und Risiko-Steuerung	730
28.3.1 Bevölkerungsentwicklung	730
28.3.2 Gebäudebestand	732
28.4 Schlussfolgerungen und Ausblick	734
Danksagung	735
Literatur	735
29 Management im Katastrophenschutz	743
29.1 Begriffsklärungen im Kontext: »Katastrophe« versus »Extremereignis«	745
29.1.1 Definition von Extremereignissen	746
29.1.2 Definition von Katastrophen	747
29.2 Katastrophenbewältigung: historische Entwicklung	750
29.3 Fallbeispiele »extremer« Katastrophen	752
29.4 Management »extremer« Katastrophen	753
29.4.1 Vorsorge für Extremereignisse	754
29.4.2 Bewältigung »extremer« Katastrophen	755
29.5 Mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen	761
29.6 Perspektiven für Handlungsoptionen	762
Literatur	763
Anschriften der Herausgeber*innen	767
Anschriften der Autor*innen	769

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

Vorwort des Auftraggebers

Naturkatastrophen verursachen jedes Jahr wirtschaftliche Schäden in Millionenhöhe und fordern Todesopfer. Nicht nur durch das gehäufte Auftreten von Katastrophenschäden, sondern auch durch die spektakuläre mediale Darstellung und teils alarmistische Berichterstattung ist die öffentliche Wahrnehmung von Hochwasser, Lawinen, Stürmen, Waldbränden oder Bergstürzen in den letzten Jahren stark gestiegen. Entfernte Katastrophen werden zum fast realen Erlebnis im eigenen Wohnzimmer. Dadurch steigt auch der subjektive Eindruck der Bevölkerung, dass Extremereignisse zunehmen.

Doch was ist eigentlich ein »Extrem«? Definitionsgemäß handelt es sich um außerordentliche Ereignisse, die – verglichen mit anderen Ereignissen ihrer Art – stark von Durchschnittswerten abweichen und eine sehr lange, unregelmäßige Wiederkehrsperiode aufweisen. Hinsichtlich der menschlichen Wahrnehmung ist das Extremereignis das größte in überschaubaren Zeiträumen wahrgenommene Ereignis. Es kann sich aber auch um ein extremes Schadensereignis handeln, also eines mit bisher nie dagewesenem Schadensumfang. Andererseits ist nicht jedes extreme Naturereignis gleich schadenswirksam. Auch wenn sich der Begriff »Extremereignis« im öffentlichen Sprachgebrauch etabliert hat, ist damit nicht automatisch eine eindeutige Beschreibung bestimmter Naturereignisse oder Katastrophen verbunden. Der Superlativ der medialen Berichterstattung über Extreme kann daher zuweilen trügerisch sein.

Es gilt als gesichert, dass Extremereignisse weltweit zunehmen; dies gilt insbesondere für exponierte Regionen wie den Alpenraum. Eine Ursache wird in den Folgen des Klimawandels gesehen (hinsichtlich der wetterabhängigen Naturprozesse), eine andere Ursache liegt in der zunehmenden Verletzlichkeit der Gesellschaft und der intensiven Nutzung der Gefahrengebiete. Hingegen sind Prognosen über das Ausmaß der Zunahme der Extreme höchst unsicher, sowohl was das Auftreten als auch die Wirkung betrifft. Art des Naturereignisses, Zeit- und Raumbezug, Charakteristik der Schadenswirkung, Abhängigkeit von sich veränderten Umwelteinflüssen und die Exposition des menschlichen Siedlungsraums sind Faktoren, die das Auftreten von Extremereignissen beeinflus-

sen können und eine große Bandbreite dieser Ereignisse bewirken. Eine differenzierte Betrachtung von Extremereignissen ist bisher vor allem der wissenschaftlichen Auseinandersetzung mit diesen Phänomenen vorbehalten, in der öffentlichen Wahrnehmung dominiert der Stereotyp des »noch nie dagewesenen«.

Wenn es um die Frage der Sicherheit vor Naturgefahren geht, liegen Extremereignisse üblicherweise über den definierten Grenzen des Schutzes, sind also dem sogenannten »Restrisiko« zuzurechnen. Die Auswirkungen dieser Ereignisse treten so selten auf, dass sie »in Kauf genommen werden« können oder müssen. Die Maßnahmen beschränken sich meist auf Information und Sicherheitshinweise für die Bevölkerung sowie Instrumente des Zivilschutzes. Wenn sich Extremereignisse jedoch nun zu »häufen« beginnen, entstehen unweigerlich Unsicherheiten und öffentliche Diskussionen über die Zuverlässigkeit von Sicherheitsgrenzen und das Ausmaß des Schutzes. Gesicherte Prognosen über die zukünftige Veränderung der Häufigkeit und der Intensität von extremen Ereignissen wären daher für eine nachhaltige Sicherheitsplanung essentiell.

Die große Bandbreite des Auftretens und der Wirkung von Extremereignissen generiert unweigerlich eine besondere Komplexität dieser Fragestellung. Das größte Problem der wissenschaftlichen Erforschung von Extremen liegt jedoch quasi im Begriff selbst: Extreme treten sehr selten auf und lassen sich daher nur selten beobachten oder gar messen, statistische Prognosen sind in der Regel kaum abgesichert. Trotzdem benötigen Entscheidungsträger und Sicherheitsverantwortliche valide Aussagen über die möglichen Extremereignisse, um überhaupt eine Chance auf wirkungsvolle Vorsorge oder zeitgerechte Reaktion zu haben. Auch wenn die Prognoseunsicherheit sehr hoch bleibt, so steigt doch mit dem der Menge des Wissens über Extreme auch die Handlungsmöglichkeit.

Die primäre Zielsetzung des Projektes »Extrema 2019« war es, den aktuellen Wissensstand über Extremereignisse in Österreich durch Naturgefahren zusammenzutragen. Da es letztendlich im Schutz vor Naturgefahren um Entscheidungsgrundlagen geht, war die Sammlung und Verdichtung des Wissens der führenden Expertinnen und Experten sowie der Vergleich der Extreme unterschiedlicher Naturgefahrenprozesse im Fokus der Arbeit. Auch wenn das Ziel, konkrete Aussagen über die Veränderung von Sicherheitsniveaus für jede Naturgefahr zu erhalten, in vielen Fällen auf gesicherter wissenschaftlicher Basis nicht erreichbar schien, so ist eine Bilanz des »Standes des Wissens« doch von erheblichem Wert. In diesem Band haben Expertinnen und Experten aus Österreich, Deutschland und der Schweiz ihr Wissen über Extreme folgender Naturprozesse zusammen getragen: Temperatur, Schnee- und Eislasten, Sturm, Starkniederschläge und Hagel, Waldbrand, Niederwasser, Hochwasser, Sturzfluten, fluviale Feststoffkatastrophen, Bodenerosion, Felsgleitungen, Felsstürze

und Steinschlag, Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren, Muren, Lawinen, Permafrostgefahren, Gletschergefahren, Erdbeben sowie Multi-Hazard und Kaskadeneffekte dieser Prozesse. Ebenso wurden technische, naturräumliche und gesellschaftliche Aspekte im Kontext der Extremereignisse behandelt: Schutzwald, kritische Infrastrukturen, Vulnerabilität, ökonomische Dimension, Katastrophenmanagement und Überlastfälle. Aus den zahlreichen Beiträgen von rund 80 Autorinnen und Autoren ist eine bisher in Österreich nicht verfügbare Wissenssammlung entstanden. Der darin abgebildete Wissensstand ist zwar noch lange nicht erschöpfend, trägt jedoch zukünftig zu einer faktenbasierten Diskussion über dieses zentrale Sicherheitsthema bei. Außerdem bildet der Bericht eine umfassende Grundlage für vertiefte Forschungsarbeiten über Extremereignisse, deren Ursachen und Veränderungen. Es besteht die Hoffnung, dass dieses Wissen sowohl dem politischen als auch medialen Diskurs eine neue Qualität verleiht. Ebenso kann die Gruppe der beteiligten Expertinnen und Experten eine Initialzündung zur vernetzten Forschung über Extremereignisse geben. Aus Sicht des Initiators dieses Statusberichts über den »Stand des Wissens«, des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (ehemaliges Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus), sind diese Intentionen erreicht worden. Ebenso besteht kein Zweifel, dass das Werk einen langfristigen wissenschaftlichen Prozess der Auseinandersetzung mit Extremereignisse anstoßen wird, um diese Ereignisse zukünftig noch besser prognostizieren und präventive Maßnahmen treffen zu können.

Florian Rudolf-Miklau

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

Vorwort der Herausgeber*innen

Extremereignisse alpiner Naturgefahren können einen großen Einfluss auf unsere Umwelt und unser Leben ausüben, weswegen ein besseres Verständnis ihrer in der heutigen Zeit zunehmend an Bedeutung gewinnt. Extreme Ereignisse sind einer gewissen Komplexität unterworfen, da nicht nur *klimatische* Änderungen Einfluss auf die tatsächlichen Auswirkungen von Extremereignissen haben, sondern auch *sozioökonomische* Entwicklungsprozesse wie etwa der Wandel von Siedlungsstrukturen oder der Landnutzung, oder die Wirkung von Schutzbauwerken.

Ziel des Buches ist es, den aktuell verfügbaren Stand des Wissens über das Auftreten von Extremereignissen alpiner Naturgefahren sowie deren Ursachen und Folgen in Österreich anhand ausgewählter Beispiele in Form eines wissenschaftlich fundierten, leicht verständlichen Berichts zusammenzufassen. Dieser soll Entscheidungsträger*innen als wertvolle Informationsquelle dienen und als solche den fachpolitischen Diskurs hinsichtlich des Umgangs mit Naturgefahren im österreichischen Alpenraum unterstützen. Es sollen aber auch Forschungsdefizite in den ganz unterschiedlichen Bereichen aufgezeigt werden. Des Weiteren versteht sich das Buch, das ein Ergebnis des ExtremA-Projektes ist, als ein Anstoß zur Intensivierung des bereits vorhandenen Netzwerkes, sieht sich aber auch geeignet neue Kollaborationen von ausgewiesenen Expertinnen und Experten zu Themen alpiner Naturgefahren in Österreich zu initiieren.

Die Wahl des Titels »ExtremA 2019« fiel einfach. »Extrem« steht offensichtlich für Extremereignisse, »A« sowohl für Alpen als auch Österreich und »2019« betont die Aufgabe des Berichts, den *aktuellen* Wissenstand zu Extremereignissen alpiner Naturgefahren in Österreich zusammenzufassen. Die Gliederung des Berichts ergibt sich aus der Auswahl an Naturgefahren sowie gesellschaftsrelevanten Aspekten, welche thematisiert werden sollten. Der vorliegende Sammelband gliedert sich demnach in unterschiedliche – meteorologische, hydrologische, gravitative, glaziale und periglaziale und einige weitere – Extremereignisse, und in gesellschaftsrelevante Aspekte. Alle Kapitel beinhalten aus Gründen der Übersichtlichkeit einleitend eine Zusammenfassung sowie

Kernaussagen in jeweils deutscher und englischer Sprache. Des Weiteren werden in den einzelnen Kapiteln die historische Entwicklung der Forschung, der Stand des derzeitigen Wissens, Perspektiven für Handlungsoptionen, mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen beleuchtet. Eingebettete Fachliteratur und Fallbeispiele, die sich auf den österreichischen Alpenraum fokussieren, veranschaulichen den jeweiligen Sachverhalt.

Die Herausgeberin und Herausgeber erarbeiteten gemeinsam mit dem Auftraggeber einen ersten Entwurf für die inhaltliche Struktur des Berichts und trafen eine erste Auswahl an Expertinnen und Experten für die Erstautor*innenschaft der einzelnen Kapitel. Besonders Augenmerk wurde auf die Diversität der beitragenden Institutionen und Autor*innen gelegt, um möglichst alle Zugänge und Blickpunkte, aber auch Verantwortlichkeiten zum Thema Extremereignisse alpiner Naturgefahren abzudecken. So konnten schlussendlich Expert*innen aus Bundesministerien, Forschungseinrichtungen und Universitäten für die Erstautor*innenschaft gewonnen werden. Großteils stammen diese von österreichischen Institutionen, aber auch in Österreich arbeitende Expertinnen und Experten aus dem Ausland wurde eingeladen beizutragen. Die Zusammenstellung und Auswahl von Co-Autor*innen wurden in diesem Sinne den Erstautor*innen überlassen, wobei die Herausgeber*innen bei Bedarf geeignete Co-Autor*innen vorschlugen.

Die Erarbeitung des Buches war in *sechs Phasen* gegliedert. Die *erste Phase* umfasste die Erstellung einer stichworthaften Kurzbeschreibung des geplanten Inhalts, welche den Autor*innen bei der Themenfindung sowie den Herausgeber*innen bei der inhaltlichen Abgleichung des Gesamtberichts helfen sollte. Hinweise und Empfehlungen der Herausgeber*innen konnten so gegebenenfalls bereits früh in der Erarbeitung des Beitrags berücksichtigt werden. Meilenstein der *zweiten Phase* bildete der eintägige ExtremA-Workshop der Erstautor*innen am 19. April 2017 in Wien. Im Rahmen des Workshops stellten die Erstautor*innen oder gegebenenfalls deren Vertretung geplante Struktur, Inhalte und, falls bereits vorliegend, Fallbeispiele in einer kurzen Präsentation den anwesenden Autor*innen vor. Weiters wurde die Zielsetzung des Gesamtberichts durch Auftraggeber und Herausgeber*innen nochmals zusammengefasst, die zentrale Frage »Was ist ein Extremereignis?« diskutiert sowie in ausgiebigen Austauschrunden Herausforderungen, Anregungen und noch fehlende Aspekte und Thematiken besprochen. Als Folge der konstruktiven Diskussionen wurde die Struktur des Gesamtberichts leicht überarbeitet sowie weitere zu behandelnde Themen und Autor*innen aufgenommen. Aufbauend auf die Inhalte und Diskussionen des Workshops folgte in der *dritten Phase* die Ausarbeitung der ersten Vollversion des Beitrags. Jedes einzelne Manuskript wurde anschließend in der *vierten Phase* von zwei Reviewer*innen anonym begutachtet. Die versammelten Erstautor*innen hatten sich beim Workshop – wo möglich – für eine

Kombination aus Projekt-internen und Projekt-externen Reviewer*innen entschieden. Die Auswahl und Koordinierung der Gutachter*innen erfolgte durch die Herausgeber*innen, wobei alle Erstautor*innen aufgefordert waren, den Herausgeber*innen jeweils fünf geeignete Expert*innen vorzuschlagen. Rückmeldungen der Gutachter*innen flossen in der *fünften Phase* in die finale Überarbeitung und Formatierung der Beiträge ein. Die Beiträge des Sammelbands repräsentieren daher ausschließlich die Meinung und Arbeit der jeweiligen Autor*innen. In der *letzten sechsten Phase* wurde dann die Endbearbeitung durch das Herausgeber-Team vorgenommen. Wo passend wurden von den Herausgeber*innen in einer finalen Abstimmung des Gesamtberichts Querverweise zu anderen Beiträgen eingefügt, gegebenenfalls Textformatierungen abgeglichen, sowie auf eine einheitliche Zitierweise geachtet. Graphiken und Abbildungen wurden kontrolliert, Literaturstellen wurden überprüft und gegebenenfalls angepasst und korrigiert. Final wurde alles für den Verlag in eine einheitliche Vorlage überführt.

An dieser Stelle gilt es einen großen Dank für die hervorragende Arbeit der Expertinnen und Experten auszusprechen. Durch sie konnte das wertvolle *State of the Art*-Wissen über Extremereignisse im Österreichischen Alpenraum zu einem Sammelband vereint werden. Auch sei Ingeborg Auer, Marco Conedera, Kurt Decker, Daniela Engl, Sven Fuchs, Bernhard Gems, Johann Georg Goldammer, Matthias Granig, Wilfried Haerberli, Gerhard Hohenwarter, Holger Starke, Johannes Hübl, Christian Huggel, Siegfried Jachs, Sven Kotlarski, Michael Kugler, Andreas Lang, Susanne Mehlhorn, Clemens Neuhold, Lydia Pedoth, Ronald Pöppl, Burkhard Rüdissler, Florian Rudolf-Miklau, Martin Rutzinger, Thomas Schindler, Elmar Schmaltz, Josef Schneider, Katharina Schröer, Stefan Steger, Markus Stoffel, Peter Strauss, Christian Unterberger, Bodo Wichura und vielen anderen anonymen Revierinnen und Reviewern gedankt, die im Hintergrund tätig waren, sehr wichtige Hinweise geben konnten und auch damit einen sehr wertvollen Beitrag zur Qualität der einzelnen Kapitel geleistet haben. Vor allem möchten wir uns auch bei Hanna Schechtner für die tatkräftige administrative Unterstützung des Projekts herzlich bedanken.

Abschließend möchten wir allen Leserinnen und Lesern viel Spaß bei der Lektüre wünschen. Wir sind sehr zuversichtlich, dass die vielen zusammengefassten Aspekte eine Quelle für zukünftige Inspirationen in den ganz unterschiedlichen Wirkungsbereichen sein werden.

Thomas Glade, Martin Mergili und Katrin Sattler

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

Zusammenfassung/Abstract

Es ist schwer, extreme Naturgefahren zu definieren. Noch schwerer ist es, diese vorherzusagen, zu bewältigen und deren entsprechende sozioökonomische Konsequenzen abzuschätzen. Extreme Ereignisse weichen stark von Durchschnittswerten – verglichen mit anderen Ereignissen derselben Art – ab und sind durch unregelmäßige und lange Wiederkehrperioden gekennzeichnet. Sie unterliegen komplexen Prozesswechselwirkungen und meist mangelt es an Bewusstsein, Erfahrungsschatz und Daten. Ursachen für Extremereignisse werden in den Folgen des Klimawandels, als auch in der zunehmenden Exposition der Gesellschaft und der intensiven Nutzung von Gefahrengebieten gesehen. Zu einer großen gesellschaftlichen Herausforderung werden Naturgefahren dann, wenn sie sich zu Katastrophen entwickeln und eine potentiell große Anzahl an Menschen, Wirtschafts- und Besitzgütern und/oder kritische Infrastruktur betreffen – dies gilt insbesondere für exponierte Regionen wie den Alpenraum. Tatsächlich werden Extremereignisse oft auch über die gesellschaftlichen Auswirkungen definiert.

Die fundierte Dokumentation von aufgetretenen Extremereignissen stellt eine besonders wichtige Grundlage für das Management der Risiken möglicher extremer Ereignisse in der Zukunft dar. Das ExtremA 2019 Projekt hat sich zum Ziel gesetzt eine dementsprechende Dokumentation für den Österreichischen Alpenraum bereitzustellen. Es wurde durch das Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus (ehemaliges Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus), in Kooperation mit der Arbeitsgruppe ENGAGE – Geomorphologische Systeme und Risikoforschung des Instituts für Geographie und Regionalforschung der Universität Wien ins Leben gerufen. Der Bearbeitungsschwerpunkt liegt auf Extremereignissen klassischer alpiner Naturgefahren, wobei jedoch auch weiter verbreitete Phänomene wie Bodenerosion behandelt werden, die bisher im »Extremereignis«-Kontext nur wenig Beachtung fanden. Überdies werden sozio-ökonomische Herausforderungen im Zusammenhang mit extremen Ereignissen und mögliche Strategien des Risikomanagements betrachtet. Führende nationale und internationale in Österreich

forschende Expert*innen dokumentierten den *State of the Art* in Bezug auf ihre Fachgebiete. Die begutachteten Einzelberichte ergeben in Summe eine solide, verständliche und leicht zugängliche Fachinformation, die als wertvolles Werkzeug für Entscheidungsträger*innen dienen soll.

Extreme events of natural hazards are difficult to define, but even harder to predict and to manage. Similarly, it is challenging to evaluate their potential respective consequences for society. Extreme events differ substantially from average events of the same type, and are characterized by irregular and long return periods. They often consist in complex process interactions and lack of awareness, experience and data. The causes of extreme events are seen in the consequences of climate change, as well as in the increasing exposure of society and the intensive use of hazard-prone areas. Natural hazards become a sincere societal challenge when they evolve into natural disasters and affect a potentially large number of people, economic and property assets as well as critical infrastructure – especially in exposed regions such as the Alpine region. Indeed, extreme events are often defined through their impact on society.

A solid documentation of past extreme events is an important basis for managing the risks of possible extreme events in the future. The overall goal of the ExtremA 2019 project is the corresponding documentation for the Austrian Alps. It was launched by the Austrian Federal Ministry of Agriculture, Regions and Tourism (former: Austrian Federal Ministry of Sustainability and Tourism) in cooperation with the working group ENGAGE – Geomorphological Systems and Risk Research of the Vienna University's Department of Geography and Regional Research. The project focuses on extreme events of common alpine natural hazards, but also more widespread phenomena such as soil erosion are addressed, which are currently not in the focus within an »extreme-event« context. In addition, socio-economic challenges related to extreme events and possible risk management strategies are considered. Leading national and international experts with an Austria-related research record compiled information for event documentation and *state of the art* reports on their specific fields of expertise. The reviewed individual reports provide in total a robust, clear and easily accessible information, which is a valuable tool for decision makers tasked with the design of appropriate risk management practices in a constantly changing world.

Die Situation

Alpine Naturgefahren waren in Österreich schon immer präsent. Frühere Gesellschaften stellten sich darauf ein, gingen ihnen aus dem Weg oder begannen einfache, damals mögliche Schutzmaßnahmen anzuwenden. Mit der technologischen Entwicklung und einem besseren Prozessverständnis begann man vor über 150 Jahren technisch weiter ausgereifte Maßnahmen zu entwickeln, um das Auftreten der Ereignisse zu verhindern und vermeiden bzw. behindern. Wo dies nicht möglich war wurde versucht, entweder die Prozesse in ihrem Bewegungsablauf zu steuern und weg vom Wirkungsraum des Menschen zu lenken, oder aber technische Schutzmaßnahmen für gefährdete Objekte zu entwickeln, sei es dass der Prozess an sich eingedämmt (z. B. Retentionsbecken für Muren oder Hochwasser) oder dass die bestehende Baustruktur ertüchtigt wurde.

In den letzten Jahren konnten jedoch **Veränderungen im Prozessgeschehen** festgestellt werden. Es hat den Anschein,

- dass die Prozesse häufiger auftreten,
- dass sie an Stellen auftreten, die vorher nicht betroffen waren,
- dass sie mit größerer Stärke auftreten, dass bisherige Prozesse sich massiv verändern (z. B. Sturzfluten, pluviale Hochwasser) und in bisher verschonten Gebieten auftreten,
- dass aber auch die Konsequenzen für die Gesellschaft gravierender werden.

Diese Konsequenzen beinhalten direkte Einflüsse (z. B. zerstörte oder verschüttete Häuser) genauso wie indirekte Auswirkungen (z. B. unterbrochene Infrastruktur und damit einhergehender kurzfristiger Zusammenbruch des

* Martin Mergili, Universität Wien, Institut für Geographie und Regionalforschung, martin.mergili@univie.ac.at.

Thomas Glade, Universität Wien, Institut für Geographie und Regionalforschung, thomas.glade@univie.ac.at.

Transportwesens). Zusätzlich nehmen die ökonomischen Schäden in den letzten Jahrzehnten tendenziell zu. Bisher sind die maßgeblichen Ursachen dafür nicht identifizierbar; Landnutzungsänderungen und Änderungen in der natürlichen Umwelt finden zeitgleich statt, der Klimawandel und die ihm zugeschriebenen Auswirkungen sind omnipräsent.

Von besonderer Bedeutung ist bei den beobachtbaren Veränderungen das Auftreten von **Extremereignissen**, vor allem im alpinen Raum. Es ist aber auch festzustellen, dass der detaillierte Kenntnisstand zu Extremereignissen in Österreich sehr unterschiedlich ist. Aufgrund dieser Situation ist es angebracht zu reflektieren, welcher **Stand des Wissens** zu Extremereignissen vorliegt, sei es in Bezug auf unterschiedliche Prozessbereiche der Naturgefahren, oder in Bezug auf die potentiellen Auswirkungen und die entsprechenden Handlungsoptionen im Kontext eines integralen Risikomanagements. Da ein »Extremereignis« ganz unterschiedlich verstanden werden kann, ist es im ersten Schritt wichtig diesen Begriff zu definieren.

Terminologie Extremereignisse

Obwohl der Begriff »Extremereignis« klar und einfach scheint, so bedarf er doch einer genaueren Erläuterung. Zwei beispielhafte Definitionen, die unterschiedliche Betrachtungsweisen widerspiegeln, sind folgende:

- A. Ereignisse, die aufgrund ihrer physikalischen Eigenschaften »außergewöhnlich« sind, d. h. von bisherigen Erfahrungen, bzw. statistisch von einem Mittelwert abweichen. Derartige Eigenschaften können in Masse, Volumen, Geschwindigkeit, Temperatur, Niederschlag, freigesetzter Energie, etc. ausgedrückt werden. Folgt man dieser Definition, besteht kein zwingender Zusammenhang zwischen Extremereignissen und Katastrophen, da bei letzterem Begriff die gesellschaftlichen Auswirkungen im Mittelpunkt stehen. Ein Zusammenhang ist zwar häufig, aber nicht zwingend gegeben.
- B. Ereignisse, die »außergewöhnliche« Auswirkungen auf die Gesellschaft haben, sei es in Form von Verletzten, Todesopfern, Gebäudeschäden, Beeinträchtigung von (kritischer) Infrastruktur oder des Verkehrs, landwirtschaftlichen Flächen/Produkten oder des Waldes, oder andere direkte oder indirekte gesellschaftliche bzw. wirtschaftliche Konsequenzen nach sich ziehen. Diese Konsequenzen sind so groß, dass man von einer »Katastrophe« spricht.

In beiden Beispielen ist hierbei der Begriff der »Katastrophe« definiert als eine Situation, in der eine Gesellschaft nicht mehr allein mit den Folgen eines Ereignisses fertig werden kann und externe Hilfe benötigt. Die Möglichkeit der

Selbsthilfe der betroffenen Akteure ist folglich überschritten und Unterstützung von auswärts ist notwendig um die unmittelbare Reaktion, und später auch den Wiederaufbau zu gewährleisten.

Ein wichtiges Konzept stellen in dieser Hinsicht die **Überlastfälle** und das damit verbundene **Restrisiko** dar. Im Wesentlichen wird hierbei auf solche Ereignisse Bezug genommen, auf die die bestehenden Schutzmaßnahmen nicht ausgelegt sind. In vulnerablen Gesellschaften mit niedrigen Schutzziele und hohem Restrisiko können auch kleinere Naturereignisse Überlastfälle darstellen und in weiterer Folge zu Katastrophen führen, während in dünn besiedelten Gebieten das Auftreten eines viel größeren Ereignisses oft nicht einmal wahrgenommen wird. Deshalb ist es unerlässlich, das Wirkungsgefüge aus Naturprozessen und der sozioökonomischen Dimension von Extremereignissen zu betrachten.

Oft handelt es sich bei Extremereignissen um Ereignisse mit **hoher Magnitude** bzw. **Intensität** und/oder **geringer Eintretenswahrscheinlichkeit**. Extremereignisse, die in direktem Zusammenhang mit messbaren meteorologischen oder hydrologischen Größen wie Temperatur, Niederschlag oder Abfluss stehen, können manchmal relativ direkt durch ein »zu viel« bzw. »zu hoch« oder auch ein »zu wenig« bzw. »zu niedrig«, d. h. eine deutliche Abweichung vom Mittelwert in eine beliebige Richtung, charakterisiert werden. Definierte Magnituden werden mit den entsprechenden Wiederkehrintervallen (**Jährlichkeiten**) verknüpft. Auch für Erdbeben und Muren sind ähnliche Ansätze verbreitet. Das Konzept der **Jährlichkeiten** steht jedoch vor allem bei hydro-meteorologischen Fragestellungen vor großen Herausforderungen, unter anderem da der Klimawandel eine Verschiebung der etablierten Zusammenhänge zur Folge haben kann. Konkret bedeutet das, dass aus der Kenntnis der vergangenen Ereignisse nicht mehr zwingend die zukünftigen Ereignisse abgeleitet werden können, da sich die Rahmenbedingungen fundamental ändern. Die Rahmenbedingungen beziehen sich hier jedoch nicht nur auf Umweltveränderungen wie z. B. den Klimawandel, sondern auch auf gesellschaftliche Entwicklungen (z. B. Urbanisierung, Landnutzungsänderungen). Dadurch können Zusammenhänge, die in der Vergangenheit beobachtet und auch gemessen wurden, nicht mehr direkt in die Zukunft extrapoliert werden. Es besteht also kein gesicherter statistischer Zusammenhang zwischen beobachteten vergangenen Ereignissen und Prognosen über Ereignisse in der Zukunft mehr. Und das hat fundamentale Folgen für die Vorhersagbarkeit von Extremereignissen und die daraus resultierenden möglichen Konsequenzen.

Zusätzlich muss man sich weiteren Herausforderungen stellen. Ganz allgemein ist es sehr schwierig, singular beobachtbare Phänomene im Kontext von Extremereignissen zu betrachten, da hierfür eine Einbettung in Frequenz-Magnituden-Beziehungen hilfreich wäre. Manche Naturgefahren, z. B. verschiede-

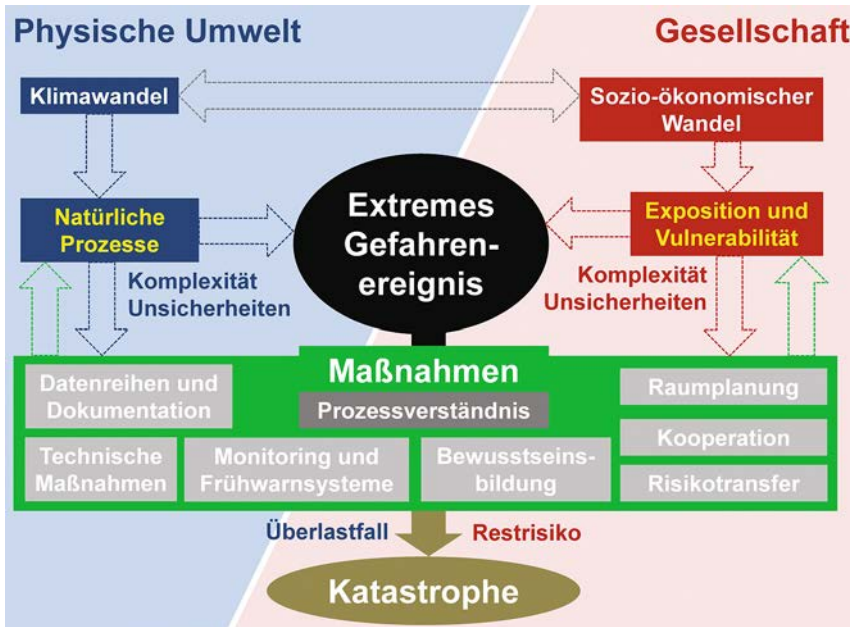


Abbildung 01: Stark vereinfachte Darstellung der wesentlichen Komponenten des konzeptuellen Modells »Extremereignis«.

Figure 01: Strongly generalized diagram of the key components of the conceptual model »extreme event«.

Quelle: M. Mergili

ne Typen gravitativer Massenbewegungen oder auch Gletscherseeausbrüche, entziehen sich aber oft einer solchen Einbettung. Häufig entstehen Extremereignisse – welche Definition nun auch immer verwendet wird – auch erst durch das Zusammenwirken unterschiedlicher Prozesse. Zum Beispiel kann die Umverteilung von Schnee durch Frost-Tauwechsel eine ebenso bedeutende Rolle für extreme Schneelast spielen wie die Menge des gefallenen Schnees.

»Multi-hazard« Situationen, bei denen mehrere Gefahrenprozesse in kontextuellem, zeitlichem und räumlichem Zusammenhang auftreten, stellen aufgrund ihrer Komplexität ganz besondere Herausforderungen an die Identifikation, an die Prozessaufnahme im Gelände, an die Modellierungen und an das reaktive und präventive Risikomanagement. Derartige Prozesskombinationen sind oft nichtlinear, folgen also nicht immer dem gleichen Ablauf sondern verändern sich in Ihrem Auftretensmuster entweder kontinuierlich oder nach Überschreiten einer Grenze, eines Schwellenwertes und sind damit nur sehr schwer zu erfassen. Überdies verändern sich derartige Schwellenwerte mit der Zeit. Beispielsweise könnte die gleiche Menge Niederschlag, die vor 50 Jahren kein Ereignis ausgelöst hätte, heute aufgrund geänderter Rah-

menbedingungen sehr wohl ein Ereignis initiieren. Man spricht hier auch von Kippunkten, an denen ein Umweltsystem plötzlich anders reagiert als zuvor. Diese sind oft entscheidend dafür, inwiefern ein Extremereignis auftritt bzw. entsteht.

In Abbildung 01 sind die verschiedenen Komponenten des konzeptuellen Modells »Extremereignis« in den entsprechenden allgemeinen Kontext der Umwelt und Gesellschaft und deren Wechselwirkungen gesetzt, ohne konkret auf bestimmte Gefahrenprozesse oder gesellschaftliche Systeme einzugehen.

Mögliche zukünftige Entwicklungen

Auf der Prozessseite ist der **Klimawandel** eine der dominanten Einflussgrößen. Schäden durch Wetterereignisse haben in Österreich in den letzten Jahrzehnten stark zugenommen. Dies betrifft direkt meteorologische Extremereignisse wie Hitze- und Kälteperioden, die vergleichsweise gut durch Klimasimulationen abgeschätzt werden können. Hier ist durch den Klimawandel eine Verschiebung zu zunehmenden Hitze-, jedoch abnehmenden Kälteextremen zu erwarten. Waldbrände im Alpenraum könnten durch Dürreereignisse zunehmen – diese müssten als relativ »neues« Risiko eingestuft werden, da hier kaum Erfahrungen mit Großwaldbränden vorhanden sind. Schon beim Niederschlag ist die Wirkung des Klimawandels jedoch wesentlich komplexer. Die prognostizierte Verschiebung der Niederschläge vom Sommer hin zum Winter und Frühjahr legt unterschiedliche Konsequenzen nahe: zunächst ist eine Verlagerung von Trockenheitsproblematiken vom Winter zum Sommer vor auszusehen. Auch die Entstehung von Nassschnee-Lawinen im Gebirge wird durch einen derartigen Trend gefördert. Ebenso könnte das Auftreten von Hochwasser-relevanten Schneeschmelzereignissen in diesem Kontext einem Wandel unterliegen. Bodenerosion könnte sich verstärken, da im Winter und Frühjahr die landwirtschaftlichen Flächen in der Regel nicht durch Vegetation geschützt sind. Auch das erwartete stärkere Auftreten von konvektiven Starkniederschlagsereignissen durch die erhöhte Temperatur könnte zu einer verstärkten Bodenerosion führen. Ebenso ist aus diesem Grund ein verstärktes Auftreten von Sturzfluten und fluvialen Feststoffereignissen bis hin zu Muren zu erwarten. Insgesamt wird sich die Verlagerung von Feststoffen in alpinen Fließgewässern signifikant erhöhen. Ein Anstieg fluvialer Hochwasser lässt sich am ehesten für kleine Einzugsgebiete nachweisen, für die eher konvektive als langanhaltende Ereignisse relevant sind. Fluviale Hochwasser in größeren Einzugsgebieten, die trotz vielfältiger Einflussgrößen in einem relativ klaren positiven Zusammenhang mit extremen Niederschlagsereignissen stehen, haben in den letzten Jahren im Norden Österreichs tendenziell zugenommen, eine Fortschreibung in die Zukunft ge-

staltet sich jedoch aufgrund der hohen natürlichen Schwankungsbreite – größer als die zu erwartenden Änderungen – sehr schwierig.

Der Klimawandel wirkt sich auch auf die **österreichischen Schutzwälder** aus. So führen zwar höhere Temperaturen und längere Vegetationsperioden zu einem verbesserten Baumwachstum, allerdings bedeuten längere Trockenperioden auch zusätzlichen Stress. Dies hat zur Folge, dass der Schutzwald anfälliger gegenüber möglichen Schädlingen wird und es zu einer Verringerung der Resilienz nach Schadereignissen kommt. Der Schutzwald wird in Zukunft sensibler auf Sturm, Schneebruch, Dürre, Waldbrand und Massenvermehrung von Schädlingen reagieren. Da Baumarten unterschiedliche Toleranzen gegenüber Stresssituationen aufweisen, entstehen neue Konkurrenzverhältnissen und die Baumartenzusammensetzung verändert sich. Änderungen und möglicher Verlust von Schutzwald führen zu Sekundärgefahren, wie geringerer Schutzwirkung gegen Steinschlag, Lawinen, Erosionsprozessen sowie Muren oder lokalen Überflutungen.

Gleichzeitig wird aber auch betont, dass der Klimawandel alleine nicht ausreicht um die zu beobachtenden Veränderungen zu erklären. Denn es verändert sich nicht nur das Klima, es verändern sich auch sehr viele andere Umwelt-rahmenbedingungen wie beispielsweise die Böden, die Vegetation, oder die Wasserführung der Flüsse. Und als weitere Herausforderung befinden sich auch unsere **Gesellschaftssysteme im Wandel** (z. B. über Infrastrukturbauten, Ausweitung des Siedlungsraumes) und stehen in intensiver Wechselwirkung mit unserer Umwelt. Dadurch wird es sehr schwierig, die einzelnen Komponenten zu trennen, denn ein heute beobachtetes Ereignis beinhaltet immer mehrere unterschiedliche Komponenten. Aber es ist unzweifelhaft und eindeutig festzustellen, dass der anthropogen verursachte und getriebene Klimawandel eine zentrale Rolle in dem veränderten Prozessgeschehen in unserer Umwelt spielt, auch und gerade für das Auftreten von Extremereignissen.

Das Zusammenwirken von meteorologischen, hydrologischen, glazialen, periglazialen und gravitativen Prozessen sowie dem Waldbrand kann auch das Auftreten von Multi-hazard und Kaskadeneffekten bedingen und verstärken und ist deshalb in einem breiteren Kontext zu betrachten. Hierzu gehört auch die Integration gesellschaftsrelevanter Aspekte, wie beispielsweise der verschiedenen Dimensionen der Vulnerabilität, der Berücksichtigung der ökonomischen Dimensionen und letztendlich auch des Risikomanagements im Katastrophenschutz.

Grundsätzlich ist ein **tiefgreifendes Verständnis aller Komponenten** vonnöten, um auf dieser Basis Einflüsse des Wandels in der Umwelt und in der Gesellschaft, und hierbei besonders des Klimawandels, aber auch des sozio-ökonomischen Wandels, realistisch abschätzen zu können. Dieses Verständnis ist jedoch oft, nicht zuletzt aufgrund der hohen Komplexität vieler Systeme und

der **Schwankungsbreite** der beeinflussenden Faktoren (z. B. meteorologischer Parameter), nur in Ansätzen vorhanden. Solche komplexen Abläufe sind beispielsweise bei Prozessen wie Schnee- und Eislast, Waldbrand, Feststoffereignissen oder den verschiedensten Typen gravitativer Massenbewegungen zu beobachten. Prozessketten durch Gletscherseeausbrüche, aber auch die Destabilisierung von Hängen im Hochgebirge durch Gletscherrückgang (Wegfall des Widerlagers) oder durch Tauen von Permafrost seien ganz besonders genannt, wobei vor allem hinsichtlich des letzteren Prozesses noch erhebliche Unsicherheiten bestehen. Selbst die Auswirkungen möglicher Erdbeben sind hier in einem größeren Zusammenhang zu sehen – man denke an das Auftreten und die Konsequenzen ko- und postseismische ausgelöster gravitativer Massenbewegungen.

Kritische Infrastrukturen, die wichtig für das Funktionieren der Gesellschaft sind, sind in Gebirgsräumen aufgrund der hohen Exponiertheit verwundbarer als außerhalb. Dies kann – insbesondere beim Anstieg von Extremereignissen – zur Erhöhung der Betriebskosten und, falls die Unterhaltung der kritischen Infrastruktur (z. B. von Versorgungs- und Verkehrswegenetzen) nicht mehr tragbar ist, sogar zur Absiedlung führen. Gegenmaßnahmen sind deshalb zur Erhaltung des Lebens- und Wirtschaftsraumes unbedingt nötig. Des Weiteren führen **veränderte Lebensgewohnheiten** der Bevölkerung nicht nur zu erhöhter Exposition gegenüber Naturgefahren, sondern können auch das Auftreten von Prozessen bedingen – als Beispiel sei hier die erhöhte Gefahr von unter Umständen extremen Waldbränden durch die verstärkte Nutzung des Waldes als Freizeitraum genannt.

Herausforderungen und Handlungsoptionen

Aufgrund langer Wiederkehrzeiten oder Singularität von Extremereignissen besteht eine wesentliche Herausforderung in eingeschränktem Bewusstsein sowie oft fehlender oder mangelnder Erfahrung und Daten. Weiterhin ist in vielen Bereichen festzustellen, dass auch die existierenden Modellierungsansätze häufig nicht mehr für Extremereignisse einsetzbar sind, da frühere Erfahrungen mit solchen Extremen fehlen, was die Modellbildung sehr erschwert und wodurch sich die Unsicherheit sehr erhöht. Dem muss mit einer Kombination unterschiedlicher Maßnahmen entgegengewirkt werden (vgl. Abbildung 01). Zunächst ist eine ständige Weiterentwicklung des **Verständnisses der involvierten Prozesse** und Mechanismen essentiell. Dies gilt nicht nur für die Naturprozesse, sondern insbesondere auch für die gesellschaftliche Komponente. Hierzu sind Fakten zu früheren Ereignissen und den Entwicklungen in Raum und Zeit essentiell. Wissenschaftliche Erkenntnisse im Zusammenhang

mit den möglichen Auswirkungen des Anstiegs von Extremereignissen auf die Gesellschaftssysteme (z. B. kritische Infrastrukturen) sind kaum vorhanden, hier besteht noch viel Forschungs- und Kooperationsbedarf. Eine **umfassende Datenverfügbarkeit** in Form von langen und qualitativ hochwertigen Meßreihen und einer sorgfältigen Dokumentation und Inventarisierung von Extremereignissen – und auch weniger extremen Ereignissen oder ereignisrelevanten Objekten – stellt die Basis für die Verbesserung des Prozessverständnisses und für viele Maßnahmen dar. Ein Vorteil in Österreich liegt grundsätzlich in einer vergleichsweise guten Datenlage, wobei hier vor allem durch das Aufkommen sozialer Medien neue Möglichkeiten zur Datenakquisition geschaffen wurden, die noch in vollem Umfang inwertgesetzt werden sollten. Auch Fernerkundungsmethoden wie die Nutzung von Satellitendaten (z. B. Landnutzung) und die Analyse von Daten aus Befliegungen (z. B. Luftbilder) oder terrestrischen Aufnahmen (z. B. LiDAR) sind verstärkt einzusetzen.

Trotzdem sind die **Unsicherheiten** bezüglich einiger Variablen beträchtlich, was z. B. zu Herausforderungen bei der Vorhersage von extremen Sturmereignissen oder Schneelast führt. Für die Erfassung von Hagel oder konvektiven Starkregenereignissen, die häufig sehr kleinräumig auftreten, ist das Messnetz auch zu dünn – hier können z. B. Radarmessungen helfen. Prozesse wie das Tauen von Permafrost, Bodenerosion, oder auch Sedimenttransport durch Muren oder fluviale Prozesse, werden nur vereinzelt gemessen. Kontinuierliche Messreihen über mehrere Dekaden sind zwar essentiell für das Prozessverständnis, jedoch nur spärlich vorhanden. Gleiches gilt beispielsweise auch für die teure und aufwändige Untergrunderkundung im Falle gravitativer Massenbewegungen. Für die Fortsetzung und ständige Verbesserung sowohl von Mess- als auch von Analysetechniken gemäß der internationalen Standards, zusammen mit der grundlegenden wissenschaftlichen Dokumentation und dem Monitoring gerade von Extremereignissen, ist eine adäquate und kontinuierliche öffentliche Finanzierung unabdingbar. Insbesondere ist es wichtig nicht nur die Ereignisse selbst, sondern auch die konkret an Objekten aufgetretenen Schäden zu dokumentieren, um beispielsweise die Vulnerabilitäten dieser Objekte gegenüber der eingetretenen Ereignisse besser abschätzen zu können. Ganz generell besteht bezüglich Vulnerabilität für die meisten Naturgefahrenbereiche ein Datendefizit, das die konkreten Risikoabschätzungen sehr erschwert und in hohen Unsicherheiten resultiert.

In Kombination mit Ereignisdokumentation, Monitoring und Messtechniken sollten für viele Prozesse auch **Modellrechnungen** durchgeführt werden, wobei hier insbesondere die Wahl des geeigneten Ansatzes (physikalisch basiert oder datengesteuert) und der adäquate Umgang mit den oft beträchtlichen Unsicherheiten im Vordergrund stehen sollten. Eine der großen Herausforderungen besteht hierbei darin, bisher noch nicht beobachtete Ereignisse in den Modellen

abzubilden. Als wesentliche Eingangsdaten für die Abschätzung zukünftiger Entwicklungen liefern Klimamodelle dabei relativ zuverlässige Temperaturprognosen, jedoch höchst unsichere Niederschlagsprognosen. Diese Unsicherheiten pflanzen sich in die Modellierung von Klimafolgen fort, und multiplizieren sich mit weiteren Unsicherheiten, ganz besonders dann, wenn nichtlineare Aspekte wie Schwelleneffekte oder Kipppunkte zum Tragen kommen. Trotzdem können – abhängig vom Prozess und bis zu einem gewissen Grade – durch Modelle oder Modellketten (z. B. im Fall von Lawinen oder Kaskadeneffekten) raumzeitliche Muster und mögliche Magnituden von Extremereignissen abgeschätzt und dadurch Entscheidungen hinsichtlich Raumplanung, technischen Maßnahmen, Verboten, Handlungsanreizen wie finanziellen Förderungen, Frühwarnung und Evakuierung trotz großer Unsicherheiten unterstützt werden. Wichtig ist in diesem Kontext jedoch, dass nicht nur der natürliche Prozess, sondern in gleichem Maße die gesellschaftliche Komponenten mit einbezogen werden (u. a. Exponiertheit und Vulnerabilität). Auch diese Komponenten sollten verstärkt in den Modellierungen integriert werden, beispielsweise über Risikoanalysen. Es sollen somit die natürlichen mit den gesellschaftlichen Prozessen gekoppelt werden um sofort neben den Prozessinformationen auch immer die potenziellen Konsequenzen zu kennen. Um dieses Ziel zu erreichen, müssen ständige Verbesserungen und Aktualisierungen der Modelle vorgenommen werden.

Besonders die **Raumplanung** als eine der wichtigen präventiven Maßnahmen wird bei der Betrachtung von Extremereignissen vor große Herausforderungen gestellt. Grundsätzlich ist für viele Prozesse – genannt seien hier beispielhaft die Sturzfluten, aber auch Hangrutschungen, Muren oder Schneelawinen – zunächst die Erstellung von Gefahren- bzw. Risikohinweiskarten zielführend. Solche Karten geben zwar keine Informationen über die Frequenz und Magnitude von Prozessen, sie erlauben aber eine flächenhafte Einschätzung des Gefährdungspotenzials und der entsprechenden gesellschaftlichen Exponiertheit. Auf dieser Basis sollten dann weiterführende Detailstudien in den jeweiligen identifizierten Gebieten durchgeführt werden, die in Gefahren- und im Idealfall auch Risikozonierungen münden und konkrete, rechtsverbindliche Planungsgrundlagen darstellen. In vielen Fällen ist es jedoch schwierig, singuläre Extremereignisse wie z. B. Großmassenbewegungen zu prognostizieren und das gefährdete Gebiet entsprechend vorherzusagen und abzugrenzen. Verschiebungen von Frequenz-Magnituden-Beziehungen zyklischer Prozesse stellen eine zusätzliche Herausforderung dar. Ganz besonders ist in der Raumplanung im Kontext des Klimawandels und des sozio-ökonomischen Wandels, und der daraus resultierenden Notwendigkeit einer häufigeren Anpassung der Gefahrenbeurteilung, die Frage der Rechtssicherheit für zukünftige Planungen und Nutzungen in exponierten Gebieten zu stellen.

Bauliche/technische Maßnahmen und entsprechende **Normen** sind abhängig vom betrachteten Prozess und definieren die nach den gesellschaftlich akzeptierten Parametern bzw. Schwellenwerten (z. B. die Festlegung von Wiederkehrintervallen für Hochwasser oder Muren) notwendigen Maßnahmen. Es ist zu betonen, dass derartige Maßnahmen entsprechend des technischen Fortschritts und der Herausforderungen durch den Klimawandel immer wieder aktualisiert werden müssen, da sich die Rahmenbedingungen kontinuierlich ändern. Damit müssen automatisch auch die Sicherheitsstandards in Baurechtsnormen und bautechnischen Normen angepasst werden, wodurch sich Baukosten in exponierten Gebieten signifikant erhöhen werden. Als Rahmenbedingungen sind hierbei die Umweltsysteme an sich zu sehen – aber auch die Einschätzungen, was gesellschaftlich akzeptabel und tolerierbar, aber auch wirtschaftlich vertretbar ist, ändern sich. Es muss auch reflektiert werden, welche Maßnahmen einen umfassend wirksamen und wirtschaftlich vertretbaren Schutz vor Extremereignissen bieten. Beispielsweise sind im Fall von Waldbrand, aber auch von Lawinen und Steinschlag, forstliche Vorsorgemaßnahmen zielführend. Bodenerosion kann durch entsprechende landwirtschaftliche Techniken vermindert oder gar verhindert werden. Bestimmte Typen gravitativer Massenbewegungen und Wildbachprozesse können sehr gut abgeschätzt und mit entsprechenden Maßnahmen reguliert werden.

Vielfach sind **Monitoring- und Frühwarnsysteme** essentielle Maßnahmen, um das Risiko vor allem für Objekte und Personen zu minimieren. Derartige Systeme bedingen oft ein sehr gutes Prozessverständnis und eine sehr gute Datenlage. Während bei großflächig auftretenden Extremereignissen – wie z. B. Temperaturextremen – Monitoring und Frühwarnung, gestützt auf Fernerkundungsdaten oder lokal installierte Sensoren, recht gut funktionieren, so sind derartige Maßnahmen bei lokal begrenzten Ereignissen wie Großmassenbewegungen aufwändig und nur punktuell umsetzbar. Bei allen Frühwarnsystemen sind die Vorwarnzeiten und die Zuverlässigkeit der Systeme essentiell. Hier liegt eine wesentliche Herausforderung in der Lokalisierung sogenannter Hot Spots.

Das Funktionieren von Frühwarnsystemen – und des Risikomanagements im Allgemeinen – setzt jedoch immer auch eine gesellschaftliche Komponente voraus, die von **Bewusstseinsbildung und Eigenverantwortung** – nicht zuletzt der Wahrnehmung und Befolgung von Warnungen und dem Bewusstsein der Handlungskonsequenzen – bis zur Tätigkeit von Zivilschutzbehörden reicht. Auch die rasche und gut koordinierte Reaktion auf beginnende Prozesse spielt eine große Rolle, um Extremereignisse verhindern zu können – als Beispiel hierfür seien Waldbrände genannt. Wichtig sind die **Koordination** und Zusammenarbeit zwischen den unterschiedlichen Akteuren, die Entwicklung von Strategien auf politischer/institutioneller Ebene, der Erhalt ehrenamtlicher Strukturen sowie grenzüberschreitende Zusammenarbeit. Ein Diskurs hin-

sichtlich des akzeptierten Risikos (wo beginnt der Überlastfall bzw. das Restrisiko?) ist von großer Bedeutung, um eine höhere Akzeptanz von Entscheidungen zu schaffen. Für bestimmte Prozesse (z. B. Hochwasser, Niederwasser, Wildbachprozesse, Schneelawinen) sind hier bereits relativ klare Definitionen vorhanden, die jedoch einer ständigen Anpassung an den Klimawandel und an gesellschaftliche Dynamiken bedürfen. Für andere Prozesse wiederum steht man in dieser Hinsicht noch am Anfang (z. B. Bodenerosion, gravitative Massenbewegungen, glaziale und periglaziale Prozesse). Schließlich besteht auch beim **Risikotransfer**, insbesondere hinsichtlich privater Objekte, Handlungsbedarf. In Österreich zum Beispiel decken die Gebäudeversicherungen die aus wiederkehrenden Naturgefahren resultierenden Schäden ab, während die Konsequenzen von Extremereignissen durch den Katastrophenfond übernommen werden. Trotz dieses ausgeprägten Risikotransfersystems bliebe es jedoch zu überlegen, ob eine verpflichtende Versicherung der jeweiligen Eigentümer gegenüber Naturgefahren nicht auch sehr unterstützend im Kontext der erhöhten Eigenvorsorge wirken könnte.

Auf fachpolitischer Ebene ergibt sich aus dem umfassenden Anpassungsbedarf infolge des klimatischen und gesellschaftlichen Wandels die zwingende Notwendigkeit einer übergeordneten strategischen Steuerung der Vorsorge für extreme Naturkatastrophen auf europäischer und nationaler Ebene. Diese Steuerung soll sowohl gefahren- als auch sektorenübergreifend erfolgen, um eine möglichst hohe Effizienz des staatlichen Handelns sicherzustellen. Dafür erscheint die Schaffung einer nationalen Risikovorsorgestrategie für Naturkatastrophen und deren rechtliche Verankerung in Wirkung und Umsetzung essentiell.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass Extremereignisse in allen Bereichen wirken. Jedoch ist weder die Erfassung von Extremereignissen einheitlich entwickelt, noch wird deren Modellierung nach ähnlichen Zugängen und vergleichbar durchgeführt. Auch die finale Darstellung ist höchst variabel. Gleichzeitig werden die Konsequenzen möglicher Extremereignisse nur selten adressiert, und unterscheiden sich auch dann grundlegend in der Umsetzung. Auch kann konstatiert werden, dass die Bedeutung von Extremereignissen neben den direkten Einglüssen auf die Umwelt auch für die Gesellschaft immer mehr zunimmt. Es besteht diesbezüglich ein **großer inter-, intra- und besonders transdisziplinärer Bedarf an Zusammenarbeit** – nur so können Extremereignisse und deren potenzielle Folgen nachhaltig bearbeitet werden. Insbesondere im Bereich der Forschung besteht hoher Bedarf an gesicherten Erkenntnissen über das Auftreten von Extremen sowie den Einfluss des klimatischen und gesellschaftlichen Wandels.

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

Teil I: Ausgangssituation

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

1 Überblick alpiner Naturgefahren in Österreich

Katrin Sattler und Susanne Mehlhorn*

Zusammenfassung

Lebens- und Wirtschaftsräume im österreichischen Alpenraum sind aufgrund topographischer und klimatischer Einschränkungen vorwiegend entlang von Talsohlen und auf Schwemmfächern konzentriert, wo natürliche Prozesse, wie Hochwasser, Muren, Felsstürze und Schneelawinen, schnell zu Naturgefahren mit hohem Schadenspotenzial werden können. Dieses einleitende Kapitel gibt einen kurzen Überblick über die im vorliegenden Bericht verwendete Terminologie, Definitionen und Abgrenzungen und über die behandelten Arten von alpinen Naturgefahren in Österreich. Weiters werden Herausforderungen im Umgang mit alpinen Naturgefahren näher beleuchtet sowie Gefahrenzonenpläne und -planungen als zentrale Anpassungsstrategien mit Ziel eines nachhaltigen Lebens und Wirtschaften mit Naturgefahren vorgestellt.

Abstract

Due to topographical and climatic constraints, settlements and economic areas in the Austrian Alps are concentrated largely along valley bottoms and on alluvial fans, where natural processes, such as flooding, debris flows, rockfalls, and snow avalanches, can quickly become natural hazards with high potential for damage. This introductory chapter gives a brief overview of the terminology, definitions and demarcations used in this report as well as of the types of alpine natural hazards present in Austria. Furthermore, challenges in dealing with alpine natural hazards are discussed and hazard zoning is introduced as one of the central adaptation strategies for sustainably living with natural hazards.

Kernbegriffe

- Naturgefahren (engl. natural hazards) sind natürliche Prozesse oder Phänomene, welche zu Todesfällen, Verletzungen oder anderen gesundheitlichen Auswirkungen, Sachschäden, sozialen und wirtschaftlichen Störungen oder Umweltbeeinträchtigungen führen können (UNISDR, 2017).
- Alpine Naturgefahren umfassen alle natürlichen Prozesse und Phänomene, welche Leben und Wirtschaften im alpinen Raum beeinträchtigen können.

* Katrin Sattler, Universität Wien, Institut für Geographie und Regionalforschung, katrin.sattler@univie.ac.at.

Susanne Mehlhorn, Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, susanne.mehlhorn@die-wildbach.at.

- Der österreichische Alpenraum ist gemäss der Abgrenzung durch die Alpenkonvention, Stand 2018, verstanden, jedoch sind manche natürlichen Prozessereignisse bei Eintreten geographisch nicht ausschliesslich auf den Alpenraum beschränkt (z. B. Stürme) bzw. können sich negative Beeinträchtigungen bis in die voralpinen Gebiete erstrecken (z. B. Hoch- und Niederwasser).

Key Points

- Natural Hazards are natural processes or phenomena »that may cause loss of life, injury or other health impacts, property damage, social and economic disruption or environmental degradation« (UNISDR, 2017).
- Alpine natural hazards are defined as all natural processes and phenomena that can negatively affect lives and economic activities in alpine areas.
- The Austrian Alps are defined as demarcated by the perimeter of the Alpine Convention as per 2018. However, some natural events may not be restricted to this region (e. g. storms) or negative impacts may extend into pre-alpine regions (e. g. flooding and low-flows).

1.1 Land der Berge, Land am Strome ... Land mit alpinen Naturgefahren

Österreichs Landschaft ist geprägt von Mittel- und Hochgebirge. Fast zwei Drittel des österreichischen Staatsgebiets sind gemäß der Abgrenzung nach der Alpenkonvention (2018) Teil des Europäischen Alpenraums (vgl. Abbildung 01). Aufgrund der gebirgigen Topographie und der klimatischen Verhältnisse sind nur 22 % dieses, im Folgenden als *österreichischer Alpenraum* bezeichneten Gebiets als Dauersiedlungsraum geeignet. Dennoch leben 39 % der österreichischen Bevölkerung in diesem Gebiet (vgl. Statistik Austria, 2018). Angesichts des begrenzten Platzangebots konzentrieren sich besiedelte Lebens- und Wirtschaftsräume auf die tiefergelegenen und flacheren Bereiche, wie entlang Talsohlen und auf Schwemmfächern. Natürliche Prozesse, wie Hochwasser, Muren, Felsstürze und Lawinen, können hier schnell zu Naturgefahren mit hohem Schadenspotenzial werden.

1.2 Terminologie und Definitionen

Gemäß der Terminologie der UN-Organisation International Strategy for Disaster Risk Reduction (UNISDR, 2017) sind *Naturgefahren* (engl. natural hazards) natürliche Prozesse oder Phänomene, welche zu Todesfällen, Verletzungen oder anderen gesundheitlichen Auswirkungen, Sachschäden, sozialen und wirtschaftlichen Störungen oder Umweltbeeinträchtigungen führen *können*

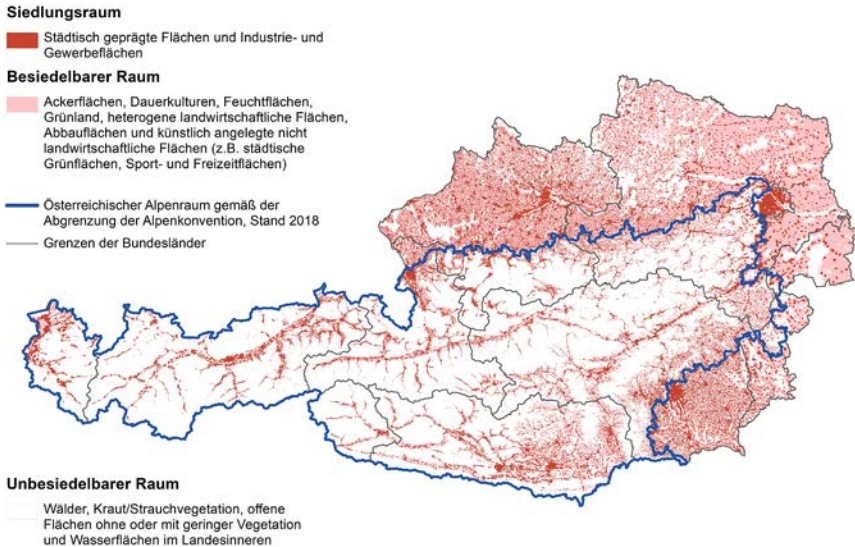


Abbildung 01: Dauersiedlungsraum innerhalb des österreichischen Alpenraums gemäß der Abgrenzung nach Alpenkonvention. Der Dauersiedlungsraum wird als potentieller Siedlungsraum verstanden und setzt sich aus Siedlungsraum und besiedelbarem Raum zusammen (Wonka, 2008).

Figure 01: Permanent settlement area within the Austrian Alpine region according to the demarcation by the Alpine Convention. The permanent settlement area is defined as the potential settlement area and consists of areas already settled as well as areas suited for settlement (Wonka, 2008).

Datenquellen: Alpenkonvention, 2018; BEV, 2018; Statistik Austria, 2016

(Übersetzung und Hervorhebung durch die Autoren). Naturgefahren sind daher immer im Kontext *möglicher* negativer Auswirkungen für Menschen bzw. Gesellschaften zu sehen. Naturgefahren können einzeln, nacheinander oder in Ursprung und Wirkung kombiniert auftreten, wobei Naturgefahren anhand der Art des Prozesses, des Entstehungsortes, der Intensität oder Magnitude und der Häufigkeit oder Eintrittswahrscheinlichkeit beschrieben werden können. *Alpine Naturgefahren* umfassen im engeren Sinne jene natürlichen Prozesse und Phänomene, welche, wie Felsstürze, Muren und Schneelawinen, aufgrund des zentralen Einflusses von Relief und Klima vorrangig in Gebirgsregionen auftreten. Im weiteren, und diesem Bericht zugrunde gelegtem Sinne, umfassen alpine Naturgefahren alle natürlichen Prozesse und Phänomene, welche Leben und Wirtschaften im alpinen Raum negativ beeinträchtigen können. Gemäß dieser Auffassung sind in diesem Sammelband auch Stürme, Waldbrände und Erdbeben behandelt. *Alpin* beschreibt daher einen gemeinsamen geographischen Nenner im Gegensatz zu einem geographischen Abgrenzungskriterium.

Gefährdung beschreibt im Zusammenhang mit Naturgefahren die Möglichkeit des Eintretens negativer Auswirkungen für Mensch und Gesellschaft durch Naturereignisse (PLANAT, 2012). Kommt es durch Eintreten eines Naturereignisses zu einer schwerwiegenden Störung einer Gemeinschaft oder Gesellschaft durch menschliche, materielle, wirtschaftliche oder ökologische Verluste, spricht man von einer *Naturkatastrophe* (engl. natural disaster; UNISDR, 2017; Übersetzung der Autoren). Eine Quantifizierung der möglichen negativen Konsequenzen anhand der geschätzten Wahrscheinlichkeit des Schadenseintritts (Naturgefahr) und des geschätzten Schadensausmaßes (Vulnerabilität bedrohter Menschen und Sachwerte) erfolgt durch die Berechnung von *Naturrisiken*, welche in Form von akzeptablem und inakzeptablem Risiko quantitative Informationen für das Management von Naturgefahren darstellen (vgl. Elverfeldt et al., 2008).

1.3 Arten alpiner Naturgefahren in Österreich

Der Großteil der im alpinen Raum Österreichs auftretenden Naturgefahren können nach Ursprung bzw. treibender Kraft in meteorologische, hydrologische und gravitative Naturgefahren unterteilt werden.

Meteorologische Naturgefahren

Kälteeinbrüche und Stürme sind in der Regel großflächige meteorologische Phänomene, welche jedoch, getrennt durch den Alpenhauptkamm als Wetterbarriere, selten den ganzen österreichischen Alpenraum auf einmal betreffen. Besonders hohe Eis- und Schneelasten sowie Hagelunwetter treten hingegen meist lokalisiert auf. Starkniederschläge können sowohl großflächig durch Tiefdruckgebiete oder durch Staueffekte an den Gebirgen als auch sehr kleinräumig durch Konvektionen auftreten und Auslöser für nachfolgende hydrologische und gravitative Sekundärgefahren wie Hochwasser, Sturzfluten und intensive Bodenerosion sein. Die Gefährdung durch Hitze, Dürre und Waldbrände ist im österreichischen Alpenraum im europäischen Vergleich derzeit gering, jedoch sind aufgrund steigender Durchschnittstemperaturen und erhöhter Wahrscheinlichkeit für Hitzewellen (APCC, 2014) auch hier zukünftig vermehrt negative Konsequenzen zu erwarten.

Hydrologische Naturgefahren

Mit Wasser als treibende Kraft zählen Sturzfluten, Hochwasser und fluviatile Feststoffkatastrophen zu den hydrologischen Naturgefahren. Als Sekundärprozesse, für welche nicht nur die Niederschlagsmenge, sondern auch Faktoren wie Topographie, Infiltrationskapazität und Landnutzung ausschlaggebend sein

können, können sie meist auch weit vom Niederschlagsereignis entfernte voralpine Gebiete betreffen (siehe Abbildung 02). Niederschlagsbedingte Sturzfluten sind im Vergleich zu Hochwasser durch einen raschen Anstieg zum Abflussscheitel und kurze Vorwarnzeiten gekennzeichnet. Grundlegendes Unterscheidungsmerkmal zwischen Hochwasser und fluviatilen Feststoffereignissen ist der höhere Feststoffanteil, wie Geschiebe, Schwebstoffe und Holz, wobei der Wasseranteil bei fluviatilen Feststoffereignissen jedoch noch überwiegt. Zu hohen Abflüssen stehen zu geringe Abflüsse gegenüber, welche zu Niederwasser in Flüssen und Bächen führen und so die alpine Wasserwirtschaft bis hin zur voralpinen Binnenschifffahrt negativ beeinträchtigen können.

Schutzmaßnahmen gegen Naturgefahren sind für definierte Bemessungsereignisse dimensioniert. Treten Sturzfluten, Hochwasser und fluviatile Feststoffkatastrophen in solch einer Intensität auf, dass getroffene Schutzmaßnahmen nicht ausreichen, spricht man von Überlastfällen. Diese werden bereits in der Planung von Rückhaltebauwerken und Stauanlagen berücksichtigt, damit es auch in solchen Fällen nicht zum Versagen der Schutzmaßnahmen kommt.

Bodenerosion tritt im alpinen Raum meist in Zusammenhang mit Starkniederschlagsereignissen auf und ist daher in diesem Bericht den hydrologischen Naturgefahren zugeordnet.

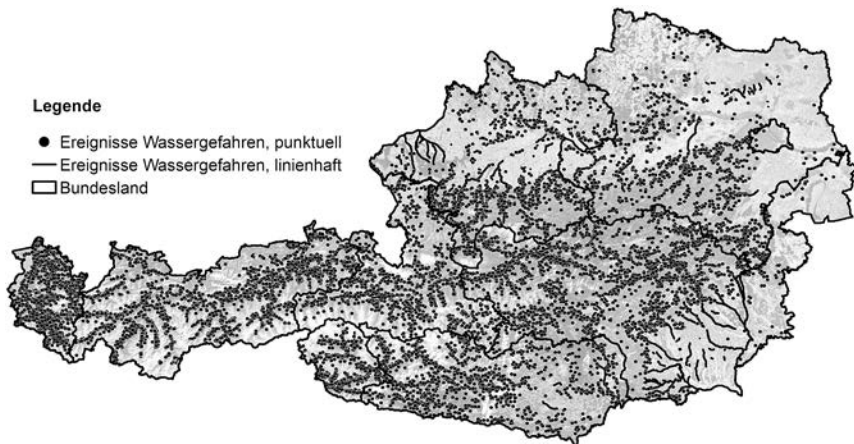


Abbildung 02: Räumliche Verteilung von dokumentierten Schadensereignissen durch Wassergefahren in Österreich.

Figure 02: Spatial distribution of recorded damaging events through hydrological hazards in Austria.

Datenquelle: BMNT, 2018b – WLK-EKM (08/881–09/2018); BMNT, 2018c – HW-FDB (10/2013–09/2018); kein Anspruch auf Vollständigkeit. (© WLV)

Gravitative Naturgefahren

Unter gravitativen Naturgefahren werden alle jene Prozesse zusammengefasst, bei welchen es zu einer Gefährdung durch hangabwärts gerichteter, der Schwerkraft folgenden Verlagerung von Material kommt (Glade und Stötter, 2008). Genauere Differenzierungen können anhand des Bewegungsmechanismus und des bewegten Materials vorgenommen werden (siehe dazu Beitrag 2 zu *Was sind Extremereignisse*, Kapitel 2). Tiefgründige Felsbewegungen, wie Felsstürze, Felsgleitungen und Felslawinen, treten im österreichischen Alpenraum aufgrund der geologischen Beschaffenheit des Untergrunds und intensiver Frostwirkung besonders in den hochalpinen, ehemals vergletscherten Gebieten auf (vgl. Interpraevent, 2009; siehe Abbildung 03). Hohe Reliefenergie kombiniert mit signifikanten Schneemächtigkeiten, Schneeschmelze und häufigen Starkniederschlägen sind auch Gründe für die besondere Gefährdung durch Schneelawinen (siehe Abbildung 04) und Muren in diesen Gebirgsregionen. Flachgründige Massenbewegungen, wie Rutschungen und Hangmuren, hingegen treten besonders in den rutschungsanfälligen Flysch- und Klippenzonen in Vorarlberg, Nieder- und Oberösterreich sowie in verwitterungsanfälligen Schiefer- und Sedimentgesteinen der Grauwackenzone und Alpenvorländer auf. Mit Steinschlägen ist in allen felsdurchsetzten Hängen in Österreich zu rechnen.

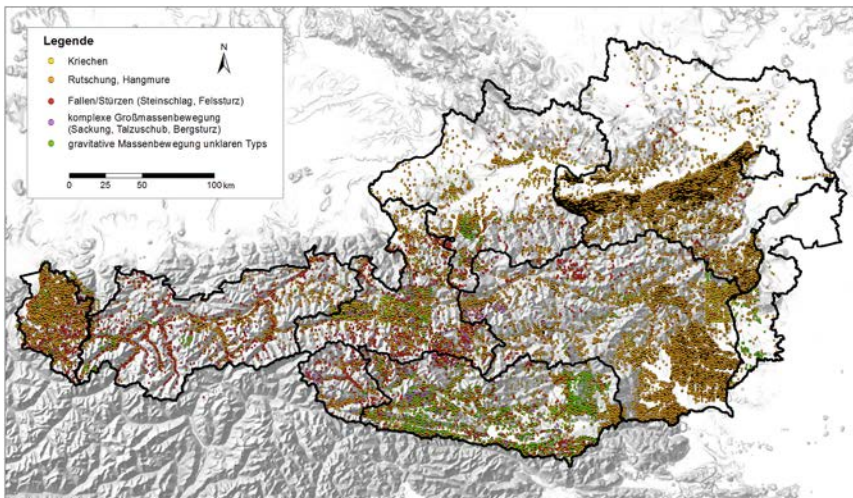


Abbildung 03: Digitaler Kataster gravitativer Massenbewegungen in Österreich der Geologischen Bundesanstalt Österreich. Kein Anspruch auf Vollständigkeit.

Figure 03: Digital event inventory of landslides in Austria compiled by the Geological Survey of Austria. No claim to completeness.

Datenquelle: Geologische Bundesanstalt, September 2018

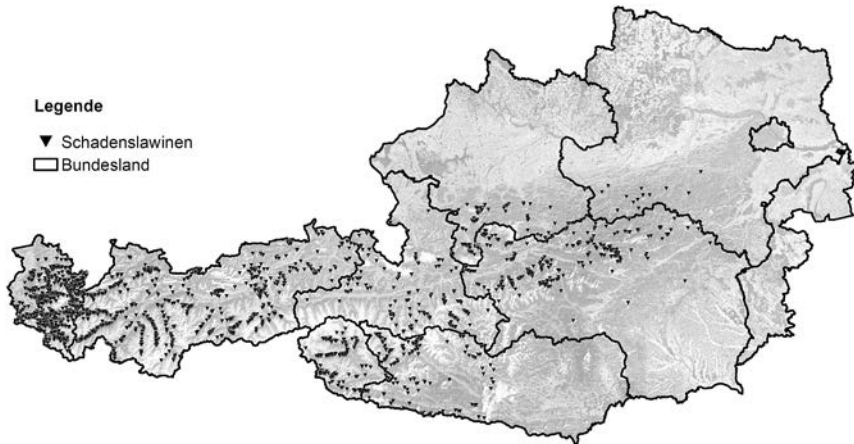


Abbildung 04: Räumliche Verteilung von dokumentierten Schadensereignissen durch Lawinen in Österreich.

Figure 04: Spatial distribution of recorded damaging events through avalanches in Austria.
Datenquelle: BMNT, 2018b – WLK-EKM (12/1450.–09/2018) (© WLV)

Geophysikalische Naturgefahren

Erdbeben zählen neben Vulkanausbrüchen zu den geophysikalischen Naturgefahren. Obwohl sich die Ausläufer des Innerkarpatischen Vulkanbogens bis in den voralpinen Südosten von Österreich erstrecken (Krenmayr et al., 1999), gilt der damit verbundene Vulkanismus heute als erloschen und die Gefährdung durch Vulkanausbrüche im österreichischen Alpenraum sowie Gesamtösterreich als sehr gering. Auch ist Österreichs Seismizität im europäischen Vergleich gering, jedoch erinnern leichte Erdbebenereignisse jedes Jahr an die durchaus präsente, doch im Kontext von Naturgefahren in Österreich oft nur wenig beachtete Gefährdung. So ist beispielsweise die Möglichkeit folgenschwerer Erdbeben im Wiener Raum sehr wohl gegeben.

Sturzprozesse, Sturzfluten, Hochwasser und Muren, welche mit den Eiskomponenten des Hochgebirges, Gletscher und Permafrost, in Zusammenhang stehen, werden in diesem Bericht prozessbereichsübergreifend unter *Glaziale und Periglaziale Naturgefahren* zusammengefasst. Ebenso können sich *Multi-Hazards und Kaskadeneffekte* als kombiniertes Auftreten bzw. gegenseitiges Verstärken von unterschiedlichen Naturgefahren bereichsübergreifend aus meteorologischen, hydrologischen, gravitativen und geophysikalischen Naturgefahren zusammensetzen.

1.4 Herausforderung alpine Naturgefahr

Per Definition recht konkret und greifbar, stellt die Abschätzung von Naturgefahren und die Planung von Maßnahmen zur Risikoreduktion jedoch eine große Herausforderung für die betroffenen Akteure dar. Ein wesentlicher Grund hierfür ist, dass sich Naturgefahren im ständigen Wandel befinden. Dieser Wandel kann sowohl durch Veränderungen im Naturraum als auch Veränderungen im Kulturräum bedingt sein (Fuchs, 2010).

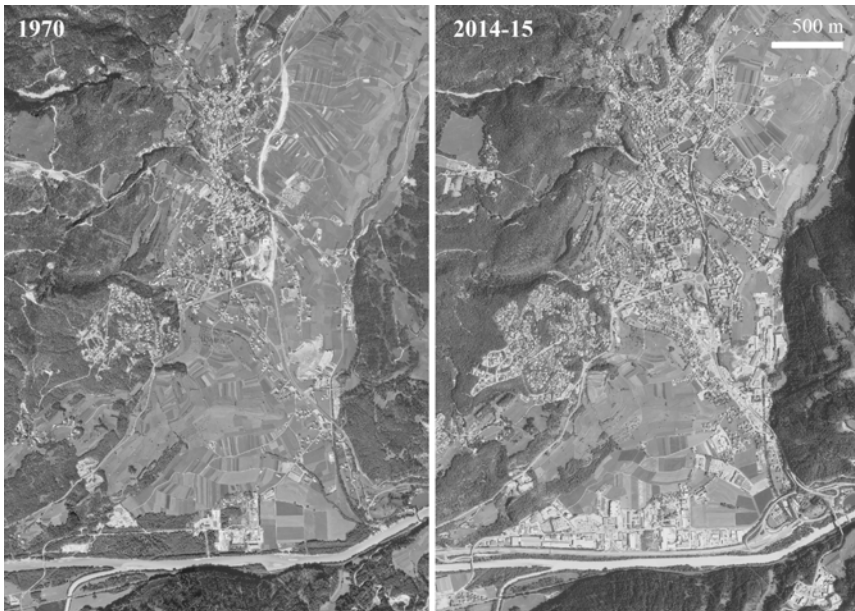


Abbildung 05: Siedlungsentwicklung im Alpenraum am Beispiel Imst, Tirol.

Figure 05: Settlement development in the Alps, illustrated by the example Imst, Tyrol.

Quelle Orthophotos: Land Tirol, Oktober 2018

Naturräumliche Veränderungen können unter anderem Relief, Klima, Wasserhaushalt, Flora und Fauna betreffen. Besondere Bedeutung kommt hierbei den durch den Klimawandel hervorgerufenen langfristigen Veränderungen des Naturraums zu. Änderungen in Temperatur (Rückgang von Gletschern und Permafrostvorkommen) und/oder Niederschlag (häufigeres Auftreten von Starkniederschlägen, vermehrt flüssiger statt fester Niederschlag im Hochgebirge) können nachhaltige Änderungen in Frequenz und Magnitude von Naturereignissen an einem bestimmten geographischen Ort bewirken. Ebenso bedeutsam sind jedoch auch die lang- und kurzfristigen Veränderungen im Kulturräum, welche mancherorts zu einer signifikanten Zunahme an Menschen

oder Sachgütern im Wirkungsbereich von Naturereignissen führen können. Besonders in den tiefen Tal- und Beckenlagen hat sich die Flächennutzung seit 1955 stark geändert (Fuchs, 2010; Bätzing, 2015). Die Erschließung der Alpen durch den Massentourismus sowie ein genereller ökonomischer Aufschwung aufgrund der zentralen Lage innerhalb Europas führten vielerorts zur Ausweitung und Verdichtung des Dauersiedlungsraums und der Zunahme in Zahl und Dichte notwendiger Infrastrukturen, wie Straßen, Bahntrassen und Versorgungsleitungen (siehe Abbildung 05). Besonders in Tourismuszentren steigt die Anzahl der sich in gefährdeten Bereichen aufhaltenden Personen jedes Jahr für ein paar Monate um ein Vielfaches (vgl. Keiler et al., 2005). All diese Aspekte gilt es im Umgang mit alpinen Naturgefahren zu berücksichtigen.

1.5 Umgang mit alpinen Naturgefahren

Der Umgang mit Naturgefahren hat im Alpenraum eine lange Tradition (Interpraevent, 2009). Schon seit Beginn der Nutzung der Alpen als Dauersiedlungsraum vor ca. 7.000 Jahren waren Siedler mit Naturgefahren und ihren Folgen konfrontiert. Bis ins frühe Mittelalter herrschte eine fatalistische Grundhaltung gegenüber den Gefahren durch Naturereignisse. Naturkatastrophen wurden als göttliche Fügung interpretiert, welchen man schutzlos ausgeliefert war. Nach und nach begannen Menschen jedoch Maßnahmen zur Abwehr von Gefahren und zum Schutz von Hab und Gut zu ergreifen. Der zielgerichtete Erhalt von Schutzwäldern und die Errichtung von einfachen Schutzbauwerken gegen Hochwasserereignisse zählen zu frühen Maßnahmen. Mit zunehmendem Vertrauen in technische Entwicklungen, konzentrierten sich die Menschen der Neuzeit vermehrt auf ingenieurtechnische Maßnahmen zur aktiven Abwehr von Naturgefahren. Im 21. Jahrhundert erleben wir nun einen erneuten Paradigmenwandel hin zur Anpassung der menschlichen Lebensweise an drohende Gefahren durch Naturereignisse, mit dem Ziel ein Leben und Wirtschaften *mit* Naturgefahren im Alpenraum nachhaltig sicherzustellen. Denn: Einen absoluten Schutz vor Naturgefahren gibt es nicht.

Parallel zu den Strategien und Maßnahmen im Umgang mit alpinen Naturgefahren entwickelte sich der »Schutz vor alpinen Naturgefahren« mit der Zeit zu einer staatlichen Aufgabe (Rudolf-Miklau, 2009). Die Hochwasserkatastrophen 1882 in Kärnten und Tirol waren Anlass für den Erlass eines Gesetzes zur Verbauung von Wildbächen und die Sicherung entsprechender Finanzierung. Für die Umsetzung und Durchführung der Arbeiten wurde eine eigene Abteilung innerhalb des k.k.Ackerbauministeriums gegründet – die Geburtsstunde des heutigen Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinerverbauung. Der Schutz vor Naturgefahren wird heute primär von der Bundeswasserbauver-

waltung und der Wildbach- und Lawinenverbauung wahrgenommen. Zentrale Aufgabe beider Institutionen ist die Erarbeitung von Gefahrenzonenplänen sowie die Entwicklung und Umsetzung von Schutzmaßnahmen. Weitere Schwerpunkte sind die Naturgefahreninformation und Dokumentation von Naturereignissen. Verlässliche Daten und Erkenntnisse aus vergangenen Ereignissen sind grundlegende Bausteine, um daraus lernen zu können und für zukünftige Katastrophen besser vorbereitet zu sein. Seit 2009 stehen die gesammelten Ereignismeldungen berechtigten Akteuren und Entscheidungsträgern im Digitalen Wildbach- und Lawinenkataster der Wildbach- und Lawinenverbauung sowie seit 2013 in der Hochwasserfachdatenbank der Bundeswasserbauverwaltung zur Verfügung.

Gefahrenzonenpläne und -planungen

Gefahrenzonenpläne der Wildbach- und Lawinenverbauung sowie Gefahrenzonenplanungen der Bundeswasserbauverwaltung stellen zentrale Anpassungsstrategien im Sinne der modernen gesellschaftlichen Bestrebungen nach einem Leben und Wirtschaften *mit* Naturgefahren im Alpenraum dar. Sie beinhalten Informationen zu Auftreten und Auswirkungen von Naturgefahren auf den Siedlungsraum und Infrastrukturen. Sie bilden die Grundlage für die örtliche Flächenwidmung und Bauplanung sowie für die Planung von Schutzmaßnahmen und die Abschätzung von deren Dringlichkeit.

Gefahrenzonenpläne der Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) sind flächenhafte Gutachten über die Gefährdung durch Wildbäche, Lawinen, Steinschlag und Rutschungen, welche im Auftrag des Forstgesetzes von 1975 für alle Gemeinden Österreichs erstellt werden (BMLFUW, 2014). Derzeit verfügen bereits 98 % der Gemeinden, für welche laut Forstgesetz 1975 die Ausweisung von Gefahren gefordert ist, über einen ministerial genehmigten Gefahrenzonenplan (BMNT, 2018a).

Grundlage der räumlichen Abgrenzung der Zonen stellt ein 150-jährliches Bemessungsereignis dar. Gefahrenzonenpläne weisen folgende Zonen und Bereiche aus (aus BMLFUW, 2014):

- In der *Roten Gefahrenzone* ist die Gefährdung durch Wildbäche und Lawinen so groß, dass eine ständige Besiedlung nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich ist.
- In der *Gelben Gefahrenzone* ist die ständige Benützung für Siedlungs- und Verkehrszwecke beeinträchtigt. Eine Bebauung ist hier nur eingeschränkt und unter Einhaltung von Auflagen möglich.
- *Blaue Vorbehaltsbereiche* sind für technische oder biologische Schutzmaßnahmen freizuhalten oder bedürfen einer besonderen Art der Bewirtschaftung.

- Mit *Braunen Hinweisbereichen* wird auf andere als durch Wildbäche und Lawinen hervorgerufene Naturgefahren hingewiesen.
- *Violette Hinweisbereiche* kennzeichnen jene Flächen, deren gegenwärtiger Zustand erhalten werden muss, weil sie bereits einen natürlichen Schutz bieten.

Gefahrenzonenplanungen der Bundeswasserbauverwaltung (BWV) sind gemäß § 42a Abs. 2 WRG (BMNT, 2018d) insbesondere für Gebiete mit potenziellem signifikantem Hochwasserrisiko zu erstellen. Sie sind Fachgutachten, in denen insbesondere Überflutungsflächen hinsichtlich der Gefährdung und der voraussichtlichen Schadenswirkung durch Hochwasser sowie ihrer Funktionen für den Hochwasserabfluss, den Hochwasserrückhalt und für Zwecke späterer schutzwasserwirtschaftlicher Maßnahmen beurteilt werden. Grundlage der räumlichen Abgrenzung der Zonen stellt ein Bemessungsereignis mittlerer Wahrscheinlichkeit (i. d. R. ein 100-jährliches Abflussereignis) dar. Zuständig für die Erstellung der Gefahrenzonenplanungen und deren Anpassung an den Stand der Entwicklung ist das Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus in Zusammenarbeit mit den Ländern.

Gefahrenzonenplanungen der BWV weisen folgende Zonen und Bereiche aus (aus BMNT, 2018d):

- *Rote Gefahrenzonen* sind jene Flächen, die durch das Bemessungsereignis mittlerer Wahrscheinlichkeit derart gefährdet sind, dass ihre ständige Benutzung für Siedlungs- und Verkehrszwecke wegen der voraussichtlichen Schadenswirkungen nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich ist (»Gefahr für Leib und Leben«).
- *Gelbe Gefahrenzonen* sind alle übrigen durch das Bemessungsereignis mittlerer Wahrscheinlichkeit betroffenen Überflutungsflächen. In diesen Flächen können unterschiedliche Gefährdungen geringeren Ausmaßes oder Beeinträchtigungen der Nutzung für Siedlungs- und Verkehrszwecke auftreten oder sind Beschädigungen von Bauobjekten und Verkehrsanlagen möglich.
- *Zonen mit niedriger Wahrscheinlichkeit* (»Restrisikogebiete«, *gelb schraffierte Bereiche*) basieren auf dem Hochwasser niedriger Wahrscheinlichkeit (HQ₃₀₀ oder Extremereignisse) und weisen auf die Restgefährdung beispielsweise bei Überschreiten des Schutzgrades bzw. erhöhte Schadenswirkung bei Versagen von Schutzmaßnahmen hin.
- *Rot-Gelb schraffierte Funktionsbereiche* weisen auf Überflutungsflächen hin, die wesentlich zum Hochwasserabfluss beitragen oder deren Abflusswirkung bzw. Retentionswirkung dazu beiträgt das Gefährdungspotenzial zu verringern.

- *Blaue Funktionsbereiche* sind Flächen, die für die Durchführung sowie für die Aufrechterhaltung der Funktionen geplanter schutzwasserwirtschaftlicher Maßnahmen benötigt werden.

Die Gefahrenzonenpläne sind unter <http://maps.naturgefahren.at/> öffentlich einsehbar. Eine weitere Plattform des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus ist die digitale Gefahrenlandkarte HORA (<https://www.hora.gv.at/>). Sie enthält Informationen zu möglichen Gefährdungen durch Hochwasser, Erdbeben, Sturm, Hagel und Schnee sowie aktuelle Daten zu Wetterwarnungen und Blitzen in Österreich und soll so auch zur Schärfung des Risikobewusstseins der Menschen beitragen.

Literatur

- Alpenkonvention, 2018. Perimeter der Alpenkonvention, Stand 2018. <http://www.alpconv.org/de/AlpineKnowledge/Perimeter.html> [22. 10. 2018].
- APCC, 2014. Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 1096 S.
- Bätzing, W., 2015. Die Alpen – Geschichte und Zukunft einer europäischen Kulturlandschaft. Verlag C.H. Beck, 484 S.
- BEV 2018. Verwaltungsgrenzen, Stichtag 01.04.2018. <https://www.data.gv.at/katalog/dataset/51bdc6dc-25ae-41de-b8f3-938f9056af62> [22. 10. 2018].
- BMLFUW, 2014. Gefahrenzonenplan. <http://www.naturgefahren.at/massnahmen/gefahrenarst/gzp.html> [20. 09. 2018].
- BMNT, 2018a. BMNT – Daten, Zahlen und Fakten 2018. 128 S.
- BMNT, 2018b. Digitaler Wildbach- und Lawinenkataster des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung (unveröffentlichter Datensatz).
- BMNT, 2018c. Hochwasserfachdatenbank der Bundeswasserbauverwaltung (unveröffentlichter Datensatz).
- BMNT, 2018d. Technische Richtlinie für die Gefahrenzonenplanung gem. 42a WRG. 44 S. https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/foerderungen/foerd_hochwasserschutz/trl_gzp_42a_wrg.html [25. 10. 2018].
- Elverfeldt, K., Glade, T., Dikau, R. 2008. Naturwissenschaftliche Gefahren- und Risikoanalyse. In: C. Felgentreff, T. Glade (Hrsg.), Naturrisiken und Sozialkatastrophen. Spektrum Akademischer Verlag, Berlin-Heidelberg, S. 31–46.
- Fuchs, S., 2010. Auswirkungen des Klimawandels auf Naturgefahren – Herausforderungen für eine nachhaltige Landnutzung in alpinen Gebieten. In: ÖWAV (Hrsg.), Auswirkungen des Klimawandels auf Hydrologie und Wasserwirtschaft in Österreich Eigenverlag des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbandes, Wien, S. 169–180.
- Glade, T., Stötter, J., 2008. Gravitative Massenbewegungen und Schneelawinen. In: C. Felgentreff, T. Glade (Hrsg.), Naturrisiken und Sozialkatastrophen. Spektrum Akademischer Verlag, Berlin/Heidelberg, S. 151–164.

- Interpraevent, 2009. Alpine Naturkatastrophen: Lawinen – Muren – Felsstürze – Hochwässer. Leopold Stocker Verlag, 120 S.
- Keiler, M., Zischg, A., Fuchs, S., Hama, M., Stötter, J., 2005. Avalanche related damage potential – changes of persons and mobile values since the mid-twentieth century, case study Galtür. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(1), S. 49–58. DOI: 10.5194/nhess-5-49-2005.
- Krenmayr, H.G., Hofmann, T., Mandl, G.W., Peresson, H., Pestal, G., Pistotnik, J., Reitner, J., Scharbert, S., Schnabel, W., Schönlaub, H.P., 1999. Rocky Austria. Geologische Bundesanstalt, 63 S.
- PLANAT, 2012. Risikodialog Naturgefahren – Fachbegriffe im Naturgefahrenbereich. Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT. http://www.planat.ch/fileadmin/PLANAT/Risikodialog_Dokumente/DE/090_RDN_Begriffe_Naturgefahren_alphab_120304.pdf [17.12.2018].
- Rudolf-Miklau, F., 2009. Naturgefahren-Management in Österreich;Vorsorge – Bewältigung – Information. Nexis Lexis, 280 S.
- Statistik Austria, 2016. Dauersiedlungsraum. http://data.statistik.gv.at/web/meta.jsp?dataset=OGDEXT_DSR_1 [22.10.2018].
- Statistik Austria, 2018. Bevölkerungsstand 2018. http://data.statistik.gv.at/web/meta.jsp?dataset=OGD_bevstandjbab2002_BevStand_2018 [22.10.2018].
- UNISDR, 2017. Terminology on disaster risk reduction. <https://www.unisdr.org/we/inform/terminology> [20.09.2018].
- Wonka, E., 2008. Neuabgrenzung des Dauersiedlungsraums. *Statistische Nachrichten*, 5, S. 432–442.

2 Was sind Extremereignisse?

Thomas Glade*

Zusammenfassung

Extremereignisse sind nicht eindeutig definiert. Grundlegend lassen sich ein mathematisch-statistischer Zugang über die Analyse der Naturgefahren und ein über die Auswirkungen definierter Ansatz differenzieren. Extreme werden sehr häufig in den Kontext des Klimawandels gebracht, sind aber bei weitem nicht darauf beschränkt. Auch rein gesellschaftliche Veränderungen können Extreme verursachen. Bei Analysen von Extremen bestehen aufgrund der geringen Datenlage und der limitierten Kenntnis der Prozess-Interaktionen sehr große Unsicherheiten, was einen Umgang mit solchen Ereignissen sehr erschwert. Es muss überprüft werden, ob die momentan etablierten Untersuchungsansätze fähig sind, auch Extremereignisse abzubilden.

Abstract

Extreme events are not uniquely defined. Basically, a mathematical-statistical approach analysing the natural hazards and a concept determining the consequences can be differentiated. Extreme events are often framed within climate change, however, are by far not limited to it. Also purely societal changes can lead to extremes. Within the analysis of extremes, there is a large uncertainty due to limited data availability and to the understanding of interacting processes. This hinders the management of such extreme events. It has to be verified that the currently established models and concepts are suitable to analyse extreme events.

Kernaussagen

- Es gibt keine einheitliche Terminologie von Extremereignissen, bzw. Extremen.
- Definitionen variieren sehr stark nach einzelnen Naturgefahrenprozessen und potenziellen Konsequenzen.
- Extreme können für Naturgefahrenprozesse statistisch beschrieben werden.
- Extreme können gemäß deren Konsequenzen charakterisiert werden.
- Komplexe Systeme mit deren Kennzeichen wie Nichtlinearität und Emergenz bestimmen häufig Extremereignisse.
- Etablierte Modellansätze und Konzepte müssen bezüglich ihrer Anwendbarkeit für Extremereignisse geprüft werden.

* Thomas Glade, Universität Wien, Institut für Geographie und Regionalforschung, thomas.glade@univie.ac.at.

- Analysen von Extremen finden besonders im Kontext des Klimawandels statt, sind aber nicht beschränkt darauf.
- Extreme können auch durch rein gesellschaftliche Veränderungen herbeigeführt werden.

Key points

- There is no uniform terminology of extreme events, or extremes respectively.
- Definitions vary strongly for different natural hazards and potential consequences.
- Extremes of natural hazards can be described statistically.
- Extremes can be characterized by their consequences.
- Complex systems including non-linearity and emergence often determine extreme events.
- Current modelling approaches and concepts have to be verified with respect to their applicability of extreme event analysis.
- Analyses of extremes are often related to, but by no means limited to, climate change.
- Extremes can also be induced by purely societal changes.

2.1 Hintergrund

Extremereignisse werden im allgemeinen Sprachgebrauch geläufig mit etwas ungewöhnlichem, von der Norm oder der bisherigen Erfahrungswelt abweichend in Verbindung gebracht und häufig als »katastrophales Ereignis« bezeichnet (in Bezug zu Hochwasser z. B. Schoklitsch, 1914; Zettl, 1958; Troschl, 1967; Schwarzl, 1972). Dementsprechend werden solche Extremereignisse häufig auch als »überraschend«, »noch nie dagewesen« oder »vollkommen unnormal« bezeichnet. Jedoch hängen die Extreme immer vom Betrachtungsobjekt und dem Beobachtungszeitraum ab (EU, 2017). Im Kontext von Naturgefahren werden folglich Extreme für verschiedene Prozesse ganz unterschiedlich definiert (McPhillips et al., 2018), beispielsweise im räumlichen oder zeitlichen Auftreten (McGuire, 2006; Berz, 2009; Interpraevent, 2009). In den unterschiedlichen Wissenschaften wird deshalb mit diversen Methoden versucht, das Wiederkehrintervall solcher Prozesse und deren Stärke in bestimmten Regionen zu untersuchen, entsprechende Muster abzuleiten und dann mögliche Szenarien zu entwickeln (z. B. Felgentreff und Glade, 2008; Haigh und Wahl, 2019). Solche Frequenz-/Magnitude-Analysen helfen auch bestimmte Schwellenwerte in der Umwelt zu definieren, nach deren Über- oder Unterschreiten entsprechende »extreme« Situationen auftreten können (z. B. für gravitative Massenbewegungen und Schneelawinen, Glade und Stötter, 2008).

Das gleiche gilt selbstverständlich auch für die möglichen Konsequenzen resultierend aus dem Auftreten von Naturgefahren. Diese Konsequenzen sind abhängig von den veränderten Prozessgeschehen, können aber auch nur und

ausschließlich Ausdruck von veränderten sozio-ökonomischen Veränderungen sein (z. B. Abholzung, Ausweitung von Siedlungsgebieten). Auch Versicherungen haben größtes Interesse solche Extremereignisse gut abschätzen zu können (Smolka, 2006; Bernet et al., 2017).

Grundlegend ist auch hervorzuheben, dass gerade der Klimawandel im Kontext von Extremereignissen seit Jahrzehnten bearbeitet wird (u. a. Schiesser, 2003; IPCC, 2012; Hartmann et al., 2013; APCC, 2014). Hierbei werden häufig entweder die Veränderungen im Klimasystem an sich untersucht (z. B. Frei und Schär, 2001; Eccel et al., 2012; Scherrer et al., 2016; Lexer et al., 2017; Brönnimann et al., 2018, Hofstätter et al., 2018; Hofstätter und Blöschl 2019), bzw. mit entsprechenden Folgeprozessen (z. B. Keiler et al., 2010; Schneuwly-Bollschweiler et al., 2013; WMO, 2015; Kirnbauer et al., 2016) oder unterschiedlichen Konsequenzen (z. B. Diaz und Murane, 2008; Chavez et al., 2015; Forzieri et al., 2018; Mortlock et al., 2018; Yin et al., 2018) in Verbindung gebracht. Zwar sind Extremereignisse im Zusammenhang mit dem Klimawandel sehr wichtig, jedoch gibt es vielfältige globale Extremereignisse die nicht auf den Klimawandel reduziert werden können (u. a. Huppert und Sparks, 2006; Hewitt et al., 2008; Korup et al., 2009; Glade et al., 2014; Mazas, 2019).

Unabhängig von den Auslösern können Extremereignisse in natur- und gesellschaftswissenschaftliche Bereiche unterschieden werden.

2.2 Naturwissenschaftlicher Kontext

Im statistischen Kontext sind Extremereignisse definiert als Ereignisse, welche stark vom statistischen Mittelwert abweichen. Diese Abweichungen können vielfältig sein, drei typische Veränderungen sind in der Abbildung 1 dargestellt (IPCC, 2012). Grundlegend werden Extreme in den Naturwissenschaften mithilfe der Extremwertstatistik bearbeitet (u. a. Mitchell et al., 2006; Santhanam, 2012; Haigh und Wahl, 2019).

Die präsentierten potentiellen Auswirkungen in der Veränderung eines Mittelwertes (Abb. 1a), in der Erhöhung einer Variabilität (Abb. 1b) und in der veränderten Verteilung (Abb. 1c) sind am Beispiel der Temperatur dargestellt, aber selbstverständlich können solche Veränderungen auch auf statistische Kennwerte von Werteverteilungen anderer Parameter übertragen werden. Die jeweiligen konkreten Verteilungen und deren potenziellen Änderungen hängen vom betrachteten System ab, z. B. Wasserstandhöhen bei Flüssen, Erosion von Ackerböden, Windstärken bei Stürmen, Schneedeckenhöhen bei Lawinen, Fließgeschwindigkeiten bei Erdströmen, Beschleunigungen bei Erdbeben, um nur einige Beispiele zu nennen.

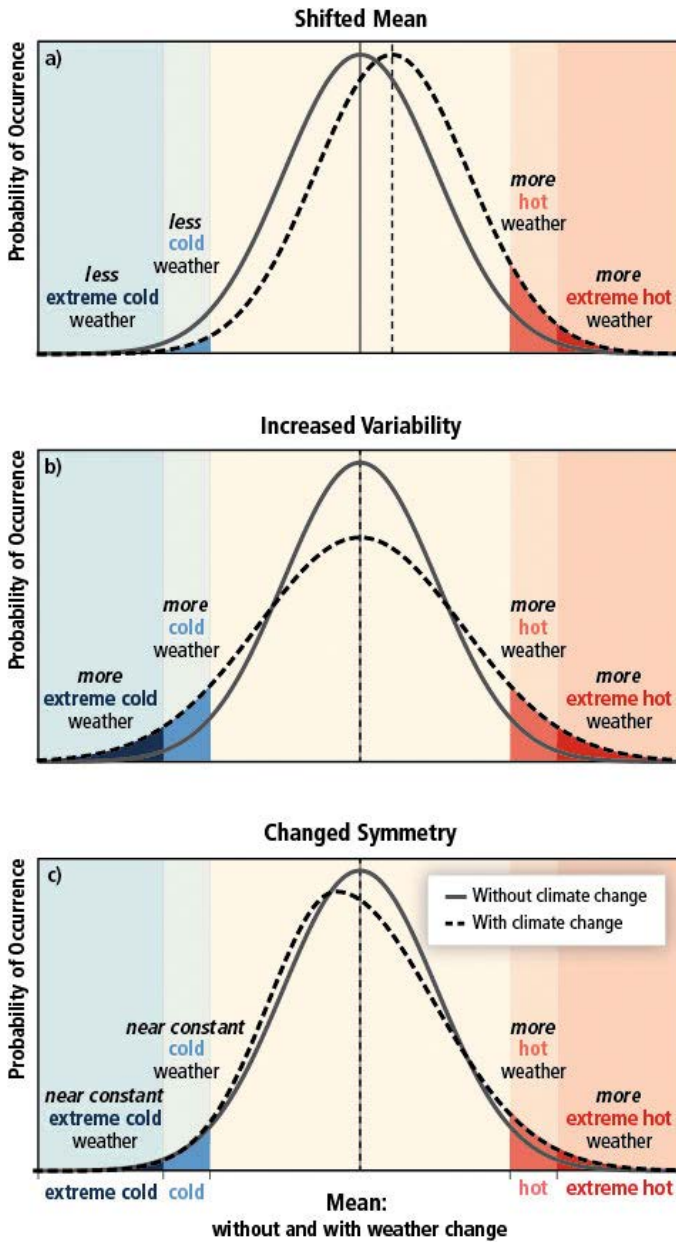


Abbildung 01: Schematische Darstellung von Auswirkungen der Temperaturänderungen auf die Extremwertverteilung.

Figure 01: Schematic presentation of effects of temperature changes on the extreme value distribution.

Quelle: IPCC, 2012

In physikalischem Kontext werden Extreme auch häufig als Ereignisse bezeichnet, die von nichtlinearen und komplexen Systemen erzeugt wurden (Chavez et al., 2015). In diesem Verständnis ist es folglich zwingend notwendig, dass die beobachteten Prozesse sich nicht linear verhalten, d. h. nach bestimmten Veränderungen ein nicht-lineares, aus bisherigen Beobachtungen nicht abzuleitendes Verhalten beschreiten. Solche komplexen Systeme sind dadurch definiert, dass deren Funktionsweise im Sinne einer Interaktion der unterschiedlichen Kompartimente noch nicht vollständig verstanden ist (Sharma et al., 2012). Typische Eigenschaften solcher komplexen Systeme sind u. a. emergentes Verhalten und Selbstorganisation. Dem gegenüber stehen Systeme, deren Einzelkomponenten sowie Interaktionen und Wechselwirkungen umfassend verstanden und somit klar determinierbar sind. Während der Umgang mit letzteren Systemen relativ einfach ist stellen gerade die komplexen Systeme, egal ob diese natürlicher oder sozioökonomischer Natur sind, die betroffenen Akteure vor große Herausforderungen.

2.3 Gesellschaftswissenschaftlicher Kontext

Extremereignisse können aber auch gemäß der realen oder potenziellen Konsequenzen betrachtet werden (Haid und Haid, 2013). In einem praxis-bezogenen Kontext wird nach Zentes et al. (2012) »Extrem« häufig für Katastrophe oder katastrophales Ereignis als Synonym genützt. Derartige Ereignisse sind durch zwei zentrale Merkmale gekennzeichnet. Erstens ist ihre Eintrittswahrscheinlichkeit sehr niedrig und der Eintritt zumeist nicht vorhersehbar. Zweitens haben sie oft sehr starke und zumeist nicht vorhersehbare Auswirkungen auf die Gesellschaft (im Englischen auch häufig als »low probability and high impact« bezeichnet). Entsprechende Kennzeichen sind folglich ein unregelmäßiges Auftreten, eine Wirkung im Sinne von Langzeiteffekten und eine zeitliche und räumliche Konzentration. Die Schädigung von Leben oder Gesundheit vieler Menschen, bzw. die Schädigung der Lebensgrundlage einer großen Bevölkerung ist ein zentrales Kriterium für diese Sichtweise von »Extremereignissen«.

Im internationalen Kontext werden Extreme auch häufig in Bezug zu Katastrophen gesetzt. Katastrophen sind hierbei definiert als Situationen, in denen die lokal betroffenen Akteure überfordert sind, sie also nicht mehr selbstständig aus eigenen Ressourcen mit den Situationen umgehen können sondern auf externe Hilfe angewiesen sind (UN-ISDR, 2017). Die UN-ISDR unterscheidet hier in *Extensive* – und *Intensive Disaster Risk* (UN-ISDR, 2017). *Extensive Disaster Risk* ist als ein häufig und mit geringer Stärke auftretender Prozess definiert, der meist nur lokal auftritt. Typische Naturgefahren sind hierbei wiederkehrende Überschwemmungen, gravitative Massenbewegungen, Stürme oder Trockenheit

und werden häufig verschärft durch Armut, Urbanisierung oder eine degradierte Umwelt. Demgegenüber ist *Intensive Disaster Risk* definiert als ein Prozess, der mit geringer Frequenz aber sehr hohen Konsequenzen auftritt. Somit sind nach UN-ISDR (2017) hier besonders große Städte oder dicht besiedelte Gebiete betroffen die nicht nur gegenüber Prozessen wie starken Erdbeben, aktivem Vulkanismus, schweren Überschwemmungen oder großen Tsunamis betroffen sind, sondern die auch eine hohe Vulnerabilität gegenüber diesen Naturgefahren besitzen. Während erstere extensive Katastrophenereignisse folglich eher lokale Extreme darstellen, sind die intensiven Katastrophenereignisse als weiträumige Extreme verstanden.

2.4 Herausforderungen

Aus den vorangegangenen Aspekten lassen sich verschiedene Herausforderungen ableiten. Es muss weiter daran gearbeitet werden zu definieren, welche Variablen und Konditionen überhaupt genutzt werden können um »Extremereignisse« zu identifizieren. Es muss weiterhin untersucht werden, welche Daten für die Charakterisierung von Extremereignissen notwendig sind, und wie diese erhoben werden können. In diesem Zusammenhang ist selbstverständlich auch zu klären, wer für die Datenerhebung, deren Speicherung und Bereitstellung zuständig ist. In einem weiteren Schritt ist zu analysieren, welche Methoden zur Erhebung von »Extremereignissen« für die verschiedenen Naturgefahren verfügbar sind, bzw. ob die existierenden Ansätze und Konzepte überhaupt geeignet sind auch Extreme zu untersuchen, oder ob hier komplett neue Ansätze gewählt werden müssen. Hierbei spielen besonders die Berücksichtigung von Unsicherheiten und mögliche inhärente Schwellenwerte eine übergeordnete Rolle. Ultimatives Ziel sollte es gerade hinsichtlich von Handlungsempfehlungen sein mit der größtmöglichen Genauigkeit, somit mit einer möglichst geringen Unsicherheit, entsprechende Extremereignisse in Szenarien abzubilden die im der präventiven Risikomanagement berücksichtigt werden können.

Von Seiten der Wissenschaft sind hier beispielweise neue mathematische, numerische, statistische Ansätze wichtig, um das Wissen über Extremereignisse zu verbessern (z. B. Haigh und Wahl, 2019). Genauso müssen aber auch die entsprechenden Risiken für die Gesellschaft weiter untersucht werden (z. B. Sharma et al., 2012; Chavez et al., 2015). Methodische und konzeptionelle Ansätze entwickelt in der Klimawandelforschung (u. a. APCC, 2014) müssen auf andere Bereiche der Forschung des Globalen Wandels ausgeweitet werden.

Auch von Seiten der Praxis wird an dieser Thematik in manchen Bereichen schon lange gearbeitet, z. B. im Kontext des Hochwassers über die EU Hochwasserrichtlinie (2007/60/EG), die in Österreich im Hochwasserrisikoplan

umgesetzt wurde (BMFLUW, 2015). Die nationale Plattform für Naturgefahren PLANAT (2009, S. 11) in der Schweiz definiert beispielsweise die Grenzbedingungen für ein Extremereignis (EHQ – Extremhochwasser) als ein »... Ereignis, welches im Rahmen des EHQ-Szenarios beschrieben wird. Die Wiederkehrperiode des EHQ wird für Wasserprozesse mit 1000 Jahren und für die gravitativen Gefahren mit 300 Jahren festgelegt.« Dagegen definiert das BMFLUW (2011, S. 24) »... das Extremhochwasser (EHQ) als außerordentliches (sehr seltenes) Ereignis, das die Dimensionierungswerte (wesentlich) übersteigt. Die Festlegung dieses Ereignisses berücksichtigt zahlreiche Faktoren, die ihrerseits sehr variabel sind. Deshalb ist eine genaue Definition, wie auch die Angabe einer Wiederkehrperiode, nicht unbedingt notwendig und zweckmäßig.« Zwar wird deutlich, dass es keine einheitliche Definition von Extremereignissen im Alpenraum beim Prozessbereich des Hochwassers gibt, aber es sind entsprechende nationale Charakterisierungen vorhanden, die in der Anwendung Richtlinien bereitstellen und aus denen Handlungsoptionen abgeleitet werden können. Bei vielen anderen Prozessbereichen wie z. B. Bodenerosion oder Waldbrand gibt es nach momentanem Kenntnisstand keine entsprechenden Charakterisierungen.

Insofern bleiben bezüglich »Extremereignisse« noch viele offene Fragen, die aus unterschiedlichster Sicht bearbeitet werden müssen. Einige exemplarische Fragen sind:

- Was sind Extremereignisse im Kontext von anderen Naturgefahren wie z. B. Schneelawinen, Sturzfluten, Dürre oder Gletschergefahren im österreichischen Alpenraum?
- Welche Datengrundlagen, Erfassungsmethoden und Modellierungsansätze gibt es für unterschiedliche Naturgefahren im österreichischen Alpenraum?
- Wie können Extreme im sozioökonomischen Kontext erfasst werden?
- Können die derzeitigen Konzepte und Methoden Extremereignisse der unterschiedlichen Naturgefahren abbilden oder sind Neuentwicklungen notwendig?
- Worin bestehen diesbezügliche Schlüsselinformationen für lokale und regionale Entscheidungsträger, die benötigt werden um Handlungsoptionen auszuarbeiten?
- Für wen ist was »extrem« und wie muss das kontextualisiert werden?
- Wie ist bei Extremereignissen mit dem definierten »Sicherheitsniveau« umzugehen?

Die Auseinandersetzung mit »Extremen« erfolgt seit vielen Jahren (z. B. Schiesser, 2003; Huppert und Sparks, 2006; McGuire, 2006; Mitchell et al., 2006; Diaz und Murane, 2008; Berz, 2009; Korup et al., 2009; Sharma et al., 2012; Chavez et al., 2015) und wird auch bereits in Österreich auf unterschiedlichen Ebenen bearbeitet. Beispielsweise hat sich das BMNT (2017, S. 3–4) der Frage der Ex-

tremereignisse bereits angenommen und identifizierte die folgenden 12 Handlungsfelder:

1. *»Aufbereitung und Verbesserung des Wissens über natürliche sowie anthropogene Treiber von extremen Naturgefahrenereignissen, sowie deren Gefahren und Risiken für den menschlichen Lebensraum.*
2. *Abschätzung und ggf. Quantifizierung von Extremereignisse (bezogen auf verschiedene Naturgefahrenentypen) hinsichtlich Häufigkeit und Intensität.*
3. *Evaluierung und angemessene Adaption der Schutzniveaus an die veränderten Risiken durch Extremereignisse (extreme Naturkatastrophen).*
4. *Faktenbasierte Politikberatung und verstärkte Bewusstseinsbildung der Bevölkerung für einen angepassten Umgang mit Extremereignissen und verbleibendem Risiko.*
5. *Anpassung von Schutzsystemen zur Erhöhung der Resilienz gegenüber extremen Ereignissen: Stärkung der Robustheit und Redundanz, Anpassung an den Überlastfall.*
6. *Verstärkte Berücksichtigung von vergangenen und zukünftigen Extremereignissen in der Raumordnung und Regionalentwicklung.*
7. *Stärkung der Eigenverantwortung und Eigenvorsorge (Objektschutz) als Beitrag zur Erhöhung der Resilienz des Siedlungsraums im Sinne des Konzepts »Building Back Better« nach eingetretenen Katastrophen.*
8. *Unterstützung und Beratung der Gemeinden zur Erhöhung der kommunalen Resilienz in der Katastrophenvorsorge und Katastrophenbewältigung.*
9. *Erforschung von Effekten, Auswirkungen und Kaskadeneffekten von Extremereignissen: Ereignisdokumentationen, Schadddatenerfassung, Erhebung von Auswirkungen auf die Gesellschaft.*
10. *Sinnvoller Einsatz von sowie Investition in Monitoring- und Frühwarnsysteme und in neue Technologien in diesem Bereich.*
11. *Förderung einer Risikokultur: Risikokommunikation und Bewusstseinsbildung für Bevölkerung und Experten/innen als Grundlage dafür, dass Extremereignisse nicht beherrscht werden können und die Gesellschaft damit umgehen lernen muss.*
12. *Anpassung der Organisationsstrukturen des Katastrophenmanagements für extreme Ereignisse, Etablierung einer übergeordneten Koordinationsinstanz (SKKM).«*

Diese Ansätze gilt es weiter zu verfolgen, zu konkretisieren und zu ergänzen. Ganz neue Methoden (z. B. Crowdsourcing, Krennert et al., 2018a,b) und internationale Ansätze müssen hierbei zukünftig mit eingebunden werden um die extremen Prozesse und deren Konsequenzen in ihrem jeweiligen Auftreten besser verstehen und abschätzen zu können. Dies wird es ermöglichen auch in der Zukunft den alpinen Raum nachhaltig nutzen zu können.

Literatur

- APCC (Hrsg.), 2014. Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, 1096 S.
- Bernet, D.B., Prasuhn, V., Weingartner, R., 2017. Surface water floods in Switzerland: what insurance claim records tell us about the damage in space and time. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, S. 1659–1682.
- Berz, G., 2009. Natural Disasters and Climate Change in the Alps. In: *Global Change and Sustainable Development in Mountain Regions*. *Alpine Space – Man & Environment*, 7, S. 53–60.
- BMFLUW, 2015. Nationaler Hochwasserrisiko-Managementplan RMP 2015. Wien, 177 S.
- BMFLUW, 2011. Leitfaden – Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten, Abteilung VII3: Wasserhaushalt, Wien, 113 S.
- BMNT, 2017. Policy Brief: Extremereignisse und Anpassungsstrategien. Wildbach- und Lawinerverbauung, Vierter Risiko Policy Dialog, Wien, 4 S.
- Brönnimann, S., Rajczak, J., Fischer, E.M., Raible, C.C., Rohrer, M., Schär, C., 2018. Changing seasonality of moderate and extreme precipitation events in the Alps. *Natural Hazards and Earth System Science*, 18, S. 2047–2056.
- Chavez, M., Ghil, M., Urrutia-Fucugauchi, J. (Hrsg.), 2015. *Extreme Events: Observations, Modeling, and Economics*. American Geophysical Union – Geophysical Monograph Series. John Wiley & Sons. Blackwell, 439 S.
- Diaz, H.F., Murane, R.J. (Hrsg.), 2008. *Climate Extremes and Society*. Cambridge University Press, New York, 340 S.
- Eccel, E., Cau, P., Riemann-Campe, K., Biasoli, F., 2012. Quantitative hail monitoring in an Alpine area: 35-year climatology and links with atmospheric variables. *International Journal of Climatology*, 32, S. 503–517.
- EU (Hrsg.), 2017. Overview of natural and man-made disaster risks the European Union may face. Publication Office of the European Union, Luxembourg, 80 S.
- Felgentreff, C., Glade, T. (Hrsg.), 2008. *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*. Spektrum Akademischer Verlag.
- Forzieri, G., Bianchi, A., Silva, F.B.E., Marin Herrera, M.A., Leblois, A., Lavallo, C., Aerts, J.C.J.H., Feyen, L., 2018. Escalating impacts of climate extremes on critical infrastructures in Europe. *Global Environmental Change*, 48, S. 97–107.
- Frei, C., Schär, C., 2001. Detection probability in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *Journal of Climate*, 14, S. 1568–1584.
- Glade, T., Bell, R., Dobesberger, P., Embleton-Hamman, C., Fromm, R., Fuchs, S., Hagen, K., Hübl, J., Lieb, G., Otto, J.-C., Perzl, F., Peticzka, R., Pranger, C., Samimi, C., Sass, O., Schöner, W., Schröter, D., Schrott, L., Zangerl, C., Zeidler, A. 2014. Der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre. In: *Austrian Panel on Climate Change (Hrsg.), Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14)*, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich S. 557–600.
- Glade, T., Stötter, J., 2008. Gravitative Massenbewegungen und Schneelawinen. In: C. Felgentreff, T. Glade (Hrsg.), *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, S. 151–164.
- Haid, H., Haid, B., 2013. *Naturkatastrophen in den Alpen*. Haymon Verlag.

- Haigh, I.D., Wahl, T., 2019. Advances in extreme value analysis and applications to natural hazards. *Natural Hazards*, 98(3), S. 819–822.
- Hartmann, D.L., Klein Tank, A.M.G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dlugokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M., Zhai, P.M., 2013. Observations: Atmosphere and Surface. In: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Hrsg.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge/United Kingdom/New York, S. 159–254.
- Hewitt, K., Clague, J.J., Orwin, J. F., 2008. Legacies of catastrophic rock slope failures in mountain landscapes. In: *Earth-Science Reviews*, 87, S. 1–38.
- Hofstätter M., Blöschl, G., 2019. Vb cyclones synchronized with the Arctic-/North Atlantic Oscillation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 124(6), S. 3259–3278.
- Hofstätter, M., Lexer, A., Homann, M., Blöschl, G., 2018. Large-scale heavy precipitation over central Europe and the role of atmospheric cyclone track types. *International Journal of Climatology*, 38, S. 497–517.
- Huppert, H.E., Sparks, R.S., 2006. Extreme natural hazards: population growth, globalization and environmental change. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364, S. 1875–1888.
- Interpraevent (2009): *Alpine Naturkatastrophen: Lawinen Muren Felsstürze Hochwässer*. Stocker Verlag Graz.
- IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012: Summary for Policymakers. In: *Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge/New York, S. 3–21.
- Keiler, M., Knight, J., Harrison, S., 2010. Climate change and geomorphological hazard in the eastern European Alps. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 368, S. 2461–2479.
- Kirnbauer, R., Pistotnik, G., Blöschl, G., 2016. Klimawandel als Herausforderung für die Wildbachverbauung. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 178, S. 58–77.
- Korup, O., John J. Clague, 2009. Natural hazards, extreme events, and mountain topography. In: *Quaternary Science Reviews*, 28(11/12), S. 977–990.
- Krennert, T., Kaltenberger, R., Pistotnik, G., Holzer, A.M., Zeiler, F., Stampfl, M., 2018a. Trusted Spotter Network Austria – a new standard to utilize crowdsourced weather and impact observations. *Advances in Science and Research*, 15, S. 77–80.
- Krennert, T., Pistotnik, G., Kaltenberger, R., Csekits, C., 2018b. Crowdsourcing of weather observations at national meteorological and hydrological services in Europe. *Advances in Science and Research*, 15, S. 71–76.
- Lexer, A., Hofstätter, M., Höfler, A., 2017. REGIOKONVEKT 2017-17. AP5 – Veränderung konvektiver Starkniederschläge (CONVEX). Projektbericht. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.
- Mazas, F. 2019. Extreme events: a framework for assessing natural hazards. *Natural Hazards*, 98(3), S. 823–848.

- McGuire, W.J., 2006. Global risk from extreme geophysical events: threat identification and assessment. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364, S. 1889–1909.
- McPhillips, L.E., Chang, H., Chester, M.V., Depietri, Y., Friedman, E., Grimm, N.B., Kominoski, J.S., McPhearson, T., Méndez-Lázaro, P., Rosi, E.J., Shafiei Shiva, J., 2018. Defining Extreme Events: A Cross-Disciplinary Review. *Earth's Future*, 6, S. 441–455.
- Mitchell, J.F., Lowe, J., Wood, R.A., Vellinga, M., 2006. Extreme events due to human-induced climate change. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364, S. 2117–2133.
- Mortlock, T.R., Metters, D., Soderholm, J., Maher, J., Lee, S.B., Boughton, G., Stewart, N., Zavadil, E., Goodwin, I.D. 2018. Extreme water levels, waves and coastal impacts during a severe tropical cyclone in northeastern Australia: A case study for cross-sector data sharing. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, S. 2603–2623.
- PLANAT 2009. Risikokonzzept für Naturgefahren – Leitfaden, Verzeichnisse: Literaturverzeichnis und Glossar, 16 S.
- Santhanam, M.S., 2012. Extreme Event Recurrence Time Distributions and Long Memory. In: A. Surjalal Sharma, A. Bunde, V.P. Dimri, D.N Baker (Hrsg.), *Extreme Events and Natural Hazards: The Complexity Perspective*, Geophysical Monograph Series, 196, S. 335–334.
- Scherrer, S.C., Fischer, E.M., Posselt, R., Liniger, M.A., Croci-Maspoli, M., Knutti, R., 2016. Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. *Journal of Geophysical Research*, 121, S. 2626–2637.
- Schuesser, H., 2003. *Extremereignisse und Klimaänderung. Hagel. Bericht des Beratenden Organs für Fragen der Klimaänderung*, Bern, 88 S.
- Schneuwly-Bollschweiler, M., Stoffel, M., Rudolf-Miklau, F. (Hrsg.), (2013). *Dating torrential pro-cesses on fans and cones: methods and their application for hazard and risk assessment. Advances in Global Change Research*, 47, Springer Science & Business Media, 439 S.
- Schoklitsch, A., 1914. Die Hochwasserkatastrophe in Graz am 16. Juli 1913. *Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur- und Architektenvereins*, 27, S. 511–516.
- Schwarzl, S., 1972. Die meteorologischen Ursachen der Unwetterkatastrophe vom 12. zum 13. August 1958 im Raume der Fischbacher Alpen (Stmk.). *Wetter und Leben*, 24(7/8), S. 150–159.
- Sharma, A.S., Baker, D.N., Bhattacharyya, A. Bunde, A., Dimri, V.P., Gupta, H.K., Gupta, V.K., Lovejoy, S., Main, I.G., Schertzer, D., von Storch, H., Watkins, N.W., 2012. Complexity and extreme events in geosciences: An overview. *Geophysical Monograph Series*, 196, S. 1–16.
- Smolka, A., 2006. Natural disasters and the challenge of extreme events: risk management from an insurance perspective. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364, S. 2147–2165.
- Troschl, H., 1967. Die neuerliche Niederschlags- und Hochwasserkatastrophe im österreichischen Südalpengebiet vom 3.–5. November 1966. *Wetter und Leben*, 19(1/2), S. 1–12.
- UN-ISDR, 2017. Report of the open-ended intergovernmental expert working group on indicators and terminology relating to disaster risk reduction. *Unite Nations*, A/71/644, 41 S.

- WMO, 2015. World Meteorological Organization Guidelines on Multi-hazard Impact-based Forecast and Warning Services. https://www.wmo.int/pages/prog/www/DPFS/Meetings/ET-OWFPS_Montreal2016/documents/WMOGuidelinesonMulti-hazardImpact-basedForecastandWarningServices.pdf [28.02.2020].
- Yin, J., Gentile, P., Zhou, S., Sullivan, S.C., Wang, R., Zhang, Y., Guo, S., 2018. Large increase in global storm runoff extremes driven by climate and anthropogenic changes. *Nature Communications*, 9, S. 4389.
- Zentes, J., Lehnert, F., Beham, F., Roßbach, J., 2012. Extremereignisse – eine unkontrollierbare Gefahr?: Risikominimierende Strategien für herstellende Unternehmen. Institut für Handel und Internationales Marketing, Saarbrücken.
- Zettl, H., 1958. Die Unwetterkatastrophe in der Steiermark am 12. und 13. August 1958. *Mitteilungsblatt des Hydrografischen Dienstes in Österreich*, 23, S. 1–11.

3 Ziele des Extrema Berichts

Thomas Glade und Martin Mergili*

Aufgrund der ganz unterschiedlichen Ausgangslage in der Kenntnis über Extremereignisse von Naturgefahren und deren potenziellen gesellschaftlichen Auswirkungen im österreichischen alpinen Raum ist es Ziel des Extrema 2019 Berichtes, das vorhandene Wissen zu einzelnen ausgewählten Prozessbereichen und sozioökonomischen Herausforderungen zusammenzufassen und in den Kontext des Katastrophenmanagements zu setzen. Die verbesserte Kenntnis der Sachlage soll eine Basis für die Wissenschaft und die anwendungsorientierte Praxis sein um das Seltene vor dem Hintergrund des Bekannten und Bewussten besser abschätzen zu können. Dies soll helfen einerseits noch offene wissenschaftliche Fragestellungen zu identifizieren, andererseits aber auch den betroffenen Akteuren die potenziellen Herausforderungen aufzeigen um im Folgenden die Möglichkeit zu geben daraus nachhaltige Handlungsoptionen zu entwickeln.

Der Bericht fasst den aktuell verfügbaren Stand des Wissens über das Auftreten von Extremereignissen sowie deren Ursachen, auslösenden Prozessen und Folgen in Österreich zu folgenden Gefahrenarten zusammen:

- Meteorologische Gefahren wie Niederschlagsverteilung, Starkniederschläge und Hagel, Extremtemperaturen und Trockenheit, Sturm, Schnee- und Eislast;
- Hydrologische Gefahren wie Nieder- und Hochwasser in Flüssen, Sturzfluten, Hochwasser mit Feststoffereignissen in Wildbächen (Murartiger Transport, Wildholz), Bodenerosion;
- Gefahren durch gravitative Massenbewegungen inklusive Sturzprozessen (Felslawinen und Bergstürze, Steinschlag und Felssturz), flachgründige Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren, tiefgründige Massenbewegungen mit Erdströmen und Muren sowie Lawinen;

* Thomas Glade, Universität Wien, Institut für Geographie und Regionalforschung, thomas.glade@univie.ac.at.

Martin Mergili, Universität Wien, Institut für Geographie und Regionalforschung, martin.mergili@univie.ac.at.

- Periglaziale und glaziale Gefahren wie den Folgen der Permafrostdegradation, Schneelawinen (Fließ- und Staublawinen) und Gletschergefahren;
- Erdbeben;
- der Umgang mit Überlastfällen;
- Multi-Gefahren und potenzielle Kaskadeneffekte der vorangegangenen Gefahrenbereiche; sowie
- Extremereignisse mit zerstörender Wirkung auf Schutzwälder (Waldbrand)

Ebenso werden gesellschaftsrelevante Aspekte wieder Schutz kritischer Infrastrukturen, Vulnerabilität, ökonomische Dimensionen und Management im Katastrophenschutz im Detail betrachtet.

Die Analyse der jeweiligen Themen erfolgt unter besonderer Berücksichtigung der Folgen des klimatischen und gesellschaftlichen Wandels. Dabei wird ein besonderer Fokus auf Veränderungen und Trends in der Häufigkeit und Magnitude sowie im Ablauf von Extremereignissen gelegt. Neben Fachbegriffen, historischen Entwicklungen und Fallbeispielen werden auch Einschätzungen des Sachstandes und Unsicherheiten, mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen, sowie Perspektiven für Handlungsoptionen zu den einzelnen Themenbereichen erarbeitet. Die jeweiligen Beiträge sind von österreichischen Expert*innen, bzw. internationalen in Österreich forschenden Expert*innen in einzelnen *State of the Art* Berichten zusammengestellt. Der Bericht fasst den Stand des Wissens über Extremereignisse so zusammen, dass er als Grundlage für einen fachpolitischen Diskurs geeignet ist.

Teil II: Extremereignisse einzelner Prozesse und Prozessbereiche

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

A Meteorologische Extremereignisse

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

4 Extremtemperaturen und Trockenheit

Wolfgang Schöner und Klaus Haslinger*

Zusammenfassung

Extremtemperaturen sind sowohl bei extrem niedrigen (Kälteperioden) als auch bei extrem hohen Temperaturen (Hitzeperioden) eine unmittelbare Gefahr für den Menschen. Durch die allgemeine Temperaturzunahme und auch durch den zukünftigen Klimawandel wird sich der, in den Beobachtungen bereits manifestierte, Trend des Hitzestress weiter verstärken, der Kältestress jedoch abschwächen. Trockenheit ist hingegen, sowohl auf der Raum- als auch der Zeitskala, deutlich komplexer, da stark vom Niederschlagsmangel gesteuert. Aus Temperatur und Niederschlag abgeleitete Zeitreihen der Trockenheit für die letzten 200 Jahre zeigen, dass die größten Dürren in den 1860er und 1940er Jahren auftraten. Durch den Klimawandel wird sich die Situation der Winterniederwässer in den Alpen Bereichen Österreichs eher entspannen, die Sommertrockenheit in den Tieflagen weiter verschärfen.

Abstract

Extreme temperatures are an immediate danger to humans both at extremely low (cold periods) and at extremely high temperatures (heat periods). The general increase in temperature and the future climate change will further increase the heat exposure, but reduces the demands related to cold temperatures. Drought, on the other hand, is much more complex, both on the spatial and the time scale, as it is significantly controlled by precipitation deficits. Drought time series derived from temperature and precipitation for the past 200 years show that the largest droughts occurred in the 1860s and 1940s. Due to climate change, the occurrence of winter low flows in the Alpine areas of Austria will tend to decrease, while summer droughts will increase in the lowlands.

Kernaussagen

- Temperaturextreme im Sinne von Hitze spielen für Seehöhen über ca. 800 m keine Rolle, in tiefen Lagen, unter 800 m Seehöhe, haben sie in den letzten Dekaden zugenommen und werden auch in Zukunft weiter zunehmen
- Veränderungen der Lufttemperatur im Bereich von 0 °C steuern den Anteil von Niederschlag in fester bzw. flüssiger Form und auch die Schneeschmelze (gekoppelt über

* Wolfgang Schöner, Universität Graz, Institut für Geographie und Regionalforschung, wolfgang.schoener@uni-graz.at.

Klaus Haslinger, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Klimasystem und Klimafolgen, klaus.haslinger@zamg.ac.at.

die Strahlung), die für mehrere Prozesse im Zusammenhang mit Naturgefahren im Gebirge einen unmittelbaren Einfluss haben

- Trockenheit nimmt zwar mit der Seehöhe deutlich ab, jedoch kann auch in höheren Lagen Trockenheit entstehen die z. B. Waldbrände oder extremen Schädlingsbefall mitauslöst oder zur Folge hat
- Niederwasser ist in Hochlagen durch die winterliche Schneedecke bestimmt und entschärft sich durch den Klimawandel, in tieferen Lagen ist die Niederwassersituation jedoch durch die sommerliche Verdunstung bestimmt und verschärft sich.

Key Points

- Temperature extremes in terms of heat play no role for altitudes above 800 m a.s.l., in low elevations, below 800 m a.s.l., they have increased in recent decades and will continue to increase in the future
- Changes of the air temperature close to 0 °C define the proportion of precipitation in solid or liquid form and also the amount of snow melt (coupled by radiation), which is highly relevant for a series of processes linked to natural hazards in mountains
- Although drought decreases markedly with the altitude, it can also occur at higher altitudes, which can trigger or lead to forest fires or extreme pest infestations
- Low flows are caused by the winter snowpack at high altitudes and will be eased by climate change, however, at lower altitudes low-flows are caused by evaporation in summer and have been exacerbated.

4.1 Definition und Terminologie des Sachverhaltes

4.1.1 Naturgefahren durch Extremtemperaturen

Naturgefahren durch Extremtemperaturen beziehen sich meist auf die Wirkung der Lufttemperatur auf das physiologische Befinden des Menschen. Dabei wirken sowohl extrem kalte wie auch extrem heiße Temperaturen auf den Menschen. Ursächlich werden mit Extremtemperaturen meist Hitzetage oder Hitzeperioden, sowie daraus resultierende Krankheiten und, im Extremfall, Todesfälle (»Hitzetote«), in Zusammenhang gebracht. Eine robuste Statistik der Todesfälle durch Hitze ist jedoch schwierig. Für Österreich wird angenommen, dass die Anzahl der Todesfälle durch Hitze größer ist als die Anzahl der Verkehrstoten (AGES, 2018). Da die Lufttemperatur deutlich mit der Seehöhe abnimmt, nehmen jedoch auch die Herausforderungen durch extrem heiße Temperaturen mit der Seehöhe deutlich ab und stellen im alpinen Raum oberhalb ca. 800 m Seehöhe keine Gefahr dar (Abbildung 01).

Das physiologische Befinden des Menschen wird im Allgemeinen mit der thermischen Behaglichkeit beschrieben, die den Zusammenhang zwischen Wohlbefinden und der Lufttemperatur herstellt. Die Lufttemperatur wird dabei als ein sehr guter Proxy für die Energiebilanz des Menschen verwendet. Für den Menschen

entsteht Hitzestress, wenn die vom Körper aufgenommene Energie gegenüber der abgebbaren Energie überwiegt. In umgekehrte Weise kann es zu einem Kältestress kommen. Um diese Situationen mit einfachen Masszahlen zu belegen wurden in der Literatur entsprechende Indizes entwickelt (siehe Kapitel 4.1.2).

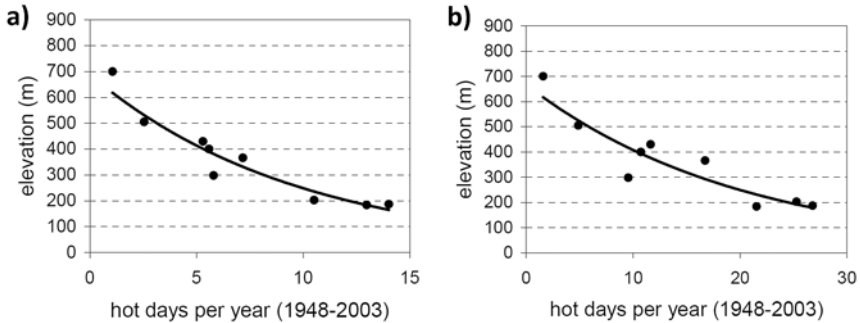


Abbildung 01: Mittlere Anzahl der Hitzetage nach Kysely pro Jahr (a) im Zeitraum 1948 bis 2003 in Abhängigkeit von der Seehöhe und deren Zunahme (b) im Zeitraum 1948 bis 2003 in Abhängigkeit von der Seehöhe für Österreich.

Figure 01: Dependence of mean number of hot days per year according to Kysely on elevation (a) for 1948 to 2003 and dependence of the increase of hot days on elevation (b) during 1948 to 2003 in Austria.

Quelle: Auer et al., 2005

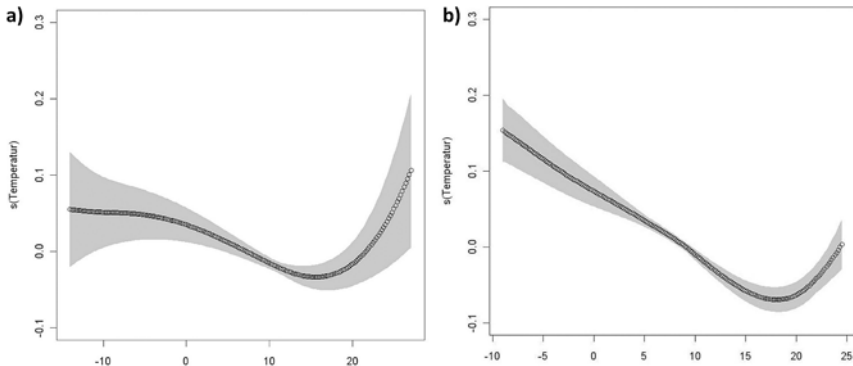


Abbildung 02: Regressionspläne (mit punktwisen 95 %-Konfidenzintervallen) für die Expositions-Wirkungsbeziehung auf der logarithmierten Skala zwischen dem 2-Tage-Mittel der Lufttemperatur (Lags 0 und 1) und Änderung der Mortalität (s) aufgrund natürlicher Todesursachen (a). Selbe Darstellung für 14-Tage-Mittel (Lags 0 bis 13) (b).

Figure 02: Regression-spline (with pointwise 95 % confidence intervals) for the exposure-effect relationship at the logarithmic scale between the 2-day mean air temperature (Lags 0 and 1) and change in mortality (s) due to natural causes of death (a). Same display for 14-day average (Lags 0 to 13) (b).

Quelle: Schneider et al., 2009

Abbildung 02 zeigt, dass ein Zusammenhang zwischen der Lufttemperatur und Todesfällen bei extrem heißen und extrem kalten Temperaturen besteht (abgeleitet für den städtischen Bereich, siehe Schneider et al., 2009).

4.1.2 Quantitative Beschreibung von Temperaturextremen mittels Kenngrößen

Für die Beschreibung von Temperaturextremen wurden in der Klimatologie mehrere Kenngrößen entwickelt. Diese beziehen sich einerseits auf die Auszählung von Tagen die einen Temperaturschwellwert über- oder unterschreiten. Andererseits gibt es für die Festlegung von Kälte- oder Hitzeperioden auch Definitionen basierend auf mehreren Kriterien. Dafür werden neben der Temperatur weitere Größen in die Betrachtung mit aufgenommen, wie etwa die Luftfeuchte, Strahlung oder Windgeschwindigkeit, wodurch die Stresswirkung auf den menschlichen Organismus besser abgeschätzt werden kann (z. B. Wind Chill Temperature, gefühlte Lufttemperatur, Apparent Temperature).

In Tabelle 01 werden Beispiele wichtiger und weit verbreiteter Indizes für Temperaturextreme angeführt:

Tabelle 01: Beispiele von Indizes zur Beschreibung von Temperaturextremen.
Table 01: Examples of indices for the description of temperature extremes.

Index	Beschreibung
Eistag	Tag, an dem die Tageshöchsttemperatur tiefer als 0,0 °C liegt
Frosttag	Tag, an dem die Tagesniedrigsttemperatur unter 0,0 °C liegt
Frostwechseltag	Tag, an dem die Maximumtemperatur über 0 °C und die Minimumtemperatur des selben Tages unter 0 °C liegt
Sommertag	Tag, an dem die Tageshöchsttemperatur 25,0 °C erreicht oder überschreitet
Heißer Tag	Tag, an dem die Tageshöchsttemperatur 30,0 °C erreicht oder überschreitet
Wüstentag	Tag, an dem die Tageshöchsttemperatur 35,0 °C erreicht oder überschreitet
Tropennacht	Eine Tropennacht ist eine Nacht, in der das Minimum der Lufttemperatur größer oder gleich 20 °C beträgt.

Die Berechnung von Hitzeperioden folgt oft der Definition von Kysely et al. (2000), wobei drei Bedingungen erfüllt sein müssen:

- 1) Mindestens 3 aufeinander folgende Tage müssen jeweils ein Temperaturmaximum von zumindest 30 °C aufweisen,
- 2) das Maximum der einzelnen darauf folgenden Tage liegt nicht unter 25 °C und

3) das mittlere Temperaturmaximum während der gesamten Periode unterschreitet nicht $30\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Eine in ähnlicher Weise definierte und verbreitete Definition von Kälteperioden/ Kältewellen liegt nicht vor. Seitens der WMO wurde aber kürzlich eine Definition empfohlen, welche die Dauer und Schwere der Kälteperiode beinhaltet (WMO, 2015).

Im Zusammenhang mit schnee-/eisbedingten Naturgefahren ist die sogenannte Temperatursumme (Gradtagszahl oder Gradtagssumme) eine sehr relevante meteorologische Größe, die eine sehr gute Proxygröße für den Energiefluss zwischen Atmosphäre und Oberfläche darstellt. Dabei werden, im Falle von Schnee- und Eisobeflächen, über einen definierten Zeitraum die Temperatursummen $> 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ ausgezählt.

4.1.3 Naturgefahren durch Trockenheit (Dürre)

Während sich der Begriff Hitze auf das Wohlbefinden des Menschen fokussiert, hat der Begriff Trockenheit (Dürre) eine breites praktisches Bedeutungsspektrum. In Lehrbüchern werden dazu meist mehrere Unterbegriffe der Trockenheit unterschieden:

- Atmosphärische Trockenheit (Niederschlagsdefizit)
- Landwirtschaftliche Trockenheit (Trockenheit im Boden)
- Hydrologische Trockenheit (Niederwasser, Niedrigwasser)
- Soziökonomische Trockenheit

Trockenheit (Dürre) ist somit durch Wasserdefizit definiert, welches vorwiegend durch Niederschlagsmangel oder Verdunstungsüberschuss entsteht. Durch Trockenheit kommt es zu wesentlichen Einschränkungen für Landwirtschaft, Forstwirtschaft oder die Wasserversorgung und bei Überschreiten von kritischen Werten können Extremsituationen eintreten. Trockenheit wird daher selbst als Naturgefahr bezeichnet, gleichzeitig bildet Trockenheit aber auch die Grundlage für weitere Naturgefahren wie etwa Waldbrände, Ernteauffälle oder Schädlingsbefall (die hier nicht behandelt werden).

4.1.4 Quantitative Beschreibung von Trockenheit (Dürre) – Extremereignisse

Zur Erfassung sowie zur Beschreibung von raumzeitlichen Änderungen trockener (meteorologischer) Bedingungen hat sich die Anwendung von Dürre-Indizes bewährt (siehe Tabelle 02), wobei verschiedene Variablen herangezogen

werden. So gibt es etwa rein Niederschlags-basierte Indizes sowie solche die die Wasserbilanz vereinfacht abbilden versuchen und somit näher am Bodenwasserhaushalt bzw. am (sommerlichen) Niederwasser-Prozess angesiedelt sind. Zu den zuletzt genannten Indizes gehören u. a. der Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI, Vicente-Serrano et al., 2010), der die klimatische Wasserbilanz (Niederschlag minus potentieller Verdunstung) abbildet, sowie der self-calibrating Palmer Drought Severity Index (scPDSI, Wells et al., 2004), der einen einfachen Bodenfeuchte-Indikator darstellt.

Herkömmliche Trockenindizes bilden die Wasserbilanz auf Basis von Monatswerten und ohne Berücksichtigung der Schneedecke ab. Für den alpinen Raum spielt jedoch die Schneedecke als Speichergröße der Wasserbilanz eine sehr wichtige Rolle. Dazu wurde von Staudinger et al. (2014) kürzlich der Standardized Snow Melt and Rain Index SMRI vorgestellt, der auch die Schneespeicherung und Schneeschmelze berücksichtigt.

Tabelle 02: Beispiele von Indizes zur Beschreibung von Trockenheit und Niederwasser.
Table 02: Examples of indices characterizing droughts and low-flows.

Index	Bezeichnung (Referenz)
SPI	Standardized Precipitation Index (McKee et al., 1993)
SPEI	Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (Vicente-Serrano et al., 2010)
SWSI	Surface Water Supply Index (Shafer and Dezman, 1982)
SSI	Standardized Streamflow Index (Lopez-Moreno et al., 2009)
SRMI	Standardized Snow Melt and Rain Index (Staudinger et al., 2014)

Die Verwendung der Indizes erlaubt eine klare Festlegung von Extremwerten, da sich die Indexwerte auf die Häufigkeitsverteilung des Niederschlags (Wasserhaushalts) beziehen, wobei beide Größen nicht der Normalverteilung gehorchen, was eine Transformation notwendig macht (siehe z. B. McKee et al., 1993 oder Vicente-Serrano et al., 2010). Die Definition von extremer Trockenheit ist in Tabelle 03 am Beispiel des SPI und des SPEI gezeigt, ist bei anderen Trockenindizes aber ähnlich definiert.

Tabelle 03: Definition von Trockenheit Intensitäten basierend auf dem SPI und SPEI.
Table 03: Definition of drought intensity based on the SPI and SPEI.

SPI/SPEI Wert	Trockenheitskategorie
0.00 bis -0.99	Geringe Trockenheit (mild drought)
-1.00 bis -1.49	Mäßige Trockenheit (moderate drought)
-1.50 bis -1.99	Starke Trockenheit (severe drought)
≤ 2.00	<i>Extreme Trockenheit (extreme drought)</i>

Neben der Trockenheit an der Oberfläche bzw. im Boden ist Niederwasser in Fließgewässern (hydrologische Trockenheit) eine weitere wesentliche Ausprägung von Trockenheit, wozu auch eine Vielzahl von Studien für Österreich vorliegen (siehe die Übersichtsdarstellung in Blöschl et al., 2017). Niederwasser, oft mittels dem Q_{95} (also jener Abfluss, welcher an 95 % Prozent der Tage im Jahr (347) überschritten wird) beschrieben, hat für das jahreszeitliche Auftreten (Winter vs. Sommer) und für Veränderungen über die Zeit eine deutliche Abhängigkeit von der Seehöhe, welche durch die Schneedecke bedingt ist und damit einen klaren räumlichen Bezug von Niederwasser erzeugt. Hochgelegene Regionen sind durch Winterniederwasser (sehr tiefe Temperaturen als Treiber → Gefrierprozesse), tiefelegene Regionen in Österreich durch Sommerniederwasser geprägt (sehr hohe Temperaturen als Treiber → Verdunstungsprozesse) (Laaha und Blöschl, 2006).

4.2 Historische Entwicklung

4.2.1 Historische Entwicklung von Temperaturextremen in Österreich

Die tiefste von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) für Österreich gemessene Temperatur beträgt $-37,4\text{ °C}$ und wurde 2. Jänner 1905 am Sonnblick beobachtet (Auer et al., 2002). Die höchste vom Messnetz der ZAMG erfasste Temperatur wurde am 8. August 2013 mit $40,5\text{ °C}$ für Bad Deutsch-Altenburg gemessen (ZAMG, 2013). Die Anzahl der Frosttage und Eistage weisen eine klare Abhängigkeit von der Seehöhe auf, die sich aus der allgemeinen Höhenabhängigkeit der Lufttemperatur erklärt. Abbildung 03 zeigt das an Beispiel von Klimastationen im Bereich des Sonnblicks in den Hohen Tauern sowie Stationen in der weiteren Umgebung. Der Jahresgang der Lufttemperatur führt auch zu einem typischen Jahresgang der Eis- und Frosttage mit einem Minimum im Sommer und einem Maximum im Winter. Eine interessante anwendungsnahe Größe sind die sogenannten Frostwechseltage, die sich als Differenz von Frost- und Eistagen ergeben. Frostwechseltage sind ein gutes Maß für die sich jahreszeitlich ändernde Frostaktivität, also wenn es durch das Über-/Unterschreiten der Grenztemperatur von 0 °C zu Schmelzen und Wiedergefrieren von Wasser im Untergrund kommen kann. Während am Sonnblick (3.105 m) die Frostwechseltage ihren größten Wert im Sommer erreichen, treten in einer Seehöhe von ca. 1.000 m die meisten Frostwechseltage im Frühjahr auf. Auch ist die Anzahl der Frostwechseltage in 1.000 m deutlich höher als im Bereich des Sonnblicks.

Die langfristige Entwicklung der Frosttage wird in Abbildung 04 für ausgewählte Stationen in Österreich gezeigt. Deutlich ist die Abnahme der Frosttage in

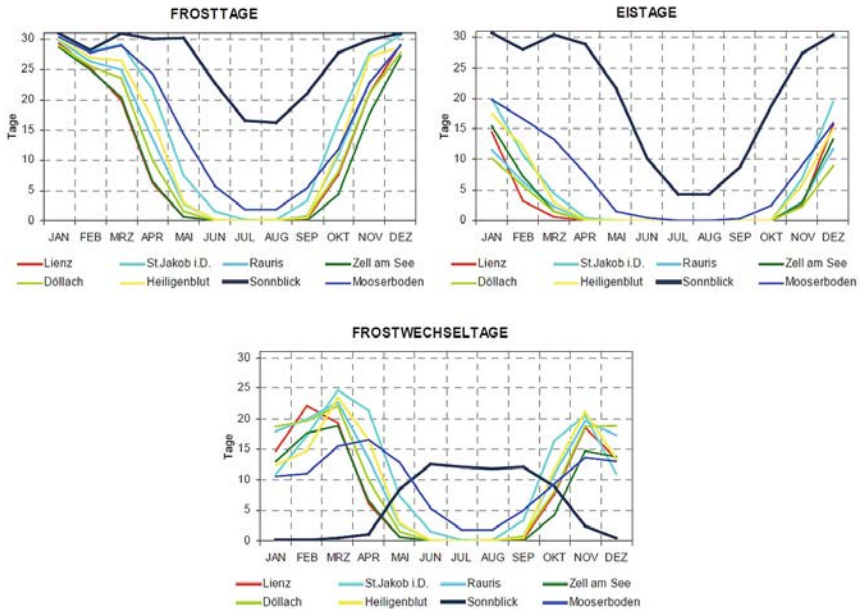


Abbildung 03: Jahresgang von Frosttagen ($T_{\min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), Eistagen ($T_{\max} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) und Frostwechseltagen (Frosttage minus Eistage) als Mittel der Periode 1961–1990.

Figure 03: Annual course of frost days ($T_{\min} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$), ice days ($T_{\max} < 0\text{ }^{\circ}\text{C}$) and frost-transition days (frost days minus ice days) as average over the period 1961–1990.

Quelle: Auer et al., 2002

hohen Lagen im Sommer (z. B. ungefähr –20 Tage in den letzten 100 Jahren am Sonnblick) sowie in tiefen Lagen im Winter (z. B. ungefähr –20 Tage in den letzten 100 Jahren in Wien) zu erkennen. Noch relevanter als die Veränderung der Frost- und Eistage für Prozesse im Hochgebirge (z. B. Permafrostveränderung, Gletscherschmelze) ist die Abnahme des Anteils des festen Niederschlags durch die beobachtete Temperaturzunahme. Der Anteil des festen/flüssigen Niederschlags wird durch die Lufttemperatur bestimmt und kann durch ein einfaches empirisches Modell aus Monatsmittelwerten bestimmt werden, Das wird in Abbildung 05 am Beispiel einer modellierten Zeitreihe für den Bereich des der Öztaler Alpen (für eine Seehöhe von 2.640 m a.s.l.) gezeigt, die bis 1800 zurück reicht (Böhm und Hiebl, 2013). Auffallend sind mehrere extreme Jahre, ganz besonders das Jahr 2003, in dem nur etwa 20 % des Niederschlags in Form von Schnee gefallen ist. Das ist der niedrigste Wert der gesamten Zeitreihe und ist nur ca. die Hälfte des durchschnittlichen Schneeniederschlag-Anteils der Periode 1961–90.

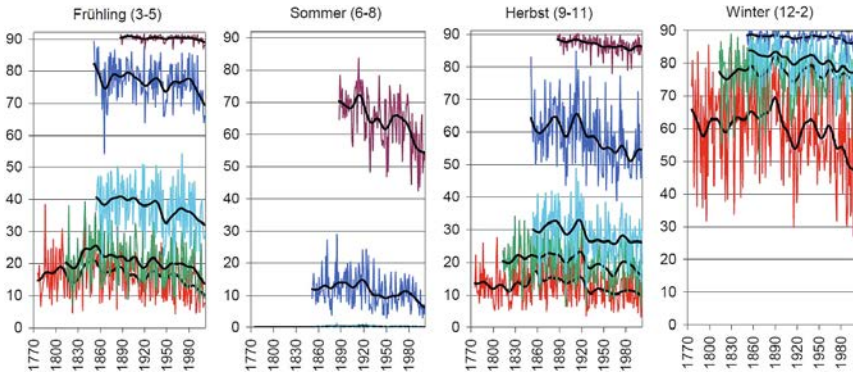


Abbildung 04: Ausgewählte Zeitreihen der Frosttage in Österreich (Einzelj. und 30-j. Tiefpass) rot: Wien (202 m), grün: Klagenfurt (459 m), hellblau: Bad Gastein (1.100 m), blau: Villacher Alpe (2.160 m), violett: Sonnblick (3.106 m) für verschiedene Jahreszeiten. y-Achse: Anzahl Frosttage.

Figure 04: Selected time series of seasonal frost days in Austria (single and 30-year lowpass filtered values) red: Vienna (202 m), green: Klagenfurt (459 m), light blue: Bad Gastein (1.100 m), blue: Villacher Alpe (2.160 m), violet: Sonnblick (3.106 m). y-axis: Number of frost days.

Quelle: Auer et al., 2003

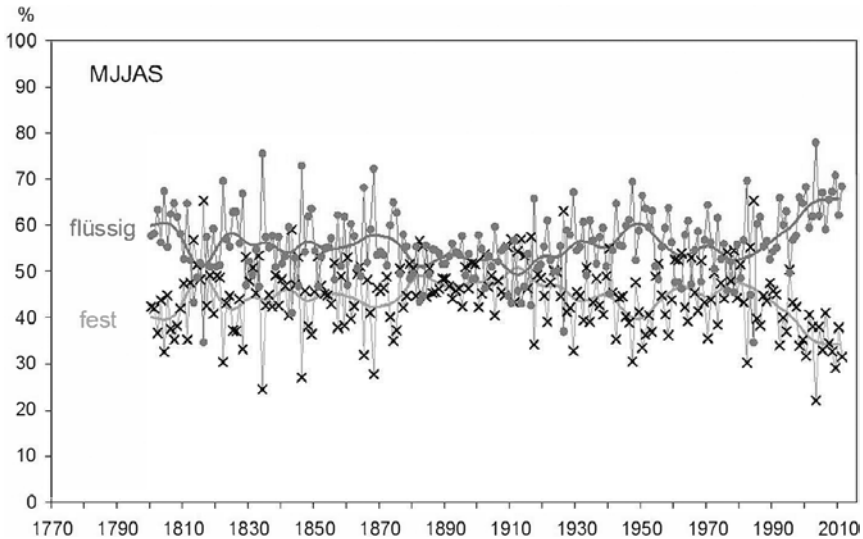


Abbildung 05: Anteil des festen (hellgrau) und des flüssigen (dunkelgrau) Niederschlages am saisonalen Gesamtniederschlag an der Pegelstation Vernagtbach (2.640 m) in der Ablationsperiode (Mai–September).

Figure 05: Proportion of solid (light gray) and liquid (dark gray) precipitation on seasonal total precipitation at Vernagtbach gauge station (2.640 m) in the ablation period (May–September).

Quelle: Böhm und Hiebl, 2013

4.2.2 Historische Entwicklung von Trockenheit in Österreich

Verschiedene Analysen zur Trockenheit für den Alpenraum zeigen, dass Österreich in den letzten Dekaden im Übergangsbereich zwischen einem Trend hin zu trockeneren Bedingungen für den mediterranen Raum und zu feuchteren Bedingungen in Nordeuropa liegt (siehe z. B. Blöschl et al., 2017). Daher sind die Änderungsgrößen für diesen Übergangsbereich uneinheitlich, oft sogar widersprüchlich und stark von der Wahl des Dürre-Index abhängig (IPCC, 2012).

Auswertungen eines Bodenfeuchte-Indikators (scPDSI) für den Alpenraum von Schrier et al. (2007) über die letzten 200 Jahre (1801–2003) zeigen eine sehr hohe Variabilität auf dekadischen Zeitskalen, jedoch keine Trends. Die späten 1850er bis 1870er sowie die 1940er Jahre stechen als Perioden persistenter und außergewöhnlicher Trockenheit hervor. Die trockensten Sommer traten in den Jahren 1865, 1950 sowie 2003 auf.

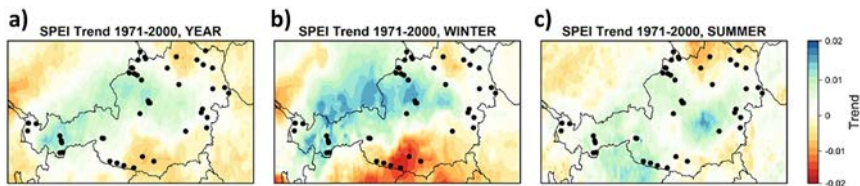


Abbildung 06: Trends des Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) von 1971–2000 für das Gesamtjahr (a), Winter (b) und Sommer (c); negative (positive) Werte kennzeichnen einen Trend zu trockeneren (feuchteren) Bedingungen.

Figure 06: Trends of the Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) from 1971–2000 for the full year (a), winter (b) and summer (c); negative (positive) values indicate a trend towards drier (wetter) conditions.

Quelle: Laaha, 2014

Abbildung 06 zeigt Trends der klimatischen Wasserbilanz mittels des weiter oben beschriebenen SPEI für den Zeitraum 1971–2000. Für den meteorologischen Winter deckt sich das Bild sehr gut mit den entsprechenden Trends für die Niederschlagssumme, was die Bedeutung des Niederschlags als Hauptantriebsgröße für Änderungen der Wasserbilanz zeigt. Ganz deutlich kommt auch die zunehmende Trockenheit im Süden Österreichs für den Winter durch den SPEI in Abbildung 06 zum Ausdruck. Für den meteorologischen Sommer decken sich Niederschlagstrend und Trockenheitstrend nicht. So hat im Norden und Südosten der Niederschlag leicht zugenommen, gleichzeitig jedoch sich auch die Trockenheit verschärft. Dies ist auf einen Anstieg der pot. Verdunstung zurückzuführen. Da die Verdunstung für den SPEI über die Monatsmitteltemperatur abgeschätzt wird, entstehen Unsicherheiten in der Abschätzung. Verschiedene Studien konnten zeigen (Sheffield et al., 2012), dass die Parameteri-

sierung der potentiellen Verdunstung einen wesentlichen Einfluss auf die Trends hinsichtlich Trockenheit hat (Überschätzung der Verdunstung durch den Thornthwaite-Ansatz). Eine Zunahme der Verdunstung für Österreich im Sommer (und auch über das gesamte Jahr) ist jedoch durch Untersuchungen belegt (Duethmann und Blöschl, 2018) und als robust anzusehen. Bezogen auf den Zeitraum 1976–1990 hat die Verdunstung im Mittel in der Period 1995–2014 in Österreich etwa 80 mm/a zugenommen (das sind ca. 7 % des mittleren Jahresniederschlags, siehe Blöschl et al., 2017).

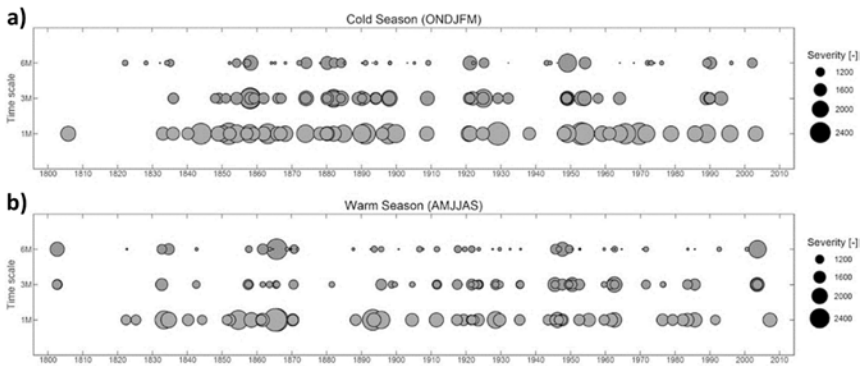


Abbildung 07: Zeitreihe des Eintretens und der Schwere (Größe der Kreise) von Trockenheit im Alpenraum auf regionaler Basis für Winterhalbjahr (a) und Sommerhalbjahr (b). Die y-Achse stellt die zeitliche Aggregation für die Entwicklung der Trockenheit dar.

Figure 07: Time series of occurrence and severity (size of circles) of droughts in the Alpine region on a regional basis for winter half-year (a) and summer half-year (b). The y-axis represents the temporal aggregation for the development of dryness.

Quelle: Haslinger et al., 2018

Abbildung 07 zeigt die zeitliche Entwicklung der 50 ausgeprägtesten Trockenereignisse für den Alpenraum auf verschiedener zeitlicher Aggregationsstufe basierend auf einer eingehenden Analyse der HISTALP Niederschlagsdaten (siehe Haslinger et al., 2018). Die Trockenereignisse decken sich sehr gut mit dokumentierten Ereignissen in historischen Quellen. So kommen etwa die ausgeprägte Trockenperiode der 1860–1870er Jahre (Austrocknen des Neusiedlersees) sowie der 1940er Jahre zum Ausdruck. Die Trockenheit 2003 bildet sich, da weniger niederschlagsdominiert denn verdunstungsdominiert, dagegen weniger deutlich ab.

Untersuchungen zur meteorologischen Trockenheit, die sich spezifisch auf die Gebirgsregion der Alpen beziehen (der Fokus dieser Studie ist), sind kaum vorhanden. Jedoch gibt es mehrere Studien die sich auf die Greater Alpine Region (GAR, siehe z. B. Schrier et al., 2007, Haslinger und Blöschl 2017, Haslinger et al., 2018) beziehen bzw. Studien die sich auf Folgen von Trockenheit im

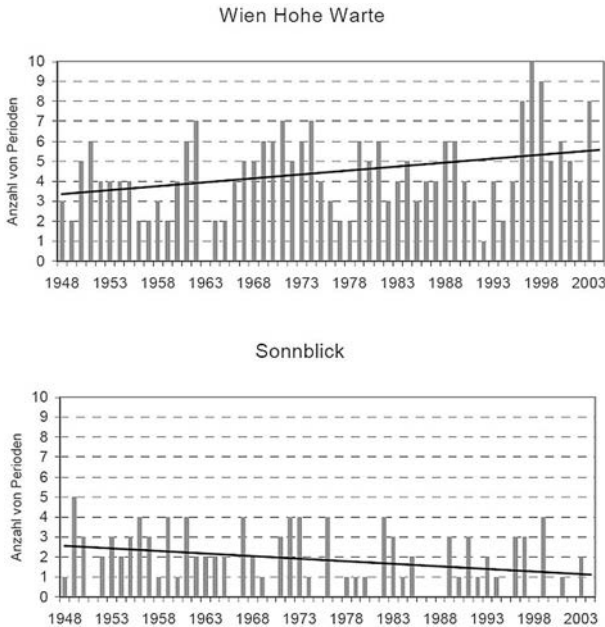


Abbildung 08: Zeitreihen von Trockenperioden einer Dauer von 10 bis 14 Tagen in Wien Hohe Warte und am Sonnblick. Einzelwerte und linearer Trend im Zeitraum 1948 bis 2003.

Figure 08: Time series of droughts over 10 to 14 days in Vienna Hohe Warte and Sonnblick. Single values and linear trend in the period 1948 to 2003.

Quelle: Auer et al., 2005

alpinen Raum beziehen, wie insbesondere Schädlingsbefall im Wald (z. B. Schebeck und Schopf, 2017) oder Waldbrand (z. B. Müller et al., 2015). Auf Grund der abnehmenden Temperatur und Verdunstung bei gleichzeitig generellen Zunahme des Niederschlags mit der Seehöhe, ist eine deutliche Abnahme von Trockenheit mit der Seehöhe zu erwarten und zu beobachten. Abbildung 08 zeigt am Beispiel von Trockenperioden von 10 bis 14 Tagen, dass nicht nur der mittlere Zustand der Trockenheit mit der Seehöhe abnimmt, sondern auch die zeitlichen Trends sich deutlich unterschiedlich verhalten können.

Trenduntersuchungen des Niederwassers zeigen ebenfalls eine Differenzierung mit der Seehöhe (Abbildung 09), die sich aus dem Einfluss der Schneedecke ergibt. Hochgelegene Gebiete zeigen vorwiegend eine Zunahme der Q_{95} Werte (Minderung der Niederwassersituationen), während tiefgelegene Gebiete eher eine Abnahme der Q_{95} Werte zeigen (Verschärfung der Niederwassersituation).

Zukunftsprojektionen auf Basis von Simulationen Globaler Klimamodelle zeigen für Europa einen eindeutigen Trend hin zu trockeneren Bedingungen im mediterranen Raum (IPCC, 2012) sowie eine generell erhöhte Variabilität von Trockenheit in der warmen Jahreszeit (Giorgi, 2006, Heinrich und Gobiet, 2012),

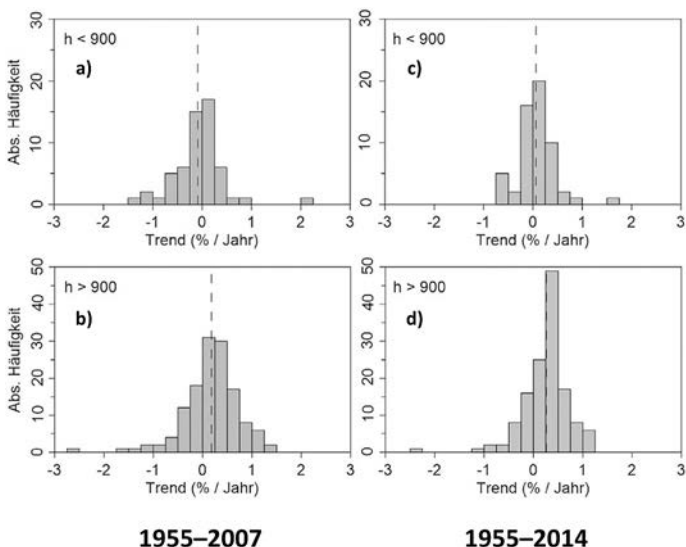


Abbildung 09: Histogramme der Trends der Q_{95} Jahresniederwasser in der Periode 1955–2007 (a, b) im Vergleich zu 1955–2014 (c, d), mit mindestens 40 bzw. 47 Jahren in der Trendberechnung. (a, c): Gebiete mit mittlerer Einzugsgebietshöhe $h < 900$ m. (b, d): Gebiete mit $h > 900$ m.

Figure 09: Histograms of the trends of Q_{95} annual low flows in the period 1955–2007 (a, b) compared to 1955–2014 (c, d), with at least 40 or 47 years in the trend period. (a, c): Areas with a mean catchment elevation $h < 900$ m. (b, d): Areas with $h > 900$ m.

Quelle: Blöschl et al., 2017

wobei Österreich und der Alpenraum im Übergangsbereich zwischen diesen beiden Bereichen liegen (APCC, 2014).

Um die spezifische zukünftige Dürre-Situation für Österreich abzuschätzen, verwendeten Haslinger et al. (2014) ein kleines Ensemble an Regionalen Klimasimulationen mit unterschiedlichen Treibhausgasszenarien für den Alpenraum in hoher räumlicher Auflösung (10 km). Basierend auf Beobachtungsdaten (HISTALP-Daten der ZAMG, www.zamg.ac.at/histalp) wird an Hand des mittleren jährlichen SPEI der zeitliche Verlauf der Dürre für den Alpenraum in Abbildung 10 gezeigt. In der Beobachtungsperiode zeigt sich kein allgemeiner Trend, bis auf die letzten Dekaden, wo eine leichte Abnahme festzustellen ist. Im Gegensatz dazu zeigen die Szenarien für die Zukunft gegen Ende des Jahrhunderts eine deutliche Zunahme von trockeneren Bedingungen. Diese Änderung geht auch mit einer Erhöhung der Varianz einher (Abbildung 10b).

Die Eintrittswahrscheinlichkeit für ein extremes Ereignis, welche für die Referenzperiode bei ca. 4 % liegt, zeigt für den Zeitraum 2071–2100 im Winter eine Abnahme in Alpinen Gebieten (=feuchter) und keine, oder nur relativ geringe Änderungen im Flachland, mit Ausnahme des Szenarios A2, wo im

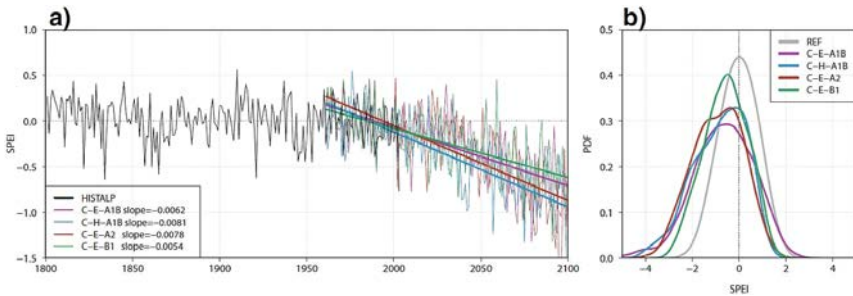


Abbildung 10: Zeitreihe (a) und Häufigkeitsverteilung 2071–2100 (b) des mittleren jährlichen SPEI im Alpenraum aus Beobachtungsdaten (1801–2003, schwarz) und Regionalen Klimasimulationen mit COSMO-CLM (1971–2100) angetrieben mit unterschiedlichen Globalen Klimamodellen und mit unterschiedlichen Treibhausgasszenarien (violett: ECHAM5, Szenario A1B; blau: HadCM3, Szenario A1B; rot: ECHAM5, Szenario A2; ECHAM5, Szenario B1), C–E steht für COSMO-CLM angetrieben von ECHAM5, C–H steht für COSMO-CLM angetrieben von HadCM3.

Figure 10: Time series (a) and frequency distribution 2071–2100 (b) of the average annual SPEI in the Alpine region from observational data (1801–2003, black) and regional climate simulations with COSMO-CLM (1971–2100) driven by different global climate models and with different greenhouse gas scenarios (violett : ECHAM5, scenario A1B, blue: HadCM3, scenario A1B, red: ECHAM5, scenario A2, ECHAM5, scenario B1) , C–E means COSMO-CLM forced by ECHAM5, C–H means COSMO-CLM forced by HadCM3.

Quelle: Haslinger et al., 2015

Flachland eine erhöhte Wahrscheinlichkeit simuliert wird (Haslinger et al., 2014). Im Gegensatz dazu ist im Sommer eine generell stark erhöhte Wahrscheinlichkeit für extreme Dürre zu verzeichnen, wobei dieses Signal südlich der Alpen noch deutlicher ist als im Norden.

4.2.3 Fallbeispiele

Im Kapitel 4.2.2 wurden bereits Jahre mit extremer Trockenheit im Alpenraum (und Österreich) angeführt. Herausragend sind die 1860er Jahre, die 1940er Jahre, als Einzeljahr auch 2003. Laaha und Blöschl (2007) haben das Jahr 2003 im Hinblick auf die Niederwassersituation an Hand des Niederwasserdurchflusses in Österreich untersucht (Abbildung 11). Dargestellt ist das Verhältnis des Niederwasserdurchflusses des Jahres 2003 (NQ_t) in Bezug zu Q_{95} , womit das Jahr 2003 im Vergleich zu mittleren Verhältnissen dargestellt wird. Regionen in roter Farbe weisen einen Niederwasserabfluss auf, der nur 20 % des Normalwertes beträgt. Bis Ende August 2003 herrschte besonders in weiten Teilen Vorarlbergs, im Westen Nordtirols, im nördlichen Flachgau und im Tennengau, im angrenzenden Innviertel und im Salzkammergut, in weiten Teilen Niederösterreichs, in der Steiermark im Bereich rund um Zeltweg, im Grazer Becken und im Leib-

nitzer Feld sowie im südlichen Burgenland ausgeprägte Trockenheit. In einigen Regionen wurden 2003 saisonal und auch absolut die niedrigsten bisher beobachteten Werte für Niederschlag, Abfluss und Grundwasserstand unterschritten (BMNT, 2014).

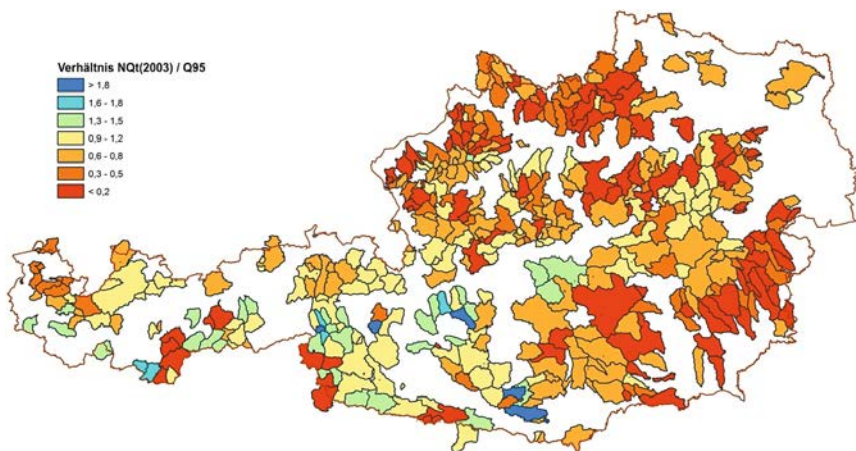


Abbildung 11: Niederwasserdurchfluss des Jahres 2003 (NQ_1) in Bezug zu Q_{95} (325 Zwischen-EG, 1977–1996).

Figure 11: Low flow runoff for 2003 (NQ_1) in relation to Q_{95} (325 intermediate catchments, 1977–1996).

Quelle: Laaha und Blöschl, 2007

Eine Auszählung der Hitzetage nach Kyseli zeigt für 2003 an vielen Stationen den höchsten Wert der Messgeschichte (44 Hitzewellentage in Wien). Dem Jahr 2003 folgten weitere Jahre mit ausgeprägter Trockenheit in Österreich, 2011, 2015 und ganz besonders 2018. Abbildung 12 listet die Schäden durch Dürreereignisse in der österreichischen Landwirtschaft seit 2013 auf, die durch die österreichische Hagelversicherung dokumentiert sind. Das Jahr 2018 weist besonders hohe Schäden in der Landwirtschaft durch Dürre auf. Seitens der Versicherungswirtschaft in Österreich wird eine weitere Zunahme der Schäden in der Landwirtschaft durch den Klimawandel angenommen.

4.3 Einschätzung des Sachstandes und Unsicherheiten

Zur Trockenheit wurde in Österreich in den letzten Jahren eine Vielzahl von Studien durchgeführt. Insbesondere wurden durch das Austrian Climate Research Programme (ACRP) mehrere Projekte gefördert die sich mit verschiedenen Aspekten der Trockenheit (von atmosphärischer bis hydrologischer Trocken-

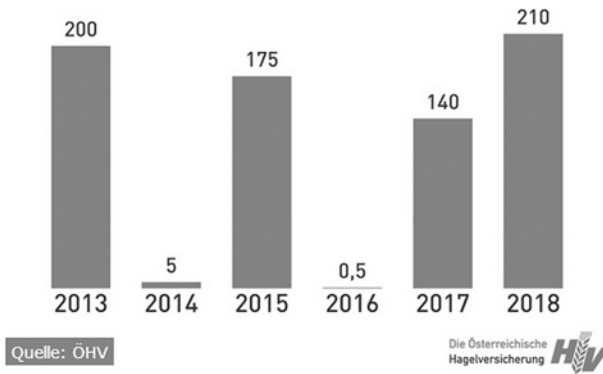


Abbildung 12: Dürreschäden 2013–2018 in Österreich in Mio. Euro.

Figure 12: Drought damages in Austria in Million Euros for 2013–2018.

Quelle: BauernZeitung, 2018

heit) und deren klimabedingten Veränderungen beschäftigt. Der Sachstand konnte dadurch deutlich verbessert werden. Die Studien zeigen jedoch auch, dass jedes Dürreereignis ganz spezifische Ursachen der Entstehung aufweist (z. B. zeitliche Entwicklung, verursachende Wetterlagen, Rückkoppelung mit Bodenfeuchte) und eine Vorhersage von Dürreereignissen mittels Prozesse abbildender Modelle daher schwierig ist, beziehungsweise auch die Unsicherheit der Vorhersage groß ist, da manche Eingangsgrößen ungenügend erfasst werden. Diese Aussage gilt insbesondere für Trockensituationen im Boden und weniger für Niederwasserereignisse. Andererseits können die Prozesse, die zu Trockenheit führen, recht gut identifiziert werden, können aber mangels guter Antriebsdaten (Bodenfeuchte, Verdunstung) ungenügend simuliert werden. Ein verbessertes Monitoring der Evapotranspiration (potentiell und aktuell) und der Bodenfeuchte in Österreich, könnte auch die Erfassung (und Vorhersage) von Trockenheit vorantreiben.

Im Gegensatz zur Trockenheit sind Hitze- und Kälteperioden, auf Grund der ausschließlichen Abhängigkeit von der Lufttemperatur, einfacher zu erfassen (kombinierte Größen die auch die Luftfeuchtigkeit miteinbeziehen wurden hier nicht berücksichtigt). Auf Grund der deutlich besseren Zuverlässigkeit der Temperaturszenarien (gegenüber Niederschlagsszenarien) aus den Klimasimulationen, sind auch die entsprechenden Szenarien für Hitze und Kälte deutlich robuster (geringere Unsicherheit) als für zukünftige Trockenheitsereignisse. Ähnlich wie für Trockenheit, weisen auch Hitzeperioden eine große natürliche Schwankung auf, die dem generellen Trend des anthropogen verursachten Klimawandels überlagert ist. Diese natürliche Schwankung beziehungsweise Periodizität wird noch zu wenig verstanden und stellt einen offensichtlichen Forschungsbedarf dar.

4.4 Mögliche zukünftige Entwicklungen und Herausforderungen

Die zukünftige, durch den anthropogenen Klimawandel verursachte Entwicklung von Kälte- und Hitzeperioden ist aus Klimamodellsimulationen recht gut abschätzbar. Für Dürre/Trockenheit ist die Situation, auf Grund der starken Abhängigkeit vom Niederschlag und auch von Prozessen im Boden, deutlich ungünstiger. Gleichzeitig wird für beide Phänomene, Temperaturextreme und Trockenheit, die natürliche Variabilität und Periodizität zu wenig verstanden. Hier besteht eine Herausforderung für die zukünftige Forschung, wobei ein verbessertes Prozessverständnis aber auch ein verbessertes Erfassen verschiedener Zustandsgrößen (Niederschlag, Verdunstung, Bodenfeuchte) wichtig ist. Damit könnte nicht nur die Vorhersage auf der Zeitskala der Wettervorhersage sondern auch auf der Zeitskala der Klimasimulationen verbessert werden.

4.5 Perspektiven für Handlungsoptionen

Der Klimawandel hat für Österreich einen direkten und großen Einfluss auf Naturgefahren, die im Zusammenhang mit Kälte/Hitze sowie Trockenheit stehen. Eine enge Zusammenarbeit verschiedener Organisationen und Interessensvertreter der von Dürre/Trockenheit Betroffenen in Österreich ist notwendig, um gemeinsam mit Forschungseinrichtungen das Monitoring und den Forschungsstand zu verbessern und damit eine verbesserte Vorhersage und Warnung zu ermöglichen. Das sollte insbesondere vor den Herausforderungen des zukünftigen Klimawandels passieren. Dabei sollte nicht nur eine Verbesserung von regionalen Klimasimulationen, zur Verbesserung der Niederschlags-simulationen, im Fokus stehen, sondern auch das Prozessverständnis basierend auf Beobachtungsdaten. Hierzu kann Österreich auf lange meteorologische Beobachtungsdaten aufbauen (was international herausragend ist), die mit entsprechenden modernen Beobachtungssystemen für die verbesserte Erfassung von Verdunstung und Bodenwassergehalt/Bodenfeuchte zu erweitern sind. Dabei sollte auch das Potential von Methoden der Fernerkundung vermehrt eingesetzt und genutzt werden.

Im Sinne von Handlungsoptionen ist auch eine entsprechende Warnung der Öffentlichkeit vor Hitze/Kälte beziehungsweise Dürre/Trockenheit zu nennen. Der Thematik entsprechend fallen derartige Warnungen für Österreich in den Zuständigkeitsbereich der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (Hitze/Kälte, atmosphärische Trockenheit) beziehungsweise der Hydrographischen Dienste der Bundesländer (hydrologische Trockenheit). In Abstimmung mit den Hitzeschutzplänen der Bundesländer liegen Warnsysteme der ZAMG vor Hitzeereignissen vor, die vorwiegend auf den, besonders relevanten, städ-

tischen Raum fokussieren. Durch die Hitzeschutzpläne der Bundesländer werden auch Maßnahmen zum Schutz vor Hitzestress für die Öffentlichkeit bereitgestellt. Für Warnungen vor Trockenheit ist jedoch, auch vor dem Hintergrund der verschiedenen Typen von Trockenheit, ein deutlicher Forschungs- und Handlungsbedarf sichtbar. Eine systematische Warnung existiert derzeit nicht. Dies wäre aber ganz besonders auch vor dem Hintergrund zunehmender, durch den Klimawandel verursachter, Dürre-Ereignisse in der Zukunft relevant.

Literatur

- AGES, 2018. Hitze-Mortalitätsmonitoring. <https://www.ages.at/themen/umwelt/informationen-zu-hitze/hitze-mortalitaetsmonitoring> [18. 12. 2018].
- APCC, 2014. Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (APCC). Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, 1096 S.
- Auer, I., Böhm, R., Leymüller, M., Schöner, W., 2002. Das Klima des Sonnblicks – the climate of Sonnblick. Österreichische Beiträge zur Meteorologie und Geophysik, 29.
- Auer, I., Böhm, R., Potzmann, R., Ungersböck, M., 2003. Änderung der Frosthäufigkeit in Österreich. Sechste Deutsche Klimatagung Potsdam. Terra Nostra, 6, S. 25–29.
- Auer, I., Korus, E., Böhm, R., Schöner, W., 2005. Analyse von Hitze und Dürreperioden in Österreich. Ausweitung des täglichen StartClim Datensatzes um das Element Dampfdruck. StartClim2004.A, Universität für Bodenkultur, 49 S.
- BauernZeitung, 2018. Rekordschäden durch Hitze und Dürre in Österreich. <http://www.bauernzeitung.at/rekordschaeden-durch-hitze-und-duerre-in-oesterreich/> [18. 12. 2018].
- Blöschl, G., Parajka, J., Blaschke, A.P., Hofstätter, M., Haslinger, K., Schöner, W., 2017. Klimawandel in der Wasserwirtschaft – Schwerpunkt Hochwasser, Dürre und Trockenheit. Follow up zur ZAMG/TU-Wien Studie (2011). Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft im Auftrag von Bund und Ländern. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, 85 S.
- BMNT, 2014. Trockenheit 2003. https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/was-serkreislauf/hydrograph_charakt_extrema/Trockenheit2003.html [18. 12. 2018].
- Böhm, R., Hiebl, J., 2013. Lange instrumentelle Klimazeitreihen für den Vernagtferner. Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie, 45/46(2011/12), S. 203–218.
- Duethmann, D., Blöschl, G., 2018. Why has catchment evaporation increased in the past 40 years? A data-based study in Austria. Hydrology and Earth System Sciences Discussions, S. 1–24. <https://doi.org/10.5194/hess-2018-129>.
- Giorgi, F., 2006. Climate change hot-spots. Geophysical Research Letters, 33, L08707. DOI: 10.1029/2006GL025734.
- Haslinger, K., Blöschl, G., 2017. Space-Time Patterns of Meteorological Drought Events in the European Greater Alpine Region Over the Past 210 Years. Water Resources Research, 53, S. 9807–9823. DOI: 10.1002/2017WR020797.

- Haslinger, K., Holawe, F., Blöschl, G., 2018. Spatial characteristics of precipitation shortfalls in the Greater Alpine Region – a data-based analysis from observations. *Theoretical and Applied Climatology*, S. 1–15.
- Haslinger, K., Koffler, D., Schöner, W., Laaha, G., 2014. Exploring the link between meteorological drought and streamflow: Effects of climate-catchment interaction. *Water Resources Research*, 50, S. 2468–2487. DOI: 10.1002/2013WR015051.
- Haslinger, K., Schöner, W., Anders, I., 2015. Future drought probabilities in the Greater Alpine Region based on COSMO-CLM experiments – spatial patterns and driving forces. *Meteorologische Zeitschrift*, 25(2), S. 137–148. DOI:10.1127/metz/2015/0604.
- Heinrich, G., Gobiet, A., 2012. The future of dry and wet spells in Europe: A comprehensive study based on the ensembles regional climate models. *International Journal of Climatology*, 32, S. 1951–1970. DOI: 10.1002/joc.2421.
- IPCC, 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, P.M. Midgley (Hrsg.). Cambridge University Press, Cambridge, 582 S.
- Kyselý, J., Kalvová, J., Kveton, V., 2000. Heat Waves in the South Moravian Region during the Period 1961–1995. *Studia Geophysica et Geodaetica*, 44(1), S. 57–72.
- Laaha G., 2014. Climate Impact on Low Flows and Droughts. Endbericht, ACRP2. <https://www.klimafonds.gv.at/wp-content/uploads/sites/6/20150716CILFADEBACRP2B060362.pdf> [18. 12. 2018].
- Laaha, G., Blöschl, G., 2006. Seasonality indices for regionalizing low flows. *Hydrological Processes*, 20, S. 3851–3878. DOI: 10.1002/hyp.6161.
- Laaha, G., Blöschl, G., 2007. Niederwasserspende (Specific low flow). In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.), *Hydrologischer Atlas Österreichs*, 3. Lieferung, Karte 5.8. Österreichischer Kunst- und Kulturverlag, Wien.
- Lopez-Moreno, J., Vicente-Serrano, S., Begueria, S., Garcia-Ruiz, J., Portela, M., Almeida, A., 2009. Downstream propagation of hydrological droughts in highly regulated transboundary rivers: The case of the Tagus river between Spain and Portugal. *Water Resources Research*, 45, W02405. DOI: 10.1029/2008WR007198.
- McKee, T., Doesken, N., Kleist, J., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. *Eighth Conference on Applied Climatology*. American Meteorological Society, Boston, Massachusetts, 17, S. 179–183.
- Müller, M.M., Vacik, H., Vales, E., 2015. Anomalies of the Austrian Forest Fire Regime in Comparison with Other Alpine Countries: A Research Note. *Forest*, 6, S. 903–913. DOI: 10.3390/f6040903.
- Schebeck, M., Schopf, A., 2017. Temperature-dependent development of the European larch bark beetle, *Ips cembrae*. *Journal of Applied Entomology*, 141(4), S. 322–328.
- Schneider, A., Breitner, S., Wolf, K., Hampel, R., Peters, A., Wichmann, E., 2009. Ursachenspezifische Mortalität, Herzinfarkt und das Auftreten von Beschwerden bei Herzinfarktüberlebenden in Abhängigkeit von der Lufttemperatur in Bayern (MOHIT). *Helmholtz Zentrum München – Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt, Institut für Epidemiologie*, 79 S.

- Schrier, G. van der, Efthymiadis, D., Briffa, K.R., Jones, P.D., 2007. European Alpine moisture variability for 1800–2003. *International Journal of Climatology*, 27, S. 415–427. DOI:10.1002/joc.1411.
- Shafer, B.A., Dezman, L.E., 1982. Development of a Surface Water Supply Index (SWSI) to Assess the Severity of Drought Conditions in Snowpack Runoff Areas. *Western Snow Conference*. Colorado State University, Fort Collins, S. 164–175.
- Sheffield, J., Wood, E.F., Roderick, M.L., 2012. Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 491, S. 435–438. DOI: 10.1038/nature11575.
- Staudinger, M., Stahl, K., Seibert, J., 2014. A drought index accounting for snow. *Water Resources Research*, 50, S. 7861–7872. DOI: 10.1002/2013WR015143.
- Vicente-Serrano, S., Begueria, S., Lopez-Moreno, J., 2010. A multiscalar drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index. *Journal of Climate*, 23(7), S. 1696–1718.
- Wells, N., Goddard, S., Hayes, M., 2004. A self-calibrating Palmer drought severity index. *Journal of Climate*, 17, S. 2335–2351. DOI: 0.1175/1520-0442(2004)017<2335:AS-PDSI>2.0.CO;2.
- WMO, 2015. Guidelines on the definition and monitoring of extreme weather and climate events. <http://www.wmo.int/pages/prog/wcp/ccl/opace/opace2/documents/DraftversionoftheGuidelinesontheDefinitionandMonitoringofExtremeWeatherandClimateEvents.pdf> [18. 12. 2018].
- ZAMG, 2013. Neuer Hitze-Rekord: 40,5 °C in Bad Deutsch-Altenburg. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/klima/news/neuer-hitze-rekord-40-5deg-c-in-bad-deutsch-altenburg> [18. 12. 2018].

5 Schnee- und Eislast

Michael Winkler, Hildegard Kaufmann, Wolfgang Schöner und Michael Kuhn*

Zusammenfassung

Extreme Schnee- und Eislasten gefährden Gebäude und andere Infrastruktur wie elektrische Leitungen, Windenergieanlagen oder Solarpaneele, sowie Bäume. In diesem Beitrag wird erklärt, wie solche Lasten entstehen, wie sie gemessen und vorhergesagt werden können. Die zugrundeliegenden Normen, die extreme Lasten aufgrund von meteorologischen Messungen erwarten lassen, werden erläutert. Besonders wird darauf hingewiesen, wie die allgemeine Schneelage individuelle, extreme Lasten verursachen kann. Die Erkennung dieser Gefahren, entsprechende Warnungen und lokale Gegenmaßnahmen werden behandelt.

Abstract

Extreme loads of snow and ice endanger buildings and other infrastructure such as power lines or solar panels, wind turbines, as well as trees. This article explains how such loads originate, how they can be measured and forecasted. We summarize underlying engineering standards for the occurrence of extreme loads on the basis of meteorological records. In particular we emphasize the impact of large scale snow falls on extremes of individual, local loads. The detection of imminent danger, suitable warnings and local countermeasures are presented.

Kernaussagen

- Extremwerte von Schnee- und Eislasten sind stark von lokalen Bedingungen beeinflusst.
- Ihre Vermeidung verlangt den Einsatz lokaler Erfahrung und lokaler Kontrolle nach allgemeiner Warnung.

* Michael Winkler, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Kundenservice Tirol und Vorarlberg, michael.winkler@zamg.ac.at.

Hildegard Kaufmann, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Klima, hildegard.kaufmann@zamg.ac.at.

Wolfgang Schöner, Karl-Franzens-Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung, wolfgang.schoener@uni-graz.at.

Michael Kuhn, Universität Innsbruck, Institut für Atmosphären- und Kryosphärenwissenschaften, michael.kuhn@uibk.ac.at.

Key Points

- Extremes of snow and ice loads strongly depend on local conditions.
- Their mitigation requires local experience and local control following general public alert.

5.1 Definition und Terminologie des Sachverhalts

5.1.1 Schneelast

5.1.1.1 Schneefall und Schneedecke, Schneehöhe und Schneedicke, Neuschneesummen

Mit Schnee bezeichnet man einerseits Eiskristalle, die in Wolken entstehen, anschließend aus ihnen zu Boden fallen, sich unter Umständen zu Schneeflocken verbinden und sich – im Unterschied zu Graupel oder Hagel – durch eine sechszählige Struktur auszeichnen (Schneefall). Andererseits bezeichnet Schnee die Ablagerung dieser Kristalle am Boden (Schneedecke). Die augenscheinlichste Eigenschaft der Schneedecke ist ihre Höhe; die Schneehöhe wird lotrecht vom Boden aus gemessen und typischerweise in Zentimeter angegeben. Als Schneedicke wird die normal vom Untergrund aus gemessenen Entfernung zur Schneeoberfläche bezeichnet. Die Schneedicke entspricht damit über horizontalen Flächen der Schneehöhe, über geneigten Flächen ist sie geringer (siehe z. B. Fierz et al., 2009).

Neuschnee ist in der gebräuchlichen Definition derjenige Schnee, der innerhalb von 24 Stunden an einem bestimmten Ort abgelagert wurde. Addiert man die Neuschneehöhen mehrerer Tage erhält man sogenannte Neuschneesummen ohne dabei die (mehrtägige) Setzung des Schnees zu berücksichtigen. So ergibt beispielsweise eine 3-Tages-Neuschneesumme von 50 cm auf zuvor schneefreiem (aperem) Boden bei typischen Setzungsbedingungen eine Schneehöhe von etwa 30–40 cm.

5.1.1.2 Schneedichte, Wasserwert und Schneelast

Die erwähnte Setzung des Schnees ist seine Verformung durch Auflast (von weiterem Schnee) und thermodynamischen Umwandlungsprozessen innerhalb des Kristallgefüges. Sie bewirkt eine Abnahme der Schneehöhe mit der Zeit, aber keinen Massenverlust, wie er z. B. durch Schmelzen verursacht wird. Das Gewicht der Schneedecke bleibt erhalten und mit ihm die sogenannte Schneelast, eine weitere wichtige Eigenschaft der Schneedecke. Sie ist definiert als die Gewichtskraft, die die Schneedecke pro Flächeneinheit auf den Untergrund ausübt

und entspricht damit physikalisch einem Druck. Üblicherweise wird sie in kN/m^2 angegeben. Die flächenbezogene Masse, die diesen Druck bzw. diese Schneelast ausübt, wird als Schneewasserwert bezeichnet. Die Angabe des Schneewasserwerts erfolgt z. B. in kg/m^2 ; es besteht folgender Zusammenhang zur Schneelast.

$$SL = SWE * g \quad (5.1.)$$

(mit SL...Schneelast, SWE...Schneewasserwert (engl. Snow Water Equivalent), g...Schwerebeschleunigung, $9,81 \text{ m/s}^2$)

(Etwas ungenau werden in alten Darstellungen und Normen Schneelast und Schneewasserwert häufig gleichgesetzt, wobei unter der oft hinreichend genauen Annahme von $g = 10 \text{ m/s}^2$ die Werte von 1 kN/m^2 und 100 kg/m^2 derselben »Schneelast« entsprechen.)

Die massenbezogenen Eigenschaften des Schnees (Schneelast und Schneewasserwert) und die Schneehöhe (meist in cm angegeben) sind durch die mittlere Dichte der gesamten Schneedecke (Schneedichte, meist in kg/m^3 angegeben) miteinander verknüpft.

$$SL = SWE * g = \rho_s * HS * g \quad (5.2.)$$

(mit HS...Schneehöhe (engl. Height of Snow), ρ_s ...Schneedichte)

Je nach Schneehöhe, den Bedingungen während der einzelnen Schneefälle, je nach Alter der Schneedecke, je nach meteorologischen und mechanischen Einwirkungen kann die Dichte der Schneedecke räumlich und zeitlich stark variieren. Grundsätzlich gilt, je größer die Schneehöhe und je älter die Schneedecke, desto größer und weniger variabel die Schneedichte. So rangiert die Dichte von Neuschnee typischerweise zwischen 30 und 200 kg/m^3 , diejenige einer Hochwinter-Schneedecke zwischen 250 und 350 kg/m^3 und kurz vor dem Ausapern nähert sich die Dichte der durchnässten Frühjahrsschneedecke typischen Werten von 400 – 450 kg/m^3 .

5.1.1.3 Jährlichkeit, Charakteristische Schneelast, Lastzonen, Einfluss der Seehöhe

Schnee wird vor allem in Form von Lawinen mit Naturgefahren in Verbindung gebracht. Allerdings stellen auch Schneelasten auf Gebäuden und Installationen wie Hochspannungsleitungen, Solarpanele oder Windenergieanlagen, sowie Bäumen eine Naturgefahr dar, und zwar dann, wenn sie im Verlauf eines Winters außergewöhnliche Werte erreichen. Welche Schneelast in einer bestimmten Region, auf einer bestimmten Seehöhe im topographisch stark gegliederten

Österreich außergewöhnlich bzw. extrem ist, lässt sich jedoch nicht ohne weiteres festlegen. Man bedient sich hier der langjährigen Messreihen der Schneehöhe und ermittelt Schwellwerte, ab denen ein Ereignis als extrem einzustufen ist, mithilfe der Methoden der Extremwertstatistik. (Beispiele extremer Schneehöhen finden sich in Tabelle 01) Im Kontext nationaler und internationaler Baunormen hat sich das »50-jährliche Ereignis« als Grundlage für statische Berechnungen etabliert. Ein Schneelastereignis einer Jährlichkeit von 50 tritt an einem bestimmten Ort in einem bestimmten Winter mit einer Wahrscheinlichkeit von 1:50 bzw. 2 % auf oder wird überschritten. In Normen wird die 50-jährliche Schneelast als »charakteristische Schneelast« bezeichnet.

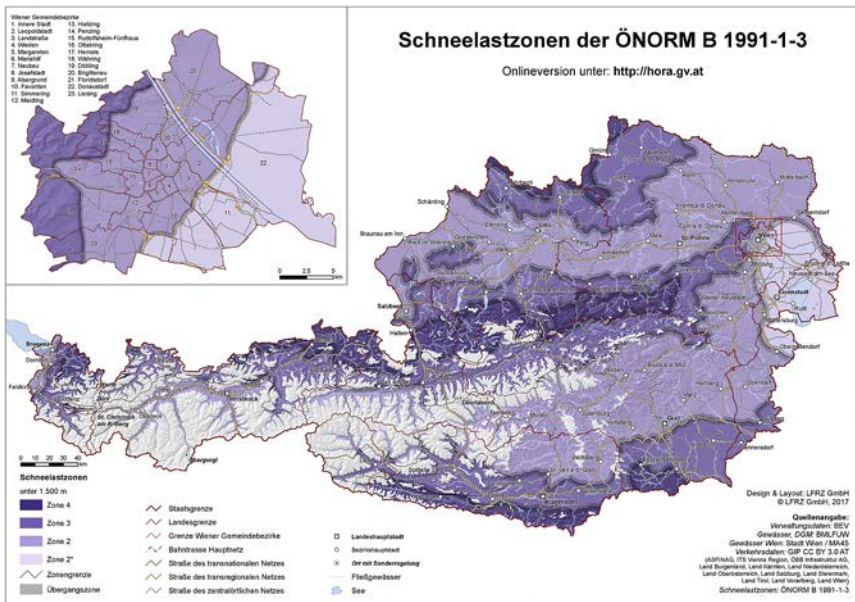


Abbildung 01: Die Schneelastzonen Österreichs gemäß ÖNORM B 1991-1-3. Seit Sommer 2018 auch online verfügbar unter hora.gv.at; siehe dort auch zur besseren Lesbarkeit.

Figure 01: Snow load zones of Austria according to ÖNORM B 1991-1-3. Since summer 2018 online at hora.gv.at; see also for better readability.

Quellen: hora.gv.at; Austrian Standards International

Tabelle 01: Beispiele für extreme Schneehöhen an Stationen des Lawinenwarndienstes Tirol.

Table 01: Selected values of extreme snow heights from the net of the Tyrolian Avalanche Service (Station name, geographical latitude and longitude, elevation, maximum measured snow height, date).

Quelle: C. Oberparleiter und P. Nairz, 2018

Stationsname	geogr. Breite	geogr. Länge	Höhe [m]	max. gem. Schneehöhe [cm]	gemessen am
Boden Lechtal (seit 1960)	47,2844	10,605	1.356	190	25.02.1999
Dolomitenhütte (seit 1995)	46,7903	12,7842	1.616	360	03.02.2014
Felbertauern N. (seit 1990)	47,1608	12,5361	1.630	207	27.03.1992
Felbertauern S. (seit 1990)	47,1189	12,5061	1.630	190	18.03.2000
Kaunertal (seit 2000)	47,0308	10,7483	1.287	135	22.01.2018
Kühtai (seit 1990)	47,2078	11,0067	1.930	225	18.03.2000
Nauders (seit 2009)	46,8736	10,4964	1.571	165	22.01.2018
Innsbruck Seegrube (seit 1973)	47,3067	11,3803	1.905	540	18.03.2000
Obergurgl (seit 1961)	46,8673	11,0228	1.940	215	15.04.1962
Obertilliach (seit 1961)	46,7083	12,6197	1.450	210	01.04.1975
St. Veit i. D. (seit 1997)	46,9247	12,4244	1.495	127	18.02.2014
Steeg (seit 1991)	47,2517	10,3117	1.130	179	16.02.2012

Österreich wurde in vier Schneelastzonen eingeteilt (siehe Abbildung 01), innerhalb derer sich die charakteristischen Schneelasten mithilfe einer Berechnungsvorschrift bestimmen lassen. Wie oben erwähnt, nimmt die Schneelast vor allem mit zunehmender Schneehöhe und zunehmendem Alter der Schneedecke zu. Weil Schneehöhe und Schneebedeckung im Allgemeinen mit der Seehöhe zunehmen, ist es sinnvoll in der Berechnungsvorschrift für die Schneelast eine Abhängigkeit von der Seehöhe einfließen zu lassen. Im EU-Alpenraum ist der quadratische Zusammenhang

$$s_k = (0,642 * Z + 0,009) * [1 + (A/728)^2] \quad (5.3.)$$

(mit s_k ... charakteristische Schneelast, Z... Rechenwert für die Zonen-Nummer, A... Seehöhe des Standorts)

üblich (Austrian Standards Institute, 2012). Mithilfe der Seehöhe des Standorts in Metern, und der Schneelastzone (In Österreich entspricht der Rechenwert für die Zonen-Nummer 1,6; 2; 3 oder 4,5.) kann für jeden Standort unterhalb von 1.500 m Seehöhe der Wert der charakteristischen Schneelast am Boden bestimmt werden. Von den so berechneten charakteristischen Schneelasten muss im Einzelfall mit Erfahrungswerten (Formbeiwerte von Dächern, Umgebungskoeffizienten u. Ä) auf individuelle Gebäude umgerechnet werden. Wird über 1.500 m Seehöhe gebaut, ist laut Norm ein Schneelast-Gutachten – z. B. bei der ZAMG – einzuholen.

Aufgrund der Normierung in Gleichung 5.3 und der Zonierung in Abbildung 01 ergeben sich die charakteristischen Schneelasten, die in Tabelle 02 auszugsweise wiedergegeben werden.

Tabelle 02: Schneelasten für ausgewählte Orte in Österreich. Charakteristische Schneelast s_k nach Gleichung 5.3 (x bedeutet Stationshöhe über 1.500 m.).

Table 02: Characteristic snow load s_k according to equation 5.3 for selected Austrian locations. Elevation A, Schneelastzone = snow load zone, calculation value for snow load zone Z (The symbol x indicates elevations above 1.500 m.).

Quelle: Austrian Standards International, 2018

Ort	Höhe A [m]	Schneelastzone	Z	s_k [kN/m ²]
Wien Stephansplatz	171	2	2	1,35
Neusiedl/See	140	2*	1,6	1,05
St. Pölten	265	2	2	1,45
Semmering	1.000	2/3	2,5	4,65
Graz	369	2	2	1,65
Mariazell	868	3/4	3,75	5,85
Linz	260	2	2	1,45
Gosau	779	4	4,5	6,20
Salzburg	436	2	2	1,75
Lofer	639	4	4,5	5,15
Obertauern	1.649	x	x	9,90
Klagenfurt	448	3	3	2,65
Kötschach	706	4	4,5	5,60
Innsbruck	573	2	2	2,10
Kitzbühel	761	3/4	3,75	5,05
St. Christoph/Arlberg	1.780	x	x	13,50
Bregenz	398	2/3	2,5	2,10
Zürs	1.720	x	x	12,75

5.1.1.4 Entwicklung der Messungen zum heutigen Stand

Grundlagen für die Berechnung der charakteristischen Schneelasten waren die Schneehöhenmessungen, die in Österreich vorbildlich und in ausreichendem Maß durchgeführt werden.

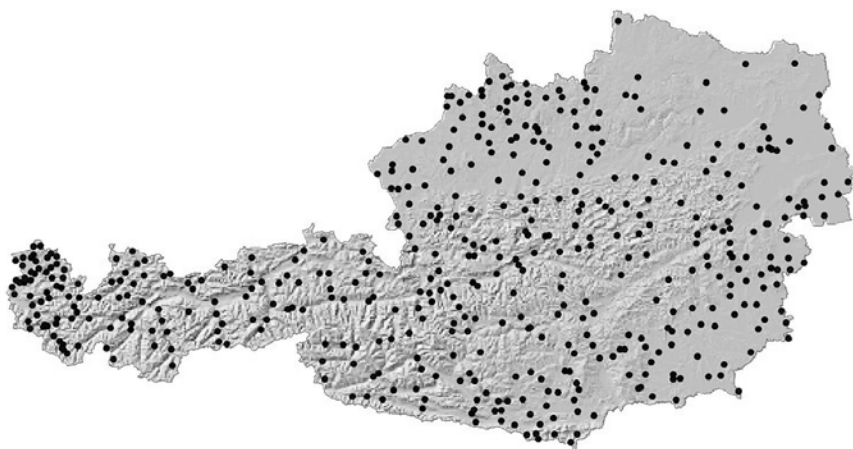


Abbildung 02: Schneemesstationen in Österreich, wo zumindest im Zeitraum 1961–90 Schneeparameter gemessen wurden.

Figure 02: Snow measurement sites in Austria where at least from 1961–90 snow parameters were measured.

Quelle: Schöner und Mohnl, 2002

Das amtliche Stationsnetz zur Messung von Schnee Größen durch den österreichischen Wetterdienst (ZAMG) und den Hydrographischen Dienst in Österreich (HZB) mit vollständigen Messungen für den Zeitraum 1961–90 wird in Abbildung 02 gezeigt. Die Messungen beinhalten die Neuschneesumme über die vergangenen 24 Stunden, die Gesamtschneehöhe sowie, an einer deutlich geringeren Anzahl der Stationen, auch ihre Schneedichte jeweils um 7 Uhr Ortszeit. Die Messung der Schnee Größen ist durch entsprechende Beobachteranleitungen standardisiert (z. B. Klinger, 1986). Eine Regionalisierung der Schnee Größen für Österreich kann mit den in Abbildung 03 ersichtlichen Regionen durchgeführt werden (Schöner und Mohnl, 2002). Dabei ist die Seehöhenabhängigkeit der Schnee Größen die klassifizierende Größe (siehe entsprechende Tabelle in Schöner und Mohnl, 2002), die einen sehr hohen erklärenden Anteil an den räumlichen Unterschieden besitzt.

In den letzten drei Dekaden haben die oben angeführten amtlichen Messnetze wesentliche Impulse erhalten, wobei insbesondere folgende Faktoren anzuführen sind:

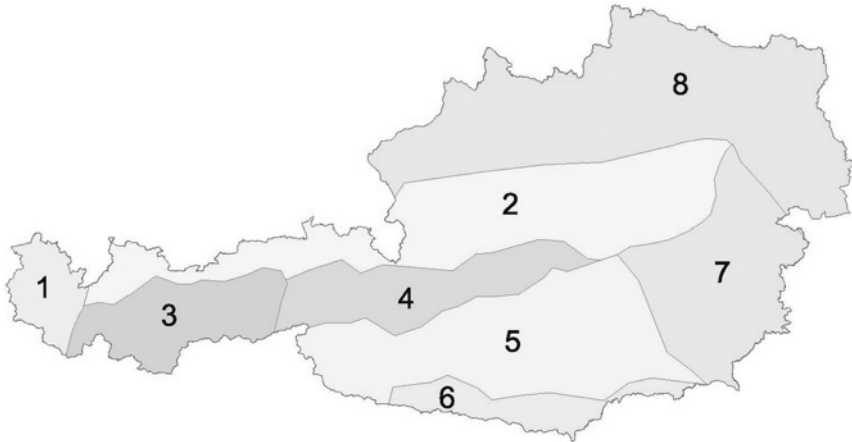


Abbildung 03: Aus den Schneemessungen (Abbildung 02) abgeleitete Schneeregionen für die Kenngrößen Neuschneesumme, mittlere maximale Schneehöhe, Schneedeckendauer und Winterdeckendauer.

Figure 03: Snow regions for the parameters accumulated fresh snow, mean maximal snow height, snowpack duration, and longest duration of continuous snow cover.

Quelle: Schöner und Mohnl, 2002

- Erweiterung durch neue Messnetze von öffentlichen und privaten Anbietern (z. B. Lawinenwarndienst, Energieversorger)
- Automatisierung der Messungen (dadurch höhere zeitliche Auflösung der Messungen aber auch systematische Änderungen der Messgrößen)
- Verstärktes Interesse der Öffentlichkeit an Informationen zum Schnee

5.1.2 Eislast

5.1.2.1 Entstehungsformen und Wachstumsprozesse, Vereisungsformen

Eislasten entstehen durch die Anlagerung von Vereisung an Strukturen und sind eine Ausprägung atmosphärischer Vereisung. Nach dem internationalen Standard »Atmospheric icing of structures« (ISO 12494, 2017) wird Vereisung in zwei Entstehungsformen unterteilt: In Niederschlags-Vereisung (Gefrierender Niederschlag und Nassschnee) und sogenannte In-Cloud-Vereisung (z. B. durch Nebel). Bei einer Temperatur von unter -20 °C wird der Flüssigwassergehalt in der Luft so gering, dass letzterer Prozess jedoch kaum noch wirksam ist.

Des Weiteren wird nach zwei verschiedenen Wachstumsprozessen unterschieden (Makkonen, 1981). Bei trockener Vereisung gefrieren die auftreffenden Tropfen noch bevor der nächste Tropfen auftrifft, sodass es zu keinem Abfließen kommt. Dieser Prozess tritt bei einer Oberflächentemperatur von 0 °C und

darunter auf. Die dabei entstehende Vereisungsformen (Raureif und Raueis) sind undurchsichtig und porös. Bei nasser Vereisung gefriert der Tropfen nicht bevor ein weiterer auftrifft, so entsteht ein Wasserfilm an der Eisoberfläche und ein Teil des auftreffenden Wassers kann abfließen. Dies geschieht bei einer Oberflächentemperatur nahe 0 °C und es kommt zu der Vereisungsform Klareis, welches durchsichtig ist.

Nach ISO 12494 (2017) werden die folgenden Vereisungsformen unterschieden: Raureif und Raueis, Klareis, Nassschnee und Reif. Für das Thema Eislast sind die Formen Raureif und Raueis, Klareis und Nassschnee relevant (siehe Tabelle 03 und 04) (Reif entsteht, wenn die Oberflächentemperatur der vereisenden Objekte gleich oder tiefer als der sogenannte Reifpunkt liegen, sodass der Wasserdampf der Luft auf den Oberflächen deponiert und sich eine Reifschicht bildet. Reif besitzt im Vergleich zu den anderen Eisablagerungen eine geringe Mächtigkeit und fällt bei Erschütterungen leicht ab.).

Tabelle 03: Vereisungsarten und ihre Eigenschaften.

Table 03: Typical properties of accreted atmospheric ice.

Quelle: nach ISO 12494, 2017

Vereisungsart	Dichte [kg/m ³]	Adhäsion und Kohesion	Erscheinungsbild	
			Farbe	Form
Klareis	900	stark	transparent	Auf Objekten gleichmäßig/ ungleichmäßig verteilt
Nassschnee	300–600	schwach (während Entstehung) stark (im gefrorenen Zustand)	weiß	gleichmäßig verteilt/ ungleichmäßig
Raueis	600–900	stark	undurchsichtig	ungleichmäßig, windzugewandt
Raureif	200–600	schwach bis mittel	weiß	ungleichmäßig, windzugewandt

Tabelle 04: Vereisungsarten und ihre Entstehungskonditionen.**Table 04:** Meteorological parameters controlling atmospheric ice accretion.

Quelle: nach ISO 12494, 2017

Vereisungsart	Lufttemperatur [°C]	Windgeschwindigkeit [m/s]	Tropfengröße	Wassergehalt in der Luft	Typische Andauer
Niederschlags-Vereisung					
Klareis (gefrierender Regen oder Niesel)	$-10 < t_a < 0$	jegliche	groß	mittel	Stunden
Nassschnee	$0 < t_a < +3$	jegliche	Schneeflocken	sehr hoch	Stunden
In-cloud Vereisung					
Klareis	≤ 0	≥ 0	mittel	hoch	Stunden
Raueis	≤ 0	≥ 0	mittel	mittel	Tage
Raureif	≤ 0	≥ 0	klein	gering	Tage

5.1.2.2 Raureif

Raureif ist die häufigste Form der Vereisung aus Wolken und Nebel. Er tritt in der Regel bei Lufttemperaturen unter 0°C auf, wenn feine, unterkühlte Wassertropfchen auf den Oberflächen von Objekten auftreffen und sofort vollständig gefrieren. Da kein Zusammenfließen von einzelnen Tropfen mehr stattfindet, wächst der Raureif beispielsweise an den Objektkanten fahnenartig dem Luftstrom entgegen (Abbildung 04). Durch eingeschlossene Schneekristalle und Luftbläschen weist er eine raue Oberfläche auf, ist brüchig und milchig-weiß. Für die Entstehung von Raureif sind eine hohe relative Luftfeuchtigkeit von über 90 % und eine geringe Windgeschwindigkeit von Nöten. Raureif haftet eher locker an der Oberfläche, fällt aber bei starken Erschütterungen ab. Die Dichte von Raureif liegt bei ca. $200\text{--}600\text{ kg/m}^3$; hohe Dichten kommen häufig an exponierten Lagen durch Hebung von feuchter Luft zustande.

5.1.2.3 Klareis

Klareis entsteht, wenn Wassertropfen aus Wolken und Nebel bei Lufttemperaturen unterhalb des Gefrierpunkts auf eine Oberfläche treffen. Hierbei gefrieren die Tropfen nicht vollständig, sondern werden vom Wind verteilt, dabei bildet sich eine sehr glatte Eisoberfläche. Der Gefriervorgang tritt erst nach und nach ein. Die Eisschicht passt sich der Form des umschlossenen Objektes gleichmäßig an und lässt sich von diesem kaum lösen. Klareis kann zu sehr hohen Eislasten führen, nicht zuletzt wegen seiner hohen Dichte von 900 kg/m^3 . Es entsteht aber



Abbildung 04: Vereisungsereignis im Waldviertel Ende November/Anfang Dezember 2014.

Figure 04: Icing-event in the Waldviertel, NE Austria, at the end of November/beginning of December 2014.

Quelle: *Einsatzdoku.at*, 2014

auch bei gefrierendem Regen oder gefrierendem Niesel. Die unterkühlten Wassertropfen gefrieren augenblicklich, wenn sie auf den Erdboden oder auf Gegenstände mit Temperaturen unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ auftreffen und bilden Glatteis (am Boden) oder eben Klareis (an Gegenständen). Diese Wettererscheinung tritt im Winter häufig dann auf, wenn sich nach einer längeren stabilen Wetterlage Kaltluftseen gebildet haben, in die mit Durchzug von Warmfronten Regen oder Niesel fällt.

5.1.2.4 Raueis

Raueis entsteht beim Auftreffen von unterkühlten Wasser- und Nebeltropfen an Oberflächen mit einer Temperatur von unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Es ist eine körnige, grauweiße und sehr fest anhaftende Eisablagerung unter Einschluss von Luftbläschen. Starker Wind begünstigt die Bildung von Raueis. Die Temperaturen für Raueisbildung liegen zwischen -2 und $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Die Dichte von Raueis liegt bei ca. $600\text{--}900\text{ kg/m}^3$.

5.1.2.5 Nassschnee

Befindet sich während eines Schneefalls Flüssigwasser zwischen den Schneekristallen der Schneeflocken kann sich an Gegenständen Nassschnee anheften. Meist tritt Nassschnee bei Temperaturen knapp über dem Gefrierpunkt auf ($0\text{--}3\text{ }^{\circ}\text{C}$). Sinkt die Temperatur zu einem späteren Zeitpunkt kann Nassschnee gefrieren. Er weist eine Dichte von $300\text{--}600\text{ kg/m}^3$ auf.

5.1.2.6 Methoden zur Berechnung von Eislasten, Eisklassen

In der Natur tritt Vereisung häufig nicht in den reinen Formen (Raureif, Raueis, Klareis und Nassschnee) auf. Da sich Entstehungsbedingungen aufgrund wechselnder meteorologischer Verhältnisse ständig ändern, kommt es zu Mischformen und der Aufbau von Eislasten ist ein dementsprechend komplexer Prozess. Generell sind Windgeschwindigkeit, Lufttemperatur, Flüssigwassergehalt und Tropfenspektrum die entscheidenden Parameter. Daneben spielen weitere Faktoren eine Rolle, wie die Querschnittsfläche der vereisenden Struktur, die lokale Topographie, die Höhe über Grund oder zusätzliche Feuchtequellen. Je nach Vereisungsart finden sich in der Literatur unterschiedliche Methoden zur Berechnung, z. B. ISO 12494 (2017) oder auch Makkonen (1981, 1984), Nygard et al. (2013) und Davis et al. (2013).

Eislasten sind vor allem für den Infrastrukturbereich von Bedeutung und betreffen z. B. Freileitungen, Bauwerke im alpinen, exponierten Gelände, Seilbahnen, Sendemaste, Messmaste und Windenergieanlagen.

Nach ISO 12494 (2017) wird die Eisklasse IC (ice class) definiert. Sie ist der charakteristische Wert mit einer Wiederkehrzeit von 50 Jahren als allseitiger Eisansatz für einen Referenz-Zylinder. Der Referenz-Zylinder hat einen Durchmesser von 30 mm, eine Länge von mindestens 0,5 m, befindet sich vertikal 10 m über Grund und rotiert langsam um die eigene Achse.

Eisklassen können dabei durch ein Vereisungsmodell (ice accretion model) unter Einbeziehung von meteorologischen und topographischen Daten berechnet oder durch Versuchsmessungen der Eismasse bestimmt werden. Dabei werden Eisklassen aufgrund ihrer unterschiedlichen Charakteristik sowohl für Klareis (ice class glaze ICG) als auch für Raureif (ice class rime ICR) definiert. Für extreme Eislast sind eigene Klassen jeweils für Klareis und Raureif definiert. Für Raureif soll dabei die Form der Raureiffahnen berücksichtigt werden.

5.2 Historische Entwicklung

Der Entwicklung der Normen ist die Entwicklung verschiedener Dachformen vorausgegangen. Das traditionelle Satteldach mit oder ohne Walm sowie das Zeltdach reagieren auf Schneelast mit der Reibung der Abdeckung und mit ihrer Neigung. Bei Neigungen $< 30^\circ$ werden selten, bei $> 60^\circ$ sehr häufig Verrutschungen des Schnees oder Dachlawinen beobachtet. Fensterdauben auf den Dächern oder Verflachungen im Dach bremsen solche Rutschungen und verursachen ganz lokal höhere Schneelasten. Auf dem Dach montierte Solarpaneele verringern die Oberflächenreibung und fördern das Abrutschen. Schneerechen auf den Dächern sollen das Rutschen großflächig und gleichmäßig verhindern

und vermeiden damit auch lokale Maxima der Schneelast oder Dachlawinen. In dieser Hinsicht reagieren die heute beliebten Pultdächer ähnlich wie Satteldächer: gleichmäßige Neigung und das Fehlen von Hindernissen vermeiden Maxima der Schneelast beim Niederschlag und beim Abrutschen.

Aus einer ganz anderen Warte wurden vor rund 100 Jahren thermisch isolierte Flachdächer propagiert. Sie sollten vermeiden, dass Dachlawinen Fußgänger und Straßenverkehr gefährden und dass Schmelzwasser über schneegefüllte Dachrinnen unkontrolliert Hauswände vernässt. Der Wohnbereich wird durch eine Betondecke abgeschlossen, über der wasserdichte, thermische Isolierung liegt. Darüber folgt ein belüfteter Raum von etwa 1 m Höhe, weiters die eigentliche Dachfläche, die leicht nach innen geneigt ist und Regen und Schmelzwasser in einen Ablaufkanal sammelt. Diese aufwändige Bauweise des sogenannten »Davoser Flachdachs« verhindert weitgehend die Bildung von lokalen Extremwerten der Schneelast und hat sich seit 1926 im schneereichen Davos so gut bewährt, dass sie in die Bauordnung der Gemeinde aufgenommen wurde.

5.2.1 Entwicklung der Normen in Österreich

5.2.1.1 Schneelastnorm

Die ersten als solche zu bezeichnenden Schneelastnormen Österreichs stammen aus den späten 1950er Jahren, z. B. ÖNORM B 4000 (Austrian Standards Institute, 1960; gültig zwischen 1960 und 1983). Ihre Grundlage bildete eine Karte, auf der die Absolutwerte für die anzunehmende »Regelschneelast« (in kg/m^2) direkt ablesbar waren. Eine sehr grobe Berücksichtigung von Regionsunterschieden ist erkennbar, in erster Linie orientieren sich die »Regelschneelasten« aber an der Seehöhe.

Im Vergleich dazu darf die Anfang der 1980er Jahre entwickelte Nachfolgerin der ÖNORM B 4000, die ÖNORM B 4013 (Austrian Standards Institute, 1983; gültig von 1983 bis 2006), als große Innovation gelten. Erstmals bildet eine Zonenkarte die Grundlage der Bemessung der Schneelast, und damit können klimatische Unterschiede zwischen verschiedenen Regionen deutlicher berücksichtigt werden. Österreichweit gibt es in ÖNORM B 4013 fünf Zonen. Die Abhängigkeit der Schneelast von der Seehöhe wird durch eine Berechnungsvorschrift berücksichtigt. Es handelt sich hierbei – wie bei der derzeit gültigen Gleichung 5.3 – um ein Polynom zweiten Grades, wobei für jede Lastzone andere Koeffizienten einzusetzen sind. Außerdem bietet ÖNORM B 4013 ein umfangreiches Ortsverzeichnis an, definiert einige Ausnahmen, behandelt verschiedene Dachformen und gibt Hinweise zum Umgang mit Windeinflüssen. Die

Schneelast wird in ÖNORM B 4013 als »Schneeregellast« bezeichnet, in kN/m^2 angegeben und als »einmal in 50 Jahren zu erwartende, maximale Schneelast« definiert. Sie gilt grundsätzlich gleichermaßen am Boden und auf Dächern. Die Bemessungswerte beruhen auf der extremwertstatistischen Auswertung von Datenreihen der Schneehöhe (unter Anpassung der Gumbel-Verteilung an die Extrema). Welche Messreihen verwendet wurden ist nicht bekannt, jedenfalls sind es nicht Datenreihen aller im Ortsverzeichnis angegebenen Orte (obwohl das Ortsverzeichnis dies suggerieren könnte). Ebenso unbekannt sind Details zur extremwertstatistischen Auswertung und deren Erfolg bzw. Vertrauenswürdigkeit. Außerdem erscheinen die Lastzonen als »mit meteorologischem Feingespür« erstellt, die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Zonengrenzen ist jedoch keineswegs gegeben.

Den nächsten – und bisher letzten – Meilenstein in der Geschichte der österreichischen Schneelastnorm setzte die notwendige Eingliederung der Norm in die europäischen Eurocodes. Dies geschah im Rahmen der Novelle zur ÖNORM B 1991-1-3:2006 (Austrian Standards Institute, 2006), die bis 2013 gültig war. (Die Novellierungen zur derzeit (2019) gültigen ÖNORM B 1991-1-3:2018 (Austrian Standard Institute, 2018) brachten keine Änderungen in den anzunehmenden Schneelasten, sondern enthielten nur bautechnische Empfehlungen, z. B. im Umgang mit aufgeständerten Solarpanelen.) ÖNORM B 1991-1-3 übernimmt die seehöhenabhängige Berechnungsvorschrift der Eurocodes für den Alpenraum (siehe Gleichung 5.3). Außerdem wird die Bemessungsschneelast nun eindeutig als sogenannte »charakteristische Schneelast am Boden« (am Dach gilt sie nur mehr dann unverändert, wenn dieses besonders groß ist) mit einer jährlichen Überschreitenswahrscheinlichkeit von 2 % definiert. Der Zusammenhang von Seehöhe und extremer Schneelast wird damit wie schon in ÖNORM B 4013 aus den 1980er Jahren als ein quadratischer angenommen, allerdings mit anderen Koeffizienten. Um weiterhin möglichst sinnvolle Werte der Schneelast festlegen zu können, musste die Zonierung geändert werden. Seither gibt es vier Schneelastzonen in Österreich.

5.2.1.2 Eislastnormen

Eislasten sind vor allem für den Infrastrukturbereich von Bedeutung. Dabei gibt es für unterschiedliche Anwendungsgebiete auch unterschiedliche Normen und Richtlinien. Viele davon basieren auf der ISO 12494 (2017). In der ÖNORM EN 1993-3-1 (Austrian Standards Institute, 2010) und dem nationalen Anhang für Österreich der ÖNORM B 1993-3-1 (Austrian Standards Institute, 2009) gibt es Angaben zur Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten wie Türme und Maste, die sich im Wesentlichen auf die ISO 12494 (2017) stützen. Für den Bereich Freileitungen (elektrische Oberleitungen, Stromübertragungsleitungen

etc. und Umspannwerke) gibt es eigene Normen z. B. ÖVE/ÖNORM EN 50341 (Austrian Standards Institute, 2011), die neben der ISO 12494 (2017) zum Teil weitere Aspekte, wie das regionale Klima und seine Ausprägungen berücksichtigen, darunter fällt z. B. ÖVE/ÖNORM EN 61936-1 (Austrian Standards Institute, 2015). Ausreichend konkrete Definitionen für meteorologische Eingangsparameter bzw. anzunehmende Belastungswerte sind jedoch nicht immer ausformuliert, was in der Anwendung Interpretationsspielraum offen lässt. Aktuell gibt es das Projekt des CEN (Comité Européen de Normalisation), dem Europäische Komitee für Normung, die ISO 12494 in einen Eurocode, die EN 1991-1-9 »Atmospheric Icing« überzuführen und zu überarbeiten. Elektrische Oberleitungen werden dann auch durch Standards der IEC (International Electrotechnical Commission) behandelt werden. Bei Eislasten ist häufig auch die kombinierte Wirkung mit Windlasten relevant und wird auch in den Normen und Richtlinien behandelt.

5.2.2 Entwicklung der Erfahrungen und Maßnahmen

5.2.2.1 Schneelast

Treten in einem Winter regional große Schneelasten auf, müssen die Dächer von Gebäuden geräumt werden. Dies geschah in den letzten Jahren zumeist zu Zeitpunkten, als die Normwerte noch nicht überschritten waren, aber das Überschreiten im weiteren Winterverlauf als möglich erachtet wurde. Meistens werden Feuerwehren oder andere Professionisten engagiert, die sich auf Arbeiten am hängenden Seil spezialisiert haben. Nach wie vor ist es jedoch auch üblich, dass Privatpersonen ihre Hausdächer ohne adäquate Schutzmaßnahmen (vor Absturz, Elektrounfällen u. Ä.) zu treffen, und ohne die nötige Sorgfalt im Umgang mit den Dachhäuten walten zu lassen, selbst von Schnee räumen.

5.2.2.2 Eislast

Maßnahmen zur Vorbeugung von großen Eislasten sind ein schwieriger Bereich, die ordnungsgemäße Planung und Wartung von Trassen an sich (besonders relevant für Nassschneelasten) könnten jedoch bereits als Vorbeugemaßnahmen angesehen werden.

Hohe Eislasten bergen Gefahren beim Aufenthalt bzw. Fahrten in und durch die betroffenen Gebiete. Der Aufenthalt in der Nähe von Bäumen, Masten und Stromleitungen sollte wegen der Gefahr von Eisbruch und herabfallenden Eisteilen vermieden werden. Teilweise werden bei erhöhter Gefahr Wälder und deren Zugänge und Zufahrten gesperrt.

Wenn Windenergieanlagen vereisen, müssen diese in Österreich abgeschaltet werden, um Eiswurf zu vermeiden. Für die Warnung vor Eisfall von Windenergieanlagen werden Warntafeln bzw. Warnleuchten vorgeschrieben. Die Anlagen dürfen erst bei Eisfreiheit wieder in Betrieb gehen.

5.3 Fallbeispiele

5.3.1 Schneelast

Die größten Schäden durch Schneelasten der letzten Jahrzehnte gab es im Jänner und Februar 2006 insbesondere am nördlichen Alpenrand Salzburgs, Ober- und Niederösterreichs sowie der Steiermark. Vielfach waren Risse an Gebäuden zu verzeichnen, einige Wirtschaftsgebäude und Hallendächer kamen zum Einsturz, Gebäude mussten vorübergehend gesperrt werden. Es gab außerdem einige Verletzte. In trauriger Erinnerung bleibt der Halleneinsturz im bayrischen Bad Reichenhall – nur wenige Kilometer von der österreichischen Grenze entfernt – vom 2. Jänner 2006. Dabei starben 15 Menschen. Eine Auswertung der ZAMG bescheinigt den Schneehöhen von 2006 in manchen der betroffenen Gebieten Jährlichkeiten von über 100 (siehe Balak et al., 2006). Die Jährlichkeiten der Schneelasten konnten mangels längerer Datenreihen nicht beurteilt werden, allerdings wurden die Werte der ÖNORM B 4013 (gültig 1983–2006, Austrian Standards Institute, 1983) in den stark betroffenen Gebieten teilweise deutlich überschritten. (Hinweis: Die im April 2006 in Österreich in Kraft getretene ÖNORM B 1991-1-3, bei der die Schneelasten im Mittel um ca. 1 kN/m^2 höher liegen als bei der Vorgängernorm, wurde nicht als Reaktion auf den Unglückswinter erstellt. Sie wurde in ihren wesentlichen Teilen bereits 2005 verfasst.)

Weit weniger dramatisch gestaltete sich der »Schneelastwinter« 2008/2009. Im oberen Kärntner Gailtal wurden bereits im Dezember 2008 viele Häuser von Schnee befreit, um nicht schon im Frühwinter allzu viel Schnee auf den Dächern zu akkumulieren (siehe Abbildung 05a). Tatsächlich kam es Anfang Februar 2009 dann zu vereinzelt Dacheinstürzen in Kärnten und gegen Ende Februar verhinderten in Ober- und Niederösterreich Dutzende Feuerwehreinheiten durch das Abschaufeln von Dächern Schlimmeres.

Der im Nordalpenbereich schneereiche Winter 2011/2012 brachte insbesondere in tiefen Lagen außergewöhnliche Schneelasten. So mussten im nördlichen Teil Innsbrucks Anfang Jänner Häuser evakuiert werden und Ende Jänner in Schwaz ein Einkaufszentrum (Abbildung 05b). Zur selben Zeit standen auch im Bezirk Leoben und im Pongau Feuerwehren und sogar Hubschrauber im Einsatz um Haus- und Hallendächer zu entlasten.



Abbildung 05: Schneeräumung am Nassfeld (Kärnten) im Februar 2009 (a) und auf dem Dach eines Einkaufszentrums in Schwaz im Jänner 2012 (b).

Figure 05: Snow removal at Nassfeld (Carinthia) in Februar 2009 (a) and from a mall roof in Schwaz in January 2012 (b).

Fotos: C. Gratzner (a), Freiwillige Feuerwehr der Stadt Schwaz (b)

Starkschneefälle Ende Jänner/Anfang Februar 2014 führten zu extremen Schneelasten im südlichen Osttirol und im südlichen Oberkärnten. Schäden an und Einstürze von Wirtschaftsgebäuden waren die Folge.

Große Schneemengen – insbesondere in tiefen Lagen – sorgten 2018 im Tiroler Oberland für außergewöhnliche Schneelasten. Relativ früh im Winter wurden bereits hohe Werte erreicht, weshalb erstmalig in Österreich ein kontinuierliches Monitoring in den am stärksten betroffenen Gebieten durchgeführt wurde. Glücklicherweise entspannte sich die Situation im Laufe des sehr trockenen Februars.

Die Rekordschneefälle im Jänner 2019 in den österreichischen Nordalpen sorgten erstmals seit 2006 für ein flächenhaftes Überschreiten der Normwerte (eine erste Einschätzung geben Radlherr et al., 2019). Tausende Dächer wurden von Schnee befreit, es kam vielfach zu Schäden an Gebäuden und zu einigen Einstürzen. Auch etliche Bäume hielten dem Schneedruck nicht stand. Personen kamen dabei nicht zu Schaden, allerdings forderte eine Dachlawine während des Abschaufelns eines Daches in Faistenau (Salzburg) ein Menschenleben und in Gnadenwald (Tirol) wurde ein Pferd durch den Einsturz eines Rondells getötet.

5.3.2 Eislast

Von Ende November bis Anfang Dezember 2014 (28.11. bis 05.12.) gab es ein außergewöhnliches Vereisungsereignis im Osten Österreichs. Die Großwetterlage war von einem mächtigen Kontinentalhoch geprägt, atlantische Tiefdruckgebiete wurden blockiert. Entlang des Alpenostrands, im Wein- und Waldviertel gab es zähen Nebel bzw. Hochnebel. In der feuchten Grundschicht

zwischen 700 m und der Nebelobergrenze (ca. 1.200 m) herrschten Temperaturen unter dem Gefrierpunkt. Diese wurde verursacht durch kühlere kontinentale Luftmassen, die mit der Südost-Strömung herangeführt wurden. Darüber bildete sich eine markante Inversion mit einer trockenen Luftmasse in darüber liegenden Schichten. Diese Luftschichtung blieb für einige Tage sehr beständig. Durch die Entkoppelung der beiden Luftmassen kam es zu keiner vertikalen Durchmischung. Die Folge war starke Raueisbildung und nachfolgend gefrierender Regen (siehe dokumentierte Eisablagerungen in Abbildung 04). Massiv betroffen waren die Gebiete vom Rosalingebirge über die Bucklige Welt, Hohe Wand, die nördlichen Gutensteiner Alpen, der südliche Wienerwald bis hin ins Waldviertel.

In der Unwetterübersicht der ZAMG (2018) findet sich folgende Analyse: Die Kombination von Inversionen, Wind, Nebel, frostigen Temperaturen und gefrierendem Regen sorgte im Zeitraum vom 28. November bis zum 5. Dezember 2014 für außergewöhnliche Vereisungen in vielen Regionen im Waldviertel, im Industrieviertel sowie in Teilen des Mühlviertels, im nördlichen Burgenland (besonders im Rosalingebirge) sowie in der Oststeiermark. Besonders betroffen war Niederösterreich, wo das Land in den betroffenen Regionen Katastrophenalarm ausrief. Aufgrund der zahlreichen, durch die hohe Eislast umgestürzten Bäume mussten flächendeckend Straßen gesperrt werden und viele Ortschaften mussten mit Notstromaggregaten versorgt werden. Schulen, etwa im Umkreis von Ottenschlag, wurden aus Sicherheitsgründen mehrere Tage lang gesperrt.

5.4 Einschätzung des Sachstands, Unsicherheiten

5.4.1 Schneelast

Zur Bemessung der 50-jährlichen Schneelasten an beliebigen Orten ist ein möglichst dichtes Messnetz mit möglichst langen Datenreihen nötig. In Österreich verfügt man für diese Zwecke grundsätzlich über eine sehr gute Datenlage was langjährige Schneemessungen betrifft. Es bestehen Hunderte, räumlich recht ausgewogen verteilte, jahrzehntelange Messreihen der täglichen Schneehöhe, viele umfassen mehr als 100 Jahre (z. B. Abbildung 02).

Insbesondere in den Archiven der Hydrographischen Dienste der Bundesländer wird dieser Datenschatz aufbewahrt und ein großer Teil ist digitalisiert. Soweit es die Qualität dieser Messungen betrifft, kann gesagt werden, dass es sich bei der Feststellung der täglichen Schneehöhe um eine prinzipiell einfache Messung handelt, die auch in historischen Zeiten mittels Zollstock oder Messlatte bereits mit hoher Genauigkeit (im Zentimeterbereich) durchgeführt wer-

den konnte. Trotz der einfachen Messung zeigen sich auch in den Zeitreihen der Schneehöhe Fehler und Inhomogenitäten und verlangen eine sorgfältige Datenprüfung. Heute werden neben Handmessungen vermehrt automatische Messungen durchgeführt. Außerdem benötigt man für die extremwertstatistische Auswertung von Schneehöhen in erster Linie nur das jährliche Maximum. Naturgemäß handelt es sich dabei um verhältnismäßig hohe Werte, wodurch der relative Fehler tendenziell als gering eingeschätzt werden darf. Es darf des Weiteren davon ausgegangen werden, dass besonders dem Jahreshöchstwert zu allen Zeiten besonderes Augenmerk geschenkt wurde und damit seine Genauigkeit im Vergleich zu den übrigen Messungen als eher höher eingestuft werden darf. (Allerdings müssen außergewöhnliche Schneemessungen an besonders schneereichen Standorten in besonders schneereichen Wintern (etwa ab Schneehöhen > 300 cm) erfahrungsgemäß kritisch beurteilt werden. Unter solchen Extrembedingungen dürfte es insbesondere in historischen Zeiten öfters zu fehlerhaften Aufzeichnungen gekommen sein.) Was fehlt ist eine übergeordnete Datenbank die »alle« in Österreich zur Verfügung stehenden Schneehöhenmessungen (inkl. Metainformationen) umfasst, wenngleich etwa die ZAMG bereits Zugriff auf einen beachtlichen Datenstock vorweisen kann.

In den letzten Jahren gab es – insbesondere an der ZAMG Kundenservicestelle für Tirol und Vorarlberg in Innsbruck – große Bestrebungen, diese Schneehöhendaten mit modernen extremwertstatistischen Methoden auszuwerten und zwischen den Stationen in die Fläche zu interpolieren. Abbildung 06 zeigt ein Ergebnis dieser Bestrebungen.

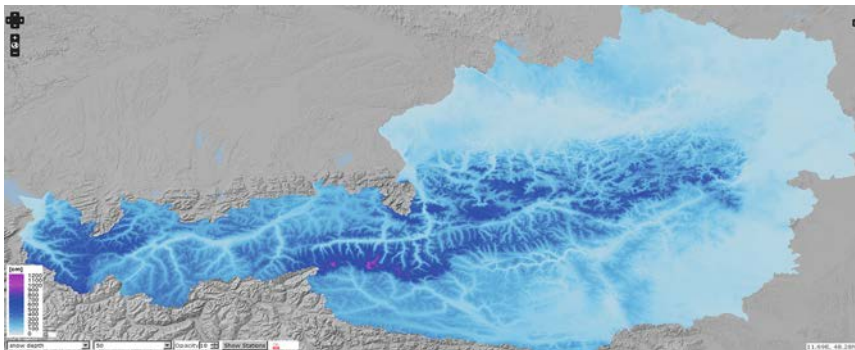


Abbildung 06: Darstellung der 50-jährlichen Schneehöhen in Österreich. Es ist nicht trivial von einzelnen, für Messstationen berechneten Extremwerten flächige Darstellungen abzuleiten. Hier wurde mit diesem Problem mathematisch korrekt umgegangen.

Figure 06: Visualization of snow heights with a return period of 50 years in Austria. It is not trivial to derive areal distribution from calculated extremes of distinct stations. In this example the problem was solved in a mathematically consistent way.

Quellen: EVAmaps, ZAMG; siehe z. B. Schellander und Hell, 2018

Entscheidend in diesem Zusammenhang ist die Tatsache, dass es sich bei den angesprochenen, umfangreichen Messdaten um *Schneehöhen* und nicht um *Schneelasten* handelt. Letztere zu messen ist deutlich aufwändiger und es gibt in Österreich nur sehr wenige langjährige Reihen. Seit einigen Jahren gibt es vermehrte Bestrebungen ein Messnetz der Schneelast bzw. des Schneewasserwerts in Österreich aufzubauen. Auslöser für neue Ideen in diese Richtung sind Entwicklungen in der Messtechnik. Bisher waren automatisierte Messungen nur durch Schneekissen und Schneewaagen möglich. Diese Messgeräte sind jedoch groß, teuer und wartungsintensiv und daher für den operationellen Betrieb an vielen verschiedenen Standorten nicht gut geeignet. In den letzten Jahren konnten jedoch vor allem mit der Messung der schneebedingten Abschwächung von GNSS-Signalen Erfolge erzielt werden. Mehrere Institutionen prüfen derzeit die Möglichkeit des operativen Einsatzes dieser Methode zur automatischen Bestimmung des Schneewasserwerts.

Für die aktuelle Datensituation lässt sich allerdings zeigen, dass man bei weitem bessere Ergebnisse erzielt, wenn man die Vielzahl der Schneehöhenmessungen zur Extremwertberechnung verwendet und sich Methoden überlegt, wie man die Schneedichte parametrisiert um die Schneelast zu erhalten, als die wenigen Schneelastmessungen direkt extremwertstatistisch zu verarbeiten.

Die Unsicherheit in der Berechnungen der charakteristischen Schneelast mittels Gleichung 5.3 ergibt sich aus mindestens drei Teilunsicherheiten:

- 1) die Umrechnung von gemessenen Schneehöhen auf Schneelasten durch Abschätzung der Schneedichte.
- 2) die Berechnung der 50-jährlichen Werte basierend auf den Methoden der Extremwertstatistik.
- 3) die Interpolation von wenigen Messstationen auf einen beliebigen Gebäudestandort auf beliebiger Seehöhe wird durch die Zonierung der ÖNORM (und die entsprechenden Variablen Z) und Gleichung 5.3 nur unzureichend erfasst.

Zu diesem regionalen Effekt kommen noch kleinräumigere Effekte zur Wirkung: ein Gebäude in einer Waldlichtung bekommt vom großräumigen Niederschlagsfeld einen anderen Anteil als eines auf einem freien Bergrücken. In der Skala eines Dachs treten durch den Einfluss des Winds beim Niederschlag und bei der folgenden Umverteilung des Schnees auf dem Dach durch Winddrift im Abstand von einigen Metern signifikante Unterschiede in der ganz lokalen Schneelast auf.

Weiters erfolgt Umverteilung durch Dachlawinen und Verrutschungen unmittelbar bei oder in den Tagen nach Schneefall. Schließlich bewegt sich Regen- und Schmelzwasser durch die vorhandene Schneedecke und verschiebt die Last (Eis plus Wasser) im Meter- bis Dekameterbereich. Wenn mehr als etwa 10 % des

Porenraums (Luftvolumens) der Schneedecke mit flüssigem Wasser gefüllt ist, beginnt sich dieses Wasser zu bewegen. Es sickert vertikal in die Schneedecke ein und kann sich je nach Neigung horizontal (dachabwärts) mit Geschwindigkeiten von Dezimeter pro Stunde verlagern (Jordan et al., 2008). Dabei kann es von Änderungen der Dachneigung oder von undurchlässigen Eisschichten gestaut werden, sodass sich lokale Extreme der Last entwickeln.

5.4.2 Eislast

Prinzipiell können Eislasten (z. B. Eismasse in kg/m) mit entsprechenden Messgeräten direkt bestimmt werden (Fikke et al., 2006) und es ist möglich aus langjährigen Messungen – ISO 12494 (2017) empfiehlt mindestens 20 Jahre – mittels Extremwertstatistik die 50-Jährlichkeit zu bestimmen. Die Schwierigkeit ergibt sich jedoch bereits bei der Messung von Eislasten. Zum einen gibt es in Österreich keine langjährigen Reihen und zum anderen ist die Vereisungsmessung in der Natur eine große Herausforderung. Messungen zu Eislasten sind in Österreich zwar vereinzelt verfügbar (Dobesch et al., 2005) oder wurden temporär betrieben, ausreichend lange Zeitreihen für klimatologische und Extremwertbewertungen sind jedoch (noch) nicht verfügbar. Von der ZAMG wurden im Winter 2015/2016 Messungen an drei vereisungsträchtigen Standorten im Rahmen eines Forschungsprojektes begonnen. Dabei zeigten sich Mängel in der Konzeptionierung der Messgeräte, die nur teilweise behoben werden konnten. Dennoch konnten einige eindrucksvolle Vereisungsereignisse gemessen und beobachtet werden (Abbildung 07).

Zusätzlich zu den automatischen Messungen wurde ein fixer Referenzzyylinder gleicher Bauart (3 cm Durchmesser, 50 cm Länge, gleiches Material und Oberflächenbeschaffenheit) angebracht um den Vergleich zwischen der Eislastmessung nach Messgerät entsprechend ISO 12494 (rotierend, allseitiger Eisansatz) und dem »natürlichen« Erscheinungsbild anstellen zu können. Des Weiteren werden Augenbeobachtungen durch Beobachter durchgeführt und Webcam-Aufnahmen archiviert. Dadurch wird ermöglicht, die Prozesse zur Bildung und zum Abbau zu dokumentieren um diese besser zu verstehen. Zusatzmessungen der Dimensionen der Eisablagerungen bringen weitere Information über die Eigenschaften der Eisablagerungen und ermöglichen gemeinsam mit der gemessenen Eislast Rückschlüsse auf die Dichte der Eisansätze. Es ist geplant diese Messungen und Beobachtungen weiterzuführen, zwischenzeitlich wurden zwei Standortwechsel durchgeführt um auch Charakteristika der Vereisung in unterschiedlichen Regionen zu erfassen.

Fragestellungen der Extremwertbestimmung und die Interpolation der Ergebnisse auf andere Standorte sind jedoch mit diesen sehr kurzen Reihen noch



Abbildung 07: Eislastmessung am Sonnblick: mittels rotierendem IceMonitor von Combitech (a), Raureiffahne an einem festen baugleichen Zylinder (50 cm Länge, 3 cm Durchmesser) (b), 23. 11. 2016. Im Zuge einer Südwestwetterlage wurden knapp über 11 kg/50 cm und eine maximalen Raureiffahne von 35 cm erreicht.

Figure 07: Ice load measurements at Sonnblick: ice accumulation on a rotating IceMonitor from Combitech (a), hard rime vane on an identical cylinder (50 cm length, 3 cm diameter) (b), 23. 11. 2016. Winds from Southwest brought more than 11 kg/50 cm of ice load and a maximal length of the vane of 35 cm.

Quelle: ZAMG-Sonnblick Hermann Scheer

nicht machbar. Die Modellierung ist somit zwischenzeitlich die einzige Möglichkeit zur Bemessung von Eislasten. Für die Kalibrierung der Vereisungsmo-
dellierung und deren Validierung sind die Messungen selbst jedoch unbedingt notwendig.

5.5 Mögliche zukünftige Entwicklung

Es gibt für Österreich keine Untersuchungen über eine mögliche Häufung oder Verringerung der 50-jährlichen Schneelasten während der letzten Jahrzehnte. Es ist daher unklar, ob Schneelasten, die die Bemessungswerte der ÖNORM B 1991-1-3 (Austrian Standards Institute, 2018) übersteigen, häufiger oder seltener geworden sind.

Die meteorologischen Bedingungen, die in Bayern und im österreichischen Nordalpenbereich zur Extremschneelast vom Jänner und Februar 2006 führten, wurden von Strasser (2008) untersucht, der nicht extreme Normschneelast, sondern häufigen Frostwechsel und folgende Umverteilung der Last auf den Dächern als mögliche Ursache vorschlägt. Im Hinblick auf den Klimawandel könnten vor allem Temperatur, Niederschlag, Wind und Schmelzwasser von Bedeutung für Änderungen in der Schneelast sein. Die Möglichkeit einer Projektion von Schneelasten aus diesen Größen ist sehr gering, weil zum Beispiel

der Trend von Temperatur und Niederschlag in Jahrzehnten kleiner ist als ihre Standardabweichung von Jahr zu Jahr und weil die Schneelasten stärker auf die Abfolge von Wetterlagen und die Kombination von meteorologischen Parametern als auf deren langfristige Änderung reagieren würde.

Aussagen zur möglichen zukünftigen Entwicklung der Eislast müssen derzeit ähnlich vage ausfallen, wie eben Erwähntes zur Schneelast. In Bezug auf den Klimawandel und die Entwicklung von Eislasten existieren für Österreich bisher keine Studien. Eine mögliche Veränderung der Persistenz der Wetterlagen hin zu längerem Andauern von Wetterlagen, die gute Bedingungen für Vereisung und Bildung von Eisablagerungen mit sich bringen, kann trotz eines im Mittel wärmeren Klimas relevant werden.

5.6 Handlungsoptionen

5.6.1 Schneelast

Seit 1983 steht Österreich eine sehr detaillierte Schneelastnorm zur Verfügung. Sie wurde jedoch seither hinsichtlich der Datengrundlage und der verwendeten Methoden nicht mehr wesentlich weiterentwickelt. Um in Zukunft Katastrophenschutz und Baunorm hinsichtlich Schneelastextrema verbessern zu können, braucht es Anstrengungen im Bereich des Aufbaus von umfassenden Datenbanken, der Entwicklung von geeigneten Schneedichtemodellen und des Einsatzes von modernen Methoden der Extremwertstatistik, die nachvollziehbares und mathematisch korrektes Interpolieren der Extremwerte in die Fläche ermöglichen. Außerdem sollte für besseren Schutz ein systematisches Monitoring der Schneelast angepeilt werden, damit man kritische Fälle frühzeitig als solche erkennt. Der Aufbau eines nationalen Netzes automatisierter Messungen der Schneelast ist hierfür anzustreben. Neue Daten (insbesondere automatisiert gewonnene) und daraus abgeleitete Erkenntnisse könnten die normgebenden Gremien unterstützen, damit die Kartenbasis der ÖNORM B 1991-1-3 in regelmäßigen Intervallen auf den aktuellen Stand gebracht werden kann.

Außerdem sind kommunale Organisation der Kontrolle sowie Dachräumungen in Gebieten mit Extremereignissen zu empfehlen. Die Kontrolle kann etwa durch Messungen am Dach erfolgen. Die Übertragung von Normwerten auf das eigene Dach setzt persönliche Beobachtungen voraus, die mit Webcams erleichtert und ergänzt werden können. Wichtige Beobachtungen dazu sind: typische Schneedrift auf dem Dach je nach Windrichtung, Stärke und Schneebeschaffenheit; wo bleibt Schnee am längsten liegen; wo gibt es kleine Hindernisse für eine eventuelle Schneeräumung. Die eigenen Beobachtungen kön-

nen mit den Warnungen der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik verglichen werden:

- www.zamg.at/warnungen
- www.meteoalarm.eu

5.6.2 Eislast

Der geplante neue Eurocode EN 1991-1-9 »Atmospheric Icing« ist ein sehr begrüßenswertes Vorhaben. In Folge ist es ratsam, für die Gestaltung von Normen und Richtlinien mit nicht ausreichenden Definitionen zur Eislast Expertinnen und Experten aus Meteorologie, Klimatologie und Physik einzubinden. Damit können der Interpretationsspielraum minimiert und eindeutige Definitionen der meteorologischen und klimatologischen Parameter ausgewiesen werden, um so die Normen und Richtlinien in der Anwendung praktikabler zu gestalten. Dies gilt insbesondere für Normen nach den IEC-Standards.

Wie auch bei der Schneelast ist es notwendig, weitere Grundlagen zu schaffen, wobei auf dem Gebiet der Eislasten die Datenbasis deutlich geringer ist. Um zukünftig fundiertere Annahmen zur Eislast tätigen zu können sind langjährige Messungen der Eislast in Österreich essentiell. Empfohlen wird eine Fortführung der aktuell laufenden Messungen der ZAMG, weitere Tests mit anderen Messgeräten (beispielsweise durch Neuentwicklungen) und eine Ausweitung des Messprogramms. Dabei ist die Einbeziehung von von Eislast und von bodengebundener Vereisung betroffenen Branchen notwendig, z. B. Elektrizitätswesen im Anlagenbetrieb und Leitungsbau, Luftfahrt, Forstwirtschaft und Infrastruktur,... um nur einige zu nennen.

Zwischenzeitlich bietet die Modellierung von Eislasten mangels vorliegender langjähriger Messungen eine Option für die Bemessung von Eislasten. Gerade im Windenergiebereich werden die Vorhersagen von Vereisung zur Minimierung der Gefahren und Optimierung des Betriebs immer relevanter.

In Akutfällen sollten Warnungen und Handlungsempfehlungen von Wetterdiensten (vgl. obige Links zu den Warnseiten), Behörden, Gemeinden, Blaulichtorganisationen und Grundbesitzern befolgt werden.

Danksagung

Wir danken Patrik Nairz und Carmen Oberparleiter für die Daten der Tabelle 01.

Literatur

- Austrian Standards Institute, 1960. ÖNORM B 4000:1960. Berechnung und Ausführung der Tragwerke, Schnee und Eislasten, Allgemeine Grundlagen.
- Austrian Standards Institute, 1983. ÖNORM B 4013:1983-12-01. Belastungsannahmen im Bauwesen; Schnee- und Eislasten.
- Austrian Standards Institute, 2006. ÖNORM B 1991-1-3:2006-04-01. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1–3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten.
- Austrian Standards Institute, 2009. ÖNORM B 1993-3-1:2009-03-15. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 3–1: Türme, Maste und Schornsteine, Türme und Maste.
- Austrian Standards Institute, 2010. ÖNORM EN 1993-3-1:2010-08-15. Eurocode 3: Bemessung und Konstruktion von Stahlbauten, Teil 3–1: Türme, Maste und Schornsteine, Türme und Maste.
- Austrian Standards Institute, 2011. ÖVE/ÖNORM EN 50341:2011-01-01. Freileitungen über AC 45 kV.
- Austrian Standards Institute, 2012. ÖNORM EN 1991-1-3:2012-03-01. Eurocode 1: Actions on structures, Part 1–3: General actions, Snow loads (konsolidierte Fassung).
- Austrian Standards International, 2018. ÖNORM B 1991-1-3:2018-12-01. Eurocode 1: Einwirkungen auf Tragwerke – Teil 1–3: Allgemeine Einwirkungen – Schneelasten.
- Austrian Standards Institute, 2015. ÖVE/ÖNORM EN 61936-1:2015-01-01. Starkstromanlagen mit Nennwechselspannungen über 1 kV – Teil 1: Allgemeine Bestimmungen.
- Balak, M., Hubner, W., Steinbrecher, M., 2006. Schneedruckschäden an Hallenkonstruktionen in Österreich im Winter 2005/2006. Forschungsbericht. ofi-Institut für Bauschadenforschung, Wien, 38 S.
- Davis, N., Hahmann, A.N., Clausen, N.-E., Zagar, M., 2013. Forecast of Icing Events at a Wind Farm in Sweden. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 53, S. 262–281.
- Dobesch, H., Nikolov, D., Makkonen, L., 2005. Physical Processes, Modelling and Measuring of Icing Effects in Europe. *Österreichische Beiträge zu Meteorologie und Geophysik*, 34, 71 S.
- Einsatzdoku.at, 2014. Eishülle im südl. Waldviertel fordert Dauereinsatz der Feuerwehren. <https://www.einsatzdoku.at/2014/12/01/eishuelle-im-suedl-waldviertel-fordert-dauer-einsatz-der-feuerwehren> [10.12.2018].
- Fierz, C., Armstrong, R.L., Durand, Y., Etchevers, P., Greene, E., McClung, D.M., Nishimura, K., Satyawali, P.K., Sokratov, S.A., 2009. The International Classification for Seasonal Snow on the Ground. IHP-VII Technical Documents in Hydrology, 83/IACS Contribution, 1. UNESCO, International Hydrological Programme, Paris, 80 S.
- Fikke, S., Ronsten, G., Heimo, A., Kunz, S., Ostrozlik, M., Persson, P.-E., Sabata, J., Wareing, B., Wichura, B., Chum, J., Laakso, T., Säntti, K., Makkonen, L., 2006. COST-727: Atmospheric Icing on Structures. Measurements and data collection on icing: State of the Art. *MeteoSwiss*, 75, 110 S.
- Freiwillige Feuerwehr der Stadt Schwaz, 2018. 21.01.12: Dachlast überschritten... <https://www.ff-schwaz.at/2012/01/21/210112-dachlast-schritten/> [01.09.2018].
- ISO-Standard, 2017. ISO 12494:2017-03-01. Atmospheric icing of structures.

- Jordan, R., Albert, M., Brun, E., 2008. Physical processes within the snow cover and their parameterization. In: R.L. Armstrong, E. Brun (Hrsg.), *Snow and Climate*. Cambridge University Press, S. 12–69.
- Klinger, E., 1986. *Die Wetterbeobachtungen an Klimastationen*. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.
- Makkonen, L., 1981. Estimating intensity of atmospheric ice accretion on stationary structures. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 20, S. 595–600.
- Makkonen, L., 1984. Modelling of Ice Accretion on Wires. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 23, S. 929–939.
- Nygaard, B., Egil, B., Agustsson, H., Somfalvi-Toth, K., 2013. Modeling wet snow accretion on power lines: Improvement to previous methods using 50 years of observation. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52, S. 2189–2203.
- Radlherr, A., Winkler, M., Bauer, M., 2019. Schneereiche Zeiten und was unsere Haus-einfahrten mit Meteorologie zu tun haben. Ein Jänner wie selten.... Kuratorium für Alpine Sicherheit. Blogbeitrag. <https://www.alpinmesse.info/de/Schneereiche-Zeiten-ein-Jaenner-wie-selten/> [25.04.2019].
- Schellander, H., Hell, T., 2018. Bivariate spatial modeling of extreme snow load and snow depth in Austria. *Geophysical Research Abstracts*, 20, S. 7510.
- Schöner, W., Mohnl, H., 2002. Schneehöhen und Schneebedeckung. *Hydrologischer Atlas Österreichs*, Kartenblatt 4.2.
- Strasser, U., 2008. Snow loads in a changing climate: new risks? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, S. 1–8.
- ZAMG, 2018. Monthly Climate Report. http://www.zamg.ac.at/cms/en/climate/climate-overview/current_climate/monthly_climate/unwetterbericht?monat=12&jahr=2014 [09.08.2018].

6 Stürme

Christoph Matulla, Frauke Feser, János Tordai, Matthias Schlögl,
Holger Starke, Wolfgang Schöner, Katharina Enigl, Barbara Chimani,
Michael Hofstätter und Konrad Andre*

Zusammenfassung

Im Zentrum dieses Beitrags stehen Stürme, die weltweit, in Europa, im europäischen Alpenraum und in Österreich zu den zerstörerischsten Naturgefahren zählen. Die vorliegende Darstellung befasst sich sowohl physikalisch-konzeptionell mit dem Extremereignis »Sturm«, als auch strategisch mit dessen Auswirkungen und geeigneten Adaptionsmaßnahmen. Nach der notwendigen Begriffsbildung behandeln beide Foki folgende Aspekte: Beobachtung/Messung, historische Entwicklung, gegenwärtiger Stand (state-of-the-art) des Wissens, Simulation/Warnung, künftig mögliche Entwicklungen, Schutzstrategien und schließlich Handlungsempfehlungen.

Abstract

Storms are amongst the most destructive natural hazards worldwide, in Europe, in the European Alpine region and in Austria. We address both, the physical character of the extreme event »storm« as well as strategic concepts tackling impacts and appropriately coping with this threat. After establishing common basis, both foci pursue the following

* Christoph Matulla, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Klimasystem und Klimafolgen, christoph.matulla@zamg.ac.at.

Frauke Feser, Helmholtz-Zentrum Geesthacht, Institut für Küstenforschung, frauke.feser@hzg.de.

János Tordai, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Klimasystem und Klimafolgen, janos.tordai@zamg.ac.at.

Matthias Schlögl, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren, matthias.schloegl@boku.ac.at.

Holger Starke, Österreichische Hagelversicherung, Abteilung Meteorologie und Geoinformation, starke@hagel.at.

Wolfgang Schöner, Karl-Franzens-Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung, wolfgang.schoener@uni-graz.at.

Katharina Enigl, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Klimasystem und Klimafolgen, katharina.engl@zamg.ac.at.

Barbara Chimani, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Klimamonitoring und Kryosphäre, barbara.chimani@zamg.ac.at.

Michael Hofstätter, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Klimasystem und Klimafolgen, michael.hofstaetter@zamg.ac.at.

Konrad Andre, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Klimasystem und Klimafolgen, konrad.andre@zamg.ac.at.

aspects: observation/measurement, historical evolution, state-of-the-art, simulation/warning procedures, potential future developments, protection strategies and guidance.

Kernaussagen

- Stürme, Naturgefahren, Risiko, Extremereignisse
- Beobachtungen, Modellierung, Unsicherheit
- Warnungen, Strategien, Handlungsempfehlungen

Key Points

- Storms, natural hazards, risk, extreme events
- Observations, modelling, uncertainty
- Warnings, strategies, decision support

6.1 Einführung

6.1.1 Definition und Terminologie

Unter Windgeschwindigkeit versteht man die Strömungsgeschwindigkeit der Luft relativ zur Erdoberfläche. Per Definition spricht man von einem Sturm, wenn die Strömungsgeschwindigkeit relativ zur Erdoberfläche 75 km/h oder 9 Beaufort überschreitet (WMO, 1970). Treten hohe Druckunterschiede auf relativ kurzer Distanz auf (Drängung der Isobaren), so entstehen Stürme. Solche Bedingungen liegen insbesondere im Bereich stark ausgeprägter Tiefdrucksysteme vor. Stürme werden anhand ihrer Entstehungsbedingungen und ihrer Ausdehnung unterschieden: Tropische Wirbelstürme, außertropische Stürme und kleinräumige Stürme.

Tropische Wirbelstürme, wie z. B. Hurrikans, Taifune, Zyklone, sind Tiefdruckgebiete ohne Frontsysteme, und entwickeln sich in den Tropen oder Subtropen. Österreich ist von solchen Wetterereignissen nicht betroffen.

Außertropische Stürme (Stürme in mittleren und hohen Breiten, z. B. Sturm-tiefs) stellen dagegen eine Bedrohung für Mitteleuropa und damit den Alpenraum dar. Die für Mitteleuropa relevanten Tiefdruckgebiete entstehen über dem Atlantischen Ozean, wo an der Polarfront, dem Grenzbereich zwischen kalten und warmen Luftmassen, optimale Bedingungen für deren Ausbildung vorherrschen. Außertropische Stürme erstrecken sich meist über 1.000 km und haben eine Lebensdauer von 3 bis 10 Tagen. Die besonders kräftigen Sturmtiefs, die Mitteleuropa in der Periode 199–2008 erreichten, fallen mit einer ausgeprägt positiven Phase der NAO (Nordatlantische Oszillation) zusammen. Österreich war besonders von Vivian (1990), Wiebke (1990), Lothar (1999), Kyrill (2007) und Emma (2008) betroffen. Insgesamt entstanden in diesem Zeitraum Schäden von mehreren 100 Millionen Euro.

Neben diesen großräumigen Phänomenen treten in Österreich auch regional-skalige Stürme auf. Unter diesen ist besonders der Föhn zu erwähnen. Dabei können zwei Entstehungsbedingungen unterschieden werden: einerseits – angetrieben durch ausgeprägte Druckgradienten vom Luv ins Lee des Gebirges – das Zusammenwirken feuchtadiabatischer Abkühlung (0,6 C/100 m) und dem Ausregnen im Luv, sowie trockenadiabatischer (1 Grad/100 m) Erwärmung im Lee; andererseits durch das Absinken von Luft aus höheren Atmosphärenschichten auf der windabgewandten Seite. Auch hier ist die treibende Kraft eine ausgeprägte Luv-Lee Strömung.

Föhnstürme treten in allen Gebirgsregionen der Welt auf und tragen unterschiedliche Namen: Rocky Mountains, USA: Chinook, Ecuador: Chanduy, usw. Im Alpenraum spricht man von Alpenföhn und in Österreich unterscheidet man zusätzlich zwischen Nord- und Südföhn. Wetterfähige Menschen leiden bei Auftreten des Föhnwindes an physiologischen Auswirkungen – die häufigsten Symptome sind Migräne und Schlafstörungen. Der Vollständigkeit halber seien noch tagesperiodische, thermisch bedingte Berg-Talwindzirkulationssysteme erwähnt.

Bei starker Konvektion bilden sich z. T. heftige Gewitter, die von schweren Fallböen (Downbursts) oder Tornados begleitet werden können. Diese kleinräumigen und kurzlebigen Wetterereignisse sind in Österreich für erhebliche Schäden verantwortlich. Der bisher stärkste Tornado (Kategorie F4) trat 1916 in Wiener Neustadt auf und forderte 32 Menschenleben.

6.1.2 Stürme als Extremereignisse

Stürme – auch in Hinblick auf resultierende Schadausmaße – folgen einer klassischen Extremwertverteilung (Coles, 2001; Ceppi et al., 2008; Steinkohl et al., 2013). Starke Windböen bis zu 7 Beaufort (61 km/h) treten in Österreich von Juni bis August zwischen 15 und 20 Uhr auf (Kaltenböck und Steinheimer, 2015).

Orkanböen (Windgeschwindigkeiten ≥ 118 km/h, 12 Beaufort) dahingegen sind wesentlich seltener und treten vor allem zwischen November und Februar auf. Sturmdaten werden z. B. vom European Severe Storms Laboratory (ESSL) in der European Severe Weather Database (ESWD) gesammelt. Besonders schad-induzierende Sturmereignisse sind von anderen Naturgefahren wie etwa Hagel, Blitzschlag oder Starkniederschlag begleitet und können Überflutungen oder Murgänge auslösen (Kaltenböck et al, 2009).

Daten zu wetterinduzierten Schadereignissen werden an der ZAMG in der VIOLA Datenbank seit 1948 erfasst. Abbildung 01 zeigt – nach Ereigniskategorien gegliedert – die innerhalb der EU-28 entstandenen ökonomischen Schäden von 1980 bis 2016. Dabei treten die Winterstürme 1999, die Hochwässer

2000 (mit je 13 Milliarden Euro Schaden; EEA, 2018) und 2002 (mehr als 20 Milliarden Euro Schaden) und die Dürre/Hitzewelle 2003 (mit fast 15 Milliarden Euro Schaden), hervor. Über den gesamten Zeitraum betrachtet sind Sturmschäden im Mittel für 32 % der Gesamtschäden verantwortlich.

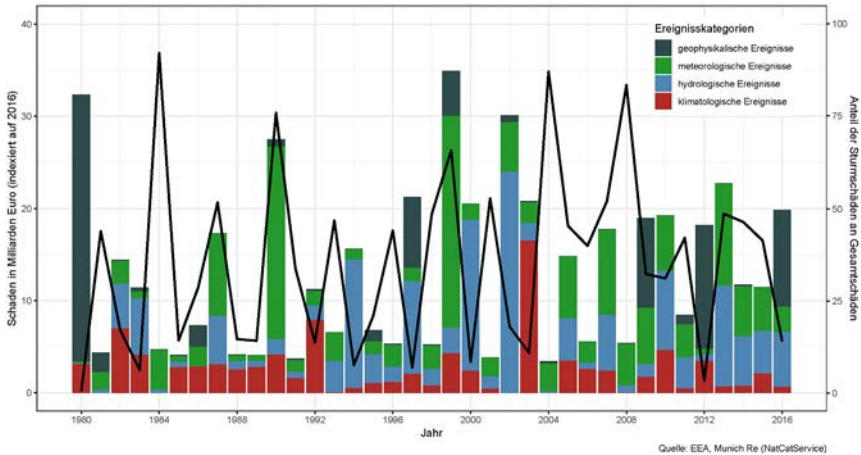


Abbildung 01: Ökonomischer Schaden (EU-28) aufgeschlüsselt nach geophysikalischen Ereignissen (Erdbeben, Tsunamis, Vulkanausbrüche), meteorologischen Ereignissen (Stürme), hydrologischen Ereignissen (Überflutungen, gravitative Massenbewegungen) und klimatologischen Ereignissen (Hitzewellen, Kältewellen, Dürren, Waldbrände). Die schwarze Linie beschreibt den Anteil sturminduzierter Verluste bezogen auf alle wetter- und klimabezogenen Extremereignisse (rechte Achse).

Figure 01: Economic damage (EU-28) caused by geophysical events (earthquakes, tsunamis, volcanic eruptions), meteorological events (storms), hydrological events (floodings, gravitational mass movements) and climatological events (heat waves, cold waves, droughts, forest fires) within the EU. The black line represents the percentage of storm-induced losses relative to all costs caused by weather- and climate-related events.

Datenquelle: EEA, 2018

In Österreich treten, bezogen auf die räumliche Verteilung schwerer Sturmergebnisse die südöstlichen Teile Kärntens und der Steiermark, der nördliche Teil des oberen Murtales, das westliche Oberösterreich, das Wiener Becken, das Tullner Feld, das Inntal sowie die Bodenseeregion hervor (ESSL,2018). Dafür verantwortlich sind beispielsweise in Kärnten und Teilen der Steiermark Vb-Wetterlagen oder in Oberösterreich atlantische Stürme. Das Tullnerfeld und das Wiener Becken sind von beiden betroffen. In der Bodenseeregion kommen neben atlantischen auch vom Nordmeer herangeführte Stürme zu Tragen.

6.2 Bemessung, Warnungen und Unsicherheiten

Mit der forcierten Verdichtung des meteorologischen Messnetzes (Abbildung 02) von 1850 bis 1880 liegen regelmäßige Beobachtungen drei Mal täglich vor, die an der ZAMG archiviert sind. Bezogen auf das heutige Österreich besitzt Kremsmünster die längsten im »Meteorologischen Tagebuch« festgehaltenen Messreihen ab 1762. Seit dieser Zeit hat sich die Erfassung immer wieder verändert. Bis zum Beginn der 1990er Jahre waren z. B. mechanisch oder digital erfasste Windgeschwindigkeiten selten und daher wurden diese basierend auf der Beaufort-Skala geschätzt (Hammerl, 2001).

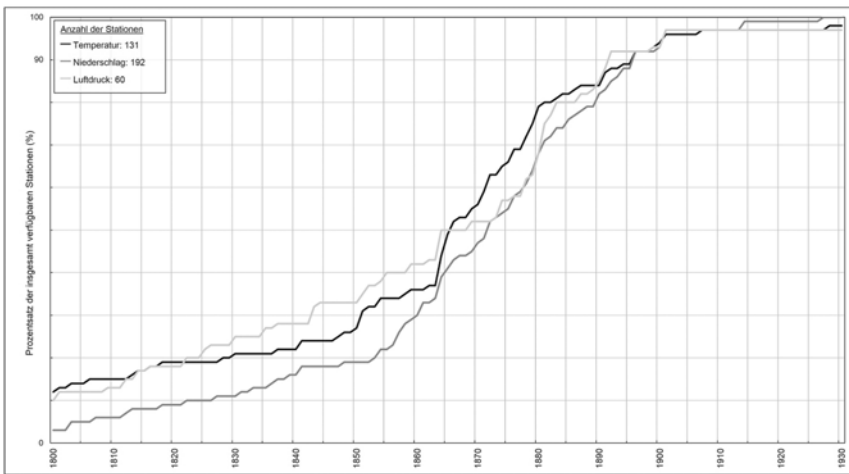


Abbildung 02: Historische Entwicklung des Messnetzes: Der HISTALP-Datensatz (Auer et al, 2007) umfasst die zentraleuropäische Alpenregion und ist besonders gut geeignet, um die Entwicklung des Stationsnetzes in Mitteleuropa anschaulich darzustellen.

Figure 02: Historical development of the meteorological network. HISTALP data (Auer et al, 2007) contains this evolution across the European Alpine region.

Quelle: Matulla et al., 2018

War lange Zeit das Schalenkreuzanemometer bei der Beobachtung von Windgeschwindigkeiten in Verwendung, so kommen seit einigen Jahren vermehrt zusätzlich Ultraschallanemometer zum Einsatz. Während im ersten Fall die Rotationsgeschwindigkeit entscheidend ist, sind es im zweiten Fall die Schallwellen.

Da von hohen Windgeschwindigkeiten und Windböen Gefahr für Leben und Infrastruktur ausgehen, wurden schon früh auf Beobachtungen basierende Sturmwarnungen ausgesprochen. An der ZAMG haben Warnungen eine lange Tradition und werden seit 1959 dem Innenministerium gemeldet. 2005 ging ein

in Zusammenarbeit mit den Ländern entwickeltes »Warntool« auf der ZAMG-Webseite online, über das jederzeit und österreichweit der aktuelle Warnstand abrufbar ist.

Während bisher Warnungen auf (klimatologisch und versicherungs-technisch definierten) Schwellenwerten beruhten, werden sie gegenwärtig zunehmend von impaktorientierten Warnungen ergänzt. Bei dieser Form der Warnung steht nicht nur die meteorologische Situation im Zentrum, sondern auch die sie begleitenden Umstände. So geben z. B. bei winterlich, unbelaubten Bäumen höhere Windgeschwindigkeiten Anlass zur Warnung, als im Falle belaubter Bäume während der Vegetationszeit.

6.3 Historische Entwicklungen

Die Verletzlichkeit von Bevölkerung, sozioökonomischen Strukturen, Ökosystemen usw. ist bezogen auf Veränderungen in der Klimaextreme wesentlich größer als referenziert auf den mittleren Zustand (Katz und Brown, 1992). Daher ist die Beschreibung von Klimaänderungen hinsichtlich hoher bzw. niedriger Perzentile von besonderer Bedeutung. Zur Beschreibung von Änderungen im Sturmklima sind im Gegensatz zur Temperatur nicht nur wenige Dekaden, sondern Jahrhunderte erforderlich (Schmidt und von Storch, 1993; Barring, 2004). Daher sind direkte Windbeobachtungen aufgrund der auftretenden Inhomogenitäten – wie oben beschrieben – nicht geeignet, um auf diesen Zeitskalen Veränderungen abzubilden (Trenberth und Paolino, 1980; Karl et al, 1993; The WASA Group, 1998; Auer et al, 2007). Eine Alternative stellen Luftdruckmessungen, die sich über die Jahrhunderte kaum in der Erfassung verändert haben, dar, um Veränderungen im Sturmklima zu beschreiben (Alexandersson et al, 1998; Matulla et al, 2008; Matulla et al., 2011).

Da Veränderungen im Sturmklima für Versicherungsprodukte von signifikanter Bedeutung sind, ist die Entwicklung auf mittelfristigen Zeitskalen von erheblicher Bedeutung (Karremann et al., 2014; Zimmerli und Renggli, 2015; Welker et al., 2016).

Abbildung 03 zeigt Entwicklungen des Sturmklimas (extratropische Stürme) in Österreich ab 1874 anhand des 95 % Perzentils der standardisierten Windgeschwindigkeiten die aus Druckmessungen in Kremsmünster, Wien und Prag abgeleitet wurden (Matulla et al., 2008).

In die Sturmsaison 1868/1869, kurz vor Beginn der in Abbildung 03 beschriebenen Periode, fällt der wohl stärkste Wintersturm des 19. Jh., der in Österreich, Tschechien und weiter nord-westlich in Holland und Belgien außerordentlich großen Schaden verursachte.

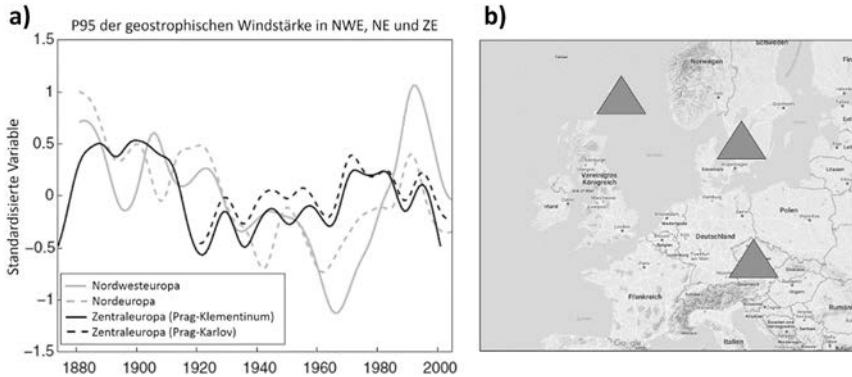


Abbildung 03: Entwicklung des Sturmklimas in Österreich ab 1874, sowie die Entwicklungen in den Regionen im Norden und Nord-Westen des Kontinents (siehe die Dreiecke in 3b). Die Kurven repräsentieren die stärksten Sturmereignisse (> 95 % Perzentile der Windgeschwindigkeit als »score« Variable). Die beiden zentraleuropäischen Kurven beruhen auf Dreiecken, mit Prag-Klementinum bzw. Prag-Karlov.

Figure 03: Development of storminess in Austria from 1874 onwards, as well as, evolutions in northern and north-western Europe (see the triangles in 3b). The curves represent the strongest storm events (> 95 % percentiles of wind-speed depict as »score« variable). The Central European curves are based on the triangles: Prague-Klementinum and Prague-Karlov.

Quelle: Matulla et al., 2008

Am 07. Dezember erreichte der mit dem Durchzug einer Kaltfront verbundene Sturm Hurrikanstärke über den böhmischen Landen, kostete Menschenleben und verursachte schwere Infrastrukturschäden sowie weit verbreiteten Windwurf. Quellen zeichnen die katastrophalen Auswirkungen dieses Wintersturms nach (Brázdil et al., 2017).

Abbildung 03 zeigt, dass das Sturmklima in Mitteleuropa verglichen mit dem am Übergang von 19. ins 20. Jahrhundert weniger ausgeprägt in Erscheinung tritt.

Der Übergang zu einer schwächeren Ausprägung im frühen 20. Jh., nachdem zuvor das Maximum der die letzten 130 Jahre umfassenden Periode angenommen wurde, vollzieht sich in Österreich im Gegensatz zu den Verläufen im Norden Europas rapide. Daran schließt sich ein langsamer Anstieg, von dekadischer Variabilität überlagert, bis in die 1990er Jahre. Das erreichte Niveau bleibt deutlich unter dem im Nord-Westen des Kontinents zurück. Die Werte im beginnenden 21. Jh. zeigen sowohl in Österreich als auch im Nord-Westen des Kontinents Abnahmen.

Klimamodelle erlauben auf Zeitskalen von Dekaden bis hin zu Jahrtausenden Aussagen zur zeitlichen Variabilität und räumlichen Verteilung von Stürmen um den Globus. Dabei kommt der Abschätzung vergangener Sturm­tätigkeit besondere Bedeutung zu, da auf dieser Grundlage zukünftige Entwicklungen ab-

leitbar gemacht werden können. Es existiert eine Reihe globaler Klimamodellstudien, die ihren Fokus auf die europäische Sturmaktivität, einschließlich der des Alpenraums, richten. Zu diesen zählen unter anderem die von Hall et al. (1994); Lambert (1995); Knippertz et al. (2000); Lambert et al. (2002); Fischer-Bruns et al. (2005); Yin (2005); Pinto et al. (2007); Ulbrich et al. (2008); Woolings et al. (2012); Xia et al. (2013).

Für die letzten Jahrzehnte bis hin zu Jahrhunderten in die Vergangenheit zurück, können Modellsimulationen mit Beobachtungen und auf Proxydaten beruhenden Sturmklima-Rekonstruktionen verglichen werden, um deren Qualität zu bewerten.

Betrachtet man die letzten Dekaden (z. B. zurück bis ins 19. Jh.), bieten Reanalysedaten eine wertvolle Abbildung des Wettergeschehens, aus der u. a. die Entwicklung von Sturmklimaten über Kontinenten abgeleitet werden kann. Reanalysen beschreiben den Zustand der Atmosphäre mehrmals täglich. Das geschieht mit Hilfe eines über den betrachteten Zeitraum unverändert gelassenen Analyseschemas – wie es in Wettervorhersagemodellen verwendet wird. Bei Wettervorhersagemodellen wird das Analyseschema allerdings immer am neuesten Stand der Technik gehalten, also mit der Zeit verändert.

Brönnimann et al. (2012) untersuchten auf Basis der 20CR Reanalysen (Compo et al., 2011) extreme Windgeschwindigkeiten ab 1871. Trends betrachteten sie jedoch nicht vor 1950, da ab diesem Zeitpunkt die Ensemblevarianz der 20CR Reanalysen (d. h. die Unsicherheit) deutlich abnimmt und erst damit die Voraussetzung für eine konsistente Betrachtung von Differenzenquotienten erfüllt ist. Für Zentraleuropa und Österreich beschreiben die Autoren eine leichte Erhöhung des 98. Perzentils der Windgeschwindigkeit um etwa 0,18 km/h pro Dekade für die letzten Jahrzehnte bis 2008. Mit Reanalysedaten angetriebene Modellsimulationen beziehen sich i. d. R. auf die letzten Dekaden. Das liegt an der, den Berechnungen zugrundeliegenden, Datenbasis, die, je weiter sie sich in die Vergangenheit erstreckt, von einer abnehmenden Zahl an Messreihen erzeugt wird. Das gibt zu (bereits diskutierten) Inhomogenitäten Anlass, die jedoch nicht auf Veränderungen im Analyseverfahren, sondern auf die abnehmende Stationsdichte zurückzuführen sind. Dieser Effekt ist in Abbildung 02 für die Entwicklung des Messnetzes der Österreichisch-Ungarischen Monarchie dargestellt. Die zunehmende Zahl an Beobachtungsstationen hin zur Gegenwart (und später um 1970 auch die Nutzung von Satellitendaten) führt zwangsläufig auf eine vermehrte Detektion von Stürmen, die aber nicht von einem Klimawandel induziert sind.

Mit regionalen Klimamodellen können Globalmodell- oder Reanalysedaten auf eine deutlich höhere Auflösung gebracht werden. Regionalmodellstudien, die Globalmodelldaten als Antrieb verwenden, sind z. B. in den Artikeln von (Beersma et al., 1997; Leckebusch et al., 2006) beschrieben. Die der Reviewstudie

zu Stürmen über dem Nordatlantik und Nordwesteuropa vorausgegangene Literaturrecherche (Feser et al., 2015) gab bisher beschränkten Anlass zu Nachfolgestudien. Diese jedoch zeigen entweder keinen oder einen nur leicht ansteigenden Trend der Sturmanzahl über die letzten Dekaden (in Übereinstimmung mit Brönnimann et al. (2012) und Matulla et al. (2008); siehe auch Abbildung 04).

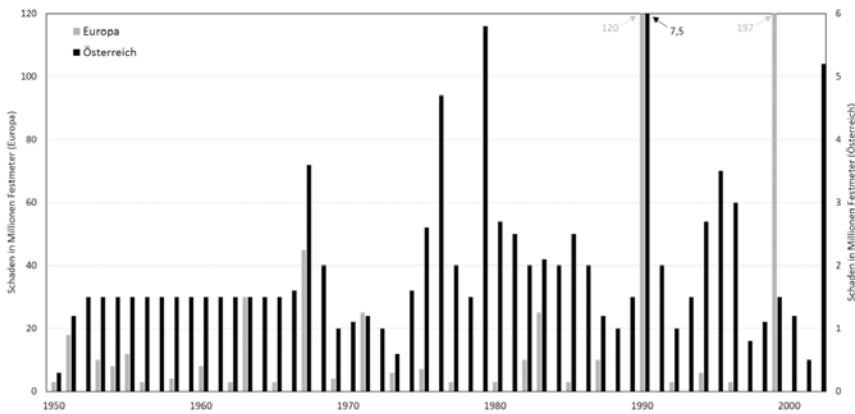


Abbildung 04: Extreme Auswirkungen von Sturmereignissen bezogen auf Schäden durch Windwurf in Europa und Österreich.

Figure 04: Impacts caused by extreme storm events related to damages due to wind-throw in Europe and Austria.

Datenquelle: BFW, 2018

6.4 Mögliche zukünftige Entwicklungen und Herausforderungen

Schäden durch Sturmereignisse spielen in der Landwirtschaft im Vergleich zu Hagel oder Frost zwar eine untergeordnete Rolle, können aber doch – insbesondere im Zusammenwirken mit Starkniederschlägen und Hagelunwettern – hohe Schäden verursachen. Hagelschutznetzanlagen, Folienhäuser oder Hopfenplantagen sind äußerst windempfindlich und, im monetären Sinn, Einrichtungen mit hohen Schadenpotentials.

Generell entstehen die meisten Schäden durch konvektive Ereignisse, die auch von Hagelschlag begleitet sein können. Dies hängt auch damit zusammen, dass diese in die Hauptvegetationszeit fallen, während der die landwirtschaftliche Produktion großflächig gefährdet ist. Die steigende Zahl an Hagelschutznetzen, die im Obst- und Weinbau zur Reduktion der Hagelschäden eingesetzt werden, erhöhen hier – im Zusammenhang mit Stürmen – zudem das Risiko.

Seit 1998 aber traten in Österreich auch Sturmtiefs auf, die größere Schäden verursachten. Vor allem die Winterstürme der Jahre 2007 und 2008 (»Kyrill«, »Emma« und »Paula«) führten zu Millionenschäden in der Landwirtschaft (Abbildung 05).

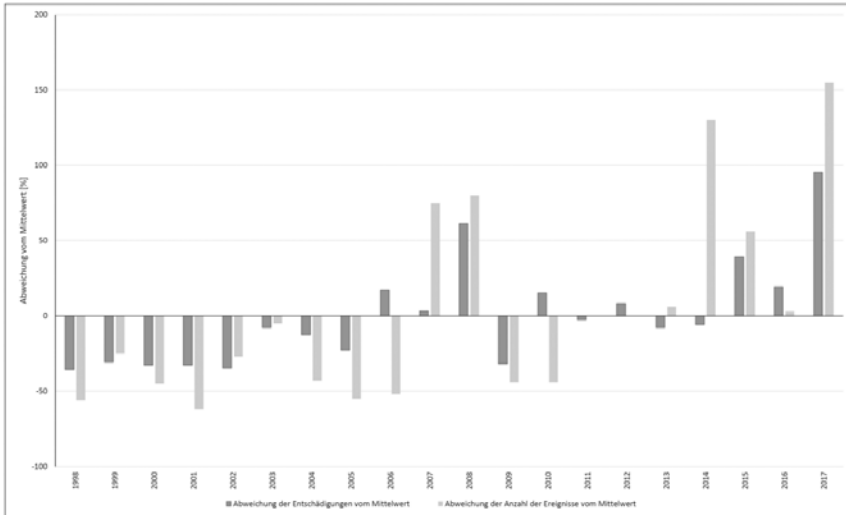


Abbildung 05: Mit 0.7 korrelierte Entschädigungszahlungen der österreichischen Hagelversicherung (OEHV) und schadbringenden Stürmen (VIOLA).

Figure 05: Compensation payments of the Austrian Hail Insurance (OEHV) and extreme storm events that have caused damages (VIOLA). Pertaining curves exhibit a Pearson correlation coefficient of 0.7.

Datenquelle: OEHV – OEHV, 2019; VIOLA – ZAMG, 2019

Im Allgemeinen steigt in der Landwirtschaft das Bewusstsein für Wetterrisiken. Auch politische Maßnahmen wie die Ausweitung der Prämienförderung beeinflussen den Anteil der versicherten Betriebe, sodass sich Aussagen zu klima-induzierten Trends kaum tätigen lassen.

Die Unsicherheiten in den Daten werden darüber hinaus auch dadurch verstärkt, dass aus versicherungstechnischen Gründen Schadereignisse in landwirtschaftsarmen – also etwa bewaldeten Regionen (siehe Abbildung 04) oder urbanen Räumen – keine Berücksichtigung finden. Abgesehen davon ändern sich die angebauten Produkte im Lauf der Zeit und damit die Beziehung zwischen Ereignis und Entschädigung. Als Maßnahme zur Vermeidung von Schäden werden seit 2006 Versicherungskunden im Bereich Obst- und Gartenbau per SMS mit Wetterwarnungen versorgt. So können diese aktiv Gegenmaßnahmen ergreifen, um Schäden zu vermeiden (z. B. bei Glashäuser Lüftungsöffnungen schließen). Investitionen in moderne Steuerungssysteme bei Glashäusern

können ebenfalls dazu beitragen, Schäden zu minimieren. Acker- oder Obstbaubetriebe haben dahingegen kaum Reaktionsmöglichkeiten.

Die Abschätzung künftiger Sturmklimate beruht auf Annahmen, die mögliche Pfade der Menschheit in den kommenden Dekaden beschreiben. Aus potentiellen Bevölkerungsentwicklungen und solchen, die diverse wirtschaftliche und technische Aspekte berücksichtigen, werden Emissionsszenarien der atmosphärenrelevanten Treibhausgase wie Kohlendioxid, Methan, Lachgas, Stickoxiden oder FCKWs abgeleitet (Vuuren et al., 2011). Diese sind Antriebsdaten regionaler Klimamosellsimulationen und erlauben die Modellierung zukünftiger Klimaänderungen. Dabei ist die Variabilität der Sturmanzahl, ihrer Stärke und ihrer Zugbahnen von Interesse. In diesem Zusammenhang darf aber der Hinweis auf die große Unsicherheit der Emissionsszenarien nicht ausbleiben, da sowohl gesellschaftspolitische als auch ökonomische Änderungen sowie technologische Fortschritte nur bedingt vorhersagbar sind. Daher werden sehr unterschiedliche Entwicklungspfade der Menschheit verwendet, um eine große Bandbreite möglicher Klimaänderungs-Korridore widerzuspiegeln.

Klimamodellstudien zukünftiger Sturmaktivität über Zentraleuropa und Österreich enden i. d. R. im Jahr 2100. Siehe dazu, unter anderem Ulbrich und Christoph (1999); Knippertz et al. (2000); Andersen et al. (2001); Leckebusch und Ulbrich (2004); Bengtsson et al. (2006); Leckebusch et al., (2006); Walter et al. (2006); Beniston et al. (2007); Pinto et al. (2007); Rockel und Woth (2007); Bengtsson et al. (2009); Donat et al. (2010) sowie Pinto et al. (2010, 2012). Dabei unterscheiden sich die Aussagen zur künftigen Anzahl der Stürme deutlich. Es gibt etwa gleich viele Studien, die eine Abnahme prognostizieren wie jene, die von einer Zunahme ausgehen. Die Mehrzahl beschreibt im Zuge eines sich wandelnden Klimas eine Zunahme der Sturmintensität (Feser et al., 2015).

Analysen von Klimaprojektionen hinsichtlich der Änderung verschiedener Perzentile der Windstärke über Europa zeigen bei mittleren Perzentilen (dem mittleren Windfeld) wenig Änderung, in den höchsten Perzentilen (den stärksten Stürmen) aber Zunahmen.

Physikalisch motivierte Überlegungen zu Klimawandel und Stürmen, die nur auf wenigen Mechanismen – wie etwa den abnehmenden Temperaturgradienten zwischen Äquator und Polen bzw. der sich verändernden Intensität des polaren Vortex – beruhen, erlauben keine konsistenten Aussagen. Die im Norden des Kontinents und in Österreich beschriebenen Reduktionen der Sturmklimate in den 1990ern (Alexandersson et al., 2000; Bärring, 2004; Matulla et al., 2008, 2012; Krüger et al., 2019) fallen zwar mit der starken, vom Rückgang der industriellen Aerosolkonzentration in der Atmosphäre und anthropogenen Treibhauseffekt induzierten, Temperaturzunahme im ausgehenden 20. Jh. zusammen, gestatten aber wegen der sonst schwachen Korrelation keine signifikanten Schlussfolgerungen.

6.5 Handlungsempfehlungen

Die Basis einer sinnvollen, wissenschaftlich konsistenten Bewertung von Forschungsergebnissen erfordert die Diskussion der inhärenten Unsicherheiten. Bezogen auf das vergangene Sturmklima bilden dabei die Beobachtungen den Ausgangspunkt. Direkte Windmessungen sind stark von Inhomogenitäten dominiert und daher nicht für die Beschreibung von Sturmklimaten geeignet – insbesondere da deren konsistente Abbildung deutlich längere Perioden erfordert als z. B. im Fall der bodennahen Lufttemperatur (siehe z. B. The WASA Group, 1998; Alexandersson et al., 2000; Bärring, 2004; Matulla et al., 2008, 2012). Luftdruckmessungen hingegen haben einen vergleichsweise kleinen Fehler, können einfach homogenisiert werden und erlauben die Bereitstellung qualitativ hochwertiger Ergebnisse. Auf dieser Basis gelingt die Erfassung von Sturmklimaten und deren Veränderungen, die Berechnung von Tendenzen, Frontdurchgängen, Schwellwertüberschreitungen und die Bestimmung von Zeitreihen des geostrophischen Winds.

Die Erzeugung künftiger Sturmklimaentwicklungen basiert auf sogenannten Entwicklungspfaden der Menschheit, globalen Klimamodellen (GCMs) und Regionalisierungsverfahren. Die dieser Modellkette innewohnenden Unsicherheiten nehmen entsprechend der genannten Reihenfolge ab, d. h. die von den GCMs und Downscalingverfahren kommenden Beiträge (die mit Validierungsverfahren abgeschätzt werden) in der Fehlerfortpflanzung fallen deutlich hinter den, mit den Entwicklungspfaden verbundenen Unsicherheiten zurückfallen.

Die den Modellen anhaftenden Fehler kann man durch die Verwendung von großen Ensembles abschätzen. Diese zeichnen für jeden betrachteten Pfad der Menschheitsentwicklung Korridore in die Zukunft, die mit statistischen Qualitätsmaßen charakterisiert werden und die Unsicherheiten der Modelle (GCMs + Downscalingverfahren) beschreiben. Differenzen zwischen den Korridoren zeigen die Unterschiedlichkeit der künftigen Auswirkungen auf das Klimasystem »Erde«, die von den entsprechenden Entwicklungspfaden der Menschheit z. B. »business as usual« oder »climate friendly« induziert werden. Warnungen beruhen auf meteorologischen Beobachtungen, deren Qualität maßgeblich durch die Abdeckung des zugrundeliegenden Stationsnetzes bestimmt wird. Tatsächlich war es ein dramatisches Ereignis, das den Anlass liefert, die Errichtung von Messnetzen, die diese Beobachtungen liefern, entschlossen umzusetzen: Während des Krimkriegs ging am 14. November 1854 ein französisches Schiff im Schwarzen Meer in schwerem Sturm unter. Dieser Sturm zog vorher durch weite Teile Europas und wäre somit vorhersagbar gewesen. In der Österreichisch-Ungarischen Monarchie war zu diesem Zeitpunkt der – maßgeblich von Dr. Kreil, dem ersten Direktor der 1851 gegründeten ZAMG, vorangetriebene – Messnetz-Aufbau von Lemberg nach Prag und Wien nach Pula

schon in den Anfängen (Hammerl, 2001). Im Österreich der Nachkriegsjahre verbreitete die ZAMG Sturmwarnungen, die seit vielen Dekaden direkt dem Innenministerium gemeldet werden. Seit 2005 wird die Bevölkerung darüber hinaus über die frei zugängliche ZAMG-Website vor Unwettern gewarnt; zudem gibt es mittlerweile etablierte private Wetterdienste, die entsprechende Warnungen bereitstellen. Diverse Versicherungen informieren (in Kooperation mit Wetterdiensten) ihre Kunden via SMS über drohende Gefahren und fördern mit einer – je nach Initiative des Versicherungsnehmers bei der Umsetzung von Schutzmaßnahmen – flexiblen Prämiengestaltung eigenverantwortliches Handeln in der Schadprävention.

Die Diskussion der Unsicherheit bzw. des Erfolgs von Warnungen unterscheidet sich vielfältig und grundsätzlich von der in Bezug auf Beobachtungen und Klimaprojektionen bereits dargestellten. Versicherungen, die als Kompetenzträger den Erfolg von Warnungen am besten bewerten können, weisen i. d. R. auf die hohe, zugrundeliegende Komplexität hin (und die Naivität hinter solchen Fragen). Zu viele Faktoren beeinflussen, z. T. auch entgegengesetzt, Sturmereignisse und Entschädigungszahlungen.

Eine Möglichkeit den Erfolg von Warnungen dennoch quantitativ abzuschätzen, könnte darin bestehen jährlich die Entschädigungszahlungen (\$), den auf Sturmschäden beruhenden Sturmereignissen (#) gegenüberzustellen, die z. B. im VIOLA Datensatz erfasst sind (siehe Abbildung 05). Der Pearson'sche Korrelationskoeffizienten q beschreibt die Ähnlichkeit der Daten, beträgt im dargestellten Fall 0.7 (siehe Abbildung 05) und könnte Versicherungen helfen frühzeitig auf sie zukommende Leistungen abzuschätzen. Um zu gültigen Aussagen zum Erfolg von Warnungen zu gelangen, müssten aus den Daten noch die Einflüsse von Inflation, Zunahme an Wohlstand und Besitz, Veränderungen des Durchversicherungsgrades und dgl. Herausgerechnet werden. Die Betrachtung der Höhe der Entschädigungszahlungen (\$) bezogen auf die Anzahl (#) der Sturmereignisse ist also nicht trivial. Wenn sich die Mittelwerte dieser Größe ($n \gg 1$ Jahre, $\sum \frac{\$}{\#}$) in zwei verschiedenen, genügend langen Perioden unterscheiden, ist eine Abnahme – wie für die beiden Dekaden in Abbildung 05 – ein Anhaltspunkt für die positive Auswirkung von Warnungen. Abgesehen davon, dass die Daten nicht (wie oben beschrieben) korrigiert sind, sind die zwei Dekaden in Abbildung 05 zu kurz um Aussagen treffen zu können. Die in diesem Beitrag dargestellten Forschungsergebnisse stellen eine verhältnismäßig robuste Basis für die Entwicklung von Schutzstrategien im Umgang mit künftigen Sturmklimaentwicklungen in Österreich dar. Damit einhergehende Unsicherheiten sind also verhältnismäßig gering. Das gilt somit auch für die daraus deduzierbaren Handlungsempfehlungen. Da bis zum Ende des 21. Jh. die Wissenschaft in weitgehender Übereinstimmung von z. T. ausgeprägten Schwankungen des Sturmklimas auf Zeitskalen von Jahrzehnten, aber nicht von signi-

fikanten Trends ausgeht, ist zumindest mittelfristig zu empfehlen, besonders jene Schutzstrategien zu verfolgen, die bereits in den vergangenen Dekaden Erfolge zeigten.

Schutzstrategien die Personen, Immobilien, die eigene Situation bzw. die der unmittelbaren Umgebung betreffen, empfehlen etwa zweimal jährlich Kamine und Dächer auf ihren einwandfreien Befestigungszustand hin überprüfen zu lassen (Ziegel, Bleche usw.) sowie ggfls. die Umgebung des eigenen Hauses von umsturzgefährdeten Objekten freizuhalten. Bei drohender Gefahr sollten gefährdete Objekte aus Gefahrenzonen entfernt, diverse Gegenstände (Gartenmöbel u. dgl.) gesichert, Fenster, Fensterläden geschlossen, Sonnensegel, Markisen eingebracht werden. Während eines Sturmes sind schützende Räume nicht zu verlassen, bzw. wenn man unterwegs ist, sollten Bäume und Objekte, von denen durch herabfallendes Material Gefahr droht, gemieden werden. Das gilt auch nach einem Sturm, bis die Aufräumarbeiten die Sicherheit wiederhergestellt haben. Über diese Schutz-Strategien hinausgehende Informationen sind von Zivilschutzbehörden zu beziehen. Diese Empfehlungen beziehen sich der großen Unsicherheit wegen auf die konkrete Situation der betreffenden Person.

In Bezug auf die langfristigen Sturmereignisse kann weniger von noch nie dagewesenen Windgeschwindigkeiten ausgegangen werden, sondern viel mehr von kürzer werdenden Wiederkehrperioden (höheren Auftrittswahrscheinlichkeiten) bisher seltener Starkwindereignisse.

Danksagung

Wir bedanken uns bei M. Granzner, I. Hinterleitner und L. Pohl (CIT Praktikant*innen) für Ihre wertvolle Unterstützung.

Literatur

- Alexandersson, H., Schmith, T., Iden, K., Tuomenvirta, H., 1998. Long-term variations of the storm climate over NW Europe. *Global Atmosphere and Ocean System*, 6, S. 97–120.
- Alexandersson, H., Tuomenvirta, H., Schmith, T., Iden, K., 2000. Trends of storms in NW Europe derived from an updated pressure data set. *Climate Research*, 14, S. 71–73. DOI: 10.3354/cr014071.
- Andersen, U.J., Kaas, E., May, W., 2001. Changes in the storm climate in the north atlantic/european region as simulated by gcm timeslice experiments at high resolution. Technical Report 01-1. Danish Climate Centre, S. 1399–1957.
- Auer, I., Böhm, R., Jurkovic, A., Lipa, W., Orlik, A., Potzmann, R., Schöner, W., Ungersböck, M., Matulla, C., Briffa, K., Jones, P., Efthymiadis, D., Brunetti, M., Nanni, T.,

- Maugeri, M., Mercalli, L., Mestre, O., Moisselin, J.M., Begert, M., Müller-Westermeier, G., Kveton, V., Bochnicek, O., Stastny, P., Lapin, M., Szalai, S., Szentimrey, T., Cegnar, T., Dolinar, M., Gajic-Capka, M., Zaninovic, K., Majstorovic, Z., Nieplova, E., 2007. HISTALP – historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology*, 27(1), S. 17–46. DOI: 10.1002/joc.1377.
- Bärring, L., 2004. Scandinavian storminess since about 1800. *Geophysical Research Letters* 31(20), L20202. DOI: 10.1029/2004GL020441.
- Beersma, J.J., Rider, K.M., Komen, G.J., Kaas, E., Kharin, V.V., 1997. An analysis of extratropical storms in the North Atlantic region as simulated in a control and 2×CO₂ time-slice experiment with a high-resolution atmospheric model. *Tellus A*, 49, S. 347–361. DOI: 10.1034/j.1600-0870.1997.t01-2-00003.x.
- Bengtsson, L., Hodges, K.I., Keenlyside, N., 2009. Will extratropical storms intensify in a warmer climate? *Journal of Climate*, 22, S. 2276–2301.
- Bengtsson, L., Hodges, K.I., Roeckner, E., 2006. Storm tracks and climate change. *Journal of Climate*, 19, S. 3518–3543. DOI: 10.1175/JCLI3815.1.
- Beniston, M., Stephenson, D.B., Christensen, O.B., Ferro, C.A.T., Frei, C., Goyette, S., Halsnaes, K., Holt, T., Jylhä, K., Koffi, B., Palutikof, J., Schöll, R., Semmler, T., Woth, K., 2007. Future extreme events in european climate: an exploration of regional climate model projections. *Climatic Change*, 81, S. 71–95. DOI: 10.1007/s10584-006-9226-z.
- BFW, 2018. Borkenkäfersituation 2002. <https://bfw.ac.at/db/bfwcms.web?dok=6448> [04.02.2019].
- Brázdil, R., Szabó, P., Stucki, P., Dobrovolný, P., Řezníčková, L., Kotyza, O., Valášek, H., Melo, M., Suchánková, S., Dolák, L., Chromá, K., 2017. The extraordinary windstorm of 7 December 1868 in the Czech Lands and its central European context. *International Journal of Climatology*, 37, 14–29. DOI: 10.1002/joc.4973.
- Brönnimann, S., Martius, O., Waldow, H. von, Welker, C., Luterbacher, J., Compo, G., Sardeshmukh, P., Usbeck, T., 2012. Extreme winds at northern mid-latitudes since 1871. *Meteorologische Zeitschrift*, 21, S. 13–27. DOI: 10.1127/0941-2948/2012/0337.
- Ceppi, P., Della-Marta, P.M., Appenzeller, C., 2008. Extreme value analysis of wind speed observations over switzerland. *Arbeitsbericht. Bundesamt für Meteorologie und Klimatologie, MeteoSchweiz*, 219, 48 S.
- Coles, S., 2001. An introduction to statistical modeling of extreme values. *Springer Series in Statistics*, Springer, London, 209 S.
- Compo, G.P., Whitaker, J.S., Sardeshmukh, P.D., Matsui, N., Allan, R.J., Yin, X., Gleason, B.E., Vose, R.S., Rutledge, G., Bessemoulin, P., Brönnimann, S., Brunet, M., Crouthamel, R.I., Grant, A.N., Groisman, P.Y., Jones, P.D., Kruk, M.C., Kruger, A.C., Marshall, G.J., Maugeri, M., Mok, H.Y., Nordli, Ø., Ross, T.F., Trigo, R.M., Wang, X.L., Woodruff, S.D., Worley, S.J., 2011. The twentieth century reanalysis project. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(654), S. 1–28. DOI: 10.1002/qj.776.
- Donat, M.G., Leckebusch, G.C., Pinto, J.G., Ulbrich, U., 2010. European storminess and associated circulation weather types: future changes deduced from a multi-model ensemble of gcm simulations. *Climate Research*, 42, S. 27–43. DOI: 10.3354/cr00853.
- EEA, 2018. Economic losses from climate-related extremes. <https://www.eea.europa.eu/da/ta-and-maps/indicators/direct-losses-from-weather-disasters-3/> [05.11.2018].
- ESSL, 2018. European severe weather database. <http://www.eswd.eu/> [05.11.2018].

- Feser, F., Barcikowska, M., Krueger, O., Schenk, F., Weisse, R., Xia, L., 2015. Storminess over the North Atlantic and northwestern Europe – a review. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 141, S. 350–382. DOI: 10.1002/qj.2364.
- Fischer-Bruns, I., Storch, H. von, González-Rouco, J.F., Zorita, E., 2005. Modelling the variability of midlatitude storm activity on decadal to century time scales. *Climate Dynamics*, 25, S. 461–476. DOI: 10.1007/s00382-005-0036-1.
- Hall, N.M., Hoskins, B.J., Valdes, P.J., Senior, C.A., 1994. Storm tracks in a high-resolution GCM with doubled carbon dioxide. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 120, S. 1209–1230.
- Hammerl, C. (Hrsg.), 2001. *Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1851–2001, 150 Jahre Meteorologie und Geophysik in Österreich*. Leykam, Graz, 838 S.
- Jones, P., 1995. The Instrumental Data Record: Its Accuracy and Use in Attempts to Identify the »CO₂ Signal«. In: H. von Storch, A. Navarra (Hrsg.), *Analysis of Climate Variability*. Springer Berlin/Heidelberg, Berlin/Heidelberg, S. 53–75.
- Kaltenböck, R., Diendorfer, G., Dotzek, N., 2009. Evaluation of thunderstorm indices from ECMWF analyses, lightning data and severe storm reports. *Atmospheric Research*, 93(1), S. 381–396. DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.11.005.
- Kaltenböck, R., Steinheimer, M., 2015. Radar-based severe storm climatology for austrian complex orography related to vertical wind shear and atmospheric instability. *Atmospheric Research*, 158, S. 216–230. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.08.006.
- Karl, T.R., Quayle, R.G., Groisman, P.Y., 1993. Detecting Climate Variations and Change: New Challenges for Observing and Data Management Systems. *Journal of Climate*, 6(8), S. 1481–1494. DOI: 10.1175/1520-0442(1993)006<1481:DCVACN>2.0.CO;2.
- Karremann, M.K., Pinto, J.G., Reyers, M., Klawa, M., 2014. Return periods of losses associated with European windstorm series in a changing climate. *Environmental Research Letters*, 9(12), S. 124016.
- Katz, R.W., Brown, B.G., 1992. Extreme events in a changing climate: Variability is more important than averages. *Climatic Change*, 21(3), S. 289–302. DOI: 10.1007/BF00139728.
- Knippertz, P., Ulbrich, U., Speth, P., 2000. Changing cyclones and surface wind speeds over the North Atlantic and Europe in a transient GHG experiment. *Climate Research*, 15, S. 109–122.
- Krüger, O., Feser, F., Weisse, R., 2019. Northeast Atlantic Storm Activity and its Uncertainty from late 19th to the 21st Century. *Journal of Climate*, 32, S. 1919–1931.
- Lambert, S.J., 1995. The effect of enhanced greenhouse warming on winter cyclone frequencies and strengths. *Journal of Climate*, 8, S. 1447–1452. DOI: 10.1175/1520-0442(1995)008<1447:TEOEGW>2.0.CO;2.
- Lambert, S.J., Sheng, J., Boyle, J., 2002. Winter cyclone frequencies in thirteen models participating in the atmospheric model intercomparison project (AMIP1). *Climate Dynamics*, 19, S. 1–16. DOI: 10.1007/s00382-001-0206-8.
- Leckebusch, G.C., Koffi, B., Ulbrich, U., Pinto, J.G., Spanghel, T., Zacharias, S., 2006. Analysis of frequency and intensity of european winter storm events from a multi-model perspective, at synoptic and regional scales. *Climate Research*, 31, S. 59–74.
- Leckebusch, G.C., Ulbrich, U., 2004. On the relationship between cyclones and extreme windstorm events over europe under climate change. *Global Planet Change*, 44, S. 181–193.

- Matulla, C., Hofstätter, M., Auer, I., Böhm, R., Maugeri, M., von Storch, H., Krueger, O., 2012. Storminess in northern Italy and the Adriatic Sea reaching back to 1760. *Physics and Chemistry of the Earth*, 40–41, S. 80–85.
- Matulla, C., Hofstätter, M., Auer, I., Böhm, R., Maugeri, M., Storch, H. von, Krueger, O., 2012. Storminess in northern Italy and the Adriatic Sea reaching back to 1760. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 40/41, S. 80–85. DOI: 10.1016/j.pce.2011.04.010.
- Matulla, C., Schöner, W., Alexandersson, H., Storch, H. von, Wang, X.L., 2008. European storminess: late nineteenth century to present. *Climate Dynamics*, 31(2/3), S. 125–130. DOI: 10.1007/s00382-007-0333-y.
- Matulla, C., Tordai, J., Schlögl, M., Ganekind, M., Matulla, H., Ressel, H., Chimani, B., 2018. Establishment of a long-term lake-surface temperature dataset within the European Alps extending back to 1880. *Climate Dynamics*, S. 1–17. DOI: 10.1007/s00382-018-4479-6.
- OEHV, 2019. Schadensmeldung. <https://www.hagel.at/schadensmeldung/> [06.02.2019].
- Pinto, J.G., Karremann, M.K., Born, K., Della-Marta, P.M., Klawa, M., 2012. Loss potentials associated with European windstorms under future climate conditions. *Climate Research*, 54, S. 1–20. DOI: 10.3354/cr01111.
- Pinto, J.G., Neuhaus, C.P., Leckebusch, G.C., Reyers, M., Kerschgens, M., 2010. Estimation of wind storm impacts over Western Germany under future climate conditions using a statistical-dynamical downscaling approach. *Tellus A*, 62, S. 188–201. DOI: 10.1111/j.1600-0870.2009.00424.x.
- Pinto, J.G., Ulbrich, U., Leckebusch, G.C., Spanghel, T., Reyers, M., Zacharias, S., 2007. Changes in storm track and cyclone activity in three SRES ensemble experiments with the echam5/mpi-om1 gcm. *Climate Dynamics*, 29, S. 195–210. DOI: 10.1007/s00382-007-0230-4.
- Rockel, B., Woth, K., 2007. Extremes of near-surface wind speed over Europe and their future changes as estimated from an ensemble of rcm simulations. *Climatic Change*, 81, S. 267–280.
- Schmidt, H., Storch, H. von, 1993. German Bight storms analysed. *Nature*, 365(6449), S. 791–791. DOI: 10.1038/365791a0.
- Steinkohl, C., Davis, R.A., Klüppelberg, C., 2013. Extreme value analysis of multivariate high-frequency wind speed data. *Journal of Statistical Theory and Practice*, 7(1), S. 73–94. DOI: 10.1080/15598608.2013.756346.
- The WASA Group, 1998. Changing Waves and Storms in the Northeast Atlantic? *Bulletin of the American Meteorological Society*, 79(5), S. 741–760. DOI: 10.1175/1520-0477(1998)079<0741:CWASIT>2.0.CO;2.
- Trenberth, K.E., Paolino, D.A., 1980. The Northern Hemisphere Sea-Level Pressure Data Set: Trends, Errors and Discontinuities. *Monthly Weather Review*, 108(7), S. 855–872. DOI: 10.1175/1520-0493(1980)108<0855:TNHSLP>2.0.CO;2.
- Ulbrich, U., Christoph, M., 1999. A shift of the nao and increasing storm track activity over Europe due to anthropogenic greenhouse gas forcing. *Climate Dynamics*, 15, S. 551–559.
- Ulbrich, U., Pinto, J.G., Kupfer, H., Leckebusch, G.C., Spanghel, T., Reyers, M., 2008. Changing northern hemisphere storm tracks in an ensemble of IPCC climate change simulations. *Journal of climate*, 21, S. 1669–1679. DOI: 10.1175/2007JCLI1992.1.

- Vuuren, D.P. van, Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A., Hibbard, K., Hurtt, G.C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J.F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakicenovic, N., Smith, S.J., Rose, S.K., 2011. The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(5), S. 5–31. DOI: 10.1007/s10584-011-0148-z.
- Walter, A., Keuler, K., Jacob, D., Knoche, R., Block, A., Kotlarski, S., Müller-Westermeier, G., Rechid, D., Ahrens, W., 2006. A high resolution reference data set of German wind velocity 1951–2001 and comparison with regional climate model results. *Meteorologische Zeitschrift*, 15, S. 585–596. DOI: 10.1127/0941-2948/2006/0162.
- Welker, C., Martius, O., Stucki, P., Bresch, D., Dierer, S., Brönnimann, S., 2016. Modelling economic losses of historic and present-day high-impact winter windstorms in Switzerland. *Tellus A: Dynamic Meteorology and Oceanography*, 68(1), S. 295–46. DOI: 10.3402/tellusa.v68.29546.
- WMO, 1970. The Beaufort scale of wind force (technical and operational aspects): report submitted by the President of the Commission for Maritime Meteorology to the WMO Executive Committee at its twenty-second session. Report on marine science affairs 3. World Meteorological Organization, Genf, 22 S.
- WMO, 1992. International Meteorological Vocabulary. World Meteorological Organization, 182, 802 S.
- Woollings, T., Gregory, J.M., Pinto, J.G., Reyers, M., Brayshaw, D.J., 2012. Response of the north atlantic storm track to climate change shaped by ocean-atmosphere coupling. *Nature Geoscience*, 5, S. 313–317. DOI: 10.1038/NGEO1438.
- Xia, L., Storch, H. von, Feser, F., 2013. Quasi-stationarity of centennial northern hemisphere midlatitude winter storm tracks. *Climate dynamics*, 41, S. 901–916. DOI: 10.1007/s00382-012-1543-5.
- Yin, J.H., 2005. A consistent poleward shift of the storm tracks in simulations of 21st century climate. *Geophysical Research Letters*, 32(18), L18701. DOI: 10.1029/2005GL023684.
- ZAMG, 2019. VIolent Observed Local Assessment (VIOLA). <https://www.zamg.ac.at/cms/de/forschung/klima/datensaetze/viola> [06.02.2019].
- Zimmerli, P., Renggli, D., 2015. Winter storms in Europe: Messages from forgotten catastrophes. Technical Report 1506235_15_EN. Swiss Reinsurance Company Ltd, Zürich, 25 S.

7 Starkniederschlag und Hagel

Georg Pistotnik, Michael Hofstätter und Annemarie Lexer*

Zusammenfassung

Starkniederschläge und Hagel gehören zu den schadensträchtesten Unwetterereignissen in Österreich und im Alpenraum. Flächige Starkregenereignisse werden durch Tiefdruckgebiete oder Staueffekte ausgelöst, können das ganze Jahr über auftreten und sind je nach Region mit charakteristischen Wetterlagen verknüpft. Sogenannte Vb-Tiefs, die vom Golf von Genua östlich der Alpen vorbei Richtung Norden ziehen, sind dabei das dominante Muster. Kleinräumige Starkniederschläge und Hagel sind an Konvektion gebunden, treten fast ausschließlich im Sommerhalbjahr (April bis September) auf und hängen deutlich weniger von bestimmten Wetterlagen ab. Räumlich gesehen ist das Risiko von Starkregen entlang der Alpenränder am größten, das Risiko von Hagel in den angrenzenden Alpenvorländern. Die Erwärmung durch den Klimawandel führt im Mittel zu instabileren Luftschichtungen und zu einer Abnahme des Windes in der oberen Troposphäre. Diese Verschiebungen wurden über die letzten Jahrzehnte bereits beobachtet und werden sich in der Klimazukunft wahrscheinlich fortsetzen. Sie begünstigen stärkere Niederschläge sowohl in flächigen als auch in konvektiven Ereignissen. Die Anzahl an Tiefdruckgebieten selbst dürfte sich nicht wesentlich ändern. Eine Zunahme des Hagelrisikos ist etwas unsicherer, da schwächere Höhenwinde einer instabileren Luftschichtung teilweise entgegenwirken könnten. Wissenschaftliche Fragestellungen und Handlungsoptionen werden andiskutiert.

Abstract

Heavy precipitation and hail are among the costliest severe weather phenomena in Austria and the Alpine region. Large-scale heavy precipitation events are caused by low-pressure systems or upslope flow situations, can occur throughout the year and are associated with characteristic weather patterns within different regions. So-called Vb cyclones, which move from the Gulf of Genova around the eastern Alps towards the north, are the dominant pattern. Small-scale heavy precipitation events and hail are tied to convection, occur almost exclusively in the warm season (April to September) and are less strongly asso-

* Georg Pistotnik, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung für Klimaforschung, georg.pistotnik@zamg.ac.at.

Michael Hofstätter, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung für Klimaforschung, michael.hofstaetter@zamg.ac.at.

Annemarie Lexer, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung für Klimaforschung, annemarie.lexer@zamg.ac.at.

ciated with particular weather patterns. Spatially speaking, the risk of heavy precipitation is maximized along the Alpine rims, while the hail risk is maximized over adjacent forelands. The warming trend induced by climate change, on average, reduces the static stability of the troposphere and decreases the strength of upper-tropospheric winds. These shifts have already been observed over the past few decades and will likely proceed into the climate future. They favor heavier precipitation both in large-scale and convective events. Significant changes in the number of cyclones themselves are not expected. An increase of the hail risk is a little less certain, because weaker upper-level winds could partly counteract less stable stratifications. Current research questions and options for action are discussed.

Kernaussagen

- Starkregen geschehen sowohl großräumig (Tiefdruckgebiete, Staueffekte) als auch kleinräumig (Konvektion), Hagel ist ein ausschließlich kleinräumiges Phänomen.
- Das Starkregenerisiko ist entlang der Alpenränder maximal, das Hagelrisiko in den angrenzenden Alpenvorländern.
- Der Klimawandel führt zu tendenziell instabileren Luftschichtungen, die im Verlauf von Jahrzehnten sowohl Tiefdruckgebiete als auch Gewitter langsam niederschlagsreicher werden lassen.
- Eine Zunahme des Hagelrisikos wird wahrscheinlich durch abnehmende Höhenwinde verringert.
- Die vergangenen und erwarteten zukünftigen Trends sind durch hohe Variabilität überlagert und daher überwiegend statistisch nicht signifikant, allerdings physikalisch erklärbar.

Key Points

- Heavy precipitation occurs on large scales (low-pressure systems, upslope flow situations) as well as on small scales (convection), whereas hail is exclusively a small-scale phenomenon.
- The risk of heavy rain is maximized along the Alpine rims, the hail risk in adjacent forelands.
- Climate change induces trends to more unstable atmospheric stratifications, which aid low-pressure systems as well as thunderstorms to gradually produce more precipitation over the course of decades.
- An increase of the hail risk will likely partially be compensated by decreasing upper-level winds.
- The majority of the found past and expected future trends are superimposed by high natural variability and therefore not statistically significant, but physically explainable.

7.1 Einleitung

Unwetter verschiedener Art richten in Österreich Schäden an, deren versicherter Anteil alleine die Größenordnung von einigen hundert Millionen Euro jährlich ausmacht. Starkregen und Hagel gehören dabei zu den teuersten Phä-

nomenen. Besonders hohe jährliche Schadenssummen können sowohl durch eine Vielzahl an Ereignissen als auch durch einzelne, besonders schwere Ereignisse entstehen.

Intensive Regenfälle treten großflächig durch Tiefdruckgebiete oder Staufeffekte an Gebirgen oder kleinräumig durch Konvektion (Schauer und Gewitter) auf, mitunter auch durch eine Kombination dieser Ursachen. Ihre schadensbringenden Folgen bestehen je nach räumlicher und zeitlicher Ausdehnung aus Hochwasserwellen in Flüssen, Sturzfluten in Bächen und ab rinnendem oder stehendem Oberflächenwasser. An geneigten Hängen kommt es zudem bei Beteiligung von Festmaterial zu Bodenerosion, Murenabgängen und Hangrutschsch. Dabei ist die Abgrenzung zu rein gravitativen Massenbewegungen mit wenig oder gar keiner Beteiligung von Wasser (Erdrutschen, Steinschlägen und Felsstürzen) diffus. Insbesondere die kleinräumigen, plötzlich auftretenden Sturzfluten und Murenabgänge fordern in Einzelfällen auch Menschenleben. In Österreich fand im Mittel über die vergangene Dekade (2008–2017) etwa eine Person pro Jahr durch solche Ereignisse den Tod, mehrere Menschen jährlich erlitten Verletzungen. Knapp jenseits der deutschen Grenze kostete die Sturzflut von Simbach am 1. Juni 2016 sogar sieben Menschen auf einmal das Leben.

Hagel tritt ausschließlich mit konvektiven Niederschlagsereignissen auf. Je nach Art und Alter der angebauten Kulturpflanzen können Hagelschäden in der Landwirtschaft bereits ab Korngrößen von 2 cm oder durch Belagsbildung oder Anhäufung noch kleinerer Hagelkörner entstehen. Ab etwa 3 cm Durchmesser ist mit Schäden an Fahrzeugen, Glas- oder Plexiglasscheiben zu rechnen, ab etwa 5 cm mit Schäden an Dächern oder sonstiger Bausubstanz von Gebäuden. Auffällig bei Hagelschlägen ist die hohe Dichte der materiellen Schäden: während Schadensfolgen durch Starkregen meist aderartig an Bach- und Flussläufen konzentriert sind, beschädigt Hagelschlag ab einer gewissen Korngröße sämtliche exponierten Gebäude, Fahrzeuge und landwirtschaftlichen Nutzflächen. Dagegen sind schwere oder gar tödliche Verletzungen durch sehr großen Hagel zwar möglich, aber ausgesprochen selten, da Menschen heutzutage kaum noch unvorbereitet und ohne Zufluchtsmöglichkeit davon überrascht werden.

Dieser Artikel fasst den bestehenden meteorologischen Wissenstand zum Thema Starkregen und Hagel speziell im Kontext des Klimawandels zusammen. Die betrachteten Phänomene werden zunächst in Kapitel 7.2 definiert. Kapitel 7.3 beschreibt die meteorologischen Bedingungen für das Auftreten von Starkregen oder Hagel. Anschließend werden ihre zeitliche und räumliche Verteilung in Kapitel 7.4 sowie vergangene und wahrscheinliche zukünftige Trends in Kapitel 7.5 behandelt. Kapitel 7.6 beinhaltet eine Diskussion und skizziert aktuelle Forschungsfragen. Kapitel 7.7 liefert Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen.

7.2 Definition

7.2.1 Starkregen

Starkregen entfaltet seine Schadenswirkung nicht durch seine unmittelbare Einwirkung, sondern durch eine Kombination aus Intensität und Dauer. Eine objektive Definition muss daher auch diese beiden Komponenten verknüpfen. Die verschiedenen Ansätze lassen sich in die drei folgenden Gruppen einteilen, wobei jede ihre Vor- und Nachteile hat.

– *Definition über fixe Schwellwerte (»peak over threshold«)*

Die Vorteile dieser einfachsten Methode sind eine globale Vergleichbarkeit absoluter Niederschlagsintensitäten und ihre Verwendbarkeit ohne Kenntnis historischer Messreihen der untersuchten Stationen. Allerdings erlaubt sie keine räumliche Differenzierung, wie extrem ein bestimmtes Ereignis lokal einzuordnen ist. Eine Verfeinerung dieser Methode ist die Entwicklung von Intensitätskurven als Funktion der Zeit, um auch Niederschläge unterschiedlicher Zeitdauer berücksichtigen und vergleichen zu können. Im deutschsprachigen Raum ist die »untere Grenze dichter Regenfälle« von Wussow (1922) die älteste und gleichzeitig bekannteste Intensitätskurve.

– *Definition über Extremwerte von Verteilungen (Perzentile)*

Mit dieser Methode lassen sich die für einen bestimmten Ort extremen Ereignisse identifizieren und mit jenen von anderen Orten vergleichen. Allerdings ist dafür eine Kenntnis von ausreichend langen historischen Zeitreihen nötig. Auch eine Anwendung auf Flächenmittel ist möglich, üblicherweise aus gegitterten Niederschlagsdatensätzen. Typische Beispiele für Starkniederschläge wären etwa jene über dem 90., 95. oder 99. Perzentil. Eine weitere Verfeinerung stellt die Wahl von bestimmten Perzentilen als mittlere statistische Wiederkehrzeiten von z. B. einmal pro Monat, Jahr oder Jahrzehnt dar (Frei und Schär, 2001).

– *Definition über aufgetretene Schäden*

Eine alternative oder auch ergänzende Interpretation ist es, eine Definition für Starkregen indirekt an das Auftreten von Schäden zu knüpfen. Die Extremität eines Ereignisses wird also implizit über seine Auswirkungen für die betroffene Bevölkerung ausgedrückt, worüber Stationsmessungen alleine keine Auskunft geben können. Außerdem können Schadensinformationen (zumindest theoretisch) flächig vorliegen, wohingegen Messungen lediglich punktweise und selbst bei einem so dichten Stationsnetz wie in Österreich nur in einem typischen Abstand von ca. 10 km verfügbar sind. Diesen beiden Vorteilen steht der Nachteil gegenüber, dass Schäden nicht alleinig mit Niederschlagsmengen oder -intensitäten skalieren, sondern unweigerlich auch

Vulnerabilität und Exposition mit abgebildet werden und daher ein Bias hin zu dichter besiedelten Gebieten in Betracht gezogen werden muss.

7.2.2 Hagel

Als Hagel bezeichnet man Niederschlag in Form von Eiskörnern von mindestens 5 mm Durchmesser, die klar oder milchig, kugelig oder unregelmäßig geformt sein können. Kleinere Eiskörner werden Graupel genannt. Graupel und Hagel entstehen in konvektiven Wolken, wenn feste Niederschlagspartikel (ursprünglich Eisnadeln oder Schneekristalle) von Aufwinden in Schwebelage gehalten oder wiederholt in die Höhe gerissen werden und dabei durch Anfrieren von unterkühlten Wassertröpfchen an Masse gewinnen. Fast immer ist Hagel mit Gewittern verbunden, da Hagelwachstum und die Trennung elektrischer Ladung, die schließlich zu Blitzentladungen führt, in konvektiven Wolken Hand in Hand gehen.

7.3 Ursachen und Bedingungen

Die Bildung von Wolken und Niederschlag ist eine Folge von Hebung feuchter Luftmassen. Je stärker die Hebung und je höher der Wasserdampfgehalt der Luft, desto mehr Niederschlag fällt aus. Das Auftreten und der Charakter von Starkniederschlägen sowie die Bildung von Hagel werden dabei maßgeblich von zwei Größen beeinflusst, einerseits der Stabilität der Luftschichtung und andererseits der vertikalen Windscherung, also der Änderung von Windrichtung und -geschwindigkeit mit steigender Höhe.

7.3.1 Stabilität der Luftschichtung

Bei Hebung von stabil geschichteter Luft bilden sich Schichtwolken und flächige Niederschläge. Diese »erzwungene« Hebung ist relativ schwach, aber großräumig, und geschieht etwa in Tiefdruckgebieten oder durch Staueffekte, wenn Luftmassen gegen Gebirge geführt werden. Bei instabiler Luftschichtung bleiben aufsteigende Luftpakete hingegen wärmer als ihre Umgebung und erfahren dadurch einen thermischen Auftrieb, sodass die Hebung in deutlich stärkere, auf engen Raum konzentrierte Ballen von Konvektion aufbricht.

Die Stabilität der Luftschichtung hängt einerseits mit der vertikalen Temperaturabnahme in einer Luftmasse zusammen, andererseits mit dem Gehalt an Wasserdampf, der bei Wolkenbildung in aufsteigenden Luftpaketen Energie in

Form von latenter Wärme freisetzt. Wärmere Luft beinhaltet im Allgemeinen mehr Wasserdampf, daher nimmt dieser zweite Effekt bei einem steigenden Temperaturniveau zu: die Schichtung wird weniger stabil, selbst wenn sich die vertikale Temperaturabnahme in einer Luftmasse selbst nicht ändern sollte. Dieser Zusammenhang ist im Kontext des Klimawandels zentral.

Tabelle 01 fasst die unterschiedlichen Eigenschaften flächiger und konvektiver Starkniederschläge zusammen. Insbesondere sind die Intensitäten in konvektiven Fällen typischerweise um eine Größenordnung höher, dafür sind ihre zeitlichen und räumlichen Ausdehnungen um jeweils eine bis zwei Größenordnungen geringer (Hagel stellt hier gewissermaßen das extreme Ende des Spektrums konvektiver Starkniederschläge dar). Folglich führen flächige Niederschlagsmaxima vor allem zu Hochwasser in größeren Flüssen, während sich konvektive Niederschlagsspitzen am meisten in Form von Sturzfluten in kleinen Einzugsgebieten oder Oberflächenwasser auswirken (Formayer und Kromp-Kolb, 2009; Bernet et al., 2017). In der Realität ist die Trennung zwischen beiden Niederschlagsarten allerdings oft unscharf: auch flächige Niederschläge werden bei weniger stabiler Schichtung intensiver und können eingebettete Konvektion beinhalten, sobald die Luftschichtung gänzlich instabil wird.

Tabelle 01: Typische Eigenschaften flächiger und konvektiver Starkniederschläge im Vergleich.

Table 01: Comparison of typical characteristics of large-scale and convective heavy precipitation events.

	flächige Starkniederschläge	konvektive Starkniederschläge
Luftschichtung	stabil	instabil
Ursache der Hebung	Dynamik (Tiefdruckgebiete, Stau)	thermischer Auftrieb
Charakter der Hebung	schwach, großräumig, laminar	stark, kleinräumig, turbulent
Niederschlagsraten	1–10 mm/h	10–100 mm/h
Ausdehnung	1.000–100.000 km ²	10–1.000 km ²
Dauer	viele Stunden bis wenige Tage	Minuten bis wenige Stunden
Niederschlagscharakter	gleichmäßig	räumlich und zeitlich schwankend
Geeignetes Messverfahren	Stationsmessungen in Intervallen von 6–24 h	Fernerkundung (Radar) in Intervallen von 5–60 min

7.3.2 Vertikale Windscherung

Vertikale Windscherung ist eine indirekte Folge von horizontalen Temperaturgegensätzen in der Atmosphäre. Auf großen Skalen ist sie insbesondere unter dem Jetstream präsent, jenem mäandrierenden, semi-permanenten Starkwindband, das die Erde in der oberen Troposphäre (ca. 5–10 km Höhe) in mittleren geografischen Breiten umschließt. Auch auf kleineren Skalen entsteht oder wächst sie durch thermische Windsysteme, die sich infolge der unterschiedlich starken Aufheizung etwa zwischen Land und Meer oder zwischen Gebirgen und deren Vorländern bilden.

Die Position und Intensität des Jetstreams bestimmt wesentlich das Auftreten und die Stärke von Tiefdruckgebieten. Das Wissen über deren Verbreitung und Verlagerung in Europa wuchs im späten 19. Jahrhundert dank der telegrafischen Übertragung von Wettermeldungen rasch an. Darauf aufbauend kategorisierte Bebbler (1891) fünf typische Zugbahnen von Tiefdruckgebieten in Europa. Während die meisten seiner Bezeichnungen wieder verschwunden sind, ist die Zugstraße Vb (gesprochen: »fünf b«), ein Zweig seiner »fünften« Zugbahn, bis heute im deutschsprachigen Raum ein wichtiger Begriff. Sie führt vom Golf von Genua rund um die Ostalpen Richtung Polen oder Ostdeutschland und kehrt besonders charakteristisch wieder, da der Alpenbogen in bestimmten Wetterlagen Tiefdruckbildungen über dem Golf von Genua begünstigt. Insbesondere haben Vb-Tiefs eine hohe Wetterwirksamkeit in Mitteleuropa und sind für den Hauptanteil der großräumigen Hochwasserereignisse verantwortlich (Messmer et al., 2015; Hofstätter et al., 2015, 2018).

Auf der wesentlich kleineren Skala von Konvektion wirkt vertikale Windscherung auf eine direktere Weise: sie kippt die Achse einer Gewitterwolke aus der Senkrechten in eine Schräge, wodurch der Niederschlag nicht mehr in den Aufwindbereich, sondern neben diesem zu Boden fällt (Abbildung 01). Diese sogenannte »Organisation«, also die Trennung von Auf- und Abwindbereich, ermöglicht eine längere Lebensdauer von Gewittern. Außerdem werden sowohl die Aufwinde als auch die Abwinde in organisierten Gewittern durch dynamische Effekte gegenüber den rein thermischen Auf- und Abtrieben in unorganisierten Gewittern weiter verstärkt. Unwetter mit Hagel und konvektiven Sturmböen treten also bevorzugt unter besonders instabiler Luftschichtung oder unter starker vertikaler Windscherung auf (Pučík et al., 2015; Taszarek et al., 2017). Der Einfluss des Organisationsgrades von Gewittern auf Starkregen ist dagegen bisher kaum untersucht worden. Dass organisierte Gewitter an einem fixen Ort größere Niederschlagsmengen bringen sollten, ist nicht unbedingt intuitiv, da sie sich im Allgemeinen auch rascher verlagern als unorganisierte. Allerdings treten konvektive Starkregen auffällig oft gemeinsam mit großem Hagel auf. Dieser Umstand wurde bereits von Watzinger (1997) betont, aber erst

von Kirnbauer et al. (2016) näher diskutiert, und legt eine Verzahnung der zugrunde liegenden Entstehungsprozesse nahe.

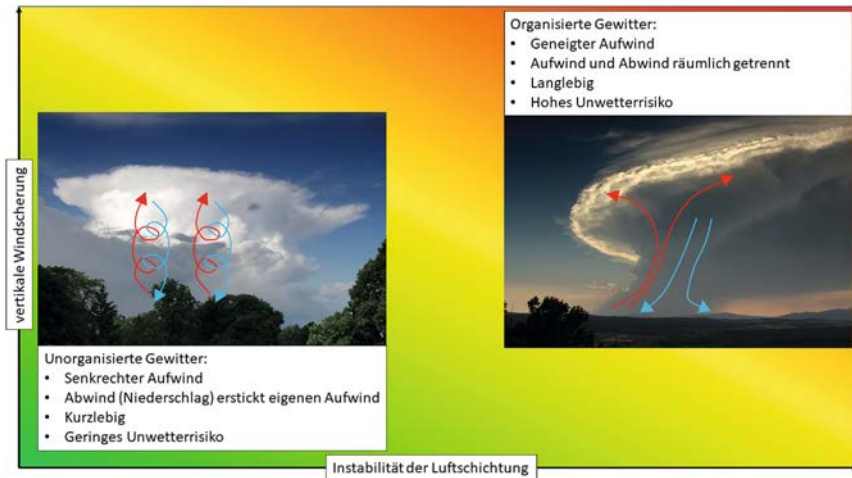


Abbildung 01: Schematische Darstellung der Bedingungen für unorganisierte und organisierte Gewitter und ihrer Eigenschaften. Die roten und blauen Pfeile skizzieren die Aufwinde beziehungsweise Abwinde in der Gewitterwolke. Die Hintergrundfarbe des Diagramms symbolisiert das von links unten nach rechts oben zunehmende Unwetterrisiko.

Figure 01: Schematic illustration of the conditions for disorganized and organized thunderstorms and their characteristics. The red and blue arrows sketch the updrafts and downdrafts, respectively, within the thundercloud. The background color of the diagram symbolizes the increasing severe weather risk from bottom left to top right.

Quelle: Pistotnik et al.

7.4 Zeitliche und räumliche Verteilung, historische Fallbeispiele

Die beiden wesentlichen Steuerungsmechanismen weisen gegengleiche mittlere Jahreszyklen auf: der Jetstream und die damit verbundene vertikale Windscherung sind im Winterhalbjahr am stärksten, während die Luftschichtung im Sommerhalbjahr am wenigsten stabil ist. Diese Zusammenhänge bestimmen die saisonale Verteilung von Starkregen und Hagel. Die räumliche Verteilung wird vor allem von der Topografie der Alpen diktiert.

7.4.1 Starkregen

Starkregen tritt bevorzugt entlang der Alpenränder auf. Ein ausgeprägter Zusammenhang zwischen mittleren Jahressummen und höchsten Tagessummen des Niederschlages liegt auf der Hand. Unterschiede offenbaren sich erst im Detail.

Die räumlichen Verteilungen von Starkregen wurden bisher noch nicht explizit, sondern allenfalls implizit über ihre Dauerstufen in flächige und konvektive Ereignisse unterteilt. Watzinger (1997) untersuchte alle 24-stündigen Stationsmessungen über 140 mm in Österreich zwischen 1895 und 1992 und führte die Maxima entlang der Alpennord- und -südseite vorrangig auf flächige, durch Stau unterstützte Niederschläge zurück. Eine weitere Häufung an den südöstlichen Alpenausläufern wies er konvektiven Niederschlagsspitzen von in Wahrheit wesentlich kürzeren Zeitdauern zu. Lorenz und Skoda (2001) verknüpften Stationsdaten mit räumlichen Niederschlagsmustern aus einem numerischen Modell für eine Abschätzung statistischer Wiederkehrzeiten von 30-minütigen bis 12-stündigen Niederschlägen auf einem 6-km-Gitter. Dieser Datensatz wird bis heute für Bemessungsniederschläge verwendet und bildet die beiden unterschiedlichen Regimes ebenfalls deutlich ab, indem die regional höchsten Bemessungswerte von kurzen zu längeren Dauerstufen allmählich vom Südosten (Maximum konvektiver Ereignisse) zur Alpennord- und -südseite (Maximum flächiger Ereignisse) wandern.

Für flächige Starkniederschläge lassen sich in Österreich vier Naturräume mit räumlicher und saisonaler Unterscheidung identifizieren (Formayer und Kromb-Kolb, 2009; Hofstätter et al., 2015):

- Von Vorarlberg bis Oberösterreich bringt vor allem Nordwest- bis Nordstau über das ganze Jahr verteilt ergiebige Niederschläge. Die Druckgegensätze, die diese Staueffekte maximieren, treten typischerweise an den Flanken von Tiefs atlantischen Ursprungs oder an den Rückseiten von abziehenden Vb-Tiefs auf. Bemerkenswerte Ereignisse in jüngerer Vergangenheit traten etwa im Februar 1990 sowie im März 2002 auf. Bei Zufuhr milder atlantischer Luftmassen spielt im Winter und Frühjahr auch Schneeschmelze eine große Rolle, sodass es in diesen Situationen besonders schwierig sein kann, die rein meteorologische Komponente herauszufiltern.
- Südstau an der Vorderseite von Mittelmeertiefs (inklusive entstehenden Vb-Tiefs) bewirkt an der Alpensüdseite von Osttirol über Kärnten bis in Teile der Steiermark flächige Starkniederschläge mit einer maximalen Häufigkeit im Herbst und Winter. Ein historisch herausragendes Ereignis trat im November 1966 auf (Troschl, 1967). Erst vor kurzem waren die Niederschläge und folgenden Hochwässer vom 27.–30. Oktober 2018 mit jenen von 1966 vergleichbar.

- Der Alpenostrand in Niederösterreich, Wien, dem Burgenland und der Steiermark ist stark von Vb-Tiefs beeinflusst und erfährt im Sommer und Herbst die größten flächigen Starkregenereignisse. Herausragendes Beispiel ist hier das Starkregen- und Hochwasserereignis im August 2002 (z. B. Ulbrich et al., 2003a,b).
- Höhentiefs über Mitteleuropa, die sich vom Jetstream abgelöst haben und daher nur langsam ziehen oder gar ortsfest werden, können vor allem im Sommer überall flächige Starkregenfälle auslösen, je nachdem, aus welchem Sektor sie feuchte Luftmassen gegen die Alpen steuern. Ein extremes Hochwasser in Teilen der Schweizer, bayrischen und österreichischen Alpen trat im August 2005 auf (Beniston, 2006; BLU, 2006).

Das Risiko von großflächigen Starkniederschlägen in Mitteleuropa wird durch verschiedene Faktoren bestimmt. Einerseits ist die Häufigkeit von Tiefdruckgebieten im Winter durch den stärkeren Jetstream deutlich höher als im Sommer (Abbildung 04 in Hofstätter et al., 2018). Starke Tiefs sind im Winterhalbjahr (Oktober bis März) sogar um 250 % häufiger als im Sommerhalbjahr (April bis September). Andererseits sind große Niederschlagsmengen im Sommerhalbjahr aufgrund der weniger stabilen Luftschichtung und des höheren Wasserdampfgehaltes auch bei schwächeren Tiefdruckgebieten wahrscheinlich. So liegt das 95. Perzentil des Niederschlags-Flächenmittels in Mitteleuropa für die Gesamtheit aller Tiefdruckgebiete im Sommer bei 30 mm und im Winter bei 19 mm in 24 Stunden, für Vb-Tiefs sogar bei 56 mm beziehungsweise 29 mm (Tabelle 06 in Hofstätter et al., 2018). Großflächige Starkniederschläge sind also in Mitteleuropa das ganze Jahr über möglich, im Sommerhalbjahr aber häufiger als im Winterhalbjahr.

Konvektive Starkregen weisen durch ihre Bindung an eine instabile Luftschichtung markante Jahres- und Tageszyklen auf. Da im Prinzip jedes Gewitter einen konvektiven Starkregen auslösen kann, lassen sich die seit 1992 von ALDIS (»Austrian Lightning Detection and Indication System«) registrierten Blitzentladungen zu einem gewissen Grad als Substitut für eine Betrachtung ihrer räumlichen und zeitlichen Verteilung verwenden.

Mehr als 95 % aller Gewitter entladen sich im Sommerhalbjahr (April bis September), und innerhalb davon die meisten am Nachmittag und Abend (Bertram und Mayr, 2004; Schulz et al., 2005; Nisi et al., 2016; Piper und Kunz, 2017). Räumlich gesehen ist ihre Häufigkeit entlang der Alpenränder am größten und nimmt sowohl Richtung Zentralalpen als auch in den Alpenvorländern mit größerer Entfernung zu den Bergen ab (Bertram und Mayr, 2004; Schulz et al., 2005; Wapler, 2013; Kaltenböck und Steinheimer, 2015). Physikalisch lässt sich dieses Muster so interpretieren, dass sich an den Alpenrändern die »Zutaten« für eine instabile Luftschichtung, nämlich eine vom Boden aus-

gehende Tageserwärmung der Luft und ein hohes Feuchteangebot, am besten überlappen. Inneralpin stellt das mangelnde Feuchteangebot, im Flachland hingegen die schwächere Tageserwärmung den limitierenden Faktor dar.

Besonders gewitterreich ist die Alpensüdseite. Das europaweite Gewittermaximum umfasst den Schweizer Tessin, weite Teile Norditaliens, Slowenien sowie den Süden und Südosten Österreichs; das Feuchteangebot der warmen Adria verlängert hier die Gewittersaison zudem bis in den Herbst hinein (Schulz et al., 2005; Kotroni und Lagouvardos, 2016; Piper und Kunz, 2017). Seit 1992 waren laut den Aufzeichnungen von ALDIS in 23 von 26 Jahren entweder Kärnten oder die Steiermark das österreichische Bundesland mit der höchsten Blitzdichte.

Auf Gemeindeebene ist die mittlere jährliche Blitzdichte in Miesenbach bei Birkfeld (Bezirk Weiz, Steiermark) am höchsten. Diese Gemeinde liegt am steirischen Randgebirge, wo auch die extremsten in Österreich bekannten Wolkenbrüche konzentriert sind (Schwarzl, 1972; Watzinger, 1997; Kirnbauer et al., 2016). Bei vier Ereignissen ergaben entweder eine Messung (1947 am Semmering) oder eine hydrologische Rekonstruktion (1913 im Stiftingtal bei Graz, 1915 in Schaueregg am Wechsel und 1958 bei Allerheiligen in den Fischbacher Alpen) Niederschlagsmengen von mehreren hundert Millimetern binnen weniger Stunden. Drei dieser Ereignisse wurden detailreich dokumentiert (Forchheimer, 1913; Schoklitsch, 1914; Hader, 1951; Zettl, 1958; Schwarzl, 1972). Information über das Ereignis von Schaueregg 1915 dürfte infolge der beiden Weltkriege verloren gegangen sein; in Sekundärquellen wird es mit einem rekonstruierten Niederschlagsmaximum von etwa 650 mm in zwei Stunden sogar als der stärkste Wolkenbruch überhaupt in Österreich geführt.

Auch in den letzten Jahren traten konvektive Starkregen mit 100 bis 200 mm Niederschlag binnen weniger Stunden vorrangig im Südosten Österreichs auf. Im Frühsommer 2010 waren kurz nacheinander Hollenthon und Tauchen in der Buckligen Welt betroffen, am 16. April 2018 Heiligenkreuz am Waasen und das Stadtgebiet von Graz. Ansonsten traten Niederschläge ähnlicher Größenordnung lediglich 2006 in Weikertschlag im nördlichen Waldviertel und 2016 im grenznahen Simbach in Bayern auf (Tabelle 02 und Abbildung 07 in Kirnbauer et al., 2016).

Konvektive Starkregen wurden bisher noch kaum mit Wetterlagen verknüpft. Jedenfalls werden sie nicht so sehr durch eine bestimmte Wetterlage ausgelöst wie flächige Starkniederschläge durch Vb-Tiefs. Offensichtlich können viele unterschiedliche Wetterlagen die Bedingungen für einen konvektiven Starkregen bereitstellen. Bereits Schwarzl (1972) schloss, dass die Hochwasser- und Murenkatastrophe von 1958 in den Fischbacher Alpen nicht als beispielloser »Exzess« der Natur gesehen werden sollte, sondern sich bei neuerlichem Zusammentreffen der Bedingungen dort oder andernorts wiederholen könnte.

Kirnbauer et al. (2016) fanden schließlich Hinweise, dass die auffällige Häufung extremer konvektiver Starkregen im Südosten Österreichs vor allem an eine ganz bestimmte Wettersituation gebunden wäre, nämlich eine Kaltfront aus Nordwesten, die in höheren Luftschichten langsam den Alpenbogen überstreicht, während sie in Bodennähe von ihm blockiert wird. Eine umfassende Rekonstruktion ist jedoch noch ausständig.

Nicht zuletzt sei auch auf die wichtige Rolle einer niederschlagsreichen »Vorgeschichte« hingewiesen, die die Böden mit Wasser sättigen und die Folgen eines neuerlichen Starkregens entsprechend verschlimmern kann. Das großräumige Sommerhochwasser 2002 wurde durch eine Abfolge zweier besonders starker Vb-Tiefs binnen weniger Tage ausgelöst. Im Sommer 2009 traten im Gefolge eines großräumigen Starkregen- und Hochwasserereignisses zwei Wochen lang fast täglich in verschiedenen Teilen Österreichs Überflutungen und Murenabgänge durch Gewitterregen auf, die aus meteorologischer Sicht keineswegs außergewöhnlich waren. Heftige, aber als einzelne noch nicht extreme Gewitter an zwei aufeinanderfolgenden Tagen waren auch für die katastrophalen Sturzfluten und Muren in Oberwölz und anderen Teilen der Niederen Tauern am 5. August 2017 verantwortlich.

7.4.2 Hagel

Das Auftreten von Hagel spiegelt ebenfalls gut jenes von Gewittern wider. Räumlich sind seine Maxima allerdings ein Stück Richtung Alpenvorländer verschoben, wie Studien aus der Schweiz, Deutschland, Österreich und Norditalien übereinstimmend zeigen (Eccel et al., 2012; Manzato, 2012; Puskeiler, 2013; Svabik et al., 2013; Nisi et al., 2016; Nisi et al., 2018). Gewitter entstehen bevorzugt über den Bergen und intensivieren sich oft, sobald sie in die besonders feuchte Luft über den Vorländern ziehen.

Bei kurzer Dauer betrifft Hagel fleckenhafte, meist nur wenige Quadratkilometer große Gebiete. Bei langlebigen und schnell ziehenden Unwettern können Hagelstriche im Extremfall dutzende oder sogar hunderte Kilometer lang werden, während ihre Breite weiterhin meist auf wenige Kilometer beschränkt bleibt (Kapsch et al., 2012; Puskeiler, 2013; Nisi et al., 2018). Die bisher bekannten Aspekte der Hagelklimatologie des Alpenraums offenbaren ein interessantes und noch nicht erklärtes Detail: obwohl Hagel an der Alpensüdseite am häufigsten ist, sind die längsten und schadensträchtigsten bisher rekonstruierten Hagelstriche der letzten hundert Jahre auffallend an der Alpennordseite konzentriert (Tabelle 02).

Die größten Hagelkörner in Österreich mit bis zu 12 cm Durchmesser wurden am 6. Juli 1929 in mehreren Gemeinden vom Salzburger Flachgau bis zum

oberösterreichischen Hausruck sowie am 13. Juli 1984 (einen Tag nach dem berühmten »Münchner Hagelunwetter«, siehe Tabelle 02) in St. Oswald im südlichen Waldviertel dokumentiert.

Tabelle 02: Rekonstruierte Hagelzüge in Bayern und Österreich mit mehr als 400 km Länge (ohne Anspruch auf Vollständigkeit).

Table 02: Reconstructed hail tracks in Bavaria and Austria with a length of more than 400 km (the list might not be exhaustive).

Datum	größter dokumentierter Hagel [cm]	Bemerkungen (Referenz)
06.07. 1929	12 (Pöndorf u. a.)	Hagelzug entlang des Alpennordrandes vom Raum Rosenheim bis in die heutige Slowakei (Abbildung 02) »Münchner Hagelunwetter«; Hagelzug vom Berner Oberland über den Bodensee und München bis zum südlichen Bayerwald; versicherte Schäden von rund 1,5 Milliarden Deutscher Mark; teuerste Naturkatastrophe Deutschlands und teuerstes Hagelereignis weltweit; mehr als 400 Verletzte und drei indirekte Todesopfer (Heimann und Kurz, 1985; Höller und Reinhardt, 1986)
12.07. 1984	9,5 (München)	Hagelzug entlang der nördlichen Längstalfurche vom Tiroler Oberland bis ins südliche Niederösterreich (Scheffknecht et al., 2017)
02.08. 2007	5 (Radstadt)	zwei zusammen ca. 1.000 km lange Hagelzüge entlang des ganzen Alpennordrandes vom Genfer See bis in den Wiener Raum; versicherte Schäden mehr als eine Milliarde Euro; teuerster Hagelschlag sowohl in der Schweiz als auch in Österreich; etwa 40 Menschen im Salzburger Flachgau und im oberösterreichischen Innviertel durch 8–10 cm große Hagelkörner schwer verletzt (Pistotnik, 2009; Imhof und Choffet, 2012)
23.07. 2009	10 (Munderfing)	

7.5 Vergangene und zukünftige Trends

Vor dem Hintergrund des Klimawandels stellt sich die Frage nach vergangenen und vor allem zukünftigen Änderungen der Bedrohung durch Starkregen und Hagel. Gerade bei Ereignissen mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Variabilität wird die Erkennung allfälliger Trends, also systematischer Änderungen über die Zeit, durch ihre Überlagerung mit kürzeren, zufälligen Schwankungen und Perioden erschwert. Eine verlässliche Erkennung von Trends erfordert daher homogene Daten über mindestens eine Klimanormalperiode (30 Jahre), idealerweise noch wesentlich länger, und eine Prüfung auf statistische Signifikanz, also auf eine hohe (per Konvention mindestens 95 %-ige) Wahrschein-

lichkeit, dass es sich bei der Änderung um ein tatsächliches Signal und nicht um ein vergängliches Abbild natürlicher Variabilität handelt.

Bisher lassen sich (vorsichtige) Aussagen über direkte Trends lediglich für flächige Starkniederschläge treffen, deren räumliche und zeitliche Ausdehnung groß genug für eine hinreichend gute Repräsentation durch Stationsmessungen oder gegitterte meteorologische Reanalysefelder ist und auch realistische Projektionen durch Klimamodelle erlaubt. Für konvektive Phänomene ist man hingegen auf indirekte Methoden angewiesen.

7.5.1 Starkregen

Der bestehende Erkenntnisstand zu Starkniederschlägen in Europa wurde im Fifth Assessment Report des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) zusammengefasst. Es besteht ein hohes Vertrauen, dass Starkniederschläge in den letzten Jahrzehnten in vielen Teilen Europas zugenommen haben, wenn auch mit regionalen Abweichungen (Hartmann et al., 2013). In Mitteleuropa zeigten Auswertungen des 95. Perzentsils von Tagesniederschlägen in langen Stationszeitreihen über das 20. Jahrhundert öfter positive als negative Trends, allerdings räumlich und saisonal uneinheitlich und überwiegend statistisch nicht signifikant (Frei und Schär, 2001; Schmidli und Frei, 2005; Zolina et al., 2008; Villarini et al., 2010). In der Schweiz wurden diese Trends bei Ausweitung auf den Zeitraum 1901–2014 allerdings immer öfter positiv (> 90 % aller Stationen) oder sogar signifikant positiv (> 30 % aller Stationen), vor allem durch eine sprunghafte Zunahme um 1980 herum und ein anschließendes Einpendeln auf ein neues, höheres Niveau (Scherrer et al., 2016).

Betrachtet man Flächenmittel des 24-stündigen Niederschlages, so nahm dessen 95. Perzentil im Gebiet von Tschechien und dem Osten Österreichs im Zeitraum 1961–2015 statistisch signifikant um 21 % zu. Im benachbarten Gebiet im Nordstau der Alpen von Südbayern und Oberösterreich war die Zunahme mit 7 % deutlich schwächer und auch statistisch nicht signifikant (Hofstätter et al., 2018). Dieses unterschiedliche Verhalten selbst in benachbarten Gebieten lässt sich auf den Einfluss der verschiedenen Zugbahntypen von Tiefdruckgebieten innerhalb Mitteleuropas zurückführen. Während in Westdeutschland winterliche Atlantiktiefs relevant sind, bestimmen am Alpenostrand vor allem Vb-Tiefs das Starkniederschlagsrisiko. Damit ist die räumlich-zeitliche Kohärenz von großflächigen Starkniederschlägen innerhalb Mitteleuropas schwach (Hofstätter et al., 2018).

Die durchschnittliche jährliche Häufigkeit von Vb-Zugbahnen hat im Zeitraum 1959–2015 statistisch signifikant von 12 Ereignissen um 1960 auf 10 Ereignisse heute abgenommen. Der Großteil dieser Änderung ist jedoch auf die

hohe Anzahl von winterlichen Vb-Tiefs in den 1960er Jahren zurückzuführen. Die Häufigkeit von sommerlichen Vb-Tiefs ist relativ konstant geblieben (Hofstätter und Blöschl, 2019). Atlantik-Tiefs weisen im Zeitraum 1948–2012 keine signifikante Änderung der Häufigkeit auf, befinden sich aktuell allerdings ebenfalls auf einem relativ niedrigen Niveau (Hofstätter et al., 2015).

Simulationen mit globalen Klimamodellen für die Periode 2071–2100 lassen über alle Saisonen eine leicht abnehmende Häufigkeit von starkniederschlagsrelevanten Tiefdruckgebieten im Alpenraum um 5–15 % erkennen, hingegen eine Zunahme der 24-stündigen Niederschlagssummen bei Vb-Tiefs um 15–20 % im Vergleich zu 1971–2000 (Nissen et al., 2013; Hofstätter et al., 2015). Die Niederschlagszunahme lässt sich hauptsächlich durch das höhere Feuchteangebot in einem wärmeren Klima erklären (Brönnimann et al., 2018). Speziell im Fall von Vb-Tiefs spielt die Wassertemperatur des Mittelmeers dabei eine große Rolle (Volosciuk et al., 2016; Messmer et al., 2017).

Direkte Trends für konvektiven Starkregen konnten bisher kaum untersucht werden. Die räumliche Auflösung konventioneller Messnetze ist zu gering für eine repräsentative Erfassung konvektiver Wetterereignisse (Hartmann et al., 2013; Martius et al., 2018). Auch die zeitliche Auflösung ist erst seit dem Beginn automatischer Niederschlagsmessungen ausreichend fein. In Österreich datieren die längsten Zeitreihen automatischer Stationen bis in die späten 1980er Jahre zurück. Sie decken inzwischen also knapp einen 30-jährigen Zeitraum, aber nicht die aktuelle Klimanormalperiode (1981–2010) ab. Erste Auswertungen dieser Messungen auf Stundenbasis zeigten eine hohe jährliche Variabilität und lediglich schwache, uneinheitliche und statistisch nicht signifikante Trends (Lexner et al., 2017).

Darüber hinaus ist man für die Abschätzung von Trends konvektiver Ereignisse auf indirekte Methoden angewiesen. Solche Methoden wurden bisher allerdings hauptsächlich auf Hagel und nicht auf konvektiven Starkregen angewandt. Sie werden daher im folgenden Unterabschnitt erklärt.

7.5.2 Hagel

Hagel wird nicht systematisch mit meteorologischen Instrumenten gemessen. Nur in wenigen Gebieten, etwa den Umfeldern von Krems und Graz in Österreich sowie in Friaul und im Trentino in Italien, existieren Netzwerke von Hagelplatten in Gebieten intensiver landwirtschaftlicher Nutzung, mit denen das Auftreten und die Größe von Hagel direkt und mit hoher räumlicher Auflösung nachgewiesen werden können. Die bisher einzige Auswertung von Hagelplatten für eine ausreichend lange Periode im Alpenraum zeigte eine leicht abnehmende Anzahl an Hagelereignissen, aber eine leichte Zunahme der Hagelkorngrößen

im Trentino im Zeitraum 1974–2009 (Eccel et al., 2012). Beide Trends waren allerdings statistisch nicht signifikant. Auch sonst sind die Signale uneinheitlich. In der Schweiz und Baden-Württemberg wurden seit 1980 deutliche, zum Teil statistisch signifikante Zunahmen der Hageltage und normierten versicherten Hagelschäden gefunden (Schiesser, 2003; Kunz et al., 2009; Mohr et al., 2015b). In jüngster Zeit zeigten hingegen systematische Auswertungen von Radardaten in der Schweiz im Zeitraum 2002–2016 zwar eine Zunahme von Gewittern, hingegen eine Abnahme von Hagel (Nisi et al., 2018); hier sei allerdings der kurze Untersuchungszeitraum betont, der zufällige Schwankungen wahrscheinlicher macht.

In Ermangelung homogener und ausreichend langer Ereigniskataloge bieten sich indirekte Methoden zur Abschätzung von Trends an. Dabei werden Variablen, die besser messbar oder berechenbar sind (etwa aus Stationsmessungen, Radiosonden-Aufstiegen oder gegitterten meteorologischen Reanalysefeldern) und in einem Zusammenhang mit einem untersuchten Phänomen stehen, als »Proxy« für das Auftreten dieses Phänomens verwendet. Im Falle von Hagel sind dies vor allem Maßzahlen für die Stabilität der Luftschichtung und die vertikale Windscherung (siehe Kapitel 7.3). Eine Tendenz zu instabilerer Luftschichtung über die letzten drei Jahrzehnte in Mitteleuropa wurde dabei mehrfach nachgewiesen: aus Stationsmessungen und Radiosonden-Daten von Mohr und Kunz (2013), aus einer rückwirkenden Klimavorhersage (»Hindcast«) von Mohr et al. (2015a) und aus Reanalysefeldern von Pistotnik et al. (2016). Die detektierten Trends waren allerdings stark von natürlicher Variabilität überlagert und daher überwiegend nicht statistisch signifikant. Das zeitliche Verhalten der vertikalen Windscherung wurde noch kaum untersucht. Lediglich Mohr und Kunz (2013) erwähnten uneinheitliche und statistisch insignifikante Trends über die letzten Jahrzehnte in Mitteleuropa.

Eine andere indirekte Möglichkeit besteht darin, die Häufigkeit bestimmter Wetterlagen, die als besonders hagelträchtig bekannt sind, über lange Zeiträume zu untersuchen. In Mitteleuropa schaffen Südwestwetterlagen im Allgemeinen die besten Bedingungen für heftige Gewitter mit Hagel. Deren Zunahme wurde für den Zeitraum zwischen 1971 und 2003 bereits nachgewiesen (Kunz et al., 2009; Kapsch et al., 2012).

Das zukünftige Hagelpotenzial in Mitteleuropa zeigt anhand beider Methoden, also einer Anwendung von Proxies auf das Gitter von Klimamodellen (Mohr et al., 2015b) und einer Untersuchung der Häufigkeit hagelträchtiger Wetterlagen (Kapsch et al., 2012), eine statistisch insignifikante Zunahme für die Periode 2021–2050 gegenüber 1971–2000. Die bisherigen Anwendungen der Proxy-Methode auf Klimamodelle für die fernere Periode 2071–2100 zeigen eine Zunahme des Hagelrisikos in weiten Teilen Europas, indem im Mittel instabilere Luftschichtungen eine im Mittel schwächere vertikale Windscherung über-

kompensieren sollen, wobei diese Zunahme im ausgehenden 21. Jahrhundert immer öfter statistisch signifikant werden soll (Marsh et al., 2009; Sander, 2011; Púčik et al., 2017).

7.6 Diskussion und aktuelle Forschungsfragen

Die Erwärmung im Zuge des Klimawandels betrifft die Polargebiete wesentlich stärker als die Tropen, da die Ausaperung vormals schnee- und eisbedeckter Flächen ausgeprägte positive Rückkopplungen erzeugt. Der verringerte globale Temperaturgegensatz schwächt den Jetstream im Mittel ab. Dafür wird die Luftschichtung bei einem höheren Temperaturniveau tendenziell instabiler (siehe Kapitel 7.3.1). Sowohl für Tiefdruckgebiete mit flächigen Starkregen als auch für Gewitter mit kleinräumigen Starkregen und Hagel werden die beiden grundlegenden Steuerungsmechanismen also gegenläufig sein.

Welcher dieser beiden Effekte überwiegen wird, ist nicht von vornherein klar. In den bisherigen Studien für Mitteleuropa herrscht allerdings weitgehender Konsens, dass der Einfluss weniger stabiler Luftschichtungen gegenüber dem Einfluss abnehmender Höhenwinde überwiegen wird. Tiefdruckgebiete werden also im Mittel nicht unbedingt häufiger und stärker werden, aber dann, wenn sie auftreten, mehr Niederschläge bringen (Messmer et al., 2015). Insbesondere begünstigt ein schwächerer Jetstream auch öfter »stehende« Wetterlagen mit ortsfesten Druckgebilden, die sowohl Trockenheit als auch Hochwässer insgesamt wahrscheinlicher machen. Gewitter werden häufiger und ebenfalls niederschlagsreicher, aber tendenziell weniger gut organisiert sein als bisher. Da eine positive Abhängigkeit konvektiver Starkregen von vertikaler Windscherung fraglicher – und sehr wahrscheinlich schwächer – ist als für Hagel oder konvektive Sturmböen, lässt sich zumindest spekulieren, dass Starkregen noch mehr als bisher zum dominanten Risiko bei Gewittern werden wird (Kirnbauer et al., 2016).

Auch wenn sich viele der beobachteten Trends also physikalisch plausibel erklären lassen, sind die betrachteten Zeiträume allerdings oft noch zu kurz für eine Beurteilung, ob sie sich tatsächlich bereits als ein Fenster in einen zukünftigen Klima-Alltag interpretieren lassen oder noch ein Resultat natürlicher Variabilität sind. Auch eine Einbettung in einen Kontext verschobener Zirkulationsmuster oder veränderter Wetterlagen, etwa einer seit den 1950er Jahren beobachteten polwärtigen Verschiebung der mittleren Position des Jetstreams und assoziierter Zugbahnen atlantischer Zyklonen (Hartmann et al., 2013), ist noch ausständig.

Ein weiterer zu erwartender Effekt des Klimawandels ist eine Verschiebung der Saisonalität von Niederschlägen. Eine Temperaturerhöhung um ein Grad

entspricht in den Übergangsjahreszeiten einer Verschiebung von etwa einer Woche. Die globale Erwärmung dürfte also sowohl die Saison sommerlicher, besonders niederschlagsreicher Tiefdruckgebiete als auch von Gewittern im Mittel nach vorne und hinten verlängern (Beniston, 2006; Brönnimann et al., 2018). Vor diesem Hintergrund kann etwa das beispiellos frühe Auftreten extremer Gewitterregen am 16. April 2018 im Raum Graz und Leibnitz kaum als reiner Zufall betrachtet werden: schließlich waren sowohl dieser Tag (+6,0 K Abweichung zum Klimamittel) als auch der ganze Kalendermonat (+4,8 K Abweichung) temperaturmäßig um etwa fünf Wochen der Jahreszeit voraus.

Generell ist die Untersuchung von Unwetterrisiken, insbesondere konvektiver Phänomene, vor dem Hintergrund des Klimawandels noch ein sehr junges Feld, das sich gerade erst intensiv entfaltet. In den folgenden Unterabschnitten werden einige Herausforderungen für die nächsten Jahre andiskutiert.

7.6.1 Weiterführung und Ausbau von Messsystemen

Für robuste Aussagen über Veränderungen der Häufigkeit und Intensität von Wetter- und Klimaphänomenen sind lange und homogene Zeitreihen von 30 Jahren und mehr nötig. Diese Voraussetzungen sind für flächige Starkregenereignisse, die sich hinreichend gut mit Wetterstationsnetzen abbilden lassen, dank der Erhaltung und Homogenisierung langjähriger Messreihen gut erfüllt. Die weitere Erhaltung und Pflege dieses Stationsnetzes ist daher essenziell.

Für eine vollständige Abbildung konvektiver Niederschläge reicht die Auflösung herkömmlicher Wetterstationsnetze oder gegitterter Reanalyse-Datensätze nicht aus. Für wissenschaftliche Fragestellungen können feinmaschige Messnetze in begrenzten Zielgebieten eine Lösung mit vertretbarem Kostenaufwand sein, etwa das WegenerNet im Raum Feldbach in der Steiermark, das seit 2007 vom Wegener Center der Universität Graz betrieben wird und in seiner Dichte von einer Station pro 2 km² weltweit einmalig ist (Kirchengast et al., 2014). Das WegenerNet wurde vor allem für eine Validierung von zukünftigen hochauflösenden Klimamodellen, Downscaling-Verfahren und Radardaten konzipiert. Die Stationsdaten verbesserten auch das Verständnis, wie weit konvektive Niederschlagsspitzen räumlich ausstrahlen (Schroerer et al., 2018).

Radardaten vermitteln ein in der Fläche vollständiges Bild über das Auftreten konvektiver Niederschläge, sind allerdings mit erheblichen quantitativen Unsicherheiten behaftet. In einem alpin geprägten Land wie Österreich kommt die begrenzte Reichweite der Radarstrahlen noch erschwerend hinzu. International geht der Trend in Richtung eines dichteren Messnetzes kleinerer Radargeräte, die in einem kurzwelligeren Frequenzbereich operieren und nur begrenzte

Reichweiten haben, dafür noch feinere Auflösungen bieten. Für eine direkte Anwendung auf klimatologische Fragestellungen müssten Radardaten noch bestmöglich homogenisiert werden, um sie um die Effekte von technischen Neuerungen und Standort-Änderungen zu bereinigen. Diese große Herausforderung muss in Österreich erst angegangen werden.

Die österreichischen Radarstandorte wurden in den letzten Jahren auf polarimetrische Radargeräte aufgerüstet, die neben der Intensität auch die Art des Niederschlages detektieren (Kaltenböck und Ryzhkov, 2013). Damit kann erstmals auch Hagel automatisch mit hoher Wahrscheinlichkeit erkannt werden, was zuvor nur mit erheblichen Unsicherheiten (oder viel menschlicher Erfahrung) möglich war. Das oben genannte Problem einer schlechten »Radarsicht« speziell in gebirgigem Gelände bleibt allerdings auch für polarimetrische Radardaten bestehen und muss für eine räumliche Vergleichbarkeit erst gelöst werden.

Mit Sicherheit können das Auftreten und die Größe von Hagel durch Kunststoffplatten festgestellt werden, in denen aufschlagende Eiskörner entsprechende Abdrücke hinterlassen. Bisher wurden Hagelplatten lediglich im Zusammenhang mit einer künstlichen Hagelabwehr durch rechtzeitiges »Impfen« einer Gewitterwolke mit Silberjodid verwendet, deren Wirkung noch immer umstritten ist. In Österreich existieren feinmaschige Netzwerke von Hagelplatten daher nur im Operationsbereich der Hagelabwehr im Raum Krems und Graz sowie neuerdings im WegenerNet im Raum Feldbach. Angesichts der geringen Kosten ist das erstaunlich: eine systematische Ausstattung z. B. aller Niederschlagsmessstationen mit einer zusätzlichen Hagelplatte könnte unseren Informationsstand über das Auftreten von Hagel systematisch verbessern.

7.6.2 Sammlung von Informationen über die Auswirkung von Unwettern

Gerade für konvektive Unwetter stellt das Fehlen vollständiger, einheitlicher und homogener Mess- und Beobachtungsdaten große Herausforderungen dar. Neben Radardaten lässt sich die unzureichende Dichte an automatischen Stationsmessungen und der Mangel an routinemäßigen Beobachtungen etwa durch Versicherungsdaten, Protokolle von Feuerwehreinsätzen und Unwettermeldungen aus der Öffentlichkeit beheben (Krennert et al., 2018a; Martius et al., 2018). Der Weg zur bestmöglichen Kombination dieser verschiedenen Datensätze für die optimale Ausnutzung ihrer jeweiligen Stärken muss allerdings erst beschritten werden.

Für die Sammlung von Information über die Auswirkungen von Unwettern stellt »Crowdsourcing« derzeit ein besonders heißes Thema dar. Seine Aktualität ergibt sich aus einer Verschneidung zwischen einem explodierten Verbrei-

tungsgrad von Smartphones mit Kamera, Internetzugang und GPS-Ortung sowie dem steigenden Bestreben nationaler Wetterdienste, vor den Auswirkungen von Unwettern statt vor Unwettern an sich zu warnen, also auch Vulnerabilität und Exposition mit einzuschließen (»what the weather will do« anstelle von »what the weather will be«; WMO, 2015). Trotz der stetigen Weiterentwicklung von Messinstrumenten und Fernerkundungsverfahren sind Beobachter vor Ort noch immer unerlässlich für eine zweifelsfreie Bestätigung des Auftretens und vor allem der Auswirkungen eines bestimmten Wetterphänomens. Der Anteil der nationalen Wetterdienste, die für diesen Zweck offiziell mit Netzwerken ehrenamtlicher Wettermelder kooperieren, nahm im letzten Jahrzehnt in Europa von unter 20 % auf 58 % zu (Krennert et al., 2018b). Unterstützt wurde diese Entwicklung auch vom zunehmend partizipativen Charakter des Internets, der die Verbreitung von Information erleichterte und beschleunigte (Pistotnik et al., 2017; Krennert et al., 2018b).

Gerade die Wetterdienste der Schweiz und Österreichs nehmen hier Vorreiterrollen ein. So inkludiert eine von der Meteo Schweiz entwickelte Wetter-App, die bis Mitte 2015 bereits von mehr als einem Drittel der Schweizer Bevölkerung heruntergeladen wurde, eine Möglichkeit zur Meldung von Hagel. Selbst wenn nur ein Bruchteil der Nutzer aktiv davon Gebrauch nimmt, lässt sich damit eine Fülle an Hagelmeldungen erhalten (Trefalt et al., 2018). In Österreich baute die ZAMG das europaweit fortschrittlichste System für Echtzeit-Meldungen von Wetter- und Unwetterphänomenen auf, indem ehrenamtliche Melder zu beglaubigten Beobachtern (»Trusted Spotters«) geschult werden und ihre Meldungen eine höhere Qualitätsflagge erhalten, die eine sofortige Verarbeitung für zeitkritische Unwetterwarnungen ermöglicht (Krennert et al., 2018a).

Obwohl das Einbinden der Öffentlichkeit vor allem von der Wettervorhersage getrieben wird, gewinnen wir dadurch auch verbesserte klimatologische Abschätzungen des Risikos von Starkregen oder Hagel. Einerseits können damit Proxy-Methoden besser kalibriert werden, andererseits helfen sie längerfristig für den Aufbau möglichst vollständiger Datenbanken von Ereignissen. Inwieweit sich dieser noch junge und innovative Ansatz breitenwirksam machen lässt, werden erst die nächsten Jahre zeigen.

7.6.3 Rekonstruktion historischer Unwetter und Vergleich mit heutigen Ereignissen

Die Aufarbeitung vergangener Unwetter wird durch die fortschreitende Digitalisierung erhaltener historischer Zeitungsberichte und anderer Dokumente erleichtert. In einem Pilotversuch an der ZAMG wurden Meldungen konvektiver Unwetter im deutschsprachigen Alpenraum aus den diesbezüglich herausra-

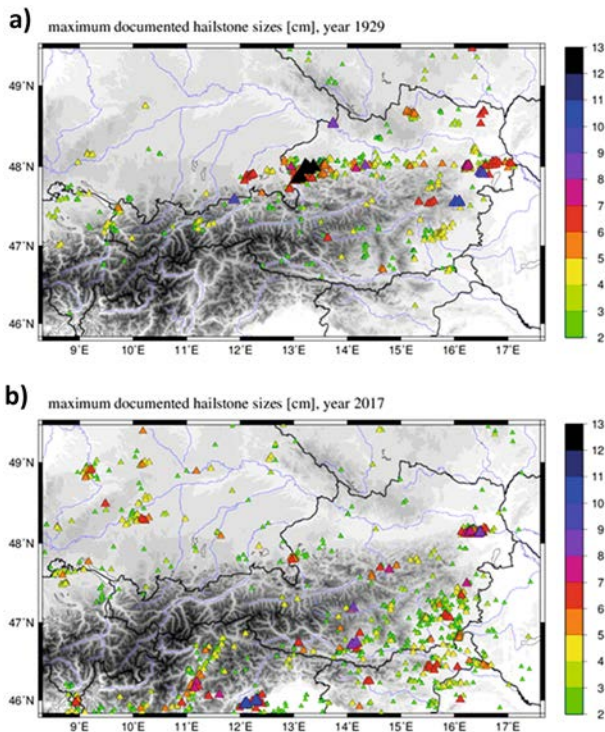


Abbildung 02: Gesammelte Hagelmeldungen (maximal dokumentierte oder beschriebene Korngröße ab 2 cm) aus den Jahren 1929 (a) und 2017 (b).

Figure 02: Collected hail reports (maximum documented or described hailstone sizes of at least 2 cm) from the years 1929 (a) and 2017 (b).

Datenquellen: historische Medienberichte aus der Österreichischen Nationalbibliothek, der Schweizer Nationalbibliothek, der Bayerischen Landesbibliothek, sowie Feuerwehreinsätze, Augenzeugen und Online-Medienberichte

genden Jahren 1929 (Quellen: historische Medienberichte aus der Österreichischen Nationalbibliothek, der Schweizer Nationalbibliothek und der Bayerischen Landesbibliothek) und 2017 (Quellen: Feuerwehreinsätze, Augenzeugen, Online-Medienberichte) systematisch gesammelt und gegenübergestellt (Pistotnik et al., 2017). Abbildung 02 zeigt alle Meldungen von mindestens 2 cm großem Hagel in beiden Jahren. Eine Zusammenfassung der einzelnen Meldungen zu Hagelzügen offenbart eine verblüffend ähnliche Dichte an Meldungen entlang eines Hagelzugs (Tabelle 03). Im Durchschnitt ließ sich 1929 wie 2017 etwa eine Hagelmeldung pro 2,5 km Strecke gewinnen.

Die damalige und heutige Meldeeffizienz ist also bis auf Gemeindeebene herab gut vergleichbar. In der Beurteilung von Einzelereignissen ist selbstverständlich Vorsicht geboten, eine robuste Rekonstruktion der jährlichen Ge-

samtheit von Unwettern im Alpenraum erscheint bis ins mittlere 19. Jahrhundert zurück aber möglich. Das erlaubt eine Vergleichbarkeit vergangener und heutiger Ereignisse und schließlich vielleicht sogar eine direkte Abschätzung von Trends.

Tabelle 03: Vergleich der Charakteristika dokumentierter Hagelzüge aus den Jahren 1929 und 2017 in Österreich. Ein Hagelzug bezeichnet hier ein Hagelereignis, das durch mindestens zwei verschiedene Meldungen abgedeckt wurde (Gemeinden und Bezirke folgen der heutigen Verwaltungsgliederung.).

Table 03: Comparison of characteristics of documented hail tracks in 1929 and 2017 in Austria. A hail track denotes a hail event that was covered by at least two separate reports (Municipalities and districts refer to today's administrative boundaries.).

Jahr	1929	2017
Tage mit Hagelzügen	31	20
Anzahl an Hagelzügen	46	43
Gesamtlänge aller Hagelzüge [km]	1.371	1.530
Mittelwert der Länge von Hagelzügen [km]	30	36
Median der Länge von Hagelzügen [km]	7	19
Betroffene Bezirke pro 100 km Länge	6,5	6,3
Betroffene Gemeinden pro 100 km Länge	20,4	16,2
Meldungen pro 100 km Länge	38,1	39,1

7.6.4 Fortschritte in numerischer Modellierung

In der numerischen Modellierung des vergangenen und zukünftigen Klimas eröffnen die stetig steigenden Kapazitäten von Großrechnern immer neue Möglichkeiten. Prein et al. (2015) fassten den Stand regionaler Klimasimulationen mit einer Auflösung unter 5 Kilometern zusammen. Ab dieser Auflösung kann auch Konvektion explizit modelliert werden und muss nicht mehr durch indirekte Verfahren (»Parametrisierungen«) behandelt werden. Simulationen mit konvektions-auflösenden Klimamodellen werden derzeit beispielsweise schon am Wegener Center der Universität Graz, an der Eidgenössischen Technischen Hochschule (ETH) in Zürich und an der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) durchgeführt, und sie könnten schon in wenigen Jahren auch für jahrzehntelange Simulationen zum Standard werden. Dieser Schritt wird direkte Abschätzungen des zukünftigen Trendverhaltens von simulierten konvektiven Starkniederschlägen und vielleicht sogar Hagelereignissen erlauben. Gleichzeitig tragen Studien mit numerischen Modellen in einer noch feineren Auflösung in der Größenordnung von hundert Metern zur Erforschung der Rollen von Dynamik und Mikrophysik bei, die ebenfalls in me-

thodische Verbesserungen zukünftiger Generationen von Klimamodellen umgesetzt werden können.

Die bisher nötigen Proxy-Methoden werden durch diese Fortschritte in numerischer Modellierung allmählich an Bedeutung verlieren. Bis dahin sind allerdings auch damit noch Verbesserungen durch weitere Verfeinerung der Methodik und verbesserte Trainingsdatensätze aus Beobachtungsdaten und Reanalysefeldern in Aussicht.

7.6.5 Fortschritte im Prozessverständnis

Ein vollständiges Verständnis jener Prozesse, die das Auftreten von Starkregen und Unwettern im Alpenraum kontrollieren, ist von essentieller Wichtigkeit. Darunter fallen etwa (ohne Anspruch auf Vollständigkeit):

- Die Kaskade an Zusammenhängen, wie sich tieffrequente (lange) Variationen der atmosphärischen Zirkulation (z. B. der Nord-Atlantischen Oszillation oder der Atlantischen Multidekaden-Oszillation) in Wetterlagen übersetzen und welche dieser Wetterlagen wiederum Konvektion begünstigen;
- Die vertikale Verteilung der durch den Klimawandel bedingten Erhöhung der Temperatur und des Wasserdampfgehaltes, die die Stabilität der Luftschichtung beeinflusst;
- Unsicherheiten über Änderungen der Bodenfeuchtigkeit, des Bewuchses und der Verdunstung im Klimawandel sowie möglicher daraus folgender Feedbacks;
- Atmosphärische Kontrollmechanismen, die zwischen »moderaten« Unwettern mit relativ häufiger Wiederkehr und den extremsten Ereignissen trennen;
- Die Modulationen des Starkregen- und Unwettersrisikos durch die Orographie der Alpen und von ihr regulierte atmosphärischer Prozesse.

Beispielgebend sei dargelegt, wie die wissenschaftliche Landschaft Österreichs gerade für eine Entschlüsselung des letzten Punktes eine Pionierrolle einnehmen kann. Die Forschung an Gewittern und damit verbundenen Unwettererscheinungen war seit dem zweiten Weltkrieg in den USA konzentriert, wo die Great Plains das weltweit höchste Unwetterrisiko aufweisen. Dieser Naturraum ist allerdings vollkommen frei von Gebirgen. Im Gegensatz dazu ist der Alpenraum schon seit über hundert Jahren das produktivste »Freiluftlabor«, in dem unser Verständnis von atmosphärischen Prozessen über komplexem Gelände katalysiert wurde. Eine vollständige Synthese dieser beiden großen Themenfelder, also die Frage, wie sich thermische und dynamische Modifikationen der Tempe-

ratur-, Feuchte- und Windverhältnisse durch Gebirge auf die Organisation und Heftigkeit von Gewittern auswirken, ist noch ausständig.

So mag es etwa auf den ersten Blick verblüffen, dass konvektive Niederschläge – im Gegensatz zu flächigen – eher auf der windabgewandten Seite von Gebirgen konzentriert sind (Bertram und Mayr, 2004). Insbesondere bilden sich die heftigsten und langlebigsten Gewitter bei Süd- bis Südwestwetterlagen bevorzugt an der Alpennordseite (so auch bei den langen Hagelzügen aus Tabelle 02), hingegen bei West- bis Nordwestwetterlagen an der Alpensüdseite. Dabei treten im Alpenvorland auch erstaunlich viele Hagelschläge unter bei großräumiger Betrachtung nur unauffällig schwachen Höhenwinden auf. Wahrscheinlich erhöhen thermische Windsysteme von den Vorländern zu den Gebirgen (»Alpines Pumpen«; Winkler et al., 2006) systematisch die vertikale Windscherung und damit den Organisationsgrad von Gewittern, wenn sie dem Höhenwind entgegengesetzt sind. Die mögliche Schlüsselrolle dieses Prozesses wurde jüngst in zwei Fallstudien herausgearbeitet (Scheffknecht et al., 2017; Trefalt et al., 2018). Eine systematische Untersuchung fehlt allerdings noch und erscheint hier entscheidend, um die regional gefährlichsten Wettersituationen noch besser identifizieren und ihr zukünftiges Auftreten abschätzen zu können.

7.7 Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen

Starkregen und Hagel gehören zu den gefährlichsten Wetterphänomenen in Österreich. Unser Erkenntnisstand und physikalische Argumentationen legen einen weiteren Anstieg dieser Risiken im Zuge der globalen Erwärmung nahe. Unter dem Einfluss von im Mittel wärmerer, feuchterer und weniger stabil geschichteter Luft werden wahrscheinlich sowohl flächige als auch konvektive Starkniederschläge häufiger werden. Eine gleichzeitige mittlere Abnahme der Winde in der oberen Troposphäre könnte den Anstieg des Hagelrisikos etwas dämpfen, wenn auch nach bisherigen Erkenntnissen nicht ganz wettmachen.

Die genannten Phänomene kündigen sich meist erst wenige Tage, im Falle konvektiver Ereignisse erst Stunden oder gar Minuten im Voraus an. Dieser Umstand beschränkt naturgemäß die Planbarkeit von Maßnahmen zur Schadensminimierung. Essentiell dafür sind Unwetterwarnungen, die im Anlassfall einen Zustand erhöhter Wachsamkeit unter Einsatzkräften und potenziell betroffener Bevölkerung herstellen und damit wenigstens kurzfristig noch eine bestmögliche Sicherung gefährdeter materieller Werte oder Personenrettungen ermöglichen.

Die explizite Ausgabe von Unwetterwarnungen an die Öffentlichkeit wurde an der ZAMG vor 15 Jahren gestartet. Seither haben sich die räumliche Differenzierung, Verlässlichkeit und Genauigkeit der Warnungen durch feinere Mess-

und Beobachtungsdaten, Wissensgewinn und technische Fortschritte stetig verbessert. Die Einführung von international einheitlichen drei Warnfarben (gelb = »Vorsicht«, orange = »Achtung« und rot = »Gefahr«) sowie der zunehmende Fokus auf Auswirkungen der Unwetterphänomene waren Meilensteine, die die Verwendbarkeit der Warnungen weiter verbesserten. Auch ihre Weitergabe und die Zusammenarbeit mit Einsatzkräften wurden stetig optimiert, sodass Todesfolgen durch Unwetter inzwischen sehr seltene Ereignisse geworden sind. Weiteres Verbesserungspotenzial besteht vor allem noch in einer verstärkten Verifikation von Unwetterwarnungen, einem Ausbau robuster Feedback-Schleifen zwischen Meteorologen und Einsatzkräften sowie intensiveren gemeinsamen Nachbehandlungen großer Ereignisse.

Durch die nur kurzfristige Warnbarkeit kommt eine umso wichtigere Bedeutung der Bewusstseinsbildung und präventiven Schutzmaßnahmen zu. Diese unterliegen natürlich stets einer Kosten-Nutzen-Rechnung. Eine erwartete höhere Gefährdung durch Unwetter rechtfertigt auch höhere Investitionskosten. Hier wollen wir wiederum zwischen Starkregen und Hagel differenzieren.

7.7.1 Starkregen

Eine Änderung der Häufigkeit und Intensität von Starkregen schlägt sich selbstverständlich in ein geändertes Abflussverhalten der Fließgewässer nieder. Diese Übersetzung folgt keiner linearen Beziehung, zunehmende Starkregen könnten im schlimmsten Fall also auch überproportional stark zunehmende Abflussspitzen zur Folge haben. In den letzten 15 Jahren wurden, vor allem als Folge des verheerenden Hochwassers von 2002, von Meteorologen und Hydrologen gemeinsam Niederschlags-Abfluss-Modelle für Hochwasser-Frühwarnsysteme an allen größeren Flüssen Österreichs entwickelt und implementiert. Die Abschätzung über das Gefährdungspotenzial durch Hochwasser (und andere Risiken) wurde auch auf der Website HORA (»Natural Hazard Overview & Risk Assessment Austria«) des Bundesministeriums für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT) interaktiv zugänglich gemacht.

Derzeit wird intensiv an der Intensivierung und Optimierung des Hochwasserschutzes an kleineren Flüssen und Bächen gearbeitet. Auf diesen kleineren Skalen müssen allerdings neben den bereits herausgearbeiteten meteorologischen Unsicherheiten auch mindestens ebenso große hydrologische Unsicherheiten mit Hilfe verbesserter Daten, Methodiken und technischer Randbedingungen gebändigt werden. Außerdem stellt die extrem kurze Zeitspanne zwischen einem meteorologischen Extrem und dessen hydrologischen Folgen hier die größte Herausforderung dar.

Noch gar nicht in der Hochwasserrisikozonierung berücksichtigt ist Oberflächenwasser, dessen bisher unterschätztes Schadenspotenzial erst nach und nach erkannt wird (siehe etwa Bernet et al., 2017). Neben einer regelmäßigen Nachführung der Zonierung mit dem wachsenden und verbesserten meteorologischen und hydrologischen Datenmaterial und weiteren Fortschritten in der Behandlung kleinerer Fließgewässer wäre es also notwendig, in der Siedlungswasserwirtschaft auch die Bedrohung durch Oberflächenwasser einzuschließen.

Eine richtige Balance zwischen Risikoabschätzung, Vertrauen in Schutzmaßnahmen und Erinnerung an vergangene Ereignisse stellt auf lange Sicht jedenfalls den besten Umgang einer Gesellschaft mit der Bedrohung durch Starkregen und Hochwasser dar (Viglione et al., 2014). Ob ein weiterer Ausbau baulicher Schutzmaßnahmen oder die Schaffung größerer Ausbreitungsräume für Fließgewässer, also gewissermaßen das Gegenteil, die aussichtsreichere Prävention gegen Starkregen und dessen Folgen sind, kann von Fall zu Fall unterschiedlich sein. Diese Frage muss von politischen Entscheidungsträgern in enger Zusammenarbeit mit Raumplanern, Ingenieuren, Klimatologen, Hydrologen und anderen Fachleuten behandelt werden.

Man muss sich allerdings auch vor Augen halten, dass eine Absiedlung aus gefährdeten Bereichen in der Vergangenheit selbst nach verheerenden Anlässen wie etwa dem Donauhochwasser 2002 nur in Einzelfällen und mit finanziellen Anreizen klappte. Eine präventive Aufgabe von bisherigem Kultur- oder gar Wohnraum wird also kaum funktionieren. Erfolgsversprechender erscheint es, Lenkungseffekte etwa in Form von in Aussicht gestellter finanzieller Zuwendungen für eine Aufgabe gefährdeter Bereiche im kollektiven Gedächtnis zu verankern, um anschließend das Momentum auszunützen, das sich individuell wie gesellschaftlich unmittelbar aus einem Katastrophenfall ergibt.

7.7.2 Hagel

Hagel stellt vor allem dank verbesserter Unwetterwarnungen heutzutage nur noch in absoluten Ausnahmefällen eine Gefahr für Leib und Leben dar. Hingegen sind mögliche Schutzmaßnahmen gegen materielle Schäden vergleichsweise beschränkt und konzentrieren sich meist auf die unmittelbare Sicherung gefährdeter hochwertiger Gegenstände, z. B. indem ein Fahrzeug noch schnell in eine Garage geparkt oder mit Decken geschützt wird. Das enorme Schadenspotenzial von Hagel bedingt, dass selbst solche unkoordinierten Ad-hoc-Maßnahmen dennoch einen erheblichen volkswirtschaftlichen Nutzen bringen. Dieser Umstand wurde – natürlich auch aus Eigennutz – schon frühzeitig von Versicherungen erkannt, die zu diesem Zweck mit Wetterdiensten kooperieren

und deren Warnungen auf elektronischem Weg in Echtzeit und gratis an ihre Kunden weiterleiten.

Darüber hinaus beschränken sich präventive Handlungsoptionen auf verbesserte Kosten-Nutzen-Abschätzungen im Schutz von Gebäuden, anderen Objekten und landwirtschaftlichen Nutzflächen. Der Spielraum bei Gebäuden dürfte allerdings limitiert sein, da die Bandbreite der Hagelbeständigkeit von Materialien oft zu gering ist, um deutlich höhere Anschaffungs- und Baukosten oder gar eine Novelle der Bauordnung zu rechtfertigen. In der Landwirtschaft können Hagelnetze oder Folien über verwundbaren Kulturen, und insbesondere Jungpflanzen, hingegen eine Investition darstellen, die sich bei einer weiteren Zunahme des Hagelrisikos relativ bald rentieren kann. Außerdem wird eine Versicherung der Nutzflächen gegen Hagel und andere Risiken zu Recht durch immer mehr Landwirte als Instrument für eine bessere finanzielle Planbarkeit erkannt.

Danksagung

Wir danken zwei anonymen Reviewern für ihre wertvollen Verbesserungsvorschläge.

Literatur

- Bebber, W.J. van, 1891. Die Zugstrassen der barometrischen Minima nach den Bahnenkarten der deutschen Seewarte für den Zeitraum 1875–1890. *Meteorologische Zeitschrift*, 8, S. 361–366.
- Beniston, M., 2006. August 2005 intense rainfall event in Switzerland: Not necessarily an analog for strong convective events in a greenhouse climate. *Geophysical Research Letters*, 33, L05701. DOI: 10.1029/2005GL025573.
- Bernet, D.B., Prasuhn, V., Weingartner, R., 2017. Surface water floods in Switzerland: what insurance claim records tell us about the damage in space and time. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, S. 1659–1682. DOI: 10.5194/nhess-17-1659-2017.
- Bertram, I., Mayr, G., 2004. Lightning in the eastern Alps 1993–1999, part I: Thunderstorm tracks. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, S. 501–511. DOI: 10.5194/nhess-4-501-2004.
- BLU, 2006. August-Hochwasser 2005 in Südbayern. Endbericht vom 12. April 2006, 49 S.
- Brönnimann, S., Rajczak, J., Fischer, E.M., Raible, C.C., Rohrer, M., Schär, C., 2018. Changing seasonality of moderate and extreme precipitation events in the Alps. *Natural Hazards and Earth System Science*, 18, S. 2047–2056. DOI: 10.5194/nhess-18-2047-2018.

- Eccel, E., Cau, P., Riemann-Campe, K., Biasoli, F., 2012. Quantitative hail monitoring in an Alpine area: 35-year climatology and links with atmospheric variables. *International Journal of Climatology*, 32, S. 503–517. DOI: 10.1002/joc.2291.
- Forchheimer, P., 1913. Der Wolkenbruch im Grazer Hügelland vom 16. Juli 1913. Sitzungsbericht. Mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse CXXII, Abteilung IIa., Kaiserliche Akademie der Wissenschaften, Wien.
- Formayer, H., Kromp-Kolb, H., 2009. Hochwasser und Klimawandel. Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasserereignisse in Österreich. Endbericht im Auftrag des WWFs. BOKU-Met Report 7. Universität für Bodenkultur, Department Wasser – Atmosphäre – Umwelt, Wien, 19 S.
- Frei, C., Schär, C., 2001. Detection probability in rare events: Theory and application to heavy precipitation in the Alpine region. *Journal of Climate*, 14, S. 1568–1584. DOI: 10.1175/1520-0442(2001)014<1568:DPOTIR>2.0.CO;2.
- Godina, R., Lalk, P., Lorenz, P., Müller, G., Weilguni, V., 2006. Hochwasser 2005 – Ereignisdokumentation. Teilbericht des Hydrographischen Dienstes. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Abteilung VII, Wien, 30 S.
- Hader, F., 1951. Der Semmering-Starkregen vom 5. Juni 1947. *Wetter und Leben*, 3, S. 46–50.
- Hartmann, D.L., Klein Tank, A.M.G., Rusticucci, M., Alexander, L.V., Brönnimann, S., Charabi, Y., Dentener, F.J., Dlugokencky, E.J., Easterling, D.R., Kaplan, A., Soden, B.J., Thorne, P.W., Wild, M., Zhai, P.M., 2013. Observations: Atmosphere and Surface. In: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Hrsg.), *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge/United Kingdom/New York, S. 159–254.
- Heimann, D., Kurz, M., 1985. The Munich hailstorm of July 12, 1984: A Discussion of the Synoptic Situation. *Contributions to Atmospheric Physics*, 58, S. 528–544.
- Hofstätter M., Blöschl, G., 2019. Vb cyclones synchronized with the Arctic-/North Atlantic Oscillation. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* DOI: 10.1029/2018JD029420.
- Hofstätter, M., Jacobeit, J., Homann, M., Lexer, A., Chimani, B., Philipp, A., Beck, C., Ganekind, M., 2015. WETRAX – Weather Patterns, Cyclone Tracks and related Precipitation Extremes. Großflächige Starkniederschläge im Klimawandel in Mitteleuropa. Projektendbericht. *Geographica Augustana*, 19, 240 S.
- Hofstätter, M., Lexer, A., Homann, M., Blöschl, G., 2018. Large-scale heavy precipitation over central Europe and the role of atmospheric cyclone track types. *International Journal of Climatology*, 38, S. 497–517. DOI: 10.1002/joc.5386.
- Höller, H., Reinhardt, M. E., 1986. The Munich hailstorm of July 12, 1984 – Convective Development and Preliminary Hailstone Analysis. *Contributions to Atmospheric Physics*, 59, S. 1–12.
- Imhof, M., Choffet, M., 2012. Ereignisanalyse Hagel 2009. Untersuchung der Hagelunwetter vom 26. Mai und 23. Juli 2009. Bericht der Vereinigung Kantonaler Gebäudeversicherungen. https://wiki.c2sm.ethz.ch/pub/COSMO/Case20090723/IRV_2012_EreignisanalyseHagel2009.pdf [29.06.2018].

- Kaltenböck, R., Ryzhkov, R., 2013. Comparison of polarimetric signatures of hail at S and C bands for different hail sizes. *Atmospheric Research*, 123, S. 323–336.
- Kaltenböck, R., Steinheimer, M., 2015. Radar-based severe storm climatology for Austrian complex orography related to vertical wind shear and atmospheric instability. *Atmospheric Research*, 158/159, S. 216–230. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.08.006.
- Kapsch, M.-L., Kunz, M., Vitolo, R., Economou, T., 2012. Long-term trends of hail-related weather types in an ensemble of regional climate models using a Bayesian approach. *Journal of Geophysical Research*, 117, D15107, DOI: 10.1029/2011JD017185.
- Kirchengast, G., Kabas, T., Leuprecht, A., Bichler, C., Truhetz, H., 2014. WegenerNet – a pioneering high-resolution network for monitoring weather and climate. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 95(2), S. 227–242. DOI: 10.1175/BAMS-D-11-00161.1.
- Kirnbauer, R., Pistotnik, G., Blöschl, G., 2016. Klimawandel als Herausforderung für die Wildbachverbauung. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 178, S. 58–77.
- Kotroni, V., Lagouvardos, K., 2016. Lightning in the Mediterranean and its relation with sea- surface temperature. *Environmental Research Letters*, 11, 034006, DOI: 10.1088/1748-9326/11/3/034006.
- Krennert, T., Kaltenberger, R., Pistotnik, G., Holzer, A.M., Zeiler, F., Stampfl, M., 2018a. Trusted Spotter Network Austria – a new standard to utilize crowdsourced weather and impact observations. *Advances in Science and Research*, 15, S. 77–80. DOI: 10.5194/asr-15-77-2018.
- Krennert, T., Pistotnik, G., Kaltenberger, R., Csekits, C., 2018b. Crowdsourcing of weather observations at national meteorological and hydrological services in Europe. *Advances in Science and Research*, 15, S. 71–76. DOI: 10.5194/asr-15-71-2018.
- Kunz, M., Sander, J., Kottmeier, C., 2009. Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. *International Journal of Climatology*, 29, S. 2283–2297. DOI: 10.1002/joc.1865.
- Lexer, A., Hofstätter, M., Höfler, A., 2017. REGIOKONVEKT 2017-17. AP5 – Veränderung konvektiver Starkniederschläge (CONVEX). Projektbericht. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.
- Lorenz, P., Skoda, G., 2001. Bemessungsniederschläge auf der Fläche für kurze Dauerstufen ($D \leq 12$ Stunden) mit inadäquaten Daten. *Wiener Mitteilungen: Niederschlag-Abfluss-Modellierung Simulation und Prognose*, 164, S. 179–200.
- Manzato, A., 2012. Hail in Northeast Italy: Climatology and Bivariate Analysis with the Sounding-Derived Indices. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51, S. 449–467. DOI: 10.1175/JAMC-D-10-05012.1.
- Marsh, P.T., Brooks, H.E., Karoly, D.J., 2009. Preliminary investigation into the severe thunderstorm environment of Europe simulated by the Community Climate System Model 3. *Atmospheric Research*, 93, S. 607–618. DOI: 10.1016/j.atmosres.2008.09.014.
- Martius, O., Hering, A., Kunz, M., Manzato, A., Mohr, S., Nisi, L., Trefalt, S., 2018. Challenges and Recent Advances in Hail Research. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98, S. 2641–2651. DOI: 10.1175/BAMS-D-17-0207.1.
- Messmer, M., Gómez-Navarro, J.J., Raible, C.C., 2015. Climatology of Vb cyclones, physical mechanisms and their impact on extreme precipitation over Central Europe. *Earth system dynamics*, 6, S. 541–553. DOI: 10.5194/esd-6-541-2015.

- Messmer, M., Gómez-Navarro, J.J., Raible, C.C., 2017. Sensitivity experiments on the response of Vb cyclones to sea surface temperature and soil moisture changes. *Earth system dynamics*, 8, S. 477–493. DOI: 10.5194/esd-8-477-2017.
- Mohr, S., Kunz, M., 2013. Recent trends and variabilities of convective parameters relevant for hail events in Germany and Europe. *Atmospheric Research*, 123, S. 211–228. DOI: 10.1016/j.atmosres.2012.05.016.
- Mohr, S., Kunz, M., Geyer, B., 2015a. Hail potential in Europe based on a regional climate model hindcast. *Geophysical Research Letters*, 42, S. 10904–10912. DOI: 10.1002/2015GL067118.
- Mohr, S., Kunz, M., Keuler, K., 2015b. Development and application of a logistic model to estimate the past and future hail potential in Germany. *Journal of Geophysical Research*, 120, S. 3939–3956. DOI: 10.1002/2014JD022959.
- Nisi, L., Hering, A., Germann, U., Martius, O., 2018. A 15-year hail streak climatology for the Alpine region. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 144, S. 1429–1449. DOI: 10.1002/qj.3286.
- Nisi, L., Martius, O., Hering, A., Kunz, M., Germann, U., 2016. Spatial and temporal distribution of hailstorms in the Alpine region: a long-term, high resolution, radar-based analysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 142, S. 1590–1604. DOI: 10.1002/qj.2771.
- Nissen, K.M., Ulbrich, U., Leckebusch, G.C., 2014. Vb cyclones and associated rainfall extremes over Central Europe under present day and climate change conditions. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), S. 649–660.
- Piper, D., Kunz, M., 2017. Spatiotemporal variability of lightning activity in Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, S. 1319–1336. DOI: 10.5194/nhess-17-1319-2017.
- Pistotnik, G., 2009. Meteorologische Analyse der großflächigen Hagelunwetter vom 23. Juli 2009. Bericht der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien. http://www.zamg.ac.at/docs/aktuell/Unwetter_23ter_Juli_2009.pdf [29.06.2018].
- Pistotnik, G., Groenemeijer, P., Sausen, R., 2016. Validation of Convective Parameters in MPI-ESM Decadal Hindcasts (1971–2012) against ERA-Interim Reanalyses. *Meteorologische Zeitschrift*, 25, S. 753–766. DOI: 10.1127/metz/2016/0649.
- Pistotnik, G., Krennert T., Stadlbacher, K., 2017. The Role of Crowdsourcing in the Retrieval of Severe Weather Information in the Past, Present and Future. Ninth European Conference on Severe Storms. Preprints, Pula.
- Prein, A. F., Langhans, W., Fosser, F., Ferrone, A., Ban, N., Goergen, K., Keller, M., Tölle, M., Gutjahr, O., Feser, F., Brisson, E., Kollet, S., Schmidli, J., Lipzig, N.P.M. van, Leung, R., 2015. A review on regional convection-permitting climate modeling: Demonstrations, prospects, and challenges. *Reviews of Geophysics*, 53, S. 323–361. DOI: 10.1002/2014RG000475.
- Púčik, T., Groenemeijer, P., Rädler, A.T., Tijssen, L., Nikulin, G., Prein, A. F., Meijgaard, E. van, Fealyh, R., Jacob, D., Teichmann, C., 2017. Future Changes in European Severe Convection Environments in a Regional Climate Model Ensemble. *Journal of Climate*, 30, S. 6771–6794. DOI: 10.1175/JCLI-D-16-0777.1.
- Púčik, T., Groenemeijer, P., Ryva, D., Kolar, M., 2015. Proximity soundings of severe and nonsevere thunderstorms in Central Europe. *Monthly Weather Review*, 143, S. 4805–4821. DOI: 10.1175/MWR-D-15-0104.1.

- Puskeiler, M., 2013. Radarbasierte Analyse der Hagelgefährdung in Deutschland. Dissertation, Universität Karlsruhe, Karlsruhe, 202 S.
- Sander, J., 2011. Extremwetterereignisse im Klimawandel. Bewertung der derzeitigen und zukünftigen Gefährdung. Dissertation, Ludwig-Maximilians-Universität München, München, 123 S.
- Scheffknecht, P., Serafin, S., Grubišić, V., 2017. A long-lived supercell over mountainous terrain. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 143, S. 2973–2986. DOI: 10.1002/qj.3127.
- Scherrer, S.C., Fischer, E.M., Posselt, R., Liniger, M.A., Croci-Maspoli, M., Knutti, R., 2016. Emerging trends in heavy precipitation and hot temperature extremes in Switzerland. *Journal of Geophysical Research*, 121, S. 2626–2637. DOI: 10.1002/2015JD024634.
- Schiesser, H., 2003. Extremereignisse und Klimaänderung. Hagel. Bericht des Beratenden Organs für Fragen der Klimaänderung, Bern, 88 S.
- Schoklitsch, A., 1914. Die Hochwasserkatastrophe in Graz am 16. Juli 1913. *Zeitschrift des Österreichischen Ingenieur- und Architektenvereins*, 27, S. 511–516.
- Schroerer, K., Kirchengast, G., O, S., 2018. Strong dependence of extreme convective precipitation intensities on gauge network density. *Geophysical Research Letters*, 45, S. 8253–8263. DOI: 10.1029/2018GL077994.
- Schulz, W., Cummins, K., Diendorfer, G., Dorninger, M., 2005. Cloud-to-ground lightning in Austria. A 10-year study using data from a lightning location system. *Journal of Geophysical Research*, 110, D09101. DOI: 10.1029/2004JD005332.
- Schwarzl, S., 1972. Die meteorologischen Ursachen der Unwetterkatastrophe vom 12. zum 13. August 1958 im Raume der Fischbacher Alpen (Stmk.). *Wetter und Leben*, 24(7/8), S. 150–159.
- Svabik, O., Meyer, V., Tüchler, L., Zenkl, G., 2013. Hail Risk Areas in Austria on the Basis of Reports 1971–2011 and Weather Radar Images 2002–2011. Seventh European Conference on Severe Storms. Preprints, Helsinki.
- Taszarek, M., Brooks, H.E., Czernecki, B., 2017. Sounding-derived parameters associated with convective hazards in Europe. *Monthly Weather Review*, 145, S. 1511–1528. DOI: 10.1175/MWR-D-16-0384.1.
- Trefalt, S., Martynov, A., Barras, H., Besić, N., Hering, A.M., Lenggenhager, S., Noti, P., Röthlisberger, M., Schemm, S., Germann, U., Martius, O., 2018. A severe hail storm in complex topography in Switzerland – Observations and processes. *Atmospheric Research*, 209, S. 76–94. DOI: 10.1016/j.atmosres.2018.03.007.
- Troschl, H., 1967. Die neuerliche Niederschlags- und Hochwasserkatastrophe im österreichischen Südalpengebiet vom 3.–5. November 1966. *Wetter und Leben*, 19(1/2), S. 1–12.
- Ulbrich, U., Brücher, T., Fink, A.H., Leckebusch, G.C., Krüger, A., Pinto, J.G., 2003a. The central European floods of August 2002: Part 1 – Rainfall periods and flood development. *Weather*, 58(10), S. 371–377. DOI: 10.1256/wea.61.03A.
- Ulbrich, U., Brücher, T., Fink, A.H., Leckebusch, G.C., Krüger, A., Pinto, J.G., 2003b. The Central European flood of August 2002: Part 2 – synoptic causes and considerations with respect to climate change. *Weather*, 58(10), S. 434–442. DOI: 10.1256/wea.61.03B.

- Wapler, K., 2013. High-resolution climatology of lightning characteristics within Central Europe. *Meteorology and Atmospheric Physics*, 122, S. 175–184. DOI: 10.1007/s00703-013-0285-1.
- Watzinger, A., 1997. Investigation of some heavy floods in small alpine catchment areas in Austria. *Proceedings of Destructive Water: Water-Caused Natural Disasters, their Abatement and Control*, Anaheim, California, S. 67–76.
- Winkler, P., Lugauer, M., Reitebuch, O., 2006. Alpines Pumpen. *Promet*, 32, S. 34–42.
- WMO, 2015. WMO Guidelines on Multi-hazard Impact-based Forecast and Warning Services. https://www.wmo.int/pages/prog/www/DPFS/Meetings/ET-OWFPS_Montreal2016/documents/WMOGuidelinesonMulti-hazardImpact-basedForecastandWarningServices.pdf [29.06.2018].
- Wussow, G., 1922. Untere Grenze dichter Regenfälle. *Meteorologische Zeitschrift*, 39, S. 173–180.
- Zettl, H., 1958. Die Unwetterkatastrophe in der Steiermark am 12. und 13. August 1958. *Mitteilungsblatt des Hydrografischen Dienstes in Österreich*, 23, S. 1–11.
- Zolina, O., Simmer, C., Kapala, A., Bachner, S., Gulev, S., Marchel, H., 2008. Seasonally dependent changes of precipitation extremes over Germany since 1950 from a very dense observational network. *Journal of Geophysical Research*, 113, D06110. DOI: 10.1029/2007JD008393.

8 Auswirkungen von Waldbränden auf die Schutzfunktionalität alpiner Wälder

Harald Vacik, Mortimer M. Müller, Jörg Degenhart und Oliver Sass*

Zusammenfassung

Waldbrände in Österreich verursachen jedes Jahr Schäden in Millionenhöhe. 85 % aller Waldbrände werden direkt oder indirekt durch den Menschen ausgelöst, 15 % entfallen auf Blitzschläge. Extremereignisse, die 30 Hektar Wald oder mehr umfassen, treten im Schnitt alle drei Jahre auf. Aufgrund der erwarteten Zunahme an Trockenperioden und Hitzewellen ist in Zukunft mit einem vermehrten Auftreten von Waldbränden zu rechnen. Dabei wird einerseits die Schutzfunktionalität der Bergwälder vermehrt gefährdet sein, andererseits dürfte die Problematik der Begegnungszone zwischen Waldbränden und Siedlungen sowie kritischer Infrastruktur an Bedeutung gewinnen. Derzeitige Modellierungsansätze können das Auftreten und die Intensität von Extremereignissen nur bedingt vorhersagen. Daher müssen die Forschungsanstrengungen in Hinblick auf die Charakterisierung des österreichischen Waldbrandregimes und der Rahmenbedingungen für das Auftreten von Bränden verstärkt werden.

Abstract

Forest fires in Austria are responsible for damages of several million Euros in Austria each year. 85 % of forest fires are caused by humans, 15 % are ignited by lightning strikes. Extreme events, which affect 30 hectares of forest area or more, occur every three years on average. The expected increasing intensity of drought periods and heat waves will probably increase forest fire activity in Austria in the future. On the one hand the protection function of mountain forests will be at higher risk, on the other hand the problematic nature of the wildland-urban-interface (WUI) will become more important. Current models cannot predict the occurrence and intensity of extreme fire events. Thus, a comprehensive characterization and analysis of the Austrian fire regime and the environmental conditions are required.

* Harald Vacik, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Waldbau, harald.vacik@boku.ac.at.

Mortimer M. Müller, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Waldbau, mortimer.mueller@boku.ac.at.

Jörg Degenhart, Landes-Feuerwehrverband Tirol, Sachgebiet Waldbrandbekämpfung und Flugdienst, j.degenhart@feuerwehr.tirol.

Oliver Sass, Universität Bayreuth, Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften, oli.ver.sass@uni-bayreuth.de.

Kernaussagen

- Waldbrände in Österreich bedingen jedes Jahr Kosten und Schäden in Millionenhöhe.
- 85 % aller Waldbrände werden durch den Menschen ausgelöst.
- Ein Extremereignis, das 30 Hektar oder mehr umfasst, tritt etwa alle drei Jahre auf.
- Eine Zunahme der Waldbrandaktivität ist in Zukunft wahrscheinlich.
- Derzeitige Waldbrandvorhersagemodelle können das Auftreten von Extremereignissen nur ungenügend beschreiben.
- Die Schutzfunktionalität der Bergwälder wird in Zukunft verstärkt gefährdet sein.
- Das Gefährdungspotenzial von Siedlungen und kritischer Infrastruktur, die direkt an Waldflächen grenzen, wird in Österreich ansteigen.

Key Points

- Forest fires cause damages and costs of millions of Euro in Austria each year.
- 85 % of forest fires in Austria are caused by humans.
- An extreme forest fire, which affects 30 hectares or more, occurs every third year.
- It is likely that forest fire activity will increase in Austria in the future.
- Current forest fire prediction models are unable to depict the occurrence of extreme events.
- The protection function of mountain forests will be at greater risk in the future.
- The risk potential of peri-urban areas and critical infrastructures along the border of forests will increase in Austria.

8.1 Charakteristika von Waldbränden in Österreich

8.1.1 Definition eines Waldbrandes

Waldbrände definieren sich zunächst über das österreichische Forstgesetz, welches den Begriff Wald im engeren Sinn beschreibt. So heißt es in § 1a. (1):

»Wald im Sinne dieses Bundesgesetzes sind mit Holzgewächsen der im Anhang angeführten Arten (forstlicher Bewuchs) bestockte Grundflächen, soweit die Bestockung mindestens eine Fläche von 1.000 m² und eine durchschnittliche Breite von 10 m erreicht.«

Ergänzend dazu werden Brände auf Kahlschlagflächen oder Windschutzgürtel, die ebenfalls als Wald gelten, oder Christbaumkulturen und Kurzumtriebsflächen, die nicht dem Wald zugeordnet werden, als Waldbrände bezeichnet. Im Englischen wird als Synonym für Vegetationsbrände häufig *wildland fire* verwendet. Dieser Begriff umfasst sowohl Wald-, als auch Busch- und Wiesenbrände. Im Deutschen gibt es dazu keine passende Übersetzung. Meist wird in Europa der Weg beschritten, den Brandtyp nicht nach der Brandart oder an der Größe festzumachen, sondern am Ort des Auftretens. Daher ist es irrelevant, ob nur 10 m² Waldboden brennen oder mehrere Hektar, ob es sich um einen

Schwel- oder Kronenbrand handelt – entscheidend ist, wo das Feuer auftritt, also ob Waldflächen betroffen sind.

Im Zweifelsfall, oder wenn sowohl Flur (Offenland) als auch Wald betroffen sind, können Mischformen auftreten, etwa Wald-/Flurbrände, wenn Wiesenflächen und Wald brennen, oder Wald-/Latschenbrände an der Baumgrenze im Gebirge. Mitunter kommt es zu unklarer Verwendung von Begriffen, die zu Fehlinterpretationen führen können, beispielsweise wenn ein kleinflächiges Bodenfeuer im Hochwald als Flurbrand bezeichnet wird oder ein Brand im Bereich von Sträuchern als Waldbrand aufscheint.

8.1.2 Definition von Extremereignissen

8.1.2.1 Extremer Waldbrand im historischen Kontext

Für Nordtirol wurde eine umfangreiche Datenbank historischer Waldbrände für den Zeitraum 1662 bis 1950 angelegt (Sass et al., 2012). Anhand der Analyse der in diesem Datensatz enthaltenen Brandereignisse, lässt sich ein historisches Extremereignis wie folgt definieren: *Ein Waldbrand, der mindestens 100 Hektar Fläche umfasst, wenigstens fünf Tage lang aktiv ist und zu einer signifikanten, langfristigen Veränderung der Vegetationszusammensetzung bis hin zur langfristigen Verkahlung führt.*

8.1.2.2 Extremer Waldbrand unter aktuellen Rahmenbedingungen

Aufgrund der veränderten Rahmenbedingungen bei der Entstehung und Meldung von Bränden sowie bei deren Bekämpfung, muss heute ein anderer Ansatz gewählt werden. Bei Analyse der aufgetretenen Waldbrände der letzten 25 Jahre, kann ein aktuelles Extremereignis folgendermaßen definiert werden: *Ein Waldbrand, der mindestens 30 Hektar Fläche umfasst, wenigstens zwei Tage lang aktiv ist und zu einer signifikanten, langfristigen Veränderung der Vegetationszusammensetzung führt.*

Im Durchschnitt kann ein solch extremer Waldbrand in Österreich alle drei Jahre beobachtet werden. Die Gesamtkosten und -schäden eines solchen Brandereignisses werden anhand von verschiedenen Einzelkosten (u. a. Einsatzkosten der Feuerwehren, direkte und indirekte Schäden, Aufforstungs- und Schutzmaßnahmen) mit 1–2 Millionen Euro angenommen.

8.1.2.3 Definition eines extremen Waldbrandjahres

In Anlehnung an die Annahme eines extremen Waldbrandes unter heutigen Bedingungen, wird für die Definition eines extremen Waldbrandjahres ein kombinierter Ansatz aus quantitativen (Brandfläche) und qualitativen (Brandintensität) Faktoren gewählt, wobei die Überschreitung des 95 % Quantils als Grenzwert für ein Extremjahr festgelegt wurde. Für ein extremes Waldbrandjahr müssen demnach folgende Kriterien erfüllt sein: *Ein Jahr, in dem insgesamt mindestens 150 Hektar Waldfläche in Brand geraten, wovon mindestens drei Waldbrände verbreitetes Kronenfeuer aufweisen sowie eine Brandfläche von zehn Hektar oder mehr erreichen und mindestens ein extremer Waldbrand (mind. 30 Hektar, mind. 2 Tage lang aktiv) zu beobachten ist.*

In Anlehnung an diese Definition kann in den vergangenen drei Jahrzehnten nur das Jahr 2003 als extremes Waldbrandjahr eingestuft werden.

8.1.3 Arten von Waldbränden

Die Kategorisierung eines Waldbrandes erfolgt anhand des jeweiligen Feuerverhalten. Dieses hängt von den kleinräumigen Bedingungen am Standort, der Zusammensetzung der Baumarten und der Begleitvegetation, dem Alter des Waldbestands und von den Wetterbedingungen ab. Grundsätzlich werden drei Brandtypen unterschieden.

8.1.3.1 Humus-/Glimmbrand (Schwelbrand)

Es brennen der Waldboden bzw. der Humus in Form eines Schwelbrandes, bei dem es nur gelegentlich zur Flammenbildung kommt. Die Glutnester können sich bei einer ausgeprägten Rohhumusdecke mehrere Dezimeter in den Erdboden erstrecken. Besonders häufig treten Schwelbrände bei Waldbränden durch Blitzschlag auf. Mitunter werden solche Brände durch die geringe Rauchentwicklung erst Tage nach der Entstehung entdeckt. Die Ausbreitungsgeschwindigkeit im Wald ist meist gering, doch kann die Brandbekämpfung besonders im alpinen Gelände eine Herausforderung darstellen, zumal sich Humusbrände auch in Latschenfeldern bei starkem Wind und anhaltender Trockenheit zu Boden- oder Vollfeuern entwickeln können. Schwelbrände können zu Schäden im Wurzelbereich von Bäumen führen. Daneben sind zeitverzögert eine Schwächung sowie Sekundärschäden (beispielsweise Befall durch Borkenkäfer) oder ein Absterben der Baumindividuen möglich.

8.1.3.2 Boden- oder Lauffeuer

Feuer, die in der bodennahen Vegetation brennen, d. h. in der Streu, Gras- und Strauchschicht, sind der häufigste Brandtyp in Österreich. Wenn diese Bodenfeuer vom Wind angetrieben werden oder hangaufwärts voranschreiten, werden sie als Lauffeuer bezeichnet. Dabei sind Flammenlängen von einem Meter oder mehr möglich und die Brände können sich rasch ausbreiten (> 5 km/h sind möglich). Feuer, die hangabwärts oder gegen den Wind brennen (Gegenwindfeuer), breiten sich langsam und mit kleiner Flammenlänge aus. Bodenfeuer treten oft in Kombination mit einem Humus-/Glimmbrand auf.

8.1.3.3 Kronenfeuer/Vollbrand

Ein Kronenfeuer beschreibt die Entflammung und das Brennen der Baumkronen. Man unterscheidet ein *passives Kronenfeuer*, bei dem nur einzelne Bäume komplett in Flammen aufgehen, und ein *aktives Kronenfeuer*, bei dem sich die Flammen in den Baumkronen weiter ausbreiten. In Mitteleuropa tritt ein Kronenfeuer fast nur in Verbindung mit einem Boden-/Lauffeuer auf, womit es sich um einen *Vollbrand* handelt. Vollbrände bzw. aktive Kronenfeuer können sich sehr rasch ausbreiten und durch Funkenflug Sekundärbrände in großer Entfernung (bis zu 100 m) zur eigentlichen Feuerfront verursachen. Ein Vollbrand führt in der Regel zu einer Vernichtung des bestehenden Baumbestandes und kann nur mit hohem technischen und personellen Aufwand effektiv bekämpft, beziehungsweise an der weiteren Ausbreitung gehindert werden.

In Österreich werden gelegentlich *Stammbrände* als separate Kategorie ausgewiesen. Dies tritt vor allem bei älteren Bäumen dann auf, wenn das Feuer durch Schadstellen wie Fäulnis- oder Fällschäden in das Stamminnere eindringt. Hierbei geraten oft nur die Baumstämme in Brand, ohne dass die Flammen auf den umliegenden Waldboden oder die Baumkronen übergreifen.

8.1.4 Historische Entwicklung in Österreich

Waldbrände stellen in heimischen Waldökosystemen einen natürlichen Bestandteil der Störungsökologie dar. Pollenuntersuchungen aus der Schweiz haben gezeigt, dass in den letzten Jahrtausenden in den Alpen regelmäßig Waldbrände aufgetreten sind. Das Wiederkehrintervall, also die durchschnittliche Dauer bis an einem bestimmten Standort erneut ein Waldbrand auftritt, betrug für die Süd- und Zentralalpen in der Vergangenheit etwa 250 bis 600 Jahre (Tinner et al., 2005). Es kann davon ausgegangen werden, dass für österreichische Verhältnisse in brandgefährdeten Lagen (z. B. trockene Südhänge) ähnliche

Zeitspannen gelten (Sass et al., 2012). In den letzten Jahrhunderten wurde aber eine Zunahme von Waldbränden durch den Einfluss des Menschen festgestellt. Vermutlich spielten hierbei Maßnahmen der Brandrodung bzw. des Waldfeldbaus eine entscheidende Rolle (Tinner et al., 2005).

8.1.4.1 Waldbrand-Dokumentation bis in die 1990er Jahre

Informationen zu Waldbränden, die bis zum Zweiten Weltkrieg aufgetreten sind, finden sich nur sporadisch in Gemeinde- und Feuerwehrchroniken. Datums- und Flächenangaben sind hierbei oft ungenau, zudem sind nur wenige (und vor allem extreme) Ereignisse überliefert. In den 1930er und 1940er Jahren unternahm W. Grabherr Bemühungen zur Dokumentation von Waldbränden in Österreich (z. B. Grabherr, 1936). Nach dem Zweiten Weltkrieg war das Innenministerium mit der Erhebung von Waldbrandereignissen in Österreich beauftragt. Die gesammelten Daten liegen heute nur noch als Monatsstatistiken vor. Anfang der 1990er Jahre wurde die zentrale und einheitliche Dokumentation von Waldbränden in Österreich eingestellt. Eine Aufarbeitung erfolgte meist nur noch in Form gesammelter Statistiken, etwa für die Datenbank waldschädigender Faktoren (DWF) des Bundesamts für Wald in Wien.

8.1.4.2 Waldbrand-Dokumentation heute

Im Jahr 2008 startete am Institut für Waldbau, Universität für Bodenkultur Wien, die Österreichische Waldbrandinitiative AFFRI (Austrian Forest Fire Research Initiative). Im Rahmen des Projekts und diverser Folgeprojekte wurden und werden aktuelle und historische Waldbrände aufgearbeitet und in eine Online-Datenbank eingespielt, die inzwischen mehr als 6000 Datensätze umfasst. Über ein öffentliches Web-GIS-Interface können Interessierte die gesammelten Informationen der letzten 25 Jahre abfragen, Grafiken und Statistiken erstellen sowie Waldbrände selbstständig melden (siehe <http://fire.boku.ac.at>). Damit sind Informationen zu sämtlichen Großbrandereignissen in Österreich, die in den letzten 25 Jahren stattgefunden haben, vorhanden (Eastaugh und Vacik, 2014).

8.1.4.3 Ausgewählte Extremereignisse der letzten Jahrhunderte

Seit dem 18. Jahrhundert wurden etwa ein Dutzend Waldbrände dokumentiert, deren Brandflächen eine Ausdehnung von mehr als 100 Hektar (1 km²) erreichten (Waldbrand-Datenbank Österreich, <http://fire.boku.ac.at>). Drei dieser Waldbrände schädigten eine Fläche von über 500 Hektar und zeigen damit das Potenzial für verheerende Waldbrände in Österreich.

Der katastrophalste, historisch bekannte Waldbrand ereignete sich im Oktober 1705 im Inntal bei Vomp. Durch ein Lagerfeuer von Hirten entstand ein intensiver Glimmbrand im Hochgebirge, der nach acht Tagen aufflammte und sich durch die Trockenheit und den herrschenden Föhnsturm rasch ausbreitete. Die Flammen zerstörten u. a. das Kloster Georgenberg, weiteten sich bis Achenkirch und fast bis zur Staatsgrenze aus. Vermutlich waren rund 3 000 Hektar (30 km²) Wald und alpines Gelände von diesem Ausnahmeereignis betroffen. Der Waldbrand konnte erst nach Wochen gelöscht werden (Grabherr, 1950). Ein weiterer massiver Waldbrand ereignete sich im Juli 1841 bei Tamsweg in Salzburg. Dabei wurde der Ort Ramingstein fast vollständig vernichtet. Das Feuer brannte mindestens eine Woche, etwa 750 Hektar Wald fielen den Flammen zum Opfer. Das dritte außerordentliche Extremereignis ist mit Mai 1888 datiert. In der Gemeinde Stans in Tirol entstand aus unbekannter Ursache ein großflächiger Waldbrand, der rund 700 Hektar Wald geschädigt haben soll.

Darüber hinaus sind mehrere Brände von rund 100 Hektar Größe aus der Mitte des 20. Jahrhunderts hinsichtlich ihrer Folgen als »extrem« einzustufen, da sie zu einer völligen Verkahlung geführt haben, ohne Regeneration der betroffenen Krummholzvegetation (z. B. auf der Arnspitze bei Scharnitz 1946 oder am Bettelwurf im Halltal 1946) (Sass et al., 2012; Sass, 2019).

8.1.4.4 Extremereignisse der letzten 25 Jahre in Österreich

Einige Waldbrände der jüngeren Vergangenheit können als Extremereignisse klassifiziert werden. Nachfolgend eine Zusammenstellung der markantesten Brände.

Stagor, Kärnten, 2002

Am 2. Februar fängt eine Berghütte im steilen Gelände Feuer. Durch Föhnwinde sowie die seit Wochen ungewöhnliche Trockenheit und hohe Temperaturen, greifen die Flammen rasch auf den angrenzenden Hochwald und eine Windwurflläche über. Brennende Baumwurzeln rollen talwärts und führen zu einer weiteren Ausbreitung. Mehrere Helikopter und rund 300 Feuerwehrleute sind fast zwei Wochen im Einsatz, bis die letzten Glutnester gelöscht sind. Insgesamt geraten 74 Hektar Waldboden in Brand.

Ebensee, Oberösterreich, 2006

Am 19. Juli entfacht die Zigarette eines Freizeitsportlers eine Latschenfläche im alpinen Gelände. Zunächst handelt es sich nur um einen kleinflächigen Schwelbrand, durch Wind und Trockenheit weiten sich die Glutnester jedoch aus und entzünden die dünnen Legföhren. Selbst ein Großaufgebot der Feuerwehren

und mehrere Helikopter können den Waldbrand erst nach zwei Wochen vollständig löschen. 43 Hektar Latschen- und Waldfläche sind betroffen.

Bad Fischau-Brunn, Niederösterreich, 2013

Am 8. August, dem heißesten Tag in Österreich seit 250 Jahren, entzündet eine weggeworfene Zigarette eine Strauchböschung. Die Flammen greifen durch den starken Wind und die extreme Trockenheit schnell um sich. Sie erfassen eine Niederwaldfläche und einen Kiefernbestand. Rasch entwickelt sich ein Vollbrand, der erst am Waldrand und nur durch 500 Einsatzkräfte und mehrere Helikopter gestoppt werden kann. Das Fazit nach drei Tagen lautet: Mehrere verletzte Feuerwehrleute und 52 Hektar zerstörter Wald.

Absam, Tirol, 2014

Am 20. März löst ein Wanderer durch eine weggeworfene Zigarette einen Großbrand am Hochmahdkopf aus. Latschenflächen und Schutzwald geraten durch die Trockenheit und Föhnwinde in Vollbrand, das Fortschreiten der Flammenfront erreicht teils Marschgeschwindigkeit. Über Nacht weitet sich das Feuer massiv aus. Am nächsten Tag stehen bis zu sieben Helikopter und 500 Einsatzkräfte im Dauereinsatz. Erst einsetzender Schneefall bringt die erhoffte Entspannung. Auf 54 Hektar wird der Schutzwald inklusive der Schutzbauwerke erheblich geschädigt. Insgesamt beträgt die Brandfläche 72 Hektar, mehrere Einsatzkräfte werden verletzt. Die Gesamtkosten und -schäden durch dieses Brandereignis werden mit mehr als zwei Millionen Euro beziffert.

Lurnfeld, Kärnten, 2015

Am 22. April gerät nach einer langen Trockenperiode vermutlich durch Unachtsamkeit der Waldboden auf einer Kahlschlagfläche in Brand. Gegen Abend weiten sich die Flammen auf den angrenzenden Hochwald aus, der Vollbrand zwingt die Einsatzkräfte zum Rückzug. Brennende und abwärts rollende Baumteile entfachen immer wieder neue Brände. Die Feuerfront kann erst nach mehr als 24 Stunden gestoppt werden. Durch stürmischen Wind entfachen noch fünf Tage später versteckte Glutnester. In Summe sind bis zu sieben Helikopter und 200 Feuerwehrleute zwei Wochen lang im Einsatz, rund 80 Hektar Wald werden zerstört.

8.1.5 Ursachen von Waldbränden in Österreich

85 % aller Waldbrände in Österreich werden direkt oder indirekt durch den Menschen ausgelöst. Die restlichen 15 % entfallen auf Blitzschläge (Müller et al., 2013). Je nach Jahreszeit unterscheidet sich dieses Bild deutlich: Während im

Winterhalbjahr sämtliche Brände auf den Menschen zurückzuführen sind, können zwischen Mai und September bis zu 40 % aller unkontrollierten Feuer im Wald Ursache von Blitzschlägen sein.

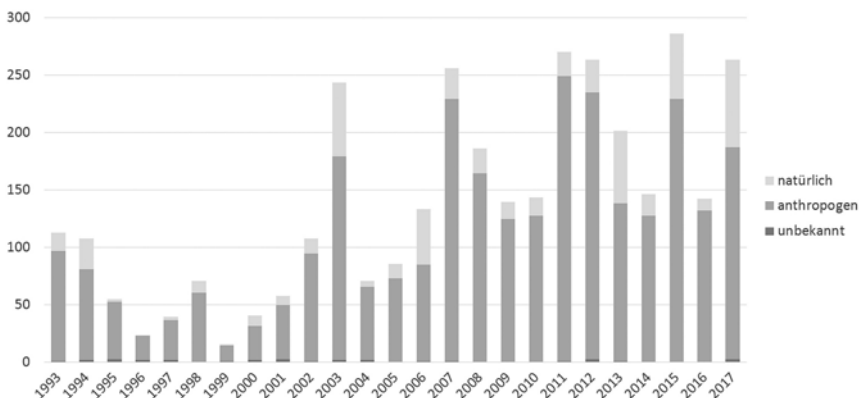


Abbildung 01: Anzahl und Ursachen von Waldbränden in Österreich von 1993 bis 2017.

Figure 01: Number and causes of forest fires in Austria from 1993 to 2017.

Datenquelle: Waldbrand-Datenbank Österreich

8.1.5.1 Anthropogene Ursachen

Die häufigste nicht-natürliche Ursache von Waldbränden in Österreich sind achtlos weggeworfene Zigaretten. Unter Berücksichtigung einer vermutlich hohen Dunkelziffer dürften mehr als 20 % aller Waldbrände auf schlecht abgelöschte Glimmstängel zurückzuführen sein. Bei vielen großflächigen Brandereignissen in Österreich werden als Auslöser achtlos weggeworfene Zigaretten vermutet. Fast ebenso relevant sind gezielt angelegte Feuer, die außer Kontrolle geraten – etwa im Zuge von Abbrennarbeiten oder bei der Beseitigung von Schlagabraum oder Schadholz. Weitere wichtige anthropogene Brandursachen in Österreich sind das Entsorgen von heißer Asche, Brandstiftung (vermutlich 5–10 % aller Waldbrände), gerissene Stromleitungen, Funkenflug bei Eisenbahnen, die Selbstentzündung von Munitionsresten, Feuerwerkskörper, Lagerfeuer sowie traditionelle Feuer (z. B. Oster- und Sonnwendfeuer).

8.1.5.2 Natürliche Ursachen

Die einzige relevante natürliche Ursache von Waldbränden in Österreich sind *Blitzschläge* im Zuge von Gewittern. Aufgrund des jahreszeitlichen Verlaufs der Gewitteraktivität treten die meisten Blitzschlagbrände von Juni bis August auf. Hierbei kann der Anteil an sämtlichen Bränden mehr als 40 % ausmachen.

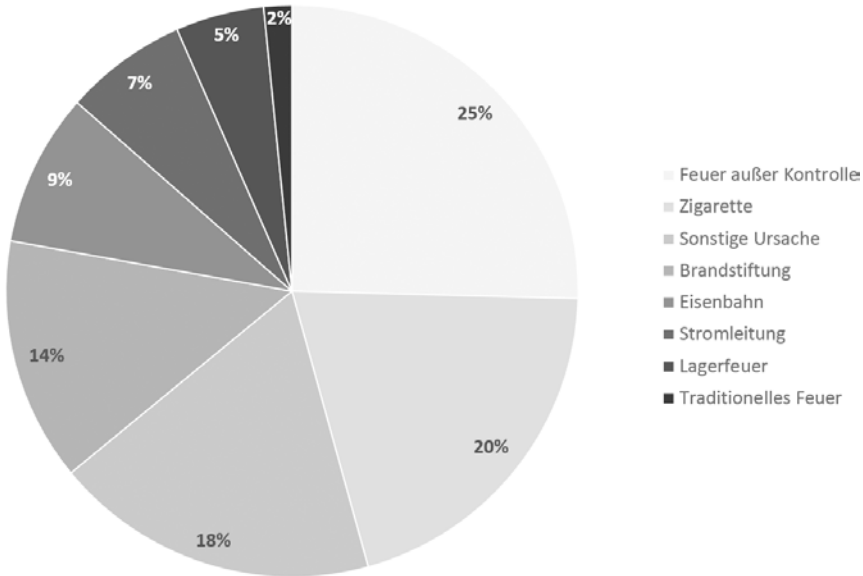


Abbildung 02: Anthropogene Ursachen der Waldbrände in Österreich von 1993 bis 2017.

Figure 02: Anthropogenic causes of forest fires in Austria from 1993 to 2017.

Datenquelle: Waldbrand-Datenbank Österreich

Vereinzelte werden auch im September oder bereits im April/Mai Waldbrände durch Blitzschlag beobachtet.

Selbstentzündung wurde bisher nur im Ausnahmefall bei einer Heuselbstentzündung und dem nachfolgenden Übergriff auf eine Waldfläche beobachtet. In Österreich hält sich hartnäckig die Überzeugung, dass weggeworfene Glascherben oder -flaschen Waldbrände auslösen können. In einer deutschen Studie wurde dies jedoch als unwahrscheinlich eingeschätzt (Müller, 2007).

8.1.6 Zeitliche Verteilung

In einer durchschnittlichen Waldbrandsaison treten im März/April sowie im Juli/August die meisten Waldbrände auf, wobei der April der brandintensivste Monat ist. Diese Verteilung ist jedoch sehr heterogen. Bei einem feuchten und kühlen Frühjahr werden nur vereinzelt Waldbrände verzeichnet, selbiges gilt für den Sommer. Auf der anderen Seite kann ein trockener Herbst oder Frühwinter zu einer hohen Zahl intensiver Brände führen – wie zuletzt im Dezember 2015 geschehen.

Für die tageszeitliche Verteilung der Waldbrände in Österreich wird der *Meldezeitpunkt* als Brandbeginn angenommen. Demnach zeigt sich ein Maxi-

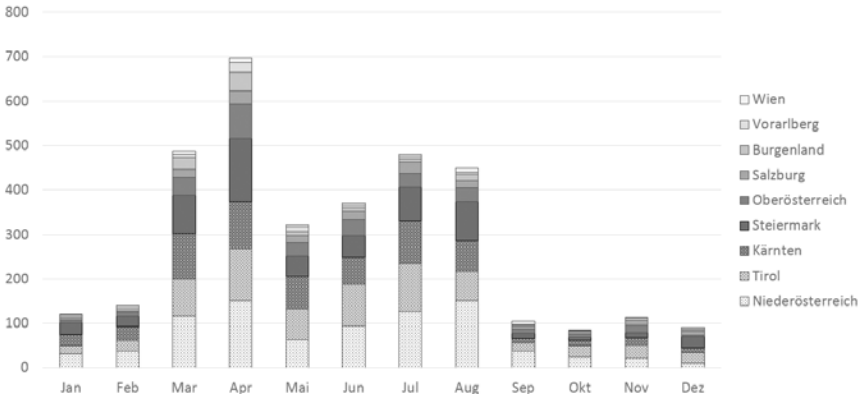


Abbildung 03: Waldbrände in Österreich nach Monaten und Bundesländern (1993 bis 2017).
Figure 03: Forest fires in Austria by months and federal states (1993 to 2017).

Datenquelle: Waldbrand-Datenbank Österreich

zum der Verteilung der Brände am frühen Nachmittag. Dies kann mit der zumeist höchsten Temperatur, der geringen Luftfeuchtigkeit und dem Freizeitverhalten der Bevölkerung erklärt werden (Vacik et al., 2011). Blitzschlagbrände folgen zeitlich der sommerlichen Gewitteraktivität, die am späten Nachmittag ihren Höhepunkt erreicht. Natürlich entfachte Brände werden im Mittel ein bis zwei Stunden später gemeldet als durch Menschen ausgelöste Feuer.

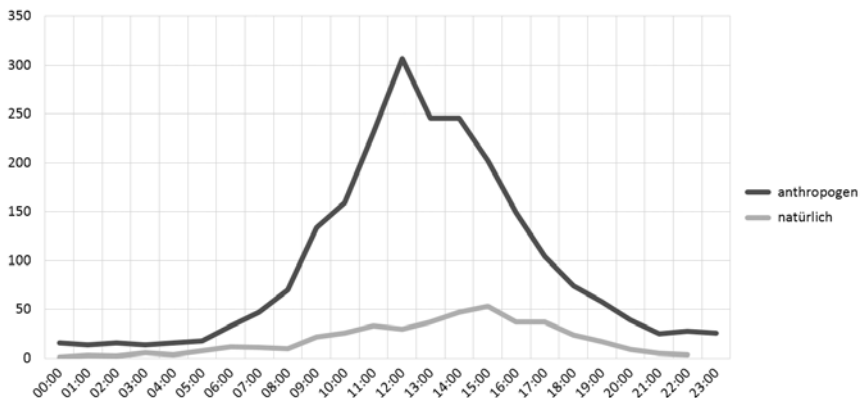


Abbildung 04: Zeitliche Verteilung der Waldbrände in Österreich (in UTC, 1993 bis 2017).
Figure 04: Temporal distribution of forest fires in Austria (in UTC, 1993 to 2017).

Datenquelle: Waldbrand-Datenbank Österreich

8.1.7 Regionale Verteilung

In den letzten 25 Jahren wurden die meisten Waldbrände in Niederösterreich verzeichnet, gefolgt von Tirol, Kärnten und der Steiermark. Als lokale Hotspots können das südliche Niederösterreich, die Mur-Mürz-Furche, das Gebiet um Villach sowie das mittlere Inntal genannt werden. Die Bezirke mit den meisten dokumentierten Waldbränden von 1993 bis 2017 sind Neunkirchen (151 Waldbrände), Wiener Neustadt-Land (142), Innsbruck-Land (133) sowie Spittal an der Drau (127).

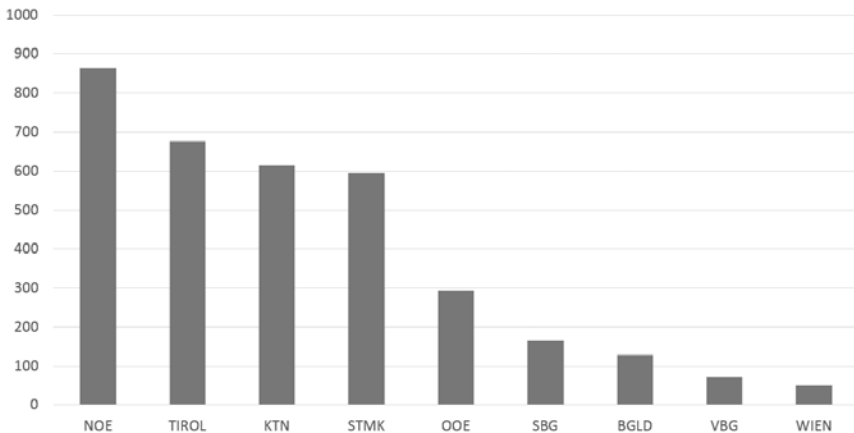


Abbildung 05: Anzahl der Waldbrände in Österreich nach Bundesländern (1993 bis 2017).

Figure 05: Number of forest fires in Austria by federal states (1993 to 2017).

Datenquelle: Waldbrand-Datenbank Österreich

8.1.8 Waldbrand beeinflussende Faktoren

Das Auftreten eines Waldbrandes hängt von verschiedenen Komponenten ab. Grundsätzlich unterscheidet man zwischen Faktoren, die das *Auslösepotenzial* determinieren und jenen Parametern, die entscheidend für die *Ausbreitung und Intensität* eines Waldbrandes sind.

Die Wahrscheinlichkeit der Brandentstehung, das Auslösepotenzial, wird im Wesentlichen von zwei Faktoren bestimmt. Einerseits ist dies die Boden- bzw. Streufeuchtigkeit, also der Feuchtegehalt des brennbaren Materials, das sich an der Bodenoberfläche befindet, wie Nadeln, Blätter oder Grasbewuchs. Die Feuchtigkeit wird von mikro- und makroklimatischen Bedingungen bestimmt – konkret vom Niederschlag, der Temperatur, Luftfeuchtigkeit und dem Wind. Andererseits kann ein Brand nur dann entstehen, wenn eine Zündquelle vor-

handen ist oder sich das Brennmaterial über die Selbstentzündungstemperatur erhitzt. In der Regel bedeutet dies, dass entweder ein Blitzschlag als Zündquelle fungiert oder, weitaus häufiger, ein (in-)direkter menschlicher Einfluss stattfinden muss (z. B. glimmende Zigarette, heiße Asche oder ein außer Kontrolle geratenes Feuer). Aus diesem Grund werden in Österreich an Wochenenden mehr Waldbrände verzeichnet. Zudem sind Wälder in Siedlungsnähe statistisch gesehen häufiger von Bränden betroffen (Arndt et al., 2013).

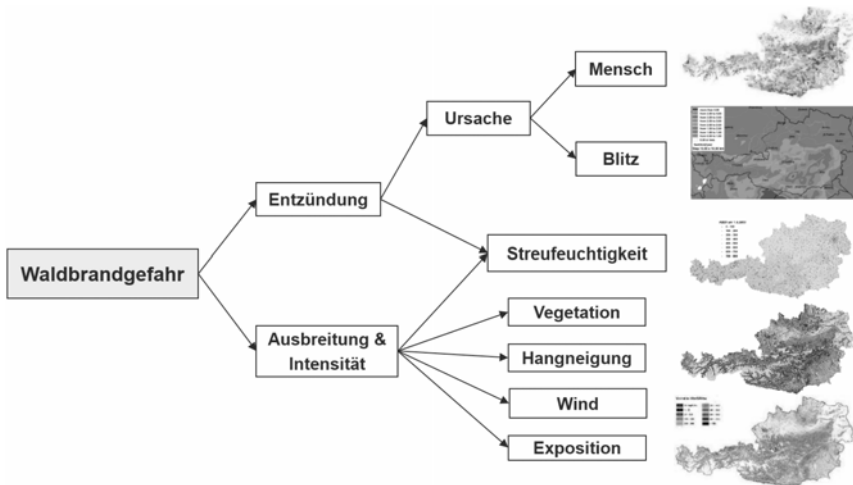


Abbildung 06: Ansatz für ein kombiniertes System zur Abschätzung der Waldbrandgefahr.

Figure 06: Approach for an integrated system to assess forest fire danger.

Quelle: nach Chuvieco et al., 2010

Das Ausbreitungspotenzial und die Intensität eines Waldbrandes hängen von mehreren Faktoren ab. Da ist zunächst die Zusammensetzung der Vegetation zu nennen. *Nadelwälder* brennen deutlich häufiger und intensiver als Laubgehölze. Zudem ist die Struktur des Waldes entscheidend, ob etwa ein Vollbrand entstehen kann oder ob die Flammen auf den Boden beschränkt bleiben. Tief hängende Äste können als *Feuerleiter* dienen oder große *Totholz*mengen die Brandintensität erhöhen und damit zu einem vermehrten Absterben von Bäumen führen. Neben der Vegetation spielt die *Topografie* eine entscheidende Rolle (Conedera und Tinner, 2010). Meist breiten sich Feuer hangaufwärts rascher aus (z. B. Boboulos und Purvis, 2009), auf südseitig ausgerichteten Hängen ist die Vegetation trockener, was ein höheres Ausbreitungspotenzial bedingt. Daneben können im steilen Gelände herabrollende, glimmende Baumstücke neue Brände entfachen, wie es in Österreich immer wieder dokumentiert wurde. Zuletzt ist der Wind für die Ausbreitungsgeschwindigkeit entscheidend. Bei starken

Föhnereignissen und Trockenheit werden vermehrt großflächige und intensive Waldbrände verzeichnet. Ebenso müssen lokale (z. B. Berg-/Talwind) und großräumige (z. B. bei Fronten) Windsysteme berücksichtigt werden, die zu einer kurzfristigen, gefährlichen Änderung der Ausbreitungsrichtung und Geschwindigkeit der Feuerfront führen können.

8.1.9 Anomalien und Tendenzen in Österreich

In den letzten Jahren wurde eine Reihe signifikanter Anomalien beim Auftreten von Waldbränden beobachtet. So ereigneten sich 2011 und 2012 durch ungewöhnlich lange und intensive Trockenperioden außergewöhnlich viele Frühjahrsbrände, während im Juli und August 2013 eine neue Rekordanzahl an Sommerbränden dokumentiert werden konnte (Müller et al., 2015). Im Jahr 2015 folgte ein extrem trockener Spätherbst, der zu Vollbränden im Hochgebirge bis Ende Dezember führte. Es wird vermutet, dass die steigenden Temperaturen im Zuge des menschengemachten Klimawandels in Verbindung mit lokal trockeneren Bedingungen für die beobachteten Anomalien verantwortlich sind.

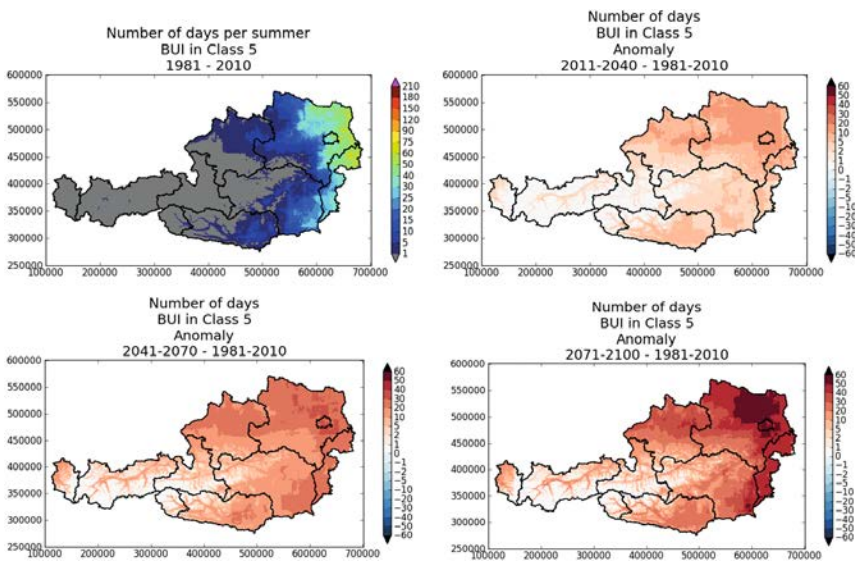


Abbildung 07: Zukünftige Entwicklung der Tage mit hoher Waldbrandgefahr in Österreich.
Figure 07: Future trend of days with high forest fire danger in Austria.

Quelle: Sass, 2014

Im Rahmen des Projektes FIRIA (Fire RIsk and vulnerability of Austrian forests under the impact of climate change) wurde das zukünftige Auftreten der Waldbrandgefahr in Österreich abgeschätzt. Zur Anwendung kam der kanadische Build-Up Index (BUI), eine Subkomponente des Fire Weather Index (FWI), der in Österreich besonders gut mit der Verteilung sommerlicher Waldbrände korreliert (Arpaci et al., 2013). Analysiert wurde die Anzahl von Tagen in den höchsten BUI-Klassen 4 und 5. Die Modellrechnungen der Arbeitsgruppe Formayer (Institut für Meteorologie, BOKU Wien) konnten auf Basis der unterstellten, von Regionalmodellen (ALADIN, RegCM3 und REMO) simulierten Klimaszenarien zeigen, dass die Anzahl an Tagen mit hoher Waldbrandgefährdung bis 2100 regional um mehr als 40 Tage zunehmen könnte. Dabei werden auch Gebiete, die bislang kaum ein relevantes Risiko aufweisen, in Zukunft verstärkt gefährdet sein (Sass, 2014). Dies gilt auch und speziell für alpine Schutzwälder.

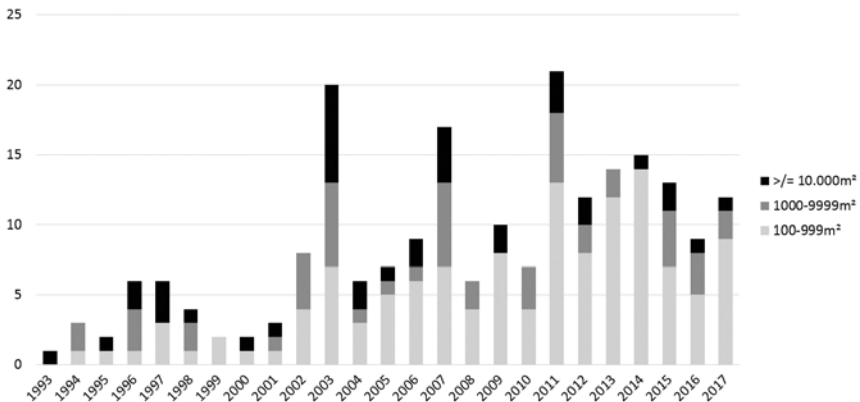


Abbildung 08: Anzahl und Flächengrößen der Waldbrände in Tirol (ohne Lienz) ab 100 m² (1993 bis 2017).

Figure 08: Number and area sizes of forest fires in Tyrol (without Lienz) as from 100 m² (1993 to 2017).

Datenquelle: Waldbrand-Datenbank Österreich

Die Anzahl der Waldbrände in Österreich von 1993 bis 2017 zeigt einen scheinbar ansteigenden Trend (siehe Abbildung 01). Hierbei ist zu beachten, dass Klein- und Mittelbrände vor 2002 unterrepräsentiert sind und vermutlich etliche Fälle nicht dokumentiert werden konnten. Zudem sind 25 Jahre noch nicht ausreichend, um einen statistisch signifikanten Trend zu ermitteln.

Eine erste Tendenz der jüngsten Entwicklung lässt sich mit den Daten aus Nordtirol ableiten, da im Rahmen des Projektes FIRIA eine umfassende Recherche zu jüngeren Waldbränden stattgefunden hat. Werden Kleinbrände

(< 100 m²) nicht berücksichtigt, zeigt sich dennoch ein Anstieg der Waldbrandzahl in den letzten Jahren. Gleichzeitig bleibt die Summe größerer Brände konstant oder nimmt sogar leicht ab – möglicherweise ein Hinweis auf die gestiegene Effizienz und raschere Brandbekämpfung durch die heimischen Feuerwehren.

8.2 Einschätzung des Sachstandes und der Unsicherheiten

8.2.1 Vorbeugung von Waldbränden

Maßnahmen zur Vorbeugung von Waldbränden können in drei Kategorien eingeteilt werden: i) Vermeidung von Waldbränden, ii) Reduktion der Auswirkungen von extremen Ereignissen und iii) Verbesserung der Resistenz und Resilienz von Wäldern.

Waldbauliche Vorbeugemaßnahmen werden in Mitteleuropa generell (und somit auch in Österreich) nur in Einzelfällen durchgeführt. In Deutschland gibt es erfolgreiche Beispiele des Unterbaus von Kiefernbeständen durch Laubholzarten, die zu einer Veränderung des Innenklimas und der Entzündlichkeit der Bestände geführt haben (Otto, 1980). Der Einsatz von Warnsystemen sowie bewusstseinsbildende Aktivitäten, die bereits im Kindesalter eingesetzt werden können, sind hingegen weiter verbreitet.

8.2.1.1 Maßnahmen zur Erhöhung der Resistenz und Resilienz

Aus den USA stammen Untersuchungen, die eine Anpassung der Waldbewirtschaftung hinsichtlich einer Vermeidung von Waldbränden zum Ziel haben. Studien aus Europa lassen sich auch auf den Alpenraum umlegen. Allerdings ist zu beobachten, dass waldbauliches Wissen zur Anpassung der Waldbewirtschaftung aufgrund mangelnden Bewusstseins hinsichtlich der Gefahren wenig Verwendung findet. Als die vielleicht geeignetste Maßnahme kann eine Änderung der Baumartenwahl in Richtung eines höheren Laubholzanteils genannt werden. Damit wird nicht nur die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Waldbränden reduziert, sondern auch die Resistenz gegenüber anderen Störungen wie Borkenkäferbefall erhöht. Sekundäre Fichten-Reinbestände (*Picea abies*) weisen eine hohe Gefährdung gegenüber verschiedenen Schadfaktoren auf – und im Hinblick auf die prognostizierte Klimaerwärmung auch eine geringere Resilienz (Lexer et al., 2014). Zudem beinhalten Fichtenwälder deutlich höhere Brennstoffmengen als etwa Kiefernwälder. Potenzielle Waldbrände können damit höhere Intensitäten erreichen und sich rascher zu Vollbränden entwickeln (Arpaci et al., 2013). Im Fall einer Bestandesüberführung oder beim

Bestandesumbau muss das Potential des Standorts bei der Baumartenwahl berücksichtigt werden. Auf ausreichend feuchten und tiefgründigen Standorten ist die Buche (*Fagus sylvatica*) meist erfolgreich, daneben eignen sich Ahorn (*Acer spp.*) und Eiche (*Quercus spp.*) auch auf trockeneren Standorten. In Richtung Waldgrenze haben sich die Grünerle (*Alnus viridis*) sowie die Mehl- und Vogelbeere (*Sorbus spp.*) bewährt. Das weitgehende Fehlen von Standortskarten, welche die veränderlichen Niederschlags- und Temperaturverhältnisse in der Zukunft in Österreich berücksichtigen, stellen ein Problem für die standortgerechte Baumartenwahl dar.

Ein weiteres Problem ergibt sich durch die kleinparzellige Struktur der heimischen Wälder. Etwa 50 % der gesamten österreichischen Waldfläche wird Kleinwaldbesitzern zugerechnet, die im Schnitt über weniger als fünf Hektar verfügen. Bei manchen Waldbesitzern fehlt das entsprechende Fachwissen zur Waldbewirtschaftung, Pflegemaßnahmen werden daher gegebenenfalls unterlassen. Es ist schwierig, Kleinwaldbesitzern die Gefahren von Waldbränden näherzubringen und sie von der Notwendigkeit von Vorbeugemaßnahmen zu überzeugen. Aufgrund der Dringlichkeit von Vorkehrungen gegenüber dem Borkenkäfer und von Maßnahmen zur Aufarbeitung von Sturmschäden, ist dies aus Sicht der Waldbesitzer auch verständlich. Der überwiegende Teil der Waldschäden in Österreich ist biotischer Natur oder wird von Sturmereignissen verursacht. Allerdings können Maßnahmen – wie eine dem Standort angepasste Baumartenwahl – auch die Entstehung und Ausbreitung von Waldbränden verhindern.

8.2.1.2 Maßnahmen zur Vermeidung der Auswirkungen von extremen Waldbränden

Das *Anlegen von Brandschutzstreifen*, wie es etwa in Brandenburg in Deutschland durchgeführt wird, ist in Österreich vermutlich nur an ausgewählten Standorten sinnvoll, die eine hohe Disposition für Waldbrand aufweisen – etwa den Schwarzkiefernwäldern am Alpenostrand. Im Gebirgsraum ist eine solche Maßnahme hinsichtlich der Erosions- oder Windwurfgefahr nicht relevant und kann nur bei der unmittelbaren Brandbekämpfung eine Rolle spielen, um die Feuerausbreitung zu unterbinden. Das *kontrollierte Abbrennen* von bodennahem Bewuchs im Gefährdungsbereich von Waldbränden wird in Österreich derzeit nur in Ausnahmefällen praktiziert, am ehesten entlang von Bahnstrecken. Die Gründe liegen neben der generellen Skepsis der Waldbesitzer auch in den verschiedenen Naturschutz- und Luftreinhaltegesetzen der Länder. In Ländern, in denen die Waldökosysteme an das Auftreten von Feuer angepasst sind, wie in Teilen Südeuropas, den USA oder Kanada, ist das *Prescribed burning* ein oft praktiziertes Mittel zur Vermeidung verheerender Waldbrände.

Durch die extensive Bewirtschaftung gerade im Gebirgswald, können nennenswerte Mengen an Totholz im Bestand verbleiben. Aus Sicht des Naturschutzes und zur Sicherung der Biodiversität ist eine größere Menge an Totholz anzustreben. Allerdings ist die Entfernung von Totholz in waldbrandgefährdeten Beständen eine effektive Maßnahme, um intensiven und sich rasch ausbreitenden Waldbränden vorzubeugen. Laut der österreichischen Waldinventur stehen und liegen im Durchschnitt 20 m^3 Totholz pro Hektar im österreichischen Wald, wobei die Mengen regional sehr unterschiedlich ausfallen. Auf 23 Prozent der Ertragswaldfläche gibt es im Durchschnitt $76 \text{ m}^3/\text{ha}$ stehendes und liegendes Totholz, auf 17 Prozent zwischen 10 und $30 \text{ m}^3/\text{ha}$ und auf 60 Prozent Waldfläche sind weniger als $10 \text{ m}^3/\text{ha}$ vorhanden (Bundesforschungszentrum für Wald, 2012). Oft wird – unter den heutigen ökologischen Rahmenbedingungen – dem Naturschutz mehr Bedeutung beigemessen, als dem Schutz vor Waldbränden. Eine eventuelle Entfernung von Totholz aus dem Bestand, die zudem mit einem Mehraufwand für den Waldbesitzer verbunden ist, sollte erst nach einer umfassenden Prüfung des Gefährdungspotenzials vor Ort erfolgen.

8.2.1.3 Maßnahmen zur Vermeidung von Waldbränden

Derzeit gibt es zwei öffentlich zugängliche Möglichkeiten, sich über die aktuelle Waldbrandgefahr in Österreich zu informieren. Einerseits erstellt das Joint Research Center der EU in Italien eine europaweite und täglich aktualisierte Karte der momentanen und prognostizierten Waldbrandgefahr mit einer Auflösung von acht Kilometern (EFFIS, o. J.). Speziell im alpinen Bereich ist dieser grobe Maßstab aber wenig aussagekräftig. Daneben wird von der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (ZAMG) in Wien eine Abschätzung der Waldbrandgefahr auf Basis von derzeit $1 \times 1 \text{ km}$ durchgeführt (ZAMG, 2018).

Für beide Systeme gilt: Es werden nur die relevanten meteorologischen Parameter berücksichtigt, Faktoren wie Vegetation, Topografie oder menschlicher Einfluss finden keine Beachtung (siehe Kapitel 8.1.8). Daneben ist anzumerken, dass selbst eine Auflösung von $1 \times 1 \text{ km}$ – was für meteorologisch interpolierte Daten einen guten Wert darstellt – nicht ausreichend ist, um die topographischen Bedingungen an Berghängen zu beschreiben. So fallen Südhänge rascher schneefrei, sind meist trockener und haben eine andere Baumartenzusammensetzung als nordseitige Hänge. Gerade die Kenntnis über die kleinräumige Struktur ist jedoch ausschlaggebend für das Entstehungs- und Ausbreitungspotenzial von Waldbränden.

Um die Qualität der Abschätzung der Waldbrandgefahr zu verbessern, sollten folglich die unterschiedlichen Vegetationsformen/-zusammensetzungen und Brennstoffmengen, topografische Faktoren (Seehöhe, Hangneigung, Expositi-

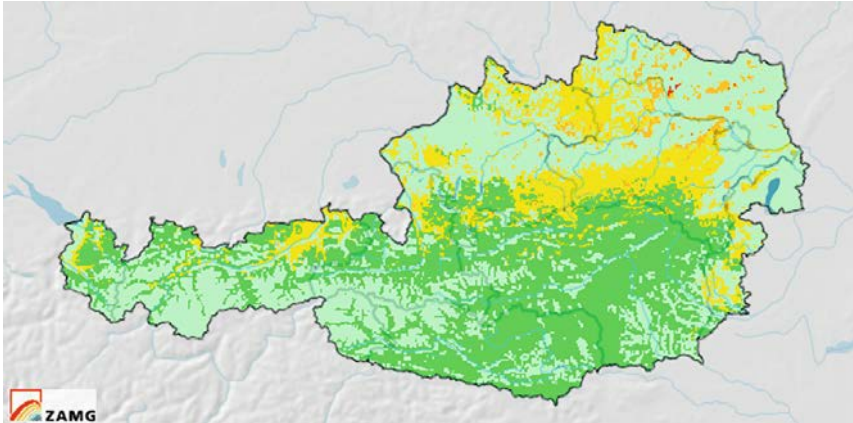


Abbildung 09: Waldbrand-Gefahrenkarte der ZAMG für den 13. April 2018. »Grün« bezeichnet eine geringe Waldbrandgefahr, »gelb« ein erhöhtes, »orange« ein hohes und »rot« ein extremes Feuerrisiko.

Figure 09: Forest fire danger map of ZAMG for the 13th April 2018. »Green« means low forest fire danger, »yellow« elevated, »orange« high and »red« an extreme fire risk.

Quelle: ZAMG, 2018

on) sowie die regionale Heterogenität von klimatischen Gegebenheiten berücksichtigt werden. Zudem sollten potenzielle Brandauslöser (u. a. menschlicher Einfluss) für eine zuverlässige Gefährdungsmodellierung Beachtung finden. Untersuchungen haben gezeigt, dass der anthropogene Einfluss die klimatischen/naturräumlichen Faktoren überprägen kann und in manchen Gebieten den höchsten Erklärungsgehalt für das Auftreten von Waldbränden besitzt (Arpaci et al., 2013).

Derzeit werden in Österreich nur wenige Maßnahmen zur Bewusstseinsbildung bei der Thematik Waldbrand gesetzt. Als ein Beispiel können die Freiwilligen Feuerwehren in Oberösterreich genannt werden, die im Rahmen ihrer Schulbesuche die wichtigsten Grundlagen zur Vermeidung von Waldbränden vermitteln. Daneben werden in Österreich auch aktuelle Informationen zu Waldbränden über einen Blog verbreitet (<http://fireblog.boku.ac.at>). Trotz dieser Initiativen kann davon ausgegangen werden, dass das generelle Bewusstsein zu Waldbränden in der österreichischen Bevölkerung gering ist. Dies resultiert in einem falschen Verhalten im Wald (z. B. achtlos weggeworfene Zigarette) oder einem unsachgemäßen Arbeiten (z. B. Abbrennarbeiten trotz Trockenheit auf einer Schlagfläche). Daneben kann unangepasstes Freizeitverhalten zu Waldbränden führen, etwa, wenn Lagerfeuer entzündet oder Feuerwerkskörper im Gefährdungsbereich des Waldes abgeschossen werden. Nur in Ausnahmefällen gibt es Besucherinformationen im Wald, die auf die Brandgefahr hinweisen – wobei diese statischer Natur sind, also unabhängig von der tatsächlichen

Waldbrandgefahr durchgehend angebracht sind und eine effektive Besucherlenkung somit fraglich erscheint.

Dem geringen Bewusstsein zu Waldbränden in der Bevölkerung steht die aktive Meldebereitschaft gegenüber: Wenn im Wald Rauch aufsteigt oder gar Flammen zu sehen sind, kann davon ausgegangen werden, dass innerhalb kurzer Zeit eine telefonische Meldung an die Warnzentrale abgesetzt wird.

8.2.2 Dokumentation von Waldbränden

Eine einheitliche und umfassende Dokumentation von Waldbränden in Österreich wird derzeit nur von der Wissenschaft durchgeführt. Es gibt keinen behördlichen Auftrag zur detaillierten Erfassung sämtlicher Waldbrände, auch erfolgt die Aufarbeitung der Brandereignisse nicht automatisiert, sondern muss in aufwendiger Recherchearbeit (Durchsicht von Medienberichten, Feuerwehrhomepages, Polizeiaussendungen) durchgeführt werden. Oft sind nur wenige Informationen verfügbar und es fehlen Daten zum genauen Brandort, der Brandfläche oder der betroffenen Vegetation. Zudem kann davon ausgegangen werden, dass zahlreiche Kleinbrände überhaupt nicht dokumentiert werden können, da keine Einsatz- oder Medienberichte existieren und der Zugang bzw. die Abfrage aus den Einsatzinformationssystemen der Feuerwehren nicht oder nur eingeschränkt möglich ist. Es wird vermutet, dass etwa 20 % aller Waldbrände mit weniger als 1.000 m² Brandfläche in Österreich noch nicht zentral erfasst sind. Die Problematik einer nicht vollständigen Waldbrand-Dokumentation sowie einer fehlenden oder ungenügenden Verortung der Brände führt zu Unsicherheiten in Bezug auf die Lage mancher Waldbrände, der betroffenen Fläche, der Brandintensitäten und der geschädigten Vegetation. Teilweise können diese Informationen über Foto- und Videomaterial zum Feuerwehreinsatz (sofern vorhanden) ergänzt werden, doch bedeutet das einen weiteren Anstieg des Rechercheaufwands.

Zuletzt führt die unsichere Datenlage dazu, dass die zentrale Frage nach einer möglichen Zunahme von Waldbrand-Extremereignissen nicht statistisch abgesichert beantwortet werden kann. Hierfür wäre ein umfangreicher und länger zurückliegender Datensatz notwendig.

In Summe führen die Unsicherheiten bei der Waldbrand-Dokumentation zu erheblichen Schwierigkeiten, aus der Vergangenheit lernen zu können – etwa hinsichtlich bisheriger Trends, der Brandflächenverteilungen oder der Ursachen. In Zukunft sollten vermehrt Anstrengungen unternommen werden, um die Dokumentation von Waldbränden zu vervollständigen. Dabei ist zu berücksichtigen, dass aufgrund des fehlenden behördlichen Auftrags die Konti-

nuität und Nachhaltigkeit der Waldbranderfassung nicht gegeben ist und derzeit nur durch Drittmittel finanzierte und zeitintensive Forschung ermöglicht wird.

8.2.3 Bekämpfung von Waldbränden

Österreich besitzt eines der dichtesten und effektivsten Netzwerke an Freiwilligen Feuerwehren weltweit. Die Ausrüstung ist technisch auf dem neuesten Stand, die Mitglieder werden regelmäßig in Einsatztaktik, Einsatzsicherheit und Brandbekämpfung geschult. Daneben ist im Regelfall eine ständige Einsatzbereitschaft gegeben. Die mittlere Dauer bis zum Ausrücken einer Freiwilligen Feuerwehr beträgt weniger als fünf Minuten. Der Beginn der ersten Löschmaßnahmen erfolgt bei einem Waldbrand im Mittel nach 20 Minuten – das ist Weltrekord (Pilat, 2018).

In den letzten Jahren und Jahrzehnten hat sich das Feuerwehrwesen in Österreich ständig weiterentwickelt. Nachbetrachtungen zu extremen Waldbrandereignissen haben zu einer Verbesserung der Einsatztaktik, des Einsatzablaufs und der Brandbekämpfung geführt. Generell kann davon ausgegangen werden, dass Waldbrände heute rascher und effektiver bekämpft werden können, als noch vor zwanzig oder dreißig Jahren. Dies dürfte sich auch in der Waldbrandstatistik widerspiegeln, die zwar eine Zunahme von Waldbränden in den letzten Jahren vermuten lässt, aber gleichzeitig mehr Kleinbrände beinhaltet (siehe Kapitel 8.1.9).

Nach wie vor gibt es aber seitens der Brandbekämpfung einige Herausforderungen. So ist die Erschließung von Waldgebieten nicht überall im Sinne der Feuerwehren gegeben. In Bezug auf die Dichte des Forststraßennetzes steht Österreich im mitteleuropäischen Vergleich sehr gut da. Bei einem Blick nach Übersee, etwa nach Kanada, kann sogar behauptet werden, dass in Österreich eine ausgezeichnete Erschließung der Wälder vorhanden ist. Verbesserungsbedarf könnte aber hinsichtlich der Befahrbarkeit (u. a. Planungsbreite der Forststraßen, Umkehrmöglichkeiten) oder der Zugänglichkeit für Feuerwehrfahrzeuge (u. a. Schranken) bestehen, was bei Löscharbeiten immer wieder für Probleme sorgt. Auch sollte das Anlegen von Löschteichen in Hinblick auf das regional unterschiedliche Gefährdungspotential angepasst werden. Nicht überall können die zahlreichen alpinen Seen und künstlichen Teiche von Beschneigungsanlagen gut und rasch erreicht werden.

Daneben ist die ausgeprägte zeitlich-lokale Heterogenität beim Auftreten von Waldbränden problematisch. Dies erfordert Flexibilität bei den Einsatzkräften und führt zu unterschiedlich intensiven Waldbrandsaisonen und -jahren. Blitzschlagbrände können im steilen, unwegsamen Gelände auftreten und die Brandbekämpfung erschweren oder sogar lebensgefährlich werden lassen.

Dasselbe gilt für starken Wind oder eine überraschende Windrichtungsänderung – im alpinen Bereich keine Seltenheit. Schließlich kann die vorhandene Vegetation eine Herausforderung bei der Brandbekämpfung darstellen, wenn sich durch die Änderung der Vegetationszusammensetzung ein Feuer zum Kronenfeuer entwickelt oder wenn Nadelbäume durch ihren hohen Harzgehalt explosionsartig in Flammen aufgehen.

In dünn besiedelten Gebieten in Österreich, in denen Abwanderung ein großes Thema ist (bspw. nördliches Waldviertel) haben die Feuerwehren auch mit der Sicherung des Personalstandes zu kämpfen. Hier verringert sich die Anzahl der Feuerwehrmitglieder durch altersbedingten Ausschied und fehlenden Nachwuchs mitunter so stark, dass keine effektive Führung einer Freiwilligen Feuerwehr mehr möglich ist.

Ein viel diskutierter Punkt ist die Effizienz und der Umfang von Helikoptereinsätzen im Brandfall. Im Gebirgsland Österreich ist der Einsatz von Hubschraubern für die Aufklärung, Eindämmung sowie die Bekämpfung von Waldbränden von großer Bedeutung. Wenn die Erreichbarkeit des Brandortes für die Einsatzkräfte nicht oder nur erschwert möglich ist, kann sich der rasche Einsatz aus der Luft entscheidend auf die Größe des Brandes auswirken. Bürokratische Hürden bei der Anforderung von Luftunterstützung sowie die Sorge um eventuell nicht gedeckte Kosten, bereiten oftmals Schwierigkeiten. Der Einsatz eines Hubschraubers für die Brandbekämpfung kann mit hohen Maschinen- und Personalkosten einhergehen, die nicht immer vollständig vom Bund oder Land übernommen werden. Daher ist es notwendig, dass die Rahmenbedingungen für den Einsatz und die Abgeltung der Hubschrauberunterstützung auf Bundesebene einheitlich geregelt werden. In Tirol gibt es hierzu eine neue Verordnung, wodurch für die betroffenen Gemeinden keine Kosten anfallen (Landesfeuerwehrverband Tirol, pers. Mitteilung). Daneben ist der Kostenersatz für direkte Einsatzkosten wie Treibstoff, Mannschaftsverpflegung oder Verschleiß von Ausrüstung nicht überall klar festgelegt und bedarf der Nachbesserung.

8.2.4 Wiederherstellung von Waldbrandflächen

Handelt es sich bei einem Waldbrand um ein Lauffeuer geringer Intensität, sind nach dem Feuer keine forstlichen Maßnahmen erforderlich, da der Hochwald in der Regel kaum Schaden nimmt. Handelt es sich dagegen um einen intensiven Glimmbrand, der die Baumwurzeln und Humusdecke verbrennt, oder gar um einen massiven Vollbrand, können umfangreiche Maßnahmen zur Wiederherstellung der Waldfunktionen notwendig sein (Heel, 2015).

Im alpinen Bereich muss speziell auf die Schutzfunktionen des Waldes Rücksicht genommen werden, da durch seine Zerstörung nachteilige Folgewirkungen auf gravitative Naturgefahren wie Erosion, Steinschlag, Muren und Lawinen zu erwarten sind (Sass et al., 2012). In Abhängigkeit vom Standort (geologisches Ausgangssubstrat, Boden, Neigung, Topografie), der Vegetation (Baumarten, Vegetationstyp, Bestandesstruktur, Altersklassen) und den getroffenen waldbaulichen Maßnahmen, gibt es unterschiedliche Sukzessionspfade und Zeitspannen bis zur Wiederherstellung des Waldes. Besonders ungünstig für die Regeneration sind steile Hänge der subalpinen Stufe mit geringer Humusauflage auf Karbonatgestein. Wenn hier die organische Bodenauflage bei Schwelbränden verbrennt (oder auch durch Löscharbeiten abgetragen wird), kann eine extrem langfristige Schädigung (Jahrzehnte bis Jahrhunderte) die Folge sein. Wichtig ist in jedem Fall eine vorausschauende und an die Situation angepasste waldbauliche Behandlung der geschädigten Flächen.

Eine rasche Aussaat von standortangepassten Gras- und Staudensamen eignet sich beispielsweise für die kurzfristige Stabilisierung einer erosionsgefährdeten Fläche, vorausgesetzt, dass nach dem Feuer eine intakte Bodendecke zurückgeblieben ist. Bei erheblicher Schädigung sollten Pflanzungen mit standortangepassten Baumarten die Naturverjüngung unterstützen. Im Fall massiv geschädigter oder toter Bäume ist zwischen einer Entfernung der betroffenen Individuen und einem Belassen im Bestand abzuwägen. So wirkt stehendes Totholz noch einige Jahre schützend vor gravitativen Naturgefahren, andererseits können geschwächte Bäume (z. B. durch versengte Nadeln) von Schädlingen wie Borkenkäfern befallen werden. Zu beachten ist auch, dass manche Baumarten wie die Schwarzkiefer (*Pinus nigra*) gegenüber Bodenfeuern eine hohe Resilienz aufweisen, weil ihre dicke Borke das lebende Gewebe vor den hohen Feuertemperaturen schützt. Auf einer Brandfläche in Niederösterreich konnte beobachtet werden, dass Schwarzkiefern selbst mit 60–70 % versengtem Kronenanteil noch eine gute Überlebensrate aufweisen.

Insbesondere in Objektschutzwäldern können neben waldbaulichen Maßnahmen nach dem Brand auch technische Schutzmaßnahmen erforderlich sein, wie es etwa in Absam 2014 der Fall war. Nur durch den Einsatz von Schneerechen und Schneeböcken ist es möglich, die junge Baumvegetation am Hang und die darunterliegende Infrastruktur vor Schneebewegungen zu schützen. Zudem ist ein laufendes Monitoring der Brandfläche vorteilhaft, etwa hinsichtlich der Überlebenswahrscheinlichkeit geschädigter Bäume und der Entwicklung der Vegetation. Ebenso sollten eventuelle Erosionserscheinungen und das Auftreten biologischer Schädlinge (Borkenkäfer, Pilze) überwacht werden. Daneben gilt ein Hauptaugenmerk dem Wildeinfluss. Auf vielen Brandflächen werden am Jungwuchs massive Verbiss- und Schälsschäden beobachtet, die oft nur durch eine intensive Schwerpunktbejagung eingedämmt werden können.

8.3 Mögliche zukünftige Entwicklungen und Herausforderungen

Je nach unterstelltem Klimaszenario ist in den nächsten Jahrzehnten eine Temperaturzunahme von +2 bis +5 °C zu erwarten. Während die Niederschläge im Winterhalbjahr eher zunehmen dürften, deuten sich für den Sommer längere Hitzewellen und Dürreperioden an (Gobiet et al., 2014; IPCC, 2014; Trnka et al., 2016). Dies resultiert in mehr Tagen mit hoher Waldbrandgefahr in Österreich (siehe Kapitel 8.1.9). Gleichzeitig sind vermehrt extreme Niederschlagsereignisse zu befürchten. Die Schwankungen zwischen sehr trockenen und sehr feuchten Bedingungen werden sich in Zukunft voraussichtlich verstärken.

Neben der Klimaerwärmung gilt ein Hauptaugenmerk dem Einfluss des Menschen. Durch die steigende Freizeitnutzung des Waldes und ein höheres Besucheraufkommen steigt auch die Zahl potenzieller Zündquellen. Freizeitnutzer kommen früher und gehen später, die Interessen und Nutzungsformen werden vielfältiger – in diesem Zusammenhang spielt auch die europaweite Regelung zur Sommer-/Winterzeit eine Rolle. Daneben können der Nutzungsrückgang in Privatwäldern und die damit verbundene Zunahme von Totholz die Intensität von unkontrollierten Feuern und die Gefahr von Vollbränden erhöhen.

Berücksichtigt man diese beiden primären Treiber für Waldbrände in Österreich, ist in Zukunft vermehrt mit Anomalien beim Auftreten von Waldbränden zu rechnen. Es ist anzunehmen, dass die Wahrscheinlichkeit für das Auftreten von Extremereignissen zunimmt – sowohl hinsichtlich der Anzahl, als auch in Bezug auf die Intensität. Daraus folgen steigende Kosten für die Bekämpfung von Waldbränden, etwa durch mehr Helikoptereinsätze. Ebenso könnte es in Zukunft im Fall mehrerer Großbrandereignisse zur gleichen Zeit zu einem Engpass bei der Verfügbarkeit von Luftfahrzeugen kommen, wodurch eine effektive Brandbekämpfung im alpinen Raum erschwert wird. Mehr Brandereignisse bedingen auch höhere Wiederherstellungskosten der betroffenen Waldflächen und führen zu kostenintensiveren Sicherungsmaßnahmen gegen Folgeschäden wie Erosion, Steinschlag oder Muren.

Neben den bereits genannten Herausforderungen dürfte in Zukunft ein weiteres Thema an Brisanz gewinnen: Die Gefährdung von Flächen, auf denen urbaner Raum – etwa Siedlungen, Betriebe, Einfamilienhäuser und kritische Infrastrukturen – direkt an Wald- und Offenlandflächen grenzen (Englisch: *Wildland-Urban Interface*, WUI). Recht häufig ist eine solche Struktur in Österreich im Umfeld von Großstädten bzw. am Rand von Siedlungen zu beobachten, möglicherweise als Effekt des Wunsches nach einer »Nähe zur Natur« und dem »Haus im Grünen«. In Ländern wie den USA oder Australien ist die Problematik dieses Phänomens hinlänglich bekannt. Viele Waldbrandkatastrophen mit zahlreichen Toten resultierten aus einem Übergreifen der Flam-

men auf besiedeltes Gebiet oder Verkehrsachsen. Inzwischen existieren im englischsprachigen Raum umfangreiche Anleitungen für Hausbesitzer, wie sie ihr Heim waldbRANDSICHER machen können – etwa durch das Anlegen eines Brandschutzstreifens, das Entfernen von Brennmaterial im Umkreis des Gebäudes oder die Errichtung einer externen Wasserentnahmestelle.

In Mitteleuropa wird diese Thematik noch kaum diskutiert. Dabei haben jüngere Brandereignisse gezeigt (z. B. Wiener Neustadt 2013, Absam 2014, Hallstatt 2018), dass sich Vollbrände bei Windeinfluss kaum kontrollieren lassen und die hohe Ausbreitungsgeschwindigkeit auch für Menschen und deren Besitz gefährlich werden kann. Berücksichtigt man die Angewohnheit mancher Hausbesitzer, ihr Heim direkt am Waldrand oder sogar im Wald zu errichten, kann dies speziell in brandgefährdeten Wäldern ein unterschätztes Risiko bedeuten. Ein aktuelles Beispiel für ein solches Szenario stammt vom August 2018 aus Deutschland, als entlang der Geleise der Deutschen Bahn bei Siegburg durch Funkenflug ein Böschungsbrand ausgelöst wurde, wodurch acht Häuser schwer beschädigt bzw. zerstört und 32 Menschen verletzt wurden (Extra-Blatt, 2018).

8.4 Perspektiven für Handlungsoptionen

8.4.1 Forstliche Vorbeugemaßnahmen

Aufgrund der langjährigen Erfahrungen im mediterranen Raum existiert bereits ein umfangreiches Portfolio an forstlichen Vorbeugemaßnahmen. Die vorhandenen waldbaulichen Empfehlungen sind auf ihre Eignung im Gebirgsraum zu überprüfen und an Waldbesitzer in gefährdeten Gebieten zu kommunizieren. Dabei müssen mögliche Konfliktfelder berücksichtigt werden, etwa die Skepsis gegenüber kontrollierten Abbrennarbeiten, eine Änderung der Baumartenzusammensetzung oder den eventuellen Widerspruch zum Naturschutz hinsichtlich des Belassens von Totholz im Wald.

8.4.2 Waldbrandwarnsystem

Das derzeitige Waldbrandwarnsystem an der ZAMG soll überarbeitet werden. Grundlage hierfür sind die im Frühjahr 2018 von Vertretern der Forstbehörden, Feuerwehren und Landeswarnzentralen kommunizierten Erwartungen (AFFRI, 2018). Neben einer optimierten Darstellung soll der verwendete Waldbrand-Index verfeinert werden. Parallel soll an einem Prototyp für ein integriertes Waldbrandgefahrenmodell gearbeitet werden, um neben der meteorologischen Komponente auch die Vegetation, Topografie sowie den menschlichen Einfluss

zu berücksichtigen. Zudem ist eine österreichweite Identifizierung von Waldbrand-Hotspots anzustreben, wobei die ökologischen Rahmenbedingungen im ostalpinen Gebirgswald, das bisherige Waldbrandgeschehen, die zukünftige Entwicklung des Klimas sowie der erwartete, steigende Einfluss des Menschen berücksichtigt werden sollen.

8.4.3 Waldbranddokumentation

Die laufende, umfassende und zentrale Dokumentation von Waldbränden ist fortzuführen. Nur auf diesem Weg können die zeitliche/örtliche Verteilung, die Ursachen, Brandintensitäten und die Entzündbarkeit unterschiedlicher Vegetationsformen festgestellt werden. Ebenso lässt sich nur auf diesem Weg die Effizienz und Notwendigkeit von Waldbrandeinsätzen sowie Luftunterstützung unterstreichen. Die Dokumentation von Waldbränden in Österreich soll durch eine intensive Kooperation aller Beteiligten auch für die Zukunft gesichert und Optionen für eine digitale Übermittlung von Waldbranddaten geprüft werden.

8.4.4 Bewusstseinsbildung

Es wird empfohlen, dass sich Vertreter von Behörden, Einsatzkräften und Wissenschaft aktiv an öffentlichkeitswirksamen Maßnahmen zur Bewusstseinssteigerung beteiligen und bei Veranstaltungen, Seminaren, Workshops und Schulungen als Ansprechpersonen und Waldbrandexperten zur Verfügung stehen. Die Forschung soll gemeinsam mit den Bedarfsträgern Projekte zur Vorbeugung von Waldbränden entwickeln, um den steigenden Anforderungen zu begegnen. Die Erstellung von Handlungsempfehlungen zur Thematik Waldbrand (u. a. korrektes Verhalten im Brandfall, waldbauliche Vorbeugemaßnahmen) kann ebenfalls zur Bewusstseinsbildung beitragen. Regelmäßige Treffen zwischen den Interessensträgern, der beteiligten Forschungseinrichtungen und den Landeswarnzentralen sorgen für eine bessere Vernetzung und einen laufenden Austausch sorgen. In Kooperation mit Schulen sind erweiterte, bewusstseinsbildende Maßnahmen denkbar, wie die Besichtigung von Brandflächen oder die Erstellung eines Imagefilms zum Thema Waldbrand.

8.4.5 Waldbrandforschung

Die Fortführung der Waldbrandforschung ist notwendig, um die kurz-, mittel- und langfristigen Effekte auf die Schutzwirkung von Gebirgswäldern sowie die

Nährstoff- und Kohlenstoffkreisläufe nach Waldbränden zu beurteilen. Besonders die österreichische Leitbaumart Fichte und mögliche Kombinationseffekte (Hitzewellen, Trockenheit, Stürme, Borkenkäfer) sind zu berücksichtigen. Ebenso zu beachten ist die in Hinblick auf den Klimawandel erwartete Ausbreitung von Laubbaumarten (Buche, Eiche) und ihre mögliche Gefährdung durch Frühjahrsbrände. Die Antizipation des zukünftigen Waldbrandregimes soll die Identifizierung neuer Gefahren und Anpassungen im Katastrophenschutz ermöglichen. Im Bereich der Waldbrandforschung ist die Sicherstellung der Finanzierung über nationale und europäische Fördertöpfe unumgänglich, damit die Forschungsarbeiten auch in Zukunft fortgeführt werden können.

8.4.6 Waldbrandbekämpfung

Angesichts der erwarteten Verschärfung der Waldbrandsituation in Österreich, ist die verstärkte Auseinandersetzung der Einsatzkräfte mit den Berührungszonen von Wald und Siedlungen in Schulungen anzustreben. Daneben ist die Ausarbeitung von bewusstseinsbildenden Maßnahmen für die betroffene Bevölkerung sinnvoll, damit die Eigentümer ihr Heim selbständig schützen und im Brandfall effektiver eingreifen können. Die Berücksichtigung kritischer Infrastrukturen und ihre in Zukunft möglicherweise erhöhte Gefährdung – beispielsweise Mobiltelefonmasten im Wald – ist zu beachten. Szenarien mit mehreren Waldbrandereignissen zur gleichen Zeit sollten entwickelt, Einsätze entsprechend geprobt und optimiert werden, um auf ein zukünftiges Waldbrandregime vorbereitet zu sein. Vorteilhaft sind auch mehr speziell ausgerüstete Waldbrand-Einsatzkräfte, die im Bedarfsfall bundesländerübergreifend eingesetzt werden können. Die über den Österreichischen Bundesfeuerwehrverband und das Sachgebiet 5.3 »Waldbrandbekämpfung und Flugdienst« laufenden Bestrebungen, die bundesweite Zusammenarbeit und das Ausbildungsangebot zu erweitern bzw. zu verbessern, sollten daher von allen Landesfeuerwehrverbänden unterstützt werden.

Literatur

- AFFRI, 2018. Herausforderung Waldbrand, Zukunftsperspektiven in Österreich. Waldbrand-Workshops in Wien und Salzburg.
- Arndt, N., Vacik, H., Koch, V., Arpacı, A., Gossow, H., 2013. Modeling human-caused forest fire ignition for assessing forest fire danger in Austria. *iForest*, 201(6), S. 315–325.

- Arpaci, A., Eastaugh, C.S., Vacik, H., 2013. Selecting the best performing fire weather indices for Austrian ecoregions. *Theoretical and Applied Climatology*, 114, S. 393–406. DOI: 10.1007/s00704-013-0839-7.
- Boboulos, M., Purvis, M.R.I., 2009. Wind and slope effects on ROS during the fire propagation in East-Mediterranean pine forest litter. *Fire Safety Journal*, 44, S. 764–769.
- Bundesforschungszentrum für Wald, 2012. Österreichs Wald. <http://bfw.ac.at> [12.09.2018].
- Chuvieco, E., Aguado, I., Yebra, M., Nieto, H., Salas, J., Martín, M.P., Vilar, L., Martínez, J., Martín, S., Ibarra, P., Riva, J. de la, Baeza, J., Rodríguez, F., Molina, J.R., Herrera, A., Zamora, R., 2010. Development of a framework for fire risk assessment using remote sensing and geographic information system technologies. *Ecological Modelling*, 221(1), S. 46–58.
- Conedera, M., Tinner W., 2010. Langzeit-Feuerökologie der Schweiz. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 161(11), S. 424–432.
- Eastaugh, C.S., Vacik, H., 2012. Fire size/frequency modelling as a means of assessing wildfire database reliability. *Austrian Journal of forest Science*, 129(3/4), S. 228–247.
- EFFIS, o. J. Copernicus. Emergency Mangement Service. http://effis.jrc.ec.europa.eu/static/effis_current_situation/public/index.html [16.09.2018].
- Extra-Blatt, 2018. Brand in Siegburg – Kanzlerin wünscht Verletzten schnelle Genesung. *Rheinische Anzeigebblätter*. <https://www.rheinische-anzeigenblaetter.de/mein-blatt/extra-blatt/siegburg/brand-in-siegburg-kanzlerin-wuenscht-verletzten-schnelle-genesung-31078582> [12.09.2018].
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M., 2014. 21st century climate change in the european alps – A review. *Science of the Total Environment*, 493, S. 1138–1151. DOI:10.1016/j.scitotenv.2013.07.050.
- Grabherr, W., 1936. Die Dynamik der Brandflächenvegetation auf Kalk- und Dolomitmöden des Karwendels. Beiheft Botanisches Centralblatt, LV/B 1(2), S. 1–94.
- Grabherr, W., 1950. Der größte Waldbrand Nordtirols von Georgenberg bis zum Hähnerbach im hinteren Achenal im Spätherbst 1705. *Tiroler Heimatblätter*, 7(9), S. 25–27.
- Heel, M., 2015. Waldbrände in den Nördlichen Kalkalpen – raumzeitliche Verteilung und Beispiele lokaler Auswirkungen. Dissertation, Universität Augsburg, Fakultät für Angewandte Informatik.
- Lexer, M.J., Rabitsch, W., Grabherr, G., Dokulil, M., Dullinger, S., Englisch, J., Essl, F., Gollmann, G., Gottfried, M., Graf, W., Hoch, G., Jandl, R., Kahrer, A., Kainz, M., Kirisits, T., Netherer, S., Pauli, H., Rott, E., Schleper, C., Schmidt-Kloiber, A., Schmutz, S., Schopf, A., Seidl, R., Vogl, W., Winkler, H., Zechmeister, H., 2014. Der Einfluss des Klimawandels auf die Biosphäre und Ökosystemleistungen. In: *Austrian Panel on Climate Change (Hrsg.), Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014*. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, S. 467–556.
- Müller, M.M., Vacik, H., Diendorfer, G., Arpaci, A., Formayer, H., Gossow, H., 2013. Analysis of lightning-induced forest fires in Austria. *Theoretical and Applied Climatology*, 111(1/2), S. 183–193.
- Müller, M.M., Vacik, H., Vales, E., 2015. Anomalies of the Austrian Forest Fire Regime in Comparison with Other Alpine Countries: A Research Note. *Forests*, 2015(6), S. 903–913.

- Müller, T., 2007. Wirkung von Glasscherben bei der Entzündung von Streuauflagen. Diplomarbeit, Abteilung für Bodenkunde und Bodenphysik, Institut für Geoökologie, TU Braunschweig, 92 S. (unveröffentlicht)
- Otto, H.J., 1980. Waldbauliche Überlegungen und Maßnahmen im Gefolge der Waldbrände von 1975 und 1976 in Niedersachsen. Forstwissenschaftliches Centralblatt, 99(1), S. 385–388.
- Pilat, D., 2018. Umgang mit Waldbrandwarnungen, Einsatzplanung und Einsatzstab, Erwartungen für die Zukunft. Herausforderung Waldbrand, Zukunftsperspektiven in Österreich. Waldbrand-Workshop Wien, 20. März 2018.
- Sass, O., 2014. FIRIA – Fire Risk and Vulnerability of Austrian Forests under the Impact of Climate Change. Endbericht. APRP 3rd Call 2010. <https://www.klimafonds.gv.at/report/acrp-3rd-call-2010> [19.12.2018].
- Saas, O. (Hrsg.), 2019. Waldbrände in den Nordtiroler Kalkalpen. Verbreitung – Geschichte – Regeneration. Innsbrucker Geographische Studien, 41, 218 S.
- Sass, O., Heel, M., Leistner, I., Stöger, F., Wetzler, K.F., Friedmann, A., 2012. Disturbance, geomorphic processes and regeneration of wildfire slopes in North Tyrol. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(8), S. 883–889.
- Tinner, W., Conedera, M., Ammann, B., Lotter, A. F., 2005. Fire ecology north and south of the Alps since the last ice age. *Holocene*, 15(8), S. 1214–1226.
- Trnka, M., Balek, J., Štěpánek, P., Zahradníček, P., Možný, M., Eitzinger, J., Žalud, Z., Formayer, H., Turňa, M., Nejedlík, P., Semerádová, D., Hlavinka, P., Brázdil, R., 2016. Drought trends over part of Central Europe between 1961 and 2014. *Climate Research*, 70(2), S. 143–160. DOI: 10.3354/cr01420.
- Vacik, H., Arndt, N., Arpacı, A., Koch, V., Müller, M.M., Gossow, H., 2011. Characterisation of forest fires in Austria. *Austrian Journal of Forest Science*, 128(1), S. 1–32.
- ZAMG, 2018. Information zur Waldbrandgefahr. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/wetter/wetter-oesterreich/waldbrand> [13.04.2018].

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

B Hydrologische Extremereignisse

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

9 Niederwasser

Gregor Laaha*

Zusammenfassung

Niederwasser- und Dürreereignisse sind eine Folge langanhaltender meteorologischer Trockenheit die sich im Wasserkreislauf fortpflanzt und alle Komponenten des Wasserkreislaufs in unterschiedlichem Ausmaß umfasst. Aufgrund des Klimawandels ist in manchen Regionen des Flachlands mit einer Verschärfung der sommerlichen Niederwassersituation zu rechnen. Im alpinen Bereich kommt es hingegen in der winterlichen Niederwassersaison zu günstigeren Niederwasserverhältnissen. Um die Niederwasserverhältnisse zu charakterisieren und die Folgen auf Wassersektoren besser abschätzen zu können, wurden unterschiedliche Kennwerte entwickelt, die Aspekte wie Abflussmagnitudo, Dauer und Fehlvolumen von Ereignissen, saisonale Abflussanomalien und den Abflussrückgang quantifizieren. Für die optimale Bewirtschaftung der Wasserressourcen im Sinn der Qualitätsziele der EU Wasserrahmenrichtlinie (guter ökologischer Status und nachhaltige Wassernutzung) steht das Instrument des *River Basin Management Plans* zur Verfügung. Für den extremen Niederwasserfall sollten Maßnahmen in der Form eines *Drought Management Plans* entwickelt werden, der ein Monitoring und Warnstufensystem umfasst und Prioritäten unterschiedlicher Nutzungen festlegt.

Abstract

Low flow and drought events are a consequence of persisting atmospheric water deficits that propagate through the water cycle and affect its components to different extents. Because of climate change the low flow situation in summer is expected to exacerbate in parts of the flatland. For the Alpine region more favourable low flow conditions in the winter season are expected. Low flows are characterised by a range of characteristics that cover aspects such as low flow magnitude, duration and deficit volume of drought events, seasonal discharge anomalies, and streamflow recessions. These characteristics are differently relevant for estimating impacts on various water sectors. River Management Plans offer an instrument for the management of water resources during normal low flow conditions according to the aims of the EU Water Framework Directive (good ecological status and sustainable water use). For extreme low flow events *Drought Management Plans* shall be developed that combine monitoring with warning levels and assign priorities to competing water uses.

* Gregor Laaha, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Statistik, gregor.laaha@boku.ac.at.

Kernaussagen

- Extreme Niederwässer entstehen durch Überlagerung atmosphärischer Prozesse mit Einzugsgebietsprozessen auf und können in ihrer Intensität von meteorologischen Dürreereignissen abweichen.
- In den Alpen treten extreme Niederwässer in überdurchschnittlich kalten Wintern auf die auf trockene Vorbedingungen im Herbst treffen.
- Zur Charakterisierung extremer Niederwasserereignisse und ihrer Auswirkung auf Wirtschaftssektoren ist eine Reihe unterschiedlicher Kennwerte erforderlich.
- In Österreich sollte ein konsistentes Niederwasser- und Dürre Monitoring- und Vorhersagesystem aufgebaut werden das eine zentrale Rolle innerhalb eines zukunftsweisenden Dürre Managements Plans einnehmen soll.

Key Points

- Extreme low flows are generated by atmospheric and catchment processes and can therefore differ from meteorological drought events.
- In the Alps extreme low flows occur when cold winters follow dry preconditions in autumn.
- A range of different low flow indices are required for characterising extreme low flow events and their impacts on water related sectors.
- In Austria a consistent low flow and drought monitoring and forecasting system is missing. It shall be established in order to play a key role in an advanced Drought Management Plan.

9.1 Einleitung

Niederwasser und Dürren zählen weltweit zu den größten Naturgefahren und auch der alpine Raum Österreichs ist in zunehmendem Maße betroffen. Ein bekanntes Ereignis war das Dürrejahr 2003 das in weiten Teilen Europas zu enormen Schäden geführt hat. Niederschlagsdefizite im Sommerhalbjahr (siehe Ionita et al., 2017) führten zu Umweltschäden und Auswirkungen auf viele Wirtschaftssektoren, und trafen vor allem die Land- und Forstwirtschaft, Industrie, Wasserwirtschaft und Energieerzeugung. Die monetären Schäden wurde europaweit mit rund 11 Mrd. € beziffert (EurAqua, 2004). Die hohen Temperaturen, die mit der Trockenheit im Sommer einhergingen, bildeten eine gesundheitliche Bedrohung die europaweiten Schätzungen zufolge zu 23.000 bis 70.000 (Robine et al., 2007) Todesopfern führte. Damit ist das Dürreereignis 2003 eine der größten Naturkatastrophen die Österreich und Europa je heimgesucht hat. Mit weiteren Ereignissen in den Sommern 2001 und 2015 und in den Wintern 2002 und 2012 ist in den letzten Jahren insgesamt eine Häufung von extremen Niederwässern in Österreich zu verzeichnen. Für eine vorausschauende Planung ist es wichtig die niederwassergenerierenden Prozesse zu verstehen und deren zukünftige Entwicklung einzuschätzen.

Dieser Beitrag gibt einen Überblick über Entstehungsprozesse und Bestimmungsmethoden extremer Niederwässer in Österreich mit besonderer Berücksichtigung des Alpenraums. Unter extremen Niederwässern werden hierbei Ereignisse mit Abflüssen unter den langjährig mittleren Niederwasserverhältnissen bezeichnet. Die Bestimmungsmethoden beinhalten die Berechnung unterschiedlicher Kennwerte aus Pegelbeobachtungen, Verfahren zur regionalen Übertragung von Kennwerte auf andere Gewässerstellen, sowie zur Rekonstruktion historischer und Prognose zukünftiger Niederwasserverhältnisse. Möglichkeiten des Niederwassermanagements werden im europäischen Kontext und anhand von Fallbeispielen für den Alpenraum aufgezeigt.

9.2 Niederwasserprozesse und ihre Veränderungen

Niederwässer sind ein Ergebnis einer komplexen Interaktion von meteorologischen Prozessen mit dem hydrologischen Verhalten des Einzugsgebiets (Tallaksen und Lanen, 2004; Laaha et al., 2013a). Ausgangspunkt extremer Niederwässer sind meteorologische Bedingungen welche die Infiltration von Wasser in den Boden unterbinden und in weiterer Folge Perkolation ins Grundwasser reduzieren. Bezüglich ihrer Genese sind zwei Typen von Niederwasser zu unterscheiden.

Der erste Typ tritt infolge langanhaltender atmosphärischer Trockenheit auf. Persistente Niederschlagsdefizite zeigen sich zunächst in einer monatlichen oder saisonalen Niederschlagsanomalie (*meteorological drought*) die sich mit zunehmender Dauer des Ereignisses im Wasserkreislauf fortpflanzt und einen Rückgang der Wasserressourcen im Einzugsgebiet bewirkt (*hydrological drought*). Dabei wirkt sich die Trockenheit zunächst auf den Boden aus (*soil moisture drought*) und führt in weiterer Folge zu sinkenden Grundwasserständen (*ground-water drought*) und abnehmenden Abflüssen in Fließgewässern (*low-flows*). In ähnlicher Weise wie die Grundwasserspeicher sind auch künstliche Speicher und Seen von der Trockenheit betroffen. Während sommerlicher Hitzeperioden werden Niederschlagsanomalien durch Verdunstungsverluste verstärkt. In Österreich treten extreme Sommerniederwässer daher typischerweise von August bis September auf bevor sich die Situation durch mildere Temperaturen und das Einsetzen herbstlicher Niederschläge entschärft. In extremen Jahren können die Wasserdefizite im Einzugsgebiet bis in den Winter fort dauern und dann besonders schwerwiegende Ereignisse bewirken.

Der zweite Typ von Niederwasser tritt infolge von Frostprozessen im Winter auf. In dieser Jahreszeit bewirken die niedrigen Temperaturen eine Speicherung von Niederschlägen in der Schneedecke und einen Rückgang der Infiltration in den Boden. Die Infiltration kann auch durch Frieren der Wasserwege im Un-

tergrund unterbunden werden. Das damit verbundene Wasserdefizit pflanzt sich analog zur Genese von Sommerniederwässern im Wasserkreislauf fort, bis Tauwetterperioden im Frühjahr eine Remobilisierung des gefrorenen Wassers bewirken. Für das saisonale Abflussverhalten spielt daher neben den Niederschlagsanomalien auch die zeitliche Umverteilung des Wassers eine Rolle, wobei sich das Wasservolumen der Schneedecke auf die Niederschlagsbilanz des Frühjahrs aufschlägt. In extremer Höhenlage können kleinere Bäche infolge strenger Frostperioden einfrieren wodurch auch in permanenten Gewässern die Abflüsse zum Erliegen kommen. Im Sommerhalbjahr fallen Österreichs Gewässer hingegen kaum trocken und Null-Abflüsse treten fast ausschließlich in intermittierenden Gewässern wie etwa Erosionsrinnen oder Karstbächen auf.

Der relative Einfluss von Sommer- und Winterprozessen auf das Niederwasserregime spiegelt sich im Auftretenszeitpunkt der Niederwässer wider und kann deshalb anhand von Saisonalitätsindizes wie das Verhältnis aus Sommer- und Winterniederwasserabfluss quantifiziert werden (Laaha und Blösch, 2006a). Abbildung 01 zeigt dieses Saisonalitätsverhältnis für österreichische Einzugsgebiete und lässt eine deutliche Gliederung in zwei Zonen mit ausgeprägter Sommer- bzw. Wintersaisonalität erkennen. Die Zone mit ausgeprägter Wintersaisonalität umfasst den alpinen Bereich von Vorarlberg bis zum Wechselgebiet mit einer Nord-Süd Erstreckung von den nördlichen Kalkalpen bis Oberkärnten. Die Intensität der Saisonalität und der mittlere Auftretenszeitpunkt variieren mit der Höhenlage der Einzugsgebiete, wobei hochalpine Gebiete die stärkste Saisonalität und einen späteren Auftretenszeitpunkt aufweisen. Primär treten hier die Niederwässer im Winter zwischen Dezember und März auf. Im Flach- und Hügelland im Norden und Osten treten Niederwässer hingegen im Sommer zwischen Juni und November auf. Auch hier variiert die Intensität der Niederwässer mit der Höhenlage wobei die Intensität mit abnehmender Seehöhe und zunehmender Kontinentalität des Klimas nach Osten zunimmt. Die Saisonalität von Niederwässern spielt bei der Beurteilung der Auswirkungen von Extremereignissen eine zentrale Rolle und dient als Prozessindikator bei der Niederwassermodellierung. Für die wasserwirtschaftliche Einordnung der Ereignisse spielen neben dem minimalen Niederwasserabfluss (Magnitude) auch Abflussanomalien eine Rolle, die eine Betrachtung der Niederwasserverhältnisse außerhalb der typischen Niederwassersaison erfordern.

Primär werden extreme Niederwasserereignisse von Niederschlags- und Temperaturanomalien ausgelöst. Zusätzlich zur hydroklimatischen Situation bestimmen Einzugsgebietsprozesse die Niederwasserentstehung (Peters, 2003; Loon, 2013; Haslinger et al., 2014). Dabei sind Niederwasserabflüsse zunächst von der Einzugsgebietsgröße abhängig. Betrachtet man die Niederwasserabflüsse jedoch als flächenbezogene Abflussspende (Abbildung 02) wird ein klares Muster aus trockenen und feuchten Regionen erkennbar welches der natur-

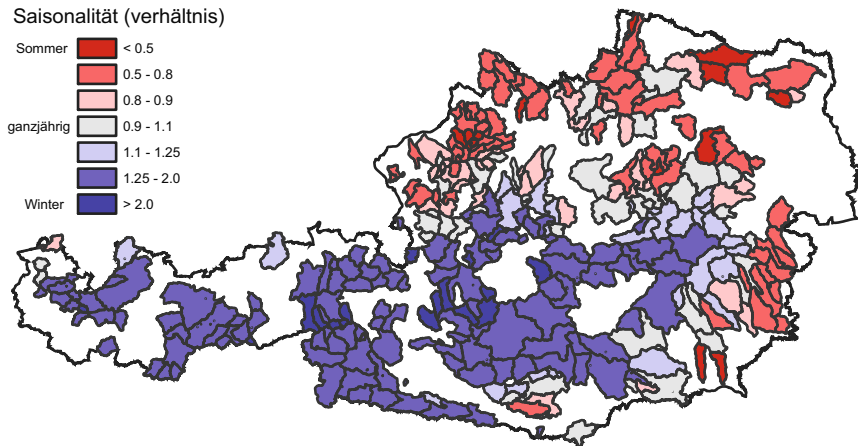


Abbildung 01: Saisonalitätsverhältnis aus Sommer- Q_{95} zu Winter- Q_{95} (325 Zwischen-EG, 1977–1996). Rot zeigt Sommerniederrasser, blau zeigt Winterniederrasser.

Figure 01: Seasonality ratio of summer- Q_{95} and winter- Q_{95} (325 residual catchments, 1977–1996). Red indicates summer low flows, blue indicates winter low flows.

Quelle: modifiziert nach Laaha und Blöschl, 2006b

räumlichen Gliederung Österreichs folgt. Landschaftsfaktoren wie topographische Neigung, Bodenmächtigkeit und Textur, Geologie und Landbedeckung bestimmen den Anteil des Niederschlags der in den Boden infiltriert und als Bodenfeuchte gespeichert wird. Ein Teil versickert in den Untergrund wo hydrogeologische Eigenschaften wie Speichervolumen und die Transmissivität das Auslaufverhalten des Grundwasserkörpers und somit die zeitliche Dynamik des Abflusses während Trockenperioden bestimmen. Die komplexe Interaktion dieser Prozesse mit den meteorologischen Signalen prägt das Niederwasserregime der Flüsse. In Österreich treten große Niederwasserspenden und somit milde Niederwasserereignisse in Gebieten mit hohen Niederschlägen und guten Speichereigenschaften auf und umfassen die großen Flusstäler (Inn, Enns, Salzach, Drau, Mur) sowie Gebiete niedriger und mittlerer Höhenlage der Alpen mit günstigen Speichereigenschaften. Winkler et al. (2016) wiesen in diesem Zusammenhang auf die Bedeutung reliktscher Blockgletscher hin die im österreichischen Alpenraum weit verbreitet sind. In diesen Gebieten reagieren die Abflüsse auf Niederschläge sehr langsam und der Basisabfluss ist hoch. Kleine Niederwasserspenden und somit strenge Niederwasserereignisse treten hingegen in Gebieten mit geringen Niederschlägen (Flach und Hügelland im Norden und Osten) sowie in hochalpinen Gebieten und in Gebieten mit geringem Wasserspeichervermögen (Flyschzone und Böhmisches Masse) auf. Hier ist der Basisabfluss gering und das Abflussverhalten mitunter sehr volatil (*flashy*).

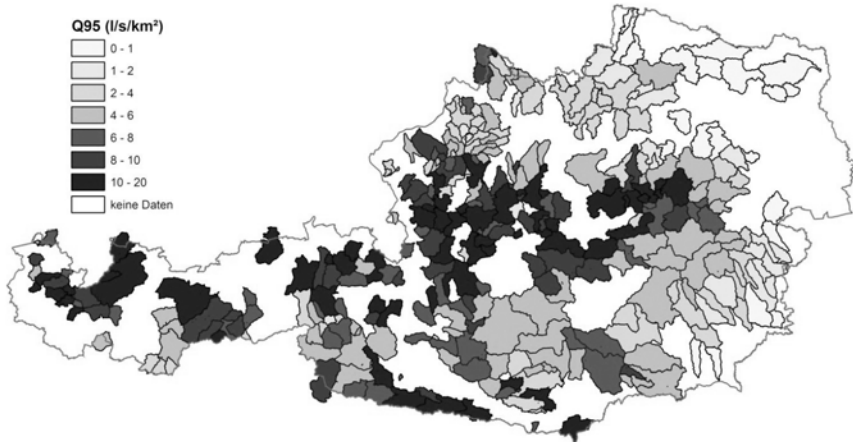


Abbildung 02: Mittlere Niederwasserspende Q_{95} (325 Zwischen-EG, 1977–1996).

Figure 02: Mean specific low flow discharge Q_{95} (325 residual catchments, 1977–1996).

Quelle: Laaha und Blöschl, 2006b

Vielorts wurde das natürliche Niederwasserregime durch den Klimawandel und durch direkte anthropogene Einflüsse erheblich verändert. Bezüglich Klimawandel sind Erderwärmung und Niederschlagsänderungen die wichtigsten Faktoren. Höhere Temperaturen führen zu einer verstärkten Verdunstung wodurch sich die sommerliche Niederwassersituation verschärfen kann. Im Winterhalbjahr führen höhere Temperaturen zum Ansteigen der Schneefallgrenze und zu einer Abschwächung der Frostprozesse, woraus günstigere Niederwasserhältnisse resultieren. Im Frühjahr kommt es aber infolge der tendenziell früheren und geringeren Schneeschmelze zu einem rascheren Rückgang der Abflüsse, was einen früheren Beginn der sommerlichen Niederwasserperiode bewirken kann. Wo sich diese Effekte mit einer erhöhten Verdunstung im Sommer überlagern ist mit strengeren Niederwasserhältnissen zu rechnen. Eine Tendenz zu persistenteren Trockenperioden würde die Sommerniederwässer weiter verschärfen.

Ein solcher Trend zu heißeren, trockeneren Sommern wurde vom IPCC Report für Südosteuropa aufgrund von Beobachtungen und Klimamodellszenarien festgestellt (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012). Die Niederwassertrends der letzten Jahre in Abbildung 03 (Blöschl et al., 2017) zeigen, dass Gebiete im Osten und Süden Österreichs diesem Trend folgen und somit eine zukünftige Verschärfung der Niederwassersituation erwarten lassen. Einen Anstieg der Niederwasserabflüsse hin zu mildereren Niederwasserhältnissen zeigen hingegen alpine Gebiete. Für die Gebiete nördlich der Alpen lassen die Trends im Einklang mit Klimaprognosen ganzjährig keine oder geringe Veränderungen des Niederwasserregimes erwarten. Generell ist die Aussagekraft

von Trendbetrachtungen hinsichtlich zukünftiger Änderungen durch die kurzen Datenreihen und Nichtlinearität hydrologischer Systeme jedoch beschränkt.

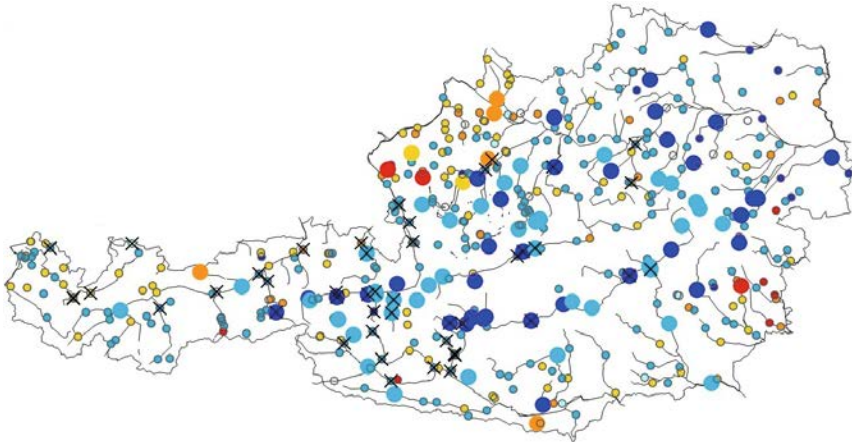


Abbildung 03: Trends der Jahresniederwasserdurchflüsse Q_{95} für die Periode 1976–2014. Große Kreise blau: steigende Trends, Große Kreise rot: fallende Trends, kleine Kreise: Trends nicht signifikant. Kreuze zeigen Pegel, die durch Überleitung/Speicher beeinflusst sind.

Figure 03: Trends of annual low flows Q_{95} for the 1976–2014 period. Large circles blue: increasing trends, large circles red: declining trends, small circles: trends not significant. Crosses indicate gauges affected by water transfer/storage.

Quelle: Blöschl et al., 2017

Auch direkte anthropogene Eingriffe haben gravierende Veränderungen des Niederwasserregimes hervorgerufen, welche die Effekte des Klimawandels um ein Vielfaches übertreffen können (Gustard und Demuth, 2008). Zu den gravierendsten Eingriffen zählen Speicherseen die eine Abflussumlagerung im Zeitraum von Tagen, Monaten oder eines Wasserhaushaltsjahres ermöglichen. Von Kraftwerksspeichern beeinflusste Gewässer weisen einen charakteristischen Tages- und Wochengang des Abflusses auf, der eine starke Veränderung des natürlichen Niederwasserregimes darstellt. Speicher können auch im Rahmen einer Niederwasserbewirtschaftung zur Abflussaufhöhung eingesetzt werden, was günstigere Niederwasserhältnisse im Sommer bewirken soll. Wasserentnahmen von Landwirtschaft, Industrie, Wasserversorgung oder Energieproduktion führen hingegen zu einer Abflussreduktion bis hin zu einer wasserrechtlich festgelegten Restwassermenge, die auch unter den natürlichen Niederwasserhältnissen liegen kann. Abbildung 04 zeigt die Beeinflussungen der Abflussstellen an österreichischen Gewässern. Änderungen des Niederwasserabflusses sind bei den Typen Überleitung/Speicher, KW mit Einleitungen,

und Ein-/Ausleitungen zu erwarten, während von Laufkraftwerken in der Regel keine nennenswerte Niederwasserbeeinflussung ausgeht.

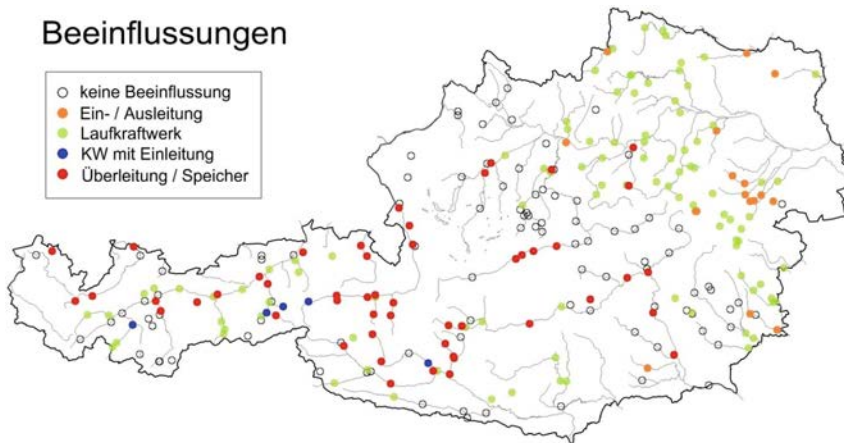


Abbildung 04: Beeinflussungen der Abflussmessstellen. Datengrundlage: Stationsdaten und Pegelfußnoten des Hydrografischen Jahrbuchs.

Figure 04: Disturbances of stream gauges, based on station data and footnotes of the annual hydrographical book.

Quelle: Schöner et al., 2011

9.3 Berechnung von Niederwasserabflüssen

9.3.1 Niederwasserkenngößen

Anders als bei Hochwässern, bei denen meist Abflüsse einer bestimmten Überschreitungswahrscheinlichkeit (Jährlichkeit) von Interesse sind, lassen sich Niederwässer in Abhängigkeit von der untersuchten Fragestellung durch unterschiedlichste Kenngrößen beschreiben (Tallaksen und Lanen, 2004; Gustard und Demuth, 2008; Laaha et al., 2013a). Diese Kenngrößen können sich auf Niederwasserabflüsse oder auf Niederwasserperioden unter einem Schwellenwert beziehen.

Bei der ersten Gruppe werden Niederwässer anhand von Abflusskennwerten charakterisiert. Hierbei sind in der Literatur die folgenden Kennwerte gebräuchlich:

- Abflussquantile Q_x %: Der Abfluss der an x % der Tage überschritten wird. Für permanente Gewässer werden meist Abflussquantile mit 95 % oder 90 % Überschreitungswahrscheinlichkeit herangezogen. Eine Analoge Form des Kennwertes bezeichnet das Quantil anhand der durchschnittlichen Über-

schreitungsdauer in Tagen, wobei in etwa der in der Schweiz gebräuchliche Kennwert Q_{374} dem international gebräuchlicherem Q_{95} entspricht.

- Das mittlere Jahresniederwasser MNQ: ist das arithmetische Mittel der Jahresniederwässer (kleinster Abfluss während eines Kalenderjahres) einer zusammenhängenden Reihe von Jahren. Es entspricht dem Erwartungswert der Verteilung der Jahresminima Serie. Der Kennwert wird häufig auf Basis einer geglätteten Abflusszeitreihe ermittelt um kurzfristige Störungen durch anthropogene Maßnahmen zu bereinigen. Häufig wird hierbei ein 7-Tages Gleitfenster verwendet und der resultierende Kennwert als MNQ_7 oder MN_7Q bezeichnet.
- Extreme Niederwasserabflüsse: Anstatt dem Mittelwert können auch Jahresniederwässer mit einer bestimmten Auftretenswahrscheinlichkeit von Interesse sein. Diese werden durch Extremwertstatistik der Jahresminima ermittelt und eignen sich zur Charakterisierung von Extremereignissen die durchschnittlich nur alle T Jahre auftreten. Für Niederwasserfragestellungen sind Wiederkehrintervalle von $T = 10$ bis 100 Jahren gebräuchlich.

Bei der zweiten Gruppe von Kennwerten werden Niederwasserperioden unter einem Abflussschwellenwert betrachtet und statistisch ausgewertet. Die Niederwasserperioden geben Aufschluss über die Dauer und das Abflussdefizit von Niederwasserereignissen die zur Ermittlung jahresbezogener Kennwerte wie

- maximale Dauer und Volumen (D_{max}, V_{max})
- kumulative Dauer und Volumen (D_{sum}, V_{sum})

herangezogen werden. Die so abgeleiteten Jahresreihen werden wiederum durch langjährigen Mittelwerte und Extremwertstatistiken charakterisiert. Bei der Ermittlung der Niederwasserperioden werden in der Fachliteratur unterschiedliche Schwellenwerte empfohlen. Bei Verwendung eines konstanten Schwellenwerts (z. B. Q_{80}) erhält man mit Jahresniederwässern kongruente Ereignisse welche die Angabe ihres Beginn- und Endzeitpunkts, sowie ihrer Dauer und ihres Fehlvolumens ermöglichen. Saisonale Schwellenwerte (z. B. $Q_{80,som}$, $Q_{80,win}$) dienen einer differenzierten Betrachtung von Sommer- und Winterniederwässern. Zeitlich variierenden Schwellenwerten (Quantile auf Tages- oder Monatsbasis) werden schließlich bei der Ermittlung saisonaler Abflussanomalien eingesetzt und helfen bei der Untersuchung der zeitlichen Genese von Niederwasserereignissen. Die Anomalien können analog zu atmosphärischen Dürreindizes als normalverteilter Indexwert angegeben werden und werden in diesem Fall als

- standardisierter Abflussindex (standardized streamflow index)

bezeichnet. Da die Anomalien aber nicht nur in Niederwasserperioden auftreten sind sie als Niederwasserkennwert nur bedingt geeignet.

Eine dritte Gruppe von Kennwerten beschreibt die Rückgangsdynamik der Abflüsse. Zu diesen Kennwerten gehören:

- Basisabflussindex
- und Rezessionskonstante.

Der Basisabflussindex ist ein Maß für den Abflussanteil aus langsamen Speicherkomponenten des Einzugsgebietes, die in Niederwasserperioden den Abfluss bilden. Die Rezessionskonstante ist ein Maß für die mittlere Rückgangsgeschwindigkeit der Abflussganglinie nach Abklingen einer Hochwasserspitze. Ein rasches Rückgangsverhalten begünstigt strengere Niederwasserverhältnisse.

Hinweise über die genaue Definition der Kennwerte und deren Berechnung gibt das WMO Manual on low flow estimation and prediction (Gustard und Demuth, 2008). Die Berechnungsroutinen wurden in der Form des R-Software Paketes *lfstat* (Koffler et al., 2016) veröffentlicht und sind für Niederwasseranalysen frei erhältlich.

9.3.2 Bestimmung aus Langzeitbeobachtungen

Die Ermittlung von Niederwasserkenngrößen erfolgt am besten aus langjährigen Zeitreihen der Abflusstagesmittel (QT) und eine minimale Beobachtungsdauer von etwa 20–30 Jahren wird üblicherweise empfohlen (DVWK, 1983). Diese Reihen sollten einer Qualitätskontrolle unterzogen werden um den Einfluss von Messfehlern und Störungen gering zu halten. Hinweise hierzu gibt hier das DWA Merkblatt »Statistische Analyse von Niedrigwasserkenngrößen« (in Ausarbeitung) das eine Überarbeitung der DVWK Regeln 120 und 121 darstellt (DVWK, 1983, 1992). Abflussreihen der Pegelstellen des Hydrographischen Dienstes in Österreich wurden einer strengen Qualitätsprüfung unterzogen und weisen demnach eine hohe Qualität auf, es sind jedoch die besonderen Gegebenheiten an der Messstelle zu berücksichtigen (Abbildung 04).

9.3.3 Ermittlung aus kurzen Messreihen

Auch kurze Messreihen und Einzelmessungen können zur Ermittlung von Niederwasserkenngrößen herangezogen werden. Sie sollten aber einer Klimakorrektur unterzogen werden, um sie mit den langjährigen mittleren Kennwerten vergleichbar zu machen (Laaha und Blöschl, 2005). Abbildung 05 zeigt

die Genauigkeit verschiedener Klimakorrekturen des Niederwasserabflusses Q_{95} in Abhängigkeit von der Reihenlänge im Vergleich zu einer Standardperiode von 20 Jahren. Kennwerte, die aus Messreihen von 5 Jahren abgeleitet werden, sind somit genauer als mittels Regionalisierung ermittelte Kennwerte, während Kennwerte aus Einzelmessungen bei Niederwasserhältnissen eine etwas geringere Genauigkeit aufweisen.

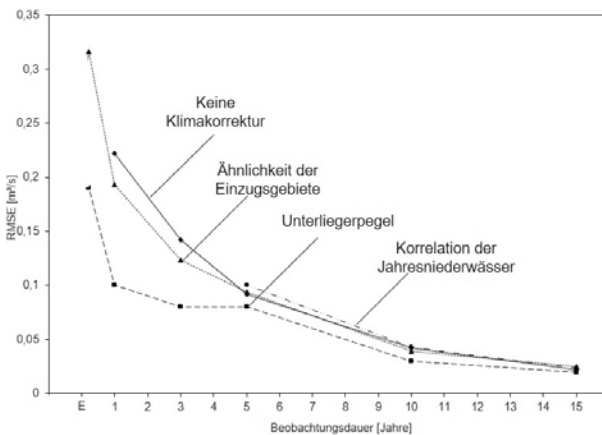


Abbildung 05: Einfluss von Beobachtungsdauer und Klimakorrekturen auf die Fehlerstandardabweichung (RMSE). Angaben beziehen sich auf einen regionalen Vergleich der Kennwerte Q_{95} (m^3/s) kurzer Reihen zum Q_{95} der Standardperiode 1977–1996.

Figure 05: Influence of record length and climate correction on the error standard deviation (RMSE). Figures correspond to a regional comparison of index Q_{95} (m^3/s) of short records with Q_{95} of the standard period 1977–1996.

Quelle: Laaha und Blöschl, 2007a

9.3.4 Ermittlung für Stellen ohne Abflussbeobachtung

Für Stellen ohne Abflussdaten können Niederwasserkennwerte durch regionale Übertragung aus benachbarten Gebieten mit ähnlichem hydrologischem Verhalten abgeleitet werden. Hierzu sind in erster Linie statistische Regionalisierungsverfahren geeignet, insbesondere multiple Regression und Kriging. Zudem werden Niederschlags-Abflussmodelle mit regionalisierten Parametern verwendet, die sich in vergleichenden Studien aber als weniger genau erwiesen haben (Engeland und Hisdal, 2009; Salinas et al., 2013).

Bei der multiplen Regression erfolgt die regionale Übertragung durch einen linearen Zusammenhang zwischen Niederwasserkennwert und Einzugsgebietskenngrößen. Es kommen additive und multiplikative Regressionsmodelle

zur Anwendung, wobei die Wahl des Ansatzes aufgrund theoretischer Überlegungen und einer Analyse der Residuenstruktur erfolgt. So wird in Vogel und Kroll (1992) die multiplikative Form empfohlen da sie mit einem aus einem Oberflächenabflussmodell (hillslope runoff model) abgeleiteten Niederwassermodell konsistent ist, während Laaha und Blöschl (2006c) die additive Form für flächenbezogene Niederwasserspenden besser zutreffend fanden. Bei der Anwendung der multiplen Regression auf Niederwasserkennwerte treten zusätzlich zu den allgemeinen statistischen Voraussetzungen eine Reihe typischer Probleme auf, deren Auswirkungen gemeinsam mit spezifischen Lösungsansätzen in Tabelle 01 aufgelistet sind.

Tabelle 01: Multiple Regression – Probleme und Lösungsansätze für Niederwassermodelle.
Table 01: Multiple regression – symptoms and remedies for low flow models.
Quelle: modifiziert nach Laaha und Blöschl, 2006b

Problem	Auswirkung	Lösungsansatz
Niederwasserabflüsse sind räumlich korreliert (insbesondere geschachtelte Einzugsgebiete)	Korrelierte Pegel erhalten zu hohes Gewicht bei der Ermittlung der Regressionskoeffizienten	<ul style="list-style-type: none"> – Disaggregation in Pegel-zwischeneinzugsgebiete – Gewichtete Regression
Heterogenität des Modellgebietes (verschiedene Prozesse wie Sommer- und Winterniederwässer)	Ein Modell für verschiedene Prozesse, hydrologisch nicht sinnvoll und wenig aussagekräftig	<ul style="list-style-type: none"> – Gruppierung in homogene Regionen – Saisonale Stratifizierung in Sommer- und Winterkennwert
Überdominanter Einfluss der Gebietskenngröße	Numerische Probleme bei der Ermittlung der Regressionskoeffizienten	– Transformation der Niederwasserabflüsse in flächenbezogene Abflussspenden
Kollinearität (Interkorrelationen) der Einzugsgebietskenngrößen	Überanpassung des Modells an die Stichprobe (künstlich erhöhtes Bestimmtheitsmaß R^2 , aber schlechtere Prognosegüte)	<ul style="list-style-type: none"> – Schrittweise Regression – Kollinearitätsdiagnostik – Hauptkomponentenregression
Ausreißer und Hebelpunkte	Hebelpunkte ziehen Regressionsgerade an, Modell an Pulk der Daten schlechter angepasst.	<ul style="list-style-type: none"> – Erkennung von Hebelpunkten anhand Cook'scher Distanz – Robuste Regression

Beim Kriging Verfahren erfolgt die regionale Übertragung aufgrund der räumlichen Korrelation der Messwerte. Ordinary-kriging ist für Abflüsse an Gewässerstellen weniger geeignet, da in diesem Verfahren die Gewässertopologie nicht berücksichtigt wird. Für die Regionalisierung von Abflüssen entlang des Gewässernetzes wurde daher das Top-kriging Verfahren (Skøien et al., 2006,

2014) entwickelt. Das Verfahren verwendet ein mehrdimensionales Variogrammodell, das zusätzlich zur räumlichen Distanz die Größe und den Überlappungsgrad der Einzugsgebiete berücksichtigt. Gebiete am selben Fluss erhalten aufgrund des Modells höhere Kriging-Gewichte als Gebiete benachbarter Gewässer die eine ähnliche Distanz aufweisen (Laaha et al., 2013b). Die Ergebnisse einer Niederwasserschätzung für Österreich (Laaha und Blöschl, 2007b; Laaha et al., 2014) zeigen, dass das Top-Kriging Verfahren für größere Flüsse bei hoher Pegelnetzdicke besonders gut geeignet ist und dort die Güte der Regressionsschätzung übertrifft. Bei Extrapolation in höhergelegene Regionen (Teileinzugsgebiete und Gebiete ohne Abflussbeobachtungen) treten jedoch Extrapolationsfehler auf die in einer geringeren Prädiktionsgüte resultieren als die eines Regressionsmodells das die Höhenabhängigkeit in die Prädiktion einbezieht.

9.3.5 Rekonstruktion historischer Niederwasserverhältnisse

Abflussreihen sind üblicherweise zu kurz um die Niederwasserereignisse der letzten Jahre im Kontext der Klimavariabilität beurteilen zu können. Die Niederwasserverhältnisse einer längeren Vergangenheit können durch Rekonstruktionsverfahren ermittelt werden. Bei der Rekonstruktion kommen drei Ansätze zur Anwendung, die unterschiedliche Informationsquellen verwenden. Im ersten Ansatz werden Niederschlags- und Temperatursimulationen aus Klimamodellen verwendet um ein hydrologisches Abflussmodell anzutreiben. Aufgrund der Stochastik der Simulationen ist die zeitliche Auflösung auf etwa 30–50 Jahre beschränkt, und die rekonstruierten Signale sind mit den kumulierten Unsicherheiten aus Klima- und Abflussmodell behaftet. Innerhalb der zeitlichen Aggregate sind saisonale Aussagen jedoch möglich. Im zweiten Ansatz wird ein statistischer Zusammenhang zwischen Proxidaten und Niederwasserabflüssen hergestellt und zur Abflussrekonstruktion einer längeren Vergangenheit herangezogen. Für die Niederwasserrekonstruktion haben sich Jahrringchronologien trockenresistenter Baumarten wie die Schwarzföhre als gut geeignet erwiesen (Karanitsch-Ackerl et al., 2017). Die Rekonstruktionen haben eine jährliche Auflösung, saisonale Aussagen sind nur beschränkt möglich. Die Erstellung von Jahrringchronologien erfordert eine Reihe von Analyseschritten und Korrekturen die zu erheblichen Unsicherheiten bei der Rekonstruktion historischer Ereignisse führen können. Im dritten Ansatz werden Niederwässer und Dürren aus historischen Aufzeichnungen rekonstruiert. Die Informationen sind zwar eher qualitativer Natur, ermöglichen aber eine gute Einschätzung von Extremereignissen.

Eine Rekonstruktion von Sommerniederwasser- und Dürreereignissen der letzten 400 Jahre wurde im Rahmen des Projekts DALF-Pro für den Nordosten Österreichs erstellt (Karانيتsch-Ackerl et al., 2019). Die Rekonstruktion basiert auf der trendfreien Jahrringchronologie der Schwarzföhre für das Weinviertel, die in Karانيتsch-Ackerl et al. (2017) näher beschrieben ist. Die Auswertungen der für die Zaya in Abbildung 06 zeigen, dass die heutige Niederwasserhältnisse dieser Region im Mittel der Bandbreite historischer Verhältnisse liegen dürften, also nicht außergewöhnlich sind. Wenn man den Auswertungen folgt ist eine Häufung von Trockenjahren am Beginn des 17. Jhd. (etwa 1705–1710), am Ende des 18. Jhds. (1780–1810) und in der Mitte des 19. Jhds. (1830–1840) zu erkennen, in denen die Niederwasserabflüsse um rd. 10 bis 20 % geringer als im Messzeitraum waren. Da die Schwankungen im Bereich der Unsicherheiten der Rekonstruktionen liegen (Fehlerstandardabweichung rd. 50 % vom mittleren Sommerniederwasserabfluss) sollten zusätzliche Informationen bei der Interpretation der Ergebnisse einbezogen werden. Abbildung 07 zeigt die aus den Rekonstruktionen abgeleitete extreme Niederwasser- und meteorologische Dürreereignisse (Zeilen a–c) in einer Zusammenschau mit anderen historischen Analysen und Rekonstruktionsstudien mit Relevanz für das Weinviertel. Für detaillierte Informationen siehe Karانيتsch-Ackerl et al. (2017).

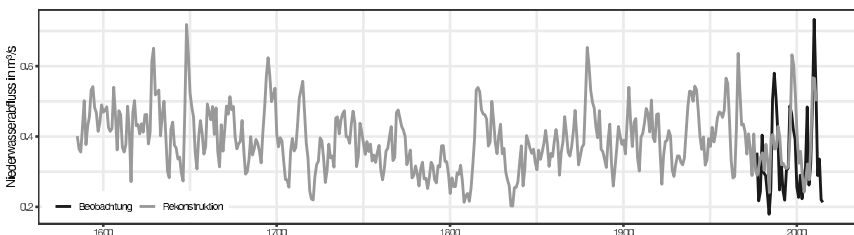


Abbildung 06: Rekonstruierter Sommer-Niederwasserabfluss (kleinstes 7-Tagesmittel NM_{7Q} in m^3/s) der Zaya.

Figure 06: Reconstructed summer low flow (annual summer 7-day minimum NM_{7Q} in m^3/s) of river Zaya.

Quelle: Daten basierend auf Karانيتsch-Ackerl et al., 2019

9.3.6 Prognose zukünftiger Niederwässer

Zur der Prognose zukünftiger Niederwasserhältnisse werden meist Modellkaskaden aus Klimamodellen und Hydrologischen Modellen verwendet. Klimaimpaktanalysen bestehen in der Regel aus drei Schritten (Blöschl et al., 2017): (a) Simulationen mit einem oder mehreren Globalen Zirkulationsmodellen (GCMs) unter Definition bestimmter Szenarien (meist IPCC Szenarien); (b)

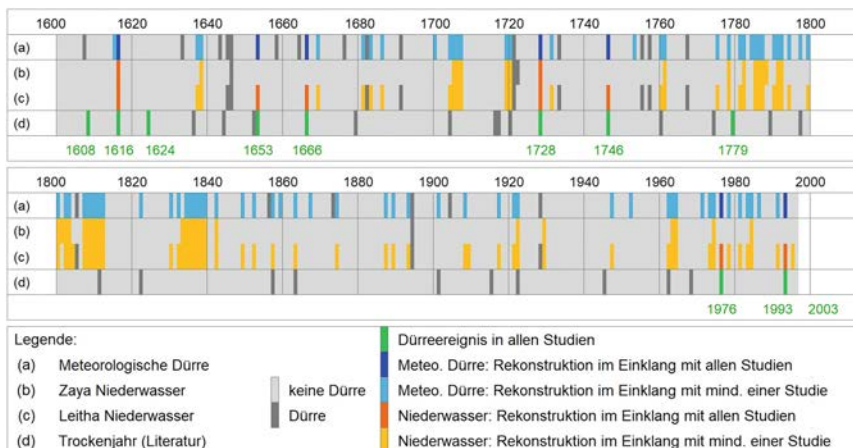


Abbildung 07: Niederwasser- und meteorologische Dürreereignisse in Nordostösterreich. Grüne Jahreszahlen entsprechen übereinstimmenden Ereignisangaben aus regionalen Klimastudien.

Figure 07: Low flow and meteorological drought events in Lower Austria. Green dates indicate events with consistent indication from regional climate studies.

Quelle: Daten basierend auf Karanitsch-Ackerl et al., 2019

Downscaling der Lufttemperatur, Niederschlag und anderer Ergebnisse des GCM auf eine Rasterweite, die für die hydrologische Modellierung geeignet ist (d. h. von ca. 200 km auf wenige km); und (c) Modellierung mit einem oder mehreren Niederschlags-Abflussmodellen unter Verwendung der Ergebnisse des Downscalings. Obwohl Klimamodelle laufend weiterentwickelt werden entsprechen die für die Abflussmodellierung relevanten Größen nicht immer den beobachteten Klimasignalen. Für Österreich erweisen sich die Temperatursimulationen in diesem Vergleich als gut zutreffend, während die Niederschlagssimulationen große Unsicherheiten aufweisen. Diese Unsicherheiten pflanzen sich in Überlagerung mit Fehlern des Abflussmodells auf die Niederwasserprognose fort (Parajka et al., 2016). Es ist daher wichtig die Unsicherheiten bei der Einschätzung der zukünftigen Niederwässer zu berücksichtigen. Für Österreich ist das im Projekt Climate impacts on low flows and droughts (CILFAD) im Rahmen eines Mehrstandbeineansatzes (Laaha et al., 2016a,b) erfolgt, indem die Klimaszenarien mit Trendbeobachtungen und stochastischen Simulationen verglichen wurden um eine robustere Einschätzung klimabedingter Änderungen zu erlangen.

Ein alternativer Ansatz wurde im Projekt Water resources under climatic stress (AquaStress) verfolgt. Anstatt Szenarienrechnungen wurden Klimareihen für einen hypothetischen zukünftigen Zeitraum erzeugt, indem beobachtete Klimareihen mit als realistisch angesehenen Temperaturerhöhungen und Nie-

derschlagsveränderungen beaufschlagt wurden. Hierdurch war es möglich die Bandbreite realistischer Änderungen gegenüber dem Ensemble der Modellszenarien abzustecken.

Der aktuelle Stand des Wissens über die Entwicklung der Niederwässer im Projektionszeitraum 2021–2050 wird in der Studie »Klimawandel in der Wasserwirtschaft – Schwerpunkt Hochwasser und Dürre« für Bund und Länder (Blöschl et al., 2017) zusammengefasst. Im alpinen Bereich Österreichs (hochgelegene Gebiete, Winterniederwasserregime) zeigen die Szenarienrechnungen eine deutliche Zunahme der Niederwasserabflüsse von etwa 10–25 %. In den niedrigen Gebieten Österreichs sowie im Alpenvorland ergeben die Szenarienrechnungen differenzierte Ergebnisse. In manchen Einzugsgebieten wird eine leichte Zunahme prognostiziert (z. B. Mühlviertel). In anderen Gebieten wird eine Abnahme der Niederwasserabflüsse von etwa 10–15 % berechnet (z. B. Weinviertel, nördliches Burgenland, Teile der Südsteiermark, Teile des niederösterreichischen Alpenvorlands). Die Abnahme ist im Südosten Österreichs am stärksten. Saisonal gesehen betrifft die Abnahme der Niederwasserabflüsse im Osten alle Jahreszeiten, die Zunahme im Westen hingegen nur den Winter und das Frühjahr.

9.4 Möglichkeiten des Niederwassermanagements

Im alpinen Raum wird Niederwasser und Trockenheit erst in den letzten Jahrzehnten als Naturgefahr breiter wahrgenommen. Der Alpenraum zählt zu den wasserreichsten Regionen Europas und so ist es wenig verwunderlich, dass die meisten alpinen Gefahren eher von zu hohen als von zu geringen Niederschlägen ausgehen. In einem größeren Betrachtungsmaßstab wird aber erkennbar, dass im alpinen Bereich die Wasserressourcen für viele angrenzende Regionen liegen. Der erhöhte Wasserbedarf der Niederungen pflanzt sich so auf alpine Gebiete fort. Im Fall internationaler Gewässer wie Donau und Rhein kommt es bei langanhaltender Trockenheit zu Nutzungskonflikten, die zwischenstaatliche Regelungen der Anrainerstaaten erfordern.

Abbildung 08 zeigt im Rahmen der Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union (WFD) (EU, 2000) zwei mögliche Instrumente. Generell sind Niederwässer als Teil der Wasser Ressourcen Management Systeme (WRMS) anzusehen, die innerhalb der River Basin Management Pläne (RBMP) angesiedelt sind. Sie definieren Instrumente zur Deckung des Bedarfs wie Infrastrukturen oder Bewirtschaftungsregeln, und können notfalls auch Restriktionen festsetzen. Reichen die Wasserressourcen in normalen, durchschnittlich wiederkehrenden Jahren nicht aus so können Langzeitmaßnahmen zur Deckung des permanenten Defizits gesetzt werden.

Extreme Niederwasser- und Dürreereignisse fallen nicht in die RBMP da sie eine Ausnahmesituation darstellen die lange Zeit als höhere Gewalt angesehen wurde, und so unter dem Argument der Unvorhersehbarkeit von den Regelungen ausgenommen waren. Infolge der Extremereignisse der letzten Jahrzehnte kam es zu einem Paradigmenwechsel in der Wasserpolitik die in der Verankerung des Niederwasser- und Dürremanagement im europäischen Recht mündete. Artikel 13 WFD ermächtigt die Mitgliedsstaaten innerhalb der RBMP spezifische Dürre Management Pläne (DMP) zu entwickeln. Generelle Richtlinien hierzu wurden vom Water Scarcity and Droughts Expert Network (2007) ausgearbeitet und im Rahmen des Drought Management Plan Reports veröffentlicht. Demnach sollen DMPs als wesentliche Bestandteile

- 1) eine Definition von Dürreindikatoren und Warnstufen,
- 2) Maßnahmen für jede Dürrephase,
- 3) und ein Organisationskonzept für den Krisenfall sowie zur Weiterentwicklung und Adaptierung des DMP

beinhalten. Der DMP sollte auch einen Abschnitt über extreme Dürreereignisse gemäß Art. 4.6 WFD aufweisen der Präventions- und Wiederherstellungsmaßnahmen regelt, Indikatoren für und Maßnahmen im Fall von Extremereignissen definiert, und einen jährlichen Reporting-Mechanismus einsetzt.

Für das Niederwassermanagement stehen eine Reihe von Maßnahmen zur Verfügung die sich nach den lokalen Gegebenheiten und dem saisonalen Auftreten richten. Ein typisches Problem im alpinen Raum bilden das Wassermanagement von Tourismusgebieten in denen der Spitzenbedarf im Winter auftritt und mit der vorherrschenden Niederwassersaison zusammenfällt. Eine wasserwirtschaftliche Aufgabenstellung ist hier mit der Schneeproduktion verbunden deren Wasserbedarf durch die immer milder werdenden Winter ansteigt (Steiger und Abegg, 2013). Die Deckung des saisonalen Bedarfs erfordert zusätzliche Ressourcen die durch strukturelle Maßnahmen wie Speicherseen und Transportleitungen gedeckt werden. Falls die Entnahmen im Winter erfolgen kann dadurch die Niederwasserführung von Bächen verschärft werden. Generell führt das Abschmelzen der künstlichen Schneedecke aber zu einer Aufhöhung der Abflüsse im Frühjahr, die den klimabedingten Rückgang der natürlichen Schneedecke ausgleicht und in ihren Auswirkungen als neutral anzusehen ist. Eine weitere wasserwirtschaftliche Aufgabenstellung bildet die Wasserver- und -entsorgung von Tourismusgebieten. Der maßgebende Belastungsfall liegt auch hier meist in der Wintersaison, wenn die Wasserressourcen knapp sind. Im Zuge der Abwasserentsorgung kann die Einhaltung der Qualitätsziele schwierig sein da die saisonale Belastungsspitze mit den kleinsten Abflüssen zusammenfällt und dann die notwendigen Verdünnungsverhältnisse nicht immer eingehalten werden können. Eine Möglichkeit bildet in solchen Fällen die Bildung größerer

Wasserverbände um so die Einleitung in Flüsse mit ausreichender Wasserführung zu verlegen.

Sommerniederwässer betreffen stärker das Flachland als den alpinen Bereich da hier die saisonalen Niederschlagsdefizite am größten sind und sich die Abflussdefizite in den Unterläufen der Flüsse kumulieren. Für die Niederwasserbewirtschaftung werden Speicherseen genutzt die typischerweise in den Oberläufen situiert sind und so auch den alpinen Bereich betreffen. Immer öfter kommen kombinierte Bewirtschaftungsregeln zum Einsatz die für den Risikoabgleich zwischen Hoch- und Niederwasser optimiert sind. Dieser Ausgleich ist oft schwierig da der Schutz vor Hoch- und Niederwassergefahren diametrale Bewirtschaftungsziele darstellen. Ein weiterer typischer Aufgabenbereich des Niederwassermanagements betrifft die Schifffahrt die in Niederwasserperioden mit Einbußen durch reduzierte Lademengen konfrontiert ist (Kramsall, 2018). In extremen Jahren kann die Schifffahrt in manchen Abschnitten völlig zum Erliegen kommen. Das Niederwassermanagement sieht hier in erster Linie gewässerbauliche Maßnahmen zur Verbesserung der Schiffbarkeit vor. Wasserentnahmen entlang der Gewässerläufe können die Situation zusätzlich verschärfen. Lanen et al. (2016) berichtet beispielsweise im Hitzesommer 2015 von einem Rekord an Wasserüberleitungen vom Donau- ins Maingebiet das in diesem Jahr von einem besonders strengen Niederwasserereignis betroffen war. Wasserentnahmen und Restwassermengen an internationalen Gewässern werden in internationalen Gewässerkommissionen verhandelt und in Staatsverträgen geregelt.

Für die Beurteilung der aktuellen Gefahrenlage während Dürreereignissen werden im verstärkten Maße Drought Monitoring Systeme eingerichtet. Ein bekanntes Beispiel bildet der US Drought Monitor (Svoboda et al., 2002). Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die Wassernutzungen verschiedener Sektoren in der Regel nicht unmittelbar vom Niederschlag, sondern von den in Böden, Grundwasser, Fließgewässer und Seen vorhandenen Wasserressourcen abhängen (Lanen et al., 2016). Meteorologische Dürreindizes wie der Standardisierte Niederschlagsindex (SPI) oder der um die Verdunstung erweiterte Niederschlagsindex (SPEI) können daher nur ein grobes Bild über die sektoralen Auswirkungen geben (Laaha et al., 2017). Eine genauere Einschätzung der aktuellen Situation würde ein multidimensionales Monitoring der Komponenten des Wasserkreislaufs erfordern welches Bodenfeuchte, Grundwasserstände, Niederwasserabflüsse und Seenstände einbezieht. Dieses ist in Österreich derzeit nicht realisiert, könnte aber auf bestehende Monitoringsysteme von ZAMG und hydrographischen Diensten aufbauen und diese vereinheitlichen. Wenn möglich sollten Impaktindikatoren miteinbezogen werden um die tatsächliche Belastung der Systeme abzubilden (Bachmair et al., 2016). Hierbei liefert die Erfassung von Dürrefolgen wie sie im Rahmen des Europäischen Drought Im-

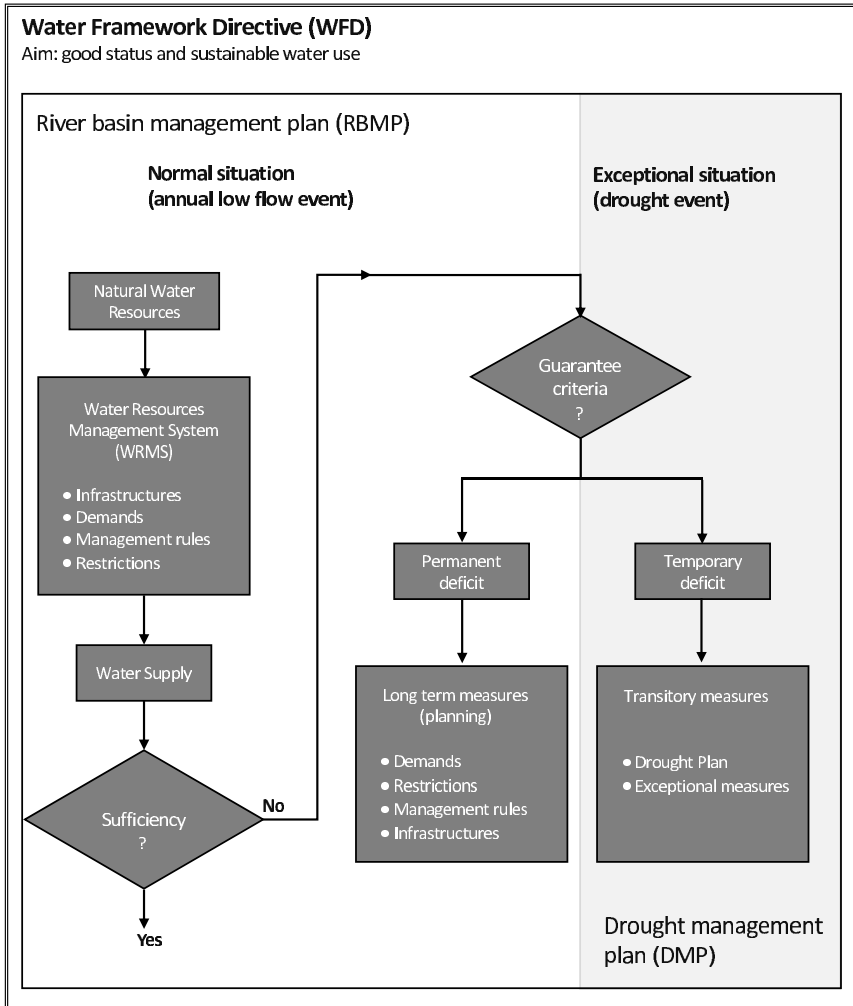


Abbildung 08: Rechtliche Stellung von Niederwasser und Dürremanagement innerhalb der EU Wasserrahmenrichtlinie.

Figure 08: Legal position of low flows and drought management within the EU Water Framework Directive.

Quelle: modifiziertes Schema nach Water Scarcity and Droughts Expert Network, 2007

pact Inventory (EDII) erfolgt einen wichtigen Beitrag (Stahl et al., 2016). Die Beurteilung der aktuellen Niederwasser- und Dürresituation kann am besten durch eine individuelle Betrachtung der Indizes im Vergleich zu Indikator- bzw. Warnstufen erfolgen. Kombinierte Indikatoren können ergänzend ein Gesamtbild über alle Sektoren liefern das idealerweise eine Gewichtung verwendet die in der Lage ist die aktuellen Gesamtkosten abzubilden.

Aktuell wird versucht die Monitoringsysteme in Richtung Vorhersagesysteme weiterentwickelt. Hierdurch soll eine Aufwertung des Niederwassermanagements von reaktiven zu vorausschauenden Maßnahmen erfolgen. Die Schwierigkeit liegt hier bei den im Vergleich zur Hochwasservorhersage langen Prognosezeiträumen die für das Dürremanagement relevant sind. So sind beispielsweise in der Landwirtschaft oder für die Schifffahrt wöchentliche bis saisonale Vorhersagen erforderlich. Solche Prognosezeiträume lassen erhebliche Unsicherheiten erwarten denen in aktuellen Studien durch Einbeziehung klimatischer Informationen über die Persistenz von Großwetterlagen oder Meeresoberflächentemperatur begegnet wird (Ionita et al., 2008, 2015). In Hinsicht auf die Niederwasserprognose hat sich in extremen Jahren ein früher Beginn der Niederwasserperiode als eine Indikation für die Strenge des Ereignisses erwiesen (Laaha et al., 2017). Diese Information kann im Rahmen von konditionalen Prognosemodellen zur Abschätzung des Risikos extremer Sommerniederwässer berücksichtigt werden. Insgesamt bieten Monitoring- und Vorhersagesysteme eine Fülle von Informationen die zu einem besseren Management extremer Niederwasserereignisse beitragen können.

Danksagung

Die Studie wurde aus Mitteln des Klimafonds, Austrian Climate Research Programme, Projekt DALF-Pro (GZ B464822) gefördert.

Literatur

- Bachmair, S., Stahl, K., Collins, K., Hannaford, J., Acreman, M., Svoboda, M., Knutson, C., Smith, K.H., Wall, N., Fuchs, B., Crossman, N.D., Overton, I.C., 2016. Drought indicators revisited: the need for a wider consideration of environment and society. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 3, S. 516–536. <https://doi.org/10.1002/wat2.1154>.
- Blöschl, G., Parajka, J., Blaschke, A.P., Hofstätter, M., Haslinger, K., Schöner, W., 2017. Klimawandel in der Wasserwirtschaft – Follow-up zur ZAMG/TU-Wien Studie (2011) Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- DVWK, 1983. Niedrigwasseranalyse Teil I: Statistische Untersuchung des Niedrigwasserabflusses. Regel 120. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau. Verlag Paul Parey, Hamburg.
- DVWK, 1992. Niedrigwasseranalyse Teil II: Statistische Untersuchung der Unterschreitungsdauer und des Abflussdefizits. Regel 121. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau. Verlag Paul Parey, Hamburg.
- DWA, in Ausarbeitung. Merkblatt Statistische Analyse von Niedrigwasserkenngrößen.

- Engeland, K., Hisdal, H., 2009. A comparison of low flow estimates in ungauged catchments using regional regression and the HBV-model. *Water resources management*, 23, S. 2567–2586.
- EU, 2000. Water Framework Directive – Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council establishing a framework for Community action in the field of water policy.
- EurAqua, 2004. Towards a European Drought Policy. Discussion Document, Oxfordshire, 19 S.
- Gustard, A., Demuth, S., 2008. Manual on low-flow estimation and prediction. Open Hydrology Report. World Meteorological Organization, Geneva.
- Haslinger, K., Koffler, D., Schöner, W., Laaha, G., 2014. Exploring the link between meteorological drought and streamflow: Effects of climate-catchment interaction. *Water Resources Research*, 50, S. 2468–2487. <https://doi.org/10.1002/2013WR015051>.
- Intergovernmental Panel on Climate Change, 2012. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation. In: C.B. Field, V. Barros, T.F. Stocker, D. Qin, D.J. Dokken, K.L. Ebi, M.D. Mastrandrea, K.J. Mach, G.-K. Plattner, S.K. Allen, M. Tignor, P.M. Midgley (Hrsg.), Special Report. Cambridge University Press, New York, 582 S.
- Ionita, M., Dima, M., Lohmann, G., Scholz, P., Rimbu, N., 2015. Predicting the June 2013 European Flooding Based on Precipitation, Soil Moisture, and Sea Level Pressure. *Journal of Hydrometeorology*, 16, S. 598–614. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0156.1>.
- Ionita, M., Lohmann, G., Rimbu, N., 2008. Prediction of Spring Elbe Discharge Based on Stable Teleconnections with Winter Global Temperature and Precipitation. *Journal of Climate*, 21, S. 6215–6226. <https://doi.org/10.1175/2008JCLI2248.1>.
- Ionita, M., Tallaksen, L.M., Kingston, D.G., Stagge, J.H., Laaha, G., Lanen, H.A.J. van, Scholz, P., Chelcea, S.M., Haslinger, K., 2017. The European 2015 drought from a climatological perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, S. 1397–1419. <https://doi.org/10.5194/hess-21-1397-2017>.
- Karanitsch-Ackerl, S., Holawe, F., Laaha, G., Wimmer, R., Grabner, M., 2017. Parameter-specific hydroclimatic sensitivity of a low-elevation network of living and historical tree-ring series from north-eastern Austria. *Dendrochronologia*, 45, S. 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2017.06.004>.
- Karanitsch-Ackerl, S., Mayer, K., Gauster, T., Laaha, G., Holawe, F., Wimmer, R., Grabner, M., 2019. A 400-year reconstruction of spring-summer precipitation and summer minimum flow from regional tree-ring chronologies in North-Eastern Austria (in Begutachtung).
- Koffler, D., Gauster, T., Laaha, G., 2016. lfstat – calculation of low flow statistics for daily stream flow data. <https://cran.r-project.org/web/packages/lfstat/lfstat.pdf>.
- Kramsall, C., 2018. Drought impacts in Austria – index selection and modelling in forestry, wild fires and Danube transport. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Laaha, G., Blöschl, G., 2005. Low flow estimates from short stream flow records – a comparison of methods. *Journal of Hydrology*, 306, S. 264–286.
- Laaha, G., Blöschl, G., 2006a. Seasonality indices for regionalizing low flows. *Hydrological Processes*, 20, S. 3851–3878. <https://doi.org/10.1002/hyp.6161>.

- Laaha, G., Blöschl, G., 2006b. Flächendeckende Bestimmung von Niederwasserkenngößen in Österreich. In: D. Gutknecht (Hrsg.), *Methoden Der Hydrologischen Regionalisierung*. Wiener Mitteilungen, 197, S. 93–108.
- Laaha, G., Blöschl, G., 2006c. A comparison of low flow regionalisation methods-catchment grouping. *Journal of Hydrology*, 323, S. 193–214.
- Laaha, G., Blöschl, G., 2007a. Niederwasser. Bestimmungsmethoden. In: D. Gutknecht (Hrsg.), *Extreme Abflussereignisse: Dokumentation, Bedeutung, Bestimmungsmethoden*. Wiener Mitteilungen 206, S. 155–180.
- Laaha, G., Blöschl, G., 2007b. A national low flow estimation procedure for Austria. *Hydrological Sciences Journal*, 52, S. 625–644.
- Laaha, G., Demuth, S., Hisdal, H., Kroll, C.N., Lanen, H.A.J. van, Nester, T., Rogger, M., Sauquet, E., Tallaksen, L.M., Woods, R. A., Young, A., 2013a. Prediction of low flows in ungauged basins. In: G. Blöschel, M. Sivapalan, Th. Wagener, A. Viglione, H. Savenije (Hrsg.), *Runoff Prediction in Ungauged Basins: Synthesis across Processes, Places and Scales*. Cambridge University Press, S. 28.
- Laaha, G., Gauster, T., Tallaksen, L.M., Vidal, J.-P., Stahl, K., Prudhomme, C., Heudorfer, B., Vlnas, R., Ionita, M., Lanen, H.A.J. van, Adler, M.-J., Caillouet, L., Delus, C., Fendekova, M., Gailliez, S., Hannaford, J., Kingston, D., Loon, A.F. van, Mediero, L., Osuch, M., Romanowicz, R., Sauquet, E., Stagge, J.H., Wong, W.K., 2017. The European 2015 drought from a hydrological perspective. *Hydrology and Earth System Sciences*, 21, S. 3001–3024. <https://doi.org/10.5194/hess-21-3001-2017>.
- Laaha, G., Haslinger, K., Koffler, D., Parajka, J., Schöner, W., Viglione, A., Zehetgruber, J., Blöschl, G., 2016a. Ein Drei-Standbeine-Ansatz zur Ermittlung zukünftiger Niederwasserabflüsse in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 68, S. 54–57. <https://doi.org/10.1007/s00506-015-0284-1>.
- Laaha, G., Parajka, J., Viglione, A., Koffler, D., Haslinger, K., Schöner, W., Zehetgruber, J., Blöschl, G., 2016b. A three-pillar approach to assessing climate impacts on low flows. *Hydrology and Earth System Science*, 20, S. 3967–3985. <https://doi.org/10.5194/hess-20-3967-2016>.
- Laaha, G., Skøien, J.O., Blöschl, G., 2014. Spatial prediction on river networks: comparison of top-kriging with regional regression. *Hydrological Processes*, 28, S. 315–324. <https://doi.org/10.1002/hyp.9578>.
- Laaha, G., Skøien, J.O., Nobilis, F., Blöschl, G., 2013b. Spatial Prediction of Stream Temperatures Using Top-Kriging with an External Drift. *Environmental Modeling & Assessment*, 18, S. 671–683. <https://doi.org/10.1007/s10666-013-9373-3>.
- Lanen, H.A.J. van, Laaha, G., Kingston, D.G., Gauster, T., Ionita, M., Vidal, J.-P., Vlnas, R., Tallaksen, L.M., Stahl, K., Hannaford, J., Delus, C., Fendekova, M., Mediero, L., Prudhomme, C., Rets, E., Romanowicz, R.J., Gailliez, S., Wong, W.K., Adler, M.-J., Blauhut, V., Caillouet, L., Chelcea, S., Frolova, N., Gudmundsson, L., Hanel, M., Haslinger, K., Kireeva, M., Osuch, M., Sauquet, E., Stagge, J.H., Loon, A.F. van, 2016. Hydrology needed to manage droughts: the 2015 European case. *Hydrological Processes*, 30, S. 3097–3104. <https://doi.org/10.1002/hyp.10838>.
- Loon, A.F. van, 2013. On the propagation of drought: how climate and catchment characteristics influence hydrological drought development and recovery. Dissertation, Wageningen University, Wageningen, Niederlande.

- Parajka, J., Blaschke, A.P., Blöschl, G., Haslinger, K., Hepp, G., Laaha, G., Schöner, W., Trautvetter, H., Viglione, A., Zessner, M., 2016. Uncertainty contributions to low-flow projections in Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20, S. 2085–2101. <https://doi.org/10.5194/hess-20-2085-2016>.
- Peters, E., 2003. Propagation of drought through groundwater systems: Illustrated in the Pang (UK) and Upper-Guadiana (ES) catchments. Dissertation, Wageningen University, Wageningen, Niederlande.
- Robine, J.-M., Cheung, S.L., Le Roy, S., Oyen, H. van, Herrmann, F.R., 2007. Report on excess mortality in Europe during summer 2003. EU Community Action Programme for Public Health, Grant Agreement, 2005114, S. 28.
- Salinas, J.L., Laaha, G., Rogger, M., Parajka, J., Viglione, A., Sivapalan, M., Blöschl, G., 2013. Comparative assessment of predictions in ungauged basins – Part 2: Flood and low flow studies. *Hydrology and Earth System Sciences*, 17, S. 2637–2652. <https://doi.org/10.5194/hess-17-2637-2013>.
- Schöner, W., Böhm, R., Haslinger, K., Blöschl, G., Kroiß, H., Merz, R., Blaschke, A.P., Viglione, A., Parajka, J., Salinas, J.L., Drabek, U., Laaha, G., Kreuzinger, N., 2011. Anpassungsstrategien an den Klimawandel für Österreichs Wasserwirtschaft. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Springer Verlag, 486 S.
- Sköien, J.O., Blöschl, G., Laaha, G., Pebesma, E., Parajka, J., Viglione, A., 2014. Rtop: An R package for interpolation of data with a variable spatial support, with an example from river networks. *Computers & Geosciences*, 67, S. 180–190.
- Sköien, J.O., Merz, R., Blöschl, G., 2006. Top-kriging-geostatistics on stream networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, S. 277–287.
- Stahl, K., Kohn, I., Blauhut, V., Urquijo, J., Stefano, L. de, Acácio, V., Dias, S., Stagge, J.H., Tallaksen, L.M., Kampragou, E., Loon, A.F. van, Barker, L.J., Melsen, L.A., Bifulco, C., Musolino, D., Carli, A. de, Massarutto, A., Assimacopoulos, D., Lanen, H.A.J. van, 2016. Impacts of European drought events: insights from an international database of text-based reports. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16, S. 801–819. <https://doi.org/10.5194/nhess-16-801-2016>.
- Steiger, R., Abegg, B., 2013. The sensitivity of Austrian ski areas to climate change. *Tourism Planning & Development*, 10, S. 480–493.
- Svoboda, M., LeCompte, D., Hayes, M., Heim, R., Gleason, K., Angel, J., Rippey, B., Tinker, R., Palecki, M., Stooksbury, D., 2002. The drought monitor. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 83, S. 1181–1190.
- Tallaksen, L.M., Lanen, H.A.J. van, 2004. Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater, *Developments in water science*. Elsevier, 579 S.
- Vogel, R.M., Kroll, C.N., 1992. Regional geohydrologic-geomorphic relationships for the estimation of low-flow statistics. *Water Resources Research*, 28, S. 2451–2458.
- Water Scarcity and Droughts Expert Network, 2007. Drought Management Plan Report – Including Agricultural, Drought Indicators and Climate Change Aspects. Technical Report 2008-023. http://ec.europa.eu/environment/water/quantity/pdf/dmp_report.pdf [01.12.2018].
- Winkler, G., Wagner, T., Pauritsch, M., Kellerer-Pirklbauer, A., 2016. Was kommt nach dem Permafrost? Bedeutung reliktscher Blockgletscher für das Abflussverhalten alpiner Einzugsgebiete. *Joannea Geologie und Palaontologie*, 12, S. 63–72.

10 Hochwasser

Günter Blöschl*

Zusammenfassung

Für die Minimierung zukünftiger Hochwasserschäden ist es notwendig, die Hochwasser auslösenden Prozesse zu verstehen, um die Größe zukünftiger Hochwässer zuverlässig zu bestimmen, und darauf aufbauend Maßnahmen zu setzen. Extremhochwässer an den Flüssen Österreichs treten meist durch das Zusammenwirken extremer Niederschläge mit gesättigten, abflussbereiten Böden auf. Im Norden Österreichs haben in den letzten Jahrzehnten tendenziell die Hochwasserabflüsse etwas zugenommen; die für die nächsten Jahrzehnte projizierten Änderungen sind im Vergleich zur natürlichen Variabilität relativ klein. Um die Hochwasserabflüsse einer bestimmten Jährlichkeit genau zu berechnen, sollten über die Hochwasserdatenreihen hinausgehende Informationen herangezogen werden. Die Maßnahmen des integrierten Hochwasserrisikomanagements erlauben eine optimale Vorbereitung auf die Situation, wenn es wirklich zu einem extremen Hochwasser kommt.

Abstract

Minimising future flood damage requires a detailed understanding of the flood generating processes in order to accurately estimate the magnitudes of future floods and to take precautionary measures based on them. Extreme floods on the rivers of Austria usually occur through the interaction of extreme precipitation with saturated soils. In the north of Austria, flood discharges have somewhat increased in recent decades; the changes projected over the next decades are relatively small compared to the natural variability. In order to accurately estimate flood discharges of a given return period, information beyond the flood data series should be used. Integrated flood risk management measures allow for an optimal preparation for the situation when an extreme flood really occurs.

Kernaussagen

- Im Norden Österreichs haben in den letzten Jahrzehnten tendenziell die Hochwasserabflüsse etwas zugenommen.
- Die für die nächsten Jahrzehnte projizierten Änderungen sind im Vergleich zur natürlichen Variabilität relativ klein.

* Günter Blöschl, Technische Universität Wien, Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, bloeschl@hydro.tuwien.ac.at.

- Das integrierte Hochwasserrisikomanagement kombiniert verschiedene Maßnahmen im Flussgebiet.

Key Points

- In the north of Austria, flood discharges have somewhat increased in recent decades.
- The changes projected over the next decades are relatively small compared to the natural variability.
- Integrated flood risk management combines a range of measures in the river basin.

10.1 Einleitung

Der Alpine Raum Österreichs hatte in den letzten Jahren viele große Hochwasserkatastrophen zu erleiden. Das Alpenhochwasser im August 2005 richtete großen Schaden an, wobei das Paznauntal am stärksten betroffen war (Godina et al., 2006). Dieses Extremhochwasser ist jedoch kein Einzelfall, denn mehrere – meist räumlich stärker beschränkte – Ereignisse waren seitdem zu verzeichnen, wie im Juli 2014 im Pinzgau und im Juni 2015 im Bezirk Landeck. Das Schadenspotenzial entlang der Flüsse im Alpenen Raum ist in der Tat enorm. Beispielsweise wurde im Tiroler Unterinntal ein Schadenspotenzial von 357 M€ auf einer Strecke von nur 20 km ausgewiesen, wenn ein hundertjährliches Hochwasser (HQ_{100}) auftritt. Bei einem HQ_{300} sind es sogar 736 M€ (Bundeswasserbauverwaltung Tirol, 2016). Zu diesen monetär bewertbaren Schäden kommen noch eine erhebliche Personengefährdung, indirekte ökonomische Schäden etwa zufolge Verkehrseinschränkungen und Umweltschäden wie eine mögliche Verunreinigung des Grundwassers. Durch die Umsetzung des Wasserrechtsgesetzes 1959 in der jeweils geltenden Fassung (WRG, 1959), wurden Schäden wesentlich reduziert. Um zukünftige Schäden weiterhin zu minimieren, ist es notwendig, die Hochwasserprozesse zu verstehen, und die Größe zukünftiger Hochwässer zuverlässig zu bestimmen.

Dieser Beitrag widmet sich den Prozessen und Bestimmungsmethoden extremer Hochwässer an den Flüssen im Alpenen Raum Österreichs. Unter Extremhochwasser wird dabei ein Hochwasser mit einem außerordentlich hohen Abfluss verstanden, der in der Regel zu Überflutungen in Flussnähe führt. Nach einer statistischen Einordnung sind das Abflüsse einer Jährlichkeit von etwa 100 Jahren oder darüber, d. h. ein Abfluss, der mit einer Wahrscheinlichkeit von 0,01 (oder weniger) in einem Jahr überschritten wird.

10.2 Aktuelle Gefahrensituation und ihre Veränderungen

Hochwasser im Alpen Raum können einerseits durch kleinräumige Gewitter ausgelöst werden, die besonders in kleinen Einzugsgebieten zu Extremereignissen führen. Oft sind damit auch Hangrutschungen und Muren verbunden, wie im Juli 2012 in St. Lorenzen im Paltental (Bezirk Liezen) (Hübl et al., 2013). Das größte bekannte Niederschlagsereignis dieser Art in Österreich trat im Juli 1913 in der Nähe von Graz auf. Dabei fielen innerhalb weniger Stunden mehr als 600 mm Niederschlag, eine Menge, die sonst nur aus den Tropen bekannt ist (Sivapalan und Blöschl, 1998).

Andererseits können Hochwässer durch großräumige Extremniederschläge ausgelöst werden, wie dies beim Hochwasser im August 2005 der Fall war. Dieses Ereignis wurde durch ein Tiefdruckgebiet aus dem Golf von Genua verursacht. In Reutte in Tirol wurden mehr als 200 mm Niederschlag in zwei Tagen gemessen (Godina et al., 2006). Entscheidend für solche Hochwässer ist aber nicht nur die Niederschlagsmenge, sondern auch der Feuchtezustand der Böden im Gebiet. Er bestimmt den Anteil des Niederschlags, der nicht versickern kann und deshalb zum Hochwasser beiträgt. Dieser Anteil (der Abflussbeiwert) kann zwischen 10 % und 60 % liegen und damit entscheiden, ob ein Hochwasser wirklich gefährlich wird oder nicht (Merz et al., 2006). Die große Bodenfeuchte war beispielsweise einer der Gründe, warum das Hochwasser im Juni 2013 so extrem ausfiel (Blöschl et al., 2013). Eine Schneedecke im Gebiet kann die Bodenfeuchte zusätzlich erhöhen und damit das Hochwasser vergrößern, während eine niedrige Schneefallgrenze das Hochwasser reduzieren kann (Blöschl et al., 2013).

In Österreich ist die hydroklimatologische Situation ein wichtiger Einflussfaktor der Hochwasserentstehung (Blöschl et al., 2017a). In Tirol und Vorarlberg kommt es insbesondere im Hochsommer zu Überschwemmungen. Dies hängt mit der Saisonalität der Niederschläge, der jahreszeitlichen Verteilung der flüssigen Niederschläge (in großen Höhen) und dem im Sommer erhöhten Abfluss durch die Schneeschmelze zusammen. In den nördlichen Voralpen führen neben einigen Hochwasserereignissen während der Schneeschmelzperiode im Winter und Frühjahr lang anhaltende großflächige Niederschläge im Sommer zu maximalen Abflüssen. In den höher gelegenen Gebieten des Mühlviertels und im Innviertel treten Hochwasser hauptsächlich im Spätwinter auf und zeichnen sich durch hohe Vorbefeuchtung durch Schneeschmelze oder Regen-auf-Schnee-Ereignisse aus. Im Süden Kärntens und in der Weststeiermark werden Hochwasser im Frühsommer durch Schneeschmelze oder Niederschläge auf abflussbereite Böden ausgelöst, und Hochwasser im Herbst durch Niederschläge, die ihren Ursprung im Mittelmeerraum haben. Diese Prozesse

bestimmen die Größe der Hochwasser und damit auch Hochwasserkenngrößen wie das 100-jährliche Hochwasser (HQ_{100}).

Abbildung 01 zeigt die Verteilung des HQ_{100} in Österreich. Die wichtigste Einflussgröße ist die Einzugsgebietsfläche. Zusätzlich treten ausgeprägte regionale Unterschiede auf. Die höchsten Hochwasserabflüsse (für eine bestimmte Einzugsgebietsfläche) treten am nördlichen Rand der Alpen auf. Topographische Verstärkungseffekte führen zu extremen Regenfällen, die in Verbindung mit hoher Bodenfeuchte zu sehr großen Hochwässern führen. In ähnlicher Weise tragen die Böden der Flyschzone zu großen Abflüssen bei. Im Süden Nordtirols sind die Abflüsse niedriger, da die Einzugsgebiete orografisch geschützt sind und dadurch die Niederschläge geringer sind.

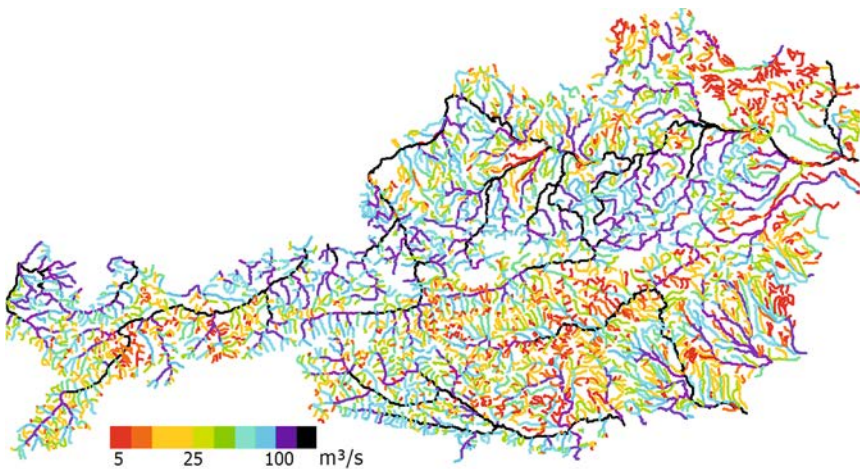


Abbildung 01: 100-jährliche Hochwasserabflüsse in Österreich.

Figure 01: 100-year flood discharges in Austria.

Quelle: Merz et al., 2008

Die in Abbildung 01 dargestellten Hochwasserabflüsse wurden aus Abflussdaten der letzten Jahrzehnte berechnet. Für praktische Anwendungen ist man jedoch an den Hochwasserabflüssen der nächsten Jahrzehnte interessiert. Es stellt sich deshalb die Frage, ob die Hochwässer im Alpenen Raum Österreichs zunehmen werden. Dafür ist es sinnvoll, vorerst zu untersuchen, ob sie in den letzten Jahrzehnten bereits zugenommen haben, und darüber hinaus Aussagen für die Zukunft zu treffen.

Hochwasser können durch drei Gruppen von Einflussgrößen verändert werden: Klimawandel, Landnutzungsänderungen und wasserbauliche Maßnahmen (Hall et al., 2014). Betreffend Klimawandel ist eine Veränderung des Niederschlagsregimes der wichtigste, mögliche Einfluss. Dies kann durch eine

Verschiebung der globalen atmosphärischen Zirkulation verursacht sein. Eine interessante Frage ist zum Beispiel, ob die für Hochwasser gefährlichen Vb-Wetterlagen häufiger geworden sind. Auswertungen von Messdaten zeigen jedoch, dass dies nicht der Fall ist (Hofstätter et al., 2015, 2018; Blöschl et al., 2018a), wenn auch die Starkniederschläge, besonders im Norden Österreichs in den letzten Jahrzehnten etwas zugenommen haben. Bei höheren Lufttemperaturen kann jedoch auch die lokale Konvektion aufgrund der geringeren Stabilität der Atmosphäre und des größeren Wasserhaltevermögens zunehmen. Nach der Clausius-Clapeyron Beziehung steigt das Wasserhaltevermögen der Atmosphäre um etwa 7 % pro Grad Temperaturerhöhung. Inwieweit sich dies auf Starkniederschläge auswirkt, wird in der Literatur noch diskutiert (Kirnbauer et al., 2016; Lexer et al., 2018). Trendanalysen der beobachteten jährlichen Hochwasserabflüsse in Österreich (Abbildung 02) zeigen, dass in 29 % der Gebiete mit Flächen $< 500 \text{ km}^2$ der Hochwasserabfluss signifikant angestiegen ist. Für Gebiete mit Flächen $> 500 \text{ km}^2$ sind es 17 %. Beide Zunahmen sind vor allem auf einen Anstieg der Sommerhochwasser zurückzuführen.

Neben dem Klima sind Änderungen der Landnutzung ein Faktor, der die Größe von Extremhochwässern beeinflussen kann. Der Einfluss der Landnutzung ist auf Einzugsgebietsebene schwer greifbar wegen der räumlichen Heterogenität der damit verbundenen Prozesse (Rogger et al., 2017; Alaoui et al., 2018). Klar ist, dass der Einsatz schwerer landwirtschaftlicher Maschinen zu Bodenverdichtung führen kann – in Europa sind rund 33 Millionen Hektar durch Bodenverdichtung betroffen (Birkas, 2008). Diese wirkt sich wiederum ungünstig auf die Infiltration und damit die Hochwasserentstehung aus. Umgekehrt sind Waldböden oft lockerer, dadurch kann die Infiltration größer sein. Inwieweit diese Effekte auf Flussgebietsebene wirksam sind, ist allerdings weniger klar (Blöschl, 2018b). Mit hydrologischen Modellen kann der Einfluss von Landnutzungsänderungen auf Hochwasser simuliert werden (Salazar et al., 2012). Dabei zeigt sich, dass der Einfluss mit der Größe des Ereignisses in der Regel abnimmt. Das bedeutet, dass Extremhochwässer weniger durch Landnutzungsänderungen beeinflusst sind als kleinere Ereignisse (Salazar et al., 2012).

Die dritte Einflussgröße sind wasserbauliche Maßnahmen. Wenn sich die Hochwasserwelle im Flusssystem ausbreitet, wird sie von den Eigenschaften des Gerinnes und des Vorlandes beeinflusst. Der Verlust von Retentionsflächen im Vorland kann zu einer Erhöhung des Hochwasserscheitels führen. Der wichtigste Parameter zur Beurteilung, ob eine Erhöhung stattfindet, ist das Wasservolumen, das im Vorland zurückgehalten werden kann, während die Vegetation für die Größe des Hochwassers meist eine untergeordnete Rolle spielt. Dieses Volumen muss im Bereich des Hochwasserscheitels zur Verfügung gestellt werden. Zum Beispiel zeigten Skublics et al. (2016), dass der Verlust von

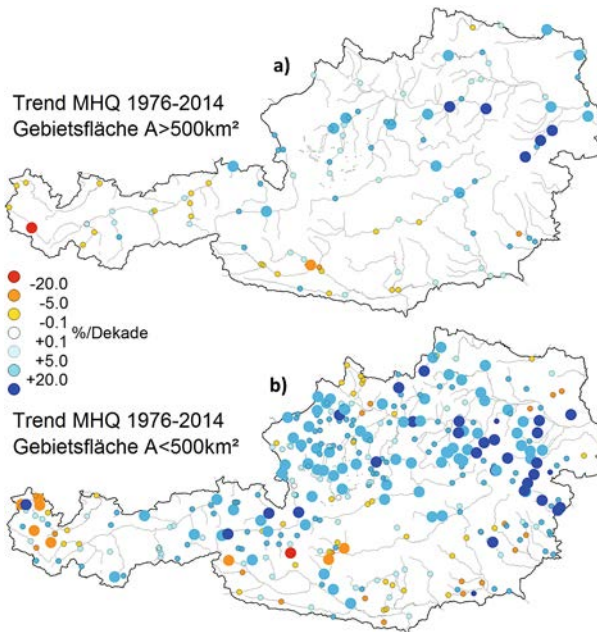


Abbildung 02: Trends der Jahresmaxima der Hochwässer für den Zeitraum 1976–2014. Große Kreise blau: signifikant steigende Trends, d. h. Zunahme des mittleren jährlichen Hochwassers. Große Kreise rot: signifikant fallende Trends. Kleine Kreise: Trends nicht signifikant (Signifikanzniveau 5 %). (a) Gebiete $> 500 \text{ km}^2$ Fläche, (b) Gebiete $< 500 \text{ km}^2$ Fläche.

Figure 02: Trends of the annual floods in the period 1976–2014. Large blue circles: significantly increasing trends, i. e. an increase in the mean annual flood. Large red circles: significantly decreasing trends. Small circles: trends not significant (5 % significance level). (a) catchments $> 500 \text{ km}^2$, (b) catchments $< 500 \text{ km}^2$.

Quelle: Blöschl et al., 2018a

Retentionsflächen entlang der Donau die Hochwasserabflüsse im Vergleich zur historischen Situation wenig beeinflusst hat, da das Speichervolumen in der historischen Situation schon zu Beginn des Ereignisses verbraucht wurde. In anderen Fällen kann der Einfluss größer sein. Die Auswirkung wasserbaulicher Maßnahmen kann durch zweidimensionale hydrodynamische Modelle gut bestimmt werden (Horváth et al., 2015).

Die drei Faktoren – Klima, Landnutzung und Wasserbauten – tragen in unterschiedlichem Ausmaß zu Veränderungen der Hochwässer bei. Auf Basis eines Attributierungsansatzes zeigten Viglione et al. (2016), dass in Oberösterreich die Veränderung des Niederschlags die wichtigste Einflussgröße ist, während Landnutzungsänderungen in kleinen Einzugsgebieten wichtig sein können (Abbildung 03). Die Auswirkung der Landnutzungsänderungen auf die Hochwässer nimmt mit der Einzugsgebietsfläche aufgrund einer Verschiebung der Abflusentstehungsmechanismen ab. In kleinen Einzugsgebieten werden Hoch-

wasser größtenteils durch hochintensive, kurze Niederschläge erzeugt, so dass der Mechanismus des Infiltrationsüberschusses dominant ist. In größeren Einzugsgebieten werden Hochwässer größtenteils durch länger andauernde Niederschläge geringerer Intensitäten erzeugt, so dass der Mechanismus des Sättigungsüberschusses dominiert. Da Landnutzungsänderungen meist die Infiltrationskapazität und damit den ersteren Mechanismus stärker beeinflussen (durch die verringerte Infiltrationskapazität z. B. zufolge Bodenverdichtung) als den zweiten (Hall et al., 2014; Rogger et al., 2017), nimmt die Wirkung der Landnutzungsänderung auf Hochwässer mit der Einzugsgebietsfläche ab.

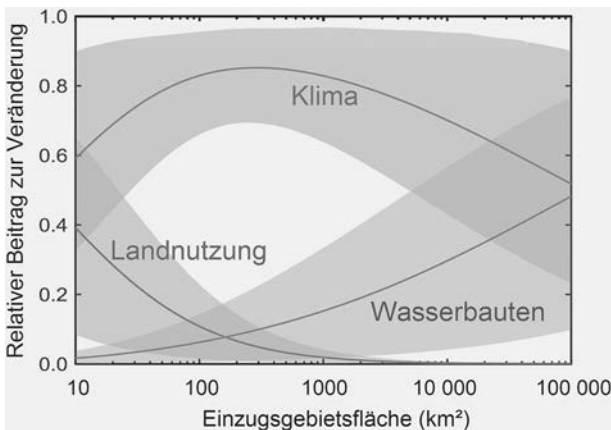


Abbildung 03: Zuordnung beobachteter Veränderungen des mittleren jährlichen Hochwassers zu den drei Einflussfaktoren: Klima, Landnutzung und wasserbauliche Maßnahmen. 97 Einzugsgebiete in Oberösterreich, Abflussdaten 1950–2012.

Figure 03: Attribution of observed changes of the mean annual flood to three drivers: climate, land use and river works. 97 catchments in Upper Austria, runoff data 1950–2012.

Quelle: Viglione et al., 2016

10.3 Berechnung von Hochwasserabflüssen

Für den richtigen Umgang mit extremen Hochwässern ist es notwendig, den Hochwasserabfluss einer bestimmten Jährlichkeit (z. B. das HQ_{100}) genau zu kennen (Blöschl und Merz, 2008). Dabei handelt es sich um den Scheitelabfluss einer Hochwasserwelle. Zusätzlich ist es auch für viele Anwendungen (z. B. die Dimensionierung von Retentionsbecken) notwendig, die Wellenform zu kennen. Wenn die maßgebenden Hochwasserwellen für einen Flussabschnitt bekannt sind, können mit Hilfe von hydrodynamischen Modellen (z. B. Horvath et al., 2015) die zugehörigen Wasserstände berechnet werden.

Die hydrologische Literatur bietet eine Fülle von Methoden an, die sich im Wesentlichen in statistische Auswertungen von gemessenen Hochwasserdatenreihen und Niederschlag-Abflussmodellierungen gliedern lassen (Blöschl und Merz, 2008). Die ersteren werden meist dafür herangezogen, die Scheitelabflüsse einer bestimmten Jährlichkeit zu bestimmen, wobei auch Auswertungen der Wellenform möglich sind (Gaál et al., 2012, 2015). Das Berechnungsergebnis der letzteren sind Hochwasserwellen. Das Regelblatt 220 des Österreichischen Wasser- und Abfallwirtschaftsverbands gibt Empfehlungen für die richtige Anwendung der Niederschlag-Abflussmodellierung (ÖWAV, 2018).

Die statistischen Auswertungen haben wegen ihrer Einfachheit im 20. Jahrhundert eine große Beliebtheit erlangt. Allerdings ist ein statistischer Ansatz nur dann gerechtfertigt, wenn die Voraussetzungen für die Anwendung der Statistik erfüllt sind. In der Praxis ist dies in der Regel nur für große Flüsse der Fall, da an kleineren Flüssen die Hochwasserdatenreihen oft zu kurz, nicht stationär und stärker fehlerbehaftet sind. Statistische Tests (Anpassungstests, Trendtests, Ausreißertests) lösen dieses Problem aus den gleichen Gründen nicht. Größere Unterschiede in der Verwendung verschiedener Parameterschätzungsmethoden und Verteilungsfunktionen weisen auf einen geringen Informationsgehalt der Hochwasserdatenreihen hin. Daher geben solche Tests oft nur eine scheinbare Objektivität. Zuverlässigere Aussagen können nur mit Informationen gewonnen werden, die über die Hochwasserdatenreihen hinausgehen.

Das Merkblatt zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (DWA, 2012) sieht deshalb basierend auf Merz und Blöschl (2008a,b,c) vor, die Informationen zeitlich, räumlich und kausal über die Hochwasserdatenreihen hinaus zu erweitern, und dann das Hochwasser einer bestimmten Jährlichkeit in einer Zusammenschau aller Informationen zu bestimmen. Die zeitliche Informationserweiterung kann etwa durch Verwendung historischer Hochwasserereignisse und längerer Abflussreihen benachbarter Gebiete erfolgen. Die räumliche Informationserweiterung kann durch Regionalisierungsmethoden erfolgen und erlaubt auch Aussagen für Gebiete ohne Abflussmessungen. Die kausale Informationserweiterung kann qualitativ im Vergleich zu anderen hydrologischen Daten (Niederschlag, Abflussbeiwerte, Saisonalität von Hochwasser, Abflusstypen, Gebietsgeomorphologie), sowie quantitativ mittels Niederschlag-Abflussmodellierung erfolgen. Um ein umfassendes Bild der Hochwasser in dem betroffenen Gebiet zu erhalten, ist es sinnvoll, möglichst vielfältige und komplementäre Informationen einzubeziehen (Gutknecht et al., 2006). Dafür haben Merz und Blöschl (2008a,b,c) den Begriff »Extremwerthydrologie« im Gegensatz zur traditionellen »Extremwertstatistik« geprägt.

Ein Beispiel für das Verfahren der Extremwerthydrologie ist in Abbildung 04a für den Pegel Zwettl am Kamp dargestellt, an dem im August 2002 ein Ex-

tremhochwasser mit $460 \text{ m}^3/\text{s}$ Scheitelabfluss auftrat. Die Anpassung einer statistischen Verteilungsfunktion an die Abflussmessungen mit und ohne Ereignis 2002 ist als Ergebnisspektrum der Statistik dunkelgrau dargestellt. Als zeitliche Informationserweiterung wurden die maximalen jährlichen Abflüsse aus den Wasserstandsdaten der Jahre 1896 bis 1947 und die Hochwässer 1655, 1803 und 1829 nach historischen Quellen rekonstruiert. Dieser Bereich ist in Abbildung 04a hellgrau dargestellt und ist enger als der Bereich der statistischen Schätzung. Für die räumliche Informationserweiterung wurden die Hochwasserparameter durch Regionalisierung aus den benachbarten Gebieten ermittelt (durchgezogene Linie). Als kausale Informationserweiterung wurde die Gradex-Methode angewendet (gestrichelte Linie), die die Hochwasserverteilung aus dem Niederschlag ableitet. In Abbildung 04b sind die Ereignisabflussbeiwerte gegen die Jährlichkeit des zugehörigen Abflussscheitels aufgetragen. Der starke Anstieg der Abflussbeiwerte bei zunehmend größeren Ereignissen ist durch die durchlässigen Böden, die erst bei großen Niederschlägen gesättigt werden, gut zu erklären, und unterstützt eine steile Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve bei großen Jährlichkeiten.

Auch wenn, wie oben erwähnt, umfangreiche Informationen verwendet werden, besteht in der Regel eine erhebliche Unsicherheit bei der Bestimmung der Hochwasserabflüsse großer Jährlichkeiten. Diese hängt hauptsächlich vom Umfang und der Qualität der Abflussdaten und der Jährlichkeit ab. In der statistischen Analyse ist eine signifikante Quelle dieser Unsicherheit die begrenzte Länge der Hochwasserdatenreihen. Es kommt daher manchmal vor, dass die für die wasserwirtschaftlichen Planungen verwendeten Bemessungswerte (z. B. HQ_{100}) nach einem großen Hochwasser erhöht werden (z. B. am Rhein 1993 und 1995; Engel, 1999). Es ist deshalb günstiger, anstelle von einem hundertjährlichen Hochwasser HQ_{100} von einem » HQ_{100} auf der aktuellen Informationsbasis« zu sprechen. In der Medizin wird beispielsweise eine Diagnose selbstverständlich überarbeitet, wenn zusätzliche Befunde vorliegen. In ähnlicher Weise ist es in der Hydrologie wünschenswert, die Informationsbasis transparent zu machen und zu vermitteln, dass eine Aussage unter den verfügbaren Informationen getätigt wird.

Die Überlegung des » HQ_{100} auf der aktuellen Informationsbasis« ist auch sinnvoll, wenn der zukünftige Einfluss des Klimawandels auf das HQ_{100} abgeschätzt wird. Die Studie »Klimawandel in der Wasserwirtschaft – Schwerpunkt Hochwasser und Dürre« für Bund und Länder (Blöschl et al., 2017b) fasst den aktuellen Stand des Wissens der Klimaänderungen in Hinblick auf die Auswirkungen auf Hochwässer in Österreich zusammen. Auswertungen von Hofstätter et al. (2015) auf Basis von drei Globalen Klimamodellen lassen erwarten, dass die Häufigkeit starkniederschlagsrelevanter Zugbahnen und Wetterlagen in den nächsten Jahrzehnten leicht abnehmen wird, allerdings die Starknieder-

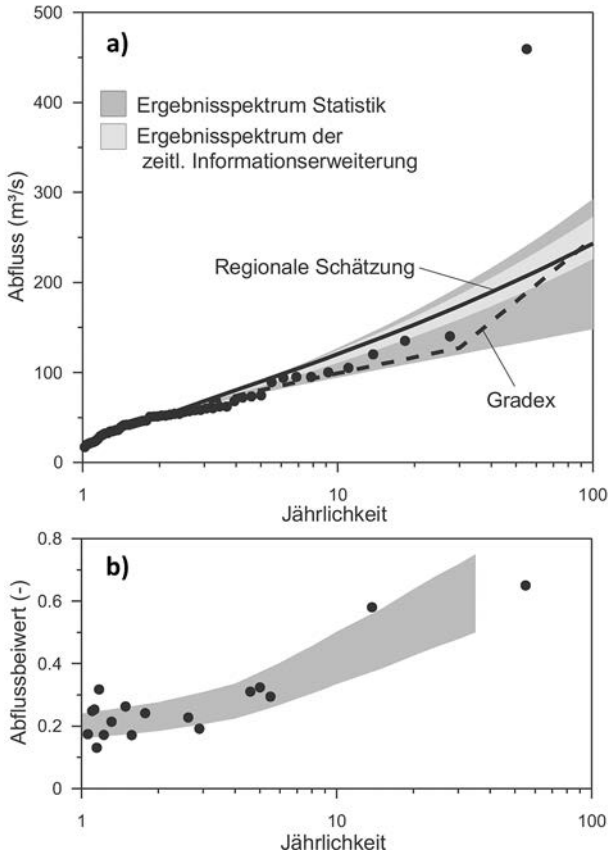


Abbildung 04: Hochwasserwahrscheinlichkeitskurve und Zusammenschau der erweiterten Informationen (a). Abflussbeiwerte (Verhältnis Abflussvolumen zu Niederschlagsvolumen) (b) der Hochwasserereignisse aus (a). Pegel Zwettl am Kamp, 622 km².

Figure 04: Flood frequency curve and synthesis of information expansion (a). Runoff coefficients (ratio of runoff volume and precipitation volume) (b) of the flood events of (a). Gauge: Zwettl at Kamp, 622 km².

Quelle: Merz und Blöschl, 2008c

schläge bei Auftreten eines Vb-Tiefs etwas zunehmen werden. Simulationen von Klimamodellen zeigen, dass konvektive Sommerniederschläge in den Alpen ergiebiger werden könnten bei gleichbleibender Häufigkeit, die Häufigkeit großräumiger Niederschläge jedoch abnehmen könnte (Giorgi et al., 2016).

Blöschl et al. (2011) definierten Mechanismen möglicher Veränderungen von Hochwässern in Österreich:

- Zunahme des Winterniederschlags, Abnahme des Sommerniederschlags (z. B. durch Verschiebung der starkniederschlagsrelevanten Zugbahnen);

- Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Erhöhung des Anteiles konvektiven Niederschlags und dadurch höhere Niederschlagsintensitäten;
- Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Erhöhung der Schneefallgrenze, dadurch größerer Anteil flüssigen Niederschlags am Niederschlag;
- Zunahme der Lufttemperatur, dadurch Verschiebung der Schneeschmelze in das Frühjahr, dadurch Verschiebung des Jahresverlaufes des Abflussbeiwertes;
- Erhöhung der Verdunstung, dadurch Verringerung des Abflussbeiwertes.

Für jeden Mechanismus wurden Monte Carlo Simulationen durchgeführt, und zwar sowohl für die gegenwärtige Situation als auch für einen zukünftigen Zeitraum. Durch einen Vergleich dieser Simulationen lassen sich, wenn auch mit großer Vorsicht, zukünftige Änderungen des HQ_{100} abschätzen (Tabelle 01). Für Gebiete, die innerhalb der Flusseinzugsgebiete von Rhein, Donau und Elbe liegen (also Gebiete nördlich des Alpenhauptkammes), ergeben sich Änderungen des HQ_{100} von -4 bis $+10$ %. Der größte Wert von $+10$ % tritt im Innviertel und Mühlviertel auf. Für Gebiete, die innerhalb der Flusseinzugsgebiete von Drau, Mur und Raab liegen (also Gebiete südlich des Alpenhauptkammes) ergeben sich Änderungen des HQ_{100} von $+1$ bis $+5$ %. Das bedeutet, dass insgesamt die projizierten Änderungen im Vergleich zur natürlichen Variabilität des Hochwassergeschehens relativ klein sind.

Tabelle 01: Möglicher prozentueller Einfluss eines veränderten Klimas auf das HQ_{100} in typischen Gebieten nördlich und südlich des Alpenhauptkammes in Österreich. 2021–2050 im Vergleich zu 1976–2007.

Table 01: Potential percent effect of a changed climate on the 100-year flood in typical areas south and north of the main alpine ridge in Austria. 2021–2050 as compared to 1976–2007.

Quelle: Blöschl et al., 2018a

Region	Veränderung
Rhein, Donau und Elbegebiete	-4 bis $+10$ %
Drau, Mur und Raabgebiete	$+1$ bis $+5$ %

Zukünftige Änderungen der Hochwässer zufolge Landnutzung können mit ähnlichen Simulationsmethoden abgeschätzt werden (Blöschl et al., 2018b). Im Rahmen des Projektes »Auswirkung alpiner Retention auf die Hochwasserabflüsse des Inns« wurde der Einfluss einer hypothetischen Aufforstung von Teilen des Einzugsgebiets auf den Hochwasserabfluss des Inns untersucht. Für die hypothetischen Landnutzungsänderungen wurden alle Flächen im Einzugsgebiet, die als Grasland ausgewiesen waren und unterhalb einer Seehöhe von 2.000 m lagen, als aufgeforstet angesehen. Das betrifft etwa 11 % der Flächen (also etwa 100.000 ha) und stellt damit eine extreme Annahme dar. Das Ergebnis

ist, dass die Landnutzungsänderungen die Hochwasserabflüsse des Inns nur geringfügig beeinflussen. Bei einem HQ_{100} beträgt die Reduktion 4,4 %. Insgesamt ist die Wirkung also sehr klein. Eine realistischere Aufforstung von 10.000 ha würde die Wirkung auf weniger als 0,5 % reduzieren.

10.4 Möglichkeiten des Hochwasserrisikomanagements

Der Umgang mit Hochwässern erfuhr in den letzten Jahren eine Weiterentwicklung von einer Betrachtung einzelner Schutzbauwerke auf eine gedankliche Fassung als Kreislauf des Hochwasserrisikomanagements (Abbildung 05; Blöschl et al., 2015). Zu dessen Instrumenten zählen:

- Hochwasservorsorge (Gefahrenzonenplanung, überregionales Zusammenwirken von Hochwässern, Restrisiko)
- Hochwasserschutz (Flächenrückhalt, lineare Schutzmaßnahmen, v. a. Hochwasserschutzdämme, Hochwasserretention)
- Bewusstseinsbildung (Bürgerbeteiligung, Öffentlichkeitsarbeit und Bildung)
- Vorbereitung (Hochwasserwarnung, Katastrophenschutzpläne)
- Nachsorge (Beurteilung von Hochwasserschäden, Ereignisdokumentation)

Zum Beispiel schließt die Gefahrenzonenplanung ein, Hochwasserrisikogebiete als Bauland in der Raumplanung zu vermeiden. Die Schaffung von Retentionsräumen für den Wasserrückhalt (Hochwasserretention) ist aus der Sicht des Hochwasserrisikomanagements immer zu begrüßen, da dies einen positiven Einfluss auch auf die Unterlieger hat. Für kleine Flüsse, an denen die relevanten Hochwässer meist kurz sind, sind Retentionsbecken in der Regel eine gute Lösung. Für große Flüsse, an denen die Hochwässer länger dauern, ist das Hochwasservolumen groß. Dementsprechend ist der Flächenbedarf sehr groß, da das Ausmaß der Abflussreduktion durch das Verhältnis von Rückhaltevolumen zu Hochwasservolumen bestimmt wird. In besiedelten Gebieten ist es schwierig, genügend Flächen für einen effektiven Hochwasserschutz von Flüssen wie die Donau bereitzustellen. Die Hauptproblematik ist dabei, dass die lokalen Anrainer Einschränkungen in Kauf nehmen müssen, während Unterlieger von der Maßnahme profitieren. Der technische Hochwasserschutz durch Schutzdämme oder mobile Systeme bleibt daher das Rückgrat der Maßnahmen an großen Flüssen, wobei zum Ausgleich des Verlustes der Rückhaltewirkung des Vorlands Rückhaltemaßnahmen vorgesehen werden.

Zunehmend ist auch zu berücksichtigen, dass Extremhochwässer auftreten können, die deutlich größer sind als alle bisher beobachteten Ereignisse bzw. die Bemessungsergebnisse. Man spricht dabei vom Restrisiko. Es gilt also, die Konsequenzen eines derartigen Ereignisses zu untersuchen. In diesem Über-

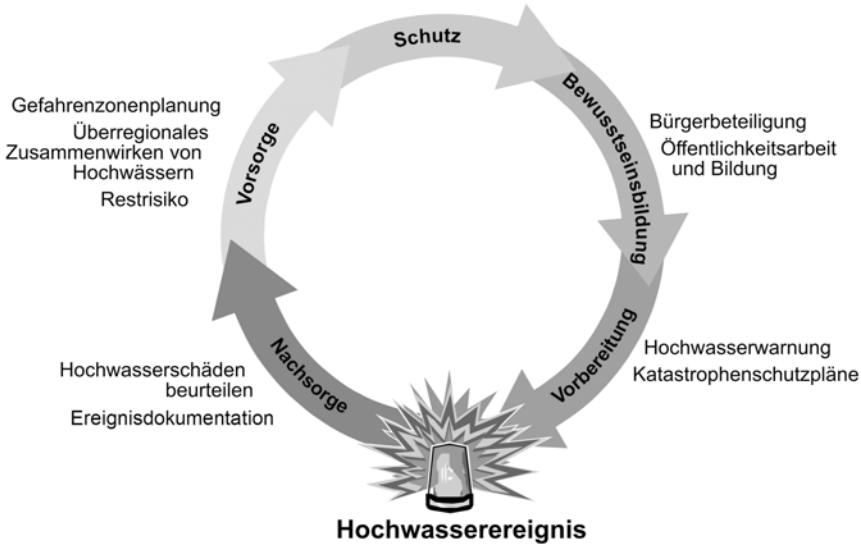


Abbildung 05: Kreislauf des Hochwasserrisikomanagements.

Figure 05: Flood risk management cycle.

Quelle: Blöschl et al., 2015

lastfall wirken die verschiedenen Maßnahmen durchaus unterschiedlich, wie in Abbildung 06 schematisch dargestellt. Bei zunehmend größeren Hochwässern wirkt Aufforstung immer weniger, da das zusätzliche Speichervolumen bald erschöpft ist. Rückhaltebecken wirken optimal bei einem bestimmten Bemessungsabfluss (z. B. HQ_{100}), darüber lässt die Wirkung nach. Wenn eine Flutmulde vorgesehen ist, die bei einem Extremhochwasser einen Teil des Abflusses in das Umland abführt, bleibt die Wirkung länger bestehen. Mobile Hochwasserschutzwände sind effizient, solange der Wasserstand nicht über die Oberkante der Wände steigt. Wenn das der Fall ist, ist keine Schutzwirkung mehr gegeben, und der Schaden kann größer sein als ohne Wände, wenn nicht evakuiert wurde. Ein Tieferlegen der Flusssohle durch Baggerung wirkt auch bei extrem großen Hochwässern, allerdings kann dies negative Auswirkungen auf den Grundwasserstand haben. Generell sind also für den Überlastfall solche Instrumente zu bevorzugen, die ihre Wirkung zumindest teilweise behalten, also robuste Instrumente. Oft ist es sinnvoll, verschiedene Maßnahmen zu kombinieren, denn damit kann die Schutzwirkung für unterschiedliche Situationen stark erhöht werden. In der Praxis sollten Instrumente nicht nur robust gegenüber verschiedener Größen von Hochwasserscheiteln sein, sondern auch gegenüber verschiedenen hydrologischen Situationen und Managemententscheidungen.

Das Hochwasserrisikomanagement sieht heute nicht nur die integrierte Betrachtung unterschiedlicher Maßnahmen, sondern auch eine integrierte Betrachtung des gesamten Flussgebietes vor. Dies ist in der EU-Hochwasserrichtlinie (EU, 2007) vorgesehen und im Nationalen Hochwasserrisikomanagementplan Österreichs implementiert (RMP, 2015). Die integrierte Betrachtung soll zu einem noch zuverlässigeren und effizienteren Management von Hochwasserrisiken beitragen, das langfristig Risiken reduziert.

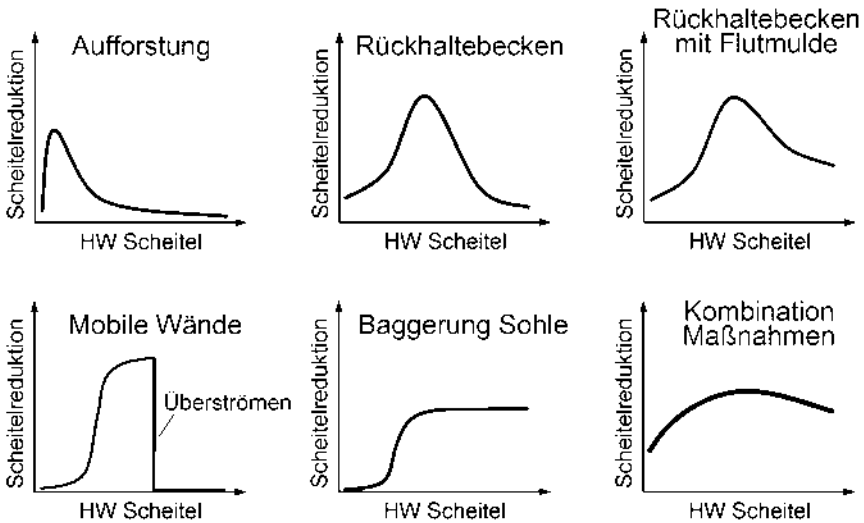


Abbildung 06: Reduktion des Hochwasserscheitels als Funktion der Größe dieses Scheitels durch verschiedene Instrumente des Hochwasserrisikomanagements. Robuste Instrumente sind diejenigen, die den Hochwasserscheitel über einen großen Bereich von Ereignisgrößen reduzieren. Eine Kombination mehrerer Instrumente (rechts unten) ist normalerweise vorzuziehen.

Figure 06: Flood peak reduction as a function of peak magnitude by various instruments of flood risk management. Robust instruments are those that reduce flood peaks over a wide range of flood magnitudes. A portfolio (bottom right) that combines a number of instruments is usually preferable.

Quelle: Blöschl, 2017

Die Betonung des Gesamtsystems im Umgang mit Hochwasser entspricht im Allgemeinen auch der Tendenz im Hoch- und Tiefbau, sich nicht ausschließlich auf das einzelne Gebäude zu konzentrieren, sondern ein Gesamtsystem im Kontext von Gesellschaft, Wirtschaft und Umwelt zu betrachten, in dem die Baumaßnahmen angesiedelt sind. Dies erfordert ein verbessertes Know-how. Im Hydrologischen Freilandlabor (HOAL) bei Petzenkirchen in Niederösterreich (www.waterresources.at) werden die hochwasserauslösenden Prozesse im Detail untersucht, und ein vom Europäischen Forschungsrat (ERC) gefördertes Projekt

untersucht Veränderungen von Überschwemmungen in Europa (*erc.hydro.tu-wien.ac.at*). Die Forschungsergebnisse fließen dann in komplexe hydrologische Modelle ein, die eine genauere Vorhersage von Hochwassern für einen zuverlässigeren Hochwasserschutz ermöglichen.

10.5 Zusammenfassung

Im Alpen Raum Österreichs gab es in den letzten Jahren viele Hochwasserkatastrophen mit enormen Schäden. Um zukünftige Schäden zu minimieren, ist es notwendig, die Hochwasserprozesse zu verstehen, die Größe zukünftiger Hochwässer zuverlässig zu bestimmen, und darauf aufbauend Maßnahmen zu setzen. Extremhochwässer an den Flüssen Österreichs treten meist durch das Zusammenwirken extremer Niederschläge mit gesättigten, abflussbereiten Böden auf. Im Norden Österreichs haben in den letzten Jahrzehnten tendenziell die Hochwasserabflüsse etwas zugenommen wegen einer Zunahme der Niederschläge. Um die Hochwasserabflüsse einer bestimmten Jährlichkeit genau zu berechnen, sollten über die Hochwasserdatenreihen hinausgehende Informationen herangezogen werden. Die für die nächsten Jahrzehnte projizierten Änderungen der Hochwasserabflüsse sind im Vergleich zur natürlichen Variabilität des Hochwassergeschehens relativ klein. Wann das nächste (extreme) Hochwasser genau kommt, kann wegen der Komplexität der Prozesse nicht über Jahre voraus prognostiziert werden. Aber die Maßnahmen des integrierten Hochwasserrisikomanagements erlauben eine optimale Vorbereitung auf die Situation, wenn es wirklich zu einem (extremen) Hochwasser kommt.

Literatur

- Alaoui, A., Rogger, M., Peth, S., Blöschl, G., 2018. Does soil compaction increase floods? A review. *Journal of Hydrology*, 557, S. 631–642. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2017.12.052>.
- Birkas, M., 2008. Environmentally sound adaptable tillage. *Akademia Kiado, Budapest, Ungarn*, 354 S.
- Blöschl, G., 2017. Engineering strategies of enhancing the resilience of cities of art to floods. In: *Resilience of art cities to natural catastrophes: the role of academies. International Conference Florence 1966–2016, held in Rome 11–13 October 2016. Accademia Nazionale dei Lincei and the interacademy partnership. Atti dei Convegni Lincei 315. Bardi Edizioni, Rome*, S. 23–38.
- Blöschl, G., Blaschke, A.P., Haslinger, K., Hofstätter, M., Parajka, J., Salinas, J., Schöner, W., 2018a. Auswirkungen der Klimaänderung auf Österreichs Wasserwirtschaft – ein

- aktualisierter Statusbericht. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 70, S. 462–473. <https://doi.org/10.1007/s00506-018-0498-0>.
- Blöschl, G., Hall, J., Parajka, J., Perdigão, R.A., Merz, B., Arheimer, B., Aronica, G.T., Bilibashi, A., Bonacci, O., Borga, M., Canjevac, I., Castellarin, A., Chirico, G.B., Claps, P., Fiala, K., Frolova, N., Gorbachova, L., Gül, A., Hannaford, J., Harrigan, S., Kireeva, M., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Kohnová, S., Koskela, J.J., Ledvinka, O., Macdonald, N., Mavrova-Guirguinova, M., Mediero, L., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Murphy, C., Osuch, M., Ovcharuk, V., Radevski, I., Rogger, M., Salinas, J.L. Sauquet, E., Šraj, M., Szolgay, J., Viglione, A., Volpi, E., Wilson, D., Zaimi, K., Živkovic, N., 2017a. Changing climate shifts timing of European floods. *Science*, 357(6351), S. 588–590. DOI: 10.1126/science.aan2506.
- Blöschl, G., Horváth, Z., Kiss, A., Komma, J., Nester, T., Perdigão, R.A.P., Viglione, A., Waser, J., 2015. Neue Methoden für das Hochwasserrisikomanagement. *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, 160, S. 15–27.
- Blöschl, G., Komma, J., Nester, T., Rogger, M., Salinas, J., Viglione, A., 2018b. Die Wirkung des Waldes auf Hochwässer. *Wildbach- und Lawinenverbau* 88(181), S. 288–296.
- Blöschl, G., Merz, R., 2008. Bestimmung von Bemessungshochwässern gegebener Jährlichkeit – Aspekte einer zeitgemäßen Strategie. *Wasserwirtschaft*, 98(11), S. 12–18.
- Blöschl, G., Nester, T., Komma, J., Parajka, J., Perdigão, R.A.P., 2013. Das Juni-Hochwasser 2013 – Analyse und Konsequenzen für das Hochwasserrisikomanagement. *Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift*, 158, S. 141–152.
- Blöschl, G., Parajka, J., Blaschke, A.P., Hofstätter, M., Haslinger, K., Schöner, W., 2017b. Klimawandel in der Wasserwirtschaft – Schwerpunkt Hochwasser, Dürre und Trockenheit. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, S. 99.
- Blöschl, G., Viglione, A., Merz, R., Parajka, J., Salinas, J., Schöner, W., 2011. Auswirkungen des Klimawandels auf Hochwasser und Niederwasser. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 63(1/2), S. 21–30.
- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. Neue Studie zum Klimawandel in der Wasserwirtschaft. https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/foerderungen/trinkwasser_abwasser/aktuelle_projekte/klimawandel_wasserwirtschaft.html [29.10.2018].
- Bundeswasserbauverwaltung Tirol, 2016. Hochwasserschutz Tiroler Unterinntal, Zusammenfassender Bericht. <http://www.hochwasserschutz-unterinntal.at/berichte/> [29.10.2018].
- DWA, 2012. Ermittlung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten, Merkblatt DWA-M 552, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, Hennef, Deutschland.
- Engel, H., 1999. Eine Hochwasserperiode im Rheingebiet, Extremereignisse zwischen Dezember 1993 und Februar 1995. Internationale Kommission für die Hydrologie des Rheingebietes. Bericht I-17, 127 S.
- EU, 2007. Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. DE 6.11.2007 Amtsblatt der Europäischen Union L 288/27.
- Gaal, L., Szolgay, J., Kohnová, S., Hlavčová, K., Parajka, J., Viglione, A., Merz, R., Blöschl, G., 2015. Dependence between flood peaks and volumes: a case study on climate and

- hydrological controls. *Hydrological Sciences Journal*, 60, S. 968–984, DOI: 10.1080/02626667.2014.951361.
- Gaál, L., Szolgay, J., Kohnová, S., Parajka, J., Merz, R., Viglione, A., Blöschl, G., 2012. Flood timescales: Understanding the interplay of climate and catchment processes through comparative hydrology. *Water Resources Research*, 48, 21 S., DOI: 10.1029/2011WR011509.
- Giorgi, F., Torma, Cs., Coppola, E., Ban, N., Schär, C., Somot, S., 2016. Enhanced summer convective rain at Alpine high elevations in response to climate warming. *Nature Geoscience*, 9, S. 584–589. DOI: 10.1038/ngeo2761.
- Godina, R., Lalk, P., Lorenz, P., Müller, G., Weilguni, V., 2006. Hochwasser 2005 Ereignisdokumentation. Teilbericht des Hydrographischen Dienstes. https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserkreislauf/hydrograph_charakt_extrema/Hochwasser-Aug2005.html [29.10.2018].
- Gutknecht, D., Blöschl, G., Reszler, Ch., Heindl, H., 2006. Ein »Mehr-Standbeine«-Ansatz zur Ermittlung von Bemessungshochwässern kleiner Auftretenswahrscheinlichkeit. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 58(3/4), S. 44–50.
- Hall, J., Arheimer, B., Borga, M., Brázdil, R., Claps, P., Kiss, A., Kjeldsen, T.R., Kriacuniene, J., Kundzewicz, Z.W., Land, M., Llasat, M.C., Macdonald, N., McIntyre, N., Mediero, L., Merz, B., Merz, R., Molnar, P., Montanari, A., Neuhold, C., Parajka, J., Perdigão, R.A.P., Plavcová, L., Rogger, M., Salinas, J.L., Sauquet, E., Schär, C., Szolgay, J., Viglione, A., Blöschl, G., 2014. Understanding Flood Regime Changes in Europe: A state of the art assessment. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18, S. 2735–2772, DOI: 10.5194/hess-18-2735-2014.
- Hofstätter, M., Jacobeit, J., Homann, M., Lexer, A., Chimani, B., Philipp, A., Beck, C., Ganekind, M., 2015. WETRAX – Weather Patterns, Cyclone Tracks and related Precipitation Extremes. Großflächige Starkniederschläge im Klimawandel in Mitteleuropa. Projektendbericht. *Geographica Augustana*, 19, 240 S.
- Hofstätter, M., Lexer, A., Homan, M., Blöschl, G., 2018. Large-scale heavy precipitation over central Europe and the role of atmospheric cyclone track types. *International Journal of Climatology*, 38, S. 497–517. <https://doi.org/10.1002/joc.5386>.
- Horvath, Z., Waser, J., Perdigão, R.A.P., Konev, A., Blöschl, G., 2015. A two-dimensional numerical scheme of dry/wet fronts for the Saint-Venant system of shallow water equations. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 77, S. 159–182.
- Hübl J., Eisl, J., Tadler, R., 2013. Ereignisdokumentation 2012. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft. 88 S.
- Kirnbauer, R., Pistotnik, G., Blöschl, G., 2016. Klimawandel als Herausforderung für die Wildbachverbauung. *Wildbach- und Lawinenverbau* 80(178), S. 58–77.
- Lexer A., Höfler, A., Hofstätter, M., Krennert, T., 2018. CONVEX: Konvektive Starkniederschläge in Österreich von 1986–2015. Endbericht, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Wien.
- Merz, R., Blöschl G., 2008a. Flood frequency hydrology: 1. Temporal, spatial, and causal expansion of information. *Water Resources Research*, 44(8), 17 S.
- Merz, R., Blöschl G., 2008b. Flood frequency hydrology: 2. Combining data evidence. *Water Resources Research*, 44(8), 16 S.
- Merz, R., Blöschl, G., 2008c. Informationserweiterung zur Bestimmung von Hochwasserwahrscheinlichkeiten. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 52(6), S. 300–309.

- Merz R., Blöschl, G., Humer, G., 2008. National flood discharge mapping in Austria. *Natural Hazards*, 46(1), S. 53–72.
- Merz, R., Blöschl, G., Parajka, J., 2006. Raum-zeitliche Variabilität von Ereignisabflussbeiwerten in Österreich. *Hydrologie und Wasserbewirtschaftung*, 50(1), S. 2–11.
- ÖWAV, 2018. Niederschlag-Abflussmodellierung. ÖWAV Regelblatt 220, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien.
- RMP, 2015. Nationaler Hochwasserrisikomanagementplan <https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-eu-international/Nationaler-Hochwasserrisikomanagementplan.html> [29. 10. 2018].
- Rogger, M., Agnoletti, M., Alaoui, A., Bathurst, J.C., Bodner, G., Borga, M., Chaplot, V., Gallart, F., Glatzel, G., Hall, J., Holden, J., Holko, L., Horn, R., Kiss, A., Kohnová, S., Leitinger, G., Lennartz, B., Parajka, J., Perdigão, R., Peth, S., Plavcová, L., Quniton, J.N., Robinson, M., Salinas, J.L., Santoro, A., Szolgay, J., Tron, S., Akker, J.J.H. van den, Viglione, A., Blöschl, G., 2017. Land-use change impacts on floods at the catchment scale: Challenges and opportunities for future research. *Water Resources Research*, 53, S. 5209–5219, DOI: 10.1002/2017WR020723.
- Salazar, S., Francés, F., Komma, J., Blume, T., Francke, T., Bronstert, A., Blöschl, G., 2012. A comparative analysis of the effectiveness of flood management measures based on the concept of »retaining water in the landscape« in different European hydro-climatic regions. *Natural Hazards and Earth System Science*, 12, S. 3287–3306, DOI: 10.5194/nhess-12-3287-2012.
- Sivapalan, M., Blöschl, G., 1998. Transformation of point rainfall to areal rainfall: intensity-duration-frequency curves. *Journal of Hydrology*, 204, S. 150–167.
- Skublics, D., Blöschl, G., Rutschmann, P., 2016. Effect of river training on flood retention of the Bavarian Danube. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 64(4), S. 349–356. DOI: 10.1515/johh-2016-0035.
- Viglione, A., Merz, B., Viet Dung, N., Parajka, J., Nester, T., Blöschl, G., 2016. Attribution of regional flood changes based on scaling fingerprints. *Water Resources Research*, 52, S. 5322–5340, DOI: 10.1002/2016WR019036.
- WRG, 1959. Gesamte Rechtsvorschrift für Wasserrechtsgesetz 1959, <https://www.ris.bka.gv.at> [21. 10. 2018].

11 Sturzfluten

Stefan Achleitner, Bernhard Kohl, Simon Lumassegger,
Andreas Huber, Herbert Formayer und Felix Weingraber*

Zusammenfassung

Die im vorliegenden Beitrag Sturzfluten behandelten Abfluss bzw. Überflutungsereignisse zeichnen sich durch einen raschen Anstieg des Hochwasserscheitels und die damit verbundenen kurzen Vorwarnzeiten aus. Die Sturzflutereignisse werden dabei grob, in Abhängigkeit des Überflutungsprozesses, in fluviale und pluviale Sturzfluten gegliedert. Die zur Überflutung führenden Niederschlagsereignisse sind kurz und intensiv und lösen bei kleinen Einzugsgebieten entsprechend schnell ansteigende Abflüsse aus. Topographisch werden Sturzfluten nach urbanen/ländlichen bzw. Wildbacheinzugsgebieten unterschieden. Wenn auch das Auftreten nur kleinräumig ist, besteht doch eine hohe Relevanz dieser Ereignisse. Unterschiedliche Studien belegen dabei, dass in der Vergangenheit aufgetretene Schäden vergleichbar mit jenen von fluvialen Hochwässern sind. Die Dokumentation von Ereignissen im Wildbachbereich hat dabei eine weit zurückreichende Geschichte, wobei pluviale Sturzfluten/Oberflächenabflüsse erst in den letzten Jahren bzw. Jahrzehnten in den Fokus rückten. Die statistische Erfassung und Einordnung stellt sich jedoch als schwierig dar. Neben historisch oft fehlenden Aufzeichnungen sind konvektive Niederschlagsereignisse zudem durch ihre Kleinräumigkeit oftmals nicht erfasst. Es werden die bestehenden Konzepte bzw. der Diskussionsstand für die Bemessung im Bereich Wildbach und Hangwässern/pluvialen Sturzfluten vorgestellt. Relevant dabei ist auch der Klimawandel, dessen Auswirkung und schlussendlich Abbildung in der Bemessung. Dies stellt derzeit ein aktives Forschungsfeld dar. Abschließend werden Herangehensweisen in der Gefahreinschätzung, Maßnahmenplanung und Handlungsop-

* Stefan Achleitner, Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich für Wasserbau, stefan.achleitner@uibk.ac.at.

Bernhard Kohl, Bundesforschungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Institut für Naturgefahren, bernhard.kohl@bfw.gv.at.

Simon Lumassegger, Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich für Wasserbau, simon.lumassegger@uibk.ac.at.

Andreas Huber, Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich für Wasserbau, a.huber@uibk.ac.at.

Herbert Formayer, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Meteorologie, herbert.formayer@boku.ac.at.

Felix Weingraber, Amt der Oberösterreichischen Landesregierung, Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft, felix.weingraber@ooe.gv.at.

tionen vorgestellt. Die Finanzierbarkeit, Förderungen und der damit notwendige rechtliche Rahmen stellen dabei wichtige Komponenten in der Praxis dar.

Abstract

This chapter deals with flood events, which are characterized by a rapid rise of the hydrograph and short advance warning times. Flash floods are thereby categorized regarding their flooding process as fluvial and pluvial flash floods. Usually short and intense rainfall events lead to fast developing flood flows in small catchments. From a topographical perspective, a differentiation of flash floods occurring in urban/rural or torrents is made. Although the occurrence is limited to small areas, the overall relevance is high. Different studies show, that damages from past pluvial events are comparable to those from fluvial flooding. While dealing with torrential flood flow events has a long lasting history, the topic of pluvial flash floods has gained increasing attention in the recent decade. Still, the statistical assessment and attribution of an occurrence interval is difficult. Besides historically often missing event descriptions, convective rainfall events are often not measured due to their small spatial extent. Existing concepts for torrents and the state of discussion regarding the design for pluvial flash floods is presented. Important in this respect is to consider climate change applied within design rules which is currently an active field of research. Finally, approaches to deal with the risk assessment, the design of measures and options in the management are shown. The financing, the co-funding of measures and the required legal framework is therein an important component from a practical perspective.

Kernaussagen

- Sturzfluten werden als Überflutungsereignisse definiert die sich durch einen schnellen, starken Abflussanstieg auszeichnen. Der Überflutungsprozess kann dabei pluvial (im ländliche bzw. urbanen Raum fern von Gewässern) oder fluvial (von ständig wasserführenden Gerinnen ausgehend) sein.
- Bestehende Berechnungsmethoden basieren auf Reinwassermodellierung. Im Wildbachbereich sind hier zum Teil Sedimenttransportmodellierungen nachgeschaltet. Oft werden Bemessungen basierend auf Reinwasser mit prozessbedingten Zuschlägen beaufschlagt. Im pluvialen Bereich kommen hydraulische Modellierungen zur Anwendung. Hier besteht zukünftig Forschungsbedarf auch Gchiebetransportmodellierung nutzbar zu machen. Damit verbunden ist die Durchführung und die Intensivierungen von Feldmessungen.
- Bei Sturzfluten/Oberflächenabflüssen bzw. den dafür relevanten Niederschlagsereignissen wird davon ausgegangen, dass diese zukünftig intensiver und auch häufiger werden. Entsprechend gilt es den Grad der Zunahme einzugrenzen. Ziel ist, dies auch in die Bemessung einfließen zu lassen. Entsprechende Untersuchungen sind derzeit aktive Forschungsfelder. Insbesondere die Berücksichtigung konvektiver Mechanismen in Klimamodellen erscheint sinnvoll.
- Verschiedenste lokale Maßnahmen zum Schutz vor Sturzfluten sind formuliert. Die Wirksamkeit dieser gilt es mittels Modellen zu bewerten. Neben Rückhaltemaßnahmen (Becken, Mulden usw.), Ableitungs- und Durchleitungsbauwerken umfasst dies auch Änderungen in der Landnutzung.

Keypoints

- Flashfloods are defined as flood events characterized by a fast and large increase of the discharge. The flooding process can be pluvial (rural/urban parts) or fluvial (in case of torrents).
- Current Methods to simulate flashfloods/surface runoff are based on clear water models. For torrential catchments the subsequent simulation of sediment transport is made in some cases. Often, the design flow obtained is simply increased in order to cover processes that were not simulated explicitly. For pluvial flooding clear water models are usually used. Future research is required addressing sediment transport. Field measurements are therein closely related.
- For flashfloods or for the relevant precipitation events it is expected that they will become more intense and more likely to occur. Thus, the degree to increase is to be understood better. There is currently a lot of research going on, putting the focus towards including convective mechanisms already in the climate model.
- Different local measures to reduce the risk of flash flooding are formulated. They are to be considered in modelling approaches in order to assess their impact. Besides retention measures (reservoirs, ponds,...) and drainage structures, methods to change e. g. the land use are considered as well.

11.1 Definition/Terminologie

11.1.1 Abgrenzung

Charakteristisch für Sturzfluten sind ein rascher Anstieg des Hochwasserscheitels und die damit verbundenen kurzen Vorwarnzeiten. In Abhängigkeit vom Überflutungsprozess können Sturzflutereignisse grob in fluviale und pluviale Sturzfluten gegliedert werden. Kurze intensive Niederschlagsereignisse führen in kleinen Einzugsgebieten (wenige km²) zu entsprechend schnell ansteigenden Abflüssen. Ein ähnliches Abflussverhalten kann bei Deich- oder Dammbürchen oder auch durch in Reservoir einstoßende Lawine, Erdbeben entstehen. Diese Prozesse sind in diesem Beitrag nicht behandelt.

Im Folgenden wird versucht den Begriff »Sturzflut« sowohl hinsichtlich des zeitlichen Ereignisverlaufs als auch der involvierten Abflussbildungs- und -konzentrationsprozesse zu charakterisieren.

11.1.1.1 Zeitliche Ereignisverlauf von Sturzfluten

Im alpinen und voralpinen Raum zeigte sich, dass neben großen Flusshochwässern (Tiroler Inn/Landeck 2005; Kössen 2013; Donau 2013) die weite Landstriche bei einem Ereignis betreffen auch vermehrt kleinräumige Überflutungen auftreten. Große Flusshochwässer werden dabei primär von advekt-

tiven Niederschlagsereignissen ausgelöst, bei denen große Niederschlagsmengen, aber mit geringen Intensitäten über mehrere Tage fallen. Der maßgebliche Abflussprozess ist tendenziell die Sättigung des Bodens, aber zum Teil auch Zwischenabfluss und Grundwasserabfluss. Im Gegensatz dazu kommt es in kleinen Einzugsgebieten – meist lokal begrenzt – zu hohen Abflüssen und Überflutungen angetrieben durch konvektive Niederschläge (z. B. Gewitter). Es dominiert der Infiltrationsüberschuss des Bodens im Abflussbildungsprozess. Die resultierenden Sturzfluten zeichnen sich durch hohe Spitzenabflüsse und kurze Abflusszeiten in betroffenen Gebieten aus, wobei in der Literatur die zeitlichen und räumlichen Abgrenzungen zu fluvialen Hochwässern unterschiedlich definiert sind.

Gaume et al. (2009) definieren als Größenordnung für Sturzfluten Ereignisse, bei denen der Niederschlag im Ereignisfall 100 mm innerhalb weniger Stunden überschreitet. Eine allgemein gültige Festlegung hinsichtlich der kritischen Regenmenge ist dabei ohnehin nicht möglich und es können auch durchaus geringere Niederschlagsmengen bereits zu Überflutungen führen. Die Abflussbereitschaft ist dabei abhängig von den jeweiligen Einzugsgebieteigenschaften wie Bodenarten, Landnutzung, Topographie und auch die hydrologische Vorgeschichte (feuchte oder trockene Vorbedingung).

Die von Gaume et al. (2009) erstellte Ereignisdatenbank von 550 Extremereignissen in sieben europäischen Ländern wird auch als »extreme flash floods« bezeichnet, wobei diese auch Ereignisse enthält, die eher klassischen Flusshochwässern zuordenbar sind. Die angewendeten Auswahlkriterien (Regendauer < 24 h und Einzugsgebietsgrößen von bis zu 500 km^2) sind darin weiter gefasst, als üblicherweise für Sturzfluten herangezogen. Meist werden Ereignisse bzw. Reaktionszeiten von Einzugsgebieten in der Größenordnung von wenigen Stunden (bis < 6 h) definiert (Georgakakos, 1986; URBAS 2008; Archer und Fowler, 2018). Die kurzen Ereignisdauern spiegeln sich auch in den von Wetterdiensten verwendeten Grenzwerten zur Starkregenwarnung wieder. So werden beim UK Met Office Niederschlagsmengen von > 40 mm (80 mm) in 1 h, > 66 mm (106 mm) in 3 h und > 80 mm (120 mm) in 6 h als Sturzflutereignisse definiert wobei die Werte in Klammern für Situationen mit trockenen Ausgangsbedingungen im Einzugsgebiet gelten (Pollard, 2014). In den verschiedenen Stufen der vom DWD (Deutscher Wetterdienst) angewendeten Wetterwarnkriterien wird zwischen Starkregen (< 6 h) und Dauerregen (> 6 h) unterschieden (LAWA, 2018). Unwetterwarnungen sind bei > 25 mm/1 h oder > 35 mm/6 h definiert; extreme Starkregen (Stufe 4) bei > 40 mm/h bzw. > 60 mm/6 h (DWD, 2018a,b; LAWA, 2018).

In Österreich kommen die Meldekriterien der ESWD (European Severe Weather Database) zur Anwendung. Nach dieser werden Starkregen erfasst, bei denen außerordentlich hohe Niederschläge in einer Zeit von maximal 24 Stun-

den gemessen wurden. Als Ereignisse ausgenommen sind »Hochwasser entlang von (größeren) Flüssen und Überflutungen aufgrund einer Kombination von Tauwetter und Regen« (ESWD, 2014; ZAMG, 2014). Als Starkregenkriterium wird das vereinfachte dauerstufenabhängige Kriterium nach Wussow bei Dauerstufen größer 30 Minuten herangezogen (> 25 mm bei 30 min; > 35 mm bei 1 h; > 85 mm in 6 h). Alternativ (nicht in ESWD Definition enthalten) wird das Wussow (1922) Kriterium auch für Niederschlagsdauern kleiner 30 Minuten angewandt wobei für Dauerstufen über 30 min die Formeln nach Schimpf angewandt werden können (Gao, 2000; Fürst, 2012; Krüger et al. 2015).

11.1.1.2 Einteilung nach der Abflusskonzentration bzw. der Art der Überflutungsprozesses

Bernet et al. (2017) beschreiben den Begriff »Flash Flood« (Sturzflut) als ursprünglich nur bei fluvialen Ereignissen gebräuchlich. Es wird auf die deutschsprachige Literatur und die dortige Verwendung des Begriffs »Sturzflut« verwiesen, der auch oft pluviale Ereignisse umfasst. Ähnlich sind in der englischen Literatur auch Quellen zu finden, welche Begrifflichkeiten wie »Urban flash flood« oder »Pluvial Flash Flood« verwenden und damit schnell abfließende oberflächliche Abflüsse, im urbanen und/oder ländlichen Bereichen beschreiben (Gourley et al., 2010; Archer und Fowler, 2018).

Grundsätzlich werden natürliche Ereignisse in pluviale und fluviale Überflutung unterschieden. Pluviale Überflutungen bezeichnen dabei Überflutungen, die abseits und ohne Beitrag von (ständig wasserführenden) Gerinnen entstehen (ÖROK, 2017). Dem gegenüber stehen fluviale Hochwässer, welche aus Gewässern heraus entstehen, wenn diese hydraulisch überlastet sind. Eine sinnvollere Einteilungsmöglichkeit der Überflutungsarten ist in Abbildung 01 dargestellt. Eine eindeutige und klare Abgrenzung der beiden Mechanismen ist in der Praxis jedoch in vielen Fällen nicht möglich, insbesondere wenn kleine Gräben, nicht ständig wasserführende Gerinne oder Kanalisationsanlagen mit betroffen sind. In der Literatur finden sich auch leicht unterschiedliche Begrifflichkeiten um die verschiedenen Überflutungsprozesse zu unterscheiden.

Nach Falconer et al. (2009) wird *pluviales Hochwasser* als niederschlaginduzierte Überflutung definiert noch bevor das Wasser in Bächen, Flüssen, Kanalisationsanlagen etc. abfließt und deckt sich begrifflich mit der »Guidance for Reporting under the Floods Directive (2007/60/EC)« (European Commission, 2013). Als Überbegriff zur pluvialen Überflutung wird »Surface Water Flooding (SWF)« – Überflutung durch Oberflächenwasser genutzt. Dabei werden auch Überflutungen durch Wasser aus kleinen Gerinnen, Ableitungen und Kanalsystemen miteingeschlossen (Falconer et al., 2009; Bernet, 2017; Jenkins et al., 2017). Implizit werden dabei ausschließlich niederschlagsinduzierte Ereignisse

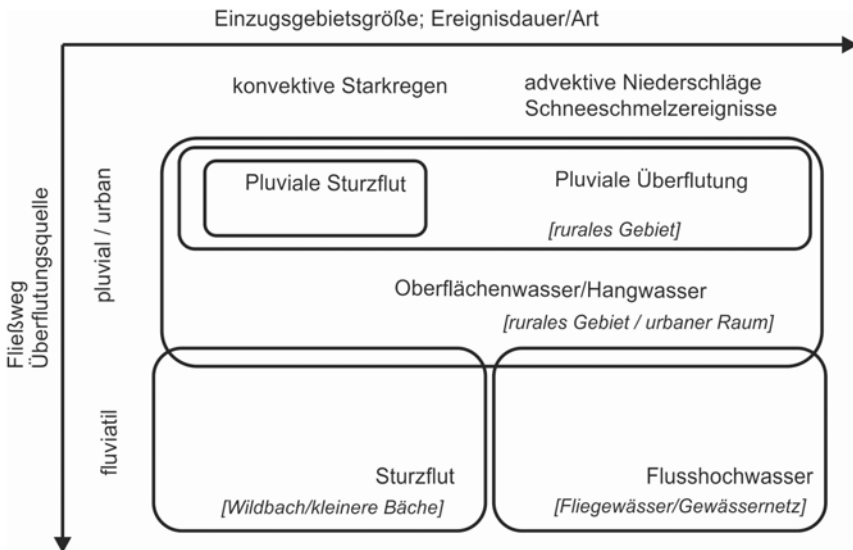


Abbildung 01: Einteilung der Überflutungsarten.

Figure 01: Classification of the flooding types.

Quelle: S. Achleitner; S. Lumassegger; A. Huber

beschrieben. Andere Autoren (Spekkers et al., 2011; Leonard et al., 2014; Abebe et al., 2018; Archer und Fowler, 2018; Di Salvo et al., 2018) treffen keine weitere Unterscheidung und bezeichnen mit pluvialer Überflutung auch aus dem Kanal sowie nicht ständig wasserführende Gräben und Mulden herrührende Überflutungen.

In Österreich sind pluviale Hochwässer als »ohne Beteiligung von Gewässern« teilweise ohne weitere Spezifikation definiert (BMLFUW, 2015a,b; ÖROK, 2017). Der Begriff Hangwasser hat sich dabei eingebürgert und wird synonym mit pluvialem Hochwasser verwendet (ÖWAV, 2013; ÖROK, 2017). Im Hangwassermanagementkonzept des Landes Oberösterreich ist eine analoge Definition gegeben, wobei »Hangwasser und Sturzfluten« zusammengefasst als (Hoch)wasserabfluss in Folge von Starkniederschlägen und lange andauernden Niederschlägen auch fern von Gewässern beschrieben werden (Land OOE-OGW, 2015a).

Bei *fluvialen Sturzflut bzw. Wildbachereignissen* handelt es sich um Ereignisse im alpinen bzw. voralpinen Bereich, bei welchen die Überflutung primär vom Gerinne ausgeht (fluviale Überflutung). Die (behördliche) Abgrenzung von Wildbächen erfolgt gemäß § 99 Abs. 5 des Forstgesetzes 1975 (BGBl Nr. 440/1975 – RIS, 2019a). Darin ist ein Wildbach als »dauernd oder zeitweise fließendes Gewässer, das sich durch rasch eintretende und nur kurze Zeit dauernde Anschwellungen« auszeichnet und »Feststoffe aus seinem Einzugsgebiet oder

aus seinem Bachbett in gefahrdrohendem Ausmaße entnimmt« definiert. Betreffend des Feststofftransports und der Auswirkung auf die Überflutung und Schadwirkung wird auf den Beitrag 12 zu *fluviale Feststoffereignisse* verwiesen. Einteilung und Ausweisung von Wildbächen und Wildbacheinzugsgebieten erfolgt auf Landesebene. Der Landeshauptmann hat diese auf Vorschlag der Wildbachsektion des Bundeslandes (Dienststelle gemäß § 102 Abs. 1 lit. a) durch Verordnung festzulegen (siehe z. B. LGBL Nr. 125/2009 – Oö. Einzugsgebieteverordnung (RIS, 2019b)) oder analoge Rechtsvorschriften in den übrigen Bundesländern.

In vielen Fällen sind die Ereignisse und Überflutungen jedoch Mischformen und damit nicht streng als pluvialer oder fluvialer Ereignistyp zuordenbar. Oftmals sind nicht nur breitflächig Überflutungen gegeben, sondern es erfolgt zudem eine Abflusskonzentration in Gräben, Mulden und Senken oder auch in kleineren oder größeren Bächen.

11.1.2 Relevanz und Historische Entwicklung

11.1.2.1 Relevanz pluvialer/fluvialer Überflutungen

Eine entsprechende Relevanz, bezogen auf die Schadwirkung ist sowohl bei fluvialen Sturzfluten (Wildbachereignisse) als auch pluvialen Sturzfluten (Hangwässer) gegeben. In BMLFUW (2012b) sind Schäden durch Wildbäche (Objektschäden inkl. Aufräumkosten im Zeitraum 1972–2004) mit insgesamt € 965 Mio angegeben. Im Vergleich dazu betragen die Kosten der Hochwasserkatastrophen 2002 und 2005 jeweils € 2,9 Mrd bzw. € 592 Mio.

In einer Auswertung von Versicherungsdaten aus der Schweiz zeigen Bernet et al. (2017), dass mehr als 40 % der Schadensmeldungen und mehr als 20 % der reklamierten Hochwasserschäden in der Schweiz (im Zeitraum der letzten 10 bis 33 Jahre) auf Überflutungen durch Oberflächenabfluss zurückzuführen sind, d. h. nicht mit fluvialen Ereignissen in Verbindung stehen. Auch Erfahrungen aus der deutschen Versicherungswirtschaft zeigen, dass mittlerweile ca. 50 % aller regulierten Überflutungsschäden in Verbindung mit lokalen Starkniederschlägen und daraus resultierenden Überflutungen fernab von Flüssen auftreten (vgl. Kron 2009; Johann und Pohl 2010; Illgen, 2017). Auch Einschätzungen für Österreich gehen davon aus, dass rund die Hälfte der bei Hochwässern auftretenden Sachschäden durch erhöhten Oberflächenabfluss, Grundwasseranstieg und Kanalarückstau verursacht werden (ÖROK, 2017). In den meisten Fällen stehen die verursachten Überflutungen im direkten Zusammenhang mit Starkniederschlagsereignissen. Die genannten Zahlen zeigen deutlich die privat- und volkswirtschaftliche Relevanz pluvialer Hochwässer auf.

Die Extremereignisse 2016 in Süddeutschland haben auch eindrücklich gezeigt, dass Sturzfluten nicht nur eine Gefahr für Infrastruktur und Sachgüter, sondern auch für Leib und Leben darstellen. Das Bayerische Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2016) beschreibt die beiden lebensbedrohlichen Gefahren durch Wasserdruck und durch Strömung bei Sturzfluten. So ist zum Beispiel ab einem Wasserstand von einem halben Meter eine Druckkraft von 125 kg erforderlich um eine Türe zu öffnen. Die Strömungsgefahr kann als Produkt aus Fließtiefe und Fließgeschwindigkeit abgeschätzt werden. Dabei können bereits bei einer Geschwindigkeit von 3 m/s und einer Fließtiefe von 30 cm Kinder von der Strömung mitgerissen werden. Kanaldeckel können durch den Wasserdruck angehoben werden und stellen damit eine lebensbedrohliche Gefahr für Personen dar. Aufgrund der mitgeführten Schlammmassen sind die offenen Kanalschächte nicht mehr ersichtlich, Personen die in den Schacht fallen können ertrinken. In der allgemeinen Wahrnehmung ist diese Gefährdung durch pluviales Hochwasser bzw. Hangwasser häufig nicht in dem erforderlichen Ausmaß gegeben.

11.1.2.2 Historische Entwicklung – Pluviale Sturzfluten/Hangwässer

Im Vergleich zu Flusshochwässern und Wildbachprozessen wurde die Thematik pluvialer Überflutungen historisch gesehen wenig beachtet (vgl. Bernet et al., 2017; Archer und Fowler, 2018). In den letzten Jahren kann aber ein rapider Anstieg der dokumentierten Hochwasserereignisse fernab von Gewässern beobachtet werden (Zahnt et al., 2018 siehe auch Abbildung 02 (aus European Commission, 2015)). Auch eine steigende Zahl wissenschaftlicher Projekte und Publikationen widmen sich in letzter Zeit dem Thema.

Vor allem pluviale Hochwässer in urbanen Gebieten sind, ausgelöst von Ereignissen u. a. in Großbritannien (z. B. Pitt, 2008; Falconer et al., 2009; Coulthard und Frostick, 2010), Deutschland (z. B. Grünewald, 2009; Spekkers et al., 2017), den Niederlanden (Spekkers et al., 2014, 2017), Dänemark (z. B. Haghigatafshar et al., 2014) und auch Österreich (z. B. Graz am 16.04.2018), in den letzten Jahren vermehrt in den Blickpunkt des Interesses von Wissenschaft und öffentlicher Verwaltung gerückt.

Dass Überflutungen fernab von Gewässern aber kein rein urbanes Phänomen darstellen, zeigen u. a. entsprechende Ereignisse in ländlichen Gebieten. So kam es z. B. im Sommer 2016 in Oberösterreich, der Steiermark und Teilen Süddeutschlands zu zahlreichen Überflutungen in Folge von wild abfließendem Oberflächenwasser nach extremen Gewitterregen (z. B. Hübl, 2018; Zahnt et al., 2018). Auch in voralpinen Regionen der Schweiz, sowie hauptsächlich landwirtschaftlich genutzten Gebieten in England, Frankreich oder Belgien sind

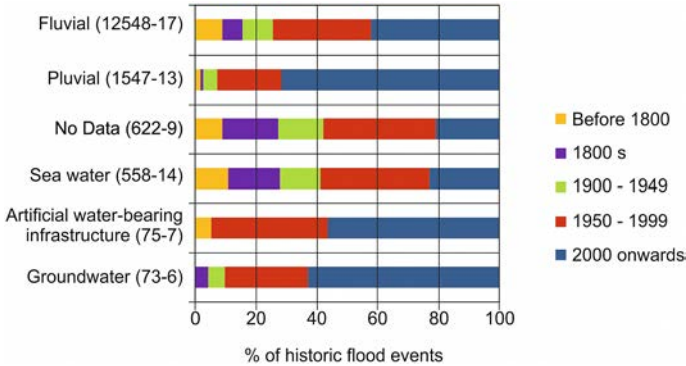


Abbildung 02: Auswertung erfasster/gemeldeter Überflutungsereignisse ausgewählter EU Mitgliedstaaten im zeitlichen Verlauf. Zahlen in Klammern bezeichnen (Anzahl der Ereignisse – Anzahl der EU Mitgliedstaaten).

Figure 02: Time periods of reported historic flood events based on data from selected EU Memberstates (The numbers in brackets after the source of flood refers to the number of events reported from the number of MS).

Quelle: übernommen und adaptiert aus European Commission, 2015

Überflutungen durch Hangwässer kein unbekanntes Phänomen (Boardman, 2010; Bernet, 2017).

Aussagen über die statistische Größenordnung bzw. die Häufigkeit von Sturzflutereignissen im urbanen als auch ländlichen Raum sind auf Grund der fehlenden oder lückenhaften Aufzeichnungen zu historischen Ereignissen oft nur schwer zu treffen (Archer et al., 2017).

11.1.2.3 Historische Entwicklung – Wildbach

Da in Österreich, dessen Landschaft von Mittel- und Hochgebirge geprägt ist, nur 38 % der Fläche für eine dauerhafte Besiedlung nutzbar ist, sind Sturzfluten im Wildbachbereich von sehr hoher Relevanz. Sie bergen seit jeher ein hohes Sicherheitsrisiko für die Bevölkerung, ihren Lebens-, Siedlungs- und Wirtschaftsraum. Überlieferungen zu Sturzfluten im Wildbachbereich reichen in Österreich zurück bis ins Frühmittelalter. Dabei sind seit jeher Hochwasserereignisse meist mit den Prozessen Geschiebetransport und Vermurung kombiniert. Eine der ältesten Überlieferungen eines Wildbachereignisses ist die Vermurung des Lahnbaches um 544 in der Gemeinde Schwaz (Tirol). Tradierte Flurnamen wie Wildenbach, Wurmbach, Hundsbach u. ä. zeugen darüber hinaus von der Gefahr, die von diesen Wildbächen ausging. 1884 nach Jahren verstärkter Wildbachaktivität wurde ein Gesetz betreffend Vorkehrungen zur unschädlichen Ableitung von Gebirgswässern erlassen und der Forsttechnische Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung (WLW) gegründet. Im Ereignis-

portal des digitalen Wildbach- und Lawinenkatasters der WLW (BMLFUW, 2012a; BMLFUW, 2016) werden all jene historischen Daten aufgearbeitet, die der Wildbach- und Lawinenverbauung zur Verfügung stehen und gleichzeitig auch die aktuellen Ereignisse eingepflegt. Eine Auswertung von Wildbachereignissen zwischen 1880 und 2009 (Hübl et al. 2009) zeigt drei große Änderungen in der Zeitreihe. Ab 1880 ist ein leicht steigender Trend zu beobachten, ab den 1920er Jahren stagniert dieser Trend, was sich durch die Weltkriege und den damit verbundenen personellen Mangel erklären lässt. Mit Ende der Kriege ist auch wieder ein rasches Ansteigen an dokumentierten Ereignissen zu beobachten, doch ab den 1950er Jahren pendelt der Trend zwischen ereignisreicheren und wenig ereignisreicheren Jahrzehnten, wodurch auf keinen Trend in der Zunahme an Ereignisse geschlossen werden kann.

11.2 Bemessung, Hochwasserwahrscheinlichkeit und Schutzziele

11.2.1 Genereller Überblick

In der Bemessung von Schutzwasserbauten werden maßgebliche Bemessungsereignisse mittels der Wiederkehrwahrscheinlichkeit charakterisiert. Diese beschreibt, wie oft im Durchschnitt ein charakteristischer Wert innerhalb einer Zeitspanne überschritten wird. Für Hochwasser ist dies üblicherweise der Spitzenabflusswert dessen Ereignishäufigkeit beschrieben wird, ausgedrückt als Jährlichkeit T_n . Diese Hochwasserkennwerte bilden die Basis für die Festlegung von Bemessungshochwässern für Hochwasserschutzmaßnahmen. Die Festlegung der Hochwasserkennwerte ist eine Kernaufgabe der Hydrografischen Dienste. Bei Vorhandensein von repräsentativen Pegeldata kommen extremwertstatistische Verfahren zur Anwendung. Sind statistische Verfahren nicht möglich bzw. aussagekräftig, was in Einzugsgebieten ohne Messpegel und im Wildbachbereich der Regelfall ist, so kommen Regionalisierungsverfahren bzw. unterstützende NA-Modelle zur Anwendung. Die Bemessung der Anlagen erfolgt auf Basis der von den Hydrographischen Diensten bekanntgegebene Erwartungswerte für die Hochwasserabflüsse durch die Wasserbauer.

In Sinne der Hochwasserrichtlinie (EG, 2007) werden Gefährdungen von hoher, mittlerer und niedriger Wahrscheinlichkeit unterschieden welche einem 30-, 100- bzw. 300-jährlichem Ereignis entsprechen (RIWA-T, 2016; ÖROK, 2017). Dieser Einteilung entsprechend folgt die Gefahrenzonenplanung. Entlang von Gerinnen und Flussläufen wird Abschnitts- bzw. Einzugsgebietsweise für die Festlegung von Bemessungswerten zusätzlich nach dominierenden bzw. vorherrschenden Prozesstypen unterschieden. Entsprechend wird bei murartigen Prozessen bzw. Abschnitten mit stark fluvialem Geschiebetransport eine Er-

höhung der Bemessungsniveaus (hin zu HQ_{150} Szenario) angestrebt (Rudolf-Miklau, 2009; BMLFUW, 2010; RIWA-T, 2016). Im Zuge der Planung und Beurteilung von Schutzwasserbauten kommt grundlegend das HQ_{100} Ereignis in der Festlegung des Schutzgrades zu Anwendung. Abminderungen oder Erhöhungen des Schutzgrades sind in begründeten Fällen möglich (RIWA-T, 2016).

Restrisikobetrachtungen dienen der Erfassung von Auswirkungen von Abflüssen über dem Bemessungsereignis (Überlastfall) oder einem Versagenszustand einer Schutzmaßnahme (z. B. technisches Gebrechen,...). Nach RIWA-T (2016) ist hier ein seltenes Bemessungsereignis ($HQ_{300/Extrem}$) vorgesehen.

Im Unterschied zu Hochwasserschutzbetrachtungen im fluviatilen Bereich sind Bemessungswerte bzw. Schutzziele in der Siedlungsentwässerung entsprechend niedriger ausgelegt. Zudem sind Bemessungsszenarien definiert durch die Wiederkehrzeiten der verwendeten Niederschläge und nicht der gemessenen Abflüsse. Statistische Verfahren sind aufgrund fehlender Abflussmessungen im Regelfall nicht möglich. Die empfohlene Jährlichkeit des Niederschlags T_n variiert dabei zwischen unterschiedlichen Nutzungskategorien (ländliche Gebiete, Wohngebiete, Stadtzentren, Gewerbegebiete, Unterirdische Verkehrsanlagen) zwischen 1 und 10 Jahren. In den gleichen Nutzungskategorien variieren die empfohlenen Häufigkeiten für Überstau und Überflutung zwischen 2–10 bzw. 10–50 Jahren (Regelblatt 11 – ÖWAV, 2009). Für Oberösterreich wurde festgelegt, dass der Bemessungswert von Anlagen in kritischen Bereichen auf die Schutzansprüche der Unterlieger abzustimmen ist.

11.2.2 Pluviale Sturzfluten/Oberflächenwasser/Hangwasser

Oberflächenwässer sind derzeit in Österreich hinsichtlich der Bemessungsfrage (Überflutungssicherheit bzw. Dimensionierung von Rückhaltemaßnahmen bei Siedlungen) in Diskussion. Einerseits darf deren Berücksichtigung für Schutzwasserbauten im Rahmen der RIWA-T (2016) erfolgen, sofern eine einzugsgebietsbezogene Betrachtung durchgeführt wird. Das legt eine Anwendung von Schutzziele analog zu fluvialen Ereignissen nahe. Oberflächenwässer aus dem Umland treten jedoch auch in Kombination mit rein aus dem urbanen Gebiet selbst herrührenden Überflutungen auf. Dieser Betrachtung lägen in der Dimensionierung nach ÖWAV RB 11 (2009) geringere Jährlichkeiten (auf das Niederschlagsgeschehen bezogen) zu Grunde.

Weiters besteht das Problem, dass Hangwässer keinem definierten Abflussquerschnitt zugeordnet werden können. Das macht es unmöglich eine Abflussganglinie bzw. -menge festzumachen. Sowohl in der Messung nach/während der Ereignisse als auch in der Nachrechnung sind ausschließlich Über-

flutungsflächen und/oder Wasserstände zur Ereignisbeschreibung nutzbar (Archer und Fowler, 2018).

Eine Modellierung der Oberflächenwässer kann derzeit als einzige Möglichkeit gesehen werden, Bemessungsszenarien abzubilden, wobei (a) die zu verwendenden Niederschlagsdaten (Jährlichkeiten von Bemessungswerten) und (b) anzuwendenden Randbedingungen (Bodeneigenschaften, Landnutzungsszenarien, Vorbedingung, etc.) derzeit nicht einheitlich definiert sind. Die zur Verfügung stehenden Daten und Modellierungsoptionen werden in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt.

11.2.2.1 Wildbachereignisse

Im Wildbachbereich können zwar Abflüsse einem Gebietsauslass zugeordnet werden, im Unterschied zu Flusshochwässern sind jedoch Abflussmessungen bei Extremereignissen meist nicht möglich. Sind also statistische Verfahren zur Bestimmung eines Bemessungsabflusses nicht möglich bzw. aussagekräftig, was im Wildbachbereich der Regelfall ist, so kommen Regionalisierungsverfahren bzw. unterstützende NA-Modelle zur Anwendung. In der Praxis liefern allerdings statistische und deterministische Methoden für das gleiche Einzugsgebiet nicht immer konsistente Ergebnisse. Rogger et al. (2011) verglichen in einer Studie HQ_{100} -Werte für zehn alpine Einzugsgebiete in Tirol. Dabei wurden Ergebnisse aus (i) einem ereignisbasierten Modell mit jenen aus einer kontinuierlichen Wasserhaushaltmodellierung (Langzeitsimulation) gegenübergestellt. Beim ereignisbasierten Ansatz spielt vor allem die Wahl des verendeten Niederschlags als Eingangsgröße eine entscheidende Rolle, wobei in Österreich die Verwendung von Bemessungsniederschläge mit Flächenabminderung meist als zu plausiblen Ergebnissen führend angesehen wird. Die Ergebnisse der Langzeit Simulationen zeigen andererseits, dass es in bestimmten Fällen zu einen Knick in der Hochwasser-Wahrscheinlichkeitsverteilung kommen kann. Die einfache Hochwasserstatistik erfasst diesen Effekt nicht. Die alleinige Anwendung der Hochwasserstatistik kann in diesen Fällen zu einer Unterschätzung des HQ_{100} führen. Im Leitfaden zur Festlegung und Harmonisierung von Bemessungsereignissen des BMNT (BMLFUW, 2010) wird eine prozessorientierte Harmonisierung ausgehend vom Reinwasserprozess mit einer bestimmten Jährlichkeit (z. B. HQ_{100}) mit einem mehr oder weniger kontinuierlichen Übergang (im Längsschnitt eines Einzugsgebietes betrachtet) zu den klassischen Wildbachprozessen mit einer prozessbedingt erhöhten Unsicherheit (z. B. 150-jährliches Szenario) angestrebt.

11.2.2.2 Kombinierte Ereignisse

Diese Ereignisarten sind ähnlich zu sehen wie die rein pluvialen Ereignisse und werden aktuell in der Behandlung oft vermischt bzw. gemeinsam behandelt und sind auch entsprechend schwer bzw. nicht zu trennen. Oft werden diese in Bemessungsansätzen durch gesamtheitliche Modellbildung und Anwendung homogener Niederschlagsszenarien erfasst. Eine explizite Erfassung der gemeinsamen Auftretenswahrscheinlichkeit pluvialer und fluvialer Überflutungen ist derzeit nicht gegeben.

11.3 Datengrundlagen und Einschätzung von Unsicherheiten

11.3.1 Niederschlagsdaten zur Ereignisrekonstruktion

In Österreich können qualitätsgeprüfte Niederschlagsdaten von Messstationen des Hydrographischen Dienstes und der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik bezogen werden. Aufgrund der räumlich begrenzten Ausdehnung von konvektiven Starkregenereignissen werden Extremereignisse allerdings nur selten von kontinuierlichen Niederschlagsmessstationen erfasst. Alternativ dazu gibt es die Möglichkeit auf Niederschlagsdaten von privaten Messstationen (z. B. <https://www.wunderground.com/wundermap>) zurückzugreifen. Diese Daten entsprechen zwar nicht den Qualitätskriterien des Hydrographischen Dienstes, allerdings ist das kontinuierliche Messstellennetz deutlich dichter, wodurch diese viel häufiger konvektive Starkregenereignisse erfassen. Eine Plausibilitätskontrolle ist bei Verwendung dieser Daten zwingend erforderlich.

Niederschlagsdaten für ganz Österreich in einer räumlichen Ausdehnung von 1 km und einer zeitlichen Auflösung von 15 Minuten können über das Analyse- und Nowcastingsystem INCA der ZAMG bezogen werden (Haiden et al., 2009). Dabei wird die bessere quantitative Genauigkeit von Stationsdaten mit der besseren räumlichen Auflösung von Radardaten kombiniert. Aufgrund der prinzipiellen Schwierigkeit des Analysesystems INCA, Niederschlagssummen sehr kurzer konvektiver Ereignisse räumlich exakt vorherzusagen, sollten immer Informationen aus der näheren Umgebung für eine Ereignisrekonstruktion herangezogen werden. In den INCA Daten wird zwar das Verteilungsmuster von konvektiven Starkregenereignissen aufgrund der genutzten Radardaten gut wiedergegeben, allerdings sind die Niederschlagsintensitäten, besonders bei kurzen Dauern mit Unsicherheiten behaftet und sollten deshalb plausibilisiert werden.

11.3.2 Bemessung – Bemessungsniederschläge

Österreichweit werden drei Typen von Bemessungsniederschlägen vom Hydrographischen Dienst für verschiedene Dauerstufen und Jährlichkeiten auf eHYD (<http://ehyd.gv.at/>) zur Verfügung gestellt. Die interpolierten ÖKOSTRA Niederschläge basieren bei kurzen Dauerstufen auf Auswertungen von 141 Messstellen und bilden die untere Grenze der Bemessungswerte. Die maximierten Modellniederschläge (MaxModN) wurden aus Niederschlagsmodellrechnungen abgeleitet und bilden die obere Grenze der Bemessungswerte. Der Bemessungsniederschlag (durch den Hydrographischen Dienst zur Verfügung gestellt) basiert auf dauerstufenabhängiger Gewichtung von MaxModN und ÖKOSTRA Niederschlägen (Lorenz und Skoda, 2000; Weilguni, 2013). Der Bemessungsniederschlag wird in vielen wasserwirtschaftlichen Aufgabenstellungen mit Ereignisbezug verwendet. In Abbildung 03 ist deutlich der topographische Einfluss auf das Verteilungsmuster der Bemessungsniederschläge für kurze Dauerstufen ersichtlich. Viele in den letzten Jahren von pluvialen Sturzfluten schwer betroffene Gebiete Oberösterreichs, wie Schwertberg oder Leonding, liegen jedoch in Bereichen mit niedrigen Bemessungsniederschlägen. In Deutschland wurde für den Zeitraum von 2001–2017 eine Niederschlagsanalyse auf Basis von Radardaten durchgeführt. Eine wesentliche Erkenntnis daraus ist, dass bei kurzen Dauerstufen die Auswertung der radarbasierten Messungen ein wesentlich weniger von der Topographie abhängiges Verteilungsmuster ergibt. Zwar ist zu berücksichtigen, dass die Zeitreihen für eine belastbare Aussage noch sehr kurz sind, trotzdem deuten die Ergebnisse darauf hin, dass die Erfassungsproblematik bei lokalen Starkniederschlägen kurzer Dauerstufen einen großen Einfluss auf die Statistik besitzt (Winterrath et al., 2017). Das gleiche zeigt sich auch bei detaillierter Auswertung der Niederschlagsdaten in Baden-Württemberg (LUBW, 2016: Anhang 3). Neben der Verwendung von Stationsreihen haben Radardaten (und damit auch das darauf basierende INCA) durchaus Potential in der extremwertstatistischen Auswertung von konvektiven Starkregenereignissen insbesondere durch die räumliche Abdeckung und grundlegende Erfassung der Ereignisse.

11.3.3 Einfluss Klimawandel

Der Einfluss des Klimawandels auf kleinräumige kurzfristige Starkniederschläge kann über mehrere Prozesse erfolgen. Eine Erwärmung der Troposphäre führt zu einem Anstieg des Wasserdampfgehaltes, bei gleichbleibender Luftfeuchtigkeit um etwa 7 % pro Grad Temperaturanstieg. Innerhalb einer Wolke mit 100 % relativer Luftfeuchte nimmt somit das ausfällbare Niederschlagswasser (pre-

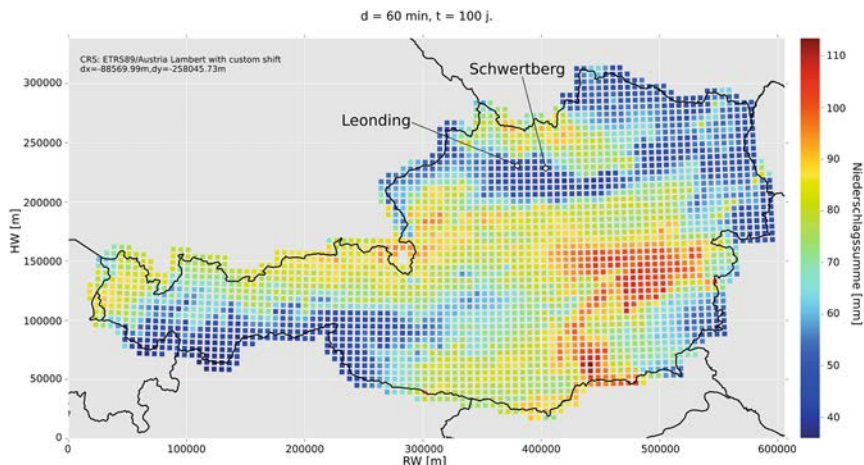


Abbildung 03: Bemessungsniederschläge Österreich (6 km Gitterpunkte) für Dauerstufe 60 Minuten und Jährlichkeit 100 Jahre, Visualisierung der Bemessungsdaten der eHYD Plattform (<http://ehyd.gv.at/>) mit deutlich erkennbarem Einfluss der Topografie.

Figure 03: Design precipitation in Austria (6 km grid points) for a duration of 60 minutes and an annuality of 100 years, visualisation of the design data of the eHYD platform (<http://ehyd.gv.at/>) with clearly recognisable influence of the topography.

Quelle: A. Huber; S. Achleitner

capitable water content (PWC)) ebenfalls bei Erwärmung um diesen Prozentsatz zu. Lenderink und Meijgaard (2008) haben als erste auf den starken Zusammenhang zwischen der Niederschlagsintensität von einstündigen Starkniederschlagsereignissen und der Temperatur hingewiesen. Sie konnten zeigen, dass bei extremen Stundenniederschlägen (99,9 Perzentile), die Intensität pro Grad Erwärmung sogar stärker ansteigt als der Wasserdampfgehalt nach der Clausius-Clapeyron Gleichung mit etwa 7 %. Formayer und Fritz (2016) analysierten die Niederschlagsmessungen der Station Wien Hohe Warte in Kombination mit der Wolkentemperatur. Auch hier ergibt sich ein Anstieg der Niederschlagsintensität um rund 9 Prozent je Grad Temperaturanstieg.

Untersuchungen im Rahmen des ACRP Projektes SAFFER-CC (https://www.uibk.ac.at/wasserbau/forschung/saffer_cc/) für Linz haben gezeigt, dass Niederschläge mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von einem Jahr und einer Dauer zwischen 10 Minuten und einer Stunde um etwa 10 % pro Grad Erwärmung zunehmen. Für längere Niederschlagsdauern nimmt diese Zunahme kontinuierlich ab und bei Tagesniederschlägen liegt diese Intensitätszunahme lediglich bei 4 Prozent. Dies liegt daran, dass bei kurzfristigen Ereignissen der lokal vorhandene Wasserdampf in Niederschlag umgewandelt wird, bei länger andauernden Ereignissen hingegen die horizontale Advektion eine immer größere Rolle spielt, die keine eindeutige Temperaturabhängigkeit hat.

Neben dieser Abhängigkeit von der Niederschlagsdauer scheint auch die Niederschlagsintensität eine wichtige Rolle zu spielen. Im Rahmen von SAFFER-CC konnte gezeigt werden, dass die Zunahme der Temperaturabhängigkeit der Niederschlagsintensität, selbst von der Niederschlagsintensität abhängt und zwar nicht nur zwischen dem Median und hohen Perzentilen, sondern auch bei Extremereignissen. So beträgt die Intensitätszunahme in Wien Hohe Warte bei einem einjährigen Ereignis etwa 9 % pro Grad Erwärmung, nimmt bei zunehmender Jährlichkeit sukzessive zu und erreicht bei einem 100-jährigen Ereignis rund 12,5 %. Dies bedeutet, dass je extremer ein Niederschlagsereignis ist, umso stärker wirkt sich eine Erwärmung – und damit der Klimawandel – auf die Intensitätszunahme aus.

Neben dieser »Wasserdampfverfügbarkeit« hängt die Entwicklung von kleinräumigen Starkniederschlägen jedoch auch von der vertikalen Luftschichtung ab. Kleinräumige Starkniederschläge haben immer eine konvektive Komponente und hierfür sind labile Luftschichtungen – also relativ kältere Luft über wärmerer – notwendig. Neben der Häufigkeit von labilen Luftschichtungen kann sich zudem auch die Intensität von extremen konvektiven Ereignissen verändern. Aussagen zur historischen Entwicklung der vertikalen Stabilität im Alpenraum können mithilfe der Analyse des Showalter Indexes (Showalter, 1953) durchgeführt werden. Der Showalter Index wird in der Wettervorhersage für Gewitterprognosen verwendet und ist sehr gut für Gebirgsräume geeignet. Analysen von Asma Yaqub (2017) zeigen für den Zeitraum 1979 bis 2016 eine klare Zunahme von stark negativen Showalter Indexwerten im Alpenraum. Dies bedeutet dass die Wahrscheinlichkeit für heftige Gewitter zugenommen hat.

Um den vollständigen Einfluss des Klimawandels auf kleinräumige Starkniederschläge abzubilden, müssten diese explizit in regionalen Klimamodellen modelliert werden. Die heute für Europa zu Verfügung stehenden regionalen Klimamodelle von EURO-CORDEX (Jacob et al. 2014) haben jedoch eine räumliche Auflösung von 12,5 km, wodurch eine explizite konvektionsauflösende Modellierung nicht möglich ist. Hierfür ist eine räumliche Auflösung von zumindest 3 km notwendig und derartige Modelle wurden bisher aufgrund des Rechenaufwandes kaum für Klimaanwendungen genutzt. Im Rahmen des ACRP Projektes reclip:convex startete jedoch im Frühjahr 2018 ein österreichisches Forschungskonsortium mit der Anwendung derartiger Modelle für den Alpenraum (<https://reclipconvex.zamg.ac.at/cms/de>). Belastbare Klimaszenarien von derartigen Modellen für den Alpenraum wird es aber erst in einigen Jahren geben. In den aktuell zur Verfügung stehenden regionalen Klimaszenarien sind konvektive Prozesse durch Parametrisierungen berücksichtigt. Man muss aber davon ausgehen, dass diese Parametrisierungen nicht die realen Verhältnisse während eines kleinräumigen extremen Niederschlagsereignisses abbilden können (Maraun, 2013).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine direkte Auswertung von kleinräumigen Starkniederschlägen aus den Klimamodellen derzeit noch nicht möglich ist. Durch den starken Zusammenhang der Niederschlagsintensität mit der Temperatur muss man jedoch davon ausgehen, dass extreme Starkniederschläge von der Dauer einer Stunde oder kürzer um etwa 10 % je Grad Temperaturerwärmung in Österreich intensiver werden. Dies gilt, solange die Wahrscheinlichkeit für Gewitter konstant bleibt. Historische Analysen zeigen aber auch eine Zunahme der gewitterträchtigen Wetterlagen. Sollte dies auch für die nächsten Jahrzehnte zutreffen, könnte sich die Häufigkeit von extremen Starkniederschlägen sogar noch stärker erhöhen.

11.3.4 Abflussbildung – Ermittlung von Abflussbeiwerte

Sowohl bei pluvialen Sturzfluten, als auch bei Sturzfluten im Wildbachbereich und den Übergängen dazwischen ist der Infiltrationsprozess von Niederschlag im Boden der maßgebende Prozess. Infiltrationsüberschuss ist jene Regenmenge, welche die Infiltrationsrate eines Standortes übersteigt. Das Infiltrationsvermögen der Oberfläche wird von der Vegetation, dem Boden und der Landnutzung bestimmt und beeinflusst. Das Extremum der Infiltrationshemmung ist die Flächenversiegelung. Unter Versiegelung wird die Abdeckung des Bodens mit einer wasserundurchlässigen Schicht verstanden. Berechnet man diese Versiegelung anhand der Daten zur Flächeninanspruchnahme (auf Basis der Grundstücksdatenbank), so ergibt sich für Österreich insgesamt für 2017 ein durchschnittlicher Versiegelungsgrad von 41 %. Dieser Flächenanteil wird durch Flächen in Anspruch genommen, die (lt. Grundstücksdatenbank) als Siedlungs- und Verkehrsflächen beansprucht werden (Umweltbundesamt, 2018).

Die Infiltrationsrate ist zudem stark abhängig von der Niederschlagsintensität (Kohl, 2011). Wenn beispielsweise ein Standort bei einer niedrigen Regenintensität von 5 mm/h drei Viertel dieses Niederschlags zu infiltrieren vermag, so sinkt diese Rate bei einem Starkregen (100 mm/h) auf lediglich ein Viertel. Die Infiltrationsrate und im Umkehrschluss der Oberflächenabfluss bzw. der Abflussbeiwert als Verhältnis des Oberflächenabflusses zum Niederschlag lassen sich aus Informationen zu Boden, Vegetation und Landnutzung ableiten (Markart et al. 2004). Da also die räumliche Verteilung der Vegetation indirekt die Bodenentwicklung und damit die Abflussbildung beeinflusst, ist die Landbedeckung und Landnutzung eine wesentliche Datengrundlage zur Beurteilung der Infiltrationsleistung unterschiedlicher Standorte. Mehrere Datensätze sind diesbezüglich verfügbar. Eine österreichweit flächendeckende Erfassung der Landbedeckung und -nutzung beinhaltet der CORINE Land Cover-Datensatz

(Aubrecht et al., 1998). Aus diesen Daten können die Landnutzung und deren Veränderung im 6 Jahresabstand (2000, 2006, 2012) abgeleitet werden. Die nächste europaweite Aktualisierung soll für das Bezugsjahr 2018 erfolgen. Der Datensatz liefert für Österreich nur relativ grobe Karten und ist nur bedingt geeignet für die Erstellung von Gefahrenhinweiskarten und Risikoanalysen. Gemäß ÖROK 2017 sollen die CORINE Land Cover Daten durch flächendeckend verfügbare genauere Landnutzungsinformationen erweitert werden. Die GIS Abteilungen der Österreichischen Bundesländer stellen hierfür unterschiedliche Geodaten über Open Government Data (OGD – <https://www.data.gv.at/>) zur Verfügung. Bundeslandspezifische Landnutzungskarten und Orthofotos können über OGD oder auf Anfrage von den GIS Abteilungen der Bundesländer bezogen werden. Diese sind räumlich hochaufgelöst und beinhalten in Oberösterreich beispielsweise Gebäudeumrisse. Diese Daten sind im Regelfall auch deutlich aktueller als der CORINE-Datensatz. Landbedeckungs- und Landnutzungsdaten können auch über das Land Information System Austria LISA & CADASTER ENV (Grillmayer, 2018) bezogen werden. Bei diesem Projekt wurden Sentinel-2 Daten integriert. Damit können mit diesen Daten langfristige Veränderungen (Siedlungsentwicklung) und, was in Bezug auf Sturzfluten von hohem Interesse ist, auch saisonale Änderungen der Landwirtschaft analysiert werden.

Vegetation und Boden beeinflussen sich gegenseitig. Für praktische Anwendungen stehen in den seltensten Fällen Messungen von relevanten Bodenparametern (z. B. gesättigte Leitfähigkeit K_f) zur Verfügung, und diese wären wegen des Skalenproblems auch kaum repräsentativ. Es besteht aber die Möglichkeit, Bodenparameter aus breitenverfügbaren Bodeninformationen wie Bodentextur, Humusanteil, Grobanteil und Lagerungsdichte, z. B. unter Nutzung der digitalen Bodenkarte Österreichs (eBod-BFW, 2018) abzuleiten.

Eingangsdaten in Niederschlag-Abflussmodelle sind manchmal Angaben zur potenziellen Abflussbereitschaft von Teilflächen (Abflussdisposition) und Abflussbeiwerte, die aus Gebietseigenschaften bzw. Feldbegehungen abgeleitet wurden. Entsprechend ihrer Eigenschaften, aber auch in Abhängigkeit vom Niederschlagsereignis und der Vorbefeuchtung tragen die Teile eines Gebietes nicht in gleichem Umfang zum Abfluss bei. Es lassen sich abflussbildungsrelevante Flächen und dominante Abflussprozesse bzw. Abflussprozesstypen identifizieren. Markart et al. (2004) und Löhmannsröben et al. (2000) geben Anleitungen für die Abschätzung von Oberflächenabflussbeiwerten auf Basis von Gebietsbegehungen. Ein Regelwerk der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (Merkblatt DWA-M 922; Entwurf – DWA, 2018) gibt eine Anleitung zur bodenhydrologischen Kartierung und rückt neben den Bodenwasserhaushaltskomponenten die Abflussbildungsprozesse ins Zentrum der Betrachtung.

Damit können für definierte Niederschläge (Summe und durchschnittliche Intensität) dominante Abflussprozesse abgeleitet und Oberflächen- und Direktabflussbeiwerte abgeschätzt werden. Bei den dominanten Abflussprozessen werden Oberflächenabfluss, Zwischenabfluss bzw. Speicherung und Tiefenversickerung unterschieden. Innerhalb dieser Grundprozesse kann auch eine detaillierte Differenzierung in Teilprozesse erfolgen.

Für manche Regionen Österreichs wurden bereits detaillierte Auswertungen der hydrologischen Bodenkenngrößen vorgenommen. Für Niederösterreich steht eine Datenbank zur Verfügung (HydroBod-Modell (Kramer et al., 2016; ÖWAV, 2016)). HydrobodNÖ erfasst in einem 50 x 50 m-Raster auf GIS-Basis die gesamte Landesfläche von Niederösterreich. Die Böden sind bis zu einer Tiefe von 100 cm analysiert. Bewertet wurden hydrologisch-geologische Substratgruppen, abflussspeichernde Bodenmächtigkeit, vertikale Wasserleitfähigkeit der obersten Bodenschicht und als harmonisches Mittel aller Bodenschichten, Gesamtporenvolumen über die Tiefe, nutzbare Feldkapazität für die oberste Tiefenschicht und als gewichteter Mittelwert über das gesamte Tiefenprofil, sowie eine Klassifizierung der Bodenelemente nach dominanten Abflussprozessen. In einem Nachfolgeprojekt wurde eine Abschätzung eines volumetrischen Abflussbeiwertes in Abhängigkeit von Niederschlagsintensität und -dauer getroffen.

Eine Vielzahl von Beregnungsversuchen bildet auch bereits die Grundlage von Abschätzungen wie sie im HydroBOD NÖ durchgeführt wurde. Dabei werden Testflächen künstlichen Niederschlägen mit Intensitäten von über 100 mm/h ausgesetzt und die Entwicklung des Oberflächenabflusses gemessen (Kohl, 2017). Die größten Unsicherheiten bei der Ermittlung/Abschätzung von Abflussbeiwerten und damit der Abschätzung von Sturzfluten aus Starkniederschlägen liegen in der saisonalen Dynamik einerseits, und im Skalenproblem Punktinformationen auf größere Gebiete zu übertragen, andererseits. Projekte wie LISA & CADASTER ENV und HydroBod bieten die Möglichkeit diese Unsicherheiten stärker einzugrenzen.

11.3.5 Methoden zur Abfluss bzw. Überflutungserfassung

11.3.5.1 Pluviale Sturzflut/Hangwasser

Bereiche, die durch pluviale Sturzfluten potentiell gefährdet sind, können mittels unterschiedlicher Methoden und Verfahren identifiziert werden. Diese Methoden unterscheiden sich einerseits hinsichtlich der benötigten Datengrundlagen und des erforderlichen Bearbeitungsaufwandes und andererseits hinsichtlich

der Aussagekraft der Ergebnisse (vgl. Falconer et al., 2009; LUBW, 2016). Gängige Ansätze können grob in die folgenden Gruppen unterteilt werden:

- 1) Gefährdungsabschätzung ohne besonderen Softwareeinsatz an Hand von dokumentierten Ereignissen und lokaler Expertise.
- 2) Vereinfachte Gefährdungsanalyse mittels Ableitung von oberflächlichen Fließpfaden und Geländesenken auf Basis eines digitalen Geländemodelles mittels GIS-Algorithmen
- 3) Gefährdungsanalyse mittels gekoppelter hydrologischer und hydrodynamischer Modellierung

Eine *Abschätzung bzw. Analyse der Gefährdungssituation ohne Einsatz gesonderter Berechnungsmethoden* erfolgt zumeist im Anschluss an ein aufgetretenes Überflutungsereignis. Die Dokumentation von Fließwegen, flächiger Ausdehnung der Überflutungen sowie Informationen zu Wasserständen und aufgetretenen Schäden können im Zusammenspiel mit lokalem Wissen dazu verwendet werden, um besonders gefährdete Bereiche zu identifizieren. Die Übertragbarkeit der Erkenntnisse auf Bereiche, in denen bisher keine Überflutungen beobachtet wurden oder auf unterschiedliche Ereignisse ist auf Basis dieser Methodik allerdings schwer bis gar nicht möglich. Nichtsdestotrotz bilden möglichst detaillierte Informationen zu abgelaufenen Ereignissen eine ideale Grundlage um Ergebnisse von topographischen Analysen oder hydrodynamischen Modellierungen zu plausibilisieren.

Eine weitere gängige Methode für eine vereinfachte Identifikation gefährdeter Bereiche stellt die *GIS-gestützte Analyse von Fließwegen und Geländesenken* auf Basis von digitalen Geländemodellen dar. Für die Berechnung von oberflächlichen Fließwegen bzw. der beitragenden hydrologischen Fläche je Rasterzelle an der Oberfläche können verschiedene Algorithmen herangezogen werden. Am gebräuchlichsten werden dabei der sog. D8-Algorithmus nach O'Callaghan und Mark (1984) und der multiple flow direction (MFD) Ansatz nach Quinn et al. (1991) und Freeman (1991) angewendet (z. B. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, 2016a; Bernet, 2017). Die in den Landes-GIS Portalen der Bundesländer Steiermark und Niederösterreich verfügbaren Hinweiskarten zum Thema Hangwasser basieren auf dem gängigen D8-Ansatz (Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, 2016a,b). Während Fließpfade und Senken im Gelände mit diesen Ansätzen in der Regel gut identifiziert werden können, kann auf Basis rein topographischer Analysen keine Aussage zu möglichen zu erwartenden Überflutungshöhen oder Fließgeschwindigkeiten getroffen werden. Denkbar ist auch eine Überschätzung der Gefährdung wenn die Abflussbildung dazu führt, dass auch bei Starkregen kaum Oberflächenabfluss entsteht.

Werden für eine praktische Fragestellung quantitative Informationen zu Wasserständen und Fließgeschwindigkeiten benötigt, wird dabei in vielen Fällen ein *kombinierter hydrologischer und hydrodynamischer Modellansatz* verwendet. 2D hydrodynamisch-numerische Modelle sind für die Identifikation von Überflutungsflächen fluvialer Hochwässer seit Jahren etabliert und eine Vielzahl an kommerziellen und quelloffenen Modellen steht zur Verfügung. Im Gegensatz zur Modellierung fluvialer Hochwässer, werden für pluviale Überflutungen als Randbedingungen an Stelle von Hochwasserganglinien flächig verteilte Niederschlagshöhen für das Rechnetz definiert (vgl. Klar et al., 2014; Humer et al., 2015). Mittels unterschiedlicher hydrologischer Modellansätze, wird dabei in Abhängigkeit von Standortfaktoren (Boden, Landnutzung) der Anteil des Niederschlages berechnet, der direkt oberflächlich zum Abfluss kommt. Zumeist werden dabei – auch aufgrund oft fehlender Validierungsmöglichkeiten – vereinfachte Modellansätze verwendet. Die Berechnung der räumlichen und zeitlichen Entwicklung des Abflusskonzentration an der Geländeoberfläche erfolgt abhängig vom Modell mittels vereinfachten hydraulischen Berechnungsansätzen (z. B. Tyrna et al., 2017) oder mit einer vollständigen Beschreibung der 2-dimensionalen Flachwassergleichungen (z. B. Klar et al., 2014; Humer et al., 2015). Beispiele für Gefahrenhinweiskarten, die mittels 2D hydrodynamischer Modellierung erarbeitet wurden, sind die »Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Schweiz«, die seit Juli 2018 online abrufbar ist (Bernet et al., 2018) oder die »Flash Food Risk Map Oberösterreich«, die im Zuge des EU-Projektes »Switch-On« erstellt wurde (vgl. Reithofer und Humer, 2016), und ebenfalls online abrufbar ist.

Für Fragestellungen im urbanen Raum werden teilweise auch vereinfachte Modellansätze aus der Urbanhydrologie verwendet. Bei diesen Ansätzen wird das Kanalsystem explizit im Modell mitberücksichtigt (z. B. Fuchs und Schmidt, 2015). Inwieweit, und mit welchen Methoden in der hydraulischen Modellierung pluvialer Überflutungen das Kanalnetz mitberücksichtigt werden sollte, ist noch nicht vollständig geklärt. Tendenziell spielen urbane Entwässerungssysteme bei Ereignissen mit hohen Auftretenswahrscheinlichkeiten (kleine Jährlichkeit) eine größere Rolle als bei seltenen und extrem seltenen Ereignissen, bei denen von einer Überlastung des Systems ausgegangen werden kann. Auch die Lage des Untersuchungsgebietes (urban, ländlich, Übergangsbereich) beeinflusst die Relevanz urbaner Entwässerungssysteme auf das Prozessgeschehen und damit die Notwendigkeit dessen Berücksichtigung in der Modellrechnung.

11.3.5.2 Fluviale Sturzfluten/Wildbach

Bei Einzugsgebieten die durch fluviale Überflutung betroffen sind, kommen meist eine klassische Überflutungssimulation mit 2D numerischen Modellen zur Anwendung. Der Abfluss aus dem dahinterliegenden EZG wird als Randbedingung (analog zu Überflutungssimulationen in der Gefahrenzonenplanung bei Flusshochwässern) angesetzt. Szenarien der Verklausung, Anlandung oder auch geschiebehydraulische Untersuchungen stellen weitere Komponenten dar, anhand derer Szenarien zur Bemessung und Gefahrenzonenplanung abgeleitet werden. Dahingehend wird an dieser Stelle auf den Beitrag 12 zu *fluvialen Feststoffereignissen* verwiesen.

11.4 Fallbeispiele

In den Fallbeispielen als auch den nachfolgenden Kapiteln erfolgt die Fokussierung auf pluviale Sturzfluten/Hangwasser. Extreme Wildbachereignisse sind, da stark mit fluvialen und/oder murartigem Feststofftransport verknüpft, im Beitrag 12 zu fluvialen Feststoffereignissen abgedeckt.

Im Alpenvorland kam es in den letzten Jahren vermehrt zu reinen pluvialen Hochwässern, an welchen keine ständig wasserführenden Gerinne beteiligt waren. Die Einzugsgebietsgröße beschränkte sich dabei auf wenige Quadratkilometer, nur selten waren sich die betroffenen Gemeinden der Gefahr durch Hochwasser abseits von Gerinnen bewusst. Im Gegensatz dazu ist die Gefährdung durch Wildbäche im Alpenraum mittels Gefahrenzonenplanung bekannt. Rein pluviale Ereignisse kommen in den Alpen aufgrund der Geländeneigung praktisch nicht vor. Kombinierte pluviale/fluviale Ereignisse können in Mittelgebirgslagen auftreten. Im anschließenden Kapitel werden ein typisches rein pluviales Hochwasser im Voralpenland und ein kombiniertes Ereignis im Alpenraum beschrieben.

11.4.1 Pluviale Sturzflut/Hangwasser Schwertberg

In der Marktgemeinde Schwertberg im Bezirk Perg kam es 2011 und 2016 zu schweren Überflutungen infolge von konvektiven Starkregenzellen. Schwertberg befindet sich im Übergang vom Mühlviertler Hügelland ins flache Donaubecken, wobei insbesondere der dicht besiedelte Hangfußbereich hochwassergefährdet ist. Die Hänge werden großteils intensiv als Ackerland genutzt, im Zuge von Beregnungsversuchen konnte eine sehr hohe Oberflächenabflussbereit-

schaft festgestellt werden. 2011 führte eine lokale Gewitterzelle zu erheblichen Schäden im Ortsteil Poneggen. Aufgrund der Topographie kam es zu raschem Oberflächenabfluss mit hohen Fließgeschwindigkeiten. Die Stelzhamerstraße verwandelte sich dabei innerhalb kürzester Zeit in ein schießendes Gerinne und leitete die Wasser- und Schlammmassen in das Siedlungsgebiet ab (Abbildung 04). Der Großteil der Schäden umfasst die Überflutung von Garagen und Kellern, bei einigen Wohngebäuden kam es auch zu Wassereintritt in das Erdgeschoss.



Abbildung 04: Sturzflut 2011 in Poneggen/Schwertberg, zahlreiche Garagen und Keller mussten ausgepumpt werden.

Figure 04: Pluvial flash flood 2011 in Poneggen/Schwertberg, numerous garages and basements had to be pumped out.

Quelle: R. Lesterl (Schwertberg)

Bemerkenswert ist vor allem die Kleinräumigkeit des Ereignisses, im einem Kilometer entfernten Zentrum von Schwertberg wurden keine Einsätze aufgezeichnet und nur sehr geringe Niederschlagsmengen beobachtet. Dies ist ein typisches Merkmal von pluvialen Sturzfluten, die aufgrund der lokal begrenzten Auswirkungen medial meist nur auf lokaler Ebene wahrgenommen werden. Ein Problem stellt bei der Rekonstruktion von vergangenen Ereignissen auch die Datenverfügbarkeit dar. Selten sind Bilder des Ereignisses verfügbar, aus welchen die Überflutungshöhen abgeleitet werden können. Auch stellt die Niederschlagserfassung dieser lokalen Gewitterzellen ein großes Problem dar. Die lokale Gewitterzelle 2011 wurde von keiner Messstation erfasst. Die in Abbildung 04 dargestellten Fließzustände können mit den Niederschlagsmengen der INCA Daten nicht im Modell abgebildet werden. Im Gegensatz dazu ist die Datenverfügbarkeit bei Ereignissen in jüngerer Vergangenheit durch die Entwicklung und Verbreitung von Smartphones und sozialen Medien deutlich besser. Von praktisch jedem Schadensereignis werden Videos hochgeladen und Bilder geteilt. In der Schweiz werden derzeit Methoden zur automatisierten Ableitung von Fließtiefen aus Bildern von pluvialen Ereignissen untersucht (Moy de Vitry et al., 2017). Hier gibt es sehr großes Potenzial zur Verbesserung der Datenlage für die Kalibrierung von Simulationsmodellen. In den letzten Jahren kam es zu einer deutlichen Zunahme von privaten Niederschlagsmess-

stationen deren Daten frei zugänglich sind. Zum Beispiel wurde das Starkregenereignis vom 23. Juli 2016 in Schwertberg von einer privaten Niederschlagsmessstation erfasst. Die Niederschlagsmenge und Verteilung stimmen bei diesem Ereignis sehr gut mit den INCA Daten überein. Für dieses Ereignis wurden auch Anschlagmarken an Gebäuden und Mauern aufgenommen.

Das Ereignis 2016 war das bisher schwerste pluviale Hochwasser in Schwertberg und führte im gesamten Gemeindegebiet zu hohen Sachschäden. Dabei kam es zur Verklausung zahlreicher Durchlässe und Einläufe, Straßen verwandelten sich in schießende Gerinne. Im Ortszentrum wurden Wasserstände von bis zu 50 cm beobachtet und es kam zu Geschiebeablagerungen entlang der Hauptstraße. Im Zuge dieses Ereignisses wurden auch viele Bereiche überflutet, die in den letzten Jahrzehnten nicht von Hangwasser betroffen waren. Exemplarisch wird hierzu die Aisttalstraße angeführt. Hier führte das Ereignis zu Schäden in Geschäften und Wohngebäuden. Dieser Bereich war bereits während des Hochwassers 2002 von der Aist überflutet. Infolge des Aisthochwassers wurden an einigen Gebäuden Dammbalkensysteme montiert, aufgrund der nicht vorhandenen Vorwarnzeit konnten diese temporären Schutzmaßnahmen allerdings nicht rechtzeitig angebracht werden. Betroffene Bewohner berichteten zudem, dass sie aufgrund des Wasserdruckes nicht mehr in der Lage waren die Eingangstüren zu öffnen.



Abbildung 05: Überströmte Aisttalstraße in 2016 mit Schäden in angrenzenden Gebäuden.

Figure 05: Flooded Aistertalstraße in 2016 with damages at the adjacent buildings.

Quelle: S. Voglhofer (Schwertberg)

Am Fallbeispiel Schwertberg kann auch sehr gut der anthropogene Einfluss auf pluviale Sturzfluten gezeigt werden. In Abbildung 05 ist die Landnutzungsänderung im Ortsteil Poneggen von 1975 bis 2016 dargestellt. Markant ist vor allem die Zunahme der Siedlungsflächen in diesem Zeitraum. Überlagert man die Landnutzungsflächen von 1975 und 2016 mit den Feuerwehreinsätzen der Sturzflut 2016 so ist ersichtlich, dass 1975 in erster Linie landwirtschaftliche Flächen überflutet worden wären. Durch die Ausdehnung des Siedlungsraumes

und der damit verbundenen Bodenversiegelung wurde das Hochwasserrisiko nochmals deutlich erhöht. Für eine Risikovermeidung fehlten in der Vergangenheit die dafür erforderlichen Gefahren- oder Risikokarten für pluviale Sturzfluten. Für die Gemeinde stellen die in der Vergangenheit gewidmeten Baulandreserven, welche sich in hangwassergefährdeten Bereichen befinden eine große Herausforderung dar. Bei Neuwidmungen wird als Folge der Ereignisse 2011 und 2016 vorab eine Hangwassergefährdung überprüft.



Legende

- Feuerwehreinsätze 2016

Landnutzung

- Acker
- Siedlung/Straße
- Wald
- Wiese

Abbildung 06: Landnutzungen von 1975 und 2016 mit Feuerwehreinsätzen vom Ereignis 2016.
Figure 06: Landuse from 1975 and 2016 with fire brigade operations in 2016.

Quelle: S. Lumassegger; S. Achleitner

11.4.2 Kombinierte pluviale/fluviatile Sturzflut Innsbruck-Land 2016

Am 2. Juli 2016 zog eine große Unwetterzelle von Nordwesten kommend über den Zentralraum Innsbruck und führte dort zu extremen Niederschlagsintensitäten. Bei diesem Ereignis gingen bei der Leitstelle Tirol ca. 400 Notrufe aus Großraum (den Bezirken Innsbruck Stadt und Land) ein. Weiter unterhalb, in Innsbruck/Ambras kam es zu Überflutungen im Bereich der Schlosstraße

(Abbildung 07). Im Gewerbegebiet Rossau (Stadtgebiet Innsbruck) musste das DEZ Einkaufszentrum aufgrund von Wassereintritt evakuiert werden.

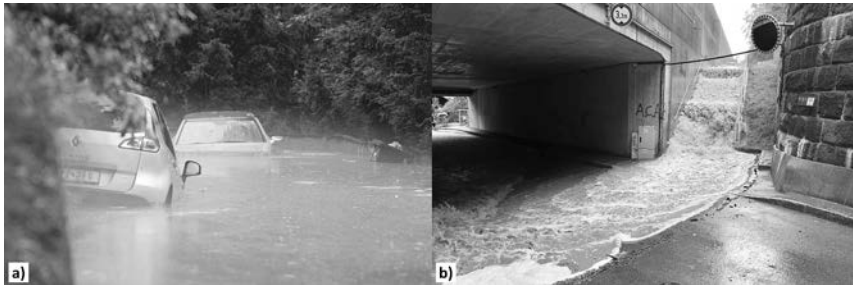


Abbildung 07: Überflutung Straße Schloss Ambras (a), Wassermassen fließen durch Autobahnunterführung nach Innsbruck (b).

Figure 07: Street flooding at Schloss Ambras (a), water flowing via the motorway underpass towards Innsbruck (b).

Quelle: D. Liebl (www.zeitungsfoto.at) (a); G. Köchler (zoom.tirol) (b)

Eine der am stärksten betroffenen Gemeinden war Aldrans im südöstlichen Mittelgebirge. Die Topographie ist geprägt von Hügeln und Mulden. Durch Aldrans fließt der im Ortszentrum verrohrte Dorfbach, ein Hochwasserrückhaltebecken befindet sich oberhalb in Sistrans. Hagel führte in Kombination mit anschließendem Starkregen zu Oberflächenabflussbildung infolge von Infiltrationsüberschuss. Über die Felder schossen Bäche aus Schlamm in Richtung Ortszentrum und verwandelten die Bundes- und Gemeindestraßen in reißende Gerinne. Keller und Tiefgaragen standen bis zu 1,2 m unter Wasser und es wurden Kanaldeckel vom Wasserdruck angehoben und mitgerissen. Die Straßen wurden teilweise unterspült und brachen weg. Dieses Ereignis ist ein typisches Beispiel für eine Sturzflut im Übergangsbereich zwischen pluvialen und fluvialen Prozessen. Neben wild abfließenden Oberflächenwässern trat auch der verbaute Dorfbach in Aldrans über die Ufer. Eine Differenzierung, in welcher Größenordnung pluviale und fluviale Prozesse zur Überflutung des Ortszentrums beigetragen haben, ist kaum möglich.

11.5 Ausblick, Perspektiven für Handlungsoptionen und resultierende Herausforderungen

Wie aus den vorangegangenen Kapiteln ersichtlich handelt es sich beim Phänomen pluvialer Sturzfluten/Hangwässer um Prozesse, die eine nicht unerhebliche Gefährdung für Sachgüter, Infrastruktur und auch Leib und Leben betroffener Personen darstellen. Der Umgang mit der Gefährdung durch Hang-

wässer wird derzeit auf unterschiedlichen Verwaltungsebenen diskutiert; unter anderem wird die Erstellung und Veröffentlichung von Planungsgrundlagen für den Umgang mit pluvialen Hochwässern im Raumordnungs- und Baurecht in Österreich aktuell sowohl auf Bundes- als auch auf Landesebene vorangetrieben. Mehrere Bundesländer haben zudem begonnen, Gefahrenhinweiskarten zu pluvialen Hochwasser bzw. Hangwasser zu erarbeiten und den Entscheidungsträgern auf Gemeindeebene zur Verfügung zu stellen (vgl. ÖROK, 2017; Zahnt et al., 2018). Nachfolgend soll ein kurzer Überblick über mögliche Maßnahmen zum Umgang mit Hangwässern und pluvialen Sturzfluten gegeben werden. Auch die Thematik rechtlicher Rahmenbedingungen und Möglichkeiten zur Förderung von Maßnahmen des Hangwassermanagements wird kurz gestreift.

11.5.1 Erarbeitung von Grundlagen zur Einschätzung der Hangwassergefährdung

In den Gebieten, die bereits in der Vergangenheit durch pluviale Sturzfluten/Hangwässer in Folge von Starkniederschlagsereignissen betroffen waren, ist das Bewusstsein für diese Gefahr und das Wissen um besonders gefährdete Bereiche schon in hohem Maße vorhanden. In Gebieten, in denen bisher keine Schäden aufgetreten sind, fehlt dieses Bewusstsein bzw. Informationen zu möglicherweise gefährdeten Bereichen aber oft weitgehend.

Um geeignete Maßnahmen aus einem Maßnahmenkatalog zum Umgang mit Hangwässern (»Hangwassermanagement« lt. Land OÖ) identifizieren zu können, gilt es als erstes fachliche und planerische Grundlagen zu schaffen, aus denen potentiell gefährdete Flächen abgeleitet werden können.

Bundesweit stehen Fließwegkarten als Gefahrenhinweiskarten außerhalb des Siedlungsraumes zur Verfügung (BMNT, WISA). Wie bereits erläutert stellen derzeit die Bundesländer Niederösterreich und Steiermark Informationen zu präferentiellen Oberflächenabflusswegen in ihren Landes-GIS Portalen zur Verfügung. Auch in anderen Bundesländern und dem benachbarten Ausland wird an der Erarbeitung entsprechender Hinweiskarten zum Thema Hangwasser gearbeitet. Parallel dazu wird in laufenden Forschungsprojekten an der Erforschung von Grundlagen und einer Verbesserung der Datengrundlagen gearbeitet.

11.5.2 Maßnahmenplanung

Ist eine Gefährdung von Flächen und Objekten durch Hangwässer aus vergangenen Ereignissen, vorhandenen Planungsgrundlagen und/oder lokaler Expertise ersichtlich/bekannt, so können geeignete Maßnahmen zum Umgang mit der gegebenen Gefährdung getroffen werden (»Hangwassermanagement«). Bundesländerspezifisch werden zur Zeit Zusammenstellungen von Maßnahmen in Form von Maßnahmenkatalogen oder ähnlichen Dokumenten erarbeitet.

Maßnahmen zum Umgang mit Hangwässern haben dabei die Vermeidung oder zumindest Verminderung von negativen Auswirkungen von Hangwasserabflüssen zum Ziel. Für den Umgang mit Hangwässern können unterschiedliche Maßnahmen ergriffen werden, der geeignete »Maßnahmenmix« ergibt sich dabei aus den lokalspezifischen Rahmenbedingungen. Räumlich können Maßnahmen grob in Maßnahmen im Einzugsgebiet, Maßnahmen am betroffenen Grundstück und Maßnahmen direkt am betroffenen Objekt gegliedert werden (Land OOE-OGW, 2015b). Fachlich kann eine Zuordnung der Maßnahmen zu den Disziplinen Raumordnung, Wasserbau, Siedlungswasserwirtschaft, Land- und Forstwirtschaft, Katastrophenschutz und Eigenvorsorge erfolgen.

11.5.2.1 Maßnahmen im Einzugsgebiet

Maßnahmen im Einzugsgebiet haben das Ziel, schädliche Oberflächenwässer und mitgeführtes Sediment von bestehenden Siedlungs- und Infrastrukturanlagen fern zu halten. Neben technischen Maßnahmen zur Retention in Form von Absetzbecken oder Sickermulden, kann auch eine angepasste Flächenbewirtschaftung dazu beitragen, die Entstehung von Oberflächenabfluss zu verringern und Wasser und Sediment im Einzugsgebiet zurückzuhalten (z. B. Schmidt et al., 2015; Seidel et al., 2015; Fiener, 2017). Ist eine Retention nicht möglich, können auch geeignete Maßnahmen zur Ableitung/Vorbeileitung schädlicher Oberflächenwässer am Siedlungsraum getroffen werden.

Grundsätzlich soll jedoch die Art der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung den natürlichen Gegebenheiten bestmöglich angepasst werden. Entsprechende Beratung bietet hierbei z. B. die OÖ Boden- und Wasserschutzberatung. Unterstützung um eine abflussneutrale Bewirtschaftung zu realisieren ist im Rahmen des Agrarumweltprogramms ÖPUL (BMNT-OEPUL, 2015, 2018) gegeben. Ziel des Österreichischen Programmes zur Förderung einer umweltgerechten, extensiven und den natürlichen Lebensraum schützenden Landwirtschaft (ÖPUL), ist eine *umweltschonende Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen*.

Bei Maßnahmen im Einzugsgebiet ist grundsätzlich zu bedenken, dass eine Absicherung der Wirksamkeit einer Maßnahme auf Fremdgrund dauerhaft nur

auf Basis von entsprechenden Verträgen, allenfalls auch im Flächenwidmungsplan und bei bereits gewidmeten Flächen darüber hinaus auch mit Bebauungsplänen möglich ist.

11.5.2.2 Maßnahmen am Grundstück

Durch eine hangwasserangepasste Geländegestaltung kann versucht werden, Abflusswege am Grundstück in Bereichen ohne Bebauung zu schaffen. Einfriedungen oder die Höherlegung von Teilen des Grundstücks sowie Rückhalte- und Versickerungsanlagen sind bei entsprechender Grundstücksgröße ebenfalls mögliche Optionen. Die anfallenden und zurückgehaltenen Wässer müssen vom Grundstück abgeleitet werden. Es ist immer auf eine entsprechende Drosselung der abzuleitenden Wässer unter Berücksichtigung fremder Rechte Bedacht zu nehmen. Zu beachten ist dabei immer, dass sich durch die getroffenen Maßnahmen die Situation für Unterlieger nicht verschlechtert (Zahnt et al., 2018). Aus wasserwirtschaftlicher Sicht ist bei Neuerrichtung von Objekten den Maßnahmen am Grundstück größte Bedeutung beizumessen.

11.5.2.3 Maßnahmen am Objekt

Auch direkt am Objekt können Maßnahmen getroffen werden. Neben einer hochwasserangepassten Bauweise kann auch eine angepasste Nutzung der vorhandenen Räumlichkeiten helfen, Schäden durch Hangwasser weitgehend zu vermeiden bzw. zu vermindern (detaillierte Ausführung siehe Holub und Hübl, 2008; Suda und Rudolf-Miklau, 2012; ÖWAV, 2013; Zechmeister et al., 2013).

In Umsetzungsansätzen des Land OÖ in Neubauten und bestehende Objekte unterschieden. Rechtlich gesehen sind bei Neubauten die örtlichen Gegebenheiten und potentiellen Änderungen des Hangwasserabflussgeschehens schon im Zuge des Umwidmungsverfahrens (im Fall von Baulandwidmungen) zu untersuchen. Erforderliche Abflusskorridore sollen etwa durch Flächenwidmungspläne oder Bebauungspläne gesichert und erhalten werden. Auch das Objekt selbst soll durch Hangwassergeschützte Gestaltung keinen Schaden durch den Hangwasserabfluss erleiden. Durch die Umsetzung von Baumaßnahmen darf es zu keiner Verschärfung des Hangwasserabflusses kommen. Die Versiegelung von Flächen ist durch Versickerungsanlagen oder Retentionsbauwerke zu kompensieren. Maßnahmen sollen grundlegend dauerhaft funktionstüchtig sein. Maßnahmen wie Sandsackersatzsysteme bzw. Verschlüsse (z. B. Dammbalken) die nur temporär wirksam sind, bieten bei Hangwasserabflüssen nur eingeschränkt Schutz, da es keine Vorwarnung vor drohenden Hangwasserabflüssen und in Folge keine Rüstzeit für das Anbringen derartiger temporär wirksamer Verschlüsse gibt.

Bei bestehenden Objekten kann durch geeignete Maßnahmen am Objekt selbst sehr effizient die Häufigkeit des Auftretens eines Schadensfalles sowie das Schadausmaß verringert werden. Es handelt sich um Maßnahmen der Eigenvorsorge, die durch die Objektbesitzer umzusetzen sind.

11.5.2.4 Information/Bewusstseinsbildung

Neben den angeführten Maßnahmen ist auch die Aufklärung der Bevölkerung über eine mögliche bestehende Gefährdung und die Kommunikation von angepassten Verhaltensstrategien im Ereignisfall ein wichtiges Instrument, um Schäden durch pluviale Überflutungen zu verringern. So zeigen beispielsweise Studien aus Belgien, dass u. a. Schäden an Mobiliar im Falle von Kellerüberflutungen im Schnitt um 90 % und bei Überflutungen des Erdgeschosses um 77 % verringert werden können, wenn die Bewohner vor Wassereintritt über das Risiko informiert sind (Ootegem et al., 2015).

11.5.3 Umsetzung von Maßnahmen – rechtliche Rahmenbedingungen und Fördermöglichkeiten

Die rechtlichen Rahmenbedingungen zur Realisierung von Maßnahmen um pluviale Sturzfluten/Hangwässer zu kompensieren unterscheiden sich je Bundesland. Die Vorgehensweise am Beispiel des Bundeslands Oberösterreich ist nachfolgend dargestellt. Rechtlich stützt sich die Vorgehensweise auf verschiedene Rechtsmaterien. Neben dem Wasserrechtsgesetz ist hier z. B. auch das Baurecht, die Raumordnung etc. befasst.

Die oben beschriebenen Maßnahmen im Einzugsgebiet, am Grundstück oder am Objekt stellen die Bausteine eines Maßnahmenkonzepts (Hangwassermanagements) dar. Dabei sollen Maßnahmen bereits wirksam sein wenn das Objekt errichtet wird. Die Vorgehensweise umfasst die (i) Feststellung der Betroffenheit, (ii) Entwicklung eines Maßnahmenkonzepts (siehe Maßnahmenkatalog) und (iii) Maßnahmenumsetzung. Die Feststellung der Betroffenheit erfolgt grundsätzlich durch die Prüfung durch die Gemeinde unter Mitwirkung des Widmungswerbers und Bauwerbers. Dabei geht es um die Frage, ob ein Grundstück durch die Umwidmung in Bauland bzw. durch die Umsetzung einer baulichen Maßnahme durch Hangwasserabfluss gefährdet ist. Die Umsetzung der geplanten Maßnahmen ist sicherzustellen. Im Rahmen ihrer Zuständigkeiten obliegt es der zuständigen Behörde, der Gemeinde und/oder den Betroffenen in geeigneter Weise sicherzustellen, dass die Maßnahmen des Hangwassermanagements zeitgerecht und dauerhaft ihre Funktion erfüllen, sodass negative Folgen von Hangwasserabflüssen durch Umsetzung einer baulichen Maßnahme

keine Auswirkungen auf Dritte haben bzw. negative Auswirkungen auf ein geplantes Objekt durch eine geeignete Maßnahmensetzung bestmöglich vermieden werden.

Die Erstellung einer Hangwassergefahrenhinweiskarte für Oberösterreich ist für die relevanten Einzugsgebiete jeder Gemeinde vorgesehen und soll die Basis für eine gefahrenbewusste Entwicklung der Gemeinde sein. Darüber hinaus ist die Hangwassergefahrenhinweiskarte eine wertvolle Fachgrundlage für die Beurteilung baufachlicher und raumordnungsfachlicher Fragestellungen. Optional kann a priori eine Bewertung/Abschätzung der Wirksamkeit einer geplanten technischen Schutzmaßnahme in Bezug auf das gesamte Einzugsgebiet erfolgen.

Sinnvoll für eine vorausschauende Raumentwicklung wäre es, den Hangwasserabflussbereich entsprechend den bundesweit einheitlichen Kriterien für die Ausweisung von Gefahrenzonen gemäß WRG 1959 in unterschiedlich gefährdete Bereiche zu gliedern. Das Ergebnis von Modellierungen sind Wassertiefe und Fließgeschwindigkeit für Niederschläge mit definierter Jährlichkeit und Dauer. Ergebnis ist die Untergliederung der Abflussbereiche in besonders gefährdete (rote) und weniger gefährdete (gelbe) Zonen.

Die Randbedingungen für Modellerstellung sehen eine vereinfachte Abbildung der tatsächlichen Gegebenheiten vor. Bauliche Details wie kleine Verrohrungen, Gartenmauern, Bordsteine bei Straßen, Gebäudeöffnungen, Zäune, nicht öffentliche Straßen sollen dabei nicht berücksichtigt werden. Der Feststoffanteil im Wasser findet ebenso keine Berücksichtigung in der Modellrechnung. Hinsichtlich hydrologischer Randbedingungen werden derzeit Anfangsbedingungen (z. B. verlustfreie Betrachtung) überlegt. Eingangsdaten zur Bemessung (siehe Kapitel 11.3.2) stellen dabei eine weitere wenn nicht die wichtigste Vorgabe dar.

11.5.4 Fördermöglichkeiten für Maßnahmen des Hangwassermanagements

11.5.4.1 Maßnahmen der Eigenvorsorge – Nicht förderfähige Maßnahmen zum Schutz bestehender Objekte

Maßnahmen der Eigenvorsorge (z. B. zum Schutz einzelner Objekte) werden nicht gefördert. Es handelt sich hierbei um Maßnahmen, die vom Objektbesitzer an seinem Objekt oder auf seinem Grundstück umgesetzt werden.

Als Unterstützung für die Objektbesitzer sollten qualitativ geeignete Produkte mittels eines Prüfstandes auf Basis geeigneter Qualitätsanforderungen (zu entwickelnder Normen) ermittelt und gekennzeichnet werden.

11.5.4.2 Maßnahmen zum Schutz von *bestehenden Objekten* im öffentlichen Interesse

Voraussetzung für die Förderung von technischen Maßnahmen ist das Vorhandensein qualitativ hochwertige Fachgrundlagen zur Beurteilung der Hangwassergefährdung im gesamten Gemeindegebiet. Es handelt sich hierbei um eine Hangwassergefahrenhinweiskarte die unter Verwendung eines 2D Abflussmodells auf Basis einheitlicher Parametersätze erstellt werden. Diese Hangwassergefahrenhinweiskarte ist Voraussetzung für die Gewährung von Förderungsmitteln für Maßnahmen zum Schutz vor Hangwasser.

Zum Schutz vor Hangwasser und Abflüssen fern von Gewässern in Folge lange anhaltender Niederschläge sollen Förderungsmittel gemäß Verordnung Ländlicher Entwicklung (LE) und in Folge gemäß Wasserbautenförderungsgesetz 1985 (WBFG) angeboten werden.

Mit vollständigem Verbrauch der Mittel die gemäß VO-LE zur Verfügung stehen, können Mittel gemäß WBFG angesprochen werden. Um eine Ungleichbehandlung der Förderwerber bei der Beurteilung der zur Förderung eingereichten Maßnahmen zu verhindern werden der Gewährung von Förderungsmitteln vergleichbare Kriterien der Förderung zu Grunde gelegt.

Förderung gemäß Wasserbautenförderungsgesetz 1985 – Entwurf der DFB 2019 zur RIWA T:

Maßnahmen zum Schutz vor Hangwasser (RIWA-T, 2016 (Abschnitt 4.13)) sind nur dann förderfähig, wenn

- eine Förderung aus anderen Förderprogrammen (z. B. LE 2014-20) nicht möglich ist,
- sie im Zusammenhang mit einer einzugsgebietsbezogenen Planung an einem Gewässer stehen
- und/oder
- sie im Rahmen eines Maßnahmenkonzeptes gemeinsam mit anderen (möglichen) Maßnahmen unter aktiver Einbeziehung der Gemeinden, der Landwirtschaft und der (örtlichen/überörtlichen) Raumplanung umgesetzt werden.

Zusätzlich zu den gemäß 4.3 DFB 2018 für Einzelanträge vorzulegenden Unterlagen sind für Maßnahmen zum Schutz vor Hangwasser folgende Unterlagen bei der Abwicklungsstelle des Bundes einzureichen:

- Einzugsgebietsabgrenzung/Gebietskulisse (Plan)
- Fließwegkarte (Gefahrenhinweiskarte Hangwasser)
- Maßnahmenbeschreibung Wasserbau (Rückhaltebecken, Schlammrückhalt, etc.)

- Maßnahmenbeschreibung Landwirtschaft (Mulch- und/oder Untersaat, Anpassung der Bewirtschaftung, etc.)
- Maßnahmenbeschreibung Raumplanung und Flächenwidmung (Berücksichtigung von Hangwasser bei der Flächenwidmung, bauliche Vorschriften im Bauverfahren, etc.)
- Gesamtbauzeit- und Finanzierungsplan für die Umsetzung aller Maßnahmen
- Katasterplan mit Darstellung der vor/nach 1990 errichteten Gebäude.
- Die Zu- und Abschläge gemäß 5.2 DFB 2018 sind anzuwenden.

Gefahrenzonenplanungen stellen keine verpflichtende Voraussetzung für die Förderfähigkeit dar.

Literatur

- Abebe, Y., Kabir, G., Tesfamariam, S., 2018. Assessing urban areas vulnerability to pluvial flooding using GIS applications and Bayesian Belief Network model. *Journal of Cleaner Production*, 174, S. 1629–1641.
- Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, 2016a. Gefahrenhinweiskarte Hangwasser. Grundlagen und Erläuterungen. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, Gruppe Wasser, 12 S. http://www.noel.gv.at/noe/Wasser/Hochwasser_Hangwasser.html [03.08.2018].
- Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, 2016b. Gefahrenhinweiskarte Hangwasser. Technischer Bericht. Amt der Niederösterreichischen Landesregierung, Gruppe Wasser, 24 S. http://www.noel.gv.at/noe/Wasser/Hochwasser_Hangwasser.html [03.08.2018].
- Archer, D.R., Fowler H.J., 2018. Characterising flash flood response to intense rainfall and impacts using historical information and gauged data in Britain. *Journal of Flood Risk Management*, 11, S. 121–133. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12187>.
- Archer, D.R., Parkin, G., Fowler, H.J., 2017. Assessing long term flash flooding frequency using historical information. *Hydrology Research*, 48, S. 1–16.
- Aubrecht, P., Andraus, F., Baumgartner-Riegler, E., Falkner, U., Lux, F., Sonderegger, G., Weigand, E., 1998. Corine Landcover Österreich. Vom Satellitenbild zum digitalen Bodenbedeckungsdatensatz. Monographien des Umweltbundesamt, 93(M-093), 103 S.
- Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz, 2016. Integrale Konzepte zum kommunalen Sturzflut-Risikomanagement. Infoblatt zum Sonderprogramm nach Nr. 2.4 RZWas 2016, 22 S.
- Bernet, D.B., 2017. On the occurrence and modeling of surface water floods. Dissertation, Universität Bern, Bern.
- Bernet, D.B., Prasuhn, V., Weingartner, R., 2017. Surface water floods in Switzerland: what insurance claim records tell us about the damage in space and time. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, S. 1659–1682.

- Bernet, D.B., Sturny, R.A., Berger, C., Kipfer, A., Prasuhn, V., Staub, B., Stoll, S., Thomi, L., 2018. Werkzeuge zum Thema Oberflächenabfluss als Naturgefahr – eine Entscheidungshilfe. *Beiträge zur Hydrologie der Schweiz*, 42, 95 S.
- BMLFUW, 2010. Leitfaden zur Festlegung und Harmonisierung von Bemessungsereignissen. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- BMLFUW, 2012a. Historische Quellen Chroniken, Dokumentationen und Archive enthalten Wissen über vergangene Katastrophen. <http://www.naturgefahren.at/karten/chronik/dokuaplng/histquellen.html> [06.08.2018].
- BMLFUW, 2012b. Schäden durch alpine Naturkatastrophen. Sachschaden durch Wildbachereignisse und Personenschäden. http://www.naturgefahren.at/karten/chronik/oestr_exposition/schaeden.html [15.02.2019].
- BMLFUW, 2015a. Nationaler Hochwasserrisiko-Managementplan RMP 2015, GZ: BMLFUW-IL.99.1.1/0191-IV/2015. <https://www.bmnt.gv.at/wasser/wisa/fachinformation/hochwasserrisiko/hochwasserrisikoplan/managementplan.html> [15.02.2019].
- BMLFUW, 2015b. Anlagen Nationaler Hochwasserrisiko-Managementplan RMP 2015, RMP 2015 BMLFUW-IL.99.1.1/0191-IV/2015. <https://www.bmnt.gv.at/wasser/wisa/fachinformation/hochwasserrisiko/hochwasserrisikoplan/managementplan.html> [15.02.2019].
- BMLFUW, 2016. Das Ereignisportal des digitalen Wildbach- und Lawinenkatasters des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung. <http://www.naturgefahren.at/karten/chronik/ereignisdoku/Ereignisportal.html> [06.08.2018].
- BMNT-ÖPUL, 2015. ÖPUL 2015 – das Agrar-Umweltprogramm bis 2020. https://www.bmnt.gv.at/land/laendl_entwicklung/oepul/oepul2015.html [15.02.2019].
- BMNT-ÖPUL, 2018. Umwelt und Wirtschaft im Einklang – ÖPUL Maßnahmen im Überblick. https://www.bmnt.gv.at/land/laendl_entwicklung/oepul/LE2020-Agrarumwelt.html [30.04.2019].
- Boardman, J., 2010. A short history of muddy floods. *Land Degradation & Development*, 21, S. 303–309.
- Coulthard, T., Frostick, L., 2010. The Hull Floods of 2007: implications for the governance and management of urban drainage systems. *Journal of Flood Risk Management*, 3, S. 223–231.
- Di Salvo, C., Pennica, F., Ciotoli, G., Cavinato, G.P., 2018. A GIS-based procedure for preliminary mapping of pluvial flood risk at metropolitan scale. *Environmental Modelling & Software*, 107, S. 64–84. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.05.020>.
- DWA, 2018. Merkblatt DWA-M 922: Bodenhydrologische Kartierung und Modellierung (Entwurf). DWA-Regelwerk. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall, 196 S.
- DWD, 2018a. Warnkriterien für Unwetterwarnungen des DWD. <http://www.wettergefahren.de/warnungen/unwetterwarnkriterien.html> [07.07.2018].
- eBOD-BFW, 2018. Digitale Bodenkarte Österreichs. <https://bfw.ac.at/rz/bfwcms2.web?dok=7066> [07.08.2018].
- EG, 2007. Hochwasserrichtlinie (2007/60/EG). Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlaments und des rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken.
- ESWD, 2014. Meldekriterien der EWSD – European Sever Weather Database, Stand 10. Mai 2014. https://www.eswd.eu/docs/ESWD_criteria_en.pdf.

- European Commission, 2013. Guidance for Reporting under the Floods Directive (2007/60/EC). Guidance Document No. 29, 68 S. DOI: 10.2779/50095. http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/facts_figures/guidance_docs_en.htm.
- European Commission, 2015. European Overview Assessment of Member States' reports on Preliminary Flood Risk Assessment and Identification of Areas of Potentially Significant Flood Risk. Final Report, 120 S. DOI: 10.2779/576456. http://ec.europa.eu/environment/water/flood_risk/pdf/pfra_reports/EU%20PFRA%20Overview%20Report.pdf.
- Falconer, R., Cobby, D., Smyth, P., Astle, G., Dent, J., Golding, B., 2009. Pluvial flooding: new approaches in flood warning, mapping and risk management. *Journal of Flood Risk Management*, 2, S. 198–208.
- Fiener, P., 2017. Erosionsvorsorgende Landwirtschaft. *WasserWirtschaft*, 11, S. 39–42.
- Formayer H., Fritz, A., 2016. Temperature dependency of hourly precipitation intensities – surface versus cloud layer temperature. *International Journal of Climatology*, 37, S. 1–10.
- Freeman, G.T., 1991. Calculating catchment area with divergent flow based on a regular grid. *Computers & Geosciences*, 17, S. 413–422.
- Fuchs, L., Schmidt, N., 2015. Vergleich von 2-dimensionalen Berechnungsansätzen für die Gefährdungsanalyse in urbanen Gebieten. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, S. 187–196.
- Fürst, J., 2012. *Gewässerkunde und Hydrometrie*. Studienblätter, Universität für Bodenkultur, Wien, 228 S. <https://iwhw.boku.ac.at/gkhydrometrie/gksb2012.pdf> [08.04.2019].
- Gao, J., Weinmeister, H.W., Lang, E., 2000. Ermittlung der Starkregenhöhen in Anhängigkeit von Regendauer und Jährlichkeit im Einzugsgebiet der Gradenbaches/Österreich. *Internationales Symposium Interpraevent Villach*, 3, S. 89–97.
- Gaume, E., Bain, V., Bernardara, P., Newinger, O., Barbuc, M., Bateman, A., Blaskovicova, L., Bloschl, G., Borga, M., Dumitrescu, A., Daliakopoulos, I., Garcia, J., Irimescu, A., Kohnova, S., Koutroulis, A., Marchi, L., Matreata, S., Medina, V., Preciso, E., Sempere-Torres, D., Stancalie, G., Szolgay, J., Tsanis, I., Velasco, D., Viglione, A., 2009. A compilation of data on European flash floods. *Journal of Hydrology*, 367(1/2), S. 70–78.
- Georgakakos, K.P., 1986. On the design of national, real-time warning systems with capability for site-specific, flash-flood forecasts. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 67, S. 1233–1239. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1986\)067<1233:OTDONR>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1986)067<1233:OTDONR>2.0.CO;2).
- Gourley, J.J., Erlingis, J.M., Smith, T.M., Ortega, K.L., Hong, Y., 2010. Remote collection and analysis of witness reports on flash floods. *Journal of Hydrology*, 394(1/2), S. 53–62.
- Grillmayer, R., 2018. LISA & CADASTER ENV. Copernicus nutzbar Machen, BMNT. http://www.naturgefahren.at/dam/jcr:4696675b-be78-4253-9896-d607aeb6c5a/11_Grillmayer_LISA.pdf [07.08.2018].
- Grünewald, U., 2009. Erkenntnisse und Konsequenzen aus dem Sturzflutereignis in Dortmund im Juli 2008. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 8, S. 422. <https://doi.org/10.3243/kwe2009.08.003>.
- Haghighatafshar, S., la Cour Jansen, J., Aspegren, H., Lidström, V., Mattsson, A., Jönsson, K., 2014. Storm-water management in Malmö and Copenhagen with regard to climate change scenarios. *Journal of Water Management and research*, 70, 3, S. 159–168.

- Haiden, T., Kann, A., Pistotnik, G., Stadlbacher, K., Wittmann, C., 2009. Integrated Nowcasting through Comprehensive Analysis (INCA) – System description. ZAMG Report, 60.
- Holub, M., Hübl, J., 2008. Local protection against mountain hazards – state of the art and future needs. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, S. 81–99.
- Hübl, J., 2018. Hochwasser Simbach 2016: Dokumentation und Analyse. In: S. Heimerl (Hrsg.), *Vorsorgender und nachsorgender Hochwasserschutz. Ausgewählte Beiträge aus der Fachzeitschrift WasserWirtschaft Band 2*. Springer Vieweg, Stuttgart, S. 210–216.
- Hübl, J., Totschnig, R., Sitter, F., Schneider, A., Krawtschuk, A., Dusl, G., Fischer, N., Swoboda, P., Neckel, N., 2009. Historische Ereignisse – Band 3: Aufarbeitung historischer Ereignisse (Verlagerungsarten Wasser und Schnee) in Österreich. IAN Report 111(3). Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien (unveröffentlicht).
- Humer, G., Reithofer, A., Klar, R., Achleitner, S., 2015. Erweiterung eines 2D-Strömungsmodelles zur Berechnung von Sturzfluten. Plausibilisierung und praktische Anwendung für die Darstellung von Gefahrenkarten und Lösung von Planungsaufgaben in Siedlungsgebieten. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 8(3), S. 164–171.
- Illgen, M., 2017. Starkregen und urbane Sturzfluten – Handlungsempfehlungen zur kommunalen Überflutungsvorsorge. In: M. Porth, H. Schüttrumpf (Hrsg.), *Wasser, Energie und Umwelt*. Springer Vieweg, Wiesbaden, S. 20–30.
- Jacob, D., Petersen, J., Eggert, B., Alias, A., Christensen, O., Bouwer, L., Braun, A., Colette, A., Deque, M., Georgievski, G., Georgopoulou, E., Gobiet, A., Menut, L., Nikulin, G., Haensler, A., Hempelmann, N., Jones, C., Keuler, K., Kovats, S., Yiou, P., 2014. EURO-CORDEX: New high-resolution climate change projections for European impact research. *Regional Environmental Change*, 14(2), S. 563–578. DOI: 10.1007/s10113-013-0499-2.
- Jenkins, K., Surminsk, S., Hall, J., Crick, F., 2017. Assessing surface water flood risk and management strategies under future climate change: Insights from an Agent-Based Model. *Science of the Total Environment*, 595, S. 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.242>.
- Johann, G., Pohl, C., 2010. Hochwassergefahren durch Flusshochwasser und Sturzflut im urbanen Raum – eine integrale Betrachtung. *Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 10, S. 545–549.
- Klar, R., Achleitner, S., Lumassegger, S., Aufleger, M., Hofer, M., 2014. Extension and testing of a 2D hydrodynamic model for direct rainfall runoff simulation, In: 11th International Conference on Hydroinformatics – HIC 2014, New York City, USA, 2014.
- Kohl, B., 2011. Das Niederschlags-/Abflussmodell ZEMOKOST. Dissertation, Universität Innsbruck, Innsbruck, 264 S.
- Kohl, B., 2017. Der Einfluss der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung auf Überschwemmungen. <https://bfw.ac.at/rz/bfwcms.web?dok=10343> [07.08.2018].
- Kramer, Ch., Klebinder, K., Eder A., Sotier B., Strauss P., Bauer, Th., 2016. HYDROBOD: obtaining a GIS-based hydrological soil database and a runoff coefficient calculator for Lower Austria. In: *Forum geografic. Studien und Forschungen zu Geographie und Umweltschutz*, 15, S. 100–104.

- Kron, W., 2009. Überschwemmungsüberraschung: Sturzfluten und Überschwemmungen fernab von Gewässern. *WasserWirtschaft*, 6, S. 15.
- Krüger, M., Niehüser, S., Pfister, A., Mudersbach, C., Teichgräber, B., Jensen, J., 2015. Vorstellung eines Tools zur Analyse von Starkregen an einem Beispiel im westlichen Emschergebiet, *KW – Korrespondenz Wasserwirtschaft*, 8(2), S. 94–101, 108–114, 115–124.
- Land OOE-OGW, 2015a. Hangwassermanagement – Kurzzusammenfassung mit wesentlichen Empfehlungen. Brochure. Land Oberösterreich, Abteilung Oberflächengewässerwirtschaft (OGW), Linz.
- Land OOE-OGW, 2015b. Hangwassermanagement – Maßnahmenkatalog. Brochure. Land Oberösterreich, Abteilung Oberflächengewässerwirtschaft (OGW), Linz.
- LAWA (Hrsg.), 2018. LAWa – Strategie für ein effektives Starkregenrisikomanagement. Thüringer Ministerium für Umwelt, Energie und Naturschutz, Erfurt, 86 S.
- Lenderink, G., Meijgaard, E. van, 2008. Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nature Geoscience*, 1(8), S. 511–514.
- Leonard, M., Westra, S., Phatak, A., Lambert, M., Hurk, B. van den, McInnes, K., Risbey, J., Schuster, S., Jakob, C., Stafford-Smith, M., 2014. A compound event framework for understanding extreme impacts. *WIREs Climate Change*, 5, S. 113–128.
- Löhmannsröben, R., Altfeld, O., Bunza, G., Eidt, M., Fischer, A., Jürging, P., Schauer, T., Ziegler, R., 2000. Geländeanleitung zur Abschätzung des Abfluss- und Abtragsgeschehens in Wildbacheinzugsgebieten. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, Materialien Nr. 87.
- Lorenz, P., Skoda, G., 2000. Bemessungsniederschläge kurzer Dauerstufen ($D < 12$ Stunden) mit inadäquaten Daten. *Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich*, 80, S. 1–24.
- LUBW, 2016. Landesamt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. www.lubw.baden-wuerttemberg.de/wasser/starkregen [08.04.2019].
- Maraun, D., 2013. When will trends in European mean and heavy daily precipitation emerge? *Environmental Research Letters*, 8, 7 S.
- Markart, G., Kohl, B., Sotier, B., Schauer, T., Bunza, G., Stern, R., 2004. Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen (Version 1.0). BFW Dokumentation, 83 S.
- Moy de Vitry, M., Dicht, S., Leitão, J.P., 2017. floodX: urban flash flood experiments monitored with conventional and alternative sensors. *Earth System Science Data*, 9(2), S. 657–666. DOI: 10.5194/essd-9-657-2017.
- O’Callaghan, J.F., Mark, D., 1984. The Extraction of Drainage Networks from Digital Elevation Data. *Computer Vision, Graphics and Image Processing*, 28, S. 323–344.
- Ootegem, L. van, Verhofstadt, E., Herck, K. van, Creten, T., 2015. Multivariate pluvial flood damage models. *Environmental Impact Assessment Review*, 54, S. 91–100.
- ÖROK, 2017. ÖROK-Empfehlung Nr. 57 zum Hochwasserrisikomanagement zur Aktualisierung und Anpassung der »ÖROK-Empfehlung Nr. 52 zum präventiven Umgang mit Naturgefahren in der Raumordnung, Schwerpunkt Hochwasser«. Österreichische Raumordnungskonferenz, Wien, 29 S.

- ÖWAV, 2009. ÖWAV-Regelblatt 11: Richtlinien für die abwassertechnische Berechnung und Dimensionierung von Abwasserkanälen. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien, 96 S.
- ÖWAV, 2013. Zusammengefasste Empfehlungen zur Prüfung von Wassergefahren auf Gebäude und Infrastruktur. Ausschusspapiere »Bauen und Wasser«. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien, 9 S.
- ÖWAV, 2016. ÖWAV-Arbeitsbehelf 47: Bodenfunktionen für die Wasserwirtschaft. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, Wien, 96 S.
- Pitt, M., 2008. Learning lessons from the 2007 floods: An independent review. Cabinet Office, London, 462 S. http://webarchive.nationalarchives.gov.uk/20100812084907/http://archive.cabinetoffice.gov.uk/pittreview/_/media/assets/www.cabinetoffice.gov.uk/flooding_review/pitt_review_full%20pdf.pdf [31.07.2018].
- Pollard, O., 2014. Rainfall forecast alarms: high priority rapid response catchments. Hydrology for Flood Risk Management, Joint BHS National and South East Section Meeting. <http://www.hydrology.org.uk/publications.php> [08.04.2019].
- Quinn, P., Beven, K., Chevallier, P., Planchon, O., 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using digital terrain models. *Hydrological Processes*, 5, S. 59–79.
- Reithofer, A. Humer, G., 2016. Flash Flood Risk Map Upper Austria – Evaluierung des Schadensrisikos durch Starkregenereignisse anhand eines erweiterten 2D-Strömungsmodelles. *AGIT – Journal für angewandte Geoinformatik*, S. 406–411. DOI: 10.14627/537622055.
- RIS, 2019a. Forstgesetz 1975. BGBl. Nr. 440/1975. Bundesgesetz vom 3. Juli 1975, mit dem das Forstwesen geregelt wird.
- RIS, 2019b. Einzugsgebieteverordnung – Oö. EGV. LGBL. Nr. 125/2009, Oö. Verordnung des Landeshauptmanns von Oberösterreich, mit der die Einzugsgebiete der Wildbäche und Lawinen festgelegt werden.
- RIWA-T, 2016. Technische Richtlinien für die Bundeswasserbauverwaltung RIWA-T, gemäß § 3 Abs. 2 WBFG Fassung 2016 GZ: UW.3.3.3/0028-IV/6/2015.
- Rogger, M., Kohl, B., Pirkl, H., Merz, R., Viglione, A., Kirnbauer, R., Blöschl, G., 2011. HOWATI – Hochwasser Tirol – Ein Beitrag zur Harmonisierung von Bemessungshochwässern in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 63, S. 153.
- Rudolf-Miklau, F., 2009. Naturgefahren-Management in Österreich: Vorsorge – Bewältigung – Information (Rechtspraxis). LexisNet, 280 S.
- Schmidt, W., Müller, E., Peschke, S., Seidel, N., 2015. Wasserrückhalt in landwirtschaftlich genutzten Gebieten. *WasserWirtschaft*, 9, S. 37–40.
- Seidel, N., Peschke, S., Schütze, S., 2015. Erosionsschutz und Wasserrückhalt mit Hilfe von bewirtschaftungsintegrierten Verwallungen. *WasserWirtschaft*, 4, S. 42–47.
- Showalter, A.K., 1953. A stability index for thunderstorm forecasting. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 34(6), S. 250–252.
- Spekkers, M.H., Kok, M., Clemens, F.H.L.R., ten Veldhuis, J.A.E., 2014. Decision-tree analysis of factors influencing rainfall-related building structure and content damage. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14, S. 2531–2547.
- Spekkers, M.H., Rözer, V., Thieken, A., ten Veldhuis, M.-C., Kreibich, H., 2017. A comparative survey of the impacts of extreme rainfall in two international case studies. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, S. 1337–1355.

- Spekkers, M.H., ten Veldhuis, J.A.E., Kok, M., Clemens, F.H.L.R., 2011. Analysis of pluvial flood damage based on data from insurance companies in the Netherlands. International Symposium Urban Flood Risk Management 2011, Graz, <http://edepot.wur.nl/201520>.
- Suda, J., Rudolf-Miklau, F. (Hrsg.), 2012. Bauen und Naturgefahren. Handbuch für konstruktiven Gebäudeschutz. Springer-Verlag Wien, Wien, 510 S. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-7091-0681-5>.
- Tyrna, B., Assmann, A., Fritsch, K., Johann, G., 2017. Large-scale high-resolution pluvial flood hazard mapping using the raster-based hydrodynamic two-dimensional model FloodAreaHPC. Journal of Flood Risk Management, 11(S2), S. 1024–1037. DOI: 10.1111/jfr3.12287, 2017.
- Umweltbundesamt, 2018. Bodenversiegelung. http://www.umweltbundesamt.at/umwelt-situation/raumordnung/rp_flaecheninanspruchnahme/bodenversiegelung/ [07.08.2018].
- URBAS, 2008. Vorhersage und Management von Sturzfluten in urbanen Gebieten (URBAS). Endbericht, Bundesministerium für Bildung und Forschung, Aachen, 395 S. <http://www.urbanesturzfluten.de/schlussbericht/schlussbericht/view> [08.04.2019].
- Weilguni, V., 2013. Fachkarte Bemessungsniederschläge. Ministerium für ein Lebenswertes Österreich, S. 6.
- Winterrath, T., Brendel, C., Hafer, M., Junghänel, T., Klameth, A., Walawender, E., Weigl, E., Becker, A., 2017. Erstellung einer radargestützten Niederschlagsklimatologie. Berichte des Deutschen Wetterdienstes, 251, 73 S.
- Wussow, G., 1922. Untere Grenze dichter Regenfälle. Meteorologische Zeitschrift, 39, S. 173–178.
- Yaqub, A., 2017. Precipitation and weather patterns in Austria under climate change conditions. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Institut für Meteorologie, Wien, 109 S.
- Zahnt, N., Eder, M., Habersack, H., 2018. Herausforderungen durch pluviale Überflutungen – Grundlagen, Schäden und Lösungsansätze. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 70, S. 64–77. <https://doi.org/10.1007/s00506-017-0451-7>.
- ZAMG, 2014. Meldekriterien der EWSD – European Sever Weather Database, Stand 10. Mai 2014. <https://www.zamg.ac.at/cms/de/dokumente/aktuell/unwettermeldung/eswd-meldekriterien> [08.04.2019].
- Zechmeister, A., Haider, S., Suda, J., Hübl, J., Holub, M., Hauer, C., Habersack, H., 2013. Wassergefahren für Gebäude und Schutzmaßnahmen. ÖVAW-Leitfaden, Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, 33 S.

12 Fluviale Feststoffereignisse

Bernhard Gems, Johannes Kammerlander, Markus Moser und Markus Aufleger*

Zusammenfassung

Im vorliegenden Beitrag des Sammelbandes werden extreme fluviale Verlagerungsprozesse in Alpen Wildbächen und Gebirgsflüssen im Sinne einer Einteilung in drei typische Prozessmuster mit jeweils typischen Vorkommen beschrieben. Die Abgrenzung zu anderen Prozessstypen in Gewässern (Reinwasserabfluss, murartiger Transport und Murgang) erfolgt anhand hydrologischer, sedimentologischer und topografischer Parameter. Extreme Ereignisse werden dabei in Abhängigkeit der Ereignisintensität und damit ausschließlich auf Basis einer Prozessbetrachtung abgegrenzt. Mit Bezug auf die drei Prozessmuster werden Beispiele extremer fluvialer Ereignisse im österreichischen Alpenraum, die mitunter sehr große Schäden verursacht und eine Anpassung von technischen Schutzmaßnahmen bewirkt haben, dargestellt. Entwicklungen und der aktuelle Stand im Umgang mit extremen fluvialen Verlagerungsprozessen in der Wildbachverbauung und im Schutzwasserbau werden aufgezeigt und in diesem Kontext wird auch der Stand der Technik hinsichtlich verfügbarer Ansätze und Modelle zu deren Abschätzung diskutiert. Schließlich werden einige wichtige Aspekte zu künftigen Herausforderungen und Perspektiven im Umgang mit extremen fluvialen Verlagerungsprozessen sowohl aus prozessorientierter (operativer) als auch aus planerischer (strategischer) Sicht thematisiert.

Abstract

The present chapter of the Extrema-report focuses on extreme fluvial relocation processes in Alpine torrents and mountain rivers. Three typical process patterns are described. Appearance and distinctive features compared to further relocation processes in rivers (floods, debris floods, debris flows) are discussed on the basis of hydrological, topographical and sedimentological parameters. Thereby, extreme events are classified

* Bernhard Gems, Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich für Wasserbau, bernhard.gems@uibk.ac.at.

Johannes Kammerlander, Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, johannes.kammerlander@die-wildbach.at.

Markus Moser, Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus, Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, markus.moser@die-wildbach.at.
Markus Aufleger, Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich für Wasserbau, markus.aufleger@uibk.ac.at.

solely based on a process-oriented approach and depending on the process intensities. With relation to the process patterns three examples of recent extreme fluvial hazard events in the Austrian Alps, which caused huge damage and led to an adaptation of existing flood protection structures, are discussed. Concerning the management of extreme fluvial hazard events and as well calculation approaches and modelling techniques, past developments and the state of the art are briefly discussed. Finally, a few aspects on future challenges when dealing with extreme fluvial relocation processes are pointed out, both from a process-oriented (operational) and planning (strategic) perspective.

Kernaussagen

- Extreme fluviale Feststoffereignisse sind Ereignisse, die die Bemessungsereignisse bestehender Gewässersysteme und aktiver Schutzsysteme in Intensität und/oder Dauer, oder in ihren Auswirkungen überschreiten. Extreme Ereignisse werden auch zukünftig auftreten, gegebenenfalls häufiger. Deren Auftretensmuster wird sich gebietsweise verändern. Entwicklungstendenzen dazu lassen sich aus dem funktionalen Zusammenhang zwischen Abfluss und Sedimenttransport und der Einschätzung der Sedimentverfügbarkeit ableiten. Bestehende Messsysteme liefern derzeit gebietsweise Daten. Eine Erweiterung ist zur Abschätzung der Entwicklungstendenzen jedoch zwingend notwendig.
- Bestehende Berechnungsansätze und -modelle können auch extreme fluviale Verlagerungsprozesse abbilden. Allgemein und insbesondere bei Wildbächen besteht Bedarf an der Validierung und Weiterentwicklung dieser Modelle und der Erweiterung deren Anwendungsbereiche. Auch hierfür sind Naturmessungen, Modellversuche, Ereignisdokumentationen und -analysen eine notwendige Grundlage. Aufgrund der komplexen Prozesse ist eine Kombination von Methoden sinnvoll.
- Extreme fluviale Feststoffereignisse resultieren häufig aus der Überlagerung ungünstig wirkender Einflüsse bzw. Prozesse. In der Modellierung und Beurteilung dieser Ereignisse ist dies im Sinne einer Szenarienbetrachtung zu berücksichtigen.
- Aktive Schutzsysteme gegen fluviale Feststoffereignisse sind so zu gestalten, dass Einwirkungen aus Extremereignissen kein strukturelles Versagen verursachen bzw. eine Verschlechterung der Situation unterstrom hervorrufen. Dieser Grundsatz gilt insbesondere für Schlüsselbauwerke in Wildbächen bzw. für Hochwasserschutz- und Retentionsmaßnahmen von regionaler Bedeutung in Gebirgs- und Talflüssen.
- Strategien im Umgang mit fluvialen Extremereignissen müssen eine regionale, über die jeweiligen Gewässergrenzen (Wildbach – Gebirgsfluss – Talfluss) hinausgehende Betrachtungsweise verfolgen: Nach Möglichkeit und mit entsprechender Priorisierung sind dabei neben dem Schutz vor Naturgefahren auch andere Schutzziele zu berücksichtigen.

Key Points

- Extreme events of fluvial bed load transport are processes, which exceed the capacities (design conditions) of rivers and active protection systems in terms of intensity and/or duration, or in terms of adverse effects compared to those of design events. Extreme events will also appear in the next decades, probably more often. Occurrence patterns can be evaluated based on the functional interrelationship of discharge and sediment transport and on the availability of sediment. Available gauge

stations for sediment transport measurements deliver valuable data. For assessing future occurrence patterns of extreme events, further measurements (gauges) are mandatory.

- Present sediment transport approaches and models can be applied also for extreme conditions of fluvial bed load transport. Generally and with a specific focus on torrents, further research in model development and validation is important, also for the purpose of enhancing its application ranges. Therefore as well, further measurements on sediment transport in natural rivers, scale model tests and post-event-analyses are mandatory. Due to the complexity of the processes, a combination of methods is reasonable.
- Extreme events of fluvial bed load transport result from the superposition of specific critical conditions/processes. In order to consider this in process modelling and risk assessment, a set of possible event scenarios has to be considered.
- Active protection systems against fluvial hazard events have to cope with extreme events without a structural damage and any potential worsening of the status of hazard protection further downstream. This principle is particularly relevant for key structures in torrents and for flood protection and retention measures of regional importance in mountain and valley rivers.
- Strategies for coping with extreme events of fluvial bed load transport have to be based on a regional planning perspective (torrent – mountain river – valley river). As far as possible and with a certain priority ranking, further protection aims others than hazard protection have to be considered.

12.1 Einleitung

Wildbäche und *Gebirgsflüsse* prägen das Landschaftsbild des Alpenraums sehr stark. Sie tun dies allerdings nicht ausschließlich durch ihr Erscheinungsbild und Gefahrenpotential, vielmehr sind die meisten Landschaftsformen unseres Alpenraums durch die Kraft dieser Gewässer in hohem Maße bestimmt worden. Steile Wildbäche haben sich z. B. tief in den Fels hineingeschnitten und im Laufe von Jahrtausenden komplexe Schluchtsysteme geformt. In den darunterliegenden, flacheren Gebirgsflüssen wurde das durch *Erosionsprozesse* abgetragene Gesteinsmaterial (*Sediment*) abgelagert und sukzessive flussabwärts verfrachtet. Es entstanden weitläufige Tallandschaften. Diese kontinuierlich anmutende Landschaftsentwicklung im Alpenraum ist jedoch in einem hohen Maße auf vergangene Extremereignisse und ihre Folgen zurückzuführen.

Im gegenständlichen Beitrag des Sammelbandes werden *fluviale Verlagerungsprozesse* thematisiert, bei denen mitunter große Mengen an *Geschiebe* durch die Strömungskraft des fließenden Wassers verfrachtet werden.

12.2 Definitionen und Terminologie

12.2.1 Prozessbeschreibung

Der Prozesstyp *fluviatiler Feststofftransport* bezeichnet die Verlagerung von Sediment durch die Strömungskraft des Gewässers (ASI, 2009a). Feinkörniges Sediment wird in der Wassersäule schwebend transportiert (*Schwebstofftransport*), grobkörnigeres Geschiebe aufgrund seines Gewichtes in Form verschiedener Transportmechanismen in Sohlhöhe (*Geschiebetransport*). Geschiebetransport ist sowohl für die Ausprägung der Sohlmorphologie des Gewässers als auch für das Gefahrenpotential extremer Ereignisse maßgebend.

Grundvoraussetzungen für das Auftreten von fluviatilen Feststofftransport sind eine ausreichend hohe Strömungskraft des Wassers (*Transportkapazität*) und das Vorhandensein von mobilem Sediment (*Sedimentverfügbarkeit*). Die Transportkapazität eines Gewässerabschnittes nimmt in der Regel mit dem vorherrschenden Abfluss und der lokal wirkenden Reliefenergie zu. Weitere gewässer- und prozessspezifische Faktoren mit Einfluss auf die Transportkapazität sind die Rauheit des Gewässers (Form und Struktur von Gewässersohle und Ufern, Vegetationsdichte im benetzten Gewässerquerschnitt) sowie die Dichte des Wasser-Feststoff-Gemischs.

Der Begriff Sedimentverfügbarkeit beschreibt die Menge, die Zusammensetzung (*Korngrößenverteilung*) und die Lagerungsbedingungen von Sediment, welches durch fließendes Wasser abgetragen (Erosion) bzw. remobilisiert werden kann. In Talflüssen und mitunter auch in Gebirgsflüssen stellt das Sohlmaterial im Flussbett und entlang der Ufer die maßgebende Sedimentquelle dar (*in-situ Sedimentquellen*). Bei entsprechend vorhandener Transportkapazität wird diese erodiert und flussabwärts verlagert (*Tiefen- und Seitenerosion*). In Wildbächen sind Tendenzen zur Sohleintiefung und Laufverlagerung und damit die Sedimentverfügbarkeit in der Bachsohle häufig begrenzt (*Zwangsgerinne*). Bedeutende Sedimentmengen werden hier oftmals durch gravitative Prozesse oder durch Zubringer ins Gewässer eingetragen (*äußere Sedimentquellen*).

Hinsichtlich des Verhältnisses von Transportrate und -kapazität zeigt sich in Wildbächen mit ausreichendem Längsgefälle in der Regel die Sedimentverfügbarkeit als limitierender Faktor für die bei extremen Ereignissen transportierte *Geschiebefracht* (Montgomery und Buffington, 1997; *feststofflimitierter Prozesscharakter*). Bei größeren und flacheren Gewässern mit entsprechend breitem Flussbett ist häufig eine »unerschöpfliche« Menge an Sediment vorhanden, welche die ereignisspezifischen Geschiebefrachten um ein Vielfaches übersteigen können (*transportlimitierter Prozesscharakter*).

12.2.2 Vorkommen und Abgrenzung zu anderen Verlagerungsprozessen in Gewässern

Fluviatiler Feststofftransport ist im Hinblick auf das Gefahrenpotential häufig der maßgebende Prozesstyp extremer Hochwasserereignisse und er kann dies bei entsprechenden hydrogeologischen, sedimentologischen und topografischen Verhältnissen auch in Wildbächen sein.

In sehr steilen Wildbächen mit Längsneigungen größer 15–25 % und ausreichender Sedimentverfügbarkeit erfolgt die Sedimentverlagerung während Extremereignissen häufig durch *murartige Prozesse* (ASI, 2009a; Bergmeister et al., 2009; Rickenmann, 2014). Anders als beim fluviatilen Transport wird das Sediment nicht sukzessive und überwiegend in Sohlhöhe (Geschiebe) verlagert, sondern fließt als verhältnismäßig homogenes Wasser-Sediment-Gemisch talwärts. Beim Murgang sind sowohl die *Sedimentkonzentration* (Sedimentanteil im Gesamtgemisch) als auch die kurzfristige Intensität deutlich höher als beim fluviatilen Verlagerungsprozess. Die Abgrenzung zu murartigen Prozessen anhand des Sedimentanteiles ist daher als »oberer Grenzbereich« zu verstehen. Im Hinblick auf die Sedimentkonzentration stellt der Übergang von fluviatilem Feststofftransport zum Prozesstyp *Reinwasserabfluss* den »unteren Grenzbereich« dar. Der Sedimentanteil liegt hier im Promillebereich, die Sedimentverlagerung ist somit von untergeordneter Bedeutung. Dieser Prozess ist vorwiegend in Talflüssen maßgebend (Abbildung 01 und Tabelle 01).

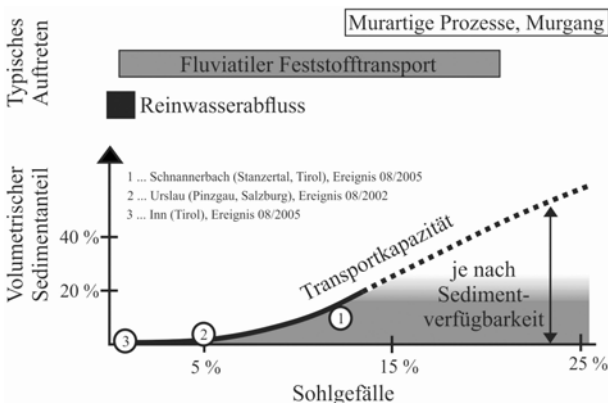


Abbildung 01: Schematische Darstellung zum typischem Auftreten von Verlagerungsprozessen in Gewässern in Abhängigkeit von Sohlneigung und Sedimentverfügbarkeit; Zuordnung der in Kapitel 12.4 beschriebenen Extremereignisse.

Figure 01: Appearance of fluvial processes as a function of channel gradient and sediment availability; characteristics of the extreme events discussed in section 12.4.

Quellen: eigene Darstellung; Daten aus BMLFUW, 2006 und Gems et al., 2014b

Tabelle 01: Prozesstypen und Eigenschaften.**Table 01:** Fluvial processes and characteristics.*Quellen:* modifiziert nach ASI, 2009a und Bergmeister et al., 2009

Prozesstyp	Reinwasserabfluss	Fluviatiler Feststofftransport	Murartiger Prozess, Murgang
Sedimentkonzentration [%]	Promillebereich	0 bis ca. 20	> 20
Durchmesser Größtkorn	Millimeter bis Zentimeter	mehrere Dezimeter	wenige Meter
Dichte Fließprozess [kg/m ³]	~ 1.000	1.000 bis ca. 1.300	> 1.300
Fließverhalten	newtonisch		annähernd bis nicht newtonisch
Sediment im Querschnitt	Schwebstoffe im gesamten Querschnitt; Geschiebe in Sohlnähe (rollend, springend, hüpfend)		Verteilung im gesamten Querschnitt
Schaden durch	Wasser und Schwebstoffe	Wasser, Geschiebe und Schwebstoffe (evtl. Schwemmholz)	Sediment und Wasser, Schwemmholz
Ablagerungsform (stumme Zeugen)	Bankige Feinsedimente	sortiert; Fächer und Lappen	unsortiert; korngestützte Bänke und Lappen; Murköpfe, Murfirse und zungenförmige Lappen

12.2.3 Extremereignis – Begriffsdefinition und Beschreibung

Die Intensität fluviatiler Feststofftransportereignisse ergibt sich aus dem zeitlichen Verlauf (Wasser- und Sedimentganglinie), der maximalen Ereignisspitze (Spitzenabfluss; üblicherweise in m³/s) sowie der Wasser- und Sedimentfracht (üblicherweise in m³). Die *Ereignisintensität* umfasst in diesem Sinne die Einwirkungsgrößen und erlaubt keine unmittelbaren Aussagen über die Auswirkungen. Sie wird im wasserbaulichen Ingenieurwesen häufig durch die Wiederkehrwahrscheinlichkeit (Jährlichkeit) angegeben. Diese Zuordnung basiert auf der Annahme, dass Ereignisse mit ansteigender Intensität im langjährigen Mittel zunehmend seltener auftreten. Für fluviatilen Feststofftransport ist dieser Zusammenhang unter Berücksichtigung einer gewissen Streubreite stetig (Hübl, 2018).

In Österreich sind *aktive Schutzsysteme* gegen Verlagerungsprozesse in Gewässern im Schutzwasserbau in der Regel auf 30- bis 100-jährliche *Bemessungsereignisse* und in der Wildbachverbauung auf 30- bis 150-jährliche Bemessungsereignisse dimensioniert (BMLFUW, 2015a, 2016a). Bei größeren Ereignissen kann eine Überlastung dieser Schutzsysteme eintreten.

Hinsichtlich des Begriffes *extreme fluviatile Feststoffereignisse* existiert keine eindeutige Definition oder minimale Wiederkehrdauer. Es handelt sich um Ereignisintensitäten, die markant über »mittleren Verhältnissen« liegen oder bisher beobachtete Ereignisse in einer gewissen Form übertreffen. In der Regel variiert die Ereignisintensität entlang eines Gewässers und es ist daher immer auch eine Frage nach dem gewählten räumlichen Maßstab. Ein Ereignis kann sich lokal als extrem erweisen (z. B. sehr hohe Geschiebefracht aufgrund eines seitlichen Geschiebeeinstoßes), aber auf regionaler Sicht kaum wahrnehmbar bleiben.

Eine Besonderheit von fluviatilen Feststoffereignissen sind zudem deren unterschiedliche Auslöseprozesse und Entstehungsmöglichkeiten. Es kann sich um *extreme Einzelereignisse* mit entsprechend niedriger Wiederkehrdauer handeln (z. B. extremes Hochwasser mit Feststofftransport, bevorzugt in flacheren Gebirgsflüssen) oder um eine *Überlagerung von mehreren, ggf. zueinander unabhängigen Ereignissen*, die für sich alleine nicht extrem sind (*Szenarien*, vermehrt in Wildbächen, lokal auch in Gebirgsflüssen).

Sowohl die Ereignisentstehung (Einzelereignis oder Kombination ungünstiger Teilereignisse) als auch die Ereignisintensität (zeitlicher Verlauf, Ereignisspitze und -frachten) von fluviatilen Feststoffereignissen resultieren aus multiplen Faktoren. Diese Besonderheit erschwert die Definition eindeutiger Grenzwerte für den Begriff »extrem«. Um aber einerseits eine grobe Einordnung zu ermöglichen, und andererseits eine Basis für die nachfolgenden Ausführungen zu schaffen, werden *extreme fluviatile Feststoffereignisse* in diesem Sammelband als jene Ereignisse definiert, die hinsichtlich der Ereignisintensität (Ereignisspitze, -dauer und/oder -frachten) oder den Auswirkungen (infolge ungünstiger Kombination von Teilereignissen) über den 100- bis 150-jährlichen Bemessungsereignissen liegen. Ereignisse sind somit auch als extrem einzustufen, wenn beispielsweise die Ereignisspitze jene des Bemessungsereignisses nicht überschreitet, die ereignisspezifische Sedimentfracht über die Dauer des Ereignisses aber erheblich größer ausfällt und beispielsweise Rückhaltestrukturen überlastet.

12.3 Ausprägung von fluvialen Feststoffgefahrenprozessen

12.3.1 Übersicht

Fluviatiler Feststofftransport in Form extremer Ereignisse ist in Abhängigkeit der räumlich und zeitlich variablen Rahmenbedingungen (Niederschlagsintensität und -dauer, Disposition, Verhältnisse bei Ereignisbeginn, Folgeprozesse, etc.) sehr unterschiedlich ausgeprägt. Im Folgenden werden diese Ausprägungen zu drei, für Extremereignisse typische Prozessmuster zusammengefasst, die in Abbildung 02 schematisch dargestellt und in den nachfolgenden Ausführungen beschrieben werden.

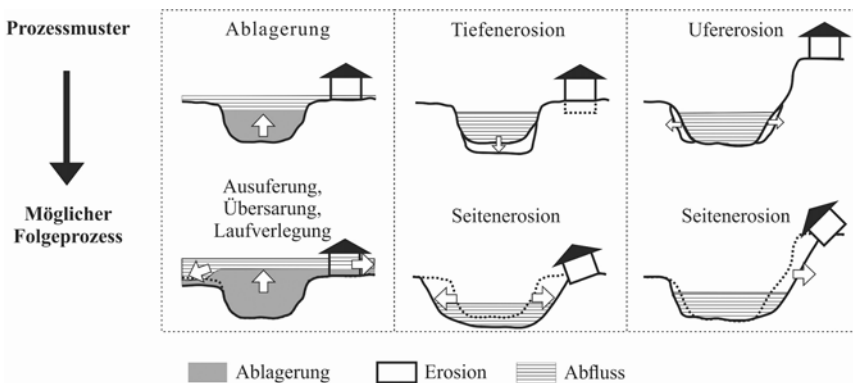


Abbildung 02: Prozessmuster und mögliche Folgeprozesse während extremer fluvialer Feststoffereignisse.

Figure 02: Process patterns and follow-up processes during extreme events of fluvial bed load transport.

Quelle: eigene Darstellung

12.3.2 Ablagerung infolge Sedimentüberschuss

Die maximale Sedimentfracht, welche während eines Extremereignisses im Gewässer transportiert werden kann, ist durch die Transportkapazität beschränkt. Diese steht in engem Zusammenhang mit dem Abfluss, dem Längsgefälle des Gewässers, der Sohlmorphologie und charakteristischen Korngrößen. Diese Parameter können sich räumlich (entlang eines Gewässers) und zeitlich (im Ereignisverlauf) stark und unmittelbar ändern, entsprechend ist auch die Transportkapazität des Gewässers diesen Schwankungen unterworfen.

Ablagerungen infolge Sedimentüberschuss sind auf Gewässerbereiche beschränkt, an denen es im Extremfall zu einer großen (positiven) Differenz

zwischen Sedimenteintrag und Transportkapazität kommen kann. Dies sind Gewässerabschnitte mit verhältnismäßig geringer Transportkapazität (lokale Flachabschnitte, aufgeweitete Gewässerabschnitte, Bereiche mit Rückstau aufgrund von Abflusshindernissen wie z. B. verklebten Brücken) und Gewässerstrecken im Nahbereich großer und im Ereignisfall mobilisierbarer Sedimentquellen (lateralen Eintrag aus hochreichenden, labilen Einhängen oder aus steilen Zubringern).

Gefahrenintensität und Ausdehnung des vom Prozess betroffenen Raumes sind stark von den lokalen bis regionalen Gegebenheiten und möglichen Folgeprozessen abhängig. Diese umfassen geringfügige Überbordungen (Wasser, Schwebstoff) bis hin zu massiven Übersarungen des angrenzenden Vorlandes (Wasser, Geschiebe, Schwebstoff, eventuell Wildholz). Ein Zusammenhang zwischen der Intensität des Hochwassers (vgl. Beitrag 10 zu *Hochwasser*) und jener dieses Prozessmusters (Abbildung 02, links) ist nicht zwingend gegeben. Extremereignisse mit diesem Prozessmuster sind häufig ein Resultat einer ungünstigen Kombination aus ggf. unabhängigen Teilereignissen. Sie sind daher nur schwer in Form von Jährlichkeiten zu quantifizieren, können aber im Sinne einer Szenarienbetrachtung beschrieben werden.

12.3.3 Tiefenerosion infolge Sedimentdefizit

Lokale und abschnittsweise Erosion der Gewässersohle kann sich in Gewässerabschnitten einstellen, in denen der Sedimenteintrag (von flussaufwärts oder lateralen Sedimentquellen) erheblich geringer ist als die Transportkapazität. Dies können Abschnitte mit hoher Transportkapazität (z. B. regulierte Gewässerstrecken, natürliche Steilstrecken) und Bereiche mit sehr geringem Sedimenteintrag (z. B. unterhalb technischer Maßnahmen zum Sedimentrückhalt oder in Gewässerstrecken unterhalb von Stauhaltungen zur Wasserkraftnutzung) sein.

Tiefenerosion findet vorwiegend in Gewässern im Lockermaterial statt. Sohlintiefungen können die Stabilität angrenzender Böschungen (Unterspülung) und die Standsicherheit von Bauwerken (z. B. Fundamente von Brückenpfeilern, Ufermauern) gefährden. Langfristig kann damit auch die Absenkung des Grundwasserspiegels einhergehen.

Beim Prozessmuster Tiefenerosion werden durch die Begriffe »*Sohldurchschlag*« und »*Kolkbildung*« zwei Sonderfälle beschrieben. Der Sohldurchschlag beschreibt den Fall, in dem sich das Gewässer bis unter sein historisches Flussbett eintieft und darunter feines, sehr leicht erodierbares Sediment (Tone, Schluffe) ansteht. Der Fluss gräbt sich sodann rasch und tief in diese erosiven Sedimente ein. In Österreich ist ein Sohldurchschlag an der Salzach bekannt.

Der Begriff »Kolk« beschreibt eine lokale und häufig sehr tief reichende Eintiefung der Gewässersohle. Kolke entstehen durch hohe, lokal wirkende Strömungsbelastungen rotierender Wasserwalzen. Sie treten unter anderem im Nahbereich von Einbauten im Gewässer auf, in denen die Wasserströmung abgelenkt wird (z. B. an Brückenpfeilern, in Außenkurven, in unbefestigten Bereichen nach natürlichen oder künstlich erzeugten Abstürzen, etc.).

Das mögliche Ausmaß der Tiefenerosion steht in direktem Zusammenhang mit jenem Anteil der Strömungskraft, der für die Erosion des Sediments aus der Sohle verfügbar ist. Massive Sohleintiefungen stellen sich demnach überwiegend während (extrem) hoher Abflüsse ein. Es ist dadurch häufig ein Zusammenhang mit der Größe des Hochwassers (vgl. Beitrag 10 zu *Hochwasser*) gegeben. Durch die limitierte Verfügbarkeit von Lockermaterial in der Gewässersohle (Wildbäche, Zwangsgerinne), sehr hohe kritische Sohlschubspannungen oder eine sukzessive Reduktion des Längsgefälles als Folge der Eintiefung (Gebirgs- und Talflüsse) ist das maximale Erosionsausmaß beschränkt.

12.3.4 Ufer- und Seitenerosion

Ufer- und Seitenerosion weisen ein sehr vielfältiges Erscheinungsbild im Zusammenhang mit fluviatilen Feststofftransport auf. Es reicht von der kleinräumigen Erosion der Ufer (Uferanbrüche über eine Länge von wenigen Metern), über die Unterspülung und den daraus resultierenden Kollaps großflächiger Böschungseinhänge, bis hin zur Aufweitung des Gewässers um ein Vielfaches des ursprünglichen Zustandes.

Die Ufer- und Seitenerosion tritt sowohl in steilen Wildbächen, als auch in Gewässern im Lockermaterial (Gebirgs- und Talflüsse, Schwemmkegelgerinne von Wildbächen) auf. Allerdings unterscheiden sich die Ausprägungen und somit die Auswirkungen auf mögliche Folgeprozesse.

In flacheren Gewässern im Lockermaterial können die Ufer- und Seitenerosion das ursprüngliche Gewässerbett sehr deutlich verbreitern. Bei entsprechendem Sedimenteintrag von flussaufwärts bilden sich in diesen aufgeweiteten Bereichen aufgrund der verringerten Transportkapazitäten folglich Ablagerungen (siehe Prozessmuster Ablagerung infolge Sedimentüberschuss), welche wiederum die Tendenz zur Seitenerosion verstärken. In steilen Wildbächen mit hochreichenden Böschungen resultiert aus starker Seitenerosion ein starker Sedimenteintrag, welcher bei ausreichender Transportkapazität weitertransportiert wird und möglicherweise in Unterliegerabschnitten zu Problemen führt (siehe Prozessmuster Ablagerung infolge Sedimentüberschuss). In bewaldeten Gebieten ist auch der Eintrag von Wildholz aus den unmittelbar an das Gewässer

angrenzenden Einhängen eine bedeutende Folgeerscheinung dieses Prozessmusters. Die mögliche Intensität der Ufer- und Seitenerosion ist auch von den lokalen Gegebenheiten (Form des Gewässerlaufs, Lockermaterialeigenschaften, Bewuchs, Verbauungsgrad und Steilheit der Böschungen/Ufer) abhängig. Darüber hinaus kann dieses Prozessmuster durch das Auftreten der beiden anderen Prozessmuster initiiert bzw. verstärkt werden. Das gilt insbesondere für Gewässerstrecken mit harten Uferverbauungen, wo bei extremen Ereignissen ein Versagen der Verbauungen und starke Gerinneaufweitungen beobachtet wurden (BMLFUW, 2009).

12.4 Ausgewählte Beispiele extremer fluviatiler Feststoffereignisse

12.4.1 Übersicht

Die im Folgenden dargestellten Fallbeispiele stellen aus Sicht der Autoren extreme fluviale Feststofftransportereignisse dar. Diese Einschätzung basiert vorwiegend auf dem jeweiligen Prozesscharakter im Vergleich zur Kapazität der bestehenden Gewässer und der vorhandenen Schutzsysteme. Verursachte Schäden, unmittelbare Bewältigungsstrategien, etc. werden thematisiert, stehen bei der Zuordnung zum Begriff »extrem« jedoch nicht im Vordergrund. Bei der Einschätzung spielt die Ereignisspitze nicht zwangsläufig die maßgebende Rolle. In Kombination mit Folgeprozessen sind auch der zeitliche Verlauf des Geschiebetransports und die ereignisspezifischen Sedimentfrachten relevant.

12.4.2 Alpiner Wildbach – Schnannerbach (Stanzertal, Tirol)

Der Schnannerbach ist ein orographisch linker Zubringer der Rosanna und entwässert eine 6,3 km² große Fläche. Das nach Süden exponierte Einzugsgebiet erstreckt sich von der Mündung bei 1.120 m ü.A. bis auf 2.889 m ü.A. Die Bachlänge beträgt ca. 3,5 km, wobei im Oberlauf zahlreiche Seitengraben und Erosionsrinnen einmünden. Mächtige Schuttkegel im Sammelgebiet stellen die Hauptgeschiebeherde dar. Feilenartige Anbrüche liefern dort sehr große Mengen von relativ feinkörnigem Verwitterungsmaterial (Kalkschutt) in das Hauptgerinne. Zusätzlich werden die Schutthalde durch Seitenerosion des Schnannerbaches unterschritten (BMLFUW et al., 2006). Im Mittellauf fließt der Schnannerbach großteils auf dem Grundgestein ab. Eine 200 m lange Schluchtstrecke leitet zum besiedelten Schwemmkegel im Ortsteil Schnann

(Gemeinde Pettneu am Arlberg), auf dem der Bach in einem getreppten Künettengerinne zum Vorfluter geführt wird.

Im oberen Einzugsgebiet des Schnannerbaches dominieren Erosionsprozesse. So wurden beim Ereignis am 23. August 2005 trotz des teilweisen Rückhalts hinter der Geschiebedosiersperre 36.000–59.000 m³ zum Schwemmkegel verfrachtet. 20.000–25.000 m³ wurden dort im Gerinne und außerhalb abgelagert. Der Vorfluter wurde mit bis zu 34.000 m³ beaufschlagt. Die Feinfraktion wurde von der Rosanna sofort abgeführt, Schwemmholz bzw. einhergehende Verkläusungsprozesse wurden nicht beobachtet (BMLFUW et al., 2006; Chiari, 2008; Gems et al., 2014b) (Abbildung 03a).

Als relevantes Prozessmuster konnten bei diesem Ereignis massive Anlandungen im Schwemmkegelgerinne infolge hoher und lang anhaltender Feststoffeinträge aus dem Einzugsgebiet definiert werden. Prozessauslösend waren intensive Niederschläge über die Dauer von etwa acht Stunden mit vorausgehender hoher Vorbefeuchtung. Der lang anhaltende, intensive fluviatile Geschiebetransport bedingte Prozessintensitäten im Bereich der Abfuhrkapazität des Unterlaufgerinnes und eine Überlastung des Vorfluters im Mündungsbereich in Form von Geschiebeablagerungen. Zeugenaussagen zufolge trat am 22. August 2005 ab dem frühen Abend intensiver (fluviatiler) Feststofftransport mit relativ feinem Sediment auf, das Schwemmkegelgerinne des Schnannerbaches begann aufzulanden. Trotz Zuhilfenahme von technischem Gerät zur Freihaltung der Brücken verlandete die Brücke im Ortskern, was eine rasche rückschreitende Auflandung, beidufige Übersarungen und schließlich großflächige Geschiebeablagerungen im Siedlungsgebiet zur Folge hatte. Im Vergleich zu früheren morgangartigen Ereignissen waren die transportierten Feststoffe verhältnismäßig feinkörnig. Die Funktionalität und Schutzwirkung der Geschiebedosiersperre war aufgrund der sehr großen Dolenquerschnitte nur eingeschränkt gegeben.

Als Sofortmaßnahme musste der Bach in sein ursprüngliches Bett rückgeführt und die Feststoffablagerungen am Schwemmkegel geräumt werden. Durch die unmittelbar durchgeführte Ereignisdokumentation und -analyse konnten der Ablauf und die Größenordnung dieses extremen fluviatilen Feststoffereignisses rekonstruiert werden (BMLFUW et al., 2006). Diese Informationen und nachfolgende Untersuchungen im Wasserbaulabor (Gems et al., 2014b, 2015; Abbildung 03b) bildeten die Grundlage für die Planungen zur Adaptierung der bestehenden Schutzmaßnahmen (Abbildung 03c). Darüberhinaus konnte dieses Ereignis als Fallbeispiel zur Validierung und Verbesserung geschiebehdraulischer Simulationsmodelle (Chiari, 2008; Kammerlander et al., 2016) herangezogen werden.

Die Funktionalität und Schutzwirkung dieser Maßnahmen wurden beim bis dato jüngsten Schadensereignis am 01. August 2018 bestätigt. Extreme, lokal im

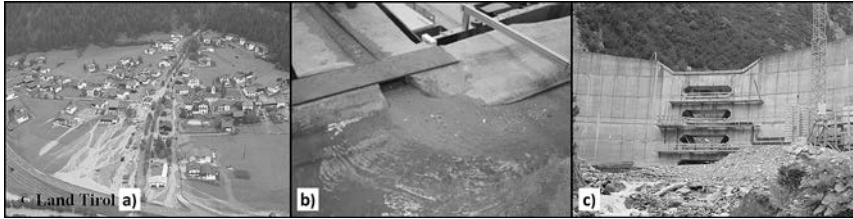


Abbildung 03: Ablagerungen in Schnann unmittelbar nach dem Ereignis am 23. August 2005 (a); Modellversuch mit Fokus auf den Mündungsbereich (Maßstab 1:30) (b); Adaptierung der Rückhaltesperre (c).

Figure 03: Sediment deposition in the locality Schnann immediately after the fluviatile hazard event on 23th August 2005 (a); physical scale model focusing on the confluence zone (scale 1:30) (b); adaptation of the retention dam (c).

Quellen: Land Tirol (a); Arbeitsbereich für Wasserbau, Universität Innsbruck (b); Arbeitsbereich für Wasserbau, Universität Innsbruck, Aufnahme vom 09.09.2015 (c)

Einzugsgebiet des Schnannerbaches und des benachbarten Gridlontobels wirkende Niederschläge, zeitweise geprägt durch intensive Hagelschauer, mobilisierten enorme Geschiebefrachten, welche die dokumentierten Mengen vom Ereignis 2005 am Schnannerbach erheblich überstiegen und den Mündungsbereich trotz optimaler Wirkung der Dosiersperre binnen kurzer Zeit massiv überlasteten (Abbildung 04a). Durch den massiven Geschiebeeinstoß aus dem Schnannerbach wurden die Rosanna trotz geringer Wasserführung auf- und rückgestaut und schließlich das angrenzende Industriegebiet flussaufwärts des Mündungsbereiches überflutet. Neben diesen Schäden im Industriegebiet wurden mehrere Brückenbauwerke am Schnannerbach und an der Rosanna zerstört bzw. beschädigt (Abbildung 04b). Erhebliche Kosten verursachten auch die Räumungen im betroffenen Siedlungsbereich und insbesondere auch im schwer zugänglichen Geschieberückhalteraum oberhalb der zur Gänze verlandeten Dosiersperre. Dieses Ereignis ist als »extrem« einzustufen, da abweichend von der unterstellten Charakteristik des bis dato größten, dokumentierten Ereignisses vom August 2005 der Eintrag von Geschiebe in den Mündungsbereich binnen kürzerer Zeit und mit erheblich größerer Intensität bzw. mit murartigem Prozessverhalten erfolgte. Die Schutzmaßnahmen am Schnannerbach haben bis zur jeweiligen Kapazitätsgrenze ihre Wirkung erzielt und weit größere Schäden im Siedlungsbereich verhindert. Unmittelbar nach dem Ereignis erfolgte u. a. die Dokumentation und Analyse dieses Ereignisses durch die zuständige Dienststelle der Wildbach- und Lawinerverbauung.

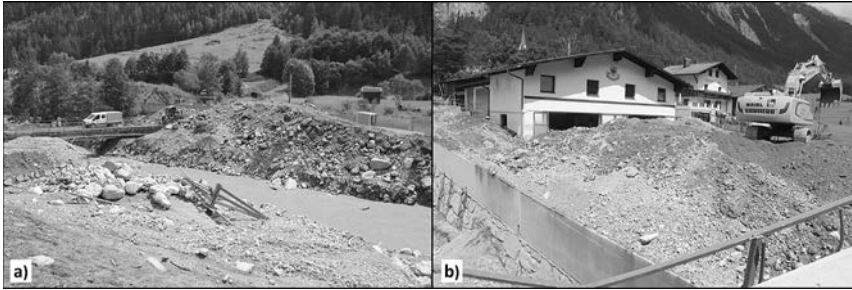


Abbildung 04: Ablagerungen im Mündungsbereich am Folgetag des Ereignisses vom 01. August 2018 (a); Ablagerungen entlang der Künette orografisch links unmittelbar oberhalb der Einmündung (b).

Figure 04: Sediment deposition in the confluence zone documented on the day after the hazard event on 1st August 2018 (a); sediment deposition at the rigid torrent channel on the left bank immediately upstream of the confluence zone (b).

Quelle: Arbeitsbereich für Wasserbau, Universität Innsbruck, Aufnahmen vom 02.08.2018

12.4.3 Alpiner Gebirgsfluss – Urslau (Pinzgau, Salzburg)

Intensive, lang anhaltende Niederschläge führten am 12. August 2002 zu massiven Überflutungen im Talboden der Urslau in den Gemeinden Saalfelden und Maria Alm (Pinzgau, Salzburg) (Abbildung 05). Die Urslau entwässert ein 121,8 km² großes Einzugsgebiet und ist der größte Zubringer zur Saalach in Uttenhofen. Zehn nennenswerte Zubringer liefern aus zwei unterschiedlichen geologischen Formationen (südlicher Teil des Hauptbaches mit Glimmerschiefer und Phylliten der Grauwackenzone; nördlicher Teil mit Gesteinen der Nördlichen Kalkalpen) erhebliche Feststoffmengen in den 18,8 km langen Hauptbach am Talboden.

Als relevantes Prozessmuster konnten massive Ablagerungen von Sedimenten im Gewässerabschnitt am Talboden infolge zu geringer Transportkapazitäten und sehr großer Feststoffeinträge (Sediment und Holz) aus dem Einzugsgebiet beobachtet werden. Prozessauslösend waren intensive Niederschläge über zwei Tage (»Vb-Wetterlage«) mit vorausgehender hoher Vorbefeuchtung im Monat vor dem Ereignis. Die statistische Analyse der Pegelmessung am Ortsausgang in Saalfelden ergab nach Anpassung der beobachteten Messwerte infolge Geschiebeanlandung für den maximalen Wasserstand (Abfluss) etwa eine 100-jährliche Wiederkehrwahrscheinlichkeit, wobei an dieser Stelle die oberhalb des Pegels überbordeten Abflüsse nicht erfasst wurden. Mit diesem Hintergrund und aufgrund der sehr hohen Sedimenttransportraten und Ereignisfracht, welche jene des Bemessungsereignisses jeweils überschritten, ist dieses Ereignis als »extrem« einstufen. Untermauert wird diese Einschätzung durch

den Umstand, dass die Transportkapazität im Unterlauf nicht ausreichte, um den massiven Feststoffeintrag aus dem Einzugsgebiet schadlos in den Vorfluter abzuführen. Anlandungen im Gerinne bis hin zur vollständigen Verfüllung der Gerinnequerschnitte und nachfolgende Übersarungen führten zu erheblichen Schäden an den bestehenden Siedlungen und Infrastruktureinrichtungen. Als Sofortmaßnahme musste die Ursrau in ihr ursprüngliches Bett rückgeführt und die Siedlungen sowie Infrastruktureinrichtungen von den Feststoffablagerungen befreit werden (Abbildung 05).

Die unmittelbar nach dem Ereignis durchgeführte Ereignisdokumentation und -analyse bildete die Grundlage für die Planung eines Schutzkonzeptes. Aktive Maßnahmen umfassen die Sohlabsenkung zur Vergrößerung des Abflussquerschnittes, Sohl- und Ufersicherungen, Ablenkdämme im Talboden, lokale technische Schutzmaßnahmen in den Teileinzugsgebieten zur Dosierung, Filterung und Energieumwandlung von Sedimenttransportprozessen sowie flächenwirtschaftliche und forstliche Maßnahmen. Die Errichtung zusätzlicher Abflusspegel im Hauptbach sowie in den Zubringern und der Betrieb einer Messstation zur integrativen Messung der Sedimenttransportprozesse (u. a. Geschiebefalle, -fänger und Geophone) stellen passive Schutzmaßnahmen dar.



Abbildung 05: Ablagerungen im Ortsbereich Maria Alm unmittelbar nach dem Ereignis am 12.08.2002.

Figure 05: Sediment deposition in the locality Maria Alm immediately after the fluviatile hazard event on 12th August 2002.

Quelle: Wildbach- und Lawinenverbauung

12.4.4 Alpiner Talfluss – Inn (sowie Zubringer, Tirol)

Intensive, lang anhaltende Niederschläge mit Tagessummen im Bereich der bisher größten gemessenen Werte (»Vb-Wetterlage«) in Österreich – in weniger als 24 Stunden fielen in Tirol und Vorarlberg 120–230 mm – führten in der Nacht

vom 22. auf den 23. August 2005 zu einer extremen Hochwassersituation in den nördlichen Vor- und Zentralalpen. Als »extrem« kann die Situation bezeichnet werden, weil mehrere die Hochwasserentstehung begünstigende Faktoren gleichzeitig eintraten: die Vorfüllung der Bodenspeicher in den Monaten Juli und August, die Ereignisdauer mit ununterbrochen hohen Intensitäten von mehr als 10 mm/h über mehrere Stunden, die flächendeckende Überregnung großer Einzugsgebiete und die Lage der Null-Grad-Grenze oberhalb von etwa 3.000 m ü.A. (BMLFUW, 2006). Hinsichtlich der Jährlichkeit ist das extreme Hochwasserereignis am Tiroler Inn aufgrund der Größe des betroffenen Gebietes nicht pauschal zu fassen. Im Oberinntal wurden Jährlichkeiten jenseits des 100-jährlichen Abflusses (bis etwa HQ_{300}) gemessen bzw. rekonstruiert (BMLFUW, 2006). An einigen Messstellen, insbesondere an der Trisanna im Paznauntal, wurden die höchsten Werte seit Beginn kontinuierlicher Aufzeichnungen registriert. An der Pegelmessstelle in Innsbruck betrug die Jährlichkeit etwa 200, weiter flussabwärts nahmen diese kontinuierlich auf Werte um bzw. unter 100 ab. Der Verlauf der Abflussintensität und auch der Sedimentkonzentration mit besonderem Schwerpunkt im Tiroler Oberland und insbesondere dem Paznauntal (Trisanna als großer Zubringer des Inns) ist in der Form auch den Aufnahmen in Abbildung 06 zu entnehmen.

Gleichermaßen wie die Ereignisintensität entlang der Lauflänge des Tiroler Inns lässt sich auch das relevante Prozessmuster gemäß obiger Einteilung nicht einheitlich festlegen. Bei diesem Ereignis wurden alle drei Prozessmuster beobachtet. Tendenziell wurde im Oberland (insbesondere an der Trisanna) ein erheblicher Überschuss an Sedimenten aufgrund massiver Einträge durch Zubringergewässer beobachtet, was folglich zu Ablagerungen im Gerinne mit massiven Ausuferungen und Laufverlagerungen führte. Im Unterland konnte dies aufgrund geringerer Einträge durch die Zubringer nicht in diesem Maße beobachtet werden. Hier wurden großflächige Überflutungen im gesamten Flussabschnitt mit teilweise extremen Erosionsprozessen dokumentiert.

Das Hochwasserereignis vom August 2005 verursachte in Tirol Schäden in Höhe von 350 Millionen Euro und betraf vor allem auch die Talböden der Zubringer Trisanna und Rosanna (BMLFUW, 2006). Dieses Ereignis verursachte ebenso massive Schäden in den benachbarten Alpenländern (Schweiz, Bayern).

Nach der Ereignisdokumentation und -analyse erfolgte zunächst eine Harmonisierung der Bemessungshochwässer durch den Hydrografischen Dienst. Die Miteinbeziehung des Extremereignisses vom August 2005 in das Datenkollektiv führte teilweise zur Erhöhung der Scheitelwerte, auch im Unterinntal, wo die verhältnismäßig geringsten Jährlichkeiten beobachtet wurden. Dem neu ermittelten Bemessungsereignis wurde die Wellenform (und -fracht) des Extremereignisses zugrunde gelegt. Folglich wurde auf Basis adaptierter Bemessungsereignisse und einer gemäß Hochwasserrichtlinie (EU,

2007) durchgeführten Abflussuntersuchung für Tirol die Gefahrenzonenausweisung für den gesamten Inn in Tirol durchgeführt. Im Abschnitt des Inns zwischen Innsbruck und der Landesgrenze mit Bayern entstehen demgemäß bei Eintreten des Bemessungsereignisses (HQ_{100}) Überflutungsflächen, von welchen auch bestehende Siedlungsbereiche, Industriezonen sowie auch landwirtschaftlich genutzte Flächen betroffen sind. Mit diesem Hintergrund wurde und wird aktuell ein umfassendes Schutzprojekt für den Inn im Tiroler Unterland ausgearbeitet (<https://www.hochwasserschutz-unterinntal.at/>). Wesentliche Zielsetzung hierbei ist die vollständige Gewährleistung des Hochwasserschutzes der Bevölkerung bis zum 100-jährlichen Bemessungsereignis und unter Berücksichtigung der Situation weiter unterstrom, wo sich die Hochwassersituation infolge der Schutzmaßnahmen im Vergleich zur Ausgangssituation nicht verschärfen darf. In diesem Sinne werden gegenwärtig entlang des Inns im Unterinntal umfangreiche Linearmaßnahmen (Dämme, Mauern) projektiert, um die Abfuhrkapazität des Inns im erforderlichen Maße zu erhöhen. Um dem Verschlechterungsverbot weiter unterstrom gerecht zu werden, werden zudem mehrere Retentionsräume im Nebenschluss projektiert. Sowohl der Planungs- als auch der Umsetzungsprozess dieses regionalen Hochwasserschutzprojektes erfordern in sehr hohem Maße die Einbindung der Gemeinden, die Berücksichtigung von Bedürfnissen der Bevölkerung sowie auch ein entsprechendes Akzeptanzverhalten dieser.



Abbildung 06: Aufnahmen vom Hochwasser am 23.08.2005 in Tirol.

Figure 06: Flood event on 23rd of August in Tyrol.

Quellen: Bundesheer Tirol, Aufnahme vom 23.08.2005 (a); Arbeitsbereich für Wasserbau, Universität Innsbruck, Aufnahme vom 23.08.2005 (b); Wikimedia commons (c)

12.5 Umgang mit fluvialen Feststoffgefahrenprozessen

12.5.1 Historischer Abriss des praktischen Schutzwasserbaus

In den Alpen hat der Mensch seit jeher versucht, seinen Siedlungsraum vor den Naturgewalten zu schützen. Von besonderer Bedeutung sind hierbei die Wassergefahren in Form von Überschwemmungen bis hin zu Vermurungen. Der Schutz vor diesen Gefahren ist eine der Hauptaufgaben der *Wildbachverbauung* (Wildbäche) und des *Schutzwasserbaus* (Gebirgs- und Talflüsse). In beiden Bereichen besteht auch ein enger, in den Anfängen durchaus unterschiedlich ausgeprägter Austausch zwischen Praxis und wissenschaftlicher Entwicklung neuer Methoden, Modelle, etc.

Im Schutzwasserbau bestanden die Anfänge des regionalen Hochwasserschutzes in der *Regulierung* (Begradigung, Einengung, Sohl- und Ufersicherung) der großen Talflüsse. Im Hinblick auf den Feststoffhaushalt der Gewässer bestand das Ziel darin, einen *Gleichgewichtszustand* zu erreichen, in dem sich die Geschiebezu- und -abfuhr langfristig ausgleichen, um Sohlanlandungen und nachfolgende Überschwemmungen zu verhindern. Die praktische Umsetzung solcher Flusskorrekturen war eng mit den theoretischen Erkenntnissen zum Geschiebetransport verbunden. Zahlreiche Untersuchungen in Modellgerinnen der damals neu errichteten Versuchsanstalt der ETH Zürich lieferten notwendige Grundlagendaten zum Geschiebetransport. Das Hauptaugenmerk lag dabei in der theoretischen (maximalen) Transportkapazität großer kiesführender Flüsse. Es entstanden weltbekannte Formeln, die nach wie vor ihre (eingeschränkte) Gültigkeit haben (u. a. Meyer-Peter und Müller, 1949; Einstein, 1950). Diese wichtigen Ansätze und Gleichungen wurden in den folgenden Jahrzehnten kontinuierlich erweitert, unter anderem richtete sich der Fokus zunehmend auch auf die Prozesse in steileren Gerinnen (u. a. Hänger, 1979; Smart und Jäggi, 1983; Rickenmann, 1990).

Seit Beginn des *Wildbachschutzes* waren wichtige Schwerpunkte die Bindung des Geschiebes sowohl in der Fläche (durch *Aufforstungen*, *Begrünungen*) als auch im Gerinne (*Konsolidierung*). Das Ziel bestand in der Verminderung des Geschiebeaufkommens im Erosionsgebiet und wohl auch deshalb hat die Wildbachverbauung in Österreich ihre geschichtlichen Wurzeln in der Forstwirtschaft. Im Laufe des letzten Jahrhunderts hat sich schließlich das *Forsttechnische System der Wildbachverbauung* etabliert, was als weiteren Schwerpunkt die *Retention* an den Grabenausgängen und die *unschädliche Ableitung* der Wildbachprozesse in den *Vorfluter* enthielt (Länger, 2009). In den vergangenen Jahrzehnten wurden diese Schutzkonzepte um gezielte Maßnahmen zur Dosierung und Filterung der Geschiebefracht während Extremereignissen ergänzt (*Geschiebewirtschaftung*; Kettl, 1984; ASI, 2009a; Bergmeister et al.,

2009) und das Instrument der Gefahrenzonenplanung umgesetzt. Die enge Verbindung zur Wissenschaft lag primär in der Feldforschung (Stiny, 1931; Aulitzky, 1986) und der Entwicklung von empirischen Formelwerken aus Ereignisdokumentationen. Die Erkenntnisse dienten der besseren Abschätzbarkeit des Gefahrenpotentials von Wildbächen (u. a. Hampel, 1980; Kronfellner-Kraus, 1984; Gertsch, 2009).

12.5.2 Aktueller Stand

Sedimentrückhalt in den Oberläufen (Wildbächen) und *Abflusskonzentration* in den kiesführenden Talflüssen führten zu langfristigen, negativen Begleiterscheinungen wie der *Sohleintiefung*, der Gefahr von Sohldurchschlägen oder der *Verringerung der Lebensraumvielfalt*. Zahlreiche wissenschaftliche Studien verdeutlichen die Notwendigkeit einer ganzheitlichen Betrachtung fluvialer Naturgefahrenprozesse. Die im Anschluss an die Hochwasserereignisse der Jahre 2002 und 2005 erarbeiteten Studien »Flood Risk I« und »Flood Risk II« (BMLFUW, 2004, 2009) stellen den Beginn der Umsetzung eines integrierten Hochwassermanagements dar. Die darin enthaltenen Zielsetzungen und Umsetzungsstrategien sind sehr vielfältig. In Bezug auf fluviale Feststoffgefahren lässt sich festhalten, dass ein nachhaltiger Schutz nur unter Miteinbeziehung einer natürlichen Gewässerdynamik (*Sedimentdurchgängigkeit*, *fließende Retention*, etc.) und nicht ausschließlich durch technische Maßnahmen (harte Verbauungen) erreicht werden kann. Wesentliches Element und grundlegende Voraussetzung des integrierten Hochwassermanagements ist das Prozessverständnis extremer Ereignisse, um:

- 1) Gefahrenbereiche einzugrenzen (Gefahrenzonenplanung),
- 2) Schutzmaßnahmenkonzepte im Sinne einer Nutzen-Kosten-Analyse zu evaluieren,
- 3) Auswirkungen lokaler Schutzmaßnahmen auf das übergeordnete Gewässersystem mitzuberücksichtigen, und um
- 4) Wirkungen der Schutzmaßnahmen bei extremen Ereignissen beurteilen zu können.

Der thematisierte Wandel fluss- bzw. schutzwasserbaulicher Maßnahmen in den vergangenen Jahrzehnten ist beispielhaft für den Abschnitt der Drau bei Obergottesfeld (Oberdrautal, Kärnten) in Abbildung 07 dargestellt:

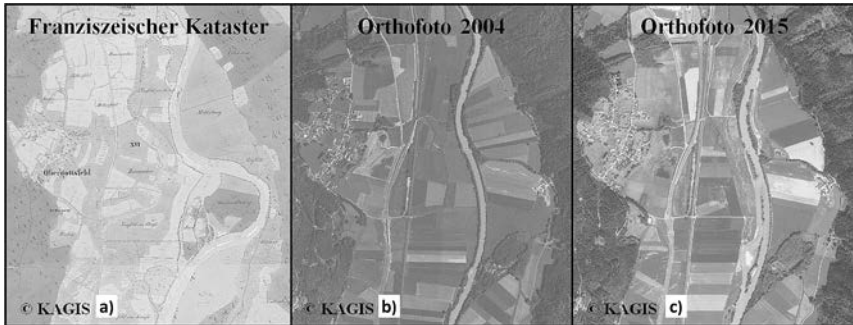


Abbildung 07: Drau bei Obergottesfeld (Oberdrautal, Kärnten) im 19. Jhdt (a) sowie 2004 (b) und 2015 (c); Fließrichtung von unten nach oben.

Figure 07: Drau River close to Obergottesfeld (Oberdrautal, Carinthia) in the 19th century (a) and in 2004 (b) and 2015 (c); flow direction from bottom to top.

Quelle: KAGIS, 2018

12.6 Abschätzbarkeit fluvialer Feststoffgefahrenprozesse

12.6.1 Berechnung fluvialer Transportprozesse

Fluviatile Feststoffgefahrenprozesse resultieren aus den Wechselwirkungen zwischen Wasserabfluss (Hydrodynamik), Sedimenttransport (Geschiebe- und Schwebstofftransport) und morphologischen Änderungen (Anlandung, Tiefen- und Seitenerosion). In *computergestützten Simulationsmodellen* können diese Teilkomponenten und deren Interaktion im betrachteten Modellgebiet zu einem gewissen Grad nachgebildet werden (Habersack et al., 2011). Der folgende Abriss beschränkt sich auf wissenschaftliche Untersuchungen zum Transportprozess von Geschiebe (*Geschiebetransportkapazität*), zumal dieser Prozess bei fluvialen Verlagerungsprozessen hinsichtlich morphologischer Veränderungen der Gewässer und des Gefahrenpotentials extremer Ereignisse maßgebend ist.

Im Alpenraum häufig angewendete Formelwerke zur Berechnung der Geschiebetransportkapazität sind unter anderem jene von Meyer-Peter und Müller (1949), Smart und Jäggi (1983) sowie von Rickenmann (1990). Diese Ansätze basieren jeweils auf Untersuchungen im physikalischen Modellversuch an der ETH Zürich, einer Einkornbetrachtung, und wurden mittlerweile durch langjährige und weltweit verbreitete Anwendung und durch Vergleiche mit Naturdaten verifiziert. Der Ansatz von Meyer-Peter und Müller basiert auf dem Prinzip der kritischen Sohlschubspannung. Der Anwendungsbereich umfasst Gewässer mit Gefälle bis etwa 2,3 % und damit insbesondere kiesführende

Talflüsse und Gebirgsflüsse mit moderatem Gefälle. Der Ansatz berücksichtigt Geschiebetransport an der Gewässersohle und Formverluste infolge Transportkörper (Riffel, Dünen, Antidünen). Die Größe des Vorfaktors der Formel erlaubt die Kalibrierung mittels Naturdaten, Beobachtungen etc. (Wiberg und Smith, 1989). Die Berechnungsansätze von Smart und Jäggi, sowie von Rickenmann basieren auf erweiterten Datengrundlagen, die auch Versuche mit höherem Längsgefälle beinhalten. Der Anwendungsbereich umfasst Gewässer bis etwa 20 % Gefälle und damit auch steile Gebirgsflüsse und Wildbäche.

Die *Ereignisse im August 2002 und 2005* im europäischen Alpenraum bestätigten mit den durchgeführten *Ereignisdokumentationen* die Anwendbarkeit dieser Berechnungsansätze und zeigten auch Anwendungsgrenzen auf. In steilen Gerinnen zeigte sich teilweise eine große Diskrepanz zwischen berechneten und rekonstruierten Sedimentfrachten. Diese Unterschiede wurden auf den Einfluss der *Formverluste* infolge Sohlstrukturen (Absturz-Becken-Sequenzen) und der eingeschränkten *Sedimentverfügbarkeit* zurückgeführt (z. B. Rickenmann et al., 2008; Gems et al., 2014a). Folglich wurden diese Berechnungsansätze weiterentwickelt, mitunter wurden von Naturmessungen empirische Zusammenhänge zur Quantifizierung der Formverluste abgeleitet (z. B. Palt, 2001; Rickenmann, 2005; Chiari et al., 2009; Nitsche et al., 2011). Diese werden mit den Ansätzen für die Transportkapazität kombiniert angewendet.

Für die Geschiebetransportberechnung in Tal- und Gebirgsflüssen mit moderatem Gefälle wurden die angeführten Ansätze um die *Berücksichtigung von Sortierprozessen (fraktionierter Transport)* erweitert. Bewährte und gebräuchliche Ansätze sind beispielsweise jene von Parker (1990), Hunziker (1995) und Wilcock und Crowe (2003).

Seit der rasanten Weiterentwicklung verfügbarer Rechnerkapazitäten stellen insbesondere auch numerische Modellwerkzeuge leistungsfähige und praktikable Werkzeuge zur Geschiebetransportberechnung dar. Numerische Modelle basieren auf der ein- oder mehrdimensionalen Abbildung des Gewässers durch Querprofile (1D) oder Berechnungsnetze (2D). Im Hinblick auf Hydraulik und Sedimenttransport werden unter Anwendung numerischer Methoden in räumlich und zeitlich diskreter Form partielle Differentialgleichungen gelöst und unter anderem auch die zuvor beschriebenen Berechnungsansätze für die Geschiebetransportkapazität und den daraus resultierenden morphologischen Änderungen (Sohlanlandung und -eintiefung, Sortierprozesse) berechnet (Habersack et al., 2011). Gebräuchliche Programme sowohl für wissenschaftliche Fragestellungen als auch für die kommerzielle Anwendung sind unter anderem *BASEMENT* (Vetsch et al., 2018), *HYDRO_GS-2D* (Nujic, 2012), *HEC-RAS* (US Army Corps of Engineers, 2016) oder *TOMSED* (Chiari et al., 2009).

Mit der Entwicklung von Berechnungsansätzen und Modellen wurde der Stellenwert von Naturdaten aus Feldmessungen und physikalischen Modell-

versuchen deutlich. Methoden der direkten Messung von Geschiebefrachten und -raten (z. B. *Geschiebefalle oder -fänger*) und auch indirekte Messmethoden (z. B. *Geophone, Hydrophone*) wurden hierbei in wissenschaftlicher Forschung getestet und weiterentwickelt (Kreisler et al., 2014). Österreich kann auf ein sehr gutes *Messstellennetz in Oberflächengewässern* (Wasserstand und Abfluss) bauen. Auch permanent aufzeichnende *Sedimenttransportmessstationen* (Schwebstoff und Geschiebe) bestehen mittlerweile in entsprechender Anzahl, unter anderem auch Geophonanlagen zur Messung der Geschiebetransportraten an der Rofenache (Nordtirol), an der Drau und an der Isel (Osttirol) sowie in den Wildbächen Suggadinbach (Vorarlberg), Ursau (Salzburg) und Johnsbach (Steiermark) (BMLFUW, 2015b,c). Allerdings stoßen solche Messstellen während Extremereignisse an ihre Grenzen, weshalb die Messdaten häufig mittels Nachbearbeitungen korrigiert werden müssen und entsprechend vorsichtig zu interpretieren sind. Im Hinblick auf die hohe Relevanz von Naturdaten während Extremereignisse ist daher eine qualitative (z. B. redundante oder gekoppelte Systeme) wie auch quantitative Erweiterung des bestehenden Messnetzes anzustreben.

12.6.2 Abschätzung von Ereignisintensität und Gefahrenpotential

Extreme fluviatile Feststoffereignisse werden durch ihre Ereignisintensität quantifiziert, welche sich aus dem zeitlichen Verlauf, der Spitze und der Fracht von Wasser und Sediment definiert. Diese Quantifizierung beruht im Wesentlichen auf feldbasierten und/oder computergestützten Methoden (z. B. Hagen et al., 2007; Rickenmann, 2014) und wird in der Regel von Naturgefahrenexpertinnen und -experten (Ingenieurwesen, Forsttechnik, Geografie, Geologie, o.ä.) vorgenommen. Sie umfasst im Wesentlichen die Bestimmung der Abflussbereitschaft und der Sedimentverfügbarkeit im Einzugsgebiet, die *Festlegung von realistischen Niederschlagszenarien und Prozessszenarien* und die Berechnung der daraus resultierenden Abfluss- und Sedimentmengen (Ganglinien).

Die Folgen solcher Extremereignisse im Sinne ihrer Auswirkungen auf das Gewässer (Prozessmuster in Kapitel 12.3) sind mittels den oben beschriebenen Berechnungsansätzen und -modellen grundsätzlich berechenbar (Habersack et al., 2011). Es lassen sich dadurch jene Gebiete ermitteln, die einer potentiellen Gefahr durch Überflutung, Geschiebeablagerung oder Erosion ausgesetzt sind. Zusätzlich sind die genannten Berechnungsansätze und -modelle ein nützliches Werkzeug für eine Vielzahl von anderen Aufgabenstellungen. Ihr Einsatz umfasst neben der *Ausweisung von Gefahrengebieten* auch die *geschiebehydraulische Dimensionierung* von einzelnen Schutzmaßnahmen oder die regionale *Wirkungsanalyse* von Schutzsystemen.

Aufgrund der unterschiedlichen Entstehungsmöglichkeiten von Feststoffereignissen und der komplexen Wechselwirkung zwischen Wasser und Sediment können die Ereignisintensität sowie die jeweiligen Prozessmuster räumlich stark variieren. Um eine flächendeckende Aussage zur Ereignisintensität oder zum Gefahrenpotential extremer, fluviatiler Feststoffereignisse innerhalb eines bestimmten Gebietes zu erhalten, muss deshalb auch die Vielfalt an Entstehungsmöglichkeiten (z. B. wo und wann tritt Starkregen auf, wie stellt sich das gegenwärtige Sedimentpotential dar, etc.) in Form von *Szenarien* formuliert werden. Diese Szenarien beruhen in der Regel auf Expertenwissen und den Erkenntnissen aus vergangenen Ereignissen (Ereignisdokumentation). Sie bilden die Grundlage (Eingangsdaten) für computergestützte Simulationen und haben einen entsprechend hohen Einfluss auf deren Ergebnisse.

12.7 Herausforderungen im Umgang mit extremen fluviatilen Feststoffereignissen

12.7.1 Verbesserung der Abschätzbarkeit fluviatiler Feststoffgefahrenprozesse

Unsicherheiten in der Abschätzung der Ereignisintensität oder des Gefahrenpotentials fluviatiler Feststoffereignisse ergeben sich zunächst aus der häufig fehlenden Möglichkeit der *Modellkalibrierung* mittels *Naturmessungen*, *Beobachtungen vergangener Ereignisse* oder *physikalischer Modellversuche*. Berechnungsansätze sind jeweils auf einen der Datengrundlage entsprechenden Anwendungsbereich beschränkt. Die Modelleignung für die betrachtete Aufgabenstellung ist seitens des Anwenders stets zu hinterfragen. Ergebnisse von Geschiebetransportberechnungen können im Vergleich verschiedener Ansätze miteinander stark divergieren. *Sensitivitätsbetrachtungen* und nach Möglichkeit die »grobe« Kalibrierung der zugrundeliegenden Formeln anhand von Messdaten und/oder die Plausibilisierung der Ergebnisse anhand dokumentierter Ereignisse sind essentiell.

Weitere Unsicherheiten in der Analyse fluviatiler Verlagerungsprozesse ergeben sich aus der *Szenarienbildung*. Die gängigen Berechnungsansätze basieren auf der Annahme von transportlimitierten Verhältnissen und geben die Transportkapazität infolge der Strömungskraft des Abflusses wieder. Die tatsächlich verfrachteten Transportraten ergeben sich aus der Bilanz mit den räumlich und zeitlich variabel verfügbaren Sedimentvolumina (lateralen Eintrag in die Gewässer aus Zubringern oder gravitativen Prozessen, Ausmaß der Tiefen- und Seitenerosion). Die Bedeutung der Szenarienbildung nimmt daher mit der topografischen Komplexität des Betrachtungsraums sehr stark zu: in engen,

steilen Tälern ist die Wechselwirkung zwischen Zubringern und Talfluss in der Regel bedeutend größer als in breiten Tallandschaften. Die Begründung liegt im potentiellen Geschiebeeintrag von steilen Zubringern, wobei neben den topografischen Gegebenheiten (Steilheit) auch die Sedimentverfügbarkeit in Betracht zu ziehen ist. Computergestützte Simulationsmodelle können diese Sedimentlimitierung oder laterale Sedimenteinträge zwar grundsätzlich berücksichtigen, allerdings fehlen häufig die dafür notwendigen Informationen. *Naturmessungen, Beobachtungen vergangener Ereignisse* oder *physikalische Modellversuche* können hierzu wertvolle Daten und Informationen liefern.

12.7.2 Einfluss von Klimawandel und Landnutzung auf fluviatile Feststoffgefahrenprozesse

Extremer fluviatiler Feststofftransport ist in Abhängigkeit der vorherrschenden Rahmenbedingungen sehr unterschiedlich ausgeprägt. Faktoren mit maßgeblichem Einfluss auf das Auftreten der Prozessmuster sind die Intensität und Häufigkeit von Hochwasserereignissen (Abfluss als unmittelbarer Treiber für die Transportkapazität), das Defizit oder der Überschuss von Sediment (Verlagerung/Eintrag aus in-situ und äußeren Sedimentquellen) und die vorherrschenden Schutzmaßnahmen im Gewässer.

Für die zukünftige, klimabedingte Entwicklung von Hochwasserereignissen wird auf Beitrag 10 zu *Hochwasser* verwiesen. Bezüglich des Einflusses zukünftiger Veränderungen der Landnutzung und daraus resultierender möglicher Veränderungen der Abflussentstehung und -konzentration sowie der Sedimentverfügbarkeit wird weiters auf Beitrag 11 zu *Sturzfluten* und Beitrag 14 zu *Bodenerosion* verwiesen.

Grundsätzlich sind Hochwässer das Resultat eines starken Niederschlagsereignisses (*Starkregen*) mit gegebenenfalls ungünstigen *Bedingungen bei Ereignisbeginn* (Vorfeuchte). In Gewässern kleinerer, alpiner Einzugsgebiete (< 100 km²) ist das maßgebende Niederschlagsereignis für extrem hohe Abflüsse häufig ein kurzes, *konvektives Gewitter*. Im Hinblick auf den Klimawandel lässt die prognostizierte Temperaturzunahme (CCCA, 2015) eine Zunahme der Intensitäten kurzer Starkregen erwarten (Ban et al., 2015; Formayer und Fritz, 2017). Die klimabedingten Auswirkungen auf zukünftige Hochwasserintensitäten werden aber regional unterschiedlich sein und liegen insgesamt unter den natürlichen Schwankungen (BMLFUW, 2017). Aktuelle Studien zeigen den Trend einer leichten Zunahme der Hochwasserintensität im Osten und einer leichten Abnahme im Westen Österreichs (Holzmann et al., 2010; BMLFUW, 2017). In Gewässern größerer Einzugsgebiete resultieren extreme Hochwässer in der Regel aus großräumigen, länger andauernden Starkniederschlägen. Aktuelle

Klimaprojektionen lassen eine saisonale Verschiebung des Niederschlags vom Sommer in Richtung Frühling/Herbst vermuten (CCCA, 2015). Trendanalysen zeigen für Gewässer größerer Einzugsgebiete geringere Zunahmen der Hochwasserintensität als in kleinen Gebieten (BMLFUW, 2017).

Die Auswirkung des Klimawandels auf das Auftreten von Sedimentüberschuss oder -defizit lässt sich für den Alpenraum zum derzeitigen Stand kaum quantifizieren. In vielen Gewässern Österreichs sind die in-situ Sedimentquellen stark durch flussbauliche und wasserwirtschaftliche Maßnahmen beeinflusst, indem das Sedimentkontinuum unterbrochen (Geschieberückhalt in den Oberläufen, Wasserkraftwerke in den Talflüssen) und die natürliche, morphologische Gewässerdynamik beeinträchtigt ist (Längs- und Querverbauungen). Die Entwicklung des Sedimentdargebots innerhalb solcher Gewässer ist daher stark von etwaigen Nutzungs- und Bewirtschaftungsänderungen (Feststoff- und Stauraummanagement) abhängig (Habersack et al., 2013; Haimann et al., 2018).

Klimabedingte Änderungen von äußeren Sedimentquellen sind hinsichtlich ihres Potentials (Größe der Geschiebeherde) und der Frequenz (Häufigkeit des Eintrags in das Gewässer) individuell zu bewerten. In hochalpinen Gebieten ist eine Erhöhung des Geschiebepotentials infolge des Gletscherrückgangs (Freilegung von Moränen) und der Permafrostdegradation (Hangentlastungen) zu erwarten (Scheuner et al., 2015). Diese Gebiete sind aber in der Regel weit vom Siedlungsraum entfernt und deren Relevanz für das Gefahrenpotential ist noch nicht geklärt. Für äußere Sedimentquellen in mittleren Höhenlagen (Schutthalden, Böschungen) lassen sich derzeit keine fundierten Aussagen treffen bzw. sind den Autoren keine entsprechende Untersuchungen bekannt. Hinsichtlich der prognostizierten Häufung von konvektivem Starkregen ist aber eine Zunahme von kleinräumigen Extremereignissen (fluviatiler oder murartiger Natur) zu erwarten. In Abhängigkeit der topografischen und hydrologischen Gegebenheiten kann sich daraus auch eine Häufung von fluviatilen Extremereignissen in den Vorflutern (Gebirgsflüssen) ergeben.

12.7.3 Meidung verbleibender Gefahrengelände

38,6 % der Fläche Österreichs stellen gemäß Statistik Austria und Corine-Landnutzungsdaten *Dauersiedlungsraumfläche* dar (Stand 2001). Bundesländerbezogen ist dieser Anteil mit 80,2 % in Wien am größten, gefolgt von Burgenland mit 63,2 % und Niederösterreich 60,4 %. Die landschaftlich stark durch die Ostalpen geprägten Bundesländer Salzburg (20,3 %), Vorarlberg (21,7 %) und Tirol (11,9 %) weisen die geringsten Flächenanteile auf (Wonka, 2008). Österreich und insbesondere jene Regionen mit hoher Reliefenergie sind nur sehr eingeschränkt besiedelbar. Trotz drohender Naturgefahren und vielleicht

gerade aufgrund der Naturlandschaft stellen diese Regionen einen attraktiven Lebensraum dar.

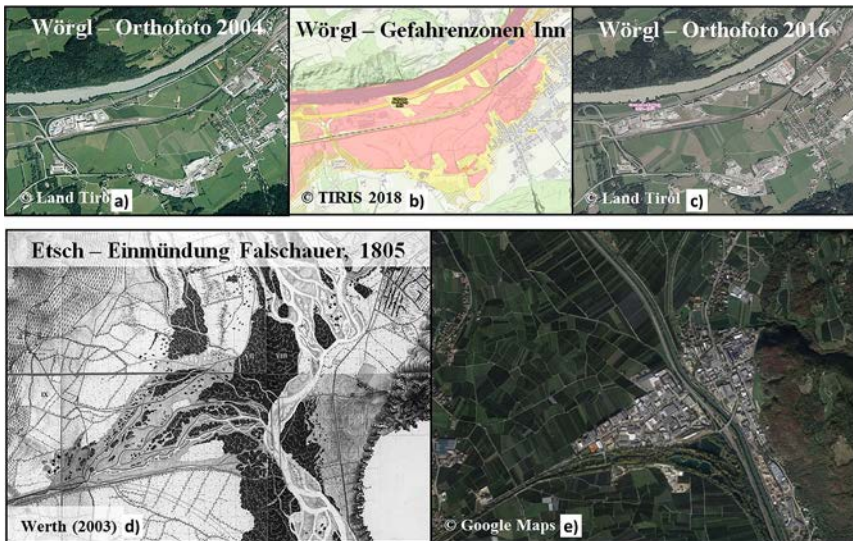


Abbildung 08: Luftbildaufnahmen und Gefahrenzonenplan der Bundeswasserbauverwaltung für Wörgl (Unterinntal, Tirol) (a, b, c); Situation der Einmündung der Falschauer in die Etsch (Südtirol) 1805 und 2016 (d, e).

Figure 08: Aerial photos and hazard map for the Inn River (a, b, c); confluence of Adige and Falschauer River in 1805 and 2016 (d, e).

Quellen: TIRIS, 2018; Werth, 2003; Google Maps, 2018

Schutzkonzepte unterschiedlicher Form sind notwendig, um den Siedlungsraum vor Naturgefahren wie extremem fluviatilen Feststoffereignissen zu schützen. Diese Schutzkonzepte werden in den kommenden Jahrzehnten umso notwendiger sein, nicht ausschließlich aufgrund möglicher klimawandelbedingter Veränderungen im Auftreten von Extremereignissen, sondern aufgrund des fortschreitenden *Bevölkerungswachstums* (Zunahme der Wohnbevölkerung Tirol im Zeitraum 2006–2016 um etwa 7 %; Amt der Tiroler Landesregierung, 2017). Aufgrund des begrenzten, großteils bereits »verbrauchten« Siedlungsraumes reduziert der Mensch kontinuierlich den Respektabstand vor den Naturgefahrenprozessen. Extreme Ereignisse bleiben nur kurz in prägender Erinnerung; mögliche zukünftige Ereignisse wurden bei der Erweiterung bestehender Siedlungsräume teilweise in Kauf genommen (Abbildung 08). Das *Gefahrenpotential fluviatiler Extremereignisse* wird in den nächsten Jahren und Jahrzehnten klimawandelbedingt möglicherweise zunehmen (Holzmann et al., 2010; BMLFUW, 2017). Das *Schadenspotential unserer Siedlungsräume*, die stetig

weiter in Gefährdungsbereiche vorrücken, hat augenscheinlich zugenommen und wird dies mit großer Wahrscheinlichkeit weiterhin tun (Statistik Austria, 2018). Gängige und *standardisierte Planungsinstrumente* wie die *Gefahrenzonenplanung* (BMLFUW, 2011a; BMNT, 2018) liefern in diesem Kontext wichtige Informationen zur Sensibilisierung der Bevölkerung und von Entscheidungsträgern gegenüber Naturgefahren. Sie stellen gegenwärtig und zukünftig zentrale Instrumente im Umgang mit extremen fluviatilen Feststoffereignissen dar.

12.8 Perspektiven für den Umgang mit fluviatilen Feststoffgefahrenprozessen

12.8.1 Operative Planungsebene

Bewährte *analytische Berechnungen* und komplexe *numerische Modelle* zur Geschiebetransportberechnung können innerhalb des Auftretensspektrums fluviatiler Verlagerungsprozesse extreme Ereignisse gleichermaßen wie jene Prozesse mit geringerer Intensität abbilden. Dennoch bestehen im Hinblick der diskutierten Unsicherheiten und möglichen zukünftigen Entwicklungen fluviatiler Feststoffgefahrenprozesse weiterhin Herausforderungen bei deren rechnerischen Abschätzung.

Fluviatile Prozesse sind in ihrer Ausprägung stark von den hydraulischen Verhältnissen im Gewässer bestimmt. Die Abflussspitze als singuläre Information charakterisiert hier in der Regel die statistische Ereignishäufigkeit. Für die verlagerten Feststoffvolumina, das Ausmaß von Sohllagenänderungen oder beispielsweise die Auslastung natürlicher und technischer Rückhaltestrukturen im Gewässer ist die vollständige Kenntnis der Abflusscharakteristik über die Ereignisdauer erforderlich. Hierzu ist zukünftig verstärkt eine detaillierte Erfassung hydrogeologischer Eigenschaften des Einzugsgebietes und eine detaillierte *hydrologische Ereignismodellierung* mit Fokus auf der Berechnung von Abflussganglinien anzustreben, in der auch mögliche Unsicherheiten in der Modellierung entsprechend dargestellt und berücksichtigt werden. Insbesondere bei der Abschätzung extremer Ereignisse sind hierbei auch die auslösenden *Bemessungsniederschläge* (Niederschlagsintensität und -dauer mit räumlich und zeitlich variabler Wirkung im Einzugsgebiet), die mit gegenwärtigem Stand der Technik mit den Jährlichkeiten entsprechend der zu berechnenden Abflussspitzen angesetzt werden (BMLFUW, 2011b), zu hinterfragen bzw. gegebenenfalls weiterzuentwickeln. Die Definition gebietsbezogener Bemessungsniederschläge sollte zukünftig auch in stärkerem Ausmaß verschiedene *Ausprägungen von Extremereignissen* berücksichtigen, etwa kurze andauernde, sehr intensive

und lokal wirkende Ereignistypen (Wildbachereignisse) und länger andauernde Niederschläge mit mäßiger Intensität und größerer Ausdehnung (Gebirgs- und Talflüsse).

Sowohl bei der Bestimmung der Sedimentverfügbarkeit im Einzugsgebiet als auch bei der Bildung extremer Ereignisszenarien können (verbesserte) *standardisierte Handlungsanleitungen* die Aufnahmen im Gelände zukünftig effizienter gestalten und belastbarere Berechnungsergebnisse für die Gefahrenzonenplanung oder die Projektierung von Schutzsystemen liefern. In diesen Handlungsanleitungen sind auch erwartbare Veränderungen im Alpenraum zu behandeln. Hier ist beispielhaft der Gletscherrückgang zu nennen, wodurch erhebliche Mengen an Lockermaterial freigelegt werden und in der Folge potentielle Geschiebeherde darstellen. Die Bildung realistischer Ereignisszenarien ist insbesondere bei der Festlegung lateraler Geschiebeeinträge durch Zubringer relevant. Diesen Prozess gilt es auf verschiedenen Skalen zu berücksichtigen, beginnend bei kleinen Bächen in Wildbacheinzugsgebieten bis hin zur Einmündung großer Wildbäche/Gebirgsflüsse in Talflüsse. Im Hinblick auf die Geschiebeabfuhrkapazität stellen Einmündungsbereiche oftmals neuralgische Stellen dar, von denen ausgehend schadenverursachende Prozesse entstehen (siehe unten). Weitere Aspekte, die in der Szenarienbildung zu berücksichtigen sind, ergeben sich aus der Kapazität und Überlastbarkeit bestehender technischer Schutzsysteme sowie verklausungsgefährdeter Gewässerquerschnitte wie Brücken.

Bestehende Berechnungsansätze sind aufgrund ihres eingeschränkten Anwendungsbereiches und dem Hintergrund, dass sie oftmals auf theoretischen Untersuchungen basieren und in der Praxis noch nicht ausreichend validiert wurden, nur eingeschränkt anwendbar. Gleichmaßen sind einige dieser Ansätze in numerischen Modellen, die im Hinblick auf die Abbildung der Topologie und der implementierten numerischen Methoden mittlerweile sehr komplex sind, noch nicht implementiert. Die Weiterentwicklung dieser Ansätze und die sukzessive Zusammenführung mit numerischen Modellen ist in diesem Sinne in den nächsten Jahren weiterhin voranzutreiben. Hierbei gilt es, den Konnex zwischen wissenschaftlicher Forschung und Ingenieurpraxis zu intensivieren und dabei bestehende *Messungen zum Sedimenttransport* in den Gewässern fortzuführen, das vorhandene Messnetz zu erweitern, hierbei auch die Methoden der Gewässervermessung und Erhebung von Prozessparametern weiterzuentwickeln sowie auftretende Ereignisse zu dokumentieren und zu rekonstruieren. Naturmessungen sind eine unverzichtbare Datenbasis für die Validierung bestehender und Entwicklung neuer Berechnungsmodelle und -methoden.

12.8.2 Strategische Planungsebene

Der Umgang mit extremen fluviatilen Feststoffereignissen fordert auch auf strategischer Planungsebene Handlungen, die möglichen zukünftigen Entwicklungen im Auftreten und der Intensität dieser Prozesse entsprechen. Einige Aspekte werden im Folgenden kurz erläutert. Gleichmaßen und im Sinne integraler Planungskonzepte anzustrebende weitere Schutzziele, beispielsweise der Erhalt oder die Wiederherstellung des Feststoffkontinuums in einer regionalen Betrachtungsskala, werden in diesem Kontext nicht thematisiert.

Technische Schutzsysteme werden hinsichtlich der einwirkenden fluviatilen Prozesse auf definierte Bemessungsereignisse dimensioniert (hydraulische Kapazität, Rückhaltevolumen, etc.; z. B. ASI, 2009a–d). Zudem ist nachzuweisen, dass auch bei Überschreiten des Bemessungsereignisses, d. h. bei Auftreten extremer Ereignisse, die Prozessverhältnisse kontrollierbar bleiben und eine Gefährdung des Versagens des Schutzsystems nicht bzw. nur mit einem gewissen Restrisiko besteht. In der Bemessung sind hierzu Sicherheitsreserven (Freibord; BMLFUW, 2016b) zu berücksichtigen und in der konstruktiven Gestaltung sind betreffend Geometrie des Schutzsystems, Baustoffwahl, etc. Regeln einzuhalten (ASI, 2009a–d). Im Falle einer Zunahme der Ereignisintensitäten und -häufigkeiten werden die Bemessungsereignisse bestehender Schutzsysteme und auch die Intensität extremer Einzelereignisse (sowie große und extreme Folgeereignisse, Kaskadeneffekte) künftig zunehmen. Bei Instandhaltungsmaßnahmen am Bestand und insbesondere in der Planung neuer Schutzsysteme sollten diese Entwicklungen bedacht werden.

Fluviatile Feststoffereignisse sind in ihrer Ausprägung durchaus sehr unterschiedlich. Insbesondere der Einfluss von Schwemmholz im Gewässer kann das lokale Gefahrenpotential des Prozesses um ein Vielfaches erhöhen sowie die Wirksamkeit von und die Einwirkungen auf Schutzbauwerke erheblich beeinflussen. Innovative und bereits bewährte Schutzsysteme weisen in diesem Kontext kombinierte Strukturen für Geschiebemanagement/Hochwasserrückhalt und den Rückhalt von Holz/die Freihaltung der Abflusssektionen auf (Brenner und Moser, 2018). Diese Konzepte sind weiterhin zu verfolgen und im Sinne deren Wirkungsweisen bei Ereignissen jenseits der Bemessungsereignisse zu untersuchen und weiterzuentwickeln. Bestehende Schutzsysteme können im Zuge von Instandhaltungsmaßnahmen nach Möglichkeit angepasst werden.

Fluviatile Verlagerungsprozesse beschränken sich in der Regel nicht auf die jeweiligen Zuständigkeitsbereiche auf Verwaltungsebene (zugeordnete Gewässer/Einzugsgebiete von Wildbachverbauung und Schutzwasserwirtschaft). Aus Sicht der Prozesse stellen Einmündungen von Wildbächen in Vorfluter besonders neuralgische Stellen dar (Gems et al., 2014b, 2015; Kammerlander et al., 2016). Massive laterale Sedimenteinträge infolge lokaler extremer Ereignisse im

Wildbach können aufgrund des geringeren Längsgefälles und der geringeren Transportkapazität des Vorfluters nicht im vollen Ausmaß weiter verfrachtet werden. Wie für den Schnannerbach gezeigt, können daraus resultierende Folgeprozesse (Anlandung infolge Sedimentüberschuss flussaufwärts in beiden Gewässern) massive Übersarungen und Schäden an der betroffenen Infrastruktur hervorrufen. Gleichermaßen können diese Ablagerungen ein Defizit an Sediment flussabwärts bedeuten, dort zur Sohleintiefung führen und/oder auch schadenbringende Übersarungen infolge Sedimentüberschuss verhindern. Die zukünftige Entwicklung von Schutzkonzepten muss in diesem Sinne noch ausgeprägter auf einer regionalen Betrachtungsskala basieren, in der alle vom Extremereignis und der Wirkung der Schutzmaßnahmen betroffenen Gewässerabschnitte miteinbezogen werden. Auch eine über die Verwaltungsgrenzen hinausgehende standardisierte Szenarienbildung (Überlagerung von Abflüssen mit entsprechenden Jährlichkeiten an Einmündungen, Annahme oder Modellierung von Ablagerungsbereichen in Einmündungen, Überlagerung von Gefahrenzonen von Zubringer und Vorfluter, etc.) ist hier (weiterhin) zu verfolgen und zu verbessern.

Letztlich kann für den zukünftigen Umgang mit extremen fluvialen Feststoffereignissen nicht nur eine noch bessere nationale Vernetzung auf Verwaltungsebene (Szenarienbildung, Auswirkungsbetrachtung, Entwicklung von Schutzkonzepten mit regionaler Wirkung, etc.) gewinnbringend sein. Auch der praxisorientierte und wissenschaftliche Austausch im internationalen Umfeld (Alpenraum) bei entsprechenden Fragestellungen (Definition Bemessungsereignis und extremes Ereignis, innovative Konzepte für Schutzbauwerke mit kombinierter Wirkungsweise, etc.) ist aufrecht zu erhalten bzw. zu intensivieren.

Literatur

- Amt der Tiroler Landesregierung, 2017. Demografische Daten Tirol 2016. Innsbruck, 126 S. <https://www.tirol.gv.at/statistik-budget/statistik/publikationen> [15.06.2018].
- ASI, 2009a. ONR 24800: 2009-02-15. Schutzbauwerke der Wildbachverbauung. Begriffsbestimmungen und Klassifizierung. Wien.
- ASI, 2009b. ONR 24801: 2013-08-15. Schutzbauwerke der Wildbachverbauung. Statische und dynamische Einwirkungen. Wien, 32 S.
- ASI, 2009c. ONR 24802: 2011-01-01. Schutzbauwerke der Wildbachverbauung. Projektierung, Bemessung und konstruktive Durchbildung. Wien, 96 S.
- ASI, 2009d. ONR 24803: 2008-02-01. Schutzbauwerke der Wildbachverbauung. Betrieb, Überwachung und Instandhaltung. Wien, 40 S.
- Aulitzky, H., 1986. Die naturräumliche Verteilung der Wildbachtypen und der Erosion in Österreich. *Allgemeine Forstzeitung*, 96(12), S. 33–31.

- Ban, N., Schmidli, J., Schaer, C., 2015. Heavy precipitation in a changing climate: Does short-term summer precipitation increase faster? *Geophysical Research Letters*, 42(4), S. 1165–1172. DOI: 10.1002/2014GL062588.
- Bergmeister, K., Suda, J., Hübl, J., Rudolf-Miklau, F., 2009. *Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele*. Ernst & Sohn, Berlin, 246 S.
- BMLFUW, 2004. *Analyse der Hochwasserereignisse vom August 2002. Flood Risk. Synthesebericht*, 201 S. http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/klima/klima_projekte/floodrisk1 [15.06.2018].
- BMLFUW, 2006. *Hochwasser 2005. Ereignisdokumentation. Teilbericht des Hydrografischen Dienstes*, 30 S. https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserkreislauf/hydrograph_charakt_extrema/Hochwasser-Aug2005.html [15.06.2018].
- BMLFUW, 2009. *Flood Risk II, Vertiefung und Vernetzung zukunftsweisender Umsetzungsstrategien zum integrierten Hochwassermanagement. Synthesebericht*, 274 S. http://www.umweltbundesamt.at/umweltsituation/klima/klimaprojekte/floodrisk/flood_risk2 [15.06.2018].
- BMLFUW, 2011a. *die.wildbach – Richtlinie für die Gefahrenzonenplanung*. BMLFUW-LE.3.3.3/0185-IV/5/2007. Fassung 02, 58 S. <https://www.bmnt.gv.at/forst/wildbach-lawinenverbauung/richtliniensammlung/GZP.html> [15.06.2018].
- BMLFUW, 2011b. *Leitfaden: Verfahren zur Abschätzung von Hochwasserkennwerten*, 113 S. <https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserkreislauf/HQkennwerteLF.html> [15.06.2018].
- BMLFUW, 2015a. *Technische Richtlinie für die Wildbach- und Lawinenverbauung*, 48 S. <https://www.bmnt.gv.at/forst/wildbach-lawinenverbauung/richtliniensammlung/Tech2015.html> [15.06.2018].
- BMLFUW, 2015b. *Geschiebemessung an der Rofenache. Bericht 2008-2014*, 60 S. <https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserkreislauf/geschiebemessung.html> [15.06.2018].
- BMLFUW, 2015c. *Geschiebemessung an Drau und Isel. Bericht 2007-2012*, 110 S. <https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/wasserkreislauf/geschiebemessung.html> [15.06.2018].
- BMLFUW, 2016a. *Technische Richtlinien für die Bundeswasserbauverwaltung RIWA-T*, 60 S. https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/foerderungen/foerd_hochwasserschutz/trl_neu-ab-2016.html [15.06.2018].
- BMLFUW, 2016b. *Leitfaden Freibord: Leitfaden zur einheitlichen Anwendung und Interpretation des Freibord-Begriffes im Richtlinienwerk der Bundeswasserbauverwaltung*, 26 S. https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/foerderungen/foerd_hochwasserschutz/leitfaden_freibord.html [15.06.2018].
- BMLFUW, 2017. *Klimawandel in der Wasserwirtschaft. Schwerpunkt Hochwasser, Dürre und Trockenheit. Synthesebericht*, 101 S. https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/foerderungen/trinkwasser_abwasser/aktuelle_projekte/klimawandel_wasserwirtschaft.html [15.06.2018].
- BMLFUW, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BFW), Institut für Alpine Naturgefahren (BOKU Wien), 2006. *Hochwasser 2005 – Ereignisdokumentation. Teilbericht der Wildbach- und Lawinenverbauung*, 142 S.

- Brenner, F., Moser, M., 2018. Konstruktionstypen zur Feststoffbewirtschaftung; Erfahrungen und Beispiele aus der Praxis der Sektion Salzburg. Wildbach- und Lawinverbau, 82(181).
- Bundeministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, 2018. Technische Richtlinie für die Gefahrenzonenplanungen gem. §42a WRG, Fassung Jänner 2018. GZ: UW.3.3.3/0023-IV/6/2016, 44 S. https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/foerderungen/foerd_hochwasserschutz/trl_gzp_42a_wrg.html [15.06.2018].
- Chiari, M., 2008. Numerical Modelling of Bedload Transport in Torrents and Mountain Streams. SETRAC. Dissertation, Institut für Alpine Naturgefahren, BOKU Wien, 212 S.
- Chiari, M., Friedl, K., Rickenmann, D., 2009. A one-dimensional bedload transport model for steep slopes. Journal of Hydraulic Research, 48(2), S. 152–160. http://www.bedload.at/index.php?option=com_content&view=article&id=65&Itemid=97&lang=de [15.06.2018].
- Climate Change Centre Austria, 2015. ÖKS1: Klimaszenarien für Österreich, Daten – Methoden – Klimaanalyse. Endbericht, 353 S. https://www.bmnt.gv.at/umwelt/klimaschutz/klimapolitik_national/anpassungsstrategie/klimaszenarien.html [15.06.2018].
- Einstein, H.A., 1950. The bedload function for sediment transportation in open channel flows. United States Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Technical Bulletin, 1026, 71 S.
- Europäische Union, 2007. Amtsblatt der Europäischen Union. Richtlinie 2007/60 EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. L 288/27–L 288/34, 8 S.
- Formayer, H., Fritz, A., 2017. Temperature dependency of hourly precipitation intensities – surface versus cloud layer temperature. International Journal of Climatology, 37(1) S. 1–10.
- Gems, B., Sturm, M., Aufleger, M., Kammerlander, J., Vogl, A., Weber, C., 2015. Einmündung von Wildbächen in Vorfluter. Gefahrenprozesse und Aspekte der großmaßstäblichen physikalischen Modellierung. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, 160(1/12), S. 119–124.
- Gems, B., Sturm, M., Aufleger, M., Neuner, J., 2014a. Reconstruction of event-related bedload transport processes in alpine catchments-application of TomSed on a large spatial scale. River Flow-Proceedings, S. 941–949.
- Gems, B., Sturm, M., Vogl, A., Weber, C., Aufleger, M., 2014b. Analysis of damage causing hazard processes on a torrent fan-scale model tests of the Schnannerbach Torrent channel and its entry to the receiving water. Interpraevent, 1, S. 170–178.
- Gertsch, E., 2009. Geschiebelieferung alpiner Wildbachsysteme bei Grossereignissen. Ereignisanalysen und Entwicklung eines Abschätzverfahrens. Dissertation, Geographisches Institut der Universität Bern, 349 S.
- Google Maps, 2018. Google Maps. <https://www.google.com/maps> [30.06.2018].
- Habersack, H., Badura, H., Gabriel, H., Hengl, M., Huber, B., Jäger, G., Knoblauch, H., Krouzicky, N., Lalk, P., Mandl, C., Moser, M., Reindl, R., Rickenmann, D., Sattler, S., Schöberl, F., Tritthart, M., 2011. Fließgewässermodellierung: Feststofftransport und Gewässermorphologie. ÖWAV-Arbeitsbehelf, 10, 259 S. https://www.bmnt.gv.at/wasser/wasser-oesterreich/foerderungen/foerd_hochwasserschutz/feststoff.html [15.06.2018].

- Habersack, H., Wagner, B., Schoder, A., Hauer, C., 2013. Die Bedeutung von Feststoffhaushalt und Sedimentdurchgängigkeit für eine nachhaltige Nutzung der Wasserkraft. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 65, S. 354–361.
- Hagen, K., Ganahl, E., Hübl, J. 2007. Analysis and Evaluation of Commonly Used Empirical Approaches for Flood Assessment in Torrents. BFW-Berichte 137. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald Naturgefahren und Landschaft, Wien, 112 S.
- Haimann, M., Aigner, J., Gmeiner, P., Lalk, P., Habersack, H., 2018. Hochwasser und Feststoffe: vom Sedimenttransport zum flussmorphologischen Raumbedarf. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 70, S. 78–89.
- Hampel, R., 1980. Geschieberegner für Gefahrenzonenpläne in Wildbachgebieten. *Interpraevent*, 3, S. 83–91.
- Hänger, M., 1979. Geschiebetransport in Steilgerinnen: Pilotstudie für feste und glatte Sohle und Gefälle von 3 bis 30 %. VAW Proceedings 38. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 112 S.
- Holzmann, H., Lehmann, Th., Formayer, H., Haas, P., 2010. Auswirkungen möglicher Klimaänderungen auf Hochwasser und Wasserhaushaltskomponenten ausgewählter Einzugsgebiete in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 56(1/2), S. 7–14.
- Hübl, H., 2018. Schutzstrategien und Funktionen von Schutzbauwerken. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 181, S. 34–44.
- Hunziker, R.P., 1995. Fraktionsweiser Geschiebetransport. VAW Proceedings 138. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 207 S.
- KAGIS, 2018. KAGIS-Geoinformation Land Kärnten. <https://gis.ktn.gv.at> [30.06.2018].
- Kammerlander, J., Gems, B., Sturm, M., Aufleger, M., 2016. Analyse hochwasserbezogener Prozesse am Zusammenfluss steiler Zubringer und deren Vorfluter. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 177, S. 172–181.
- Kettl, W., 1984. Vom Verbauungsziel zur Bautypenentwicklung: Wildbachverbauung im Umbruch. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 48(Sonderheft), S. 61–98.
- Kreisler, A., Aigner, J., Liedermann, M.G., Habersack, H., 2014. Geschiebemessung in Österreich. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 66, S. 297–305. DOI: 10.1007/s00506-014-0178-7.
- Kronfellner-Kraus, G., 1984. Extreme Feststofffrachten und Grabenbildungen von Wildbächen. *Interpraevent*, 2, S. 109–118.
- Länger, E., 2009. Die Anfänge der Wildbach- und Lawinenverbauung in Österreich. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 163, S. 166–177.
- Meyer-Peter, E., Müller, R., 1949. Eine Formel zur Berechnung des Geschiebetriebs. *Schweizerische Bauzeitung*, 67(3), S. 29–32.
- Montgomery, D.R., Buffington, J.M., 1997. Channel-reach morphology in mountain drainage basins. *Geological Society of America Bulletin*, 109(5), S. 596–611. DOI: 10.1130/0016-7606(1997)109<0596:CRMIMD>2.3.CO;2.
- Nitsche, M., Rickenmann, D., Turowski, J.M., Badoux, A., Kirchner, J.W., 2011. Evaluation of bedload transport predictions using flow resistance equations to account for macro-roughness in steep mountain streams. *Water Resources Research*, 47, W08513, 21 S. DOI: 10.1029/2011WR010645.

- Nujic, M., 2012. Hydro_GS-2D-Arbeitsblatt Stofftransport. https://www.hydrotec.de/software/hydro-as-2d/hydro_ft-2d-transportprozesse [15.06.2018].
- Palt, S.M., 2001. Sedimenttransportprozesse im Himalaya-Karakorum und ihre Bedeutung für Wasserkraftanlagen. Dissertation, Institut für Wasser und Gewässerentwicklung, Universität Karlsruhe, 312 S.
- Parker, G., 1990. Surface-based bedload transport relation for gravel rivers. *Journal of Hydraulic Research*, 28(4), S. 417–436.
- Rickenmann, D., 1990. Bedload transport capacity of slurry flows at steep slopes. VAW Proceedings 103. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 249 S.
- Rickenmann, D., 2005. Geschiebetransport in steilen Gefällen. VAW Proceedings 174. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, S. 107–119.
- Rickenmann, D., 2014. Methoden der quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen. WSL Bericht 9, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, 108 S.
- Rickenmann, D., Hunzinger, L., Koschni, A., 2008. Flood Events and Sediment Transport during the Rain-Storm of August 2005 in Switzerland. *Interpraevent*, S. 465–476.
- Scheuner, T., Schwab, S., Bättig, M., Weg, B., 2015. Strategien zur Geschiebemanagement im Zusammenhang mit Klimawandel. Bericht Nr. 1411 192.1, 67 S. <https://www.bafu.admin.ch/bafu/de/home/themen/klima/fachinformationen/anpassung-an-den-klimawandel/pilotprogramm-anpassung-an-den-klimawandel.html> [15.06.2018].
- Smart, G.M., Jäggi, M.N.R., 1983. Sediment Transport on Steep Slopes. VAW Proceedings 64. Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 191 S.
- Statistik Austria, 2018: Bevölkerungs- und Haushaltsprognose 2017. http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/index.html [15.06.2018].
- Stiny, J., 1931. Die geologischen Grundlagen der Verbauung der Geschiebeherde in Gewässern. Springer Verlag, Wien, 122 S. DOI: 10.1007/978-3-7091-9853-7.
- TIRIS, 2018. tiris – Tiroler Rauminformationssystem. <https://www.tirol.gv.at/statistik-budget/tiris/> [30.06.2018].
- US Army Corps of Engineers, 2016. HEC-RAS River Analysis System. User's Manual. Version 5.0, 960 S. <http://www.hec.usace.army.mil/software/hec-ras/downloads.aspx> [15.06.2018].
- Vetsch, D., Siviglia, A., Caponi, F., Ehrbar, D., Gerke, E., Kammerer, S., Koch, A., Peter, S., Vanzo, D., Vonwiller, L., Facchini, M., Gerber, M., Volz, C., Farshi, D., Mueller, R., Rousselot, P., Veprek, R., Faeh, R., 2018. System Manuals of BASEMENT. Version 2.8. Laboratory of Hydraulics, Glaciology and Hydrology (VAW), Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, 160 S. <http://www.basement.ethz.ch> [15.06.2018].
- Werth, K., 2003. Geschichte der Etsch zwischen Meran und San Michele. Flussregulierung, Trockenlegung der Möser Hochwasser. Tappeiner AG, Lana, 384 S.
- Wiberg, P.L., Smith, J.D., 1989. Model for calculating bed load transport of sediment. *Journal of hydraulic engineering*, 115(1), S. 101–123.
- Wikimedia Commons, 2005. Hochwasserkundl. <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/24/Hochwasserkundl.jpg> [25.04.2019].
- Wilcock, P.R., Crowe, J.C., 2003. A surface – based transport model for sand and gravel. *Journal of hydraulic engineering*, 29(2), S. 120–128.

Wonka, E., 2008: Neuabgrenzung des Dauersiedlungsraumes. Statistische Nachrichten 05.
http://www.statistik.at/web_de/klassifikationen/regionale_gliederungen/dauersiedlungsraum/index.html [15.06.2018].

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

13 Über das Erwartete hinaus – der Umgang mit Überlastfällen

Stefan Schneiderbauer, Markus Aufleger, Sönke Hartmann,
Andreas Rimböck und Hannah Berger*

Zusammenfassung

Viele Schadensereignisse in Österreich und dem Alpenraum sind auf Extremereignisse und daraus resultierende Überlastfälle zurückzuführen. Fachleute für Naturgefahren und deren Risiken im Alpenraum haben ein ähnliches Verständnis davon, wann Ereignisse als Überlastfälle angesehen werden sollten. Darüber hinaus existiert jedoch keine allgemeingültige Definition des Begriffs »Überlastfall«.

Die im Kontext von Extremereignissen erarbeiteten Schutzziele und Bemessungsgrößen unterscheiden sich je nach Gefahrenprozess aber auch je nach Betrachtungsebene (z. B. gesamtes Flusseinzugsgebiet versus einzelne Schutzbauwerke). Unabhängig von der Art des Schutzziels ist die Festlegung bestimmter Schutzzielgrößen aus technischer Sicht eine Herausforderung und immer mit gewissen Unsicherheiten verbunden. Jüngere Entwicklungen verschärfen die Dringlichkeit, Lösungsansätze für Überlastfälle bei extremen Ereignissen zu entwickeln und umzusetzen. Dazu zählen zum einen klimatische Veränderungen und deren Auswirkungen auf die Intensität und Häufigkeit der unterschiedlichen Gefahrenprozesse. Zum anderen trägt die wachsende Konzentration von Wohnraum, wirtschaftlichen Aktivitäten und Infrastruktureinrichtungen in zentralen und häufig risikooxponierten Räumen zu einem Anstieg der Schadensanfälligkeit bei.

Da der Umgang mit Überlastfällen eng mit der Definition von Schutzzielen und den zugrundeliegenden Bemessungskriterien verknüpft ist, sollte deren Management immer auch einen Diskurs beinhalten über die gesellschaftliche Akzeptanz solcher Ziele und die verbleibenden Risiken sowie über eine gerechte Verteilung der Kosten, die mit einer Risikoreduktion verbunden sind. Handlungsempfehlungen betreffen unter anderem den weiteren Ausbau des integralen Risikomanagements, die Datenakquise mit modernen Beobachtungsverfahren in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung, die Kombination

* Stefan Schneiderbauer, Eurac Research, Institut für Erdbeobachtung & Universität der Vereinten Nationen, Institut für Umwelt und menschliche Sicherheit, GLOMOS Programm, stefan.schneiderbauer@eurac.edu.

Markus Aufleger, Universität Innsbruck, Institut für Infrastruktur, Arbeitsbereich für Wasserbau, markus.aufleger@uibk.ac.at.

Sönke Hartmann, Stadt Plön, Stabstelle Klimaschutz, Soenke.hartmann@ploen.de.

Andreas Rimböck, Wasserwirtschaftsamt Donauwörth, andreas.rimboeck@wwa-don.bayern.de (ehem. Bayer. Landesamt für Umwelt).

Hannah Berger, Bayerisches Landesamt für Umwelt, Referat 61: Hochwasserschutz und alpine Naturgefahren, hafebe@gmx.de.

von technischen und naturbasierten Schutzmaßnahmen sowie deren ökonomische Bewertung und nicht zuletzt die Risikokommunikation zwischen Fachleuten und mit der allgemeinen Öffentlichkeit.

Abstract

Many damaging events in Austria and the Alpine region are triggered by extreme events and resulting overload cases. Experts for natural hazards and their risks in the Alpine region have a similar understanding of when events should be regarded as overload events. Beyond that, however, there is no universal definition of the term »overload«.

The protection goals and calculation parameters developed in the context of extreme events differ depending on the hazard process but also on the level of consideration (e.g. entire river catchment area versus individual protection structures). Irrespective of the type of protection goal, the determination of certain protection goal values is technically challenging and always associated with uncertainties. Recent developments underline the urgency of developing and implementing solutions for overload cases during extreme events. These include climatic changes and their effects on the intensity and frequency of the various hazard processes. In addition, the growing concentration of living space, economic activities and infrastructure facilities in central and often risk-exposed areas contributes to an increase in susceptibility to damage.

Since dealing with overload cases is closely linked to the definition of protection goals and the underlying assessment criteria, their management should always include a discourse on the social acceptance of such goals and the remaining risks as well as on a fair distribution of the costs associated with risk reduction.

Recommendations for action include the further expansion of integrated risk management, the acquisition of data with modern observation methods in high temporal and spatial resolution, the combination of technical and nature-based protective measures as well as their economic evaluation, and last but not least risk communication between experts and with the general public.

Kernaussagen

- Überlastfälle stellen Ereignisse dar, die aufgrund ihrer Intensität die Leistungsfähigkeit bestehender Schutzsysteme bzw. die Bemessungsgrenzen von Schutzbauwerken überschreiten und somit zu Schäden und Verlusten führen können.
- Schutzziele stellen einen wichtigen Eckpfeiler im Umgang mit Naturgefahren und dem dazu erforderlichen Risikomanagement dar. Die Festlegung von Schutzzielen erfordert eine Beschäftigung mit der gesellschaftlichen Akzeptanz solcher Ziele und den verbleibenden Risiken sowie mit einer gerechten Verteilung der Kosten, die mit einer Risikoreduktion verbunden sind.
- Jüngere Entwicklungen verschärfen die Dringlichkeit, Lösungsansätze für Überlastfälle aufgrund von Extremereignissen zu entwickeln und umzusetzen. Zu diesen Entwicklungen zählen Unsicherheiten, die mit den klimatischen Veränderungen und deren Auswirkungen auf die Intensität und Häufigkeit der unterschiedlichen Gefahrenprozesse verbunden sind sowie soziodemografische Prozessen der letzten Jahre, die mit einer Konzentration von Personen, Gütern, Verkehr und Infrastrukturen auf häufig risikooxponierten Flächen einhergehen.

Key Points

- Overload cases are events which, due to their intensity, exceed the capacity of existing protection systems or assessment limits of protective structures and can thus lead to damage and losses.
- Protection goals represent an important cornerstone in dealing with natural hazards and the necessary risk management. The definition of protection goals requires consideration of the societal acceptance of such goals and the residual risks as well as a fair distribution of the costs associated with risk reduction.
- Recent developments underline the urgency of developing and implementing solutions for cases of overload due to extreme events. These developments include uncertainties associated with climatic changes and their effects on the intensity and frequency of the various hazard processes as well as sociodemographic processes of recent years that are associated with a concentration of people, goods, transport and infrastructures in often risk-exposed areas.

13.1 Einleitung

Naturgefahren stellen eine große Herausforderung für Politiker und Entscheidungsträger dar, die für den Schutz der Bevölkerung, der Infrastruktur und des Siedlungsraumes verantwortlich sind. Der Umgang mit solchen Naturgefahren erfordert ein zielgerichtetes Management, das in der Regel anstrebt, sich auf Ereignisse einer bestimmten Intensität so vorzubereiten, dass es zu keinen negativen Auswirkungen kommt. Extreme Ereignisse, deren Ausmaß dementsprechend festgelegte Schutzziele bzw. Kriterien der Bemessung übersteigt, werden als Überlastfälle bezeichnet. Sie werden zu den verbleibenden Risiken gezählt und haben häufig ein hohes Schadenspotenzial.

Obwohl in Österreich sowie im gesamten Alpenraum in der Vergangenheit erhebliche finanzielle Ressourcen investiert wurden, um bestehende Risiken zu reduzieren, verursachen Prozesse wie Rutschungen, Steinschläge, Muren, Hochwasser und Lawinen weiterhin regelmäßig große Schäden. Viele Schadensereignisse sind auf Extremereignisse und daraus resultierende Überlastfälle zurückzuführen, die in einem komplexen Ursache-Wirkungsgefüge entstehen. Je größer das Verständnis der Wirkungszusammenhänge ist, die zu Überlastfällen führen, umso gezielter können Strategien zum Umgang mit zukünftigen Ereignissen entwickelt werden. Die Analyse solcher Überlastfälle erfordert zum einen die Betrachtung physikalischer Prozesse zur Erklärung der Intensität des Gefahrenereignisses und zur Planung von baulichen Maßnahmen, um diese Prozesse zu kontrollieren. Zum anderen müssen gesellschaftliche Rahmenbedingungen (Regularien, raumplanerische Maßnahmen, ökonomische Aktivitäten, soziale Prozesse etc.) untersucht werden, die sowohl das Schadenspotenzial bestimmen als auch rückkoppelnd die Entstehung von Gefahren beeinflussen

(z. B. das Ausmaß und die Qualität von Schutzwäldern). Bei der Betrachtung von Überlastfällen müssen also unterschiedliche Blickwinkel und Maßstabebenen berücksichtigt und miteinander verknüpft werden.

Da der Umgang mit Überlastfällen eng mit der Definition von Schutzziele und Bemessungskriterien verknüpft ist, beinhaltet deren Management immer auch eine Beschäftigung mit der gesellschaftlichen Akzeptanz solcher Ziele und den verbleibenden Risiken sowie mit einer gerechten Verteilung der Kosten, die mit einer Risikoreduktion verbunden sind. Entscheidungen, die in diesem Rahmen getroffen werden, bedürfen der Partizipation aller betroffenen Akteure und Akteursgruppen, um eine breite Unterstützung in der Bevölkerung zu erfahren. Der Prozess, der zu solchen Entscheidungen führt und die Basis für einen optimalen Umgang von Überlastfällen und verbleibenden Risiken darstellt, ist daher auch immer beeinflusst von existierenden Risiko-Governance-Strukturen.

Der vorliegende Beitrag zielt darauf ab, den Umgang mit Überlastfällen infolge von Naturereignissen im Alpenraum allgemein und in Österreich im Speziellen darzulegen. Diese Thematik wird aus dem Blickwinkel eines integralen Risikomanagements beleuchtet, dessen Raumbezug ein Einzugsgebiet oder eine gesamte Region darstellt. Ergänzt wird diese Betrachtungsebene durch einen technischen, vorwiegend wasserbaulichen Ansatz, der den Überlastfall in Bezug auf einzelne Schutzbauwerke erläutert. Obwohl dieser Beitrag prinzipiell alle alpinen Naturgefahrenprozesse behandelt, liegt sein Fokus auf der Gefahr von Hochwasser und Überflutung, deren Management bereits seit längerer Zeit mit dem Konzept des Überlastfalls verknüpft ist.

Als Einleitung in die Thematik beschreibt der Artikel zu Beginn kurz die Entwicklung des Gefahren- und Risikomanagements im Alpenraum, bevor die Terminologie und Definitionen im Kontext von Überlastfällen diskutiert werden. Darauf aufbauend werden die Zusammenhänge von Gesamtrisiko, verbleibenden Risiken sowie Überlastfällen dargelegt, die Bedeutung von Schutzziele aufgezeigt und der Handlungsspielraum beim Umgang mit Extremereignissen anhand eines vereinfachten Konzeptes erläutert. Im Folgenden wird eine Beschreibung des momentanen Umgangs mit Überlastfällen in den Alpen und Österreich gegeben. Daraus werden einige Herausforderungen im Umgang mit Extremereignissen abgeleitet und Perspektiven für Handlungsoptionen diskutiert. Der Artikel schließt mit Schlussbetrachtungen, die Denkanstöße zum Umgang mit Überlastfällen aus einer gesamtgesellschaftlichen Perspektive liefern sollen.

Der Inhalt dieses Artikels beruht zu großen Teilen auf den Ergebnissen der Studie, »Risiko-Governance im Umgang mit dem Überlastfall: Status Quo und mögliche Verbesserungen im EUSALP-Gebiet«, die im Zeitraum März 2017 bis März 2018 von Eurac Research durchgeführt wurde. Beauftragt wurde die Studie

vom Bayerischen Staatsministeriums für Umwelt und Verbraucherschutz (STMUV) im Rahmen des Interreg Alpine Space Projekts »AlpGov« (Implementing Alpine Governance Mechanisms of the European Strategy for the Alpine Region – Umsetzung von Steuerungsmechanismen im Rahmen der EU-Strategie für den Alpenraum). Die im Rahmen dieser Studie erstellten Berichte sind über die folgende Webseite zugänglich: <https://www.alpine-region.eu/results/beyond-expected-dealing-cases-overload-and-residual-risk-natural-hazards-alpine-region> (Schneiderbauer et al., 2018a,b). Die erzielten Studienergebnisse beruhen auf einer umfassenden Literaturanalyse, der Auswertung eines Fragebogens für Experten im Gebiet Risikomanagement und Risiko Governance in den Alpen sowie vertiefenden Gesprächen in Form von Leitfadeninterviews mit den wichtigsten Interessenträgern und Fachleuten.

Naturgefahrenmanagement in der Alpenregion – gestern und heute

Die Bevölkerung im Alpenraum lebt seit jeher mit Naturrisiken und hat Strategien entwickelt, um sich vor ihren Folgen zu schützen und Schäden zu vermeiden. Gefährliche Prozesse stellen insbesondere hydrogeologische Ereignisse und gravitative Massenbewegungen wie Flusshochwasser, Wildbachgefahren, Felsstürze, Lawinen und Rutschungen dar. Zu Ende des 19. Jahrhunderts begann die Entwicklung eines auf gesetzlichen Regelungen basierten Gefahrenmanagements, das sich vorwiegend auf bautechnische Maßnahmen zur Risikominderung stützte (Holub und Fuchs, 2009). Im Laufe der zweiten Hälfte des 20. Jahrhunderts wurden diese strukturellen Schutzbauten durch raumplanerische Maßnahmen ergänzt, um die Exposition der Bevölkerung gegenüber Naturgefahren zu verringern. Im gleichen Zeitraum wuchs das Schadenspotential im Alpenraum durch eine zunehmende Konzentration von Risikowerten auf den begrenzten Flächen, die in der Region als Lebensraum zur Verfügung stehen. Damit erhöhten sich auch stetig die finanziellen Ressourcen, die für den Schutz dieser Werte und für die Erhaltung der errichteten Schutzbauten aufgebracht werden mussten. Der Preis für einen solchen sich beständig vertuernden Schutz war und ist gesellschaftlich nicht mehr tragbar und erforderte die Entwicklung neuer Strategien im Naturgefahrenmanagement.

Als Folge daraus hat das Bestreben, Gefahren möglichst umfassend zu eliminieren, der Philosophie Platz gemacht, »mit gewissen Risiken zu leben« und ein bestimmtes Maß von Restrisiko zu akzeptieren (Camenzind und Loat, 2014). Vor diesem Hintergrund wurde die reine Gefahrenabwehr – in Bezug auf Naturereignisse – im Laufe des 21. Jahrhundert alpenweit schrittweise erweitert hin zu einem integralen Risikomanagement (IRM) mit dem Ziel, Schäden an Personen und Sachwerten nachhaltig, zu angemessenen Kosten und mit der Beteiligung aller Akteure zu minimieren (PLANAT, 2004; BMLFUW, 2015a). Kernaufgaben des IRM bestehen darin, relevante Faktoren laufend zu beob-

achten, bestehende Risiken periodisch zu erfassen und diese hinsichtlich ihrer Akzeptanz zu bewerten. Das Konzept des IRM folgt darüber hinaus einer dynamischen Vorgehensweise und sollte bei der Umsetzung auch jüngste Entwicklungen bei Naturgefahren berücksichtigen wie sie z. B. durch Änderungen der klimatischen Gegebenheiten in den letzten Jahren entstanden sein können.

Im Kontext eines IRM werden Ansätze zum Umgang mit Überlastfällen im Alpenraum in dem Bewusstsein entwickelt, dass es eine absolute Sicherheit vor Naturgefahren nie geben wird und ein gewisses Restrisiko immer bestehen bleibt (Rimböck et al., 2012). In Bezug auf Überlastfälle bedeutet dies, dass solche Fälle weder ausgeschlossen noch vollständig kontrolliert werden können und man sich auf diese Ereignisse sowohl in technischer wie auch in gesellschaftlicher Hinsicht so gut wie möglich vorbereiten muss.

13.2 Terminologie

Fachleute für Naturgefahren und deren Risiken im Alpenraum haben ein ähnliches Verständnis davon, wann Ereignisse als Überlastfälle angesehen werden sollten. Darüber hinaus existiert jedoch keine allgemein gültige Definition des Begriffs »Überlastfall«, die in allen Alpenländern und ihren Regionen oder in den verschiedenen Sprachen akzeptiert wäre und verwendet würde (Schneiderbauer et al., 2018b).

Im Großen und Ganzen besteht bei Fachleuten aus den Alpen ein Konsens darin, dass Überlastfälle Ereignisse darstellen, die aufgrund ihrer Intensität die Leistungsfähigkeit bestehender Schutzsysteme (Schutzfunktion) bzw. die Bemessungsgrenzen von Schutzbauwerken überschreiten und somit zu Schäden und Verlusten führen können. Bei technischen Schutzmaßnahmen wird auch häufig von Ereignissen gesprochen, die das *Dimensionierungsszenario* (bzgl. Standsicherheit) übertreffen. Zusätzlich werden Überlastfälle generell auch als Ereignisse mit *geringer* Eintrittswahrscheinlichkeit charakterisiert, die gleichzeitig ein *hohes* Potenzial aufweisen, negative Auswirkungen zu verursachen.

In mehreren Publikationen, technischen Dokumenten oder Richtlinien – insbesondere im deutschsprachigen Alpenraum – wird das Ereignis eines Überlastfalls genauer spezifiziert. Diese Erläuterungen beziehen sich in den meisten Fällen allerdings ausschließlich auf Hochwasser- bzw. Überflutungsgefahren. Von den österreichischen Fachleuten wurde in der oben erwähnten Studie zu Risiko-Governance im Umgang mit Überlastfällen als Quelle für eine solche bestehende Spezifizierung die technischen Richtlinien der Bundeswasserbauverwaltung (RIWA-T) genannt, in der unter Überlastfall die Abflüsse über einem Bemessungsereignis und die daraus folgenden Auswirkungen verstanden wird (BMLFUW, 2015b; Schneiderbauer et al., 2018a). Eine der wenigen Defi-

nitionen des Begriffs Überlastfall, die sich auf Naturgefahren allgemein bezieht, stammt von der Schweizerischen Plattform für Naturgefahren (PLANAT), die einen solchen Fall als Naturereignis spezifiziert, das »so heftig eintritt, dass die getroffene Schutzmassnahme nicht ausreicht« (PLANAT, 2012, S. 5).

Einem einheitlichen allgemeinen Verständnis dessen, was in der Wissenschaft und Praxis im Alpenraum unter einem Überlastfall verstanden wird, stehen Unterschiede im Detail der bestehenden Definitionen gegenüber. Zur Beschreibung der Schlüsselbegriffe »Schutzmaßnahme« oder »Schutzziel« werden alleine im deutschen Sprachraum vielfältige Termini wie Schutzkapazität, Schutzwirkung, Bemessungsereignis, Abfuhrkapazität, Restrisiko, Dimensionierungsszenario und Dimensionierungswassermenge herangezogen. Auch bei der Nennung möglicher Schwellenwerte zur Abgrenzung von Überlastfällen, die zumeist nur für Hochwassergefahren angegeben werden, gibt es bedeutende Unterschiede. So wird zum Beispiel in einer Broschüre für den österreichischen Hochwasserrisikomanagementplan der Überlastfall dem Restrisiko ab einem Ereignis $> HQ_{100}$ zugeordnet (BMLFUW, 2015a, S. 7), also einem Hochwasser, das statistisch alle 100 Jahre erreicht oder überschritten wird. In den technischen Richtlinien für die Bundeswasserbauverwaltung RIWA-T findet sich hingegen der Hinweis auf den Grenzwert HQ_{300} (BMLFUW, 2015b, S. 34), also einem Hochwasser, das statistisch alle 300 Jahre erreicht oder überschritten wird. Schwellenwerte in dieser Höhe werden im IRM verwendet und beziehen sich dann vorwiegend auf größere Areale wie z. B. Flusseinzugsgebiete.

Diese systemorientierten Herangehensweisen sind von den rein technischen Ansätzen zur Beschreibung von Überlastfällen zu unterscheiden:

Aus der Perspektive *des integralen Risikomanagements* bedeutet ein Überlastfall, dass Schutzziele, welche im Rahmen eines Schutzkonzeptes definiert wurden und mit Hilfe eines Systems an baulichen sowie nicht-baulichen Schutzmaßnahmen angestrebt wurden, aufgrund eines intensiven Ereignisses überschritten werden (vgl. Kapitel 13.3). In einem *technischen, ingenieurbaulichen Verständnis* bezieht sich ein Überlastfall meistens auf den Schutz durch eine einzelne bauliche Maßnahme, deren statische Bemessungsgrößen in ihren Jährlichkeiten weit über den üblichen Schutzzielen im Rahmen des IRM liegen. Für solche Hochwasserschutzmaßnahmen ist zu unterscheiden zwischen der Betrachtung der *Schutzfunktion* auf der einen und der Gewährleistung der *Bauwerks- bzw. Standsicherheit* auf der anderen Seite (siehe Abbildung 01).

Die (*Hochwasser-*) *Schutzfunktion* beschreibt im Allgemeinen eine schützende Wirkung des Bauwerks auf die Unterlieger infolge einer planmäßigen Wirkung (z. B. die Dämpfung einer Hochwasserwelle, der Rückhalt von Gesteine und/oder Holz oder die Stabilisierung einer erosionsgefährdeten Wildbachstrecke). Bezogen auf die *Schutzfunktion* vor Hochwassern beschreibt ein Überlastfall Abflüsse, welche das Bemessungsereignis der Hochwasser-

schutzeinrichtungen bzw. der technischen Schutzmaßnahmen z. B. Deiche, Hochwasserschutzmauern, oder Rückhaltebecken übersteigen (genannt Bemessungshochwasser BHQ [BMLFUW und TU-WIEN, 2009]). In diesem Fall reduziert sich der schützende Einfluss dieser Strukturen auf die An- bzw. Unterlieger. Die Einwirkung – z. B. der Wasserstand in einem Siedlungsraum – nähert sich damit sukzessive oder aber auch abrupt den Verhältnissen ohne Existenz der Schutzmaßnahmen an. In Abbildung 01 ist diese Situation als Überlastfall (Hochwasserschutz) benannt.

Die *Hochwassersicherheit* beschreibt die Standsicherheit einzelner Einzelbauwerke, wie Talsperren und Rückhaltebecken, gegenüber einem Versagen bei über den Bemessungsrahmen liegenden Extremabflüssen. Bei solchen außerordentlich seltenen Ereignissen steigt der Oberwasserstand weiter an, wodurch die Bauwerke noch stärker belastet werden. Der Abfluss über die Hochwasserentlastungsanlagen bzw. Überlaufbereiche nähert sich dem Zufluss (unter Berücksichtigung der Retention) an. Sollte die Leistungsfähigkeit der Hochwasserentlastungsanlage (genannt Sicherheitshochwasser SHQ [BMLFUW und TU-WIEN, 2009]) nicht mehr ausreichen, so ist dieser Zustand als Überlastfall im Sinne der Standsicherheit bzw. Hochwassersicherheit zu sehen. Falls im weiteren Verlauf des Hochwasserereignisses noch der Freibord (d. h. der vertikale Abstand zwischen der höchsten zulässigen Wasserspiegelkote im Oberwasser und der Krone des Bauwerkes bzw. der Oberkante der Dichtung) aufgebraucht wird, so kommt es zu einem Überströmen der Struktur. In Abbildung 01 ist diese Situation als Überlastfall (Hochwassersicherheit) benannt. Je nach Bauweise und lokalen Randbedingungen ist dieser Zustand in hohem Maße kritisch. Die Folgen einer Überlastung von Talsperren im Sinne des Verlustes der Standsicherheit übersteigen typischerweise die Auswirkungen möglicher natürlichen Ereignisse deutlich und können in letzter Konsequenz zu extremen Katastrophen führen: infolge eines Sperrenbruchs können durch eine Flutwelle ganze Landstriche zerstört werden und zahlreiche Menschen ums Leben kommen. Risikoabwägungen im Kontext von Standsicherheiten solcher Bauwerke erfordern daher ungleich höhere Anforderungen an den Umgang mit dem Überlastfall als es beispielsweise bei Flussdeichen der Fall ist und führen zur Betrachtung der (sehr gering wahrscheinlichen) Sicherheitshochwasser bzgl. ihrer Standsicherheit.

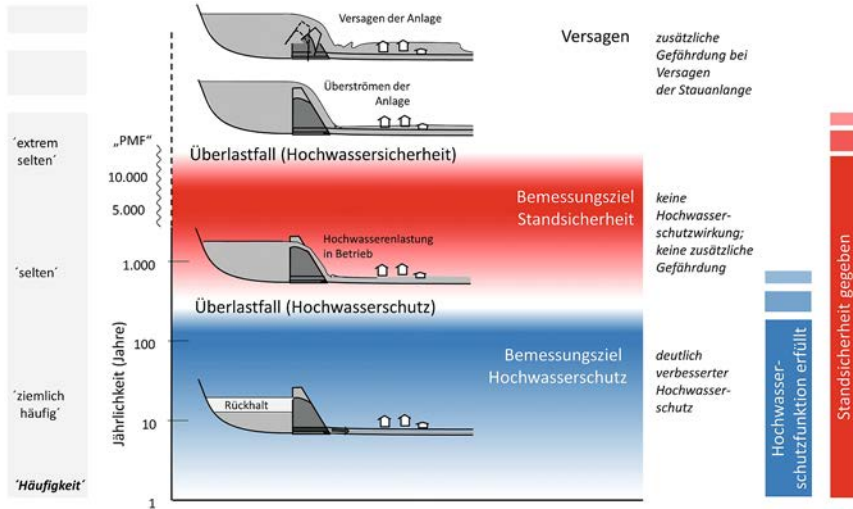


Abbildung 01: Abgrenzung von Bemessungsfällen (und damit Überlastfällen) bei Talsperren (stark vereinfachende Schemaskizze).

Figure 01: Definition of design cases (and thus overload cases) for barrage dams (greatly simplifying schematic diagram).

Quelle: verändert nach Aufleger, 2018

13.3 Die Rolle von Schutzzielen und den verbleibenden Risiken im Umgang mit Überlastfällen

Der Zusammenhang zwischen bestehenden Risiken, Schutzzielen und Überlastfällen aus der Perspektive des integralen Risikomanagements wird in vereinfachter Form in Abbildung 02 wiedergegeben. Die Abbildung zeigt den Gesamtkomplex von (Natur-) Risiken in einem System, wobei die Prozessintensität sowie das Schadenspotenzial von links nach rechts zunehmen und gleichzeitig die Eintrittswahrscheinlichkeit in diese Richtung sinkt. Im Schaubild wird das Gesamtrisiko konzeptionell in zwei Hauptbestandteile untergliedert. Während die Risiken auf der linken Seite als bekannt, kontrollierbar und deshalb nicht tolerierbar beschrieben werden können, sind die verbleibenden Risiken auf der rechten Seite als tolerierbar und in Teilen unbekannt bzw. nicht kontrollierbar charakterisiert. Getrennt werden diese beiden Sparten von einem festgelegten Schutzziel und den dazu getroffenen Schutzmaßnahmen. Wie in Kapitel 13.2 beschrieben, ist hier visualisiert, dass Überlastfälle in ihrer Intensität über das festgelegte Schutzziel hinausgehen und daher den verbleibenden Risiken zugeordnet werden. In der Abbildung 02 ist das Schutzziel als durchgezogene vertikale blaue Linie eingezeichnet. Die genaue Schutzfunktion, die diesem for-

multierten Ziel und den dazugehörigen Maßnahmen entspricht, ist jedoch aufgrund von Unsicherheiten der zur Verfügung stehenden Informationen, vereinfachenden Modellannahmen und/oder fehlerhaften Berechnungen in der Realität nicht exakt zu bestimmen.

Die Kernaussage dieses Konzepts bezieht sich zum einen auf die Möglichkeit, durch die Festlegung des Schutzziels das Ausmaß der verbleibenden Risiken zu beeinflussen. Zum anderen zeigt es die Grenzen der baulichen bzw. strukturellen Maßnahmen im Risikomanagement auf. Es verdeutlicht, dass jenseits der getroffenen Schutzziele im Bereich der verbleibenden Risiken, den nicht-baulichen wie z. B. raumplanerischen Maßnahmen oder Aktivitäten der Risikokommunikation eine große Bedeutung zukommt.

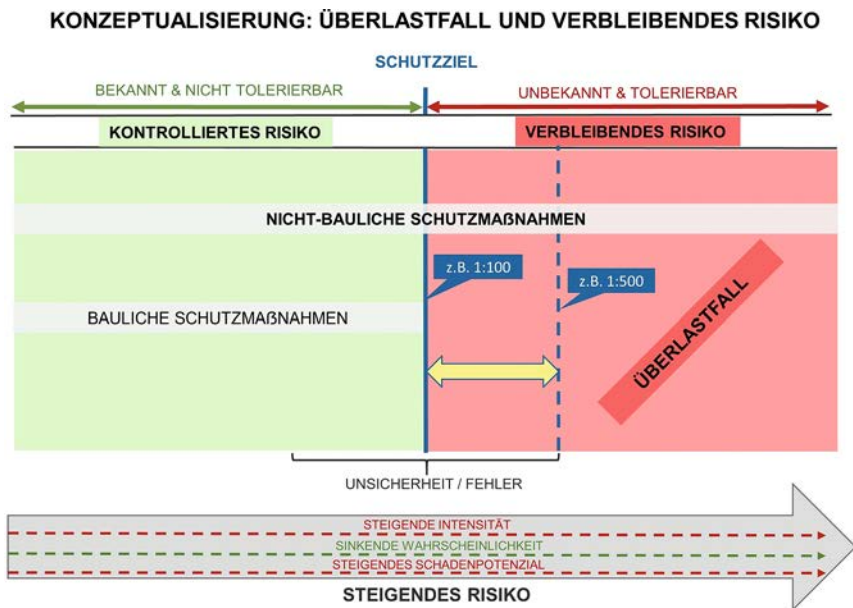


Abbildung 02: Konzeptualisierung des Überlastfalls und des verbleibenden Risikos.
Figure 02: Conceptualization of the case of overload and the remaining risks.

Quelle: verändert nach Schneiderbauer et al., 2018a

Abbildung 02 verdeutlicht zudem, dass Schutzziele einen wichtigen Eckpfeiler im Umgang mit Naturgefahren und dem dazu erforderlichen Risikomanagement darstellen. Laut PLANAT handelt es sich bei einem Schutzziel um das »Niveau an Sicherheit, das bestimmte Verantwortungsträger in ihrem Verantwortungsbereich grundsätzlich anstreben. In der Praxis dient das Schutzziel auch als Überprüfungs-kriterium zur Beurteilung des Handlungsbedarfs für die Erreichung der angestrebten Sicherheit« (PLANAT, 2015, S. 4).

Schutzziele werden häufig als Schwellenwert gegenüber einem Ereignis einer bestimmten Intensität spezifiziert. Im Kontext von Hochwasser ist dies z. B. in vielen Siedlungsgebieten in Österreich ein Ereignis des Ausmaßes HQ_{100} .

Die Definition eines Schutzzieles als präziser Schwellenwert eines Naturgefahrenereignisses ist allerdings nicht unproblematisch. Es ist wichtig, sich bewusst zu sein, dass durch die Festlegung eines Schutzzieles eine Entscheidung darüber getroffen wird, bis zu welchem Grad die verantwortlichen Behörden einen Schutz der Gesellschaft garantieren müssen und ab welchem Schwellenwert die möglichen negativen Auswirkungen potenzieller Überlastfälle weitestgehend toleriert werden. Die Berechnung von Eintrittswahrscheinlichkeiten als Basis solcher Schutzzieldefinitionen ist jedoch mit statistischen Unsicherheiten verbunden und basiert in der Regel auf langjährigen Beobachtungen. Dynamiken der letzten Jahre, wie sie eventuell klimatische Veränderungen verursacht haben, können hierbei nicht gebührend berücksichtigt werden. Aus Sicht des IRM ist es außerdem wünschenswert, dass Schutzziele kosteneffizient und umweltverträglich umgesetzt werden können sowie entsprechend notwendige Maßnahmen die Bedürfnisse der Risikobetroffenen berücksichtigen. Diese Anforderungen werden durch Schutzziele, die sich an der Intensität von Gefahrenereignissen orientieren, nur begrenzt unterstützt. Alternative Schutzziele berücksichtigen stärker die Risiken, die aus bestimmten Naturgefahren resultieren und spezifizieren Schadensgrößen als Schwellenwerte. Die oben genannte Studie hat gezeigt, dass Schutzziele in Österreich insbesondere bei wasserbezogenen Gefahren – im Gegensatz zur Schweiz und teilweise auch zu Italien – meist in Bezug auf die Gefahren und gefährliche Prozesse festgelegt werden (z. B. Wasserstände, Abflüsse). Schutzziele in Bezug auf Lawinen und Felsstürzen basieren hingegen auch in Österreich vorwiegend auf Risikoparametern (z. B. Sach- oder Personenschäden) (Schneiderbauer et al., 2018a).

Unabhängig von der Art des Schutzzieles ist die Festlegung bestimmter Schutzzielgrößen aus technischer Sicht eine Herausforderung. So sind einer genaueren Bewertung und Vorhersage der Abfluss- und Transportprozesse in Wildbächen bei sehr seltenen Ereignissen deutliche Grenzen gesetzt. In Österreich werden diese Wildbach-Prozesse oft im Rahmen von Expertenbeurteilungen unter Bezugnahme auf Ereignisse mit statistischen Wiederkehrintervallen von 150 Jahren in empirischer Weise beschrieben. Gegebenenfalls werden stark vereinfachende Modelle zu einer etwas weitergehenden Quantifizierung wesentlicher Größen (z. B. Geschiebefrachten, Wasserspiegellagen) herangezogen. In der Regel wird versucht, den erheblichen Unsicherheiten bei der Vorhersage der im Hochwasserfall tatsächlich auftretenden Vorgänge durch zusätzliche Sicherheiten im ingenieurmäßigen Sinne (z. B. Freibord) Rechnung zu tragen.

In Bezug auf wasserstauende Schutzbauten sind – so wie bereits in Kapitel 13.2 beschrieben – Überlastfälle hinsichtlich der Hochwasserschutzfunktion und der Standsicherheit zu unterscheiden. Die erforderliche Leistungsfähigkeit solcher Schutzbauwerke wird durch Bemessungsgrößen festgelegt, die sich in der Regel an jährlichen Überschreitungswahrscheinlichkeiten orientieren. Bei großen Anlagen mit weit reichender Hochwasserschutzwirkung können auch wesentlich höhere Werte als z. B. bei Deichen oder Dämmen im allgemeinen Hochwasserschutz zugrunde gelegt werden (bis etwa HQ_{300}). Abbildung 01 verdeutlicht, dass im Kontext der Standsicherheitsbetrachtungen von Talsperren Auftretenswahrscheinlichkeiten kleiner als 100 Jahre im Sinne der Anlagenbemessung als »ziemlich häufig« eingestuft werden können. Ereignisse dieser Größenordnung, die bei Schutzmaßnahmen entlang eines Flusslaufes möglicherweise bereits an die Bemessungsgrenzen bzgl. der Schutzfunktion stoßen, sind im »Betrieb« der Staubauwerke ein planmäßiger Zustand und stellen somit im Sinne der Standsicherheit dieser Bauwerke keine Überlastfälle dar. Zu Überlastfällen im Sinne des Hochwasserschutzes werden hier nur »seltene« Ereignissen gezählt. Da ein Versagen von Staubauwerken katastrophale Folgen haben kann (vgl. Kapitel 13.2) muss eine (Standsicherheits-) Überlastung solcher Anlagen mit ausreichend hoher Sicherheit verhindert werden. Hierbei sind im Allgemeinen – und abhängig vom Risikopotenzial unterhalb des Bauwerks – noch deutlich seltenere Ereignisse mit Jährlichkeiten von etwa 5.000 Jahren bis zu einem PMF [Probable Maximum Flood] zu berücksichtigen. Jährlichkeiten in dieser Größenordnung lassen sich nur vergleichsweise ungenau ermitteln und in der sehr langen Lebenszeit der Bauwerke können sich diese hydrologischen Bemessungswerte ändern. Hieraus kann ein Anpassungsbedarf bezüglich der Kapazität der Hochwasserentlastungsanlagen entstehen.

13.4 Ansätze zum Umgang mit Überlastfällen im Alpenraum und in Österreich

Im Alpenraum sind bisher wenige Publikationen erschienen, die sich explizit auf den Umgang mit Überlastfällen von Naturgefahren befassen. Die im Kapitel 13.1 genannte von Eurac Research durchgeführte Studie hat diese Literatur gesichtet und mit Ergebnissen einer quantitativen Erhebung durch einen Fragebogen sowie der Analyse von qualitativen Informationen aus Tiefeninterviews mit Fachleuten ergänzt. Die Studie ermöglicht so einen ersten groben Überblick der Situation bezüglich des Managements von Überlastfällen gegenüber verschiedenen Naturgefahren in Österreich und den anderen Alpenländern.

In Hinblick auf die Definition wichtiger Begriffe ist die Sachlage in Österreich zu vergleichen mit der Situation im gesamten Alpenraum: es besteht ein generell einheitliches Verständnis davon, was einen Überlastfall ausmacht, aber es existiert keine einheitliche Definition für diesen Begriff. Der Terminus »Überlastfall« wird vorwiegend im Zusammenhang mit Wassergefahren/Hochwasser verwendet. Die Ableitung und Spezifizierung von Schutzziele unterscheidet sich in Abhängigkeit von der Art des Naturereignisses sowie von der zu schützenden Landnutzungsform.

Die Schutzziele in Österreich werden für Flusshochwasser und Wildbachgefahren meist mit Hilfe von Wahrscheinlichkeiten der Wiederkehrperiode berechnet. Der Umfang dieses Hochwasserschutzes entlang von Fließgewässern ist in Österreich nicht einheitlich geregelt und kann sich innerhalb eines Einzugsgebiets je nach örtlichen Gegebenheiten und auch nach Verantwortlichkeiten unterscheiden. Schutzziele für Lawinen, Steinschlag und Rutschungen werden häufiger risiko-orientiert entwickelt und durch das Ausmaß möglicher Schäden bestimmt. Beim Hochwasserschutz werden solche Schäden nur insofern berücksichtigt, dass Landnutzungsformen mit besonders hohem Schadenpotenzial (z. B. kritische Infrastrukturen) – wie in allen anderen Alpenländern auch – gesondert behandelt werden. Hierzu zählen auch sensible und wirtschaftlich unverzichtbare Areale z. B. in urbanen Zentren wie Wien.

Für die Bestimmung der Hochwasserjährlichkeiten sowie die Planung von diesbezüglichen Schutzmaßnahmen und -bauten gibt es im Alpenraum verschiedene Handbücher und Anleitungen, wie in Österreich den Nationalen Hochwasserrisikomanagementplan RMP 2015 (BMLFUW, 2015c), die technischen Richtlinien für die Bundeswasserbauverwaltung (RIWA-T) (BMLFUW, 2015b), oder den Leitfaden zum Nachweis der Hochwassersicherheit von Talsperrern (BMLFUW und TU-WIEN, 2009).

Bei genauerer Betrachtung des Umgangs mit Überlastfällen in Österreich und anderen Alpenländern wird deutlich, dass die Grundideen des IRM bereits weithin aufgenommen wurden. Alle Phasen des Risikokreislaufs – Prävention, Vorsorge, Bewältigung, Minderung und Instandsetzung – sind als elementare Bestandteile des IRM fest in den unterschiedlichen Aktivitäten zum Umgang mit Überlastfällen verankert. Die Untersuchungen der Studie haben gezeigt, dass in den letzten Jahren die Berücksichtigung integrierter Managementregionen, wie gesamte Flusseinzugsgebiete, gegenüber der Betrachtung von einzelnen Flussabschnitten an Bedeutung gewonnen hat. Zudem werden Ökosystemdienstleistungen zunehmend stärker in das Risikomanagement mit einbezogen, um zusätzliche Schutzfunktionen zu erzielen und dadurch – wenn möglich – den Aufwand und die Kosten für bauliche Maßnahmen zu reduzieren. In diesem Zusammenhang spielen in ansteigendem Maße grenzübergreifende und zumindest teilweise standardisierte Vorgehensweisen sowie der Austausch er-

folgreicher und weniger erfolgreicher Praktiken eine Rolle. Dieser Austausch über die Landesgrenzen der Alpenländer hinweg geschieht beispielsweise innerhalb der Aktionsgruppe 8 der 2016 verabschiedeten europäischen makroregionalen Strategie für den Alpenraum (EUSALP) sowie im Rahmen der Plattform Naturgefahren PLANALP der Alpenkonvention. In beiden Gruppen wird Risiko Governance grenzüberschreitend diskutiert und mögliche Umsetzungsstrategien gemeinsam erarbeitet.

13.5 Herausforderungen und Handlungsoptionen

Seltene und extreme Ereignisse sowie daraus resultierende Überlastfälle im Sinne eines Überschreitens von existierenden Schutzmaßnahmen werden seit vielen Jahren im Kontext von Naturgefahren- und Risikomanagement diskutiert. Jüngere Entwicklungen verschärfen die Dringlichkeit, für solche Fälle Lösungsansätze zu entwickeln und umzusetzen. Zu diesen Entwicklungen zählen zum einen die Unsicherheiten, die mit den klimatischen Veränderungen und deren Auswirkungen auf die Intensität und Häufigkeit der unterschiedlichen Gefahrenprozesse verbunden sind. Zum anderen trägt die wachsende Konzentration von Wohnraum, wirtschaftlichen Aktivitäten und Infrastruktureinrichtungen in zentralen und häufig risikoexponierten Räumen zu einem Anstieg der Schadensanfälligkeit bei. Des Weiteren wächst nicht zuletzt aufgrund von begrenzten finanziellen Ressourcen die Notwendigkeit, kosteneffizient zu agieren und Raumnutzungskonflikte zwischen risikoreduzierenden Maßnahmen und anderen gesellschaftlich wichtigen Aktivitäten zu mediieren.

Die jüngere Entwicklung beim Umgang mit Naturgefahren weg von einem ausgeprägten Gefahrenfokus hin zu einem IRM wurde oben bereits angesprochen und einige damit verbundene Vorteile genannt. Im Folgenden werden diese konkretisiert und einige Handlungsoptionen genannt, die Praktiker und Entscheidungsträger nutzen können, um sich den heutigen und zukünftigen Herausforderungen zu stellen.

Ein entscheidender Punkt ist die *explizite Berücksichtigung von Überlastfällen im Risikomanagement überhaupt*. Dies bedeutet, dass man neben den Maßnahmen, die zur Erreichung von festgelegten Schutzziele durchgeführt werden müssen, auch für den Fall eines seltenen oder extremen Ereignisses, sprich den Überlastfall, vorbereitet ist. Dies heißt zumindest zu wissen, was in einem solchen Fall passieren könnte, um optimal zu reagieren. Weitere Maßnahmen können auf verschiedenen Ebenen erfolgen, z. B. durch Alarm-/Einsatz- und Evakuierungsplanung, durch Handlungsanweisungen für den Ernstfall, durch raumplanerische Maßnahmen (freie Retentionsflächen, Schutzwald aufforsten, Bauverbote, etc.) oder technische Maßnahmen an Schutzbauwerken

im Sinne von »überlastbaren Schutzanlagen« oder zusätzliche Schutzanlagen, wie zweiten Deichlinien, Notentlastungen bzw. einer grundsätzlich sehr »robusten« Bauwerksbemessung. Auch alle hier aufgelisteten weiteren Handlungsoptionen unterstützen die Planung für und die Vorbereitung auf einen Überlastfall. Schäden können hier nur noch begrenzt, z. B. vor allem Personenschäden, aber nicht mehr vollständig vermieden werden.

Ein wichtiger Aspekt betrifft alle Aktivitäten, die mit *der Datenakquise, der Beobachtung von Veränderungen und der Berechnung von Modellen* einhergehen. Die Alpenregion ist ein dynamischer Lebensraum, mit sich verändernden klimatischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen. Gletscherschmelze, der Rückgang von Permafrost, zunehmende Starkregenereignisse und Hitzeperioden aber auch Land-Stadt Wanderungsbewegungen und demografischer Wandel erfordern ein regelmäßiges Überdenken und eventuelles Anpassen von Schutzziele und Maßnahmen zur Risikoreduktion. Veränderungen relevanter bio-physikalischer sowie sozio-ökonomischer Faktoren sollten mit modernen Beobachtungsverfahren in hoher zeitlicher und räumlicher Auflösung erfasst und die daraus resultierenden Daten mit best-möglichen statistischen Verfahren und Modellen weiter verarbeitet werden. Das Ziel sollte immer darin bestehen, den Entscheidungsträgern eine qualitativ hochwertige und aktuelle Informationsbasis zur Verfügung zu stellen. Wichtig ist außerdem, dass Ergebnisse solcher im Rahmen vom Risikomanagement durchgeführten Erhebungen und Analysen rechtzeitig, verständlich und ohne Zugriffseinschränkungen an die jeweiligen Nutzer, z. B. den Katastrophenschutz, weitergegeben werden (s. a. weiter unten die Aspekte der Kommunikation).

Um die Gefährdung der Gesellschaft und ihrer Sachwerte flächendeckend verringern zu können, sollten Überlastfälle bereits in wichtigen *Planungsinstrumenten wie Landnutzungs-, Gefahrenzonen- und Notfallplänen* Berücksichtigung finden. Die Ausweisung von im Überlastfall betroffenen Gebieten, der Ankauf von unbebauten Flächen oder ein Bauverbot in solchen Bereichen sowie die Darstellung von Pufferzonen und Rückhalteflächen in Karten stellen weitere Handlungsoptionen dar, die mittel- und langfristig mögliche Schäden bei Extremereignissen verringern können.

Vor dem Hintergrund der erforderlichen Nachhaltigkeit und Kosteneffizienz ist es häufig gewinnbringend, vorhandene, meist bauliche Schutzkonzepte *um naturnahe und ökosystembasierter Maßnahmen* zu ergänzen und miteinander zu kombinieren. Hier spielt in den Alpen insbesondere der Schutzwald eine große Rolle. Der Einbezug der von der Natur geleisteten Schutzwirkung hat häufig auch ökonomische Vorzüge in Bezug auf die Planung von Schutzbauwerken.

In diesem Zusammenhang ist der bisher eher selten verfolgte Ansatz zu nennen, bei der Entscheidung über Maßnahmen für das Management von

Überlastfällen, *verschiedene Handlungsoptionen verstärkt ökonomisch zu bewerten*. Dabei müssen sowohl die Schutzleistungen der Ökosysteme wie auch mögliche direkte und indirekte Folgen eines potenziellen Überlastfalls berücksichtigt werden.

Hierzu zählt auch eine Betrachtung von Kosten-Nutzen-Beziehungen aus Sichtweise des Gesamtsystems, bzw. bei Wassergefahren eines Einzugsgebietes. Im Sinne der Grundsätze des konstruktiven Wasserbaus ist ein (Stand sicherheits-)Versagen technischer Schutzmaßnahmen bei Überlastfällen des Hochwasserschutzes nur dann tolerierbar, wenn sich hieraus keine relevante zusätzliche Gefährdung der Unterlieger ergibt oder diese äusserst unwahrscheinlich, d. h. extrem selten auftritt. Dies bedeutet aber auch, dass z. B. das Versagen eines niedrigen Absturzes oberhalb eines Wildbach-Schlüsselbauwerkes nicht weitergehend betrachtet werden muss.

Wenn allerdings eine relevante Gefährdung für Unterlieger besteht, insbesondere bei größeren Rückhaltebauwerken bzw. Stauanlagen, sind die Folgen im Fall *eines Versagens der Bauwerke grundsätzlich zu bewerten*. Hierzu ist es notwendig, ein geeignetes Bruchszenario (z. B. die Größe und die Entwicklung einer Dammbresche oder das Versagen einer Staumauer) in vereinfachender Weise zu definieren und die hieraus sich potentiell entwickelnde Flutwelle und deren räumliche bzw. zeitliche Verbreitung mit geeigneten rechnerischen Verfahren zu bestimmen.

In Abhängigkeit des Typs, der Bauweise, der Ausführung und vieler anderer Aspekte (u. a. Topographie, Vegetation) besitzen die *technischen Schutzmaßnahmen in der Regel Reserven*, welche eine über das definierte Schutzziel hinausgehende, im Sinne des Hochwasserschutzes günstige Wirkung besitzen. Es liegt in der Verantwortung der an der Planung, der Genehmigung und der Ausführung beteiligten Fachleute bei der endgültigen Konzeption und Realisierung dieser Baumaßnahmen eine angemessene Abwägung zwischen Sicherheits- und Wirtschaftlichkeitsüberlegungen zu treffen.

Ein weiterer, generell bedeutender Aspekt ist die zielgerichtete und an die Bedürfnisse der einzelnen Nutzergruppen angepasste *Kommunikation von Risiken*. Zwischen Wissenschaftlern und in der Praxis tätigen Fachleuten im Alpenraum sind dementsprechende Kommunikationsprozesse in den letzten Jahren erfolgreich institutionalisiert worden, z. B. durch PLANALP und EUS-ALP (siehe Kapitel 13.4). Ebenso bedeutend aber oft nicht mit angemessener Priorität behandelt ist die Kommunikation mit der Bevölkerung. Diese erfordert aus mehreren Gründen einen durchdachten, strategischen Ansatz. Zum einen muss der Austausch mit der Bevölkerung in verständlicher Sprache erfolgen. Zudem ist es notwendig, eine sinnvolle zielgerichtete Auswahl der weiterzugebenden Erkenntnisse zu treffen, um eine Informationsüberflutung zu vermeiden. Des Weiteren besteht die Gefahr, durch schlecht vorbereitete und in un-

günstiger Form übermittelte Informationen, unnötige Ängste zu wecken oder zu schüren. Wenn Sensibilisierungskampagnen, die Entwicklung von Frühwarnsystemen und Notfallplänen sowie Trainings- und Übungseinheiten für relevante Akteure diese Aspekte berücksichtigen und gut in eine Kommunikationsstrategie eingebunden sind, können sie entscheidend zu einem verbesserten Umgang mit Überlastfällen beitragen. Besondere Bedeutung haben in diesem Kontext insbesondere die Aufgaben, Erinnerungen an frühere Extremereignisse und Überlastfälle aufrechtzuerhalten sowie das Bewusstsein darüber zu schärfen, dass ein vollständiger Schutz vor Naturgefahren nie gegeben ist und gewisse Restrisiken immer existieren werden.

Abschließend ist die *Partizipation aller relevanten Akteure* bei der Entscheidungsfindung im Risikomanagement zu nennen. Das Festlegen von Schutzziele und die Allokation finanzieller Ressourcen zur Verringerung von Naturrisiken stellen gesamtgesellschaftliche Aufgaben dar. Allen potenziell Betroffenen die Möglichkeit zu bieten, sich bei relevanten Entscheidungsprozessen zu beteiligen, ist ein Gebot des Mitspracherechts und eine Frage der Gerechtigkeit. Zudem werden Entscheidungen des Risikomanagements, die im Konsens unterschiedlicher Interessengruppen getroffen wurden, in der Regel besser akzeptiert und von der Bevölkerung eher nachhaltig unterstützt, als ausschließlich von öffentlicher Seite beschlossene Maßnahmen. In einem integralen Risikomanagement stellt daher der Aufbau einer »risikokompetenten Gesellschaft« mit einer aktiven Beteiligung aller Akteure ein langfristiges Ziel dar, dass unter anderem durch (Aus-) Bildung junger Bevölkerungsgruppen in Bezug auf den Umgang mit Gefahren und Risiken unterstützt werden kann.

13.6 Schlussbetrachtungen

Die Ausführungen der vorangehenden Kapitel führen in die Materie von Überlastfällen bei Extremereignissen in Österreich und im gesamten Alpenraum ein, erläutern den konzeptionellen Hintergrund dieser Thematik und zeigen mögliche Folgen sowie Handlungsoptionen auf. Daraus wird die Notwendigkeit abgeleitet, das Bewusstsein für ein mögliches Auftreten von Überlastfällen zu stärken und entsprechende Ereignisse präventiv in einem integralen Management der Naturrisiken zu berücksichtigen. Dieses Statement gewinnt noch an Bedeutung vor dem Hintergrund der sich verändernden klimatischen Verhältnisse und ihrer Folgen sowie den soziodemografischen Prozessen der letzten Jahre, die mit einer Konzentration von Personen, Gütern, Verkehr und Infrastrukturen auf häufig risikoexponierten Flächen einhergehen.

Außerhalb des Umfeldes von Fachleuten und Interessenträgern, die sich tagtäglich mit dieser Thematik befassen, werden jedoch Fragen zum Manage-

ment von Überlastfällen bei Extremereignissen und zur Notwendigkeit, entsprechende Schutzziele festzulegen, vernachlässigt oder überhaupt nicht betrachtet. Dieser Mangel an Aufmerksamkeit in der allgemeinen Öffentlichkeit muss aufgrund der gesamtgesellschaftlichen Relevanz der Thematik im Alpenraum kritisch hinterfragt werden. Denn für das Bestimmen von Schutzziele muss geklärt werden, welches Risiko von der Gesellschaft akzeptiert wird und welche Kosten eine Gemeinschaft bereit ist zu übernehmen, um entsprechende Schutz- und Vorsorgemaßnahmen zu treffen. Direkt daran anschließend stellt sich die Frage, wer hierüber die Entscheidung trifft und wer die Verantwortung für mögliche Folgekosten und Konsequenzen trägt. In diesem Zusammenhang ist zu beachten, dass Investitionen, die zum Schutz gewisser Naturrisiken von der Gesellschaft gemeinsam getragen werden, möglicherweise nur bestimmten Teilen dieser Gemeinschaft einen Nutzen einbringen oder für bestimmte Gruppen sogar von Nachteil sein können; z. B. können Deiche und Schutzmauern, die im Oberlauf eines Flusses vor Überflutung schützen eine erhöhte Hochwasserwelle im Unterlauf bewirken. Ein weiterer Aspekt betrifft die Partizipation der Bevölkerung bei den verschiedenen Komponenten des Risikomanagements. Hier ist zu klären, inwieweit die Verantwortung im Umgang mit Überlastfällen gerecht und zielbringend auf unterschiedlichen Akteure wie die öffentliche Verwaltung, Privatwirtschaft, Vereine und einzelne Bürgerinnen und Bürger verteilt werden kann. Auch die Frage nach etwaigen Grenzen einer solcher Beteiligung der Öffentlichkeit in den facettenreichen Aktivitäten des IRM sollte diskutiert werden. Eine sinnvolle Beschränkung muss auch in Bezug auf die Kommunikation von Risiken gegenüber der Bevölkerung in Betracht gezogen werden, denn eine vollkommene Transparenz bei dieser Vermittlung kann auch negative Auswirkungen haben, als Panikmache empfunden werden und somit kontraproduktiv sein.

Es wäre wünschenswert, wenn diese und weitere Fragen mit Bezug zu Risikomanagement in stärkerem Maße von der breiten Öffentlichkeit diskutiert würden. Langfristig würde dies auch zum Aufbau einer risikokompetenten Gesellschaft beitragen.

Literatur

- Aufleger, M., 2018. Berücksichtigung von Überlastfällen an Talsperren, Flusssperrern und an Bauwerken der Wildbach- und Lawinerverbauung. In: F. Rudolf-Miklauer, J. Hübl (Hrsg.), Stand der Technik im Naturgefahren-Ingenieurwesen. Schriftenreihe des Departments für Bautechnik und Naturgefahren, Universität für Bodenkultur Wien, 24, S. 81–82.

- BMLFUW, 2015a. 1. Nationaler Hochwasserrisikomanagementplan. Sicher Leben mit der Natur. Wien, 24 S.
- BMLFUW, 2015b. Technische Richtlinien für die Bundeswasserbauverwaltung RIWA-T. Gemäß § 3 ABS 2 WBFG Fassung 2016 GZ: UW.3.3.3/0028-IV/6/2015.
- BMLFUW, 2015c. Nationaler Hochwasserrisikomanagementplan RMP 2015. Wien, 177 S.
- BMLFUW, TU-WIEN (Hrsg.), 2009. Leitfaden zum Nachweis der Hochwassersicherheit von Talsperren, Fassung 12/2009. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft und Institut für Wasserbau und Ingenieurhydrologie, TU Wien, 107 S.
- Camenzind, R., Loat, R., 2014. Risk-based spatial planning: Synthesis report on two case studies at communal land use planning level. National Platform for Natural Hazards/ Federal Office for Spatial Development/Federal Office for the Environment, Bern, 21 S.
- Holub, M., Fuchs, S., 2009. Mitigating mountain hazards in Austria – legislation, risk transfer and awareness building. *Natural Hazards and Earth System Sciences* 9(2), S. 523–37.
- PLANAT, 2004. Strategie Naturgefahren Schweiz. Synthesebericht. Nationale Plattform Naturgefahren, Bern, 81 S.
- PLANAT, 2012. Fachbegriffe im Naturgefahrenbereich. Bern, 7 S.
- PLANAT, 2015. Strategie Naturgefahren Schweiz. Sicherheitsniveau für Naturgefahren. Bern, 68 S.
- Rimböck, A., Eichenseer, E., Loipersberger, A., 2012. Integrale Wildbachentwicklungskonzepte – ein neuer Ansatz, um Erhalt und Zukunftsanforderungen in Einklang zu bringen? Internationales Symposium Interpraevent Grenoble, 2, S. 1055–1065.
- Schneiderbauer, S., Hartmann, S., Dalla Torre, C., Dinkelaker, N., Sankowsky, A., Hoffmann, C., Pedoth, L., Streifeneder, T., 2018a. Über das Erwartete hinaus: Umgang mit dem Überlastfall und dem Restrisiko im Zusammenhang mit Naturgefahren im Alpenraum. Schlussbericht. Bozen, 123 S. https://www.alpine-region.eu/sites/default/files/uploads/result/1282/attachments/beyond_the_expected_final_report_german_v2.pdf [02.08.18].
- Schneiderbauer, S., Hartmann, S., Dalla Torre, C., Dinkelaker, N., Sankowsky, A., Hoffmann, C., Pedoth, L., Streifeneder, T., 2018b. Über das Erwartete hinaus: Umgang mit dem Überlastfall und dem Restrisiko im Zusammenhang mit Naturgefahren im Alpenraum. Zusammenfassung. Bozen, 12 S. https://www.alpine-region.eu/sites/default/files/uploads/result/1282/attachments/beyond_the_expected_policy_paper_german_0.pdf [02.08.18].

14 Bodenerosion

Peter Strauss und Elmar M. Schmaltz*

Zusammenfassung

Der vorliegende Beitrag beschränkt sich in der Behandlung der Bodenerosion auf jene Regionen und Flächen in den Alpen und im Alpenvorland, die einem landwirtschaftlichen Management unterliegen. Bodenerosion ist das Ergebnis einer Vielzahl von Prozessen und Einflussfaktoren. Die menschliche Einflussnahme beruht im Wesentlichen auf der Art des landwirtschaftlichen Managements, andere Einflussfaktoren wie die Erosivität von Niederschlägen, die Erodibilität der Böden oder die Hangneigung der bewirtschafteten Flächen entziehen sich weitgehend dem Einfluss des Menschen. Eine Abgrenzung zu anderen Naturgefahren, insbesondere Hangrutschungen und fluviatilen Feststofftransporten ist möglich, betrachtet man allerdings die Kosten von Schäden durch Off-site Effekte, ist eine klare Abtrennung zu anderen Naturgefahren schwierig. Extreme Bodenerosion ist im Allgemeinen das Ergebnis einer Kopplung von selteneren Niederschlagsereignissen mit ungünstigem landwirtschaftlichem Bearbeitungszustand (offener Boden). Einer Betrachtung von Bodenerosion in Bezug auf Extremereignisse fehlt in Österreich – wie auch in anderen Ländern – die Datengrundlage. Vielmehr wird im Zusammenhang mit Bodenerosion über tolerierbare durchschnittliche Bodenabträge diskutiert. Dieses Konzept ist allerdings mit einer Reihe von Problemen behaftet. Perspektiven für Handlungsoptionen liegen einerseits in verbesserten Kommunikationsstrategien für relevante gesellschaftliche Gruppen, andererseits ist es notwendig, Extremereignisse der Bodenerosion auch mit entsprechenden Messwerten belegen zu können, also ein entsprechendes Langzeitmonitoring zu etablieren.

Abstract

This chapter confines the term »*soil erosion*« to the alpine and pre-alpine areas that are subject to agricultural management. Soil erosion is the result of a large variety of processes and influencing factors. Anthropogenic control substantially relies on the type of agricultural management, whereas other influencing factors, such as the erosivity of precipitation events, erodibility of the soil or slope inclination of the managed areas are eluded from human impact. A differentiation to other natural hazards is feasible, particularly to landslides and hydraulic transportation, however, appears to be rather difficult when

* Peter Strauss, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, peter.strauss@baw.at.

Elmar M. Schmaltz, Bundesamt für Wasserwirtschaft, Institut für Kulturtechnik und Bodenwasserhaushalt, elmar.schmaltz@baw.at.

damages by off-site erosion are considered. Generally, extreme erosion is the result of a coupling of infrequent precipitation events with unfavourable conditions of agricultural production, such as bare soil. A supportive data base for Austria – as well as in other countries – is missing for the assignment of soil erosion in the context of extreme events. In fact, rather tolerable averages of soil loss are discussed in consideration of soil erosion. However, this concept is afflicted with a rash of problems. Perspectives for courses of action are improving communication strategies for relevant groups of society on the one hand side and the justification of extreme soil erosion rates by establishing of appropriate long-term monitoring on the other hand side.

Kernaussagen

- Gesetzliche Obergrenzen für Bodenerosion im Sinne des Bodenschutzes existieren in Österreich nicht
- Extreme Mengen der Bodenerosion auf landwirtschaftlich genutzten Flächen entstehen durch die Kopplung von Starkniederschlägen mit extrem ungünstigen Bodenzuständen (z. B. Bodenbedeckung)
- Schwellenwerte für extreme Bodenerosionsereignisse wären sehr wünschenswert, wurden bisher aber noch nicht definiert, da im landwirtschaftlichen Bereich bisher mit durchschnittlichen Bodenabträgen argumentiert wird

Key Points

- No legal regulations exist, that ensure upper limits of tolerable soil loss in Austria
- Extreme amounts of eroded soil in agriculturally used areas originate through the coupling of heavy precipitation events and extremely unfavourable soil conditions (e.g. soil cover)
- Thresholds for extreme soil erosion events would be desirable, however, were not defined yet because average amounts of soil erosion are considered in agriculture

14.1 Terminologie des Sachverhaltes

Boden erfüllt vielfältige Funktionen, die ihn nicht nur in einem wirtschaftlichen Kontext schützenswert machen. Dabei ist der Boden Ökosystem und Lebensgrundlage für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen, bildet ein zentrales Glied in Wasser- und Nährstoffkreisläufen, stellt ein wichtiges Medium für Filter-, Puffer- und Stoffumwandlungsprozesse zum Schutz von Grundwasser dar und dient darüber hinaus als natürliches Archiv der Kultur- und Erdgeschichte. Obgleich Boden diese vielfältigen Funktionen erfüllt, konnten europaweit noch keine länderübergreifenden Regularien zum Schutz dieser Ressource verankert werden (Bückmann und Lee, 2008). Der Entwurf zur Europäischen Bodenrahmenrichtlinie (Europäische Kommission, 2006) wurde von der Europäischen Kommission 2014 wieder zurückgezogen. Auch in Österreich hat sich das Verständnis für den Boden als schützenswerte Ressource erst sukzessive weiterentwickelt. So beschränkte sich die Wertschätzung des Bodens bis

in die 1950er Jahre primär auf die landwirtschaftliche Nahrungsmittelproduktion. Mit dem steigenden Umweltbewusstsein und der Zunahme an Abwasserreinigungsanlagen ab den 1970er Jahren entstand auch eine Diskussion über die Ausbringung von Klärschlämmen auf landwirtschaftlich genutzte Böden, welche schlussendlich in die heutigen Bodenschutzgesetze der meisten österreichischen Bundesländer mündete (Strauss, 2016). Diese beinhalten auch Formulierungen zum Schutz des Bodens vor Bodenerosion. So legt beispielsweise §1 des Niederösterreichischen Bodenschutzgesetzes fest, dass »(...) die nachhaltige Bodenfruchtbarkeit und die Bodengesundheit (...) insbesondere durch Schutz vor Schadstoffbelastungen [sowie] Verhinderung von Bodenerosion und Bodenverdichtung« (NÖ BSG, 2014) zu erhalten und zu verbessern sind. Auf transnationaler Ebene wurde im Protokoll »Bodenschutz« der Alpenkonvention in Artikel 2 vertraglich festgelegt, dass geeignete Maßnahmen im Bereich des Bodenschutzes zu ergreifen seien – mit dem Ziel der Verminderung der quantitativen und qualitativen Bodenbeeinträchtigungen, insbesondere durch Anwendung bodenschonender land- und forstwirtschaftlicher Produktionsverfahren, sparsamen Umgang mit Grund und Boden, Eindämmung von Erosion sowie durch Beschränkung der Versiegelung von Böden (Alpenkonvention, 1995). Die ÖNORM L 1076 (2013) bewertet Bodenfunktionen vor Allem im Zusammenhang mit raumplanerischen Fragestellungen. Eine detaillierte Darstellung über die derzeit gültigen Rechtsnormen im Bereich Bodenschutz geben Norer und Holzer (2018). Sie charakterisieren das österreichische Bodenschutzrecht als außerordentlich zersplittert und unübersichtlich.

Im deutschsprachigen Raum bezeichnet Bodenerosion den meist durch die menschliche Landnutzung induzierten oder zumindest verstärkten Verlust des Oberbodens durch Wasser oder Wind. Im Gegensatz dazu berücksichtigt der englische Begriff »*soil erosion*« meist nur den physikalischen Prozess des Bodenabtrags, ohne entsprechenden Fokus auf den Einfluss der Landnutzung und des Landnutzungswandels durch den Menschen. Man unterscheidet folgende, unterschiedliche Bodenerosionsformen: die durch die kinetische Energie aufprallender Regentropfen ausgelöste *Splash-Erosion*, die linienhafte *Rillen-* oder *Grabenerosion*, die flächenhafte *Denudation*, die tieferliegende Bodenschichten abtragende *Tunnelerosion* und die durch Wind induzierte *Deflation* (Winderosion). In Österreich wird ein Großteil der Bodenerosionsereignisse durch Starkniederschläge ausgelöst. Da äolisch, d. h. durch Wind verursachte Erosion insbesondere in den Beckenlandschaften im Osten Österreichs und kaum in den Alpen eine Rolle spielen, wird in diesem Beitrag ausschließlich auf Extremereignisse der Wassererosion eingegangen. Es können dabei drei Teilprozesse der Bodenerosion unterschieden werden:

- 1) Die kinetische Energie der auftreffenden Regentropfen bewirkt, dass einzelne, feine Bodenpartikel aus den Aggregaten des Bodengefüges herausgeschlagen werden (engl. »splash erosion«). Diese ausgeschlagenen, feinen Bodenpartikel sind leichter durch abfließendes Wasser mobilisierbar.
- 2) Sobald die Infiltrationskapazität des Bodens überschritten ist, werden diese feinen Bodenpartikel durch den Oberflächenabfluss weiter transportiert und bewirken eine Verstopfung der Bodenporen im Oberboden (Verschlammung). Dadurch sinkt das Infiltrationsvermögen des Bodens weiter, die Menge und damit auch die Fließgeschwindigkeit und die Transportkapazität des abfließenden Wassers nehmen zu, sodass zusätzliche Bodenpartikel aus dem Bodengefüge gerissen und mittransportiert werden können.
- 3) Sinkt die Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses und somit seine Transportkapazität (beispielsweise durch geringeres Gefälle), wird das erodierte Bodenmaterial wieder abgelagert (Sedimentation).

14.1.1 Abgrenzung zu Naturgefahren

Obwohl Erosion als natürlicher Prozess angesehen werden kann, ist er dennoch eng mit Naturgefahren verknüpft. So benötigt es meteorologische Ereignisse, wie starke konvektive oder zyklonale Niederschläge oder Schneeschmelze, um Bodenmaterial zu mobilisieren. Wie die meisten Naturgefahren auch kann die Bodenerosion in den morphodynamischen, oft kaskadenartig ablaufenden Kontext von Abtrag, Transport und Sedimentation eingeordnet werden. Trotz einiger Gemeinsamkeiten im Prozessgeschehen, ist Bodenerosion von anderen Naturgefahren abzugrenzen. So sind z. B. Rutschungen durch eine gekrümmte oder hangparallele Gleitfläche definiert, an der das Bodenmaterial und das Lockersubstrat zu Tal gleitet (siehe Beitrag 18 zu *Hangrutschungen und Hangmuren*), während bei der Bodenerosion Bodenpartikel oberflächlich beziehungsweise oberflächennah mobilisiert und transportiert werden. Bodenerosion ist auch von fluviatilen Feststofftransporten zu unterscheiden (siehe Beitrag 12 zu *Fluviatilen Feststoffereignissen*), da insbesondere beträchtliche Unterschiede in den Körnungsgrößen des transportierten Materials bestehen können. Kolluvien, als korrelates Sediment, können hierbei durch geringeren Grobanteil des verlagerten Bodens in Senken und am Hangfuß auf (historische) Bodenerosionsprozesse hinweisen.

14.1.2 Der Begriff »Extremereignis« im Kontext der Bodenerosion

Die Kategorisierung eines aufgetretenen Ereignisses als ein »*Extremereignis*« bedarf einer Quantifizierung oder zumindest einer Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeit und Magnitude des damit verbundenen Prozesses (Korup und Clague, 2009). Im Kontext der Bodenerosion kann ein Ereignis zum einen anhand der Größe des gemessenen Bodenabtrags in Relation zu seiner Eintrittswahrscheinlichkeit und zum anderen anhand des wirtschaftlichen Schadens, der durch das Ereignis der Bodenerosion verursacht wurde, als »extrem« kategorisiert werden. Dieser Schaden umfasst einerseits die Ernte- beziehungsweise Bodenverluste auf beispielsweise der entsprechenden Ackerflächen, andererseits aber auch Schäden abseits der landwirtschaftlich genutzten Flächen.

Extremereignisse des Bodenabtrags können nur dann sinnvoll als solche kategorisiert und interpretiert werden, wenn lange Messzeitreihen sowohl für die auslösenden Niederschläge (Dauer und Intensitäten) als auch für den Bodenabtrag vorhanden sind. Das Auftreten von Niederschlägen und vor allem ihrer Intensität wird in Österreich durch den Hydrographischen Dienst seit Jahrzehnten koordiniert gemessen. Zur Bewertung der Erosivität von Niederschlägen, also dem Potential des Niederschlages durch kinetische Energie Partikel aus dem Bodengefüge herauszulösen, ist allerdings die Umsetzung von Niederschlagsintensitäten in kinetische Energie notwendig. Hier wurden in den letzten Dekaden wesentliche Innovationen der Messtechnik eingeführt (z. B. Disdrometer, der den Niederschlag differenzierter charakterisiert), die eine Neubewertung dieser Beziehung erleichtern werden (Angulo-Martínez et al., 2016).

Langjährige Messungen des Bodenabtrags auf landwirtschaftlich genutzten Flächen, die geeignet wären Wiederkehrwahrscheinlichkeiten relevanter Ereignisgrößen abzuleiten, existieren hingegen in Österreich fast nicht. Die einzigen, den Autoren bekannten Langzeitmessungen (mehr als 20 Jahre) werden auf einem Parzellenversuch an den Standorten Mistelbach und Pixendorf in Niederösterreich durchgeführt (Klik und Strohmeier, 2011). Eine ähnlich spärliche Datenlage findet sich auch im internationalen Kontext. Stattdessen wird in der Bodenerosionsforschung häufig das Konzept des tolerierbaren Bodenabtrags verfolgt. Bei landwirtschaftlich genutzten Böden spricht man dann von nicht tolerierbaren Bodenabträgen, wenn die durchschnittliche jährliche Abtragsmenge (in $t\ ha^{-1}$) einen Schwellenwert überschreitet, der über dem Schlag-spezifischen Grad des akzeptierbaren Bodenverlustes liegt. Diese Betrachtung ist mit zwei Problemen verbunden: Ein Durchschnitt bezieht sich auf eine bestimmte Anzahl von Jahren, die im Falle der Bodenerosion aber nicht definiert ist, was natürlich zu sehr inhomogenen und damit kaum sinnvoll vergleichbaren

Daten führt. Zusätzlich herrscht wenig Einigkeit darüber, wie hoch die Schwellenwerte des tolerierbaren Bodenabtrags liegen sollten und wie diese zu definieren sind. Auf die explizite Ausweisung tolerierbarer Bodenverluste durch Erosion wird in der österreichischen Bodenschutzgesetzgebung verzichtet, was aber sinnvoll wäre, um den quantitativen Bodenschutz zu stärken (Strauss, 2016). In der Schweizerischen Bodenschutzgesetzgebung hingegen ist in Abhängigkeit von der Oberbodenmächtigkeit ein Schwellenwertbereich von etwa $2\text{--}4\text{ t ha}^{-1}\text{ Jahr}^{-1}$ als Obergrenze tolerierbarer Bodenverluste festgelegt (VBBo, 1998). Wie die Diskussion zeigt, existiert ein allgemeingültiger Schwellenwert zur Quantifizierung eines »*extremen Ereignisses der Bodenerosion*« bisher nicht.

14.2 Einflussfaktoren des Erosionsgeschehens

Die Intensität der Bodenerosion hängt maßgeblich von einer Reihe natürlicher und anthropogener standortsspezifischer Einflussfaktoren ab, welche im Jahresverlauf sowohl stabil als auch veränderlich sein können. Die weitgehend natürlich vorgegebenen Einflussfaktoren sind klimatische, topographische und bodenspezifische Eigenschaften. Hinzu kommen die Art der (land-) wirtschaftlichen Nutzung, die auch den aktuellen Pflanzenbewuchs umfasst, sowie Schutzmaßnahmen. Diese Faktoren können die Bodenerosion sowohl begünstigen als auch vermindern. Eine umfangreiche, wenngleich nicht erschöpfende Zusammenstellung relevanter Einflussfaktoren und ihrer Wechselwirkungen ist in Abbildung 01 dargestellt. Diese Faktoren, welche die einzelnen Teilprozesse der Bodenerosion und somit die Intensität der Einzelereignisse bestimmen, sind nachfolgend im Detail aufgeführt.

14.2.1 Klima

Bodenerosion im Allgemeinen als natürlicher Abtragsprozess kommt in unterschiedlichen Formen und Intensitäten in allen klimatischen Regionen der Erde vor. Im zentraleuropäischen Raum sind für den Bodenabtrag im Speziellen meist kurzzeitige Witterungsverhältnisse, verbunden mit konvektiven Starkregenernissen, verantwortlich. Für landwirtschaftlich genutzte Flächen mit bestimmter Bewirtschaftung und Fruchtfolge ist der Zeitpunkt des Auftretens eines Starkniederschlags entscheidend für dessen Wirksamkeit (Scholz et al., 2008). Die Erosivität eines Ereignisses ist ebenso direkt abhängig von der Menge und der Intensität des Niederschlags, welche zwischen den Klimazonen sehr stark variiert. Unter dem gemäßigt-humiden Klima Österreichs ist mit einer wesentlich geringeren Erosivität der Niederschläge zu rechnen als in den Tropen

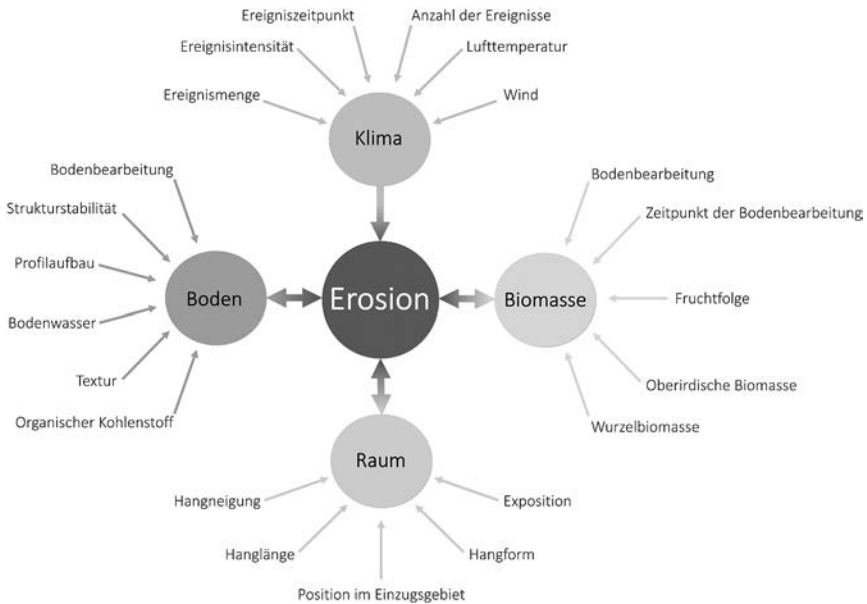


Abbildung 01: Bodenerosion als Ergebnis der Wechselwirkung von natürlichen und anthropogenen Einflussfaktoren.

Figure 01: Soil erosion as a result of the interaction between natural and anthropogenic factors.

Quelle: eigene Grafik

oder Subtropen. In Gebieten mit schneereichen Wintern kann das schnelle Abschmelzen (Bodenerosion durch Schmelzwasser) oder das Schneegleiten (Schneeschlur) ebenfalls zu nennenswertem Abtrag von Bodenmaterial führen (Tasser et al., 2005, Wiegand und Geitner, 2013). Neben dem Niederschlag wirken eine Reihe zusätzlicher klimatischer Faktoren auf das Erosionsgeschehen, so auch die Temperatur und der CO_2 -Gehalt der Atmosphäre, welche die Wasserverfügbarkeit des Bodens und damit die Entwicklung von Biomasse beeinflussen und demnach ebenfalls mitbestimmende Faktoren für die Entwicklung einer erosionsschützender Vegetationsdecke sind (Klik und Eitzinger, 2010).

14.2.2 Geomorphologische Randbedingungen

Das Erosionspotenzial an einem Standort hängt direkt von dessen Reliefposition ab. Neben der Neigung eines Hangs und der Rauigkeit der Oberfläche sind auch Exposition und Hangform sowie vertikale und horizontale Wölbung Faktoren, die den Bodenabtrag durch Wasser beeinflussen. Das Ausmaß der Bodenerosion, das durch einen Niederschlag erreicht werden kann, ist direkt mit der

Neigung und Länge eines Hanges verknüpft. So wird erst ab einer bestimmten Hangneigung unter entsprechender Oberflächenrauigkeit eine Transportkapazität des abfließenden Wassers erreicht, mit der ab einer gewissen Hanglänge (und der damit verbundenen Fließgeschwindigkeit) Bodenmaterial mobilisiert werden kann. Entsprechend sind Hangneigung und -länge, aber auch fallweise ergänzende geomorphologische Parameter, grundsätzliche und sensitive Parameter der Modelle zur Bodenerosionsabschätzung beziehungsweise -quantifizierung.

14.2.3 Boden

Neben der Erosivität des Niederschlags ist bei der Bodenerosion durch fließendes Wasser die Erodibilität des Bodens ein maßgebender Indikator für die Erosionsgefährdung eines Standorts. Diese wird im Wesentlichen von der Textur und der Struktur eines Bodens bestimmt. Die Textur ist hängt wiederum vom Ausgangssubstrat und den Verwitterungsbedingungen ab. Insbesondere schluffreiche Böden wie z. B. die lössbürtigen Böden des Weinviertels aber auch von Teilen des Alpenvorlandes sind besonders erosionsanfällig (Strauss und Klaghofer, 2004). Böden mit relativ hohem Tongehalt sind aufgrund der größeren Kohäsion der Partikel im Bodengefüge weitaus schwerer erodierbar. Neben der Korngrößenverteilung kommt der Bodenstruktur eine wichtige Rolle bezüglich der Erodibilität zu. Diese hängt zum einen von der Korngrößenverteilung des Bodens ab, zum anderen aber auch vom Gehalt des organischen Kohlenstoffs und der biologischen Aktivität. Insofern ist sie in gewissem Ausmaß auch durch entsprechende Maßnahmen steuerbar.

14.2.4 Nutzung und Management

Die Bedeckung des Bodens durch lebende oder tote Biomasse spielt eine zentrale Rolle für das Ausmaß des potentiellen Bodenabtrags einer Fläche. Sowohl lebende (Pflanzen) als auch tote (Mulchauflage o. Ä.) Biomasse reduziert die Erosionsgefährdung, einerseits durch die Reduktion der kinetischen Energie des Niederschlags, andererseits durch die Reduktion der Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses (Pimentel und Burgess, 2013) und die Zunahme der Infiltrationskapazität. Entsprechend ist das Ausmaß der Bodenbedeckung und somit der Zeitpunkt auf intensiv genutzten Ackerflächen, aber, wie neuere Studien bestätigen (Alewell et al., 2015), auch auf extensiv genutzten Grünlandflächen von besonderer Bedeutung für die Fähigkeit eines Standortes, der Bodenerosion entgegen zu wirken (Bohner, 2012).

Neben der Bodenbedeckung ist auch das landwirtschaftliche Management von großer Wichtigkeit für den Schutz des Bodens vor Erosion. Bodenbearbeitung zu ungünstigen Zeiten (z. B. bei zu nassem Boden) und der Einsatz von schweren Landmaschinen führen zur Bodenverdichtung und zu einer Verringerung der Infiltrationskapazität des Bodens. Murer et al. (2012) konnten zeigen, dass bereits ein beträchtlicher Teil ackerbaulich genutzter Flächen des Alpenvorlandes von der Verdichtungsproblematik betroffen ist. Im Grünland führt vor allem Viehtritt zu erhöhten Bodenverdichtungen, was vor allem an schwere Rinderrassen und hohe Viehbesätzen gebunden ist (Bohner et al., 2017). Darüber hinaus werden Ackerflächen in der Regel in Längsrichtung bewirtschaftet, während die Hangneigung meist unberücksichtigt bleibt. Dies kann zu begünstigten, hangabwärts gerichteten Abflusswegen führen und erhöht somit den Bodenabtrag bei erosiven Niederschlägen (Øygarden et al., 1997).

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass eine Landnutzung mit möglichst durchgehender Vegetationsdecke durch entsprechende Fruchtfolgen, Zwischenfrüchte und einem bodenschonenden und konservierenden Management die Voraussetzungen für eine Verminderung der Bodenresionsgefährdung darstellt. Dies ist umso wichtiger, als das landwirtschaftliche Management die nahezu einzige praktische Möglichkeit darstellt, das Ausmaß der Bodenerosion zu beeinflussen.

14.2.5 Räumliche Differenzierung

Obwohl für die Bodenerosion nicht notwendigerweise steile Hänge nötig sind, steigt die Quantität des erodierten Bodenmaterials auf Ackerland drastisch mit höherer Hangneigung (Pimentel et al., 1995). Die besonders anfälligen »Hotspots« der Bodenerosion sind dort zu lokalisieren, wo einerseits intensive, landwirtschaftliche Nutzung an (zum Teil zu stark) geneigten Flächen mit schluffigen Böden betrieben wird und andererseits vermehrt Starkniederschläge zu verzeichnen sind. In Österreich sind dies insbesondere die Starkniederschlagsgebiete der Südoststeiermark, das Alpenvorland und das nordöstliche Hügelland (Strauss, 2007). Abbildung 02 gibt einen Überblick über die regionale Verteilung der landwirtschaftlich induzierten Bodenerosionsgefährdung in Österreich, ermittelt durch eine Anwendung des Erosionsmodells USLE.

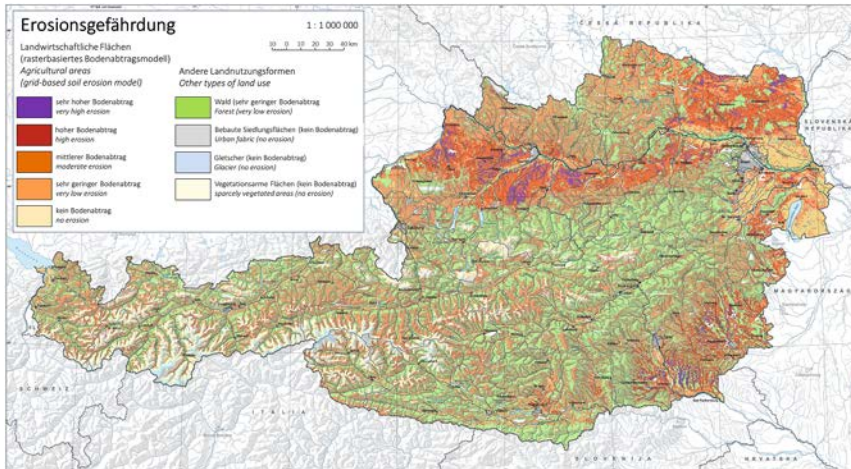


Abbildung 02: Flächenhafter Bodenabtrag durch Wasser in Österreich.

Figure 02: Areal soil loss by water in Austria.

Quelle: modifiziert nach Strauss, 2007

14.3 Typische und extreme Bodenerosion unter verschiedenen Landnutzungs- und Umweltbedingungen

14.3.1 Bodenerosion forstlich genutzter Gebiete

Im Vergleich zu ackerbaulich genutzten Flächen ist Bodenerosion bei Waldnutzung von untergeordneter Bedeutung, da Waldflächen durch das Kronendach den Boden weitestgehend vor starken Niederschlägen abschirmen (Reduzierung der kinetischen Energie auftreffender Regentropfen, sowie Puffer durch Interzeption in den Baumkronen) und Unterwuchs und Laub die Bodenrauigkeit erhöhen und somit die Abflussgeschwindigkeit des Wassers stark reduzieren (Young, 1989).

14.3.2 Ackerbau im Alpenvorland

Im Allgemeinen ist die Gefährdung durch Bodenerosion im Alpenvorland dort am höchsten zu bewerten, wo intensive landwirtschaftliche Nutzung erfolgt. Typische Größenordnungen von sowohl durchschnittlichen als auch extremen Bodenabträgen hängen dabei direkt von der Art der Bewirtschaftung ab. Sowohl Klik (2003) als auch Strauss und Schmid (2004) belegen eine Reduktion des

jährlichen Bodenabtrags bei der Verwendung von Mulch oder Direktsaat im Vergleich zu konservativen Anbaumethoden von 39 auf 0,5–4 t ha⁻¹ Jahr⁻¹ beziehungsweise von 6 auf < 1 t ha⁻¹ Jahr⁻¹ für verschiedene Regionen des Alpenvorlands in Niederösterreich. Ähnliche Werte (Reduzierung von 4–72 t ha⁻¹ Jahr⁻¹ auf 0,1–46 t ha⁻¹ Jahr⁻¹) finden sich bei Pollhammer (1997) für Gebiete in der Steiermark. Diese Ergebnisse sind sowohl ein Hinweis auf typische Ereignisgrößen als auch Minderungspotentiale durch angepasstes landwirtschaftliches Management. Extremereignisse liegen in ihrem Ausmaß wesentlich über diesen Werten und können ein Vielfaches von den durchschnittlichen jährlichen Bodenabträgen ausmachen. So wurde der von Pollhammer (1997) gemessene jährliche Bodenabtrag von 72 t ha⁻¹ im Wesentlichen durch ein einzelnes Ereignis mit 55 t ha⁻¹ bei 64 mm Gesamtniederschlag verursacht. Strauss und Klaghofer (2004) konnten für ein Niederschlagsereignis von 115 mm auf fünf Tage verteilt (ca. 23 mm Tag⁻¹) einen maximalen Bodenabtrag von ca. 226 m⁻³ ha⁻¹ (beziehungsweise 345 t ha⁻¹) aufzeichnen. Das Niederschlagsereignis, das zu diesem Bodenabtrag führte, lag mit seiner Wiederkehrwahrscheinlichkeit nur in einem Bereich von 5 bis 10 Jahren. Dieses Beispiel zeigt, dass die Betrachtung von extremen Niederschlagsereignissen alleine nicht ausreicht, um extreme Bodenabträge abzuschätzen. Die von Mabit et al. (2009) im Bezirk Mistelbach gemessenen Bodenabträge konventionell bewirtschafteter Flächen zeigen ebenfalls extreme Einzelereignisse der Bodenerosion in der Größenordnung von > 300 t ha⁻¹. Gleichzeitig wird aus den Daten der Autoren klar, dass die Größe solcher Einzelereignisse die Durchschnitte der Bodenabträge sehr stark beeinflussen.

14.3.3 Grünland- und Almwirtschaft im alpinen Raum

Bodenerosion im Grünland der Alpen ist, anders als beim Ackerbau, meist direkt an jahreszeitlich-meteorologische Bedingungen geknüpft und weniger abhängig von der jahreszeitlichen Variabilität der Bodenbedeckung. Besonders Bodenerosion durch Schneegleiten kann beachtliche, wenngleich stark variierende Erosionsraten von 0,03 bis 22,9 t ha⁻¹ Jahr⁻¹ (Meusburger et al., 2014), beziehungsweise etwa 4 t ha⁻¹ Jahr⁻¹ (durch Vieh vorgeschädigtes Grünland; Felix und Johannes, 1995) verursachen. Extremere Ereignisse der Bodenerosion sind bisher für Grünland- und Almwirtschaft in den Alpen noch nicht bekannt. Alewell et al. (2015) verbinden den tolerierbaren Bodenverlust in alpinem Grünland mit der Reproduktionsrate der dortigen Böden. Hierbei ist es nötig, die Böden standortspezifisch nach ihrer Reproduktionsrate zu klassifizieren und die Werte dem errechneten, jährlichen Abtrag gegenüberzustellen. Für das Urserental im schweizer Kanton Uri konnten Alewell et al. (2015) Reprodukti-

onsraten von 4,15 bis 8,81 t ha⁻¹ Jahr⁻¹ und jährliche Bodenabträge von 6 bis 30 t ha⁻¹ Jahr⁻¹ identifizieren. Die von Alewell et al. (2015) angewendete Methode liefert mittlere Bodenabträge. Es gibt aber ausgesprochene Schneegleitwinter, in denen – beziehungsweise im Frühling darauf – besonders starker Bodenabtrag durch Schneeschurf (Blaikenbildung) erfolgt (Wiegand und Geitner, 2013), sodass durchaus von Extremereignissen gesprochen werden kann. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass es sich bei Blaiken um flachgründige Hangrutschungen handelt und nicht um Bodenerosion im hier verwendeten Kontext. Tasser et al. (2003) konnten in diesem Zusammenhang zeigen, dass auch das Management bei Grünlandbewirtschaftung in den Alpen von zentraler Bedeutung für die Bodenerosionsgefährdung ist. So sind Mähwiesen und Weideflächen weitaus weniger abtragsgefährdet als Brachflächen. Die Quantifizierung von Bodenabträgen auf alpinen Grünlandflächen und die Abschätzung der Erosionsgefährdung bedürfen jedoch weiterer Fallstudien, insbesondere weil die Abtragsprozesse auf Grünland der höheren Lagen der Alpen seit einigen Jahrzehnten zuzunehmen scheinen.

14.4 Fallbeispiel

Die Gemeinde Michelhausen im niederösterreichischen Tullnerfeld war in den vergangenen Jahren immer wieder Schauplatz von Erosionsereignissen, die sich auch negativ im besiedelten Raum der Gemeinde auswirkten, indem einerseits flächenhafte Sedimenteinträge einzelne Wohnhäuser beschädigten, oder auch der Kanal nicht mehr in der Lage war, das Abflusswasser zu entwässern. Im Zuge der Untersuchungen zu dieser Problematik wurden auch Kartierungen zu Erosionsereignissen durchgeführt. Am 04.06.2008 fand ein Niederschlagsereignis in einer Größenordnung einer 5- bis 10-jährlichen Wiederkehr statt (ca. 15 mm Ns in 30 Minuten, insgesamt ca. 40 mm Gesamtniederschlag). Für Erosionsereignisse ist allerdings das Gefährdungspotential nicht nur von den auftretenden Niederschlägen abhängig, sondern vor Allem auch von der aktuellen Erosionsgefährdung eines Standortes, die in diesem Fall hoch war, weil zum Ereigniszeitpunkt für die angebauten Hackfruchtkulturen (Mais, Sonnenblume, Zuckerrübe) noch keine ausreichende Bodenbedeckung vorhanden war. Dementsprechend wurden auf ca. 17 % der Untersuchungsfläche Erosionsschäden festgestellt. Der durchschnittliche Bodenabtrag im Untersuchungsgebiet (267 ha) betrug 18 t/ha, maximale Bodenabträge reichten bis zu 88 t/ha. Abbildung 03a zeigt das Ausmaß der Bodenerosion im Untersuchungsgebiet. Interessant ist die Verschneidung der Bodenabträge mit den angebauten Feldfrüchten (Abbildung 03b). Es gibt zwar Hackfruchtflächen ohne Erosionsschäden (aufgrund ihrer Topographie), allerdings Erosionsschäden nur in

Verbindung mit Hackfruchtflächen (mit einer Ausnahme, einer Rebfläche). Der Einfluss der angebauten Kultur auf die Erosionsproblematik wird also sehr deutlich sichtbar.



Abbildung 03: Ausmaß der Erosionsschäden im Raum Michelhausen/NÖ (a) nach dem Niederschlagsereignis vom 04.06.2008 und Verbindung der auftretenden Erosionsschäden zum Anbau von Hackfrüchten (b).

Figure 03: Extent of soil erosion in the area of Michelhausen/NÖ (a) after the rain event of 04.06.2008 and relationship of erosion occurrence to fields with row crops (b).

Quelle: P. Strauss

14.5 Herausforderungen und zukünftige Entwicklungen

14.5.1 Prozessanforderungen und Modellvorhersagen

Eine Vielzahl von Erosionsmodellen versucht, den Bodenabtrag mittels unterschiedlicher Modellansätze abzuschätzen beziehungsweise zu prognostizieren. Eine (von mehreren) gängigen Klassifizierungen unterteilt die verschiedenen Modelle in empirisch basierte, konzeptuelle und prozessorientierte Ansätze (Pandey et al., 2016). Diese Ansätze unterscheiden sich hinsichtlich Datenverfügbarkeit, Anzahl notwendiger Eingangsdaten und zeitlicher sowie räumlicher Auflösung stark, sodass die primäre Frage jeder Modellanwendung sein muss: Wozu wird das Modell benötigt? Generell sollte hier das bekannte Forschungsprinzip von Ockhams Rasiermesser gelten (Cloeren, 1984), nachdem ein Modell nicht mehr Parameter enthalten sollte, als für den Anwendungsfall unbedingt notwendig. Dieser Grundsatz wird allerdings, wie auch Beven (1991, zitiert von Merritt et al., 2003) bemerkt, in vielen Fällen nicht eingehalten.

Der noch immer am weitesten verbreitete Modellansatz zur Berechnung des jährlichen Bodenabtrags ist die Universal Soil Loss Equation (Wischmeier und Smith, 1978) Der Bodenabtrag wird hierbei als Produkt der Einflussfaktoren

Erosivität des Niederschlags (R-Faktor), Erodibilität des Bodens (K-Faktor), Länge und Neigung des Hanges (LS-Faktor), Landnutzung (C-Faktor) und Bodenschutzmaßnahmen (P-Faktor) berechnet. Dem empirischen Modellansatz der ABAG und vergleichbarer Modelle (z. B. RUSLE2, Foster et al., 2003) stehen Modellansätze gegenüber, die einen höheren Grad der Prozessorientierung aufweisen, beispielsweise WEPP (Nearing et al., 1989), EUROSEM (Morgan et al., 1998), oder EROSION 3D (Schmidt et al., 1999).

Da die ABAG dafür entwickelt wurde, den durchschnittlichen mittleren Bodenverlust eines Jahres abzuschätzen, können Informationen zu einzelnen, meist sehr kurzzeitigen Ereignissen nicht berücksichtigt werden (Morgan et al., 1998). Für die Modellierung von extremen Ereignissen der Bodenerosion bedarf es demnach physikalisch- beziehungsweise prozessbasierter Modelle. Die Einfachheit der ABAG bietet zwar für Entscheidungsträger planerische Vorteile, ist aber durch die Multiplikation vereinfachter Faktoren nicht in der Lage, die einzelnen Mechanismen des Erosionsgeschehens abzubilden (Kirkby, 1980). Nearing et al. (1989) konnte zeigen, dass sowohl empirische als auch prozessbasierte Modelle dazu tendieren, besonders hohe Abtragsraten – und somit Extremereignisse – zu unterschätzen. Probabilistische Modellierungsansätze, wie Monte Carlo Simulationen, zeigten bisher vielversprechende Ergebnisse bei der Reduktion des statistischen Fehlers von Ergebnissen deterministischer Modellansätze (z. B. Brazier et al., 2000). Jedoch bedarf es auch in dieser Hinsicht weiterer Forschung.

14.5.2 Neue Ansätze zur Gewinnung prozessrelevanter Daten

Die bei der Verwendung von Erosionsmodellen eingesetzten Parameter werden im günstigsten Fall gemessen, im ungünstigen Fall geschätzt. Zudem gibt es dann noch jene Modellparameter, die im Regelfall dazu verwendet werden, Modellergebnisse zu kalibrieren, weil sie einerseits großen Einfluss auf die Modellergebnisse haben, andererseits eine derart große Streuung aufweisen, dass weder Messungen noch Schätzungen mit vertretbarem Aufwand zielführend sind. Um diesem Problem besser gerecht werden zu können, existiert einerseits eine Reihe von Ansätzen zur Abschätzung von Unsicherheiten bei Modellergebnissen (siehe z. B. Beven und Binley, 1992), andererseits wird natürlich auch an Verbesserungen der Messungen prozessrelevanter Werte gearbeitet. Dabei ist erforderlich, dass diese Daten eine hohe Genauigkeit und angemessene räumliche und zeitliche Auflösungen haben sowie repräsentativ für das abzubildende Gebiet und für den zu simulierenden Erosionsprozess sind. Ein Beispiel hierfür ist das Hydrological Open Air Laboratory (HOAL, Blöschl et al., 2016) in Petzenkirchen, Niederösterreich, in welchem unterschiedlichste

Sensorik zur Anwendung kommt, um zum einen prozessrelevante Daten zu erfassen, zum anderen aber auch den Erosionsprozess selbst abzubilden, um dadurch Modelle besser kalibrieren und validieren zu können. Zur kostengünstigen, flexiblen und flächendeckenden Generierung hochaufgelöster Geländemodelle mittels »*Structure from Motion*« (*SfM*) als Grundlage für prozessbasierte Erosionsmodelle werden in den letzten Jahren immer öfter sogenannte »*Unmanned Aerial Vehicle*« (*UAV*) verwendet (beispielsweise Marzoff und Poesen, 2009; Cook, 2017). Insbesondere Bodenverluste durch Extremereignisse können hiermit zeitnah und in ausreichender Auflösung erkannt und quantifiziert werden.

14.5.3 Das Problem der on-site und off-site Schäden

Beiden Gefährdungen, die durch Bodenerosion entstehen, ist generell zwischen dem direkten Bodenverlust durch auf der genutzten Fläche (»*on-site*«) und dem Eintrag des abgetragenen oder ausgewaschenen Bodenmaterials in Gerinne, Vorfluter und infrastrukturellen Einrichtungen (»*off-site*«) zu unterscheiden (Holmes, 1988).

On-site Schäden führen zur Verminderung von Bodenmaterial und somit auch von Bodenqualität, Produktivität und Wirtschaftlichkeit der landwirtschaftlichen Flächen (Miranda, 1992; Mitter et al., 2012). So beziffern beispielsweise Pimentel et al. (1995) einen Bodenabtrag von 2,8 cm mit einer Reduktion der Produktivität von 7 %. Eine aktuelle Studie wurde von Panagos et al. (2018) durchgeführt, die für die Europäische Union die Kosten von Erosion aufgrund landwirtschaftlicher Produktivitätsverluste auf 1,25 Milliarden € pro Jahr angeben.

Neben dem Bodenabtrag selbst entsteht ein Großteil der on-site Schäden durch den Verlust von Nährstoffen und Wasserspeicherkapazität. Die Nutzung beziehungsweise das Management einer Fläche ist der ausschlaggebende Steuerungsfaktor der on-site Effekte bei Bodenerosion (Strauss und Klaghofer, 2004). Wie Miranda (1992) für Studien in den USA zeigen konnte, ist bei einigen Landbesitzern Bodenerosion nicht mit dem Bewusstsein von ökonomischen und ökologischen Schäden verknüpft, was die Durchsetzung von Richtlinien und Maßnahmen zum Bodenschutz erschweren kann.

Die Art und das Ausmaß von off-site Schäden sind vielfältig und umfassen unter anderem die Beschädigung von Infrastruktur und Gebäuden, die Eutrophierung und Verschlammung von Gewässern und Wasserwegen, die Gefährdung der Tier- und Pflanzenwelt sowie die Kontamination von Rückhaltebecken, Gewässern und Böden durch abgeschwemmte Bodenpartikeln mit z. B. Pestiziden, Düngern und Schwermetallen (Pimentel et al., 1995). Diese Effekte ver-

deutlichen, dass Bodenerosion nicht nur ein Problem einzelner erosionsanfälliger Standorte ist, sondern in eine komplexe Wirkungskaskade im ökologischen und sozio-ökonomischen Kontext einzubinden ist (Kappes et al., 2012). Da diese off-site Schäden in vielen Fällen parallel mit anderen Formen der Massenbewegung (Hangrutschungen, Muren etc.) bei Extremereignissen auftreten, ist eine monetäre Bewertung der ausschliesslich durch Bodenerosion herbeigeführten off-site Schäden schwierig. In jedem Fall werden sie von Crosson (2004) als wesentlich höher als die on-site Schäden bewertet.

14.5.4 Erosion unter der Perspektive des Klimawandels

Da Erosion direkt mit der Menge und Dauer des gefallenen Niederschlags zusammenhängt, ist im Hinblick auf den Klimawandel die Einbeziehung zukünftiger Trends von Starkniederschlägen nötig. Obwohl eine signifikante Zunahme der Gesamtniederschlagsmenge in den österreichischen Alpen und dem Alpenvorland bis 2100 nicht zu erwarten ist (Klik und Eitzinger, 2010), zeigen Simulationen für zukünftige Niederschlagstrends eine Verschiebung von Sommer zu Winter und Frühjahr – mit meist geringerer Bodenbedeckung durch Pflanzen – sowie eine Zunahme von Starkniederschlagsereignissen von 15 % (Semenov und Bengtsson 2002). Mitter et al. (2014) untersuchten die Erosionsanfälligkeit von österreichischen Ackerflächen anhand von fünf Anfälligkeitsklassen nach Klimawandel-Szenarien der OECD (2001) und verschiedenen erosionsmindernden Maßnahmen. Sie konnten zeigen, dass trotz höherer zu erwartender Bodenabträge durch geänderte Niederschlagscharakteristika, Bodenverluste durch reduzierte Bodenbearbeitung und Winterbegrünung vermindert werden können. Zu ähnlichen Ergebnissen kommen Scholz et al. (2008). Allerdings sind diese Ergebnisse aufgrund der Verwendung einer adaptierten RUSLE-Version beziehungsweise des MMF Modells (Morgan, 2001), die beide durchschnittliche Bodenabträge berechnen, nicht direkt auf einzelne Extremereignisse übertragbar.

14.6 Perspektiven für Handlungsoptionen

Zur Definition eines allgemeingültigen Schwellenwertes wäre eine Verknüpfung von flächendeckend, und mit hoher zeitlicher Auflösung gewonnener Niederschlagscharakteristika mit quantitativen Erhebungen zu Bodenerosion (z. B. Erosionskartierungen) über längere Zeiträume hinweg notwendig.

Neben den gesetzlichen Vorgaben (siehe Norer und Holzer, 2018) werden seit 1995 im Österreichischen Programm für die umweltgerechte Landwirtschaft

(ÖPUL) Maßnahmen zur Verbesserung des Bodenzustandes und für den landwirtschaftlichen Bodenschutz gefördert, so z. B. Begrünungen und Bodenbedeckung durch Zwischenfrüchte, verbesserte Fruchtfolge und Vermeidung intensiver, vorbereitender Bodenbearbeitung (Baumgarten et al., 2011). Obwohl durch die ÖPUL Maßnahmen eine Reduktion des Bodenabtrags zu verzeichnen ist (Strauss, 2016), wird sich in Zukunft erst zeigen, ob diese Maßnahmen auch zum Schutz vor extremen Ereignissen der Bodenerosion beitragen können.

Für eine nachhaltige Strategie gegen die schädlichen Auswirkungen meteorologischer Extremereignisse bedarf es nach wie vor einer besseren Vernetzung beteiligter Akteure (Patek, 2007). Im Falle der Bodenerosion wäre zusätzlich ein verbessertes landwirtschaftliches Management zu kritischen Zeitpunkten des Produktionszyklus notwendig. Hierfür ist insbesondere eine bessere Kommunikation der wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Risiken durch extreme Bodenerosionsereignisse notwendig, die auch die relevanten gesellschaftlichen Gruppen erreichen muss. Parallel dazu ist allerdings auch eine Forschungsstrategie zu entwickeln, die eine Bewertung von Extremwerten für die Bodenerosion ermöglicht. Letzteres wird allerdings nur auf Grundlage eines langjährigen Monitorings zu bewerkstelligen sein.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei den Initiatoren des Extrema-Projektes, Dr. Katrin Sattler, Prof. Dr. Thomas Glade (beide Universität Wien) und PD Dr. Florian Rudolf-Miklau (Bundesministerium für Landwirtschaft, Regionen und Tourismus) für die Planung und Durchführung dieses Berichtes. Darüber hinaus danken wir zwei anonymen Gutachtern für die wertvollen Kommentare und Vorschläge zur inhaltlichen Verbesserung dieses Beitrags.

Literatur

- Alewell, C., Egli, M., Meusburger, K., 2015. An attempt to estimate tolerable soil erosion rates by matching soil formation with denudation in Alpine grasslands. *Journal of soils and sediments*, 15(6), S. 1383–1399.
- Alpenkonvention, 1995. Protokoll Bodenschutz, BGBl. III 2002/235.
- Angulo-Martínez, M., Beguería, S., Kysely, J., 2016. Use of disdrometer data to evaluate the relationship of rainfall kinetic energy and intensity (KE-I). *Science of the Total Environment*, S. 83–94. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2016.05.223.
- Baumgarten, A., Dersch, G., Hösch, J., Spiegel, H., Freudenschuss, A., Strauss, P., 2011. Bodenschutz durch umweltgerechte Landwirtschaft. Drittes Umweltökologisches Symposium Raumberg-Gumpenstein, Irdning, S. 19–24.

- Beven, K., 1991. Spatially distributed modelling: conceptual approach to runoff prediction. In: D.S. Bowles, P.E. O'Connell (Hrsg.), *Recent Advances in the Modelling of Hydrological Systems*. Kluwer Academic, Boston, S. 373–387.
- Beven, K., Binley, A., 1992. The future of distributed models model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Processes*, 6(3), S. 279–298. DOI: 10.1002/hyp.3360060305.
- Blöschl, G., Blaschke, A.P., Broer, M., Bucher, C., Carr, G., Chen, X., Eder, A., Exner-Kittridge, M., Farnleitner, A., Flores-Orozco, A., Haas, P., Hogan, P., Kazemi Amiri, A., Oismüller, M., Parajka, J., Silasari, R., Stadler, P., Strauss, P., Vreugdenhil, M., Wagner, W., Zessner, M., 2016. The Hydrological Open Air Laboratory (HOAL) in Petzenkirchen: a hypothesis-driven observatory. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(1), S. 227–255. DOI: 10.5194/hess-20-227-2016.
- Bohner, A., 2012. Grassland soils – properties and functions. *Local land & soil news*, 42/43, S. 7–9.
- Bohner, A., Gehmacher, P., Bodner, G., Strauss, P., 2017. Bodenverdichtung im Dauergrünland und ihre Auswirkung auf die Grünlandvegetation. *Die Bodenkultur*, 68, S. 113–129.
- Brazier, R.E., Beven, K.J., Freer, J., Rowan, J.S., 2000. Equifinality and uncertainty in physically based soil erosion models: application of the GLUE methodology to WEPP-the Water Erosion Prediction Project-for sites in the UK and USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 25(8), S. 825–845.
- Bückmann, W., Lee, Y.H., 2008. Schlüsselthemen eines nachhaltigen europäischen Bodenschutzes. *Natur und Recht*, 30(1), S. 1–15.
- Cloeren, H.J., 1984. Ockham's razor. In: J. Ritter, K. Gründer, G. Gabriel (Hrsg.), *Historisches Wörterbuch der Philosophie*, 6, S. 1094–1096.
- Cook, K.L., 2017. An evaluation of the effectiveness of low – cost UAVs and structure from motion for geomorphic change detection. *Geomorphology*, 278, S. 195–208.
- Crosson, P., 2004. The economics of soil erosion and maintaining soil biodiversity. In: R. Francaviglia (Hrsg.), *Agricultural Impacts on Soil Erosion and Soil Biodiversity: Developing Indicators for Policy Analysis*. OECD Expert Meeting, Rome, S. 13–20.
- Europäische Kommission, 2006. Vorschlag für eine Richtlinie des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Ordnungsrahmens für den Bodenschutz und zur Änderung der Richtlinie 2004/35/EG. Brüssel, KOM(2006) 232.
- Felix, R., Johannes, B., 1995. Bodenerosionsuntersuchungen auf Testparzellen im Kalkhochgebirge. *Mitteilungen der Österreichischen Geographischen Gesellschaft*, 137, S. 76–92.
- Foster, G.R., Yoder, D.C., Weesies, G.A., McCool, D.K., McGregor, K.C., Bingner, R.L., 2003. *RUSLE 2.0 user's guide*. USDA-Agricultural Research Service, Washington, D.C.
- Hancock, G.R., Wells, T., Martinez, C., Dever, C., 2015. Soil erosion and tolerable soil loss: Insights into erosion rates for a well-managed grassland catchment. *Geoderma*, 237, S. 256–265.
- Holmes, T.P., 1988. The offsite impact of soil erosion on the water treatment industry. *Land Economics*, 64(4), S. 356–366.
- Kappes, M.S., Keiler, M., Elverfeldt, K. von, Glade, Th., 2012. Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. *Natural Hazards*, 64(2), S. 1925–1958.

- Karl, J., 1983. Zur Erosionsgefährdung von brachgelegten Wiesen und Weiden im Berggebiet. *Geographica Helvetica*, 38(4), S. 161–165.
- Kirkby, M.J., 1980. Modelling water erosion processes. In: M.J. Kirkby, R.P.C. Morgan (Hrsg.), *Soil erosion*. Wiley, Chichester, S. 183–216.
- Klik, A., 2003. Einfluss unterschiedlicher Bodenbearbeitung auf Oberflächenabfluss, Bodenabtrag sowie auf Nährstoff- und Pestizidausträge. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 55, S. 89–96.
- Klik, A., Eitzinger, J., 2010. Impact of climate change on soil erosion and the efficiency of soil conservation practices in Austria. *Journal of Agricultural Science*, 148, S. 529–541.
- Klik, A., Strohmeier S., 2011. Verminderung von Bodenerosion durch nachhaltige Bodenbewirtschaftung. *Wasserwirtschaft*, 9, S. 20–24.
- Korup, O., Clague, J.J., 2009. Natural hazards, extreme events, and mountain topography. *Quaternary Science Reviews*, 28(11/12), S. 977–990.
- Mabit, L., Klik, A., Benmansour, M., Toloza, A., Geisler, A., Gerstmann, U.C., 2009. Assessment of erosion and deposition rates within an Austrian agricultural watershed by combining ¹³⁷Cs, ²¹⁰Pb and conventional measurements. *Geoderma* 150, S. 231–239. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.01.024>.
- Marzoff, I., Poesen, J., 2009. The potential of 3D gully monitoring with GIS using high-resolution aerial photography and a digital photogrammetry system. *Geomorphology*, 111(1/2), S. 48–60.
- Merritt, W.S., Letcher, R.A., Jakeman, A.J., 2003. A review of erosion and sediment transport models. *Environmental Modelling, and Software*, 18, S. 761–799. DOI: 10.1016/S1364-8152(03)00078-1.
- Meusburger, K., Leitinger, G., Mabit, L., Mueller, M.H., Walter, A., Alewell, C., 2014. Soil erosion by snow gliding – a first quantification attempt in a subalpine area in Switzerland. *Hydrology and earth system sciences*, 18, S. 3763–3775.
- Miranda, M.L., 1992. Landowner incorporation of onsite soil erosion costs: an application to the conservation reserve program. *American Journal of Agricultural Economics*, 74(2), S. 434–443.
- Mitter, H., Kirchner, M., Schmid, E., Schönhart, M., 2014. The participation of agricultural stakeholders in assessing regional vulnerability of cropland to soil water erosion in Austria. *Regional environmental change*, 14(1), S. 385–400.
- Mitter, H., Schönhart, M., Schmid, E., 2012. Managing Vulnerabilities to Soil Erosion under Climate Change in Austria. *Ökosystemdienstleistungen und Landwirtschaft, Herausforderungen und Konsequenzen für Forschung und Praxis*. 22. Jahrestagung der Österreichischen Gesellschaft für Agrarökonomie, Wien, S. 99–100.
- Morgan, R.P.C., 2001. A simple approach to soil loss prediction: a revised Morgan-Morgan-Finney model. *Catena*, 44, S. 305–322.
- Morgan, R.P.C., Quinton, J.N., Smith, R.E., Govers, G., Poesen, J.W.A., Auerswald, K., Chisci, G., Torri, D., Styczen, M.E., Folly, A.J.V., 1998. The European soil erosion model (EUROSEM): documentation and user guide. Silsoe College, Cranfield University, 124 S.
- Murer, E., Sisak, I., Baumgarten, A., Strauss, P., 2012. Bewertung der Unterbodenverdichtung von Ackerböden im österreichischen Alpenvorland. *Die Bodenkultur*, 63, S. 7–15.

- Nearing, M.A., Foster, G.R., Lane, L.J., Finkner, S.C., 1989. A process-based soil erosion model for USDA-Water Erosion Prediction Project technology. *Transactions of the American Society of Agricultural Engineers*, 32(5), S. 1587–1593.
- NÖ BSG, 2014. *Niederösterreichisches Bodenschutzgesetz*, LGBl 6160-5, §1.
- Norer, R., Holzer G., 2018. *Bodenschutzrecht*. NWV Verlag, 297 S.
- OECD, 2001. *Environmental indicators for agriculture, methods and results*. OECD Publications Service, Paris, 3, 410 S.
- ÖNORM L 1076, 2013. *Bodenkunde – Beurteilung von Bodenfunktionen bei bodenschutzrelevanten Fragestellungen/Eingriffen*, Wien.
- Øygarden, L., Kværner, J., Jenssen, P.D., 1997. Soil erosion via preferential flow to drainage systems in clay soils. *Geoderma*, 76(1/2), S. 65–86.
- Panagos, P., Standardi, G., Borrelli, P., Lugato, E., Montanarella, L., Bosello, F., 2018. Cost of agricultural productivity loss due to soil erosion in the European Union: From direct cost evaluation approaches to the use of macroeconomic models. *Land Degradation and Development*, 29, S. 471–484. <https://doi.org/10.1002/ldr.2879>.
- Pandey, A., Himanshu, S.K., Mishra, S.K., Singh, V.P., 2016. Physically based soil erosion and sediment yield models revisited. *Catena*, 147, S. 595–620. DOI:10.1016/j.catena.2016.08.002.
- Patek, M., 2007. *Klimawandel und Naturgefahren*. Online-Fachzeitschrift des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, S. 1–29.
- Pimentel, D., Burgess, M., 2013. Soil erosion threatens food production. *Agriculture*, 3(3), S. 443–463.
- Pimentel, D., Harvey, C., Resosudarmo, P., Sinclair, K., Kurz, D., McNair, M., Crist, S., Shpritz, L., Fitton, L., Saffouri, R., Blair, R., 1995. Environmental and economic costs of soil erosion and conservation benefits. *Science*, 267(5201), S. 1117–1123.
- Pollhammer, J., 1997. *Die Auswirkung ausgewählter ackerbaulicher, pflanzenbaulicher und landtechnischer Maßnahmen auf den Bodenabtrag durch Wasser*. Diplomarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Schmidt, J., Werner, M.V., Michael, A., 1999. Application of the EROSION 3D model to the CATSOP watershed, The Netherlands. *Catena*, 37(3–4), S. 449–456.
- Scholz, G., Quinton, J.N., Strauss, P., 2008. Soil erosion from sugar beet in Central Europe in response to climate change induced seasonal precipitation variations. *Catena*, 72(1), S. 91–105.
- Semenov, V.A., Bengtsson, L., 2002. Secular trends in daily precipitation characteristics: greenhouse gas simulation with a coupled AOGCM. *Climate Dynamics*, 19, S. 123–140.
- Strauss, P., 2007. *Flächenhafter Bodenabtrag durch Wasser*. In: Bundesministerium für Landwirtschaft, Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.), *Hydrologischer Atlas Österreich*. Wien.
- Strauss, P., 2016. *Bodenschutz in Österreich – Entwicklungen und Herausforderungen am Beispiel der Bodenerosion*. Fünftes Umweltökologisches Symposium, S. 35–38.
- Strauss, P., Klaghofer, E., 2004. Scale considerations for the estimation of processes and effects of soil erosion in Austria. In: R. Francaviglia (Hrsg.), *Agricultural Impacts on Soil Erosion and Soil Biodiversity: Developing Indicators for Policy Analysis*. OECD Expert Meeting, Rome, S. 229–238.

- Strauss, P., Schmid, G., 2004. Einfluss von Saattechnik und Zwischenfrucht auf den Oberflächenabfluss und die Bodenerosion im Zuckerrübenbau. Schriftenreihe des Bundesamts für Wasserwirtschaft, S. 91–109.
- Tasser, E., Mader, M., Tappeiner, U., 2003. Effects of land use in alpine grasslands on the probability of landslides. *Basic and Applied Ecology*, 4(3), S. 271–280.
- Tasser, E., Mader, M., Tappeiner, U., 2005. Auswirkungen von Bewirtschaftungsänderungen auf die Blaikenbildung im Gebirge. *Mitteilungen der Österreichischen Bodenkundlichen Gesellschaft*, 72, S. 193–217.
- VBBo, 1998. Verordnung über Belastungen des Bodens. Stand am 1. Juni 2012, Nr. 814.12. Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation (UVEK).
- Wiegand, C., Geitner, C., 2013. Investigations into the distribution and diversity of shallow eroded areas on steep grasslands in Tyrol (Austria). *Erdkunde*, 67(4), S. 325–343. DOI:10.3112/erdkunde.2013.04.03.
- Wischmeier, W.H., Smith, D.D., 1978. Predicting rainfall erosion losses. A guide to conservation planning. United States Department of Agriculture, *Agricultural Handbook*, 537, 66 S.
- Young, A., 1989. *Agroforestry for soil conservation*. CAB International, Wallingford, S. 318.

C Gravitative Extremereignisse

15 Gravitative Massenbewegungen – Terminologie und Charakteristika

Thomas Glade und Christian Zangerl*

Zusammenfassung

Gravitative Massenbewegungen werden in unterschiedlichen Disziplinen verschieden definiert. In diesem Beitrag wird die grundlegend international akzeptierte und gut etablierte Definition unterschiedlicher Typen gravitativer Massenbewegungen mit den jeweiligen englischen Ausgangsbegriffen und den deutschen Übersetzungen vorgestellt. Anhand eines Beispiels wird darauf hingewiesen, dass auch diese Definition in Feinheiten weiterentwickelt wird. Exemplarische Photographien verdeutlichen diese Einteilung. Ein nationaler Überblick gibt die momentane allgemein verfügbare Kenntnis zur Verteilung gravitativer Massenbewegungen in Österreich. Der für gravitative Massenbewegungen besonders wichtige Aktivitätsstatus wird grundlegend unterschieden und in mit Geschwindigkeitsangaben versehenen Tabellen präsentiert. Die für die Prozessvorbereitung, -auslösung und -bewegung beeinflussenden Faktoren werden beschrieben. Abschließend werden Hinweise für Extremereignisse bedeutende Kontexte gegeben.

Abstract

Landslides are defined differently by various disciplines. Here, the basic internationally accepted and well established definition of different landslide types including the original English and the associated German terms are introduced. Based on an example it is highlighted that also this definition is further developed. Exemplary photographs enrich this classification. A national overview of the landslide distribution provides the currently known situation in Austria. The most important information on the activity status of landslides is presented in tables showing generally the different classes and specific velocity information. Preparatory, triggering and controlling factors influencing landslide movement are described. Finally, contexts crucial for extreme landslides are explored.

Kernaussagen

- Zur Vermeidung von terminologischen Verwirrungen wird vorgeschlagen, sich bei der Bearbeitung gravitativer Massenbewegungen an das international akzeptierte und etablierte Klassifikationsschemata von Cruden und Varnes (1996) zu orientieren.

* Thomas Glade, Universität Wien, Institut für Geographie und Regionalforschung, thomas.glade@univie.ac.at.
Christian Zangerl, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Angewandte Geologie, christian.j.zangerl@boku.ac.at.

- Gravitative Massenbewegungen können überall an gefährdeten Hanglagen in Österreich auftreten.
- Der Aktivitätsstatus mit den Informationen zu Verschiebungen, Klassifikationen und Geschwindigkeitszuordnungen ist sehr hilfreich zur Beschreibung von Extremereignissen.
- Untersuchungen müssen die unterschiedlichen vorbereitenden, auslösenden und kontrollierenden Faktoren berücksichtigen, die die Initiierung und Bewegung gravitativer Massenbewegungen bestimmen.
- Extreme gravitative Massenbewegungen sind in unterschiedlicher Ausprägung auf Veränderungen im Umweltsystem (z. B. Klimawandel) und im gesellschaftlichen System (z. B. Drainagen) zurückzuführen.

Key points

- To avoid terminological confusion it is suggested to follow the internationally well accepted and established classification system finally proposed by Cruden and Varnes (1996) in landslide research.
- Landslides can occur on any prone slopes in Austria.
- The knowledge on the status of activity including the information on deformation, the general classification of activity and attributed velocity classes is very helpful to describe extreme events.
- Investigation have to consider the preparatory, triggering and controlling factors determining the landslide movement.
- Extreme landslide are, to different extends, based on environmental (e. g. climate change) and societal (e. g. drainage) changes.

15.1 Hintergrund

Gravitative Massenbewegungen spielen global eine zentrale Rolle in unserer Umwelt. Sie treten überall dort auf, wo in der Topographie Höhenunterschiede vorliegen. Diese können in Gebirgen mehrere hundert, in den Hochgebirgen gar mehrere tausend Höhenmeter sein, aber es reichen auch oftmals nur wenige Meter Höhendifferenz damit sich Massenbewegungen bilden können (z. B. in Quicktonen). Ihr Auftreten wird folglich neben den Umweltfaktoren maßgeblich über das Relief bestimmt, gleichzeitig verändert ihr Auftreten auch die Topographie und damit auch die Ausgangskonditionen für zukünftige Bewegungen irreversibel. Wenn gravitative Massenbewegungen in bewohnten Gebieten auftreten sind direkte Konsequenzen für die betroffene Gesellschaft zu erwarten. Es können aber auch weiter entfernte Gesellschaften indirekt betroffen werden, beispielsweise durch unterbrochene Infrastruktur oder gestaute Flüsse.

Grundlegend können gravitative Massenbewegungen definiert werden als »bruchlose und bruchhafte hangabwärts gerichtete Verlagerungen von Fels und/oder Lockergesteinen unter Wirkung der Schwerkraft« (Dikau und Glade, 2002

S. 40, nach UNESCO-WP/WLI, 1993). Es ist offensichtlich, dass eine Vielzahl von Disziplinen sich mit den gravitativen Massenbewegungen beschäftigen, u. a. Ingenieurgeologie, Geomorphologie, Geotechnik, aber i. S. der Konsequenzen auch Wirtschaft, Raumplanung, Politik, etc. In allen Bereichen hat sich eine entsprechende Terminologie etabliert, die sich jeweils in einzelnen Disziplinen entwickelt hat und teilweise voneinander abweicht. Aus diesem Grund hat sich in 90er Jahren unter der UNESCO Schirmherrschaft die Working Party on World Landslide Inventory (WP/WLI) zusammen gefunden, um eine einheitliche Terminologie zu etablieren (UNESCO-WP/WLI, 1990, 1991, 1993a,b, 1994, 1995). In dieser Arbeitsgruppe waren Vertreterinnen und Vertreter aus den relevanten ingenieur- und naturwissenschaftlichen Disziplinen beteiligt, um sich auf eine international gültige Terminologie zu einigen. Die Ergebnisse dieser sehr erfolgreichen Initiative wurden von Cruden und Varnes (1996) und Dikau et al. (1996) aufgegriffen, weiter verfeinert und final präsentiert. Inzwischen gibt es auch einige aktuelle Vorschläge zu Ergänzungen (z. B. Hungr et al., 2014), aber das Grundkonzept blieb erhalten. Neben den bereits vorgeschlagenen Übersetzungen der Leitbegriffe in UNESCO-WP/WLI (1993b) und Dikau et al. (1996) wurden diese Vorschläge auch in der deutschen Sprache konkretisiert und in die Fachterminologie integriert (z. B. Dikau und Glade, 2002; Zangerl et al., 2008; Prinz und Strauß, 2011). Vor diesem Hintergrund erarbeitete auch die ÖROK (Österreichische Raumordnungskonferenz) Empfehlungen für das österreichische Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplanung (ÖROK, 2015).

Ziel dieses Beitrages ist es im Folgenden, diese international anerkannte Terminologie auf Basis der bereits existierenden Arbeiten zusammenzufassen, um hiermit eine Basis für die folgenden Beiträge 16 bis 19 zu den gravitativen Massenbewegungen zu geben. Auf Grund der Fülle an Begriffen, die z. T. unterschiedlich verwendet werden, sowie den unterschiedlichen Klassifikationssystemen, ist es nötig den Bewegungsmechanismus (Kinematik), das Material, die Aktivität (Geschwindigkeit) und die Geometrie (Ausdehnung, Mächtigkeit, Volumen) im Detail zu beschreiben.

15.2 Typen gravitativer Massenbewegungen

Grundlegend werden die gravitativen Massenbewegungen in unterschiedliche Typen eingeteilt, wobei die Kriterien hierbei immer eine Kombination aus dem Material und dem Bewegungsprozess (Bewegungsmechanismus, Kinematik) darstellt. Nach Cruden und Varnes (1996) kann die bewegte Masse in die zwei Hauptklassen Fest- und Lockergestein (Boden) eingeteilt werden, wobei die Lockergesteine auf Grund ihrer unterschiedlichen geomechanischen Eigen-

schaften in eine vorwiegend grobkörnige Kornfraktion (Schutt (engl. debris), 20–80 % > als 2 mm) und eine vorwiegend feinkörnige Kornfraktion (Boden (engl. earth), 80–100 % < als 2 mm) gegliedert werden. Entsprechend UNESCO-WP/WLI (1993b) und Cruden und Varnes (1996) werden die Bewegungsmechanismen grundlegend in Fall-, Kipp-, Drift-, Fließ- und Gleitprozesse, sowie komplexe Abläufe unterschieden (Tabelle 01).

Tabelle 01: Gravitative Massenbewegungen typisiert nach Material und Bewegungsmechanismen.

Table 01: Landslide classification system based on material and type of movement.

Quelle: Dikau und Glade, 2002

Material (material)	Festgestein (rock)	Schutt (debris)	Boden (earth)
Be- wegungs- Mechanismus (mechanism of movement)			
Fallen (<i>fall</i>)	Stein- und Blockschlag; Felssturz (<i>rock falls</i>)	Fallen von Schutt (<i>debris fall</i>)	Fallen von Bodenmaterial (<i>earth fall</i>)
Kippen (<i>topple</i>)	Blockkippen; Biegekippen; Felskippen (<i>rock topple</i>)	Kippung von Schutt (<i>debris topple</i>)	Kippung von Bodenmaterial (<i>earth topple</i>)
Gleiten/ Rutschen Rotationsbew. (<i>rotational slide</i>)	Rotationsrut- schung/-glei- tung (<i>rotational slide (slump)</i>)	Rotationsrutschung (<i>rotational debris slide</i>)	Rotationsrutschung (<i>rotational earth slide</i>)
Gleiten/Rutschen Translationsbew. (<i>translational slide</i>)	Fels-, Blockgleitung (<i>translational rock slide</i>)	Schuttrutschung, -strom (<i>translational debris slide</i>)	Blattanbruch, Gras- narbenrutschung (<i>translational earth slide</i>)
Driften (<i>spreads</i>)	Felsdrift (<i>rock spread</i>)	Schuttdriften (<i>debris spread</i>)	Bodendriften, häufig mit Bodenverflüssi- gung; Bewegung in Quickton (<i>earth spread</i>)
Fließen (<i>flow</i>)	Felsfließen, -lawine; (Tälzuschub, Sackung) (<i>rock flow / deep creep</i>)	Mure, Murgang; Schuttstrom (<i>debris flow</i>); Schuttlawine (<i>debris avalanche</i>)	Erd-/Schlamm- strom (<i>earth/mud flow</i>); soil creep); Sandfließen (<i>sand flow</i>); Torfstrom (<i>peat flow</i>)

((Fortsetzung))

Material (<i>material</i>)	Festgestein (<i>rock</i>)	Schutt (<i>debris</i>)	Boden (<i>earth</i>)
Be- wegungs- Mechanismus (<i>mechanism of movement</i>)			
Komplex (<i>complex</i>)	Sturzstrom; Bergsturz; Bergzerreißung; Großhangdeformation (<i>slope deformation</i>)	Tiefgründige Hangdeformation (<i>slope deformation</i>)	Flachgründiges Bodenkriechen (<i>shallow soil creep</i>)
	Kombination von zwei oder mehr unterschiedlicher Typen (<i>Combination of two or more principle types of movement</i>)		

Hungr et al. (2014) erweitern diese Unterteilung auf Basis geotechnischer und ingenieurgeologischer Kriterien und führen eine sehr detaillierte Unterteilung der Lockergesteine in die fünf Lockergesteinstypen Ton (engl. clay), Schlamm (engl. mud), Schluff, Sand, Kies, Steine und Blöcke (engl. silt, sand, gravel, boulders), Schutt (engl. debris) und Torf (engl. peat) ein (Tabelle 02). Des Weiteren integrieren sie in ihren Vorschlag den Prozesstypen der Solifluktion (engl. solifluction). Per Definition ist dieser Prozesstyp jedoch gebunden an eine Auftauschicht im Permafrost, weshalb die grundlegende, bereits vorher dargestellte Definition der gravitativen Massenbewegungen hierfür nicht mehr korrekt ist. Zusätzlich verzichten Hungr et al. (2014) auf die Kategorie »Komplexe Bewegung« und erweitern den Grundtyp der Hangdeformation (engl. slope deformation). Dieser beschreibt extrem bis sehr langsame z. T. sehr große Massenbewegungen in Fest- und Lockergesteinen (Tabelle 02). Zusätzlich schlagen sie vor, dass Blockstürze, sowie kleinvolumige Felsstürze dem Prozess Stürzen/Fallen zugeordnet werden sollen, während größere Ereignisse mit ausgeprägter dynamischer Interaktion der Gesteinsfragmente dem Fließen zuzuordnen sind (z. B. Felslawine, Sturzstrom). Inwieweit diese neue Gliederung in Zukunft angenommen und sich durchsetzen wird, bleibt abzuwarten.

Tabelle 02: Überarbeitete Typisierung gravitativer Massenbewegungen basierend auf Material und Bewegungsmechanismus.

Table 02: Revised landslide classification system based on material and mechanism of movement.

Quelle: modifiziert nach Hungr et al., 2014

Bewegungs- mechanismus	Festgestein	Lockergestein
Fallen, Stürzen (<i>fall</i>)	Stein- und Blockschlag, kleinvolumiger Felssturz (<i>rock fall</i>)	Fallen/Stürzen von Lockergestein (<i>boulder/ debris/ silt fall</i>)
Kippen (<i>topple</i>)	Blockkippen (<i>rock block topple</i>) Biegekippen (<i>rock flexural topple</i>)	Blockkippen von Lockergestein (<i>gravel/ sand/ silt/ topple</i>)
Gleiten (<i>slide</i>)	Rotationsgleitung in Festgestein (<i>rock rotational slide</i>) Translationsgleitung in Festgestein (<i>rock planar slide</i>) Keilförmige Felsgleitung (<i>rock wedge slide</i>) Tiefgründige Felsgleitung mit ausgeprägter Interndeformation (<i>rock compound slide</i>) Felsgleitung mit unregelmäßig ausgebildetem Ablösehorizont (<i>rock irregular slide</i>)	Rotationsgleitung in feinkörnigem Lockergestein (<i>clay/ silt rotational slide</i>) Translationsgleitung in feinkörnigem Lockergestein (<i>clay/ silt planar slide</i>) Schuttgleitung (<i>gravel/ sand/ debris slide</i>) Feinkörnige Lockergesteinsgleitung mit ausgeprägter Interndeformation (<i>clay/ silt compound slide</i>)
Driften, Zergleiten (<i>spread</i>)	Driften, Zergleiten von Festgestein (<i>rock slope spread</i>)	Driften in feinkörnigem Lockergestein durch Bodenverflüssigung (<i>sand/ silt liquefaction spread</i>) Driften in Quickton (<i>sensitive clay spread</i>)
Fließen (<i>flow</i>)	Felslawine (<i>rock avalanche</i>)	Sand-/ Schluff- oder Schutt-Strom (<i>dry sand/ silt/ debris flow</i>) Sand-/Schluff- oder Schutt- Fließrutschung (<i>sand/ silt/ debris flowslide</i>) Quickton- Fließrutschung (<i>sensitive clay flowslide</i>) Murgang (<i>debris flow</i>) Schlammstrom (<i>mud flow</i>) Schuttlawine (<i>debris avalanche</i>) Erdstrom (<i>earth flow</i>) Torfstrom (<i>peat flow</i>)
Hang- deformation (<i>slope deformation</i>)	Großhangdeformation in Festgestein (<i>mountain slope deformation</i>) Hangdeformation in Festgestein (<i>rock slope deformation</i>)	Tiefgründige Hangdeformation in Lockergestein (<i>soil slope deformation</i>) Flachgründiges Bodenkriechen (<i>soil creep</i>)

Es ist evident, dass ein Großteil der real auftretenden gravitativen Massenbewegungen nicht nur einem Bewegungs- und Materialtyp entsprechen. Meist sind es Kombinationen von Prozessen und Materialien, z. B. startet die Bewegung im Quellgebiet mit einer Rotationsrutschung aus intakten Schollen, die sich im Bewegungsablauf zerkleinern, gegebenenfalls Wasser aufnehmen und sich dann zu Fließprozessen mit hohem Feinmaterialanteil entwickeln können. Diese können große Reichweiten erreichen. Trotzdem ist es hilfreich, sich dieser Grobeinteilung bewusst zu sein, um dann die jeweils individuelle gravitative Massenbewegung nach dem vorherrschenden Material und Bewegungsmechanismus zu klassifizieren. Einige zentrale Bewegungsmechanismen sind in Abbildung 01 dargestellt. Verschiedene Beispiele unterschiedlicher Typen gravitativer Massenbewegungen finden sich in Abbildung 02.

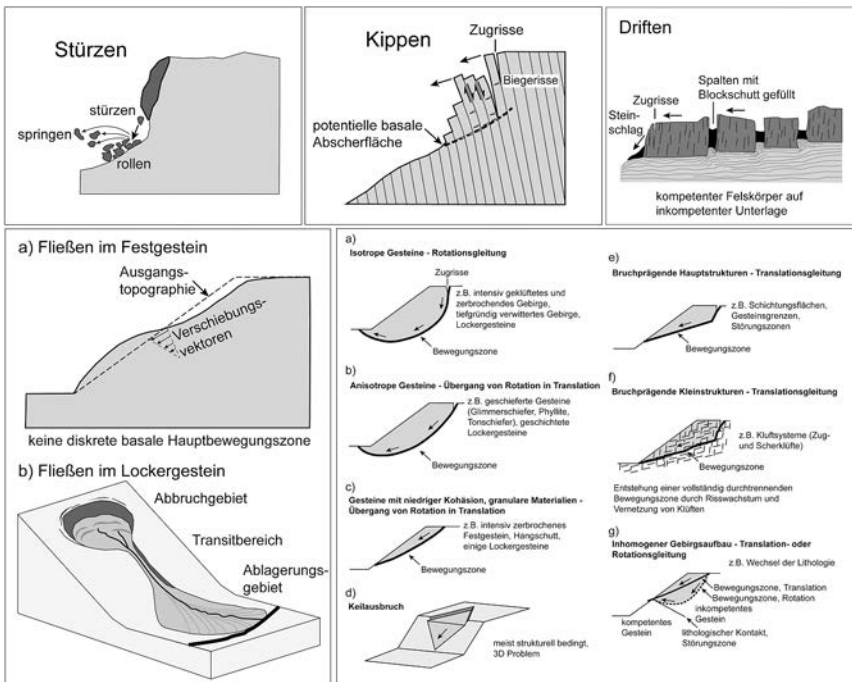


Abbildung 01: Unterschiedliche Bewegungsmechanismen gravitativer Massenbewegungen (tabellarische Übersicht siehe Tabelle 01 und 02).

Figure 01: Different movement mechanisms of landslides (listed in Table 01 and 02).

Quelle: nach Zangerl et al., 2008

In Österreich treten alle unterschiedlichsten Typen gravitativer Massenbewegungen auf. Leider liegen Informationen zur Lokalität, dem Typ der gravitativen Massenbewegung und der entsprechend Detailinformationen nur sehr spärlich

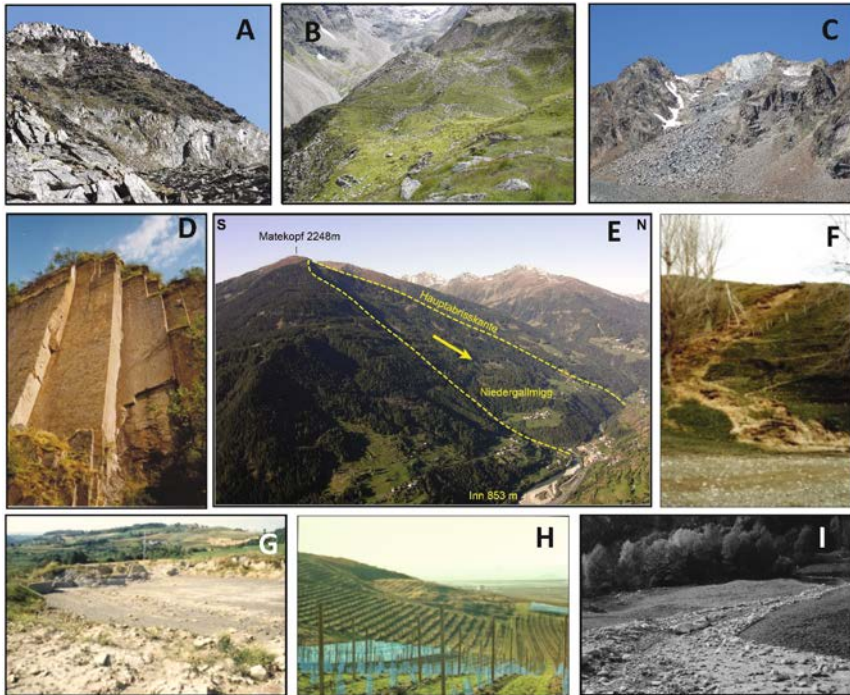


Abbildung 02: Unterschiedliche Typen gravitativer Massenbewegungen, A) Biegekippen, AUT; B) Bergzerreißung, Brand, AUT; C) Felslawine Luibiskogel, AUT; D) Felskipplung, Ahrtal, DE; E) Felsgleitung Niedergallmig, AUT; F) Bodenfließen, Wairarapa, NZ; G) Translationsrutschung, Piemonte, I; H) Rotationsrutschung, Rheinhessen, DE; I) Mure, CH.

Figure 02: Case studies of different landslide types: A) Flexural toppling in schist and gneisses, AUT; B) Rock slope deformation, Brand, AUT; C) Rock avalanche Luibiskogel, AUT; D) Block toppling, Ahrtal, DE; E) Rock compound slide, Niedergallmig, AUT; F) Earth flow, Wairarapa, NZ; G) Translational slide, Piemonte, I; H) Rotational slide, Rheinhessen, DE; I) Debris flow, CH. *Quelle:* A) C. Zangerl, B) C. Zangerl, C) C. Zangerl, D) T. Glade, E) C. Zangerl, F) T. Glade, G) R. Dikau, H) T. Glade, I) H. Gärtner

vor. Solche Daten liegen häufig in den jeweiligen Behörden, bei Universitäten oder bei Ingenieurbüros vor, sind jedoch nicht immer allgemein verfügbar. Die Geologische Bundesanstalt GBA verfolgt das Ziel, die verfügbaren Informationen zentral in einer Prozessdatenbank zusammenzuführen. Hierbei werden die einzelnen Prozessstypen in Prozessgruppen zusammengefasst und gespeichert. Diese Datenbank wurde und wird im Rahmen des Schwerpunktprogrammes GEORIOS (GEORIsiken OeSTERreich), welches seitens des Bundesministeriums für Bildung, Wissenschaft und Forschung finanziert wird, bearbeitet. Der Bestand vom Oktober 2019 ist in Abbildung 03 präsentiert. Eine Auswahl von Prozessen gravitativer Massenbewegungen wird im Beitrag 16 zu *Felsgleitung, Felslawine und Erd-/ Schuttstrom*, Beitrag 17 zu *Steinschlag und Felssturz*, Bei-

trag 18 zu *Hangrutschungen und Hangmuren* und Beitrag 19 zu *Muren* vorgestellt.

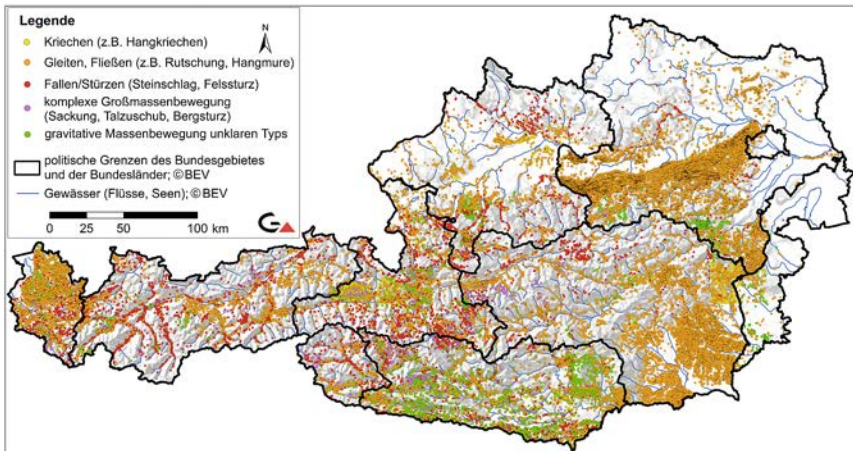


Abbildung 03: Verteilung der verfügbaren Informationen über unterschiedliche gravitative Massenbewegungen in Österreich. Hinweis: Aus einem Punkt kann weder eine Frequenz noch eine Magnitudeninformation abgeleitet werden, nur die räumliche Verortung ist gegeben.

Figure 03: Distribution of the available information on different landslide types in Austria. Note: It is not possible to delineate any landslide frequency and magnitude information from any point, only the spatial location is provided.

Quelle: Auszug der Prozessdatenbank GEORIOS mit Stand Okt. 2019 der Geologischen Bundesanstalt. Darstellungsgrundlagen: Politische Grenzen, Gewässer und Reliefschattenbild © BEV

15.3 Aktivitätsstatus gravitativer Massenbewegungen

Der Aktivitätsstatus ist essentiell für jede Betrachtung des momentanen Zustandes einer gravitativen Massenbewegung. In Anlehnung an die UNESCO-WP/WLI (1993a, 1995) und Cruden und Varnes (1996) können zur Beschreibung des Aktivitätsstatus von gravitativen Massenbewegungen acht Aktivitätszustände unterschieden werden (Tabelle 03).

Gerade im Hinblick auf Extremereignisse ist die Einordnung des Aktivitätsstatus von großer Bedeutung. Diese acht Klassen können in die drei Hauptklassen aktiv, momentan inaktiv und dauerhaft inaktiv gegliedert werden. »Aktiv« bedeutet, dass das entsprechende Objekt aktuell in Bewegung ist, seien es wenige Zentimeter im Jahr oder eben schnell mit mehreren Metern pro Sekunde (Klasse 1 und 2). Unter »momentan inaktiv« werden alle gravitativen Massenbewegungen charakterisiert, die momentan nicht in Bewegung sind.

Dazu zählen Massenbewegungen die i) sich innerhalb der letzten 12 Monate nicht bewegt hatten, ii) im letzten jährlichen Zyklus zwar bewegt hatten, jedoch aktuell keine Bewegungen mehr zeigen oder iii) im Moment inaktiv sind, jedoch durch geänderte Einflussfaktoren wieder reaktiviert werden können (Klasse 3, 4 und 5). Die dritte Hauptklasse beinhaltet alle inaktive Massenbewegungen, die i) nicht mehr durch die ursprünglichen Faktoren reaktiviert werden können, ii) durch Sanierungsmaßnahmen stabilisiert wurden oder iii) unter anderen geomorphologischen bzw. klimatischen Bedingungen entstanden sind (Klasse 6, 7 und 8). Diese inaktiven Massenbewegungen erreichten einen Zustand, bei dem die Bewegungen abgeschlossen sind und es auch keine Indizien gibt, dass diese wieder initiiert werden.

Tabelle 03: Aktivitätsstadien gravitativer Massenbewegungen.

Table 03: State of landslide activity.

Quelle: Cruden und Varnes, 1996

Klasse	Aktivitätsstatus	Beschreibung
1	Aktiv (<i>active</i>)	Massenbewegung, die gegenwärtig in Bewegung ist
2	Reaktiviert (<i>reactivated</i>)	Massenbewegung, die nach einer inaktiven Phase gegenwärtig wieder aktiv ist
3	Inaktiv (<i>inactive</i>)	Massenbewegung, die sich innerhalb der letzten 12 Monate nicht bewegt hat
4	Blockiert (<i>suspended</i>)	Massenbewegung, die sich im letzten jährlichen Zyklus bewegt hat, aber im Moment inaktiv ist
5	Latent (<i>dormant</i>)	Inaktive Massenbewegung, die durch geänderte Einflussfaktoren wieder reaktiviert werden kann
6	Abgeschlossen (<i>abandoned</i>)	Inaktive Massenbewegung, die nicht mehr von ihren ursprünglichen Faktoren beeinflusst wird
7	Stabilisiert (<i>stabilized</i>)	Inaktive Massenbewegung, deren Bewegung durch Sanierungsmaßnahmen reduziert bzw. beendet wurde
8	Relikt, fossil (<i>relict, fossil</i>)	Inaktive Massenbewegung, die unter anderen geomorphologischen bzw. klimatischen Bedingungen entstanden ist und aktuell die Landschaft prägt

Bei aktiven gravitativen Massenbewegungen muss in verschiedene Geschwindigkeitsklassen unterschieden werden. Diese wurden von Varnes (1954, 1978) erstmals erfasst, durch UNESCO-WP/WLI (1993a, 1995) vereinheitlicht und in folgenden Beiträgen übernommen (z. B. Cruden und Varnes, 1996; Glade und Stötter, 2007; Bell et al., 2010). Zangerl et al. (2008) ordneten den unterschiedlichen Bewegungsklassen eine Geschwindigkeit für die verschiedenen Arten der Bewegung zu und schlugen eine Beschreibung jeder Klasse vor (Abbildung 04).

Klasse	Beschreibung	Geschwindigkeit	Art der Bewegung					
			Fallen	Kippen	Gleiten	Fließen	Driften	Hangdeformation
7	extrem rasch	5×10^3 mm/s	■	■	■	■	■	
6	sehr rasch	5 m/s						
5	rasch	5×10^1 mm/s 3 m/min						
4	mäßig	5×10^{-1} mm/s 1,8 m/h						
3	langsam	5×10^{-3} mm/s 158 m/a						
2	sehr langsam	5×10^{-5} mm/s 1,6 m/a						
1	extrem langsam	5×10^{-7} mm/s 16 mm/a						■

Abbildung 04: Geschwindigkeitsklassen gravitativer Massenbewegungen.

Figure 04: Landslide velocity classes.

Quelle: nach Zangerl et al., 2008

Es ist offensichtlich, dass eine Bewegung unabhängig von der Art, bzw. des Typs einer gravitativen Massenbewegung unterschiedlich im zeitlichen Ablauf stattfindet. Einige der unterschiedlichen Bewegungsverläufe sind in der Abbildung 05 dargestellt. Grundlegend können die Verschiebungen A) in eine langsame Grundaktivität mit periodischen Beschleunigungsphasen, B) in eine beschleunigte Bewegung mit Bruch und entweder Übergang in einen anderen meist schnellen Bewegungsmechanismus (z. B. Felslawine) oder in eine Stabilisierungsphase (z. B. Rutschung), C) in eine langsam stabilisierende Bewegung mit ursprünglich schnellen Initialbewegungen und D) in den sehr raschen Übergang in ein Bruchstadium mit anschließend schneller Bewegung und Stabilisierung unterteilt werden. Selbstverständlich gibt es auch alle erdenklichen weiteren Kombinationen, denn der eigentliche zeitliche Verlauf hängt von den beeinflussenden Faktoren ab, die im folgenden Kapitel erläutert werden.

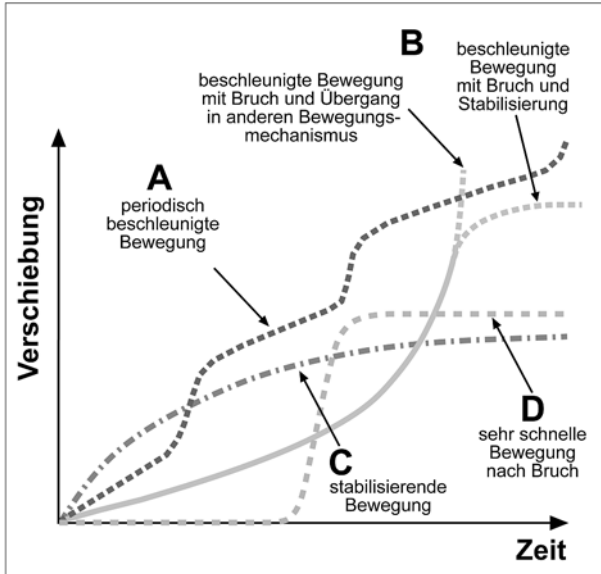


Abbildung 05: Schematische zeitliche Veränderung der Verschiebung: A) Langsame Grundaktivität mit periodischen Beschleunigungsphasen, B) beschleunigte Bewegung mit Bruch und entweder Übergang in einen anderen meist schnellen Bewegungsmechanismus oder in eine Stabilisierungsphase, C) in eine sich langsam stabilisierende Bewegung nach einer sehr schnellen Initialbewegung, D) sehr rascher Übergang in ein Bruchstadium mit anschließend schneller Bewegung und anschließender Stabilisierung.

Figure 05: Schematic temporal change of displacement: A) slow basic activity with periodic acceleration phases, B) accelerated movement with failure and either change of the type of movement to rapid landslides or stabilisation, C) advancing stabilisation after an initial high activity phase, D) slope failure followed by fast movement and stabilisation.

15.4 Beeinflussende Faktoren

In diesem Kontext sind natürlich auch die bewegungsdeterminierenden Faktoren entscheidend. Basierend auf Crozier (1989) wird hierbei ein Hangsystem in vorbereitende, auslösende und kontrollierende Faktoren eingeteilt (Abbildung 06).

Die grundlegende Disposition ergibt sich aus der Kombination der vorbereitenden und der auslösenden Faktoren. Unter den vorbereitenden Faktoren fallen beispielsweise die Topographie (z. B. Hangneigung, Hanglänge, Exposition), die Eigenschaften der Fest- und Lockergesteine, die Vegetation und die Hanghydrologie bzw. Hydrogeologie. Die auslösenden Faktoren umfassen besonders die hydrometeorologischen Gegebenheiten (z. B. Starkregen, Schneeschmelze), seismische Impulse durch Erdbeben, aber auch menschliche Ein-

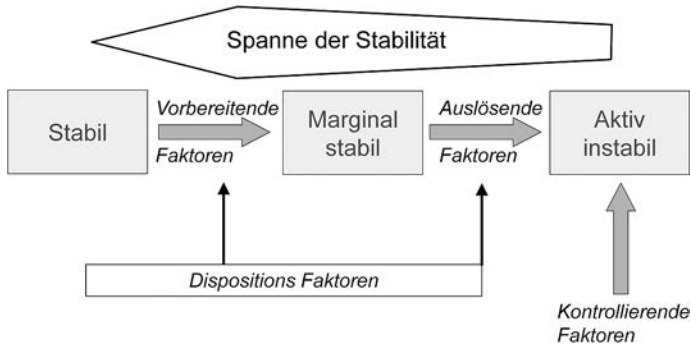


Abbildung 06: Die Spanne der Hangstabilität in Bezug zu den unterschiedlichen vorbereitenden, auslösenden und kontrollierenden Faktoren.

Figure 06: The span of stability in relation to the different preparatory, triggering and controlling factors.

Quelle: Glade und Crozier, 2005, basierend auf Crozier, 1989

flüsse wie z. B. Sprengungen. Die kontrollierenden Faktoren determinieren den Bewegungsablauf der ausgelösten Massenbewegung. Eine Übersicht der unterschiedlichen Faktoren in Bezug auf unterschiedliche Charakteristika ist in Tabelle 04 zusammengefasst.

Tabelle 04: Übersicht unterschiedlicher vorbereitender, auslösender und kontrollierender Faktoren in Bezug auf verschiedene Charakteristika.

Table 04: Overview of different preparational, triggering and controlling factors in context with different characteristics.

Quelle: Dikau und Glade

Ursache	vorbereitende Faktoren (Disposition)	auslösende Faktoren (Trigger)	Bewegungs-kontrollierende Faktoren
Geologie	Diskontinuität ¹ (z. B. Schichtung, Schieferung, Klüfte, Störungen) Verwitterung Isostasie	Erdbeben Vulkanausbrüche	Gesteinstypen Diskontinuität ¹ (z. B. Schichtung, Schieferung, Klüfte, Störungen)
Klima	langanhaltender Vorregen Schneesmelze Frost-Tau Zyklen	Niederschlag ¹ (Intensität, Menge) schnelle Schneeschmelze	Niederschlag (Intensität, Menge)

((Fortsetzung))

Ursache	vorbereitende Faktoren (Disposition)	auslösende Faktoren (Trigger)	Bewegungs-kontrollierende Faktoren
Boden	Verwitterung geotechnische Materialeigenschaften Bodenart und -typ Schrumpf-Schwell Zyklen subterrane Erosion (z. B. Tunnelerosion)	nicht zutreffend	Wassersättigung Mächtigkeit des Bodens
Vegetation	Natürliche Vegetationsänderung ¹ (z. B. Waldbrand, Trockenheit)	nicht zutreffend	Vegetation
Hydrologie	auftauender Permafrost	Schnelle Schwankungen des Grundwasserspiegels, Porenwasserdrucks	Gerinnerauhigkeit Weitertransport bewegter Massen
Topographie	Hangexposition ¹ Hanghöhe ¹	nicht zutreffend	Hangneigung ¹ Hangwölbung ¹ Tiefenlinien ¹
Anthropogen	Entwaldung Staudambau Entfernung des Hangfußes Belastung des Oberhangs Bewässerung Bergbau künstliche Bewegung (z. B. Sprengung) undichte Wasserversorgung	Hanganschnitte ¹ Hangunterschneidung ¹ Auflast ¹	Künstliche Verbauung Dämme Gerinnebegradigung, -verkleinerung, -vergrößerung

¹ diese Faktoren können, je nach Stabilitätszustand des Hanges, sowohl vorbereitend, auslösend als auch kontrollierend wirken

15.5 Bedeutung für Extreme

Gerade im Hinblick auf extreme Ereignisse muss das Auftreten von gravitativen Massenbewegungen sehr differenziert betrachtet werden. Das »Extreme« kann gesehen werden im Kontext der bewegten Masse (z. B. Mio. m³), der Bewegungsgeschwindigkeit (z. B. m/s) oder eben auch in Bezug auf die direkten oder indirekten Konsequenzen (z. B. verschüttete Siedlung oder unterbrochene Verkehrswege). Häufig müssen hier auch die potenziellen Konsequenzen im

Sinne von Kaskadeneffekten berücksichtigt werden (z. B. ausbrechende Seen, die sich auf Grund großer tiefgründiger Massenbewegungen gebildet hatten oder Mure nach einer Lockergesteinsrutschung, die das Gerinne erreichte). Nicht zu vergessen sind auch die potenziellen Einflüsse der Gesellschaft auf die Hangstabilität, beispielsweise durch die direkte Modifikation der Geländeoberfläche (z. B. im Rahmen von Flurbereinigung) oder durch die indirekte Veränderung der Hanghydrologie und -hydrogeologie über Drainagen.

Auf Basis dieser grundlegenden Einführung in die unterschiedlichen Aspekte der gravitativen Massenbewegungen werden in den folgenden Hauptkapiteln Beispiele aus dem österreichischen Alpenraum präsentiert. Besonders der Klimawandel verändert den Gebirgsraum nachhaltig, wobei grundlegende Arbeiten zu den zukünftig zu erwartenden Veränderungen bei gravitativen Massenbewegungen darauf hinweisen, dass – trotz klarer Tendenzen – Zusammenhänge zwischen Klimawandel und verändertem Auftreten gravitativer Massenbewegungen bisher noch nicht uneindeutig festzustellen sind. Dies führt zu großen Unsicherheiten, die darauf begründet sind, dass sich die verschiedenen vorbereitenden, auslösenden und bewegungskontrollierenden Faktoren überlagern, d. h. dass auch anthropogene Veränderungen über Drainagen oder Landnutzungsänderungen massive Veränderungen in den Hangsystemen hervorrufen – und sich deshalb geändertem Prozessgeschehen nicht uneindeutig auf den Klimawandel zurückführen lassen (siehe u. a. Glade et al., 2014, 2017).

»Extreme« gravitative Massenbewegungen können hierbei aus ganz unterschiedlichen Kontexten auftreten – den entsprechenden Wissenstand wird in den folgenden Beiträgen für die unterschiedlichen Bewegungsmechanismen der gravitativen Massenbewegungen (Beitrag 16 zu *Felsgleitungen, Felslawinen und Erd-/Schuttströme*; Beitrag 17 zu *Steinschlag und Felssturz*; Beitrag 18 zu *Hangrutschungen und Hangmuren*; Beitrag 19 zu *Muren*) erläutert.

Literatur

- Bell, R., Mayer, J., Greiving, S., Glade, T., 2010. Zur Bedeutung eines integrativen Frühwarnsystems für gravitative Massenbewegungen. In: R. Bell, J. Mayer, S. Greiving, T. Glade (Hrsg.), *Integrative Frühwarnsysteme für gravitative Massenbewegungen (ILEWS). Monitoring, Modellierung, Implementierung*. Klartet Verlag, Essen, S. 11–16.
- Crozier, M.J., 1989. *Landslides: Causes, consequences and environment*. Routledge, 252 S.
- Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996. *Landslide types and processes*. In: A.K. Turner, R.L. Schuster (Hrsg.), *Landslides: Investigation and mitigation. Special Report 247*. Washington, D.C., S. 36–75.
- Dikau, R., Brunsden, D., Schrott, L., Ibsen, M. (Hrsg.), 1996. *Landslide Recognition. Identification, movement and causes*. Chichester, Wiley.

- Dikau, R., Glade, T., 2002. Gefahren und Risiken durch Massenbewegungen. *Geographische Rundschau* 54(1), S. 38–45.
- Glade, T., Bell, R., Dobesberger, P., Embleton-Hamman, C., Fromm, R., Fuchs, S., Hagen, K., Hübl, J., Lieb, G., Otto, J.-C., Perzl, F., Peticzka, R., Pranger, C., Samimi, C., Sass, O., Schöner, W., Schröter, D., Schrott, L., Zangerl, C., Zeidler, A., 2014. Der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre. Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (Hrsg.), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, S. 557–600.
- Glade, T., Crozier, M.J., 2005. The nature of landslide hazard impact. In: T. Glade, M.G. Anderson, M.J. Crozier. (Hrsg.), *Landslide hazard and risk*. Wiley, Chichester S. 43–74.
- Glade, T., Stötter, H., 2007. Gravitative Massenbewegungen und Schneelawinen. In: C. Felgentreff, T. Glade (Hrsg.), *Naturrisiken und Sozialkatastrophen*. Spektrum Akademischer Verlag, Berlin, S. 151–163.
- Glade, T., Hoffmann, P., Thonicke, K., 2017. Dürre, Waldbrände, gravitative Massenbewegungen und andere Naturgefahren. In: G. Brasseur, D. Jacob, S. Schuck-Zöllner (Hrsg.), *Klimawandel in Deutschland*, S. 111–121.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L. 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11(2), 167–194.
- ÖROK (Hrsg.), 2015. Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplanung. ÖROK Schriftreihe 193, Wien.
- Prinz, H., Strauß, R., 2011. *Ingenieurgeologie*. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 838 S.
- UNESCO-WP/WLI, 1990. A suggested method for a reporting a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 41, S. 5–12.
- UNESCO-WP/WLI, 1991. A suggested method for a landslide summary. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 43, S. 101–110.
- UNESCO-WP/WLI, 1993a. A suggested method for describing the activity of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 47, S. 53–57.
- UNESCO-WP/WLI, 1993b. *Multilingual Landslide Glossary*. International Geotechnical Societies. UNESCO Working Party on World Landslide Inventory, BiTech Publishers Ltd.
- UNESCO-WP/WLI, 1994. A suggested method for reporting landslide causes. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 50, S. 71–74.
- UNESCO-WP/WLI, 1995. A suggested method for describing the rate of movement of a landslide. *Bulletin of the International Association of Engineering Geology*, 52, S. 75–78.
- Varnes, D.J., 1954. Landslide types and processes. In: E.B. Eckel (Hrsg.), *Landslides and engineering practice*. Special report 28. Highway research board. National Academy of Sciences, Washington, D.C., S. 20–47.
- Varnes, D.J., 1978. Slope movement types and processes. In: R.L. Schuster, R.J. Krizek. (Hrsg.), *Landslides, analysis and control*. Special report 176. Transportation research board, National Academy of Sciences, Washington, D.C., S. 11–33.
- Zangerl, C., Prager, C., Brandner, R., Brückl, E., Eder, S., Fellin, W., Tentschert, E., Poscher, G., Schönlaub, H., 2008. Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen. *Geo.Alp*, 5, S. 1–51.

16 Felsgleitung, Felslawine und Erd-/Schuttstrom

Christian Zangerl, Martin Mergili, Christoph Prager,
Johann-Thomas Sausgruber und Johannes T. Weidinger*

Zusammenfassung

Extrem schnelle Felsgleitungen und Felslawinen mit allgemein großen Energien und Reichweiten können Menschenleben sowie Siedlungs- und Wirtschaftsräume und Infrastruktur gefährden bzw. zerstören. Bei langsamen Felsgleitungen und Erd-/Schuttströmen, die häufig durch Reaktivierungs- und Beschleunigungsphasen gekennzeichnet sind, ist meist ausreichend Zeit vorhanden, um die betroffenen Personen zu evakuieren, die Sachschäden können aber wie bei den schnellen Bewegungen enorm sein. Im Alpenraum können für alle der erwähnten Prozesse aufgrund der Chronik sowie von ausreichenden Untersuchungen und Unterlagen (Lithologie, Strukturgeologie, Topographie, Hydrogeologie, Geomechanik) die gefährdeten Bereiche regional als bekannt angenommen werden. Hingegen bleibt die räumlich-zeitliche Vorhersage konkreter Extremereignisse trotz dieses Wissenstandes und moderner Untersuchungs- und Messmethoden nach wie vor eine Herausforderung. Dies erklärt sich aus dem Umstand, dass einerseits ein potentielles Extremereignis häufig nicht im Vorfeld räumlich lokalisiert werden kann und andererseits die Beschleunigungs- und Versagensmechanismen sehr komplex ablaufen und in vielen Fällen eindeutige Auslöser (Trigger) nicht vorhanden bzw. messbar sind. Vielfach wirken an Hangflanken zeitabhängige, progressive Prozesse wie z. B. subkritisches Risswachstum oder bei bestehenden Massenbewegungen sehr langsame Handdeformationen. Diese werden wiederum von anderen Einflussfaktoren (Niederschlag, Bergwasser, Temperatur, in-situ Spannungen, dynamische Belastungen, Permafrost etc.) beeinflusst und führen auf z. T. extrem unterschiedlichen Zeitskalen zu einer Überschreitung der Gebirgsfestigkeiten und folglich zu einem Hangversagen oder zur Beschleunigung bereits bestehender Massenbewegungen. Des Weiteren kann es zu Kaskadeneffekten kommen. Die bessere

* Christian Zangerl, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Angewandte Geologie, christian.j.zangerl@boku.ac.at.

Martin Mergili, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Angewandte Geologie, martin.mergili@boku.ac.at; Universität Wien, Institut für Geographie und Regionalforschung, martin.mergili@univie.ac.at.

Christoph Prager, ILF Consulting Engineers Austria GmbH, christoph.prager@ilf.com.

Johann-Thomas Sausgruber, Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus, Wildbach- und Lawinenverbauung, Forsttechnischer Dienst, Fachzentrum Geologie und Schnee, thomas.sausgruber@die-wildbach.at.

Johannes T. Weidinger, Kammerhof Museen Gmunden, Institut für Erd- und Kulturgeschichtliche Dokumentation, johannes.weidinger@gmunden.ooe.gv.at.

Kenntnis vergangener Ereignisse in Verbindung mit einem erhöhten Prozessverständnis und gezielt eingesetzten Monitoringsystemen, Frühwarnsystemen, raumplanerischen und – soweit wirtschaftlich vertretbar – technischen Maßnahmen ist der Schlüssel zur Minimierung der mit derartigen Massenbewegungen verbundenen Gefahren und Risiken.

Abstract

Extremely rapid rock slides and rock avalanches with generally large energies and travel distances can put human life at risk and destroy property and infrastructure. Slow- or moderate-velocity rock slides and earth/debris flows are often characterized by re-activation and acceleration phases and can cause large damages, whereas people can usually escape. In the Alps, susceptible areas for all of the considered processes are well known at regional scale due to their lithology, structural geology, topography, hydrogeology, geomechanics, and event history. However, the spatio-temporal prediction of specific extreme events remains a challenge despite modern investigation and monitoring techniques: failure mechanisms are complex in space and time, and they are not always directly linked to obvious, measurable triggering factors. In many cases, progressive processes such as subcritical crack growth or very slow deformations, which are in turn influenced by other factors (precipitation, groundwater, temperature, in-situ stress, dynamic loading, permafrost, etc.) acting in the rock mass. They lead – on broadly varying time scales – to the exceedance of rock mass strength and thus to slope failure or, for pre-existing rock slides, to acceleration phases. Furthermore, rock slides or rock avalanches can develop into cascading landslide processes. An improved level of knowledge on past events in connection with an increased process understanding and well-designed monitoring and early warning systems, spatial planning and – as far as economically justifiable – technical measures is the key to minimize the hazards and risks associated with these types of landslides.

Kernaussagen

- Anfällige Gebiete gegenüber Felsgleitungen, Felslawinen oder Erd- bzw. Schuttströmen sind in den Alpen häufig bekannt.
- Die konkrete Vorhersage spezifischer Extremereignisse in Raum und vor allem in Zeit stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar.
- Eine Kombination verschiedener Untersuchungs- und Überwachungsmethoden ist nötig, um mögliche Extremereignisse zu erkennen, entsprechend vorherzusagen und damit das Risiko bzw. mögliche Verluste zu minimieren.

Key Points

- In the European Alps, locations which are susceptible to rock slides, rock avalanches, or earth/debris flows are often known.
- The prediction of specific extreme events in space and particular in time still remains a big challenge.
- A combination of various investigation and monitoring methods is required to appropriately localise and forecast potential catastrophic events and to reduce the risk and the associated losses.

16.1 Einführung

16.1.1 Definitionen, Klassifikation und Nomenklatur

Die Fachliteratur bietet eine Vielzahl unterschiedlicher Klassifikationssysteme für Massenbewegungen. Dies führte in der Vergangenheit dazu, dass idente Phänomene von Massenbewegungen unterschiedlich bezeichnet bzw. gleiche Begriffe für unterschiedliche Bewegungsmechanismen verwendet wurden und zum Teil heute noch werden.

So werden langsame tiefgründige Massenbewegungen im Festgestein in der Literatur häufig als *Bergzerreißung* (Ampferer, 1939), *Sackung* (Zischinsky, 1969), oder *Talzus Schub* (Stini, 1941) bezeichnet, während extrem schnelle Bewegungen großer Gesteinsmassen (1 Million m³ oder mehr) unabhängig vom Bewegungsmechanismus als *Bergsturz* (Heim, 1932; Abele, 1974) bekannt sind. Der Begriff Bergsturz ist mechanisch jedoch nur selten zutreffend, weil die meisten Bergstürze nicht vom Prozess *Stürzen* geprägt werden, sondern vielmehr vom *Gleiten* oder recht häufig vom *Fließen*. Heim (1932) hat daher den zutreffenderen Begriff *Sturzstrom* definiert.

Um diesen Schwierigkeiten zu entgehen, wird hier die nunmehr international gültige und auf Varnes (1978) und Cruden und Varnes (1996) aufbauende Klassifikation der *International Geotechnical Societies, UNESCO Working Party on World Landslide Inventory* verwendet, die von Hungr et al. (2014) überarbeitet wurde. Grundsätzlich wird dabei zwischen 6 kinematischen Grundtypen (Fallen, Gleiten, Kippen, Fließen, Driften und Hangdeformationen) unterschieden. Weitere Kriterien berücksichtigen das Gestein, wobei zwischen Fest- und Lockergestein differenziert wird, sowie die Bewegungsgeschwindigkeit. Letztere unterliegt einer Einteilung in 7 Klassen von extrem langsam mit Bewegungsraten unter 16 mm/a bis extrem rasch mit Geschwindigkeiten über 5 m/s. Im vorliegenden Beitrag werden die gravitativen Hangprozesse *tiefgründige Felsgleitung*, *Felslawine* und *Erd-/Schuttstrom* behandelt (Nomenklatur gemäß Hungr et al., 2014).

Der Begriff *tiefgründige Felsgleitung* wird hierin für Prozesse verwendet, bei denen ein geklüftetes Festgestein (Gebirge) unter Einfluss der Gravitation entlang einer oder mehrerer Gleit/Scherzone(n) unterschiedlich schnell (mit Geschwindigkeiten von extrem langsam bis extrem schnell) abgleiten kann. Die Gleit-/Scherzonen können eben oder gekrümmt sein. Von ihrem Verlauf ist abhängig, ob sich die Bewegung als Translation oder Rotation vollzieht. Typischerweise treten vor allem bei unebenen Scherzonen ausgeprägte interne Gebirgsdeformationen auf, die sich morphologisch z. B. in Form von Zerrspalten, Nackentalbildung, Horst- und Grabenstrukturen sowie sekundären Ablöseflächen äußern. Extrem schnelle tiefgründige Felsgleitungen können durch zu-

nehmende Fragmentierung, d. h. der Auflösung des Gebirgsverbandes, in extrem rasche Felslawinen mit zum Teil sehr großer Reichweite übergehen. Je nach Abbruchvolumen, topographischen Verhältnissen etc. sind Reichweiten bis zu mehreren Kilometern bekannt bzw. möglich.

Eine *Felslawine* ist allgemein durch ausgeprägte dynamische Interaktion der einzelnen Gesteinskomponenten gekennzeichnet. Aufgrund des häufig großen Volumens bzw. der Topographie des Transit- und Ablagerungsgebietes (Kanalisierung) kann die Bewegung physikalisch als Fließen der Gesamtmasse approximiert werden, während beim volumetrisch kleineren Stein- und Blocksturz vorwiegend das Bewegungsverhalten der einzelnen Blöcke mechanisch maßgeblich ist. Der Übergang zwischen Felsgleitung und Felslawine ist im wahrsten Sinne des Wortes gleitend bzw. fließend. Der Prozess Steinschlag/Blocksturz wird im Gegensatz zu Felsgleitung und Felslawine hier nicht behandelt, sondern ist Gegenstand des Beitrags 17 zu *Steinschlag und Felssturz*.

Erd-/Schuttströme bestehen aus plastisch verformbaren feinkornreichen Lockergesteinen und sind durch einen kombinierten Prozess aus Gleiten entlang von mehreren diskreten Scherflächen/-zonen und internem Fließen der sich talwärts bewegenden Masse gekennzeichnet. Häufig können aktive Erd- und Schuttströme Geschwindigkeiten von mehreren Metern bis 10er Metern pro Tag erreichen. Sie stellen vielfach episodische Reaktivierungen von bestehenden z. T. über lange Zeiträume ruhenden Hanginstabilitäten dar.

16.1.2 Was sind Extremereignisse im Kontext von Felsgleitungen, Felslawinen und Erd-/Schuttströmen?

Abgesehen von Muren sind Frequenz-Magnituden-Beziehungen für Massenbewegungen weniger verbreitet als z. B. für Hochwasser. Vor allem Felsgleitungen und Felslawinen treten häufig als singuläre Ereignisse auf, Felsgleitungen auch als lang andauernde Ereignisse mit variabler Aktivität. Deshalb kann der Begriff *Extremereignis* im Zusammenhang mit Massenbewegungen nur sehr schwer über Jährlichkeiten bzw. Frequenzen definiert werden, so dass dessen Abgrenzung schwierig ist und oft subjektiven Wahrnehmungen und/oder durch Medien transportierten Informationen folgt. Während z. B. die Felslawine vom Piz Cengalo (Schweiz) im August 2017 und die aus ihr entstehende Prozesskette eindeutig als Extremereignis wahrgenommen wurde, ist dies für einige kleinere Ereignisse, die in den vergangenen Jahren in Österreich stattgefunden haben, weniger klar. Für die Massenbewegungstypen Felsgleitung, Felslawine und Erd-/Schuttstrom werden an dieser Stelle die Extremereignisse wie folgt definiert:

Felslawinen und rasche Felsgleitungen stellen im dicht besiedelten Alpenraum fast immer Extremereignisse dar, da sie durch eine besonders große

Reichweite gekennzeichnet sind und damit in vielen Fällen Auswirkungen auf die Gesellschaft haben (Personen-, Sach- und Infrastrukturschäden, Sperren und Blockaden von Straßen, Bahnlinien, touristischer Infrastruktur, etc). Vor allem die Betrachtung der Reichweite ist hier ein wichtiger Aspekt: Sie erlaubt es auch kleinere, aber höchst mobile Felslawinen zu berücksichtigen, die durch ihre Auslauflänge Gebiete erreichen können, die weit vom Anrissgebiet entfernt sind und deshalb nicht als gefährdet wahrgenommen werden.

Langsame Felsgleitungen und Erd- bzw. Schuttströme, die Hangverschiebungen im Bereich von mm/a bis m/a aufweisen, stellen Extremereignisse dar, wenn interne Deformationen d. h. diskrete Verschiebungen entlang von Scherzonen und/oder differentielle Verschiebungen der Masse auftreten, die i) kritische Infrastrukturen und Siedlungsraum beeinflussen können, ii) sekundäre Hangprozesse wie Muren, rasche Fest- und Lockergesteinsgleitungen oder Felslawinen mit großen Reichweiten begünstigen können, oder iii) bei Felsgleitungen das Potential zum Versagen mit raschen Geschwindigkeiten und großen Reichweiten besteht.

Sowohl Felslawinen als auch langsame oder rasche Felsgleitungen können durch Gefüge-Auflockerung und Gesteinszerlegung (dynamische Gesteinsentfestigung, Bildung von Block-in-Matrix-Strukturen) sowie topographische Veränderungen im Ablagerungsgebiet unterschiedliche sekundäre Folgen nach sich ziehen: Solche bestehen unter anderem in i) Veränderungen des Oberflächenabflusses (Hydrologie) und/oder der Grundwasserfließsysteme, ii) erschwerten ingenieurgeologischen und hydrogeologischen Bedingungen bzw. Risiken für Infrastrukturprojekte, iii) erhöhter Radonbelastung aus zertrümmerten Kristallingesteinen (Purtscheller et al., 1995), oder iv) der Bereitstellung von Lockergestein für Murgangprozesse. Überhaupt sollten eventuelle Prozesskaskaden zwischen gravitativen Massenbewegungen und anderen Naturgefahrenprozessen für eine Beurteilung in Betracht gezogen werden (siehe auch Beitrag 24 zu *Multi-Hazards und Kaskadeneffekten*).

16.2 Zeitliche Entwicklung von Großmassenbewegungen

16.2.1 Darstellung von Ereignissen im Spätglazial und Holozän

Zusammenstellungen von datierten Massenbewegungen im Ostalpenraum und Umgebung (Prager et al., 2008) weisen darauf hin, dass sowohl Festgesteins-Massenbewegungen als auch fluviatile Dynamik und Muren im Spätglazial und Holozän eher kontinuierlich verteilt auftreten. Jedoch sind zumindest zwei zeitliche Anhäufungen erkennbar: so gruppieren sich etwa die prominenten Felsgleitungen von Flims, Kandertal und Köfels im frühen Holozän zwischen

ca. 10.000–9.000 kalibrierten Jahren vor heute (Abbildungen 01 und 02). Betreffend nachfolgender Zeiträume weisen die Daten auf eine Phase geringerer Hangdynamik hin (bzw. Bias aufgrund bisher nur weniger datierter Massenbewegungen, z. B. Wildalpen ca. 6.000 Jahre). Dem gegenüber traten zwischen ca. 4.200–3.000 Jahre vor allem in Tirol einige der größten Massenbewegungen der Alpen auf, z. B. in den Bereichen Eibsee, Fernpass, Tschirgant, Haiming, Stöttlbach und Pletzachkogel. Auch datierte Fluss-/Murablagerungen zeigen im Holozän fluktuierende Aktivitäten, mit zeitweise erhöhten Akkumulationsraten, die zeitlich z. T. mit Gletschervorstößen in den österreichischen Zentralalpen sowie mit einigen großen Massenbewegungen korrelieren (Daten und Referenzen in: Prager et al., 2008).

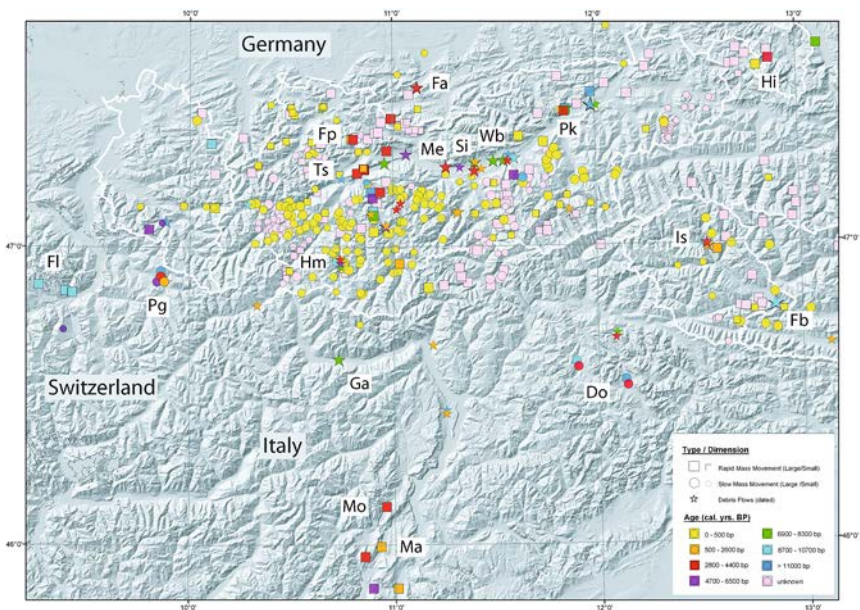


Abbildung 01: Räumliche und zeitliche Verteilung von spät- und postglazialen Massenbewegungen in Tirol und Umgebung.

Figure 01: Spatial and temporal distribution of late-glacial and postglacial landslides in Tyrol and its surroundings.

Quelle: Prager et al., 2008; Prager, 2010

Nachfolgend den o.a. Zusammenstellungen wurden zahlreiche weitere Großhangbewegungen im Ostalpenraum und Umgebung datiert. Tabelle 01 zeigt eine (unvollständige) Auswahl davon. Aktuelle Zusammenstellungen dieser und weiterer datierter Massenbewegungen im Ostalpenraum und Umgebung finden

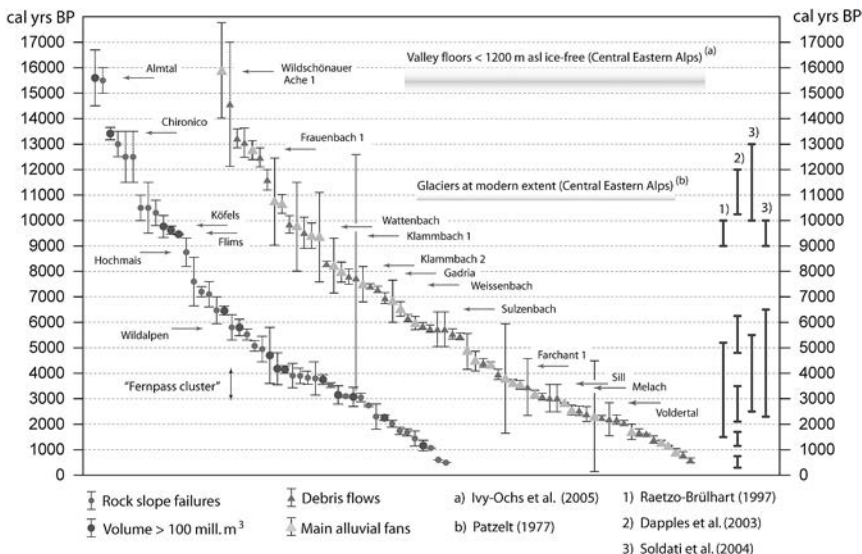


Abbildung 02: Zeitliche Verteilung von spät- und postglazialen Massenbewegungen in Tirol und Umgebung. Vertikale Achse – kalibrierte Jahre vor heute (BP = before present), horizontale Achse – dimensionslose Sequenz von datierten Ereignissen.

Figure 02: Spatial and temporal distribution of late-glacial and postglacial landslides in Tyrol and its surroundings. Vertical axis – calibrated years BP (before present), horizontal axis – dimensionless sequence of dated events.

Quelle: Prager et al., 2008; Prager, 2010

sich u. a. in Ostermann und Sanders (2012, 2017), Ivy-Ochs et al. (2017), Soldati und Marchetti (2017) sowie Referenzen darin.

Tabelle 01: Neuere (2008 und jünger) Datierungsergebnisse betreffend ausgewählter Großhangbewegungen im Ostalpenraum und Umgebung, absteigend gereiht nach Alter (unvollständige Auswahl).

Table 01: Recent (2008 and younger) dating results concerning selected large-scale landslides in the Eastern Alps and surrounding regions, listed according to descending age (incomplete selection).

Großmassenbewegung(en)	Altersbereich (Jahre)	Quelle
Butterbichl und Maria Stein (Inntal/Tirol)	max. ca. 114.000–113.000 und min. 68.000–62.000	Starnberger et al. (2013)
Stilfes, Ridnaun und Pfitsch (Südtirol)	ca. 15.500–11.700, ca. 15.500–10.800 und ca. 13.800–11.300	Ostermann und Sanders (2017)
Watles (Südtirol)	≤ ca. 10.000 und jünger	Agliardi et al. (2009)
Rinderhorn und Klein-Rinderhorn (Schweiz)	jeweils 9.800 ± 500	Grämiger et al. (2016)

((Fortsetzung))

Großmassenbewegung(en)	Altersbereich (Jahre)	Quelle
Obernberg (Tirol)	ca. 9.200–7.600	Ostermann und Sanders (2017)
Val Viola (Veltlin)	7.430 ± 460	Hormes et al. (2008)
Marocche di Dro, Principale (Trentino)	5.300 ± 860	Ivy-Ochs et al. (2017)
Brennersee (Tirol)	ca. 6.500–6.200	Ostermann und Sanders (2017)
Lavini di Marco und Costa Stenda (Trentino)	3.000 ± 400	Martin et al. (2014)
Marocche di Dro, Kas und Castelpietra (Trentino)	ca. 1.080 ± 160 und ca. 950 ± 270	Ivy-Ochs et al. (2017)
Lavini di Marco (Trentino)	ca. 800 ± 200	Martin et al. (2014)

V. a. geologisch »junge« bzw. historische Ereignisse sind betreffend ihrer Ursachen, Auslöser und Wiederholbarkeit von besonderem Interesse für die Gesellschaft. Während die geologischen Ursachen von zahlreichen großen Hangbewegungen zwischenzeitlich häufig bekannt sind (lithologische und v.a. strukturgeologische Dispositionen, z. B. Agliardi et al., 2001, 2009; Prager et al., 2009; Zangerl et al., 2010), sind die auslösenden Faktoren (»Trigger«) Gegenstand weiterer Forschungen (z. B. paläoklimatologische und paläoseismische Untersuchungen) bzw. werden vollständigere und genauere Chroniken bzw. Zeitreihen für fundierte statistisch Analysen benötigt, wie z. B. Frequenz-Magnituden-Beziehungen.

Jedoch weisen die kompilierten Daten darauf hin, dass sowohl datierte Festgesteins-Massenbewegungen (Felsgleitungen, Felslawinen) als auch Murgänge im Spätglazial und Holozän zeitlich durchaus kontinuierlich auftreten, aber sowohl räumliche als auch zeitliche Häufungen vorkommen. Demnach ist eine Vielzahl von datierten Massenbewegungen zwar ursächlich aber keinesfalls auslösend auf spätglaziale Gletscherrückzüge zurückzuführen. Vielmehr sind Hinweise auf komplexe Zusammenhänge zwischen geologischer Hangdisposition, glazialer Entlastung, geomechanischen Prozessen (subkritischem Risswachstum), Seismotektonik und/oder klimatischen Veränderungen gegeben (Prager et al., 2008). Zudem zeigen kompilierte Daten, dass prädisponierte Hangflanken im Holozän mehrfach bzw. wiederholt für Gleit- bzw. Sturzereignisse reaktiviert worden sind. So sind wiederholte Ereignisse (bzw. Phasen erhöhter Hangaktivität, Nachstürze) u. a. in den folgenden Fällen nachgewiesen:

- Köfels (Tirol): ein postglaziales Hauptereignis, vermutlich ein größeres Nachsturzereignis (Ivy-Ochs et al., 1998, Prager et al., 2009).

- Tumpen (Tirol): mehrere größere Ereignisse auf engstem Raum (Poscher und Patzelt, 2000).
- Tschirgant (Tirol): je ein Hauptereignis in den Bereichen Weißwand und Haiming, ein Nachsturzereignis in Haiming (Patzelt, 2012a; Ostermann et al., 2017).
- Fernpass (Tirol): ein Hauptereignis, lateral angrenzend sekundäre Felsgleitung und tiefgründig aufgelockerte bis leicht dislozierte Hangflanke (Prager, 2010).
- Steinlehnen (Tirol): historische Sturzereignisse 1821 und 1852 (Heuberger, 1966), rezent aktive Steinschläge und Felsgleitungen 2003 und jünger (Zangerl und Engl, 2009).
- Pletzackogel (Tirol): mindestens drei große Ereignisse im Spätglazial und Holozän (Patzelt, 2012a,b) sowie Felsstürze im 20. und 21. Jh.
- Die Felslawine von Val Pola (Italien, 1987) und die Ereignisse von von Randa (Schweiz, 1991) werden als Konsequenzen reaktivierter struktureller Schwächezonen interpretiert, wo den neuzeitlichen Sturzereignissen fossile bzw. historisch dokumentierte »Vorläuferereignisse« vorangegangen sind (Azzoni et al., 1992, Sartori et al., 2003).
- Mehrfache Reaktivierungen bzw. Beschleunigungsphasen geringaktiver prädisponierter Hangflanken in verschiedenen zeitlichen Abständen (von einigen Hundert bis mehreren Tausend Jahren) wurden auch an rezent aktiven Felsgleitungen beobachtet, z. B. an den tiefgründigen Massenbewegungen Heinzenberg (Weidner, 2000), La Clapiere (Guglielmi et al., 2005), Séchillienne (Le Roux et al., 2009), sowie an mehreren Erd-/Schuttströmen wie z. B. Fürweg (Sausgruber, 2005), Gschlifgraben (Weidinger, 2009) oder Kerschbaum (Hofmann und Sausgruber, 2017).

16.2.2 Implikationen für rezente und künftige Ereignisse

Kompilierte Altersdaten weisen darauf hin, dass eine Vielzahl von tiefgründigen Massenbewegungen, darunter mehrere geologisch »junge« Großereignisse im mittleren und jüngeren Holozän (siehe o. a.) nicht unmittelbar auf spätglaziale Gletscherrückzüge als Auslöser zurückzuführen sind. Vielmehr verharren zahlreiche instabile Hänge nach dem Eisfreiwerden noch etliche tausende Jahre in »stabiler« Position bzw. unter langsamen Verschiebungsraten ohne zunehmende Beschleunigungen bis zum extrem schnellen (»katastrophalen«) Versagen. Die Veränderungen der in-situ Gebirgsspannungen (z. B. durch Gletscherrückzüge), sowie der hydrogeologischen, klimatischen (erhöhte Kluftwasserdrucke, Permafrostrückzug) und/oder seismotektonischen Einflussfaktoren (Erdbeben, nicht nur Auslöser sondern durch Riss-

wachstum bzw. Gefügauflockerungen auch »Vorbereiter« von Hangdeformationen, Prager et al., 2008) beeinflussen zeitabhängig die Gebirgsfestigkeiten durch geomechanische Bruchprozesse, wie dem (sub-)kritischen Risswachstum (Atkinson, 1989). Im Hochgebirge werden häufig Gletscher- und/oder Permafrostrückzug ursächlich bzw. auslösend für verschiedene Felsgleitungen diskutiert. Beispiele dafür sind die tiefgründigen Massenbewegungen im Bereich der Bliggspitze und des Marzellkamms (Fey, 2018).

Jedoch sind auch außerhalb des Periglazial- bzw. Permafrost-Bereichs zahlreiche größere Sturzereignisse bekannt, z. B. Huben/T (03/1999), Bischofsmütze/S (09/2001), Hochwand-Alpl/T (03/2012), Felbertauern/T (05/2013), Vals/T (12/2017) und Hoher Göll/S (05/2018). Diesbezüglich sind die unmittelbar auslösenden Faktoren derzeit noch ungenügend erforscht. Betreffend systematischer statistischer Auswertungen von Massenbewegungen ist die fundierte Datengrundlage wie möglichst vollständige Chroniken gut dokumentierter Ereignisse, Zeitreihen mit externen Einflussfaktoren (z. B. Erdbeben, Witterungsverläufe/-ereignisse) nur vereinzelt bzw. nur für lokale Hangflanken verfügbar. Trotz paläoklimatischer Indikatoren und Hinweise auf seismotektonisch aktive Räume liegen bisher keine schlüssigen Datengrundlagen bzw. Korrelationen vor was die auslösenden Faktoren betrifft (Prager et al., 2008; Ostermann und Sanders, 2012; Ivy-Ochs et al., 2017, und Referenzen darin). Je nach überregionalem Auftreten bzw. lokalen Altershäufungen werden auch in neueren Studien klimatische oder seismotektonische Ursachen diskutiert (z. B. Zerathe et al., 2014; Ivy-Ochs et al., 2017, sowie Referenzen darin).

Längere Zeitreihen bzw. Chroniken sowie regional- und lokalspezifische Auswertungen von historischen Sturzereignissen (u. a. hinsichtlich ihrer klimatischen Beeinflussung/Auslösung) liegen in Mitteleuropa bisher nur selten vor. Vereinzelt wurden lokalitätsspezifische Sturz-Ereignisse systematisch untersucht, v. a. hinsichtlich ihres zeitlichen und räumlichen Auftretens sowie steuernder Faktoren (z. B. Steinschlag, Fels-/Bergstürze im Bereich Reintal/Zugspitze, Krautblatter et al., 2012). Betreffend Österreich zeigt ein Inventar von Sturzereignissen (Zeitraum ca. 1900–2010, 252 Ereignisse, v. a. Steinschlag, z. T. Felsstürze, v. a. aus Nicht-Permafrost Gebieten) eine sehr schwache Korrelation von Ereignissen mit Temperaturverläufen, bzw. keine Zunahme der Frequenz von Sturzereignissen während wärmerer Perioden; statistisch ist eine Häufung im Frühling ermittelbar, in den letzten Jahrzehnten auch eine Häufung im Sommer (möglicherweise Verschiebung aufgrund milderer Winter) (Sass und Oberlechner, 2012). Auch betreffend der Schweizer Alpennordseite weisen statistische Auswertungen (ca. 800 historisch dokumentierte Sturzereignisse der letzten 500 Jahre) darauf hin, dass eine eindeutige Korrelation zwischen bekannten Feucht- bzw. Warmperioden und einer Häufung von Sturzereignissen zwischen 1500 und 1900 AD nicht besteht. Allerdings zeigt sich für das 20. Jh.

eine klare jahreszeitliche bzw. klimaperiodische Abhängigkeit, indem (i) vermehrt Sommerstürze in Abhängigkeit von extremen Niederschlagsereignissen und (ii) in Kaltphasen infolge Gesteinskontraktion vermehrt Sturzereignisse im Winter (und auch im Frühling) feststellbar sind (Gruner, 2006). Allgemein können zyklische Schwankungen der Oberflächentemperatur irreversible Deformationen von geklüfteten Felsmassen bis in große Tiefen hervorrufen und als wichtiger Vorbereiter von Sturzprozessen fungieren (Gischig et al., 2011a,b). Wenn akkumuliert über einen längeren Zeitraum, können selbst geringfügigere (jedoch wiederholte) Witterungsschwankungen ein Versagen auslösen, ohne dass ein offensichtliches Trigger-Ereignis erkennbar wäre (Gunzburger et al., 2005).

16.3 Einschätzung des Sachstandes anhand von Fallbeispielen

16.3.1 Langsame tiefgründige Felsgleitungen

16.3.1.1 Allgemeine Aspekte

In den Alpen finden sich viele geomorphologische Hinweise auf tiefgründige, ganze Talflanken erfassende Massenbewegungen (z. B. Bonzanigo et al., 2007; Agliardi et al., 2009; Barla et al., 2010; Brückl et al., 2013; Crosta et al., 2013; Zangerl et al., 2010, 2015). Kompilierte geologische Befunde und Altersdatierungen weisen darauf hin, dass zahlreiche Hangbewegungen lithologisch und/oder strukturell prädisponiert sind und häufig (mehrfach) reaktiviert worden sind (siehe Kapitel 16.2). An etlichen dieser Hänge sind auch Siedlungen oder Infrastruktur zu finden. In welchem Ausmaß diese Hänge heute noch aktiv sind, ist aufgrund fehlender oder unzureichend genauer Geländeuntersuchungen/-vermessungen oftmals nicht bekannt. Erst wenn Infrastruktureinrichtungen und Häuser deutliche Schäden durch die Hangbewegungen zeigen beginnt man, sich dieser Thematik eingehender zu widmen. Exemplarisch sei hier die tiefgründige Felsgleitung Navis-Misljoch (Tirol), die z. T. durch aktivere Schuttströme überlagert ist, im Detail betrachtet.

16.3.1.2 Großhangbewegung Navis – Misljoch

An den Südhängen des Misljochs im Navistal, (Tirol) wurde man auf Hangbewegungen aufmerksam, nachdem ein Dutzend von insgesamt 84 Häusern einer in den 1980er und 1990er Jahren errichteten Siedlung markante Schäden aufwies. Ein Haus war derart stark davon betroffen, dass es abgetragen werden musste. Um die Möglichkeiten einer Sanierung auszuloten, wurde die Massen-

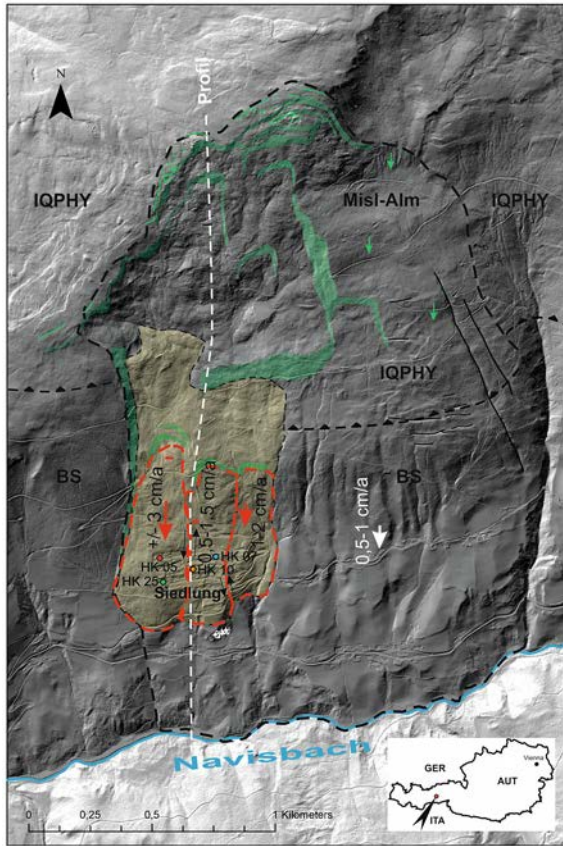
bewegung in den Jahren 2012 bis 2015 eingehend erkundet und wird bis heute messtechnisch intensiv beobachtet. Aufgrund des fundierten Erkundungs- und Messaufwands (ingenieurgeologische Kartierungen, Kernbohrungen, Bohrloch- und Oberflächengeophysik, Laborversuche, automatische Totalstation, Inklinometer, uvm.) ergeben sich heute interessante Einblicke zu Geologie, Aufbau und Geometrie, Hydrogeologie und Geomechanik dieser Massenbewegung. Auch stellt die Massenbewegung in Hinblick auf ein erfolgreich durchgeführtes Maßnahmenkonzept, welches zu einer maßgeblichen Reduktion der Bewegungen führte und zum Verbleib der Bewohner in den Häusern beigetragen hat, ein gut untersuchtes, lehrreiches Fallbeispiel dar.

Zahlreiche geomorphologische Indikatoren weisen darauf hin, dass der Hang von einer tiefgründigen Felsgleitung erfasst wurde. Dazu zählen Zerrspalten in der Gratregion, große treppenartige Absätze im Oberhang und ein unregelmäßig kupiertes Gelände in den mittleren Abschnitten. Auffällig ist ein konkav – konvexer Geländeverlauf in der Hangfalllinie, welcher Zeugnis für den Massenverlagerungsprozess vom Oberhang zum Unterhang gibt. Der Höhenunterschied von der Gratregion (2.160 m ü.A.) bis zum Talboden (1.150 m ü.A.) beträgt etwa 1.000 Höhenmeter. Auch wenn Steilstufen bis zu 40° vorhanden sind, beträgt die generelle Geländeneigung nur etwa 23°.

Die Massenbewegung ist aus tektonischer Sicht am Nordwestrand des Tauernfensters situiert (Brandner, 1980, Pichler, 2015). Der Südhang des Misljochs ist dabei lithologisch und tektonisch zweigeteilt. Die penninischen Einheiten der Matreier Zone und Bündner Schiefer nehmen die unteren zwei Drittel des Hanges ein, darüber folgt der ostalpine Innsbrucker Quarzphyllit (Schmid et al., 2013). Die Massenbewegung Misljoch setzt sich aus einer tiefgründigen Felsgleitmasse, der in ihrem westlichen Teil mehrere, zungenförmige Schuttströme (Laatsch und Grotenthaler 1972; Cruden und Varnes, 1996; Hungr et al., 2014) auflagern, zusammen (Abbildungen 03 und 04). Die Bewegungen haben ihren Ursprung in der Gratregion, wo Ausstriche tiefer Gleitbahnen in Form von großen und hohen Geländeabsetzungen anzutreffen sind. Geländeuntersuchungen haben ergeben, dass das Versagen im Oberhang durch steilstehende Talklüfte und einer infolge der Faltung immer wieder nach Süden einfallenden Schieferung strukturell begünstigt wurde (Pichler, 2015). Aus den tiefen Kernbohrungen geht hervor, dass die Gleitmasse aus unterschiedlich stark zerlegten Felsschollen mit mehreren Zentimeter bis Meter mächtigen bindigen Scherzonen (*fault gouge*, *fault breccia*) besteht. An Hand der Kernbohrungen konnte auch die Entstehung der Schuttstromareale geklärt werden. Sie sind aus den durch die Hangbewegungen aufgelösten und verwitterten instabilen Felsschollen der Massenbewegung entstanden und setzen sich heute aus gemischtkörnigem Lockermaterial, welches sich langsam talwärts bewegt zusammen (Hofmann und Sausgruber, 2017). Wesentlich für diesen Bewegungsmechanismus

und das räumlich begrenzte Auftreten der Schuttströme im Westen der Massenbewegung ist die dortige starke Hangwasserführung (Rieder, 2016). An der Deckengrenze Bündler Schiefer/Innsbrucker Quarzphyllit werden große Mengen an Wasser, welche im Oberhang in den Zerrspalten versickern, in das Schuttstromareal eingespeist und nähren so die Bewegungen. Die Mächtigkeit der Schuttströme liegt zwischen 30 und 40 m.

Durch ein langjährig durchgeführtes Monitoringsystem, bestehend aus kontinuierlichen Messungen von etwa 90 Oberflächenmesspunkten, die von einer am Gegenhang gelegenen Totalstation eingemessen werden, sowie den periodisch durchgeführten Messungen der Inklinometer, konnte die Kinematik und das zeitlich variable Bewegungsverhalten der Massenbewegung erfasst und in Bezug zu den Schäden an den Häusern gesetzt werden. Die Bewegungen im Bereich der Siedlung setzen sich aus einer langsameren Bewegung der tieferliegenden Felsgleitmasse und einer schnelleren Bewegung der darauf auflagernden Schuttzungen zusammen (Hofmann und Sausgruber, 2017). Die aktiven basalen Scherzonen der Schuttzungen liegen dabei in Tiefen zwischen 14 und 37 m. Über die Tiefe der basalen Scherzone der Felsgleitung liegt keine Information vor, da keines der Inklinometer die Basis der Gleitung durchörtert hat. Sie ist aber jedenfalls tiefer als die tiefste Bohrung mit 120 m anzunehmen. Die Geschwindigkeit der Felsgleitung konnte einerseits aus der Vermessung von Punkten, die auf der Massenbewegung, aber außerhalb der Schuttstromareale situiert sind und andererseits aus den Inklinometermessungen rekonstruiert werden. Die jährlichen Verschiebungen liegen hierfür bei 0,5–1 cm. Für die auflagernden Schuttströme waren vor der Maßnahmensetzung die Bewegungsraten zwischen 0,5 und 3,0 cm/a. Die Schäden an den Häusern konnten schließlich auf diskrete Scherbeanspruchungen der unterschiedlich schnell bewegten Schuttströme/-zungen zurückgeführt werden. Weil die Bewegungen sehr tief und die Bewegungsvektoren einheitlich in Fallrichtung des Hanges orientiert sind, treten die Schäden nur an jenen Häusern auf, die sich nahe oder auf den Scherzonen befinden. Alle anderen Objekte bewegen sich mehr oder weniger gleichmäßig talwärts, ohne dass sie Schaden erleiden. Die Auswertung der Piezometermessstellen erbrachte, dass die Bewegungsgeschwindigkeit vom Wassereintrag in den Untergrund gesteuert wird. Eine Beschleunigung der Hangbewegung sowohl in den Schuttströmen als auch in der Felsgleitung war aber nur nach der Schneeschmelze im Frühsommer festzustellen, während Perioden ergiebigen Niederschlags keine Beschleunigungsphasen auszulösen vermochten. Nach der Schneeschmelze stieg der Wasserspiegel in den Pegeln, die im Lockermaterial des Schuttstromareals ausgebaut wurden um 1,5–2,5 m, in jenen, die im geklüfteten Gebirge der Felsgleitung ausgebaut wurden um ca. 1 m an.



- | | | | |
|-------|-----------------------------|-------|--|
| --- | Begrenzung Großhangbewegung | ■ | Aktiver Schuttstrom |
| ■ | Alte Großanbrüche | --- | Teilkörper, Schuttzungen |
| — | Nackentäler | — | Zerrspalten - alt / aktiv |
| ▲-▲-▲ | Überschiebung | BS... | Bündner Schiefer, IQPHY...Innsbrucker Quarzphyllit |

Abbildung 03: Laserscan Schummerungsbild des Misljoch Südhanges mit eingezeichneten geomorphologischen Strukturen der Großhangbewegung und großtektonischen Einheiten (Tarntaler Deckensystem im Gratbereich nicht dargestellt). Ausgewiesen sind Nettogeswindigkeiten. Für die Gesamtgeschwindigkeiten der Schuttzungen ist daher die Geschwindigkeit der Felsgleitung (weiß) jeweils hinzu zu rechnen.

Figure 03: Laserscan hillshade image of the southern slope of the Misljoch with geological structures of the large-scale landslide and the major tectonic units (Tarntaler Deckensystem not shown in the crest area). Net velocities are indicated. The total velocities of the earth flow tongues are therefore derived by adding the velocity of the rock slide (shown in white colour).
Quelle: mod. nach Hofmann und Sausgruber, 2017, *Quelle DHM:* Amt der Tiroler Landesregierung, 2009

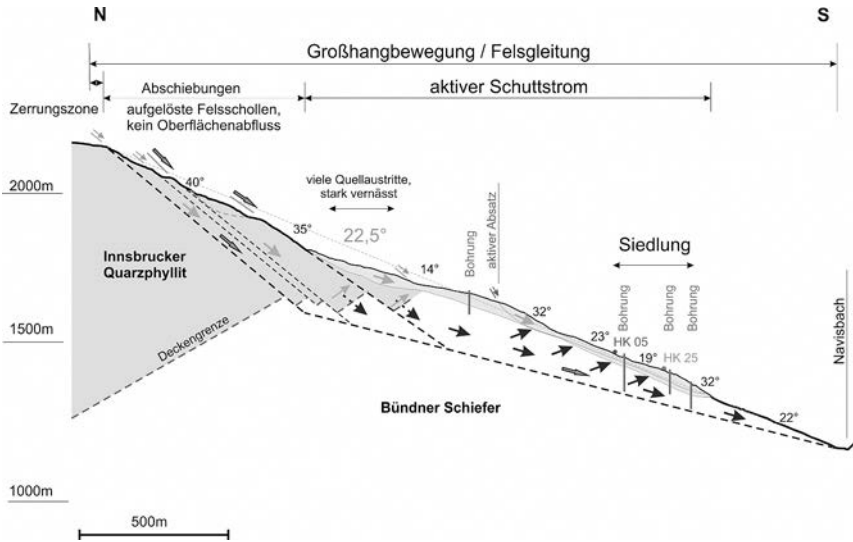


Abbildung 04: Ingenieurgeologischer Profilschnitt durch die Großhangbewegung Misljoch.
Figure 04: Engineering geological section through the large-scale landslide Misljoch.
Quelle: mod. nach Hofmann und Sausgruber, 2017

An Hand des Erkundungs- und Monitoringprogramms wurde erkannt, dass unterschiedlich große Porenwasserüberdrücke bis zu 2 bar in den Scherzonen für die unterschiedlich großen Bewegungen zwischen den einzelnen Schuttstromzungen und damit für die Schäden an den Häusern verantwortlich sind. Deshalb wurde ein Sanierungskonzept, bei dem der Abbau der Porenwasserüberdrücke im Vordergrund stand, konzipiert. Ergänzend dazu erfolgten Drainagierungen im stark vernässten Mittelhang. Längerfristig soll auch noch eine Verbesserung der Interzeption durch Aufforstung von Almweiden erreicht werden. Aufgrund der tief liegenden Scherzonen der Schuttströme von bereichsweise 37 m wurde im Herbst 2015 eine mit Pumpen ausgestattete Brunnenreihe von 50 Stück, welche oberhalb der Siedlung und quer über das gesamte Schuttstromareal angeordnet wurde, gebaut (Hofmann und Sausgruber, 2017). Jeder Brunnen hat eine Tiefe von 45 m. Die Anlage wurde im Jänner 2016 gesamtheitlich in Betrieb genommen und hält das Hangwasserpotential in einer Tiefe von etwa 35 m unter dem Gelände. Die abgepumpten täglichen Wassermengen aller Brunnen liegen hierfür lediglich zwischen 1,5 und 4,2 l/s (Hildebrand, 2018). Seither haben sich die Bewegungen stark reduziert bzw. sind nahezu zum Stillstand gekommen (Abbildung 05). Sie betragen zur Zeit, abzüglich der tieferen Bewegung, max. 3 mm/a (Sausgruber, 2017). Von großer Bedeutung in diesem Zusammenhang ist, dass sich die Bewegungen zwischen den unter-

schiedlich schnell bewegten Schuttstromzungen ausgeglichen haben, sodass kaum noch Scherbeanspruchungen auftreten.

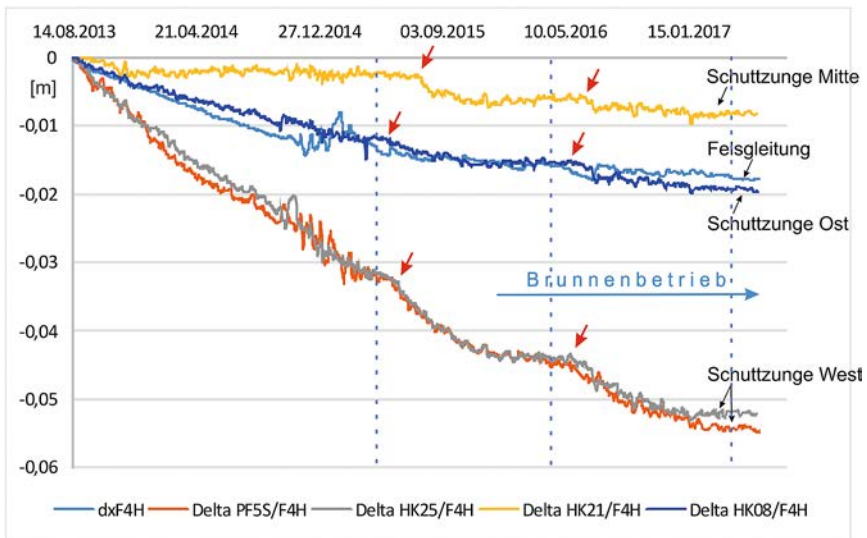


Abbildung 05: Zeit-Verschiebungskurven ausgewählter Punkte auf der Großhangbewegung. Anmerkung: blaue strichlierte Linien – Schneeschmelzen. rote Pfeile – Beschleunigungsphasen. **Figure 05:** Time-displacement diagram of selected targets on the large-scale landslide. The dashed blue lines show snowmelt. Red arrows indicate acceleration phases.

Datengrundlage: Amt der Tiroler Landesregierung, 2018

16.3.2 Schnelle tiefgründige Felsgleitungen und Felslawinen

16.3.2.1 Allgemeine Aspekte

Im Alpenraum kam es in den vergangenen Jahrzehnten mehrfach zu katastrophalen Felsgleitungen bzw. Felslawinen. Zu den bekanntesten Beispielen zählen die Ereignisse von Vajont (1963 – Genevois und Tecca, 2013), Val Pola (1987 – Govi et al., 2002) und Piz Cengalo (2017). Österreich ist bislang von Ereignissen mit vielen Toten verschont geblieben.

Allerdings kam es auch hier immer wieder zu Felslawinen, die ihren Ausgang in Kipp- und Gleitmechanismen entlang von Störungszonen, Kluft-, Schichtungs- oder Schieferungsflächen nahmen. Derartige Ereignisse waren sowohl in Sedimentgesteinen als auch in metamorphen Gesteinen zu beobachten. Einige der Ereignisse fanden im Hochgebirge statt und hatten keine oder nur geringe Konsequenzen für die Gesellschaft. Die Felslawine auf die Schildalmgalerie der

Felbertauernstraße in Osttirol im Mai 2013 führte hingegen zu schweren Schäden an der Verkehrsinfrastruktur und damit zur zeitweiligen Durchtrennung einer wichtigen Straßenverbindung (Riepler und Schroll, 2013; Pfurtsceller und Genovese, 2018). Eine weitere Felslawine, die sich im Frühjahr 2012 an der Südflanke der Hochwand (2.719 m) bzw. im Bereich Alpl in der Mieminger Kette ereignete und durch ihre besonders große Reichweite charakterisiert ist, wird exemplarisch zu vielen anderen wie z. B. am Luibiskogel (1999) und in Huben (1999) im Folgenden im Detail beschrieben (Preh und Sausgruber, 2015). Es ist wichtig darauf hinzuweisen, dass viele Ereignisse ein Bewegungsverhalten zeigen, welches sowohl typische Merkmale für Stürzen als auch für Fließen aufweist und daher eine strikte Trennung schwierig macht (siehe Beitrag 17 zu *Steinschlag und Felssturz* sowie Literatur, z. B. Hungr et al., 2014): Keines dieser Ereignisse stand in direkter Verbindung mit einem aktiven Gerinne so dass es weder zur Abspernung von Rinnen und Tälern (und dem Aufstau von Seen) noch zu Prozessketten mit nachfolgenden Mur- oder Feststoffereignissen kam.

16.3.2.2 Alpl

Die Felslawine von Alpl, die sich am 22. März 2012 kurz vor Mitternacht ereignete, war insofern ungewöhnlich, als dass die Felsmassen auf die gefrorene Firnschneedecke stürzten, was zu einer für das geringe Abbruchvolumen von nur ca. 75.000 m³ ungewöhnlich hohen Mobilität führte: es wurde ein Fahrböschungswinkel von lediglich 17,8° sowie eine Auslauflänge von 2,6 km gemessen (Preh und Sausgruber, 2015). Durch den erodierten, mitaufgenommenen Schnee kam es zu mehr als einer Versechsfachung des initialen Volumens, so dass insgesamt mindestens ca. 500.000 m³ Material (Fels/Schutt und Schnee) abgelagert wurden. Weil das Ereignis in einem abgelegenen Hochtal stattfand, kamen weder Personen zu Schaden, noch traten nennenswerte Schäden an Objekten oder Infrastruktur auf. Der initiale Abbruchprozess nahm entlang von parallel und schräg zur Oberfläche geneigten Trennflächen im Wettersteinkalk seinen Ausgang, ohne dass ein konkreter Auslöser identifiziert werden konnte. Das Material zerbrach im steilen oberen Wandbereich der Sturzbahn in Trümmer, stürzte auf den Altschnee und fuhr dann Huckepack darauf als mobile Fels-Schnee Lawine talwärts. Interessant dabei war, dass es mit Ausnahme der obersten Dezimeter zu keiner Vermischung zwischen unterlagerndem Schnee und Felssturz/-gleitmasse kam. Der Altschnee bewirkte eine Minderung des dynamischen Reibungswiderstandes (»fungierte als ein Fließmittel«) und war für die große Reichweite verantwortlich.



Abbildung 06: Felsgleitung/Felslawine Schildalmgalerie: Überblick mit Verlauf der Felbertauernstraße und der Ersatzstraße (a), Blick von unten auf die Lawinenbahn mit der zerstörten Schildalmgalerie (b). Anrissgebiet mit Hochenergie-Seilsperre (c). Die hangparallele Ausrichtung der Trennflächen ist hier deutlich zu erkennen. Anmerkung: das Anrissgebiet wurde durch nachfolgende Sprengungen verändert.

Figure 06: Rock slide/rock avalanche at Schildalm protection tunnel: overview with Felbertauern Road and replacement road (a), view from below to the avalanche path with the destroyed Schildalm protection tunnel (b), release area with high-energy rope protection system (c). The slope-parallel orientation of the joint faces is clearly visible. Remark: the release area was modified due to blasting after the event.

Fotos: M. Mergili

16.3.2.3 Schildalmgalerie (Felbertauernstraße)

Diese Felslawine ereignete sich am 14.05.2013 um 1:38 Uhr im Gemeindegebiet von Matrei in Osttirol, nahe des Südportals des Felbertauern-Straßentunnels. Ein Paket von ca. 10.000 m³ verwitterten und geklüfteten metamorphen Gesteins (hauptsächlich Amphibolit) löste sich auf einer Meereshöhe von 1.770 m, glitt an den hangparallelen Trennflächen ab und bewegte sich auf einer durchschnittlich um 45° geneigten Sturzbahn mehr als 200 Höhenmeter als Felslawine talwärts. Der Waldbestand entlang der 75 bis 100 m breiten Sturzbahn wurde ebenso wie die Schildalmgalerie der Felbertauernstraße 190 m unterhalb der Abrisskante zerstört (Riepler und Schroll, 2013; Abbildung 06a und b). Die Grunddisposition für dieses Ereignis war vor allem durch den hohen Verwit-

terungsgrad der involvierten Gesteine sowie das ungünstige Trennflächennetzwerk gegeben (Abbildung 06c). Im Unterschied zum Ereignis von Alpl kam es hier zur direkten Zerstörung von Infrastruktur, wobei keine Personenschäden zu beklagen waren. Nach dem Ereignis wurden mittels dreier Sprengungen im Abrissgebiet verbliebene potentiell instabile Gesteinsmassen entfernt, und die Felsböschung unter anderem mittels Felsankern und einer Hochenergie-Seilsperre gesichert (Riepler und Schroll, 2013). Die Straßenverbindung blieb jedoch noch längere Zeit unterbrochen. Sechs Tage nach dem Ereignis wurde ein Shuttle Service für Pendler eingerichtet, wobei der betroffene Straßenabschnitt in einem 20-minütigen Fußmarsch umgangen werden musste. Erst am 27. Juli 2013 konnte eine provisorische Umgehungsstraße (Abbildung 06a) eröffnet werden, deren Verlauf auch der Neubau des betroffenen Abschnitts der Felbertauernstraße (eröffnet im August 2015) folgt. Die direkten Kosten (Neubau und entgangene Mauteinnahmen) betragen ca. 27 Millionen Euro, hinzu kamen noch ca. eine Million Euro an Kosten durch Umwege, und ca. 8 Millionen Euro Verdienstentgang im Tourismus (Pfurtscheller und Genovese, 2018).

16.3.3 Erd- und Schuttströme

16.3.3.1 Allgemeine Aspekte

Ausgangsmaterial für periodisch wiederkehrende Erd- und Schuttströme sind nahezu in allen Fällen veränderlich feste Gesteine, wie z. B. mergelige Sandsteine, (Kalk-)Mergel, Tonmergel, Tonsteine und Tone, die in Bezug auf ihr mechanisches Verhalten äußerst empfindlich gegenüber Wasserzutritt und -aufnahme sind. Demgemäß findet sich dieser Typ von Massenbewegungen bevorzugt in den tektonischen Großeinheiten des Rhenodanubikums, des (Ultra-)Helvetikums und in ganz bestimmten Bereichen des Kalkalpins, wie etwa der Hallstätter-Zone im Inneren Salzkammergut, wo diese Gesteine vermehrt anzutreffen sind.

Tektonische Zerrüttung im Zuge des Gebirgsbaus und die Verwitterung seit dem Pleistozän führten sukzessive zur Auflockerung und Bereitstellung des mobilisierbaren Materials (Abbildung 07a und b). Hang- und Bergwasser stellt in allen Fällen einen wesentlichen treibenden Faktor für Großereignisse dar. Als Auslöser können daher i) allmähliche Veränderungen des Wasserhaushalts, ii) extreme Niederschlagsereignisse oder auch iii) diverse Felslawineneignisse, z. B. verursacht durch laterales Driften (Hungri et al., 2014; Poisel und Eppensteiner, 1989; geomechanisches System »Hart auf Weich«) im Inneren Salzkammergut, registriert werden. Letztere führen durch die spontan große Auflast rigider Sturzblöcke auf plastischer Unterlage (stark verwitterte Mergel-, Ton-

und Salzgesteine) zum Effekt der undrainierten Belastung (undrained loading, z. B. Wilson et al., 2003), welcher aufgrund von Porenwasserüberdrücken die Scherfestigkeit stark herabsetzt, so dass sich zeitverzögert ausgedehnte Erd- und Schuttströme ausbilden können. Diese bewegen sich dann im Extremfall mit mehreren Metern bis mehreren Zehnermetern pro Tag zu Tal. Als akute Gegenmaßnahmen werden einerseits Wasserhaltungs-Systeme angelegt, um ein kontrollierbares Abfließen der Hang- und Bergwässer außerhalb des bewegten Bereiches zu bewirken. Andererseits werden Brunnenbohrungen vorgenommen, um die Porenwasserüberdrücke im Vorfeld abzubauen. Damit soll eine Verlangsamung und Einschränkung des Bewegungsablaufes herbeigeführt werden. In allen drei oben erwähnten tektonischen Einheiten kam es allein im Laufe des 20. Jahrhunderts zu einer Reihe von Extremereignissen – die spektakulärsten davon sollen im Folgenden kurz Erwähnung finden.

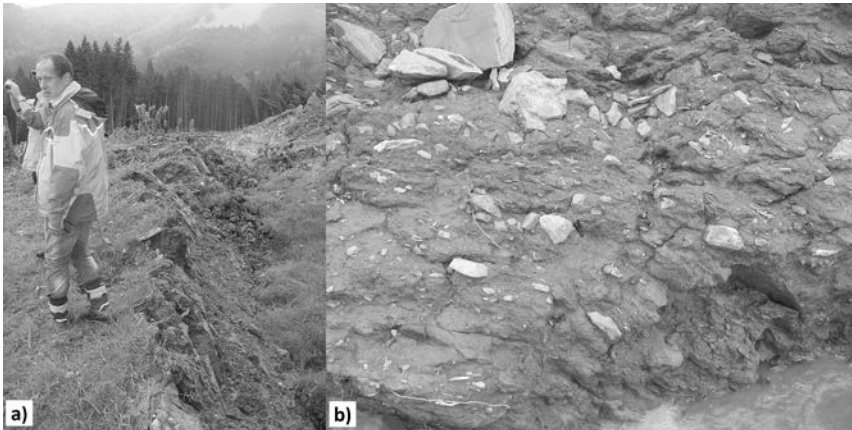


Abbildung 07: Erd- und Schuttstrom von Pechgraben bei Großraming im Jahre 2013: Scherfläche (a) und Material (Bildbreite ca. 1 m) (b).

Figure 07: Earth flow at Pechgraben near Großraming in 2013: Shear plane (a) and material (image width approx. 1 m) (b).

Fotos: J. Weidinger

16.3.3.2 Erd- und Schuttströme im (Ultra-)Helvetikum

Im Vorderen Bregenzer Wald (Vorarlberg) sind aus dem dort kalkig-mergelig-sandig entwickelten Helvetikum etliche Massenbewegungen bekannt, von denen jene von Rindberg in der Gemeinde Sibratsgfall aus dem Jahre 1999 besonders hervorsteicht. Dieser, in der Feuerstätter Decke liegenden, tiefgreifenden Hangbewegung, die oberflächennahe erdstromähnliche Kinematik aufwies, gingen Starkniederschläge voraus. Auf einer Fläche von 1,4 km² kamen auf einer in 70 m

Tiefe liegenden Bewegungsbahn ca. 70 Millionen m³ Material in Bewegung (Moser, 2003). Die Geschwindigkeit betrug bis zu 10 m pro Tag, wobei sich schwere Schäden an Straßen und Gebäuden einstellten (Abbildung 08a).



Abbildung 08: Beispiele von Erdströmen: Rindberg im Unterhangbereich (1999) (a); Gschliefgraben im Mittelhangbereich (2007) (b); Michlhallbach in Gesamtansicht mit dem Sandling im Hintergrund (1920) (c).

Figure 08: Examples of earth flows: Rindberg, lower part of the slope (1999) (a); Gschliefgraben, middle of the slope (2007) (b); Michlhallbach, total view with Sandling mountain in the background (1920) (c).

Fotos: aus Moser, 2003 (a), J. Weidinger (b) und aus Marchetti, 1991 (c)

Es sind aber in erster Linie die tonigen Sedimente des tieferen Schelfbereichs der Ultra-Helvetischen Zone, wie etwa die Buntmergelserie, die bevorzugt in mechanisch stark beanspruchten tektonischen Fenstern eine verstärkte Anfälligkeit für Erd- und Schuttströme aufweisen. Betroffen ist somit vor allem der Abschnitt zwischen dem bayerischen Ort Traunstein im Westen und der oberösterreichischen Stadt Steyr im Osten. So kamen 2013 in der Ortschaft Pechgraben bei Großraming, Oberösterreich (Abbildung 07a und b), wie auch 2014 im Stoßbach bei Grünau im Almtal, Oberösterreich Hänge in Bewegung, die von wasserführenden Kalkschollen überlagert werden und dem System »Hart auf Weich« ähneln.

Spektakulärstes Beispiel in dieser für Massenbewegungen so anfälligen tektonischen Einheit ist aber der Gschlifgraben am Traunsee-Ostufer, Gemeinde Gmunden, OÖ (Weidinger, 2009, 2012, 2017). Dieses bereits seit dem Mittelalter bekannte Erd- und Schuttstromsystem machte zuletzt in den Jahren 2007–08 von sich reden, als eine 3,8 Millionen m³ große Masse gegen den Traunsee drängte und 12 bewohnte Objekte gefährdete (Abbildung 08b). Neben der Umsetzung zahlreicher (Sofort-)Maßnahmen zur Stabilisierung der Großmassenbewegung wird deren landseitiger Bereich bis heute und in weiterer Zukunft mithilfe eines umfangreichen Multiparameter-Systems überwacht (Weidinger und Köck, 2009; Poisel et al., 2012; Supper et al., 2012). Im Hinblick auf ein noch umfassenderes Monitoring wurde im April 2013 der subaquatische Ausläufer des Gschlifgrabenfächers unter Einsatz von Fächerecholot und parametrischem Sedimentecholot (sub-bottom-profiler) hydrographisch vermessen. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen belegen, dass diese Großmassenbewegung periodisch zur markant erhöhten und teilweise zerstörerischen Ab- und Umlagerung von Sedimenten bis in größere Seetiefen geführt hat, was wiederum historische Dokumente bestätigt, dass Anfang des 18. Jahrhunderts Häuser samt Wirtschaftsgrund in den Traunsee verfrachtet wurden (Weidinger, 2009; Heine et al., 2016).

16.3.3.3 Erd- und Schuttströme im Rhenodanubikum

Massenbewegungen im Rhenodanubikum (= Flyschzone) sind häufig keine rasch ablaufenden, katastrophalen Prozesse, sondern eher eine Vielzahl von morphologischen Veränderungen, die mittel- bis langfristig zu einer sukzessiven Umgestaltung der Landschaft führen. Allerdings sind kleinräumig erscheinende Erdströme und Stauchwülste oft nur die Randerscheinungen größerer Bewegungssysteme, die im Zuge von Starkniederschlagsperioden zu Reaktivierung und extremen Zuständen führen können.

So finden sich etwa an der Gmundnerberg-Ostflanke oder an der Grünberg-Westflanke beiderseits des Traunsee-Nordufers große Bewegungssysteme. Das bekannteste Beispiel für diese tiefgreifende Auflockerung und starke Bewegung im Flysch ist der Höhenzug zwischen Mondsee-Ostende und Attersee-Südende, wo sich über eine Länge von 10 km die Hänge nach Süden und Osten absetzen und regelrecht auflösen (Weidinger, 2012). Aber auch am Attersee-Ostufer und weiter nach Osten finden sich – wenn auch überwiegend oberflächennahe – Erdstrommassen. Das Phänomen tritt u. a. am Häfelberg, am Gahberg und am Richtberg auf. Erst in jüngster Zeit waren davon die Kammerl- oder Jägermais-Rutschung betroffen. Dort lösten sich im Jahre 1959 300.000 m³ aus einer Ausbruchsnische 130 m über dem Attersee und senkten die Uferstraße ab (Weidinger, 2012). Auch die Rohrleiten-Rutschung bei Weyregg am Attersee-Ostufer

war mehrfach aktiv. 2007–08 kam es zur Reaktivierung eines aus dem Jahre 1896 stammenden Erd- und Schuttstromes am NW-Hang des Gahbergs, der weniger als 150 m vor den Wohnobjekten gestoppt werden konnte (Weidinger, 2012).

Das bekannteste dieser Fallbeispiele, das Erdstromsystem Fürwag am Hainsberg nördlich von Salzburg, bedeckt eine Fläche von 172 ha (Sausgruber et al., 2004). Es handelt sich dabei um verschiedene Erdströme, die zu unterschiedlichen Zeiten aktiv waren oder reaktiviert wurden. Die jüngsten Bewegungen betrafen im Jahre 1999 den so genannten Fürwag-Süd-Erdstrom (Braunstingl, 2000). Dieser ist sehr aktiv und erreichte damals beinahe den Talboden, wobei er eine ständig drohende Gefahr für Bundesstraße, Lokalbahn, Gaspipeline und Hochspannungsleitungen sowie einen Bauernhof darstellt (Sausgruber, 2005).

16.3.3.4 Erd- und Schuttströme im bzw. am Rande des Kalkalpins

Im Inneren Salzkammergut zwischen Oberösterreich und der Steiermark, im Gebiet um Hallstatt, Bad Goisern und Bad Aussee sowie im angrenzenden Gebiet in Salzburg bauen spröde Kalke der Trias und des Jura die Bergwelt auf und überlagern weiche Gesteine der Werfener Zone, des Salz- oder Haselgebirges und/oder Mergel der Hallstätter Zone in den Tallandschaften. Diese mechanischen Verhältnisse, die als »Hart auf Weich« bezeichnet werden können (Poisel und Eppensteiner, 1989) bedingen eine Vielzahl von gravitativen Massenbewegungen, die sturzartig, gleitend oder fließend (wie z. B. Erdströme und Muren) vor sich gehen können. Meist kommt es zu einer Kombination aller drei Bewegungsprozesse und damit zu geomorphologischen Kaskadeneffekten (Moser et al., 2003; Weidinger und Vortisch, 2005; Weidinger, 2012). So lösten in den Jahren 1978–1983 drei Felsstürze/Felslawinen von der Zwerchwand östlich von Bad Goisern mit einem Volumen von insgesamt 130.000 m³ den Erd- und Schuttstrom Stambach-Mure mit einem Volumen von 14 Millionen m³ aus, der aber glücklicherweise den Ort Bad Goisern nicht erreichte (Schäffer, 1983; Moser et al., 2003; Weidinger und Vortisch, 2005).

Das spektakulärste Beispiel dieser Art ereignete sich im Jahre 1920 im Bereich südlich des Ausseer Salzberges. Die nach einem niederschlagsreichen Sommer stattfindenden Felsstürze/Felslawinen (Bergsturz) vom Sandling mit 6–9 Millionen m³ Volumen lösten einen gewaltigen Erd- und Schuttstrom, die sogenannte Michlhallbach-Mure aus (Abbildung 08c), die sich mit Geschwindigkeiten von bis zu 50 m pro Tag ins Tal bewegte (Lehmann, 1926; Weidinger und Vortisch, 2005). Diese Massenbewegung erfolgte zwar weitgehend in wenig besiedeltem Gebiet, doch kam es in den darauffolgenden Jahren zur Umlagerung des Erdstrom-Materials bis zum Nordrand des Hallstättersees in Form des Murenfächers von St. Agatha.

Eine herausragende Sonderstellung nimmt in dieser Hinsicht das Gebiet westlich des südlichen Hallstättersees in OÖ ein (Moser et al. 2003; Weidinger 2012). Denn dabei handelt es sich vom Hohen Plassen im Westen über das Salzberg- und das Mühlbachtal bis hinunter in den Ort Hallstatt im Osten um eine klassische Sedimentkaskade (Felssturz/Felslawine-Erdstrom-Mure) mit periodisch katastrophalen Ausmaßen, deren Dokumentation bis in prähistorische Zeiten zurückreicht (Kern et al. 2008). Im Frühsommer 2013 genügte eine Gewitterzelle, um eine Mure durch die Mühlbachschlucht auszulösen, die das Zentrum des zum Weltkulturerbegebiet zählenden Ortes Hallstatt schwer in Mitleidenschaft zog. Um größeren Sedimentumlagerungen in Form von Erdströmen und Muren im Salzbergtal vorzubeugen, wurde am Eingang zur Mühlbachschlucht ein Sperrwerk samt Rückhaltebecken errichtet.

16.4 Mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen

16.4.1 Schwer prognostizierbare Prozesse und Prozessänderungen auf Grund von Veränderungen des natürlichen Systems

Großräumig gesehen sind problematische geologische Einheiten mit ausgeprägter Prädisposition für spezifische Prozesstypen im Alpenraum bekannt. Das Erkennen von kritischen Situationen, an denen konkreter und dringender Handlungsbedarf besteht, bleibt jedoch – vor allem betreffend etwas kleinerer Extremereignisse mit höheren Eintrittswahrscheinlichkeiten – eine große Herausforderung. Generell weisen die im Allgemeinen steilstehenden Abbruchnischen von Felslawinen und Felsstürzen darauf hin, dass bruchmechanische Prozesse in einem geklüfteten Gebirge vorhanden sein müssen, um ein Hangversagen auszulösen (Einstein, 1993; Einstein und Stephansson, 2000). Ein geklüftetes Gebirge besteht aus intaktem Gestein (inkl. Mikrorissen und Mikroporen), das von Trennflächen (z. B. Rissen, Klüften, Schichtungsflächen und Störungszonen) vollständig oder nur teilweise umgrenzt wird. Bei unvollständiger Umgrenzung sind intakte Gesteinsbrücken vorhanden, deren Ausmaß die Festigkeit des Gebirges bestimmt. Einstein et al. (1983) konnten zeigen, dass vollständig durchtrennende, räumlich ausgedehnte Trennflächen in der Natur selten vorkommen und dass eine Interaktion von vorhandenen Trennflächen und Risswachstum entlang der intakten Felsbrücken notwendig ist, damit eine Felsflanke grundsätzlich versagen kann. Diesbezüglich sind physikalische und chemische Prozesse maßgebend, die das Risswachstum entlang bestehender Trennflächen sowie die Neubildung und erhöhte Vernetzung von Trennflächen

fördern und so die Gebirgsfestigkeit progressiv reduzieren. Diese sehr langsamen und zeitabhängigen Prozesse werden subkritisches Risswachstum genannt (Atkinson, 1989). Allerdings lässt sich die darin enthaltene Zeitkomponente aufgrund der Komplexität des Systems (u. a. Porenwasserdruck, in-situ Spannungszustand, Spannungskorrosion, Diffusion, Ionenaustausch und Mikroplastizität) nur sehr schwer abschätzen und quantifizieren (Atkinson, 1989). So können das Risswachstum und der Vernetzungsprozess in-situ nicht direkt beobachtet bzw. nicht bis nur schwer gemessen werden. Daher können nur indirekt, auf Basis von Deformationsmessungen, Rückschlüsse auf einen beginnenden Versagensprozess abgeleitet bzw. basierend darauf Prognosen erstellt werden. Diese Herangehensweise wird in diversen Normen und Regelwerken wie ÖN und DIN als Beobachtungsmethode bezeichnet.

Neben dem sub-kritischen Risswachstum, das durch Gebirgsspannungen, Wasserdrücke oder hydrochemische Prozesse in den Klüften beeinflusst wird, sind bei der Ablösung von Felslawinen und Felsstürzen auch Temperatureinflüsse, die sich durch thermo-mechanische Prozesse bis in größere Tiefen auswirken können (Krähenbühl, 2004; Gischig et al., 2011a,b), zu berücksichtigen. Zusätzlich ist in hochalpinen Regionen je nach Exposition und Hangneigung mit sich veränderndem Permafrost zu rechnen, der einen weiteren Einfluss auf die Stabilität von Felsflanken ausübt. Aus den beschriebenen komplexen und vielschichtigen Einflussfaktoren für das Risswachstum ergibt sich die große Herausforderung der Identifizierung und Lokalisierung potentiell instabiler Felsflanken und deren räumlicher Verteilung. Offene und neu entstandene Trennflächen sowie ein stark aufgelockertes Gebirge und zunehmende Steinschlag-Aktivität können erste Hinweise für die Entstehung einer tiefgründigen Felsgleitung oder Felslawine sein. Jedoch können daraus keine Rückschlüsse gezogen werden, ob bzw. wann ein sehr schnelles (»katastrophales«) Hangversagen tatsächlich eintritt. Nur im Falle eines exponentiell beschleunigten Deformationsverhaltens sind mit einem hochauflösenden Monitoringsystem zuverlässige Prognosen möglich (Zangerl et al., 2008). Die Schwierigkeit einer seriösen Einschätzung der Stabilität potentieller Ablösegebiete und vor allem fehlende lokalitätsspezifische Untersuchungen sind mit die Gründe dafür, dass in der Vergangenheit manche Ereignisse nicht vorhergesagt wurden. Diesbezüglich ist anzumerken, dass gerade Felslawinen häufig nicht unvorhergesehen passieren, sondern sich durch Vorläuferereignisse ankündigen, z. B. Hangdeformationen, Öffnung von Spalten, erhöhte Steinschlagaktivität, geänderte Bergwasserfließsysteme, etc., d. h. erkennbar sind sofern entsprechende Geländebeobachtungen durchgeführt werden (z. B. Turner und Schuster, 1996; Highland und Bobrowsky, 2008; Blikra und Kristensen, 2013). Jedoch fehlen derartige direkte Geländebeobachtungen/Untersuchungen häufig, vor allem in abgelegenen oder schwer zugänglichen Gebieten, sodass indirekte Fernerkundungs- und Moni-

toring-Methoden zunehmend an Relevanz gewinnen (z. B. LiDAR, InSAR: Rott und Nagler, 2006; Barboux et al., 2015; Janeras et al. 2017; Fey, 2018).

Auch für die erstmalige Entstehung von langsamen und schnellen Felsgleitungen sind bruchmechanische Prozesse verantwortlich, die zur Ausbildung von internen und basalen Scherzonen führen. Diese Scherzonen bestehen meist aus neu gebildeten bindigen und/oder nicht-bindigen Störzongesteinen (Kakirite, fault gouge and breccia), die geomechanische und hydraulische Lockergesteinseigenschaften aufweisen. In einigen Fällen kann auch beobachtet werden, dass bereits bestehende tektonische Störungszonen als Scherzonen von Felsgleitungen reaktiviert werden. Sind die zum Teil zusammenhängenden Scherzonen erstmalig entstanden, wird die weitere Hangdeformation im Wesentlichen durch Kriech- und Gleitprozesse in diesen Zonen bestimmt. Häufig ist zu beobachten, dass die darüber liegende bewegte Gleitmasse nur durch geringe Interndeformationen beeinflusst ist. Ob es im Rahmen dieses erstmaligen Hangversagens zu i) einer exponentiell beschleunigten Bewegung mit eventuell katastrophalem Hangversagen, zu ii) einer langsamen vorwiegend konstanten Bewegung mit periodischen Beschleunigungsphasen, oder iii) zu einer Bewegung mit kontinuierlich abnehmenden Geschwindigkeiten und eventuell vollständiger Stabilisierung kommt, ist von einer Vielzahl an Faktoren abhängig. So haben z. B. Änderungen des Poren- bzw. Kluftwasserdrucks, fortschreitende Veränderungen der Geometrie, Teilschollenbildung im Hangfußbereich, Interaktion mit Talalluvionen und/oder zeitlich und räumlich variable Eigenschaften der Scherzonen einen wesentlichen Einfluss auf das Deformationsverhalten.

Langsame Felsgleitungen sind häufig durch Teilschollenbildung gekennzeichnet (z. B. Zangerl et al., 2015): es entstehen unterschiedlich große und unterschiedlich aktive Blöcke, die wiederum durch Scherzonen vom Rest abgetrennt sind. Diese Zerlegung kann dazu führen, dass an der Oberfläche oder im Untergrund differentielle Verschiebungen auftreten, die langfristig zu Schäden an Infrastruktur und Bauwerken führen und die geplante Lebensdauer derselben drastisch verkürzen können. Zusätzlich können diese Teilschollen vor allem im Hangfußbereich durch Interaktion mit dem Vorfluter sich zu raschen sekundären Gleitungen entwickeln, die wiederum das gesamte System nachteilig z. B. durch die Auslösung neuer Beschleunigungsphasen beeinflussen können.

Im Hinblick auf Erd- bzw. Schuttströme wurden in den letzten Jahren vorwiegend Reaktivierungen und Beschleunigungen bestehender Systeme (wie Gschlifgraben oder Rohrleitengraben) beobachtet, die Siedlungsgebiete gefährdeten und die Durchführung von Schutzmaßnahmen umgehend nötig machten. Eine große Herausforderung stellt dabei die Prognose potentieller Reaktivierungen dar, da auch in Gebieten, die in den letzten Jahrzehnten unauffällig waren, sehr wohl neue und unerwartete Phasen erhöhter Aktivität auftreten können.

16.4.2 Mögliche Veränderung von Frequenz und Magnitude durch fortschreitende Umweltveränderungen im Hochgebirge

Altersdatierungen von Massenbewegungen (siehe Kapitel 16.2.1) legen nahe und einige Fallbeispiele (McColl und Davies, 2013; Kos et al., 2016; Fey et al., 2017; Grämiger et al., 2016, 2017) zeigen, dass der fortschreitende Gletscherrückgang in den Alpen die Entstehung und Beschleunigung von tiefgründigen Massenbewegungen begünstigt. Als zugrundeliegende Mechanismen werden die Entlastung der Hänge im Hangfußbereich durch die abschmelzenden Eismassen und/oder der Zerfall des Permafrostes im geklüfteten Gebirge diskutiert. Zusätzlich kann angenommen werden, dass diese Systemveränderungen zu einer Beeinflussung der hydrogeologischen Fließsysteme und Wasserdruckverteilung führen. Wie diese Mechanismen im Detail auf die Hangstabilität wirken und interagieren ist jedoch noch wenig erforscht und daher Ziel von verschiedenen Forschungsprojekten.

Die teilweise oder vollständige Entlastung der Hangflanken durch den Rückzug von Gletschern führt zu einer Veränderung der Stabilitätsbedingungen. Dies kann rasch und unverzüglich zur Hangdestabilisierung mit der Bildung von raschen Felsgleitungen, Felsstürzen und Felslawinen, aber auch zur langsamen Destabilisierung mit einer fortschreitenden Schwächung des Gebirges durch progressive Entfestigung (Eberhardt et al., 2004), mit einer ausgeprägten Verzögerungszeit von Jahrzehnten oder länger führen. Da vorwiegend tieferliegende Abschnitte der Einhänge potenzieller Felsgleitungen und Felslawinen durch den Gletscherrückzug eisfrei werden, das heißt Abschnitte die eine hohe Relevanz für die Standfestigkeit aufweisen, kann es auch bei eher geringen Massenveränderungen im Eis zur Bildung von Hanginstabilitäten kommen. Grundsätzlich muss bei glazial erodierten Hängen auch mit einer für die Stabilität ungünstigen Übersteilung gerechnet werden. Abgesehen von einer rein statischen Standsicherheitsbetrachtung der aktuellen glazialen Entlastung durch Gletscherrückzug zeigen numerische Modellierungen, dass Gletscherschwankungen mit zyklischen Vorstoß- und Rückzugsphasen Einfluss auf den in-situ Spannungszustand ausüben, und damit wiederum die Gebirgsfestigkeit der Einhänge durch sub-kritisches Risswachstum und Rissvernetzung progressiv reduzieren bis dann möglicherweise ein Versagen eintritt (Grämiger et al., 2017).

Für die konzeptuelle Betrachtung unterschiedlicher Prozesse wurde der Einfluss von Permafrost in einem geklüfteten Gebirge auf die Festigkeit durch Laborversuche untersucht. So führte z. B. Davies et al. (2001) im Labor Scherversuche an eisgefüllten Trennflächen durch und konnte zeigen, dass die Scherfestigkeit bei niedrigeren Temperaturen höher ist und sich bei Erwärmung verringert. Eisgefüllte Trennflächen erhöhen demnach die Gebirgsfestigkeit und

reduzieren das subkritische Risswachstum (Atkinson, 1989), ein Prozess der nötig ist um die Bildung einer durchgehenden Ablösefläche oder basalen Scherzone zu ermöglichen. Krautblatter et al. (2013) stellte ein konzeptuelles mechanisches Fels-Eis-Modell für eisgefüllte Trennflächen vor, das i) Kriechprozesse des Eises als nicht-lineares viskoses Material, ii) Bruchprozesse der Gestein-Eis Kontaktflächen, iii) Reibungsprozesse der Gestein-Gestein Kontaktflächen und iv) Bruchprozesse der intakten Gesteinsbrücken berücksichtigt. Dieses Modell und andere Laborversuche (z. B. Kodama et al., 2013) an intaktem Gestein weisen auf eine Verringerung der Gebirgs- bzw. Gesteinsfestigkeit bei Erhöhung der Temperatur hin (i. e. Simulation schmelzender Permafrost). Weitere, nur wenig untersuchte Prozesse im Zusammenhang mit Permafrost im Gebirge wie z. B. Eis-Segregation entlang von Trennflächen und damit verbunden die zunehmende Auflockerung des Gebirges sind möglich. Basierend auf der aktuellen Datenlage kann angenommen werden, dass auftauender Permafrost vor allem oberflächennah (*active layer*) und weniger in großen Tiefen von mehreren Dekameter- oder Hektometern relevant ist, d. h. im Bereich der basalen Ablöseflächen bzw. Scherzonen von tiefgründigen Felsgleitungen oder großen Felslawinen keine oder nur eine geringe Rolle spielt.

Im Zuge des weiteren Gletscherrückgangs und des Auftauens von Permafrost sind im hochalpinen Raum allgemein sowohl neu auftretende Massenbewegungen als auch eine Erhöhung der Frequenz zu erwarten. Anzumerken ist, dass detaillierte Untersuchungen im hochalpinen Gelände oftmals durch schlechte Zugänglichkeit und z. T. erhöhte Steinschlaggefahr erschwert werden. Eine Erhöhung der involvierten Abbruchvolumina könnte zur Entwicklung von großen extrem raschen Felsgleitungen und Felslawinen mit großer Reichweite, sowie zu Prozessketten durch erhöhte Bereitstellung von potentieller Geschiebefracht und verstärkten Interaktionen mit Gerinnen führen.

16.5 Handlungsoptionen

16.5.1 Verbesserung des Prozessverständnisses

Grundsätzlich ist zu bemerken, dass der Kenntnisstand über die zeitabhängigen Entstehungsprozesse und die Deformationsmechanismen von tiefgründigen Felsgleitungen, Felslawinen und Erd-/Schuttströmen aufgrund der beschriebenen Komplexität und Variabilität einerseits begrenzt ist und andererseits diese Prozesse noch nicht vollständig erforscht sind. Im Zuge einer erhöhten Prognosesicherheit und verbesserten Gefahrenabschätzung ist jedoch ein tiefgreifendes Prozessverständnis nötig, um das Systemverhalten zu verstehen und möglichst realitätsnah modellieren zu können. Dafür werden Kenntnisse und

Daten über die Geometrie, Kinematik, zeitliche Aktivität und Deformationsverhalten, Trigger-, Beschleunigungs-, und Stabilisierungsfaktoren und hydro-mechanische Charakterisierung des Gebirges benötigt. Im Hinblick auf Extremereignisse unterschiedlichster Ausprägungen ist vor allem wichtig, i) ein breites Methodenspektrum zur Erkundung und Prozessanalyse anzuwenden, ii) mit Chroniken bekannter Ereignisse und Gefahren-/Risikoabschätzungen möglicher zukünftiger Ereignisse ein möglichst vollständiges lokales und regionales Inventar von Massenbewegungen zu erstellen, iii) moderne Monitoring- und Frühwarnsysteme einzusetzen und diese weiterzuentwickeln, iv) die Systemkomplexität und die Unsicherheiten der Prognose mit Hilfe einer prozess-basierten Raumplanung in Kombination mit Risikokommunikation zu berücksichtigen, und v) wenn möglich technische Schutz- bzw. Stabilisierungsmaßnahmen zu planen und umzusetzen.

16.5.2 Anwendung eines umfassenden und innovativen Methodenspektrums

Für die vertiefte Untersuchung von langsamen und raschen Felsgleitungen, Felslawinen und Erd-/Schuttströmen steht eine Vielzahl an Methoden zur Verfügung. Geomorphologische, geologische, ingenieurgeologische und hydrogeologische Kartierungen eignen sich i) zur räumlichen Abgrenzung der Anriss-, Transit- und Ablagerungsbereiche und zur Aufnahme von Hangbewegungsindikatoren wie z. B. Anrissflächen, Stauchwülsten, Zug- und Scherrissen, Nackentälchen und Erosionsflächen, ii) zur lithologischen Aufnahme der Fest- und Lockergesteine sowie der duktilen bzw. spröden geologischen Strukturen, iii) zur geometrischen (Trennflächenanalyse) und fels- bzw. bodenmechanischen Charakterisierung der Fest- und Lockergesteine und iv) zur hydrogeologischen Beschreibung durch die Aufnahme von Quellen, Quellhorizonten, Gerinnen und Versickerungszonen und deren physikalischer Parameter. Als Arbeitsgrundlage thematischer Kartierungen stehen topographische Karten, hochgenaue Geländemodelle auf Basis luftgestützter und/oder terrestrischer Laserscanneraufnahmen, und georeferenzierte Orthofotos digital zur Verfügung.

Um die Hauptstrukturen und Geometrien (Lage und Geometrie der Bewegungszone, Ausdehnung und Mächtigkeit oder Internstruktur einer bewegten Masse) von Massenbewegungen zu erfassen, können verschiedene geophysikalische Methoden angewandt werden, wie zum Beispiel Geo-Seismik, Georadar (Ground Penetrating Radar, GPR) oder vor allem bei feinkornreichen Erd-/Schuttströmen geoelektrische Erkundungsmethoden (Brückl, 2001).

Vielfach werden zur Erkundung des Internaufbaus von Massenbewegungen Bohrungen abgeteuft oder Erkundungsstollen errichtet (z. B. Bonzanigo et al.,

2007; Zangerl et al., 2008, 2010, 2017). Das Ziel der genannten Aufschlussmethoden besteht in der Erfassung folgender Gesteins- bzw. Gebirgsparameter: a) lithologisches und strukturelles Inventar, b) Verwitterungs- und Zerlegungsgrad (Trennflächeneigenschaften) und in-situ Korn- bzw. Blockgrößenverteilungen, c) Mächtigkeit und Volumen der instabilen Gebirgsbereiche, d) Aufbau, Anzahl und Tiefenlage der Scherzone(n) und e) hydrogeologische Verhältnisse der Massenbewegung. Bohrungen eignen sich sehr gut zur tiefenspezifischen Instrumentierung mit hoch entwickelten Deformations- sowie hydrologischen und geophysikalischen Messsystemen. So lassen sich mögliche Verschiebungen entlang einer Bohrung linienweise mit Inklinometern und Extensometern, die Kluft- bzw. Porenwasserdrucke und deren zeitlichen Schwankungen permanent mittels Piezometermessstellen, und die mikroseismische Aktivität des Hanges (Bruchvorgänge) mittels installierter Bohrlochgeophone überwachen. Zusätzlich werden zur Kalibrierung und Beurteilung geophysikalischer Erkundungen Kernbohrungen benötigt. Inklinometer-Messungen entlang von Bohrungen ermöglichen eine eindeutige Lokalisierung von aktiven Hangbewegungen (z. B. Scherzonen von aktiven Gleitungen und Erd-/Schuttströmen), nicht jedoch von ruhenden oder inaktiven Massenbewegungen (d.h. keine aktiven Deformationen/Lageverschiebungen messbar); in diesen Fällen können Bohrkernauswertungen und geophysikalische In-Situ Bohrlochmessungen (Strukturlogs, Kaliberlogs) auf potentielle Scherzonen hinweisen. Zudem können mit geophysikalischen Bohrlochsonden u. a. die natürliche Radioaktivität, Temperatur, elektrische Leitfähigkeit, Strömung und andere Parameter entlang einer Bohrung kontinuierlich aufgezeichnet werden. Zur Abschätzung der hydrogeologischen Parameter wie der hydraulischen Durchlässigkeit, statischen Druckhöhe und Speicherkapazität eignen sich Einzel- und Mehrfachpackertests oder Pumpversuche (Tacher et al., 2005). An Gesteinsproben aus Kernbohrungen oder Erkundungsstollen können verschiedene mineralogische, fels- bzw. bodenmechanische und hydraulische Laborversuche zur Bestimmung von unterschiedlichen Kennwerten durchgeführt werden (z. B. Strauhel et al., 2017).

Die ingenieurgeologischen Gebirgs-/Hangmodelle bilden u. a. die Grundlage analytischer Stabilitätsberechnungen und prozessorientierter numerischer Modellierungen auf Basis von Kontinuums- und Diskontinuums-Ansätzen. Die Zielsetzungen von Berechnungen und numerischen Modellierungen können dabei sehr unterschiedlich sein und beinhalten z. B. a) Standsicherheitsuntersuchungen, b) kinematische Analysen, c) Untersuchung des Einflusses von Grundwasser auf Hangbewegungen, d) Untersuchung von zeitlich variablen Hangbewegungen und deren Einflussgrößen (z. B. Niederschlag, Schneeschmelze, Temperatur, Stauspiegelschwankungen eines Reservoirs am Hangfuß), e) Rückrechnung von in-situ Materialparametern, f) Einfluss dynamischer

Belastungen (Erdbeben) auf die Hangstabilität Auswirkung von Baumaßnahmen auf die Standsicherheit, g) Planung von Hangstabilisierungsmaßnahmen (z. B. Entwässerungsbohrungen/-brunnen, Drainagestollen), h) Szenarienbetrachtungen (Analyse der Reichweite und des Ablagerungsgebietes von Felslawinen und raschen Gleitungen, Kaskadeneffekte, etc.).

Grenzgleichgewichtsmethoden und numerische Modellierungen eignen sich sehr gut um Mechanismen und Prozesse zu studieren. Sie bilden daher einen zusätzlichen Baustein bei der Beurteilung von Massenbewegungen.

16.5.3 Monitoring- und Frühwarnsysteme

Rasche Gleitungen und Felslawinen werden häufig als scheinbar unerwartete und plötzliche Ereignisse wahrgenommen, sind jedoch fast immer durch Vorbereitungsphasen gekennzeichnet. Diese Vorbereitungsphasen äußern sich in Gebirgsdeformationen (sub-kritischem Risswachstum, Bildung von Spalten, Öffnen von Trennflächen, beginnende/zunehmende Steinschlag-Aktivitäten etc.) und ermöglichen den sinnvollen Einsatz von Monitoring- und Warnsystemen zur Früherkennung von möglichen Sturz-, Kipp-, Gleit- oder Fließereignissen (mittels der Beobachtungsmethode), vorausgesetzt die Gefahrenstellen können im Vorfeld lokalisiert werden. Zusätzlich bilden Deformationsmessungen die Grundlage für die Erstellung von kinematischen Modellen, für die Bestimmung möglicher Triggerfaktoren und für Prognosen betreffend der zeitlichen und räumlichen Entwicklung von Massenbewegungen. Diese Monitoringssysteme beruhen auf dem Erfassen von Verschiebungen an der Oberfläche und/oder in der Tiefe einer Massenbewegung. Das Ziel von Deformationsmessungen kann sehr vielfältig sein: Es können Informationen über a) die räumliche Verteilung und Orientierung der Verschiebungs- und Geschwindigkeitsvektoren an der Oberfläche und in der Tiefe, b) die zeitlich variable Geschwindigkeitsentwicklung und c) die räumliche Abgrenzung zwischen unbewegten und bewegten Bereichen, aber auch von unterschiedlich aktiven Teilschollen gewonnen werden.

Messtechnisch lassen sich Hangverschiebungen punkt-, linienweise oder flächenhaft ermitteln (Kovari, 1988; Zangerl et al., 2008). Punktförmige Messdaten erhält man z. B. durch tachymetrische Vermessungen, Nivellements, GPS-Messungen, Draht-Extensometermessungen, Rissmeteraufnahmen, Laserdistanzometer und Schlauchwaagen. Linienförmige Messungen können vor allem entlang von instrumentierten Bohrungen durchgeführt werden und beinhalten z. B. Inklinometermessungen, stationäre Ketteninklinometersysteme, TDR, Trivec-Sonden und Extensometermessungen. In den letzten Jahren haben sich vor allem flächenhaft messende Methoden stark weiterentwickelt. Sie ermögli-

chen die Erfassung des Verschiebungsfeldes an der Oberfläche einer Massenbewegung. Entsprechend der vorhandenen Verschiebungsraten und einer allfälligen Vegetationsbedeckung können Hangbewegungen mittels Fotogrammetrie (Casson et al., 2003), Radarinterferometrie (Rott et al., 1999) oder Laserscanning (Fey et al., 2015), sowie kombinierter Methoden (Janeras et al., 2017; Fey, 2018) beobachtet werden, wobei diese Methoden sowohl terrestrisch als auch luftgestützt zur Anwendung kommen können. Die ständige Verbesserung und Weiterentwicklung der Satelliten-gestützten Radarinterferometrie ermöglicht die großräumige Detektion rezent aktiver Massenbewegungen auf lokaler und regionaler Maßstabsebene, und kann bei günstigen Aufnahmebedingungen extrem schnelle Massenbewegungen bereits im Initialstadium detektieren (Rott und Nagler, 2006; Intrieri et al., 2018).

Viele der genannten Messsysteme lassen sich automatisieren und sind damit als Frühwarnsystem einsetzbar. In Österreich existieren Frühwarnsysteme z. B. bei Straßen und Bahnlinien für den Prozess Murgang aber auch für tiefgründige Massenbewegungen im Einflussbereich von Infrastrukturanlagen wie z. B. Speicherseen. Natürlich wären solche Systeme auch für schnelle und große Felslawinen und Felsgleitungen wünschenswert, dies setzt jedoch ein Erkennen und eine Lokalisierung einer potentiellen Massenbewegung während der Vorbereitungsphase zum eigentlichen Versagen voraus. Im Falle von Erd- bzw. Schuttströmen sind, aufgrund deren geringen Potentials zur unvorhergesehenen »katastrophalen« Hangbeschleunigung, Frühwarnsysteme weniger relevant. Vielmehr sind hier flächendeckende Fernerkundungsmethoden von Interesse.

16.5.4 Raumplanung und bauliche Maßnahmen

Die Raumplanung ist, was Extremereignisse von großen Massenbewegungen betrifft, vor enorme Herausforderungen gestellt (BAFU, 2016), da es in vielen Fällen schwierig ist, singuläre Extremereignisse, wie z. B. Felslawinen und rasche Felsgleitungen, für die Raumplanung vorherzusagen und das gefährdete Gebiet entsprechend abzugrenzen. Auch die Reaktivierung von inaktiven, sowie die Beschleunigung von extrem langsamen Erd-/Schuttströmen oder Felsgleitungen lässt sich vielfach zeitlich nicht genügend zuverlässig (d. h. rechtzeitig für raumplanerische Maßnahmen) prognostizieren, sondern tritt mitunter auf Grund unterschiedlichster Auslösefaktoren, oder einer Kombination mehrerer Faktoren (z. B. Hangfußerosion durch Hochwasserereignis, außergewöhnliche Hangwasserverhältnisse etwa durch Niederschlagsereignisse und/oder Schneeschmelze) unerwartet plötzlich ein. Viele Fallbeispiele zeigen, dass Reaktivierungen und Beschleunigungsphasen von Erd-/Schuttströmen und Felsgleitungen möglich sind, ja sogar erwartet werden müssen,

und zur Bedrohung von Siedlungsraum und Infrastruktur führen können. Die Anwendung des Ansatzes auf Basis von Jährlichkeiten hilft bei diesen Prozessen nur wenig weiter. Vielmehr ist es vorstellbar, dass fundierte Vorerkundungen (thematische Kartierungen, Inventarkarten, Chroniken etc.) in Kombination mit Deformationsmessungen (v. a. durch flächendeckende Fernerkundungsmethoden wie InSAR und LiDAR) dazu beitragen, bestehende Massenbewegungen, die zu Reaktivierungen oder Beschleunigungsphasen neigen, zu erfassen und bei raumplanerischen Maßnahmen zu berücksichtigen.

In punkto bauliche Maßnahmen ist festzuhalten, dass diese im Anrissgebiet von Großmassenbewegungen oft nicht zielführend sind, da sie technisch meist aufwändig und damit unwirtschaftlich – oder mitunter gar nicht herstellbar – sind. Maßnahmen wie Vernetzungen, die oft im Ablösegebiet von Ereignissen errichtet werden, dienen lediglich dem Abfangen kleinvolumiger Nachstürze, haben aber keinerlei Wirkung für große Massenbewegungen. Ebenso ist die Beseitigung von potentiell instabilem Material nur in begrenztem Ausmaß möglich. Auch im Transit- und Ablagerungsgebiet sind konstruktive technische Maßnahmen oft unwirksam, da sie den großen Energien derartiger Massenbewegungen zu wenig Widerstand entgegensetzen können. Die Ausnahme davon bilden jene Maßnahmen, die dafür ausgelegt sind das gefährdete Gebiet, z. B. mit einer Trassenverlegung oder einer Untertunnelung, zu vermeiden. Bei langsamen Felsgleitungen und bei Erd-/Schuttstößen ist die Situation eine andere. Aufgrund des größeren zeitlichen Handlungsspielraumes kann mitunter selbst bei Extremereignissen (z. B. Haunsberg, Gschlieffgraben oder Navis/Kerschbaum) durch die Setzung von gezielten Maßnahmen, wie präventiven oder nachfolgenden Entwässerungen der Masse (Drainage und schadhlose Ableitung von Oberflächen- und Hangwässern), wesentlich zur Entschärfung der Gefahrensituation beigetragen werden. Jedenfalls sind Maßnahmen durch ingenurgeologische/geotechnische Expertinnen oder Experten lokalitätsspezifisch zu planen. Dies muss unter Berücksichtigung der jeweiligen Prozesstypen sowie der gefährdeten Objekte geschehen (z. B. Turner und Schuster, 1996; Fell et al., 2000; Sassa und Canuti, 2009 und Referenzen darin).

Literatur

- Abele, G., 1974. Bergstürze in den Alpen. Ihre Verbreitung, Morphologie und Folgeerscheinungen. Wissenschaftliche Alpenvereinshefte, 25, 230 S.
- Agliardi, F., Crosta, G., Zanchi, A., 2001. Structural constraints on deep-seated slope deformation kinematics. *Engineering Geology*, 59, S. 83–102.

- Agliardi, F., Crosta, G., Zanchi, A., Ravazzi, C., 2009. Onset and timing of deep-seated gravitational slope deformations in the eastern Alps, Italy. *Geomorphology*, 103, S. 113–129.
- Ampferer, O., 1939. Über einige Formen der Bergzerreißung. Sitzungsbericht. Österreichische Akademie der Wissenschaften, mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse, 148, S. 1–14.
- Amt der Tiroler Landesregierung, 2009. Digitales Geländemodell. Gesamtbefliegung 2006 bis 2009. Abteilung Geoinformation, Innsbruck.
- Anegg, J., 2018. Monitoring Kerschbaumsiedlung. Monatsberichte des Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Geoinformation, in Zusammenarbeit mit Trigonos ZT GmbH/Trigonos Metrology GmbH, Schwaz.
- Atkinson, B.K., 1989. *Fracture Mechanics of Rock*. Elsevier Science, Burlington, 548 S.
- Azzoni, A., Chiesa, S., Frassoni, A., Govi, M., 1992. The Val Pola landslide. *Engineering Geology*, 33, S. 59–70.
- BAFU (Hrsg.), 2016. Schutz vor Massenbewegungsgefahren. Vollzugshilfe für das Gefahrenmanagement von Rutschungen, Steinschlag und Hangmuren. Bundesamt für Umwelt, Umwelt-Vollzug Nr. 1608, 98 S.
- Barboux, C., Strozzi, T., Delaloy, R., Wegmüller, U., Collet, C., 2015. Mapping slope movements in Alpine environments using TerraSAR-X interferometric methods. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 109, S. 178–192.
- Barla, G., Antolini, F., Barla, M., Mensi, E., Piovano, G., 2010. Monitoring of the Beaugard landslide (Aosta Valley, Italy) using advanced and conventional techniques. *Engineering Geology*, 116, S. 218–235.
- Blikra, L.H., Kristensen, L., 2013. Monitoring concepts and requirements for large rockslides in Norway. In: C. Margottini, P. Canuti, K. Sassa (Hrsg.), *Landslide Science and Practice. Volume 2: Early Warning, Instrumentation and Monitoring*. Springer Verlag, Berlin, S. 193–200.
- Bonzanigo, L., Eberhardt, E., Loew, S., 2007. Long-term investigation of a deep-seated creeping landslide in crystalline rock – Part 1: geological and hydromechanical factors controlling the Campo Vallemaggia landslide. *Canadian Geotechnical Journal*, 44(10), S. 1157–1180.
- Brandner, R., 1980. Geologische und Tektonische Übersichtskarte von Tirol. Tirol-Atlas, Universitätsverlag Wagner, Innsbruck.
- Braunstingl, R., 2000. Die Rutschung Fürwag am Haunsberg – eine »hydraulische« Massenbewegung im Flysch. *Geoforum Umhausen 1999, Tagungsband I*, S. 60–71.
- Brückl, E., 2001. Cause-effect models of large landslides. *Natural Hazards*, 23, S. 291–314.
- Brückl, E., Brunner, F.K., Lang, E., Mertl, S., Müller, M., Stary, U., 2013. The Gradenbach Observatory – monitoring deep-seated gravitational slope deformation by geodetic, hydrological, and seismological methods. *Landslides*, 10(6), S. 815–829.
- Casson, B., Delacourt, C., Baratoux, D., Allemand, P., 2003. Seventeen years of the »La Clapière« landslide evolution analysed from ortho-rectified aerial photographs. *Engineering Geology*, 68, S. 123–139.
- Crosta, G.B., di Prisco, C., Frattini, P., Frigerio, G., Castellanza, R., Agliardi, F., 2013. Chasing a complete understanding of the triggering mechanisms of a large rapidly evolving rockslide. *Landslides*, 11, S. 747–764.

- Cruden, D.M., Varnes, D.J., 1996. Landslide Types and Processes. In: A.K. Turner, R.L. Schuster (Hrsg.), *Landslides: Investigation and mitigation*. Special report 247. National Academic Press, Washington D.C., S. 36–45.
- Davies, M.C.R., Hamza, O., Harris, C., 2001. The effect of rise in mean annual temperature on the stability of rock slopes containing ice-filled discontinuities. *Permafrost and Periglacial Processes*, 12, S. 137–144. DOI: 10.1002/ppp.378.
- Eberhardt, E., Stead, D., Coggan, J.S. 2004. Numerical analysis of initiation and progressive failure in natural rock slopes-the 1991 Randa rockslide. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 41, S. 69–87.
- Einstein, H.H., 1993. Modern developments in discontinuity analysis – the persistence-connectivity problem. In: J.A. Hudson (Hrsg.), *Comprehensive Rock Engineering*. Pergamon Press, Oxford, 3, S. 193–213.
- Einstein, H.H., Stephansson, O., 2000. Fracture systems, fracture propagation and coalescence. Issue Paper. Conference on Geotechnical and Geological Engineering, GeoEng2000, Melbourne.
- Einstein, H.H., Veneziano, D., Baecher, G.B., O'Reilly, K.J., 1983. The effect of discontinuity persistence on rock slope stability. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences & Geomechanics Abstracts*, 20(5), S. 227–236.
- Fell, R., Hungr, O., Leroueil, S., Riemer, W., 2000. Geotechnical Engineering of the Stability of Natural Slopes, and cuts and Fills in Soils. Keynote Lecture. International Conference on Geotechnical and Geological Engineering, GeoEng2000. Melbourne, 1, S. 21–120.
- Fey, C., 2018: Remote Sensing Applications for Deformation Monitoring and Process Analyses of Landslides in Alpine Environment. Dissertation, Universität Innsbruck, Innsbruck, 153 S.
- Fey, C., Rutzinger, M., Wichmann, V., Prager, Ch., Bremer, M., Zangerl, Ch., 2015. Deriving 3D displacement vectors from multi-temporal airborne laser scanning data for landslide activity analyses. *GIScience & Remote Sensing*, 52(4), S. 437–461.
- Fey, C., Wichmann, V., Zangerl, Ch., 2017. Reconstructing the evolution of a deep seated rockslide (Marzell) and its response to glacial retreat based on historic and remote sensing data. *Geomorphology*, 298, S. 72–85.
- Genevois, R., Tecca, P.R., 2013. The Vajont landslide: state-of-the-art. International Conference on Vajont – 1963–2013 – Thoughts and Analyses After 50 years since the catastrophic landslide. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 6, S. 15–39.
- Gischig, V.S., Moore, J.R., Evans, K.F., Amann, F., Loew S., 2011a. Thermomechanical forcing of deep rock slope deformation: 1. Conceptual study of a simplified slope. *Journal of Geophysical Research*, S. 1–17.
- Gischig, V.S., Moore, J.R., Evans, K.F., Amann, F., Loew, S., 2011b. Thermomechanical forcing of deep rock slope deformation: 2. The Randa rock slope instability. *Journal of Geophysical Research*, S. 1–18.
- Govi, M., Gullà, G., Nicoletti, P.G., 2002. Val Pola rock avalanche of July 28, 1987, in Valtellina (Central Italian Alps). *GSA Reviews in Engineering Geology*, 15, S. 71–90.
- Grämiger, L.M., Moore, J.R., Gischig, V.S., Ivy-Ochs, S., Loew, S., 2017. Beyond debulking: Mechanics of paraglacial rock slope damage during repeat glacial cycles. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 122, S. 1004–1036.

- Grämiger, L.M., Moore, J.R., Vockenhuber, C., Aaron, J., Hajdas, I., Ivy-Ochs, S., 2016. Two early Holocene rock avalanches in the Bernese Alps (Rinderhorn, Switzerland). *Geomorphology*, 268, S. 207–221.
- Gruner, U., 2006: Bergstürze und Klima in den Alpen, gibt es Zusammenhänge? *Bulletin für Angewandte Geologie*, 11(2), S. 25–34.
- Guglielmi, Y., Cappa, F., Binet, S., 2005. Coupling between hydrogeology and deformation of mountainous rock slopes: Insights from La Clapière area (southern Alps, France). *Comptes Rendus Géoscience*, 337(13), S. 1154–1163.
- Gunzburger, Y., Merrien-Soukatchoff, V., Guglielmi, Y., 2005. Influence of daily surface temperature fluctuations on rock slope stability: case study of the Rochers de Valabres slope (France). *International Journal of Rock Mechanics and Mining Science*, 42, S. 331–349.
- Heim, A., 1932. *Bergsturz und Menschenleben*. Fretz & Wasmuth Verlag, Zürich, 218 S.
- Heine, E., Weidinger, J.T., Götz J., 2016. Geologisch-geomorphologische Untersuchungen des subaquatischen Bereichs von Erdströmen in den Traunsee (OÖ) unter Anwendung von Fächerecholot und parametrischem Sedimentecholot. *Vermessung & Geoinformation (VGI), Sonderausgabe »Gewässer«*, 1, S. 25–37. http://hydrography.boku.ac.at/sites/default/public/Heine_et_al_2016-1_Geologisch-geomorphologische_Untersuchungen_des_Traunsee%20VGI-104.pdf.
- Heuberger, H., 1966. Gletschergeschichtliche Untersuchungen in den Zentralalpen zwischen Sellrain und Ötztal. *Wissenschaftliche Alpenvereinshefte*, 20, S. 1–126.
- Highland, L.M., Bobrowsky, P., 2008. *The Landslide Handbook – A Guide to Understanding Landslides*. United States Geological Survey Circular, 1325, 129 S.
- Hildebrandt, J., 2018. Hydrologische Bilanzierung und Abflussmodellierung der Großhangbewegung Misljoch im Navistal, Tirol, Österreich. Masterarbeit, Universität Innsbruck, Innsbruck.
- Hofmann, R., Sausgruber, J.T., 2017. Kriechverhalten und Sanierungskonzept einer Großhangbewegung, Navistal, Tirol. *Geomechanics and Tunneling*, 10(1), S. 59–73.
- Hormes, A., Ivy-Ochs, S., Kubik, P.W., Ferreli, L., Michetti, A.M., 2008. ¹⁰Be exposure ages of a rock avalanche and a late glacial moraine in Alta Valtellina, Italian Alps. *Quaternary International*, 190, S. 136–145.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, S. 167–194. DOI: 10.1007/s10346-013-0436-y.
- Intrieri, E., Raspini, F., Fumagalli, A., Lu, P., Conte, S.D., Farina, P., Allievi, J., Ferretti, A., Casagli, N. 2018. The Maoxian landslide as seen from space: detecting precursors of failure with Sentinel-1 data. *Landslides*, 15(1), S. 123–133.
- Ivy-Ochs, S., Heuberger, H., Kubik, P.W., Kerschner, H., Bonani, G., Frank, M., Schlüchter, C., 1998. The age of the Köfels event. Relative, ¹⁴C and cos-mogenic isotope dating of an early Holocene landslide in the Central Alps (Tyrol, Austria). *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 34(1), S. 57–68.
- Ivy-Ochs, S., Martin, S., Campedel, P., Hippe, K., Vockenhuber, C., Carugati, G., Rigo, M., Pasqual, D., Viganò, A., 2017. Geomorphology and Age of Large Rock Avalanches in Trentino (Italy): Castelpietra. In: M. Mikoš, V. Vilímek, Y. Yin, K. Sassa (Hrsg.), *Advancing Culture of Living with Landslides*. World Landslide Forum 2017. Springer, Cham, S. 347–353.

- Janeras, M., Jara, J.-A., Royán, M.J., Vilaplana, J.-M., Aguasca, A., Fàbregas, X., Gili, J.A., Buxó, P., 2017. Multi-technique approach to rockfall monitoring in the Montserrat massif (Catalonia, NE Spain). *Engineering Geology*, 219, S. 4–20.
- Kern, A., Kowarik, K., Rausch, A., Reschreiter, H. (Hrg.), 2008. Salz – Reich, 7000 Jahre Hallstatt. *Prähistorische Abteilung des Naturhistorischen Museums Wien*, 2, S. 1–239.
- Kodama, J., Goto, T., Fujii, Y., Hagan, P., 2013. The effects of water content, temperature and loading rate on strength and failure process of frozen rocks. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 62, S. 1–13. DOI: 10.1016/j.ijrmms.2013.03.006.
- Kos, A., Amann, F., Strozzi, T., Delaloye, R., von Ruette, J., Springman, S., 2016. Contemporary glacier retreat triggers a rapid landslide response, Great Aletsch Glacier, Switzerland. *Geophysical Research Letters*, 43(24), S. 12.466–12.474. DOI: 10.1002/2016GL071708.
- Kovari, K., 1988. General report: Methods of monitoring landslides. In: C. Bonnard (Hrsg), *Landslides. Fifth International Symposium on Landslides*, Lausanne, Switzerland. Balkema, 3, S. 1421–1433.
- Krähenbühl, R., 2004. Temperatur und Kluftwasser als Ursachen von Felssturz. *Bulletin für angewandte Geologie*, 9(1), S. 19–35.
- Krautblatter, M., Funk, D., Günzel, F.K., 2013. Why permafrost rocks become unstable: A rock-ice-mechanical model in time and space. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, S. 876–887. DOI: 10.1002/esp.3374.
- Krautblatter, M., Moser, M., Schrott, L., Wolf, J., Morche, D., 2012. Significance of rockfall magnitude and carbonate dissolution for rock slope erosion and geomorphic work on Alpine limestone cliffs (Reintal, German Alps). *Geomorphology*, 167/168, S. 21–34.
- Laatsch, W., Grottenhaler, W., 1972. Typen der Massenbewegung in den Alpen und ihre Klassifikation. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 91(6), S. 303–339.
- Le Roux, O., Schwartz, S., Gamonda, F., Jongmans, D., Bourles, D., Braucher, R., Mahaney, W., Carcaillet, J., Leanni, L., 2009. CRE dating on the head scarp of a major landslide (Séchilienne, French Alps), age constraints on Holocene kinematics. *Earth and Planetary Science Letters*, 280(1/4), S. 236–245.
- Lehmann, O., 1926. Die Verheerungen in der Sandlinggruppe (Salzkammergut) durch die im Frühherbst 1920 entfesselten Naturgewalten. *Denkschrift. Österreichische Akademie der Wissenschaften, mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse.*, 100(1926), S. 257–299.
- Marchetti, H., 1991. Zum Naturraumrisiko im Bezirk Gmunden und seiner Verminderung. In: F. Hufnagl, H. Marchetti (Hrsg), *Der Bezirk Gmunden und seine Gemeinden. Verein zur Herausgabe eines Bezirksbuches Gmunden*. Gmunden, Eigenverlag, S. 183–195.
- Martin, S., Campedel, P., Ivy-Ochs, S., Viganò, A., Alfimov, V., Vockenhuber, C., Andreotti, E., Carugati, G., Pasqual, D., Rigo, M., 2014. Lavini di Marco (Trentino, Italy): ³⁶Cl exposure dating of a polyphase rock avalanche. *Quaternary Geochronology*, 19, S. 106–116.
- McCull, S.T., Davies, T.R.H., 2013. Large ice-contact slope movements: Glacial buttressing, deformation and erosion. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38, S. 1102–1115. DOI: 10.1002/esp.3346.

- Moser, G., 2003. Bewegtes Österreich – Hangbewegungen zwischen dem Salzkammergut und Vorarlberg: Ursachen, Erscheinungsbild und Maßnahmen. *Gmundner Geostudien*, 2, S. 405–408.
- Moser, M., Lotter, M., Meier, H., 2003. Großmassenbewegungen des Hallstätter Raumes. *Gmundner Geostudien*, 2, S. 343–352.
- Ostermann, M., Ivy-Ochs, S., Sanders, D., Prager, Ch., 2017. Multi-method (¹⁴C, ³⁶Cl, ²³⁴U/²³⁰Th) age bracketing of the Tschirgant rock avalanche (Eastern Alps): Implications for absolute dating of catastrophic mass-wasting. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(7), S. 1110–1118.
- Ostermann, M., Sanders, D., 2012. Post-glacial rockslides in a 200x130 km area of the Alps: Characteristics, ages, and uncertainties. In: E. Eberhardt, C. Froese, K. Turner, S. Leroueil (Hrsg.), *Landslides and Engineered Slopes: Protecting Society through Improved Understanding*. Taylor & Francis, London, S. 659–663.
- Ostermann, M., Sanders, D., 2017. The Benner pass rock avalanche cluster suggests a close relation between long-term slope deformation (DSGSs and translational rock slides) and catastrophic failure. *Geomorphology*, 289, S. 44–59.
- Patzelt, G., 2012a. Die Bergstürze vom Tschirgant und von Haiming, Oberinntal, Tirol. *Jahrbuch der geologischen Bundesanstalt*, 152(1/4), S. 13–24.
- Patzelt, G., 2012b. Die Bergstürze vom Pletzackkogel, Kramsach, Tirol. *Jahrbuch der geologischen Bundesanstalt*, 152, S. 25–38.
- Pfurtscheller, C., Genovese, E., 2018. The Felbertauern landslide of 2013: impact on transport networks, effects on regional economy and policy decisions (No. 0218). SEEDS, Sustainability Environmental Economics and Dynamics Studies.
- Pichler, C., 2015. *Ingenieur- und allgemeine Geologie der Großhangbewegung Misljoch (Navistal, Tirol)*. Masterarbeit, Universität Innsbruck, Innsbruck.
- Poisel, R., Eppensteiner, W., 1989. Gang und Gehwerk einer Massenbewegung Teil 2: Massenbewegungen am Rand des Systems »Hart auf Weich«. *Felsbau* 7(1), S. 16–20.
- Poisel, R., Hofmann, R., Preh, A., Sausgruber, T., Schiffer, M., 2012. Gschlifegraben mudslide (Austria): hazard evaluation and risk mitigation. *Natural Hazards*, 61, S. 267–279.
- Poscher, G., Patzelt, G., 2000. Sink-hole Collapses in Soft Rocks. *Felsbau*, 18, S. 36–40.
- Prager, Ch., 2010. *Geologie, Alter und Struktur des Fernpass Bergsturzes und tiefgründiger Massenbewegungen in seiner Umgebung (Tirol, Österreich)*. Dissertation, Universität Innsbruck, Innsbruck, 307 S.
- Prager, Ch., Zangerl, Ch., Nagler, T., 2009. Geological controls on slope deformations in the Köfels rockslide area (Tyrol, Austria). *Austrian Journal of Earth Sciences*, 102(2), S. 4–19.
- Prager, Ch., Zangerl, Ch., Patzelt, G., Brandner, R., 2008. Age distribution of fossil landslides in the Tyrol (Austria) and its surrounding areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, S. 377–407.
- Preh, A., Sausgruber, J.T., 2015. The Extraordinary Rock-Snow Avalanche of Alpl, Tyrol, Austria. Is it Possible to Predict the Runout by Means of Single-phase Voellmy-or Coulomb-Type Models?. *Engineering Geology for Society and Territory*. Springer, Cham, 2, S. 1907–1911.

- Purtscheller, F., Pirchl, T., Sieder, G., Stingl, V., Tessadri, T., Brunner, P., Ennemoser, O., Schneider, P., 1995. Radon emanation from giant landslides of Koefels (Tyrol, Austria) and Langtang Himal (Nepal). *Environmental Geology*, 26(1), S. 32–38.
- Reuther, A.U., Reitner, J.M., Ivy-Ochs, S., Kubik, P.W., Herbst, P., 2006. From kinematics to dating – the sturzstrom deposit of Feld (Matrei/Eastern Tyrol/Austria). Poster, EGU 2006. www.geologie.ac.at/fileadmin/user_upload/dokumente/pdf/poster/Poster_EGU_2006_sturzstrom.pdf.
- Rieder, B., 2016. Hydrogeologie der Großhangbewegung Misljoch und allgemeine Geologie im Raum Pfnos, Tirol. Masterarbeit, Universität Innsbruck, Innsbruck.
- Riepler, F., Schroll, H., 2013. Felssturz Felbertauern/Schildalmgalerie: Geologische Verhältnisse und Sicherungsarbeiten. *Geoforum Umhausen*, 12 S.
- Rott, H., Nagler, T., 2006. The contribution of radar interferometry to the assessment of landslide hazards. *Advances in Space Research*, 37, S. 710–719.
- Rott, H., Scheuchl, B., Siegel, A., Grasemann, B., 1999. Monitoring very slow slope movements by means of SAR interferometry: A case study from a mass waste above a reservoir in the Ötztal Alps. Austria. *Geophysical Research Letters*, 26(11), S. 1629–1632.
- Sartori, M., Baillifard, F., Jaboyedoff, M., Rouiller, J.-D., 2003. Kinematics of the 1991 Randa rockslides (Valais, Switzerland). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 3, S. 423–433.
- Sass, O., Oberlechner, M., 2012. Is climate change causing increased rockfall frequency in Austria? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, S. 3209–3216.
- Sassa K., Canuti, P., 2009. *Landslides – Disaster Risk Reduction*. Springer Verlag, Berlin, 649 S.
- Sausgruber, T., 2005. The Fürweg South – reactivation of an ancient mudslide. In: K. Senneset, K. Flaate, J.O. Larsen (Hrsg.), *Landslides and Avalanche*. ICFL 2005 Norway. CRC Press, Norwegen, S. 319–324.
- Sausgruber, T., 2017. Hangbewegung Kerschbaumsiedlung. Monitoring-Zwischenbericht Nr. 2. Forsttechnischer Dienst für Wildbach und Lawinenverbauung, Fachzentrum Geologie und Schnee, Innsbruck.
- Sausgruber, T., Marschallinger, R., Scheuringer, E., 2004. The Fürweg Landslide – Models, Monitoring and Measures. *Felsbau*, 22(2), S. 51–59.
- Schäffer, G., 1983. 4. Stellungnahme der Fachabteilung Ingenieurgeologie der Geologischen Bundesanstalt zur Massenbewegung Stambach-Zwerchwand/Bad Goisern. Wien, S. 1–9 (22 Beilagen).
- Schmid, S.M., Scharf, A., Handy, M.R., Rosenberg, C.L., 2013. The Tauern Window (Eastern Alps, Austria): A new tectonic map with cross-sections and a tectonometamorphic synthesis. *Swiss Journal Geoscience*, 106, S. 1–32.
- Soldati, M., Marchetti, M. (Hrsg.), 2017. *Landscapes and Landforms of Italy*. Springer, 536 S.
- Starnberger, R., Drescher-Schneider, R., Reitner, J.M., Rodnight, H., Reimer, P.J., Spötl, C., 2013. Late Pleistocene climate change and landscape dynamics in the Eastern Alps: the inner-alpine Unterangerberg record (Austria). *Quaternary Science Reviews*, 68, S. 17–42.
- Stini, J., 1941. Unsere Täler wachsen zu. *Geologie und Bauwesen*. 13(1), S. 71–79.

- Strauhal, T., Zangerl, Ch., Fellin, W., Holzmann, M., Engl, D.A., Brandner, R., Tropper, P., Tessadri, R., 2017. Structure, Mineralogy and Geomechanical Properties of Shear Zones of Deep-Seated Rockslides in Metamorphic Rocks (Tyrol, Austria). *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 50, S. 419–438. DOI: 10.1007/s00603-016-1113-y.
- Supper, R., Jochum, B., Kim, J.-H., Ottowitz, D., Pfeiler, S., Baron, I., Römer, A., Lovisolo, M., Moser, G., 2012. The TEMPEL geoelectrical monitoring network for landslides: highlights of recent monitoring result. *Berichte der geologischen Bundesanstalt*, 93, S. 144–151.
- Tacher, L., Bonnard, C., Laloui, L., Parriaux, A., 2005. Modelling the behaviour of a large landslide with respect to hydrogeological and geomechanical parameter heterogeneity. *Landslides*, 2(1), S. 3–14.
- Turner, A.K., Schuster, R.L., 1996. *Landslides: Investigation and mitigation*. Special report 247, Transportation Research Board, National Research Council. National Academy Press, Washington D.C., 673 S.
- Varnes, D.J., 1978. Slope Movement Types and Processes. In: R.L. Schuster, R. Krizek (Hrsg.), *Land-slides – Analysis and Control*. Special Report 176, National Research Council, Washington D.C., S. 11–33.
- Weidinger, J.T., 2009. Das Gschlifegraben-Rutschgebiet am Traunsee-Ostufer (Gmunden/OÖ) – Ein Jahrtausende altes Spannungsfeld zwischen Mensch und Natur. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 149(1), S. 195–206. http://opac.geologie.ac.at/wwwopacx/wwwopac.aspx?command=getcontent&server=images&value=JB1491_195_A.pdf.
- Weidinger, J.T., 2012. Massenbewegungen im Salzkammergut – eine geologisch-geomorphologisch-kulturhistorische Betrachtung. *Österreich in Geschichte und Literatur mit Geographie (OGL)*, 56(1), S. 77–95.
- Weidinger, J.T., 2017. Chronik eines »vorhergesagten« Erdstroms – das 2007/08 Gschlifegraben Ereignis, Oberösterreich. Arbeitstagung 2017 Bad Ischl, Hallstatt, Gmunden. *Angewandte Geowissenschaften an der GBA, Wien*, S. 163–172.
- Weidinger, J.T., Köck, G. (Hrsg.), 2009. *ÖAW-Gschlifegraben-Symposium*. Proceedings vom 1. April 2009. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, S. 33–43. DOI: 10.1553/gde2010.
- Weidinger, J.T., Vortisch, W., 2005. Massenbewegungen im System Hart-auf-Weich zwischen Traunstein und Dachstein (OÖ, Stmk.) und ihre anthropogene Beeinflussung. In: J.T. Weidinger, I. Spitzbart (Hrsg.), *Beiträge zur Geologie des Salzkammerguts*. II. *Gmundner Geo-Studien*, 3, S. 75–94. http://www.landmuseum.at/pdf_frei_remote/GmuGeoStud_3_0075-0094.pdf.
- Weidner, S., 2000. Kinematik und Mechanismus tiefgreifender alpiner Hangdeformationen unter besonderer Berücksichtigung der hydrogeologischen Verhältnisse. *Dissertation, Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen*, 257 S.
- Wilson, A.J., Petley, D.N., Murphy, W., 2003. Down-slope variation in geotechnical parameters and pore fluid control on a large-scale Alpine landslide. *Geomorphology*, 54, S. 49–62.
- Zangerl, Ch., Chwatal, W., Kirschner, H., 2015. Formation processes, geomechanical characterisation and buttressing effects at the toe of deep-seated rock slides in foliated metamorphic rock. *Geomorphology*, 243, S. 51–64.

- Zangerl, Ch., Eberhardt, E., Perzmaier, S., 2010. Kinematic behaviour and velocity characteristics of a complex deep-seated crystalline rockslide system in relation to its interaction with a dam reservoir. *Engineering Geology*, 112, S. 53–67.
- Zangerl, Ch., Engl, D., 2009. Entwicklung kinematischer Modelle von Massenbewegungen auf Basis von Deformationsmessungen. In: R. Marschallinger, W. Wanker, F. Zobl (Hrsg.), *Online Datenerfassung, berührungslose Messverfahren, 3D-Modellierung und geotechnische Analyse in Geologie und Geotechnik*. Wichmann, Heidelberg, S. 48–55.
- Zangerl, Ch., Prager, Ch., Brandner, R., Brückl, E., Eder, S., Fellin, W., Tentschert, E., Poscher, G., Schönlaub, H., 2008. Methodischer Leitfaden zur prozessorientierten Bearbeitung von Massenbewegungen. *Geo.Alp*, 5, S. 1–51.
- Zangerl, Ch., Strauhal, T., Fey, C., Holzmann, M., Perzmaier, S., 2017. Insights into Deep-Seated Rockslides in Metamorphic Rock Masses: Lessons Learned from Field Surveys, In Situ Investigations and Numerical Modelling. In: M. Mikos, N. Casagli, Y. Yin, K. Sassa (Hrsg.), *Advancing Culture of Living with Landslides. Volume 4: Diversity of Landslide Forms*. Springer, Cham, S. 499–508.
- Zerathe, S., Lebourg, T., Braucher, R., Bourlès, D. 2014. Mid-Holocene cluster of large-scale landslides revealed in the Southwestern Alps by ^{36}Cl dating. Insight on an Alpine-scale landslide activity. *Quaternary Science Reviews*, 90, S. 106–127.
- Zischinsky, U., 1969. Über Sackungen. *Rock Mechanics*, 1, S. 30–52.

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

17 Steinschlag und Felssturz

Alexander Preh, Michael Mölk und Mariella Illeditsch*

Zusammenfassung

Steinschlag und Felssturz sind von Felsböschungen ausgehende Prozesse, welche relativ häufig Siedlungsräume, Verkehrswege und andere Infrastrukturen gefährden. Die Planung, Ausführung und Instandhaltung von Steinschlagschutzmaßnahmen ist ausgehend von der Erhebung der prozessrelevanten Parameter über die Festlegung der maßgeblichen Bemessungsgrößen hin zu den charakteristischen Widerständen diverser Schutzsysteme in Österreich durch die Richtlinie für den technischen Steinschlagschutz (ONR 24810:2017) umfassend standardisiert.

Extremereignisse bei Steinschlag definieren sich in Österreich daher durch das entsprechend der ONR 24810:2017 (2017) festzulegende Bemessungsereignis. Treten Magnituden (Einwirkungen) größer als das Bemessungsereignis auf (der Überlastfall), sind diese als extrem zu betrachten bzw. die Folge eines Extremereignisses.

Bei Felsstürzen kommt es infolge des Abbruchs und der Fragmentierung größerer zusammenhängender Felsmassen zu zeitgleichen Ereignissen (Steinschlag) und folglich sind zeitnahe Einwirkungen auf Personen und Infrastruktur/Schutzmaßnahmen möglich. Darüber hinaus entspricht die Definition von Extremereignissen jener von Steinschlag. Über die Definition der Extremereignisse hinaus werden das von Steinschlag ausgehende Risiko betrachtet, Fallbeispiele und die Entwicklung der Extremereignisse im alpinen Raum diskutiert und Perspektiven für Handlungsoptionen aufgezeigt.

Abstract

Rock fall and rock mass fall are processes emanating from rock slopes, which often put settlement areas, roads and other infrastructure at risk. In Austria, the design, construction and maintenance of rock fall protection measures is standardised by the Guideline for technical protection against rock fall (ONR 24810:2017) comprehensively, originating from the investigation of relevant process parameters across to the determination of significant calculation parameters to the point of the characteristic resistance of various protection systems.

* Alexander Preh, Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, alexander.preh@tuwien.ac.at.

Michael Mölk, Wildbach- und Lawinerverbauung, Geologische Stelle, michael.moelk@die-wildbach.at.

Mariella Illeditsch, Technische Universität Wien, Institut für Geotechnik, mariella.illeditsch@tuwien.ac.at.

Therefore, in Austria, extreme rock fall events are defined by the design event, which is determined according to the ONR 24810:2017 (2017). Magnitudes (impacts) greater the design event (overload case) can be considered extreme or rather the result of an extreme event.

The detachment of a bigger coherent rock mass and its fragmentation leads to contemporaneous events (rock fall), which may be followed by contemporary impacts on people and infrastructure/protection measures.

Beyond the definition of extreme events, the risk emanating from rock fall is considered, case studies and the development of extreme events in the alpine region are discussed and prospects for recommended procedures are identified.

Kernaussagen

- Unter Steinschlag versteht man das Fallen, Springen und Rollen von isolierten Steinen und Blöcken.
- Bei Felsstürzen brechen zusammenhängende Felsmassen ab, die während des Abbruchs in Steine und Blöcke fraktionieren, welche sich anschließend als individuelle Fragmente talwärts bewegen.
- Extremereignisse definieren sich über ihre Magnitude und ihre Ereignisfrequenz. Ereignisse mit Magnituden, welche das in der nationalen Richtlinie ONR 24810:2017 definierte Bemessungsereignis übersteigen (Überlastfälle), sind als Extremereignisse anzusehen.
- Extremsituationen sind Situationen mit einem extrem hohen Schadenspotential. Ausschlaggebend sind hier die Ausgesetztheit sowie die Vulnerabilität von Personen und Infrastruktur.
- Extremereignisse in Extremsituationen können auch bei den Prozessen Steinschlag und Felssturz zu einer Katastrophe (entsprechend T-KMG, 2006) führen.
- Die derzeit vorhandenen (gängigen) Steinschlagmodelle sind in der Lage Extremereignisse abzubilden.
- In den allermeisten Fällen wäre es auch mit aufwändigen Schutzmaßnahmen nicht möglich, eine vollständige Minderung/Reduktion der Risiken infolge von Extremereignissen zu erreichen.

Key Points

- Rock fall is the falling, jumping and rolling of isolated rocks or blocks.
- Rock mass fall is the detachment of a coherent rock mass fragmenting into rocks and blocks and subsequently moving downwards as individual fragments.
- Extreme events are defined by their magnitude and probability. Events with higher magnitudes than the defined design event according to the national guideline ONR24810:2017 (overload case), can be defined as extreme events.
- Extreme situations are situations with extremely high damage potential. Crucial factors are the exposure and vulnerability of people and infrastructure.
- In extreme situations, an extreme rock fall or rock mass fall event may lead to a catastrophe (according to T-KMG, 2006).
- Presently available (current) rock fall programs are able to model extreme events.
- In most cases, even with extensive rock fall protection measures, it's not possible to fully mitigate the risks due to extreme events.

17.1 Einleitung

In vielen gebirgigen Regionen weltweit sind von Felsböschungen ausgehende Sturzprozesse eine häufig auftretende Prozessgruppe, welche Siedlungsräume, Verkehrswege und andere Infrastrukturen gefährdet. Diese Prozessgruppe lässt sich in Einzelabstürze (Steinschlag, Blockschlag) und Massenstürze (Felssturz, Felslawine) untergliedern. Das wesentliche Unterscheidungskriterium zwischen einem Einzelabsturz und einem Massensturz ist, dass bei Massenstürzen mehr oder weniger kompakte Felsmassen abbrechen, die während des Abbruchs (entsprechend des vorherrschenden Versagensmechanismus) in Blöcke und Steine fragmentieren, während sich bei Einzelabstürzen lediglich einzelne Kluffkörper aus dem Gefüge der Felswand lösen.

Massenstürze werden entsprechend ihres Abbruchvolumens und ihres Prozessverhaltens in Felsstürze und Felslawinen untergliedert. Hat die Interaktion der Komponenten untereinander einen maßgeblichen Einfluss auf die Mobilität der Sturzmasse, dann verhält sich diese mechanisch ähnlich einer Lawine (»Sturzstrom«; Heim, 1932). Diese hochmobilen Prozesse werden in der aktuellen internationalen Literatur daher zumeist als Felslawine (rock avalanche) oder bei Sturzmassen $> 1 \text{ Mio m}^3$ in der deutschsprachigen Literatur oft als Bergsturz angesprochen. Diese Massenstürze werden im Beitrag 16 zu *Felsgleitung, Felslawine und Erd-/Schuttstrom* detailliert behandelt.

Der vorliegende Beitrag konzentriert sich auf die von Felsböschungen ausgehenden Prozesse Steinschlag, Blockschlag und Felssturz, wobei unter einem Felssturz in diesem Zusammenhang ein Sturzprozess verstanden wird, bei dem die Interaktion der Komponenten untereinander »keinen maßgeblichen Einfluss« auf die Ausbreitung der Sturzmasse hat.

17.1.1 Definition Steinschlag

Evans und Hungr (1993) beschreiben den Prozess Steinschlag als die Bewegung individueller, voneinander unabhängiger Felsfragmente, die mittels episodischer Einschläge mit dem Untergrund interagieren. Die österreichische Richtlinie zum Technischen Steinschlagschutz (ONR 24810:2017) beschreibt Steinschlag gemäß der Definition nach Kienholz et al. (1998) als das Fallen, Springen und Rollen von isolierten Steinen und Blöcken.

Entsprechend den gängigen Definitionen kann der Prozess Steinschlag als die Bewegung individueller, voneinander unabhängiger Felsfragmente (Steine und Blöcke) beschrieben werden, wobei nach Bozzolo (1987) vier Bewegungszustände der Fragmente zu unterscheiden sind: Fallen, Springen, Gleiten und Rollen. Entsprechend vieler Beobachtungen ist der dominante Bewegungszu-

stand jedoch zumeist das Springen, also die Interaktion des Felsfragments mit dem Untergrund mittels episodischer Einschläge. Die übrigen Bewegungszustände (Fallen, Gleiten und, Rollen) beobachtet man vor allem am Beginn und am Ende einer Trajektorie.

Oftmals wird entsprechend der Größe der Fragmente zwischen Steinschlag und Blockschlag unterschieden. Kienholz et al. (1998) definiert den Sturzprozess von isolierten Felsfragmenten mit einem mittleren Durchmesser ≤ 0.5 m als Steinschlag und > 0.5 m als Blockschlag. Diese Unterscheidung findet in der aktuellen Literatur und in der Praxis jedoch nur mehr geringe Beachtung, da sie sich nicht auf den Prozess, sondern lediglich auf die Größe des Fragments bezieht. Als prozessbedingtes Unterscheidungsmerkmal können die vorherrschenden Bewegungszustände während des Sturzprozesses dienen, wobei der dominante Bewegungszustand (zumeist Rollen oder Springen) in hohem Maße von der Fallhöhe, der Länge und der Morphologie (Hangneigung etc.) der Sturzbahn, der Beschaffenheit der Oberfläche (Oberflächenrauheit und Dämpfung) und den Materialeigenschaften des vorherrschenden Gesteins (z. B. Einfluss durch Fragmentierung) abhängig ist. Es gibt aber die generelle Beobachtung, dass große Blöcke im Vergleich zu kleineren Blöcken mehr Rollen als Springen.

Sturzversuche an bewaldeten und nicht bewaldeten natürlichen Hängen (Smith und Duffy, 1990; Dorren et al., 2006; Usiro et al., 2006; Pamminer 2018; Rauscher, 2018) und Rückrechnungen von Steinschlagereignissen haben gezeigt, dass die maximal auftretenden Prozessgeschwindigkeiten im Allgemeinen bei 30 bis 35 m/s liegen. Vereinzelt wurden jedoch auch schon Geschwindigkeiten von über 45 m/s beobachtet bzw. rückgerechnet (z. B. Liechtensteinklamm, siehe Abbildung 01).

17.1.2 Definition Felssturz

Unter dem Prozess Felssturz versteht man den Abbruch (Disposition) einer größeren mehr oder weniger kompakten Felsmasse, die während des Abbruchs – entsprechend dem vorherrschenden Versagensmechanismus (Poisel und Preh, 2004) – in Steine und Blöcke fragmentiert, die in weiterer Folge als mehr oder weniger individuelle Fragmente talwärts stürzen. Bei diesem Prozessstyp hat die Interaktion der Fragmente untereinander während des dem Abbruch folgenden Sturzprozesses »keinen maßgeblichen Einfluss« auf die Mobilität der Sturzmasse. Die Fragmente der Sturzmasse (Steine und Blöcke) verhalten sich entsprechend dem im vorhergehenden Kapitel definierten und beschriebenen Prozess Steinschlag.

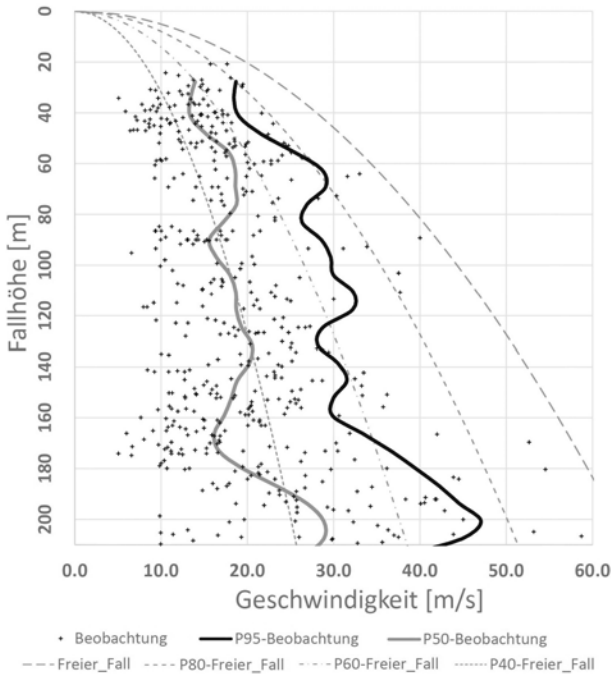


Abbildung 01: Beobachtete Geschwindigkeiten entlang der vertikalen Erstreckung der Versuchsböschung Liechtensteinklamm im Vergleich zur Geschwindigkeit des Freien Falls. Anmerkung: Pxx = 0,xx Perzentil der Geschwindigkeit des freien Falls.

Figure 01: Observed velocities along the vertical section of the test slope Liechtensteinklamm, compared to free fall velocity. Note: Pxx = 0,xx velocity percentile of free fall.

Quellen: Pamminger, 2018; Rauscher, 2018

Gemäß der Definition von BRP et al. (1997) wird bis zu einem Abbruchvolumen von 100 m^3 von Blockschlag gesprochen und bei größeren Volumina von Felssturz. Nach dem heutigen Verständnis können Stein- sowie Blockschlag aus einem Felssturz hervorgehen, wie oben beschrieben.

Abbruch und Sturzprozess sind miteinander gekoppelte Prozesse (Preh, 2016). Ein ideales Modell (Universalmodell) müsste in der Lage sein, diese beiden teilweise sehr unterschiedlichen Prozesse abzubilden. Da wir aber noch über kein zufriedenstellendes Universalmodell verfügen, müssen diese Prozesse rechnerisch derzeit noch getrennt behandelt werden.

17.2 Vom Prozess Steinschlag ausgehende Gefahr und ausgehendes Risiko und deren Beurteilung in Österreich und international (z. B. in der Schweiz)

Gefahr besteht dann, wenn aus einem Prozess Schaden für Personen und/oder Sachgüter entstehen kann (ÖGG, 2014). Die von einem Prozess wie z. B. Steinschlag ausgehende Gefahr wird einerseits durch seine Intensität und andererseits durch seine Eintrittswahrscheinlichkeit bestimmt (siehe Gleichung 17.1). Die Kombination von Intensität (I , intensity) und Eintrittswahrscheinlichkeit (P , probability) zur objektivierten Beurteilung der Gefahr (H , hazard) macht insofern Sinn, da im Allgemeinen lediglich ein möglicher großer Schaden mit einer subjektiv als hoch empfundenen Eintrittswahrscheinlichkeit als Gefahr wahrgenommen wird. Ein unwahrscheinliches Eintreten eines großen Schadens wird hingegen im Allgemeinen kaum als große Gefahr empfunden. Umgekehrt wird es auch nicht als große Gefahr empfunden, eine Geldmünze zu verlieren, obwohl bei diesem Szenario die Eintrittswahrscheinlichkeit eher hoch ist.

$$H = I * P \quad (17.1)$$

Durch die hohen Geschwindigkeiten, die herabfallende Blöcke erreichen können, kann die Intensität – selbst von kleinen Steinen – sehr hoch sein. Für Personen kann daher der kleinste stürzende Stein eine große Gefahr darstellen, umso mehr, weil die Eintrittswahrscheinlichkeit für das Fallen kleiner Steine im Allgemeinen höher ist als für große. Für Infrastrukturen besteht erst ab einer gewissen Intensität Gefahr.

Das von Scheinschlag ausgehende Risiko (Corominas, 2005, 2012) berücksichtigt den von Steinschlag verursachbaren Schaden für Personen und Infrastrukturen. Das von Steinschlag ausgehende Risiko (R) wird durch das Produkt der von Steinschlag ausgehenden Gefahr (H), dem der Gefahr ausgesetzten Personen und Infrastrukturen (E , exposure), der Vulnerabilität der ausgesetzten Personen und Infrastrukturen (V) und den Kosten der gefährdeten Subjekte/Objekte (C , cost) ermittelt:

$$R = H * E * V * C \quad (17.2)$$

17.2.1 Österreich

Im Rahmen der Partnerschaft der Österreichischen Raumordnungskonferenz (ÖROK) »Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumpla-

nung« wurden fachliche Empfehlungen und ein Materialienband erarbeitet (Bäk et al., 2015), in dem eine standardisierte Vorgangsweise zur Abgrenzung von Steinschlaggefährdungsbereichen (Gefahrenzonierung) beschrieben wird. Bei den Empfehlungen werden für die Gefahrenzonierung von Sturzprozessen drei Maßstabsebenen unterschieden: regionale Ebene, kommunale Ebene und Objektebene. Folgend wird der derzeitige Stand in Österreich im Kontext mit den Empfehlungen der ÖROK skizziert.

Einige Bundesländer verfügen über regionale Gefahrenhinweiskarten (M=1:25.000–50.000), welche auf durch Steinschlag gefährdete Bereiche hinweisen (z. B. NÖ Atlas, Land Niederösterreich, 2018). Es handelt sich hierbei lediglich um die Ausweisung von Gebieten, die von Steinschlag betroffen sein können. Die betroffenen Gebiete werden in dieser Maßstabsebene zumeist mithilfe des Pauschalwinkelansatzes »Geometrisches Gefälle« (Hsü, 1975; Grundner, 1984; Domaas, 1985; Evans und Hungr, 1993) ermittelt. Gefahrenhinweiskarten beinhalten keine Angaben über Intensitäten oder Wahrscheinlichkeiten. In der derzeitigen Gefahrenzonenplanung der Wildbach- und Lawinerverbauung (gemäß Forstgesetz 1975 (§11) bzw. Gefahrenzonenplanverordnung BGBl 436/1976) ist ebenfalls keine differenzierte Abgrenzung von Gefahrenzonen für Steinschlag vorgesehen. Auch hier erfolgt lediglich die Ausweisung von »Braunen Hinweisbereichen«, die möglicherweise von Rutschungen oder Steinschlag betroffen sein können.

Auf der kommunalen Ebene arbeiten derzeit mehrere Bundesländer an der Erstellung von Gefahrenkarten (M=1:10.000–25.000) für einzelne Gemeinden (z. B. Forschungsprojekt NÖ-Talus). Gefahrenkarten geben an, welche raumrelevanten Bereiche und wie stark diese von Steinschlag betroffen sein können. Die Abschätzung der Reichweite und der Intensität erfolgt in dieser Maßstabsebene zumeist mithilfe von Prozessmodellen (verfügbare Modelle siehe Volkwein et al., 2011; Preh und Mölk, 2018). Die Prozessintensität wird hier zumeist entsprechend der berechneten kinetischen Energien beurteilt.

Basierend auf den Empfehlungen der ÖROK (Bäk et al., 2015) wird zurzeit von der Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV) eine Methodik entwickelt und installiert (Mölk und Rieder, 2017), mit deren Hilfe Gefährdungsbereiche nachvollziehbar identifiziert und dargestellt werden können. Dabei ist eine Differenzierung der Gefährdungslage entsprechend der mithilfe von Prozessmodellen berechneten kinetischen Energien erforderlich. Bei dem von Mölk und Rieder (2017) präsentierten Vorschlag wird der Bemessungsblock zur Berechnung der energie-kodierten Trajektorien (siehe Abbildung 02) gemäß der Richtlinie für Technischen Steinschlagschutz (ONR 24810:2017) bestimmt. Daher sind bei dieser Vorgangsweise Wahrscheinlichkeiten indirekt über die Bestimmung des Bemessungsblocks enthalten.

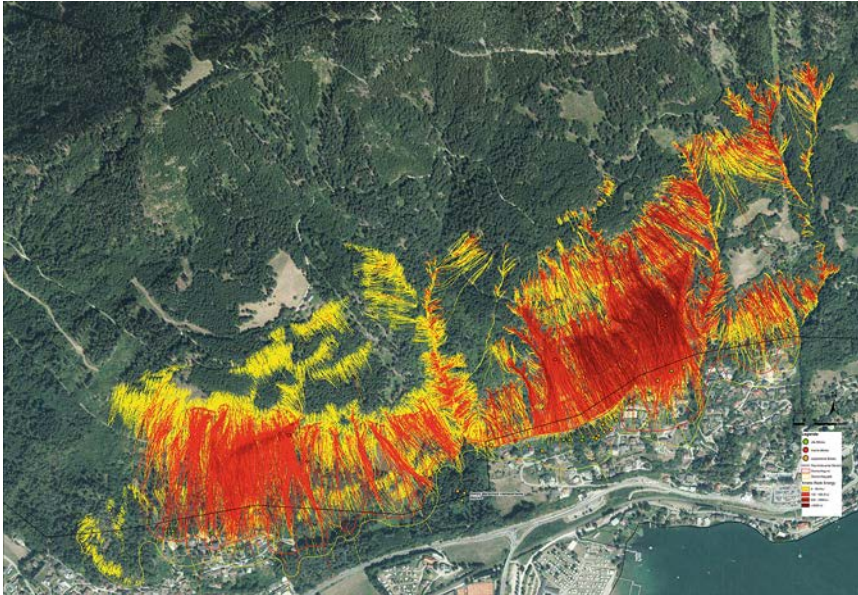


Abbildung 02: Energie-kodierte Trajektorien für eine Gefahrenhinweiskarte/einen Gefahrenzonenplan; gelb: ≤ 100 kJ, rot: > 100 kJ.

Figure 02: Energy-encoded trajectories for hazard indication maps/hazard zone plans; yellow: ≤ 100 kJ, red: > 100 kJ.

Quelle: Preh und Mölk, 2018

Die Beurteilung des von Steinschlag ausgehenden Risikos sowie die Bemessung von entsprechenden technischen Schutzmaßnahmen auf der Objektebene ($M \geq 1:5.000$) erfolgt in Österreich mithilfe der ONR 24810:2017 Technischer Steinschlagschutz. Das zentrale Element dieser Richtlinie ist die Dimensionierung einer sogenannten Bemessungsblockgröße. Dabei werden über die Ereignisfrequenzklassen die Ereigniswahrscheinlichkeit (P), über die Schadensfolgeklassen der potentielle Schaden ($E * V * C$, siehe Gleichung 17.2) und über den Bemessungsblock die Intensität (I) berücksichtigt. Die Abschätzung der Reichweite, der Sprunghöhen und der Intensitäten erfolgt dabei zwingend mit Prozessmodellen (verfügbare Modelle siehe Volkwein et al., 2011; Preh und Mölk, 2018). Zur Bemessung von Schutzbauwerken werden sowohl Einwirkung als auch Widerstand mit Teilsicherheitsbeiwerten in Abhängigkeit der Schadensfolgeklasse beaufschlagt.

Zur Ermittlung der Bemessungsblockgröße sind in Abhängigkeit von der Schadensfolgeklasse CC (siehe Tabelle 01) bzw. der Anzahl der potentiellen Sturzblöcke zwei verschiedene Varianten zulässig.

Tabelle 01: Schadensfolgeklassen CC 1 bis CC 3.**Table 01:** Consequence classes CC 1 to CC 3.

Quelle: ONR 24810:2017, 2017

Schadensfolgekategorie CC	Merkmale	Beispiele
CC 1	Geringe Folgen für Menschenleben und kleine oder vernachlässigbare wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Landwirtschaftliche Gebäude ohne regelmäßigen Personenverkehr, sowie Scheunen, Gewächshäuser, Forst- und Güterwege mit geringer Verkehrsfrequenz
CC 2	Mittlere Folgen für Menschenleben, beträchtliche wirtschaftliche, soziale oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Wohn- und Bürogebäude, öffentliche Gebäude mit mittleren Versagensfolgen, wie Bürogebäude, regionale und überregionale Verkehrswege mit $DTV \leq 50.000$ KFZ
CC 3	Schwerwiegende Folgen für Menschenleben oder sehr große wirtschaftliche oder umweltbeeinträchtigende Folgen	Tribünen, öffentliche Gebäude mit hohen Versagensfolgen, wie Konzerthallen, regionale und Überregionale Verkehrswege mit $DTV > 50.000$ KFZ

Die Schadensfolgen werden in drei Klassen unterschieden, mithilfe derer die verschiedenen möglichen Folgen für Personenleben, Wirtschaft oder Umwelt als gering, mittel oder schwerwiegend eingeteilt werden.

Für die Schadensfolgeklassen CC 2 und CC 3 oder für den Fall, dass mehr als 100 potentielle Sturzblöcke vorliegen, ist eine statistische Erfassung der Bemessungsblockgröße im Ablöse- und/oder Ablagerungsbereich durchzuführen. Bei dieser (ersten) Variante basiert die Wahl der Bemessungsblockgröße auf der im Zuge der Grundlagen- und Geländeerhebung erstellten Blockgrößenverteilung sowie auf einer geschätzten Ereignisfrequenz (siehe Tabelle 02, Abbildung 03).

Die Ereignisfrequenz wird in vier Klassen unterschieden, mithilfe derer die Häufigkeit von Steinschlag zwischen mehr als zehn Ereignissen pro Jahr und weniger als einem Ereignis alle 30 Jahre eingeteilt wird. Entsprechend dieser Klassen wird die Bemessungsblockgröße durch ein Volumens-Perzentil der Blockgrößenverteilung zwischen 98 % und 95 % festgelegt.

Die (zweite) vereinfachte Variante einer gutachterlichen Festlegung ist dann zulässig, wenn höchstens 100 Klufkörper in den potentiellen Ablösebereichen dokumentierbar sind, wenn lediglich Schadensfolgekategorie CC 1 potentiell betroffen ist oder bei Ereignisfrequenzklasse EF 1 und EF 2.

Tabelle 02: Ereignishäufigkeiten und zugeordnetes Volumens-Perzentil der Blockgrößenverteilung.

Table 02: Event frequency classes and assigned volume percentile of the block size distribution.

Quelle: ONR 24810:2017, 2017

Ereignisfrequenzklasse	Ereignishäufigkeit n (1/a)	Fraktile für die Bemessungsblockgröße
EF 4 (sehr hoch)	$n \geq 10$ (≥ 10 Ereignisse/Jahr)	V_{98}
EF 3 (hoch)	$1 \leq n < 10$ (1 bis 10 Ereignisse/Jahr)	V_{97}
EF 2 (gering)	$0,03 \leq n < 1$ (1 Ereignis/1 bis 30 Jahre)	V_{96}
EF 1 (selten)	$n < 0,03$ (< 1 Ereignis/30 Jahre)	V_{95}

Zur Ermittlung der Bemessungswerte für die Einwirkungen auf ein technisches Schutzbauwerk werden das 99 %-Perzentil der Einwirkungs-Energie-Verteilung sowie das 95 %-Perzentil der Sprunghöhenverteilung des Bemessungsblocks aus der Prozess-Modellierung mit Teilsicherheitsbeiwerten beaufschlagt, die durch die Schadensfolgeklasse CC bestimmt werden.

Zur Bemessung des Steinschlagschutznetzes, also auf der Widerstandsseite, werden der Nennwert der Energieklasse gemäß ETAG sowie die zugelassene Netzhöhe durch Teilsicherheitsbeiwerte, die ebenfalls durch die Schadensfolgeklasse bestimmt werden, abgemindert.

Bei Steinsschlagschutzdämmen werden beim geotechnischen Nachweis der Tragfähigkeit auf der Widerstandsseite die Materialfestigkeiten mithilfe von Teilsicherheitsbeiwerten abgemindert, bei der Einwirkung der Sprunghöhe kommt bei Dämmen ein Sicherheitszuschlag in Form eines Freibords zur Anwendung, welcher sicherstellt, dass das Bauwerk vom Sturzblock nicht überrollt wird. Der Freibord wird gem. ONR 24810:2017 in Abhängigkeit von der Bauweise (Erddamm, Steinschlichtung, bewehrte Erde) und von der Böschungsneigung festgelegt.

Starre Wände (z. B. Holzbohlenwände) haben i. d. R. keine definierte Energieaufnahmekapazität (keine Europäische Technische Bewertung – CE-Kennzeichnung – wie z. B. Schutznetze) bzw. eine vergleichsweise kurze Lebensdauer und werden daher üblicherweise nicht empfohlen. Stahlbetonwände können für relativ geringe Energie-Einwirkungen (< 300 kJ) eingesetzt werden, gem. Egli (2005) können bewehrte Betonwände mit einer Stärke von 30 cm bis zu 100 cm aufnehmen, mit 50 cm bis zu 300 kJ. Eine standardisierte Vorgangsweise für die

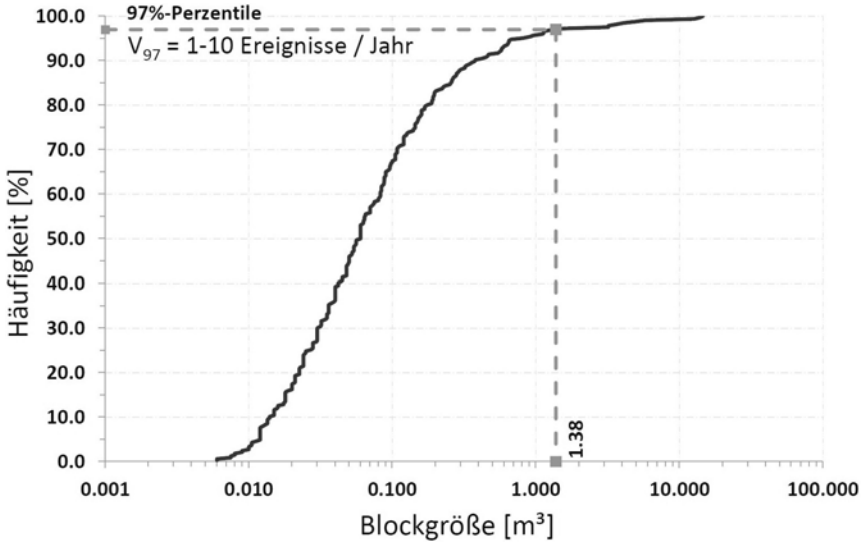


Abbildung 03: Bestimmung des Bemessungsblock-Volumens aus statistischen Aufnahmen einer Schutthalde mittels Linienzählverfahren.

Figure 03: Determination of design block volume from statistic talus investigations using the so-called »line counting approach«.

Quelle: Preh und Mölk, 2018

Bewertung von dynamischen Punktlasten auf starre Konstruktionen existiert derzeit nicht.

17.2.2 Schweiz

Die Schweiz verfolgt die Strategie, dass Risiken nur dann vermieden werden können, wenn sie als solche erkannt werden. Gefahrenhinweis- und Gefahrenkarten dienen dabei als wichtige Grundlage. Die Schweiz verfügt über eine flächendeckende Gefahrenkarte, die eine detaillierte Übersicht über die regionale und lokale Gefährdungssituation in fünf Gefahrenstufen gibt: rot – erhebliche Gefährdung, blau – mittlere Gefährdung, gelb – geringe Gefährdung, gelb-weiß gestreift: Restgefährdung, weiß – keine oder vernachlässigbare Gefährdung (ARE, BWG und BUWAL, 2005).

Die Gefahrenkarte bildet die Grundlage für die Nutzungsplanung (z. B. Ausscheidung von Gefahrenzonen), zur Formulierung von Bauauflagen sowie für die Planung von Schutzmaßnahmen. Sie enthält, zusammen mit den dazugehörigen technischen Berichten, detaillierte Angaben über Ursachen, Ablauf,

räumliche Ausdehnung, Intensität und Eintrittswahrscheinlichkeit von Gefahrenprozessen.

Die Gefahrenstufen zeigen den Grad der Gefährdung von Personen, Infrastrukturen und Sachwerten auf. Sie ergeben sich aus der Intensität und der Eintrittswahrscheinlichkeit der einzelnen Gefahrenprozesse, gemäß dem sog. Intensitäts-Wahrscheinlichkeits-Diagramm (siehe Abbildung 04). Diese Parameter müssen somit für sämtliche maßgebliche Gefahrenprozesse festgelegt werden.

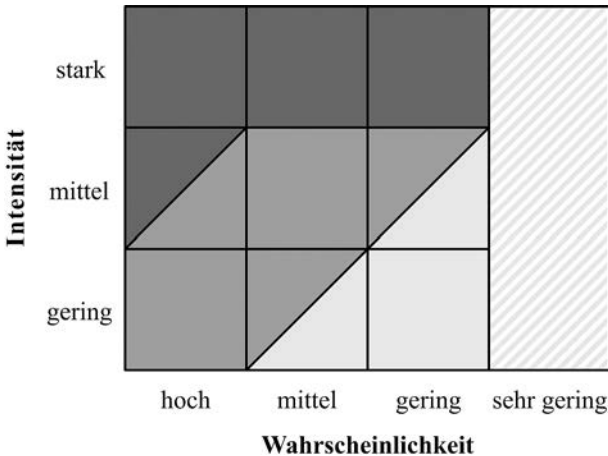


Abbildung 04: Gefahrenstufen: Ergebnis von Intensität und Wahrscheinlichkeit.

Figure 04: Hazard levels: result of intensity and probability.

Quelle: ARE, BWG und BUWAL, 2005, S. 16

Bei identifizierten Schutzdefiziten werden Schutzmaßnahmen vorgenommen, wobei danach die Gefahrenkarte der neuen Gefährdungssituation angepasst wird (»Gefahrenkarte nach Maßnahmen«).

In der Schweiz wird der Bevölkerung sehr offen kommuniziert, dass trotz Schutzmaßnahmen keine absolute Sicherheit gewährleistet werden kann. Um das Ausmaß des verbleibenden Restrisikos abschätzen zu können, werden die Auswirkungen von Extremereignissen überlegt. Mithilfe von Notfallplanung wird versucht, das verbleibende Risiko auf ein akzeptables Maß zu reduzieren.

17.3 Was ist ein Extremereignis?

17.3.1 Allgemein

Ein Extremereignis ist ein Ereignis, das auf den ersten Blick unmöglich erscheint. Es scheint deswegen unmöglich, weil es einerseits ausreichend selten (> 100 Jahre) auftritt, sodass man es »noch nie gesehen« hat und es daher unerwartet war, und weil andererseits die Magnitude des Ereignisses so groß ist, dass enormer Schaden entstehen kann. Extremereignisse können katastrophale Auswirkungen auf Personen, Infrastruktur, Umwelt und/oder Sachwerte haben.

Das Tiroler Katastrophenmanagementgesetz definiert Katastrophen folgendermaßen: »Katastrophen sind durch elementare oder technische Vorgänge oder von Personen ausgelöste Ereignisse, die in großem Umfang das Leben oder die Gesundheit von Personen, die Umwelt, das Eigentum oder die lebensnotwendige Versorgung der Bevölkerung gefährden oder schädigen.« (T-KMG, 2006)

Das Katastrophenschutzgesetz Berlin definiert Katastrophen als »Großschadenereignisse, die [...] von den für die Gefahrenabwehr zuständigen Behörden mit eigenen Kräften und Mitteln nicht angemessen bewältigt werden können.« (KatSG, 1999)

Interpol definiert eine Katastrophe als »unerwartetes Ereignis, bei dem zahlreiche Personen getötet oder verletzt werden« (Interpol, 2009).

Häufig sind durch Extremereignisse die Infrastruktur (Straßen, Brücken, Energie-/Wasserversorgung) und/oder die örtlichen Hilfskräfte und Hilfsressourcen (Polizei, Feuerwehr, Krankenhäuser) selbst beeinträchtigt oder geschädigt.

17.3.2 In Bezug auf Steinschlag

Extremereignisse bei Steinschlag können in Bezug auf die Magnitude und die Ereigniswahrscheinlichkeit definiert werden, Extremsituationen in Bezug auf die Ausgesetzttheit (exposure) und die Vulnerabilität. Treten Extremereignisse in Extremsituationen auf, kann man von einer Katastrophe sprechen (siehe Definition Interpol).

Extremereignisse – in Bezug auf die Magnitude – sind jene Ereignisse, die größer sind, als das Bemessungsereignis (Überlastfall). In Österreich erfolgt die Festlegung des Bemessungsereignisses gemäß der Richtlinie für den Technischen Steinschlagschutz (ONR 24810:2017, 2017) anhand der Einwirkung eines Bemessungsblocks. Die Festlegung des Bemessungsblocks erfolgt, wie in Kapitel 17.2.1 beschrieben, mit einer statistischen Repräsentanz in Abhängigkeit

der Ereignisfrequenz. Alle erfassten Blöcke größer dem festgelegten Bemessungsblock werden als extreme Einwirkungen (Extremereignisse) in Kauf genommen. Diese extremen Einwirkungen (Magnituden) werden gemäß ONR bewusst nicht als Grundlage einer Maßnahmendimensionierung herangezogen, da eine solche Vorgangsweise häufig extrem kostspielig bzw. technisch nicht möglich ist. Eine vollkommene Sicherheit von Personen und Infrastruktur kann nicht gewährleistet werden. Daher muss ein akzeptiertes Restrisiko (akzeptierte Todesfallwahrscheinlichkeit; ÖGG, 2014) festgelegt werden.

Die Vorgangsweise in der Schweiz ist bei der Festlegung von Schutzmaßnahmen auf der Objektebene mit jener in Österreich identisch.

Extremsituationen sind Situationen mit extrem hohem Schadenspotential. Darunter sind ungewöhnlich hohe Aufenthaltswahrscheinlichkeiten und Vulnerabilitäten zu verstehen, also jene von Steinschlag betroffenen Orte, an denen die Ausgesetztheit (exposure) und Vulnerabilität von Personen und Infrastruktur sehr hoch sind. Dort können selbst kleinste Magnituden große Konsequenzen haben (z. B. Besucherstrom in der Liechtensteinklamm, Salzburg).

17.3.3 In Bezug auf Felssturz

Infolge des Abbruchs und der Fragmentierung größerer Felsmassen kommt es zu zeitgleichen Ereignissen (Steinschlag und Blockschlag) und in weiterer Folge zu zeitnahen Einwirkungen auf Personen und Infrastruktur/Schutzmaßnahmen. Diese zeitnahen Einwirkungen stellen per se ein Extremereignis durch Steinschlag/Blockschlag dar (siehe Fallbeispiel Hinterhornbach 2011 in Kapitel 17.5.2).

Für die aus einem Felssturz resultierenden Einzelereignisse (Steinschlag/Blockschlag) gelten bezüglich der Definition von Extremereignissen und Extremsituationen die beim Steinschlag getroffenen Aussagen.

17.4 Entwicklung von Extremereignissen im alpinen Raum

17.4.1 Aufzeichnungen

Seit Ende des 19. Jahrhunderts gibt es Aufzeichnungen von Steinschlag- und Felssturz-Ereignissen in Österreich (Sass und Oberlechner, 2012). Es ist anzunehmen, dass dokumentierte Ereignisse im 19. und 20. Jahrhundert eher größere Auswirkungen auf Personen und/oder Infrastruktur hatten, weil man sich andernfalls nicht die Mühe der damals vergleichsweise aufwendigen Dokumentation gemacht hätte. Seit dem 21. Jahrhundert gibt es aufgrund der ver-

mehrten Nutzung von Computern und dem Internet sowie der zunehmenden Besiedelung von gebirgigen Regionen jährlich mehr dokumentierte Steinschlag- und Felssturz-Ereignisse. Die Auswirkungen der dokumentierten Steinschlag- und Felssturz-Ereignisse auf Personen und Infrastruktur wurden im Zuge dieser Arbeit nicht analysiert; daher können an dieser Stelle keine direkten Aussagen über die Entwicklung von Extremereignissen gemacht werden. Jedenfalls sind die vorhandenen Aufzeichnungen lückenhaft und nicht repräsentativ. Jede Schlussfolgerung aus diesen Daten muss mit Vorsicht behandelt werden.

In den letzten Jahren werden in wissenschaftlichen und nichtwissenschaftlichen Medien vermehrt Bedenken einer höheren Gefahr durch (extreme) Naturereignisse in Folge des Klimawandels geäußert. Sass und Oberlechner (2012) haben die in Österreich vorhandenen Aufzeichnungen verglichen und untersucht, um einen allumfassenden Trend durch Klimawandel festzustellen. Dabei wurden keine mikroklimatischen Situationen (wie Frost-Tau-Wechsel oder Porenwasserdruck) berücksichtigt.

Die Analyse von 252 Ereignissen in Österreich zwischen 1900 und 2010 mit einem Abbruchvolumen zwischen 10^2 und 10^6 m³ hat gezeigt, dass nur 9 % der Ereignisse in Höhenlagen über 2.100 m (wo Permafrost möglich wäre) auftreten. Mit wärmeren Sommern kann es vermehrt zu Ereignissen in zurückweichenden Permafrost-Regionen kommen. Es gibt aber derzeit keinen Hinweis darauf, dass die Ereignisse unter 2.100 m (außerhalb der Permafrost-Zone) wegen des Klimawandels zunehmen. Eine Untersuchung in der Schweiz ergab das Gleiche (Gruner, 2008). Im jährlichen Vergleich mit Niederschlag und Temperatur kann keine Korrelation zwischen Erwärmung und Ereignissen gefunden werden. Bestenfalls ist eine Tendenz zu mehr Ereignissen in kalten Jahren, besonders nach kalten Wintern (ev. wegen Frostsprengung), festzustellen. Die meisten Ereignisse finden im Frühling statt, vermutlich wegen vermehrter Wasserzufuhr durch Schmelzwasser und Regen (Porenwasserdruck) sowie durch Frost-Tau-Wechsel. Die Auswertungen von Niederschlagsdaten bis 2006 zeigen keine Zunahme an extremen Niederschlägen in Österreich (Rudel 2008). Aufgrund von wärmeren Wintern könnte es eine saisonale Verschiebung der Ereignis-Häufigkeit von Frühling auf Sommer geben, aber auf eine allgemeine Ereignis-Zunahme gibt es keine Hinweise (Sass und Oberlechner, 2012).

17.4.2 Schutzmaßnahmen

Seit Beginn der Umsetzung von Schutzbauwerken gegen Steinschlag in der Mitte des 20. Jahrhunderts kam es immer wieder zum Versagen solcher Systeme. Das Versagen hatte durchaus unterschiedliche Ursachen. Diese können einerseits in einer unzureichenden Bemessung der aufzunehmenden Einwirkungen und/

oder andererseits in einer vom Bauwerkstyp oder hinsichtlich ihres Widerstandes ungeeigneten Schutzmaßnahme liegen. Grundsätzlich ist jedoch festzuhalten, dass das Versagen von Schutzmaßnahmen sehr häufig aus einer Überlastsituation resultiert (siehe Kapitel 17.5). Das heißt, dass eine Maßnahme für eine bestimmte Ereignismagnitudo und in Abhängigkeit von deren Häufigkeit in Hinblick auf Einwirkung und Widerstand ausgelegt ist, die jedoch nicht das größtmögliche Lastbild darstellt.

Es gibt jährlich mehr Fallbeispiele von durch Extremereignissen zerstörten Schutzbauwerken. Wie weit dies jedoch auf eine zunehmende Anzahl von Extremereignissen und/oder auf eine zunehmende Anzahl von Schutzbauwerken zurückzuführen ist, ist anhand der heutigen Datenlage nicht verifizierbar.

17.5 Fallbeispiele

Im Folgenden werden einige Fallbeispiele in Österreich aufgezeigt, die gemäß den in Kapitel 17.3 festgelegten Definitionen als Extremereignisse bezeichnet werden können. Die meisten in Österreich beobachteten und dokumentierten Extremereignisse stehen im Zusammenhang mit dem Versagen von Schutzsystemen (sogenannten Überlastfällen, siehe Kapitel 17.3.2 oder Beitrag 13 zu *Überlastfälle*).

17.5.1 Einzelereignisse/Steinschlag

17.5.1.1 Blöslahna/Huben 2013 (5 m³ Block)

Bei diesem Steinschlagereignis kam es zur Ablösung eines mehrere 10er m³ großen Felsbereiches im Oberhang. Die abgelösten Felspartien stürzten relativ konzentriert über eine steile Rinne mit geringer Bodenbedeckung und daher relativ ungünstigen Dämpfungseigenschaften in Richtung Unterhang. Innerhalb der Rinne befanden sich mehrere Reihen von Lawinenverbauungen (Stahlschneeburden), die von den Sturzblöcken durchschlagen und weitgehend zerstört wurden (siehe Abbildung 05a). Ein beträchtlicher Teil der Sturzmasse kam im Bereich der Lawinenverbauungen jedoch auch zur Ablagerung. Der im Bereich des talseitigen Rinnenausgangs situierte Waldbestand wurde teilweise zerstört bzw. schwer beschädigt. Bergseits einer hier befindlichen Landesstraße bzw. einer darüber gelegenen Hofzufahrt befand sich ein Steinschlagschutznetz mit einer Energieaufnahme-Kapazität von 5.000 kJ und einer Bauwerkshöhe von 6 m. Der am weitesten in den Unterhang vordringende Sturzblock wies eine Kubatur von ca. 5 m³ auf. Dieser Block beaufschlagte das Randfeld des Schutz-

netzes, das aufgrund der Randposition in der Netzreihe eine reduzierte Energieaufnahmekapazität aufweist und den Sturzblock dennoch schadlos aufnehmen konnte (siehe Abbildung 05b). Die Energieaufnahmekapazität der Hauptfelder des Netzes von 5.000 kJ würden einer Translationsgeschwindigkeit eines 5 m³ Blockes mit einer Masse von ca. 14 Tonnen von ca. 27 m/s entsprechen. Dies ist ein Wert, der für die vorliegenden Hangneigungen tendenziell gering ist.

Damit handelte es sich bei dem gegenständlichen Ereignis tendenziell um einen Überlastfall, der Bemessungsblock für das Schutznetz war < 5 m³, die Schutzmaßnahme hat dennoch den Sturzblock aufgehalten und keine signifikanten strukturellen Schäden erlitten.

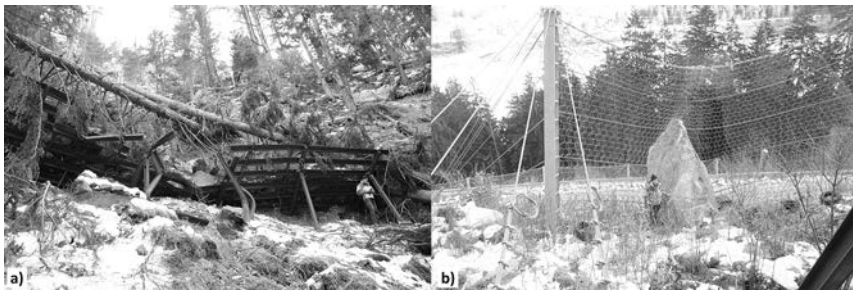


Abbildung 05: Blöslahna/Huben: durch Blockschlag zerstörte Stahlschneebrücke in der Sturzbahn (a); im Steinschlagschutznetz aufgefangener Großblock mit ca. 5 m³ bzw. 14 Tonnen (b).

Figure 05: Blöslahna/Huben: steel snow bridge along the rock fall path, demolished by block impact (a); 5 m³ large resp. 14 ton heavy block, held by rock fall protection net (b).

Fotos: WLV Geologie

17.5.1.2 See im Paznaun 1996 (30 m³ Block)

Ein Blockschlag-Ereignis mit einem ca. 30 m³ großen Felsblock schlägt in die bergseitige Wand eines Wohnhauses ein und beschädigt es so schwer, dass es nicht mehr bewohnbar ist (siehe Abbildung 06). Aufgrund möglicher Folgeereignisse und den stark eingeschränkten Platzverhältnissen wird das schwer beschädigte Gebäude geräumt und abgetragen. An seiner Stelle wird ein Steinschlagschutzdamm errichtet, der seither die darunterliegenden Gebäude vor Steinschlag schützt.



Abbildung 06: See im Paznaun: Großblock mit ca. 30 m^3 beschädigt ein Wohnhaus so stark, dass es nicht mehr bewohnbar ist.

Figure 06: See im Paznaun: 30 m^3 large block demolishes a house, leaving it uninhabitable.
Foto: WLV Geologie

17.5.2 Felsstürze

17.5.2.1 Hinterhornbach 2011 (Abbruchvolumen einige 10 m^3)

Hier kam es 2011 zu einem kleinen Felssturz mit einigen 10 m^3 Gesamtsturzmasse. Dabei wurde das auf einen Einzelblock mit einer Kubatur von $0,5 \text{ m}^3$ ausgelegte Steinschlagschutznetz im Unterhang von mehreren Sturzblöcken, die vermutlich zeitnah das Netz erreichten, überwunden. Das Netz wurde im Bereich der Belastung weitgehend zerstört (Seilrisse, geknickte Stützen, siehe Abbildung 07a).

17.5.2.2 Holderbach 2006 (Abbruchvolumen einige 100 m³)

Im Holderbach wurde in einer Steinschlagrinne als Steinschlagschutzmaßnahme einer dort befindlichen Wildbachbaustelle ein Steinschlagschutznetz in einer Felsrinne errichtet. 2006 kam es zu einem Felssturz mit einigen 100 m³. Dabei wurde das Netz vollständig überlastet, die Stützen geknickt und die Seilanker ausgezogen (siehe Abbildung 07b). Dabei handelte es sich um einen klassischen Überlastfall, auf den das Netz nicht ausgelegt war. Dennoch wurde der überwiegende Teil der Sturzblöcke hinter dem Netz abgelagert.



Abbildung 07: Kleiner Felssturz in Hinterhornbach mit einigen 10er m³ Sturzmasse, Überlastfall für Schutzmaßnahmen (dimensioniert auf 500 kJ) (a); Felssturz im Holderbach mit einigen 100er m³ Sturzmasse, Überlastfall für Schutzmaßnahmen (b).

Figure 07: Small rockfall of some 10 m³ falling mass in Hinterhornbach, overload case for protective measures (dimensioned at 500 kJ) (a); Rockfall of some 100 m³ falling mass in Holderbach, overload case for protective measures. (b).

Fotos: WLV Geologie

17.5.2.3 Vals 2017 (Abbruchvolumen ca. 117.000 m³)

Der Felssturz/die Felslawine in Vals (siehe Abbildung 8) ereignete sich am 24. Dezember 2017 und wurde als Massensturz nicht vorhergesehen, obwohl es mehrfach detaillierte geologische Aufnahmen im gegenständlichen Hangabschnitt gegeben hat. In der Hauptsturzbahn befanden sich neben der Landesstraße lediglich landwirtschaftliche Flächen. Gebäude waren vom Ereignis nicht bzw. nicht direkt betroffen, wenn auch nur wenige Meter bis 10er Meter von den Ausläufern der Sturzmasse entfernt.

Geologisch befindet sich der Abbruch des Felssturzes Vals in der Schieferhülle des Tauernfensters und die anstehenden Gesteine sind Kalkschiefer mit Bereichen mit Graphitphylliten.

Aus den Differenzen der mithilfe von mehreren Lidar-Kampagnen für die Situation vor und nach dem Felssturz ermittelten digitalen Höhenmodelle

konnte das Abbruchvolumen von ca. 117.000 m³ und das Ablagerungsvolumen von rund 130.600 m³ bestimmt werden. Die Volumszunahme infolge Erosion und Auflockerung der stark fragmentierten Sturzmasse beträgt somit ca. 11,5 %.

Der hohe Fragmentierungsgrad der Ablagerungen (vor allem im Zentrum, siehe Abbildung 9a) des Massensturzes weist eindeutig darauf hin, dass eine starke Interaktion der Komponenten der Sturzmasse beim Massensturz stattgefunden haben muss und dass man beim Massensturz Vals eher von einer Felslawine als von einem Felssturz sprechen muss.



Abbildung 08: Felssturz bzw. Felslawine Vals: Abbruchvolumen ca. 117.000 m³, Überlastfall für die Schutzmaßnahmen im Randbereich (dunkler Kreis).

Figure 08: Rock fall/rock avalanche of 117.000 m³ falling mass in Vals, overload case for protective measures at the border area (dark circle).

Foto: WLV Geologie

Wie bei vielen Felsstürzen/Felslawinen dieser Größenordnung ereigneten sich auch beim Massensturz Vals mehrere (sekundäre) Stein- und Blockschlagereignisse an den seitlichen Rändern der Sturzbahn und des Ablagerungsbereichs. Ein Großblock zerstörte dabei mehrere Felder eines Steinschlagschutznetzes (siehe Abbildung 9b). Der Großblock stellte mit seinem Volumen von ca. 5 m³ für das für Einzelblöcke bis zu 1 m³ dimensionierte Netz einen Überlastfall, d. h. ein Extremereignis dar.



Abbildung 09: Felssturz bzw. Felslawine Vals: Überlastfall für die Schutzmaßnahmen im Randbereich (dunkler Kreis) (a). Blockschlagereignis am seitlichen Rand des Ablagerungsbereichs zerstört mehrere Felder eines Steinschlagschutznetzes. Die Blockgröße von ca. 5 m^3 stellt im Sinne des Bemessungsblockes (1 m^3) ein Extremereignis dar (b).

Figure 09: Rock fall/rock avalanche Vals: overload case for protective measures at the border area (dark circle) (a). Block impact at the border area demolishes several rockfall protection net segments. The 5 m^3 block size represents an extreme event, with respect to the 1 m^3 design block (b).

Fotos: WLV Geologie

17.6 Einschätzung des Sachstandes und der Unsicherheiten

17.6.1 Stand der Technik

Der Themenbereich Steinschlag ist ausgehend von der Erhebung der prozessrelevanten Parameter über die Festlegung der maßgeblichen Bemessungsgrößen bis zur Kenntnis der charakteristischen Widerstände der Schutzsysteme in Österreich bzw. der EU umfassend genormt und standardisiert (vgl. ONR 24810:2017 Technischer Steinschlagschutz; ETAG027 European Technical Assessment of Rock-Fall Protection Kits).

Für Felsstürze und Felslawinen fehlt derzeit in Österreich eine systematische Erfassung von potentiellen Gefahrenbereichen und den daraus resultierenden Wirkungsräumen bzw. potentiellen Konflikten mit Schutzgütern.

Nachfolgend wird der Stand der Technik für einzelne Aspekte der Prozessbewertung dargestellt:

- Standards für die Kartierung und Erhebung der prozessrelevanten Daten sind in der ONR 24810:2017 beschrieben. Darin ist z. B. festgelegt, dass folgende Inhalte zu erheben und zu bewerten sind:
 - a) die potentiellen Gefahrenbereiche sind flächig zu kartieren,
 - b) die Ablösebereiche sind in Hinblick auf ihre Verbandsfestigkeit und Kluftkörper-größen zu bewerten,

- c) die Transitbereiche sind in Hinblick auf Rauheit und Dämpfung zu bewerten etc.,
- die Modellierung der Wirkungsbereiche (Reichweite und laterale Ausbreitung) wird für Maßnahmendimensionierungen überwiegend mittels physikalisch basierten 2D bzw. 3D Modellen durchgeführt,
 - die Abschätzung von Eintrittswahrscheinlichkeiten erfolgt auf Basis der Beurteilung der vorliegenden Sturzblöcke (Alter und Häufigkeit des Auftretens),
 - die Abschätzung des Risikos wird in Sonderfällen durchgeführt, wenn die Notwendigkeit einer Schutzmaßnahme strittig ist oder die ausreichende Schutzwirkung der Maßnahme bei hohen Restgefährdungen nachvollziehbar dargestellt werden soll,
 - die Bemessung und Erhaltung von Schutzsystemen (Primärsicherungen, Netze, Dämme, Galerien, Überwachung und Instandhaltung) ist in der ONR 24810:2017 ausführlich dargelegt; diese stellt den Stand der Technik dar. Im Bereich von Monitoring-Systemen sind derzeit keine normativen Regelungen in Österreich vorhanden,
 - die Ausführung von Schutzsystemen (starre Wände, Netze, Dämme, Galerien, Monitoring) mit Ausnahme von starren Wänden (diese werde aufgrund ihrer vergleichweisen kurzen Lebensdauer nicht mehr empfohlen) und des Monitorings ist ebenfalls in der ONR 24810:2017 geregelt,
 - die Dauerhaftigkeit von Schutzsystemen ist einerseits durch eindeutig geregelte Überwachungs- und Inspektionsstandards für verschiedene Schutzsysteme bzw. Schadensfolgekassen (Qualität der Schutzgüter) gewährleistet. Andererseits garantieren die Hersteller von Steinschlagschutznetzen bei normalen Umweltbedingungen eine Lebensdauer von 25 Jahren. Nach Ablauf dieser Frist sind jedenfalls Prüfungen zum Nachweis der aufrechten Schutzwirkung der Bauwerke gem. ONR 24810:2017 (2017) vorgesehen. Andere Bauwerke, wie z. B. Schutzdämme, weisen eine i. w. unbeschränkte Lebensdauer auf, die nur durch Beschädigungen im Lastfall oder durch ungeplante Lastfälle beeinträchtigt werden kann. Eine solche Beeinträchtigung wird jedoch wiederum im Rahmen der gem. ONR 24810:2017 vorgesehenen Inspektionen sichtbar und kann korrigiert werden,
 - Vorgangsweise bei veralteten Schutzsystemen: Veraltete Schutzsysteme sollten in Abhängigkeit von der Gefährdung (Qualität der Schutzgüter, unterstellte Ereignisfrequenz) einerseits in Hinblick auf den Bemessungsvorgang – der mit hoher Wahrscheinlichkeit ebenfalls nicht zeitgemäß war – und andererseits in Hinblick auf den Stand der Technik bei den Maßnahmen selbst neu bemessen werden,
 - raumplanerische Maßnahmen und Frühwarnsysteme: diese stellen häufig nachhaltige und kostengünstige Maßnahmen zur Gefahrenprävention dar.

Raumplanerische Aspekte beim Umgang mit gravitativen Naturgefahren sind im Materialienband der ÖREK (Bäk et al., 2015) dargestellt. Standards zum Komplex der Frühwarnsysteme sind derzeit nicht verfügbar. Es sollte jedoch darauf Bedacht genommen werden, dass zumindest zwei voneinander unabhängige Messgrößen erfasst werden, die ungeachtet von Umweltbedingungen (Sichtverhältnisse, Zugänglichkeit etc.) in Echtzeit in ausreichend kurzen Messintervallen erfasst werden, um eine ausreichende Vorwarnzeit vor dem Eintritt des Schadereignisses sicherzustellen. Weiters ist in diesem Fall ein Katastrophenschutzplan mit klaren Handlungsanweisungen für alle unterstellten Szenarien zu erstellen. Standards für solche Katastrophenschutzpläne existieren derzeit nur für Rutschungen (ISO/DIS 22327:2017 Draft: Security and resilience – Emergency management – Guidelines for implementation of a community-based landslide early warning system).

17.6.1.1 Steinschlagmodelle

Besondere Bedeutung bei der Bewertung der vom Prozess Steinschlag ausgehende Gefahr kommt den Steinschlagmodellen (Prozessmodellen) zu, da nur mit Ihrer Hilfe die Reichweite und Intensität einer potentiellen Steinschlaggefahr – auch von Extremereignissen – prognostiziert werden können.

Prozessmodelle zur Simulation von Steinschlag (Steinschlagmodelle) existieren seit Mitte der 70er Jahre (z. B. Azimi und Desvarreux, 1977; Piteau und Clayton, 1977). Gegenwärtig steht eine große Anzahl von Modellen sowohl für zwei als auch für drei Dimensionen zur Verfügung (für einen aktuellen Vergleich siehe Tabelle 03 nach Volkwein et al., 2011). Alle gegenwärtigen Modelle beschränken sich auf die Modellierung des eigentlichen Sturzprozesses, der initiale Abbruch (Disposition) wird in den Modellen nicht simuliert, sondern lediglich durch die Anfangsbedingungen (Anfangsposition und Anfangsgeschwindigkeiten) abgebildet. Daher benötigen alle Modelle als Eingabe die potentiellen Ablösebereiche welche mit Hilfe anderer Methoden zu ermitteln sind.

Arten von Steinschlagmodellen

Die Prozessmodelle zur Berechnung bzw. Abschätzung der Reichweite und der Ausbreitung von Steinschlag werden unter anderem in 2D- und 3D-Modelle unterschieden.

Mittels 2D-Modellen können entlang eines Hangprofils (Bemessungsprofils) die Trajektorien von Sturzblöcken berechnet werden. 2D-Berechnungen (Energien, Reichweite, Sprungweite und Sprunghöhen) werden zumeist für die Planung und Dimensionierung sekundärer Schutzmaßnahmen (Netze, Dämme) auf der Hangskala (Objektebene) verwendet. 2D-Modelle können jedoch auch für die Ausweisung von Gefahrenzonen für größere Hangabschnitte (kommuni-

nale Ebene, örtliche Raumplanung) eingesetzt werden. Hierbei werden mehrere repräsentative Hangprofile ausgewählt und die Simulationsergebnisse (z. B. der Verlauf der kinetischen Energien) von diesen Hangquerschnitten mittels Expertenwissen interpoliert (Melzner und Preh, 2012). Schwierigkeiten bei der Anwendung dieses Modelltyps ergeben sich vorwiegend bei der Festlegung des repräsentativen Hangprofils bzw. des adäquaten Abstands von mehreren Hangprofilen zueinander. 2D-Analysen haben darüber hinaus auch eine Bedeutung bei der Überprüfung/Verifikation von 3D-Analysen.

Mit Hilfe von 3D-Modellen können flächendeckende Aussagen über die potentiellen Wirkungsbereiche von Steinschlagprozessen getroffen werden (siehe Abbildung 10). Nachteilig bei der Anwendung von 3D-Modellen ist zum einen der erheblich erhöhte Aufwand für die flächendeckende Datenerhebung und Aufbereitung und zum anderen die Berechnungsdauer, die je nach Modellauflösung bzw. dem Modell zugrunde gelegten Algorithmen hoch sein kann.

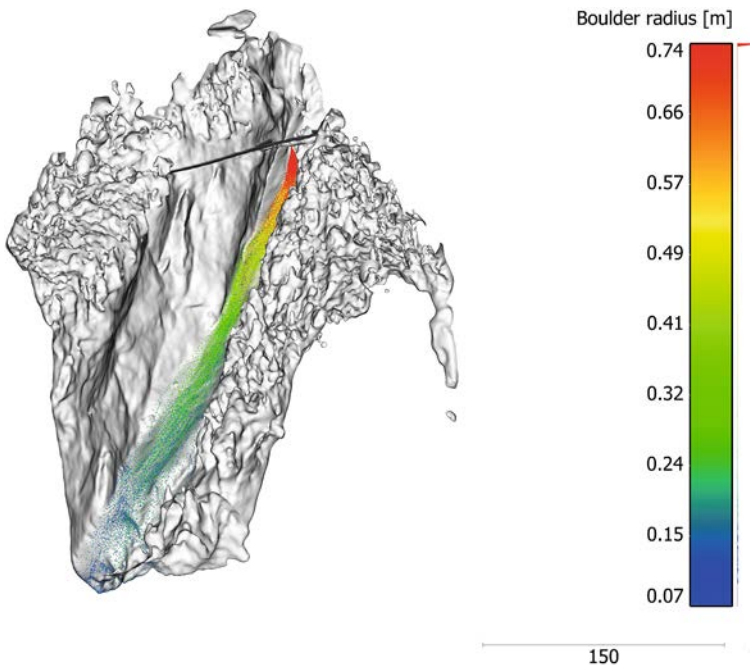


Abbildung 10: Anwendungsbeispiel eines 3D-Modells: Berechnung der Sturzbahnen und der Blockfragmentierung mithilfe des Programms WURF (Fleris und Preh, 2016), simulierte Trajektorien eingefärbt nach der im jeweiligen Bereich auftretenden Blockgröße.

Figure 10: Example of a 3D-model: calculation of trajectories and block fragmentation using the program WURF (Fleris und Preh, 2016), colorized trajectories according to the respective block size.

Quelle: Fleris und Preh, 2016

Berechnungsansätze

Ein weiteres signifikantes Unterscheidungskriterium zwischen den unterschiedlichen Steinschlagmodellen ist der Berechnungsansatz, d. h. die mathematische Formulierung und programmtechnische Implementierung des Sturzblocks, des Rückpralls (Dämpfung bzw. Restitution), der Oberflächenrauheit, des Rollwiderstands, etc.

Nach Ihrem Berechnungsansatz werden die Modelle grob in:

- 1) Massenpunktmodelle (»lumped mass approach«),
- 2) Starrkörpermodelle (»rigid body approach«) und in
- 3) hybride Modelle (»hybrid approach«) unterschieden.

Bei den Massenpunktmodellen wird der Block als form- und dimensionsloser Massenpunkt (»lumped mass«) betrachtet. Im Gegensatz dazu wird bei den Starrkörpermodellen der Sturzblock als komplexer Starrkörper (»rigid body«) modelliert. Eine Mischform zwischen diesen beiden Ansätzen stellt der sogenannte hybride Ansatz dar, bei dem der Sturzblock als dimensionsloser Block für die Simulation der Flugbahn, bei der Berechnung des Rückpralls jedoch als Starrkörper (Berücksichtigung von Blockgröße und Form) betrachtet wird.

Der aktuelle Trend in der Entwicklung geht in Richtung komplexer Starrkörpermodelle, bei denen versucht wird, die möglichen Blockformen so naturgetreu wie möglich abzubilden (Andrew et al., 2012; Glover et al., 2012; Vijayakumar et al., 2012). Weitere wesentliche Unterschiede ergeben sich bei den Modellen beispielsweise in der Art, wie wichtige Hangparameter (z. B. Rauheit, Dämpfungseigenschaften) in das Modell integriert sind und ob und wie der Effekt von Bäumen und sekundären Schutzmaßnahmen auf den Sturzprozess berücksichtigt wird. Einige Modelle verwenden einen probabilistischen Ansatz, um die Unsicherheiten in der Qualität der Eingangsparameter besser zu berücksichtigen. Tabelle 03 zeigt eine Auswahl vorhandener Steinschlagmodelle mit ihrem zugehörigen Berechnungsansatz.

Tabelle 03: Auswahl vorhandener Modelle.

Table 03: Selection of existing models.

Quelle: verändert nach Volkwein et al., 2011

Modell/ Programm Name	Referenz	2D/3D	Ansatz	Probabi- listisch	Wald
CRSP (4.0)	Pfeiffer und Bowen, 1989	2D (Profil)	Hybrid	Ja	Nein
Rockfall 7.1 (2008)	Spang und Sönser, 1995	2D (Profil)	Starr- körper	Ja	Ja
ROFMOD 4.1	Zinggeler et al., 1990	2D (Profil)	Hybrid	Ja	Ja

((Fortsetzung))

Modell/ Programm Name	Referenz	2D/3D	Ansatz	Probabi- listisch	Wald
3D-GEOTEST-Zinggeler	Krummenacher et al., 2008	3D (x,y,z)	Hybrid	Ja	Ja
RocFall 6.0 (2016)	Stevens, 1998	2D (Profil)	Massen- punkt, Starr- körper	Ja	Ja
Sturzeschwindigkeit	Meißl, 1998	2D (x,y)	Massen- punkt	Nein	Nein
STONE	Guzzetti et al., 2002	3D (x,y,z)	Massen- punkt	Ja	Nein
Rockyfor 3D 5.2 (2014)	Dorren et al., 2006	3D (x,y,z)	Hybrid	Ja	Ja
RAMMS::Rockfall	Christen et al., 2007	3D (x,y,z)	Starr- körper (reale Form)	Ja	Ja
THROW	Preh, 2015	2D (Profil)	Hybrid	Ja	Ja
WURF	Fleris und Preh, 2016	3D (x,y,z)	Hybrid	Ja	Ja
Pierre	Mitchel und Hungre, 2017	2D (Profil)	Massen- punkt	Ja	Nein
Pierre3D	Gischig et al., 2015	3D (x,y,z)	Massen- punkt	Ja	Nein

Modellierung von Felsstürzen

Der Prozess Felssturz kann mechanisch in den Abbruch und den daraus folgenden Sturzprozess untergliedert werden. Der Abbruch, die Anfangsphase eines Felssturzes, ist maßgeblich von der Fragmentierung der Felsmasse und von den Interaktionen der Komponenten untereinander (entsprechend dem vorherrschenden Versagensmechanismus) geprägt. Der folgende Sturzprozess besteht aus zeitgleichen Steinschlagereignissen, wobei Interaktionen zwischen den einzelnen Sturzblöcken nur einen geringen Einfluss auf den gesamten Sturzprozess ausüben.

Aufgrund ihrer Spezialisierung auf die Modellierung einzelner unabhängiger Felsfragmente können mit klassischen Steinschlagmodellen (entsprechend Tabelle 03) Felssturzprozesse in Ihrer Gesamtheit nicht exakt abgebildet werden. Dies gilt vor allem für die Anfangsphase eines Felssturzereignisses. Solange jedoch Interaktionen zwischen den einzelnen Komponenten während des Sturzprozesses nur im geringen Maße auftreten, kann der dem Abbruch fol-

gende Sturzprozess mit klassischen Steinschlagmodellen ausreichend genau modelliert werden. Dazu ist jedoch eine Abschätzung der durch den Abbruch (Anfangsphase) bestimmten Anfangsbedingungen mit entsprechendem Expertenwissen erforderlich.

Hat das Abbruchereignis einen dominanten Einfluss und/oder spielt die Interaktion der einzelnen stürzenden Fragmente eine wichtige Rolle, dann müssen andere Berechnungsansätze, die Block-Block-Interaktionen und Fragmentierung berücksichtigen können, z. B. die Diskrete Elemente Methode (Cundall und Strack, 1979), eingesetzt werden.

17.6.2 Unsicherheiten

Unsicherheiten ergeben sich aus:

- 1) Fehlender systematischer Erfassung potentieller Gefährdungsbereiche. In der Regel werden Schutzmaßnahmen als Reaktion auf stattgefundenere Ereignisse geplant und umgesetzt. Erst seit 2014 wird in Österreich systematisch an einer Erfassung von Steinschlaggefahren und potentiellen Konflikten mit dem Siedlungs- bzw. Nutzungsraum gearbeitet (Bäk et al. 2015),
- 2) Veralteten Schutzsystemen (sowohl Bemessung als auch technische Lösung),
- 3) Überlastfällen infolge von Extremereignissen,
- 4) Subjektiver Beurteilung einzelner Parameter durch den jeweiligen Sachbearbeiter,
- 5) Modellunschärfen bei der Ermittlung der charakteristischen Einwirkungen,
- 6) Mangelnder Ergebnisvalidierung bei Bemessung (Modellierung),
- 7) Idealierten Bedingungen bei der Charakterisierung des Widerstandes von Schutzsystemen im Rahmen von Bewertungstests (günstige Blockform ohne scharfe Kanten, zentrale Trefferposition),
- 8) Unschärfen bei der Errichtung von Schutzmaßnahmen (z. B. Fundierung von Netzen in engräumig stark variierenden Baugründen etc.).

17.6.2.1 Unsicherheiten in Bezug auf die Kartierung bzw. Erhebung der prozessrelevanten Parameter

Die Unsicherheiten in Bezug auf die Kartierung bzw. Erhebung der prozessrelevanten Parameter können für die erforderlichen Arbeitsschritte wie folgt beschrieben werden:

- 1) Identifikation von stummen Zeugen und Ablösebereichen: stumme Zeugen von Steinschlagprozessen stellen i. d. R. Sturzblöcke am Einhang dar. Die Lage und die Abmessungen dieser Blöcke zur Kalibrierung von Modellen kann mit einfachen Mitteln (GPS, Maßband) gut dokumentiert werden. Um eine Er-

eignisfrequenz/Ereignishäufigkeit abzuleiten, sind die Blockalter grob gem. Tabelle 02 zu klassifizieren. Diese Alterseinstufung ist aufgrund von meist fehlenden analytischen Methoden mit Unsicherheiten aus der gutachterlichen subjektiven Beurteilung behaftet (siehe Abbildung 11).



Abbildung 11: Stumme Zeugen verschiedenen Alters: frisch (a), angewittert (b), alt (starker Bewuchs) (c).

Figure 11: Silent witnesses at different ages: fresh (a), weathered (b), old (heavy natural vegetal cover) (c).

Fotos: WLV Geologie

- 2) Festlegung der Homogenbereiche (Eigenschaften der Sturzbahn): eine Standardisierung ist schwierig, hier sind entsprechende Erfahrungen mit den verschiedenen am Markt erhältlichen Computermodellen in Hinblick auf die Sensitivität der Ergebnisse auf die Auflösung bei der Abgrenzung von verschiedenen Homogenbereichen erforderlich.
- 3) Festlegung des Bemessungsereignisses/der Bemessungsblöcke: Diese ist in der ONR 24810:2017 (2017) klar geregelt. Unsicherheiten und Unschärfen ergeben sich aus der subjektiven Auswahl von Blöcken, die für die statistische Analyse der Blockgrößen herangezogen werden. Dabei können signifikante Differenzen zwischen verschiedenen Bearbeitern beobachtet werden. Abhilfe schaffen hier – geeignete Verhältnisse wie z. B. eine ausreichende Anzahl von am Einhang vorliegenden Blöcken vorausgesetzt – statistische Verfahren wie z. B. Linien- oder Flächenzählverfahren.
- 4) Festlegung des Bemessungszeitraums (relevant bei der Erhebung der stummen Zeugen und daraus resultierend bei der Festlegung des Bemessungsblocks): Die Festlegung des Bemessungszeitraumes ist i. w. eine technisch/gesellschaftliche Konvention. In Anlehnung an die für Hochwasser, Wildbäche und Lawinen gewählten Bemessungszeiträume wird ein Zeitraum von ca. 150 Jahren als sinnvoll angesehen.
- 5) Bestimmung von Frequenzen/Eintrittswahrscheinlichkeiten: siehe Punktation 1). Ergänzend sind hierfür möglichst vollständige Ereignischroniken hilfreich. Diese liegen aber nur in den seltensten Fällen vor.

17.6.2.2 Unsicherheiten in Bezug auf Prozessmodellierung

Aus derzeitiger Sicht besteht kein Grund zur Annahme, dass die am Markt etablierten physikalisch basierten 2D und 3D Modelle Extremereignisse in Hinblick auf die Blockgröße nicht abbilden können. Grundsätzlich gäbe es mehrere Faktoren, die bei Extremereignissen zu Problemen bei der naturgetreuen Abbildung der in der Natur stattfindenden Prozesse führen könnten. Diese sind:

- 1) die Größe der Blöcke. Da für größere Blöcke die Rauheit des Untergrundes geringere Auswirkungen hat als für kleinere, ist eine korrekte Darstellung der tatsächlichen Blockdimensionen bei der Interaktion Boden/Sturzblock entscheidend.
- 2) die Blockgröße in Hinblick auf die Energie, die auf den Boden einwirkt und hier zu entsprechenden elasto-plastischen Verformungen führt. Diese sind abhängig von der Energie.
- 3) Die Interaktion Block/Wald: da diese Interaktion bei jenen Modellen, die eine solche Interaktion abbilden können, i. d. R. energieabhängig bewertet wird, führen extreme Energien bzw. Blockgrößen hier bei der Betrachtung von Einzelblöcken nicht zu Problemen.

Moderne Modelle bilden für Einzelblockstürze die Bodenkontakte und die dabei auftretenden Dämpfungsprozesse physikalisch weitgehend korrekt ab und können daher ohne signifikante Einschränkungen auch Extremereignisse darstellen. Problematisch ist hierbei lediglich der Absturz eines Blockverbandes (Felssturz) zu werten. Im Zuge des Prozesses kann es zu Veränderungen der Topographie (Einschlagtrichter,...) und zu starken Funktionseinbußen des Waldes kommen. Diese könnten in der Modellierung nicht korrekt abgebildet werden.

Kalibrierung der Steinschlagmodelle: In der Regel werden historische Ereignisse in Form von noch vorhandenen stummen Zeugen oder von dokumentierten Ereignissen (Ereignischronik) für die Kalibrierung der Modelle herangezogen. Wenn diese Daten fehlen ist eine Kalibrierung schwierig. Im Umkehrschluss bedeutet das Fehlen von stummen Zeugen aber meist, dass die Ereignisfrequenz gering ist und daher auch die Gefährdung tendenziell gering ist. Teilweise kann hier eine Simulation mit mehreren verschiedenen Modellen mit gut abgesicherten Parametersets Abhilfe schaffen.

Einfluss/Berücksichtigung des Modellfaktors: dem Umstand, dass unterschiedliche Modelle unterschiedliche Ergebnisse liefern, kann nur mit entsprechend großer Erfahrung und einer Plausibilisierung von Modellergebnissen begegnet werden. So existieren zahlreiche Datensätze von 1:1 Sturzversuchen mit einer guten Dokumentation der Geschwindigkeit und Sprunghöhen (Smith

und Duffy, 1990), die dabei für verschiedenen Untergründe und Hangneigungen beobachtet wurden. Die Modellergebnisse sind daher jedenfalls mit solchen gemessenen Daten in Hinblick auf ihre Plausibilität zu prüfen. Grundsätzlich ist jedoch davon auszugehen, dass die Variabilität der Modellergebnisse weniger vom Modell selbst als vom Anwender abhängt (Berger und Dorren, 2007).

Behandlung von Ausreißern der Modellierung bei der Gefahrenzonen-Abgrenzung: Für die Ausscheidung von Gefahrenzonen oder qualitativen Gefahren-Hinweisbereichen sind die Modellergebnisse entsprechend zu bewerten. Bei einer ausreichenden Anzahl von modellierten Blöcken kann i. d. R. ein konvergentes Ergebnis erzielt werden, das auch reproduzierbar ist. Gibt es bei so einem Ergebnis Ausreißer, die sehr untypische Reichweiten zeigen, ist es vertretbar, solche Modellergebnisse zu eliminieren. Es ist zwar durchaus möglich, dass die Modelle auch solche extremen Ereignisse korrekt darstellen, die Eintrittswahrscheinlichkeit solcher extremen Ergebnisse, die meist in Kaskaden von ungünstigen Parameterkombinationen begründet sind, ist jedoch sehr gering und daher nicht zwingend relevant für die Darstellung von Gefahrenzonen.

17.6.3 Ausblick auf mögliche zukünftige Entwicklungen

In Hinblick auf einen bevorstehenden bzw. bereits erkennbaren Klimawandel mit einer Häufung von extremen Wetterphänomenen kann mit hoher Wahrscheinlichkeit auch von einem Anstieg von Extremereignissen – auch bei Sturzprozessen – ausgegangen werden. In Anbetracht des Charakters der Bemessung von Schutzbauwerken auf ein »Bemessungsereignis«, das wiederum eine definierte Wiederkehrperiode aufweist, muss darauf hingewiesen werden, dass mit dem retrospektiven Charakter dieser Festlegung nur sehr bedingt auf signifikante Änderungen der Magnitude und Frequenz von Schadensereignissen eingegangen werden kann. Daher wäre gegebenenfalls ein Überdenken des »Bemessungsereignisses« notwendig, um mittel- bis langfristig das derzeit existierende Sicherheitsniveau zu halten.

Ähnliche Einschränkungen sind in Hinblick auf eine progressive Siedlungsentwicklung gültig. Hier kann über einen risikobasierten Ansatz eine Lösung angeboten werden. Das heißt, dass die errichteten Schutzmaßnahmen zu einem definierten (akzeptablen) Restrisiko führen (vgl. ÖGG, 2014), das auf das bestehende Schadenspotential abgestellt ist. Wird durch die Siedlungsentwicklung das Schadenspotential erhöht, müssen bei der Überschreitung des akzeptablen Restrisikos die bestehenden Schutzmaßnahmen entsprechend nachgezogen und verbessert werden. Hierzu wäre jedoch bei allen Schutzprojekten eine Ermittlung des nach Realisierung der Maßnahmen bestehenden Restrisikos durchzuführen. Dies ist derzeit in Österreich nur in Ausnahmefällen gegeben.

Zu einem zukünftigen veränderten Freizeitverhalten mit einer erhöhten Risikobereitschaft ist festzuhalten, dass es sich hierbei um ein freiwillig eingegangenes, individuelles Risiko handelt. Die Entscheidung hierüber ist in der Regel von Einzelpersonen zu treffen und lässt sich nur in Ausnahmefällen institutionell regeln. Häufen sich jedoch Fälle von extremen Risiken in diesem Bereich, kann es dennoch zu normierten Vorgangsweisen beim Umgang mit diesen Naturgefahren kommen (vgl. Lawinenwarnstufen mit entsprechenden Verhaltensempfehlungen für Skitouristen, Wanderwege-Tool Tirol für steinschlagexponierte Wanderwege mit einem abgestuften akzeptablen Restrisiko in Abhängigkeit von der Schwierigkeit des betroffenen Wanderweges – vgl. LOLA, 2018 etc.).

17.7 Perspektiven für Handlungsoptionen

In den allermeisten Fällen ist es auch mit aufwändigen Schutzmaßnahmen nicht möglich, eine vollständige Abdeckung von Risiken aus Steinschlag- und Felssturzprozessen zu erreichen. Neben der oft nicht gegebenen Machbarkeit sind hierbei vor allem Überlegungen zur Wirtschaftlichkeit der Schutzmaßnahmen und die Relation von Kosten und Restrisiken bei verschiedenen Maßnahmenvarianten maßgeblich (EconoMe 4.0, o. J.). Aus diesen Gründen sieht z. B. auch der Eurocode 7 (ÖNORM EN 1997-1:2014) vor, dass in Abhängigkeit vom Schadenspotential beim Versagen eines Bauwerks (im Überlastfall) eine bestimmte Zuverlässigkeitsklasse des Bauwerks anzustreben ist. Dies bedeutet, dass die akzeptable Versagenswahrscheinlichkeit eines Bauwerkes – und hier werden auch Hochbauten wie z. B. Wohnhäuser betrachtet – mit steigendem Schadenspotential geringer werden sollte. Diese in Ingenieurskreisen durchaus übliche Denkweise ist jedoch häufig schwierig zu kommunizieren, vor allem, wenn es zu Schadensfällen mit Betroffenen kommt. Dann ist jeder Sachschaden inakzeptabel und jedes Menschenleben unersetzlich. Es gilt daher, in der Bevölkerung ein besseres Bewusstsein für solche bestehenden Restrisiken zu schaffen und diese auch klar und deutlich zu kommunizieren.

Häufig ist es hilfreich, Vergleiche zu Risiken in einem anderen Kontext zu ziehen. So ist die Teilnahme am Straßenverkehr als eine der gefährlichsten Aktivitäten, die man in Mitteleuropa ausüben kann, einzustufen. Dabei werden Personenschaden-Risiken in Kauf genommen, die oft mehrere Zehnerpotenzen größer sind als jene, die Personen im Kontext mit Naturgefahren als inakzeptabel einstufen.

Um eine klarere Vorstellung von den Unsicherheiten und Unschärfen, die bei der Bewertung von Naturprozessen unvermeidbar sind, zu bekommen und auch für alle Nachnutzer einer Expertise zugänglich zu machen, sollte besonderes

Augenmerk auf eine nachvollziehbare Vorgangsweise bei den Erhebungs- und Bemessungsprozessen gelegt werden. Im Wesentlichen ist dies bei Beachtung der in der ONR 24810:2017 beschriebenen Vorgangsweise gegeben. So sollte z. B. eindeutig beschrieben und verortet sein, wo die Blöcke vermessen wurden, die für die Bestimmung der Bemessungsblockgröße herangezogen wurden. Die Bestimmung der Ereignisfrequenz sollte ebenso eindeutig über Chronik- oder Geländedaten dokumentiert werden, wie die Dokumentation der Lage von den für die Kalibrierung des Modells bzw. der Validierung der Ergebnisse herangezogenen Blöcke.

Literatur

- Andrew, R., Hume, H., Bartingale, R., Rock, A., Zhang, R., 2012. CRSP-3D User's Manual Colorado Rockfall Simulation Program. Federal Highway Administration Report CO 80228FHWA-CFL/TD-12-007. Lakewood, Colorado, S. 163.
- ARE, BWG, BUWAL, 2005. Empfehlung Raumplanung und Naturgefahren. Bundesamt für Raumentwicklung, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern, 48 S.
- Azimi, C., Desvarreux, P., 1977. Calcul de chutes de blocs et vérification sur modèle réduit, Internal Technical Report ADRGT.
- Bäk, R., Braunstingl, R., Hagen, K., Kociu, A., Kolmer, C., Melzner, S., Mölk, M., Preh, A., Schwarz, L., 2015. Materialien und Arbeitspapiere – Arbeitsgruppe Geologie. In: ÖROK (Hrsg.), Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplanung. ÖROK Schriftenreihe, 193, S. 155–195.
- Berger, F., Dorren, L., 2007. Principles of the tool Rockfor.net for quantifying the rockfall hazard below a protection forest. Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen, 158(6), S. 157–165. DOI: 10.3188/szf.2007.0157.
- Bourrier, F., Dorren, L., Hungr, O., 2013. The use of ballistic trajectory and granular flow models in predicting rockfall propagation. Earth Surface Processes and Landforms, 38, S. 435–440.
- Bozzolo, D., 1987. Ein mathematisches Modell zur Beschreibung der Dynamik von Steinschlag. Dissertation, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, Nr. 8490.
- BRP, BWW, BUWAL, 1997. Berücksichtigung der Massenbewegungsgefahren bei raumwirksamen Tätigkeiten. Empfehlungen 1997. Bundesamt Raumplanung, Bern, 42 S.
- Christen, M., Bartelt, P., Gruber, U., 2007. RAMMS – a modelling system for snow avalanches, debris flows and rockfalls based on IDL. Photogrammetrie, Fernerkundung, Geoinformation, 4, S. 289–292.
- Corominas, 2005. Quantitative assessment of the residual risk in a rockfall protected area. Landslides, 2, S. 343–357.
- Corominas, J., Mavrouli, O., 2011. Rockfall quantitative risk assessment. In: S. Lambert, F. Nicot (Hrsg.), Rockfall engineering. Wiley, New York, S. 252–284.
- Cundall, P.A., Strack, O.D., 1979. A Discrete Numerical Model for Granular Assemblies. Geotechnique, 29, S. 47–65.

- Domaas, U., 1985. *Rekkevidden av steinsprang*. Oslo. NGI, 58500-1, 17 S.
- Dorren, L., Berger, F., Putters, U.S., 2006. Real-size experiments and 3D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6, S. 145–153.
- EconoMe 4.0, o. J. Wirtschaftlichkeit von Schutzmaßnahmen gegen Naturgefahren. Schweizer Eidgenossenschaft, Bundesamt für Umwelt. https://econome.ch/eco_work/index.php [12.12.2018].
- Egli, T., 2005. Objektschutz gegen gravitative Naturgefahren. Wegleitung kantonale Gebäudeversicherung, St. Gallen.
- ETAG027, 2008. European Technical Assessment of Rock-Fall Protection Kits. European Organization for Technical Approvals.
- Evans, S.G., Hungr, O., 1993. The assessment of rockfall hazards at the base of talus slopes. *Canadian Geotechnical Journal*, 30, S. 620–636.
- Fleris, M., Preh, A., 2016. WURF_LIVE: Demonstration of a stochastic numerical rockfall code in 3D. In: H. Ortner (Hrsg.), *Abstract Volume of GeoTirol2016 – Annual Meeting of DGGV and PANGEO Austria*. Innsbruck, S. 69.
- Gischig, V., Hungr, O., Mitchell, A., Bourrier, F., 2015. Pierre3D – a 3D stochastic rock fall simulator based on random ground roughness and hyperbolic restitution coefficients. *Canadian Geotechnical Journal*, 52(9), S. 1360–1373. DOI: 10.1139/cgj-2014-0312.
- Glover, J., Schweizer, A., Christen, M., Gerber, W., Leine, R., Bartelt, P., 2012. Numerical investigation of the influence of rock shape on rockfall trajectory. *Geophysical Research Abstracts*, 14, EGU2012-11022-1.
- Grundner, M., 1984. Ein Beitrag zu Beurteilung von Naturgefahren im Hinblick auf die Erstellung von mittelmäßstäbigen Gefahrenhinweiskarten (mit Beispielen aus dem Berner Oberland und der Landschaft Davos). *Geographica Bernensia*, G23.
- Gruner, U., 2008. Klimatische und meteorologische Einflüsse auf Sturzprozesse. *Interpraevent*, S. 147–158.
- Guzzetti, F., Crosta, G., Detti, R., Agliardi, F., 2002. STONE: a computer program for the three dimensional simulation of rock-falls. *Computers & Geosciences*, 28, S. 1079–1093.
- Heim, A., 1932. *Bergsturz und Personenleben*. Fretz & Wasmuth, Zürich.
- Hsü, K.J., 1975. Catastrophic debris streams (sturzstroms) generated by rockfalls. *Geological Society of America Bulletin*, 86, S. 129–140.
- Interpol, 2009. *Disaster Victim Identification Guide*, 1(4), S. 3.
- KatSG, 1999. *Katastrophenschutzgesetz – Gesetz über die Gefahrenabwehr bei Katastrophen*, §2(1).
- Kienholz, H., Zeilstra, P., Hollenstein, K., 1998. *Begriffsdefinitionen zu den Themen: Geomorphologie, Naturgefahren, Forstwesen, Sicherheit, Risiko*, Arbeitspapier. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Eidgenössische Forstdirektion, Bern.
- Krummenacher, B., Schwab, S., Dolf, F., 2008. Assessment of natural hazards by three calculations of rockfall behaviour. In: A. Volkwein, V. Labiouse, K. Schellenberg (Hrsg.), *Interdisciplinary Workshop on Rockfall Protection*. Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Morschach, Schweiz, S. 49–51.
- Land Niederösterreich, 2018. *NÖ Atlas*. <http://atlas.noe.gv.at> [13.12.2018].

- LOLA Peak Solutions, 2018. Bericht: Anwendungsbeispiel: Wander-Wege-Werkzeug zur Risikobeurteilung am Weg Nr. 222, Zustieg Bettelwurfhütte. Projektbericht im Auftrag von Amt der Tiroler Landesregierung, Alpenverein Österreich.
- Meißl, G., 1998. Modellierung der Reichweite von Felsstürzen – Fallbeispiele zur GIS-unterstützten Gefahrenbeurteilung aus dem Bayerischen und Tiroler Alpenraum. Innsbrucker Geographische Studien IGS, 28, 249 S.
- Melzner, S., Preh, A., 2012. Sturzmodelle und ihre Anwendbarkeit in der Praxis. Wildbach- und Lawinenverbau. Zeitschrift für Wildbach-, Lawinen-, Erosions- und Steinschlagschutz., 169, S. 78–97.
- Mitchell, A., Hungr, O., 2017. Theory and calibration of the Pierre 2 stochastic rock fall dynamics simulation program. Canadian Geotechnical Journal, 54(1), S. 18–30, DOI: 10.1139/cgj-2016-0039.
- Mölk, M., Rieder, B., 2017. Steinschlag-Gefahrenzonen in Österreich. Erfahrungen, Probleme und Lösungsansätze bei der Entwicklung einer standardisierten Vorgangsweise. Geomechanics and Tunnelling 10(1), S. 24–33.
- ÖGG, 2014. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik, Empfehlung für das Schutzziel bei gravitativen Naturgefahren in Österreich.
- ÖNORM EN 1997-1:2014, 2014. Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1: Allgemeine Regeln. ON-Institut (Hrsg.).
- ONR 24810:2017, 2017. Technischer Steinschlagschutz: Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung.
- Pamminger, P., 2018. Untersuchungen zum Einfluss der Blockfragmentierung am Beispiel der Liechtensteinklamm mithilfe des Berechnungsansatzes WURF. Diplomarbeit, Institut für Geotechnik, TU Wien (in Ausarbeitung).
- Pfeiffer, T., Bowen, T., 1989. Computer Simulation of Rockfalls. Bulletin of the Association of Engineering Geologists, 26(1), S. 135–146.
- Piteau, D.R., Clayton, R., 1977. Discussion of paper »Computerized design of rock slopes using interactive graphics for the input and output of geometrical data« by P.A. Cundall, M.D. Voegele, C. Fairhurst. 16th Symposium on Rock Mechanics, Minneapolis, S. 62–63.
- Poisel, R., Preh, A., 2004. Rock Slope Initial Failure Mechanisms and their Mechanical Models. Felsbau, 22(2), S. 40–45.
- Preh, A., 2015. THROW, ein dynamisch stochastisches Simulationsmodell zur Prognose von Steinschlag. (unveröffentlichtes Benutzerhandbuch)
- Preh, A., 2016. Rock Slopes: Detachment and Runout (Felsböschungen: Abbruch und Sturzprozess). Habilitationsschrift, Technischen Universität Wien, Lehrbefugnis für das Fach »Angewandte Felsmechanik«, Fakultät für Bauingenieurwesen.
- Preh, A., Mölk, M., 2018. Steinschlagmodelle. In: Geologische Bundesanstalt (Hrsg.), Tagungsband Gefahren durch Steinfall und Felssturz. Berichte der Geologischen Bundesanstalt 125, S. 18–24.
- Rauscher, R., 2018. Planung, Ausrichtung und Durchführung eines Steinschlag-Sturzversuches zur Kalibrierung von 3D-Steinschlagsimulationen unter besonderer Berücksichtigung der ONR 24810:2017. Masterarbeit, Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Rudel, E., 2008. Einige Gedanken zur Frage der Zunahme der meteorologischen Extremwerte, Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft.

- Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, S. 83–91.
- Sass, O., Oberlechner, M., 2012. Is climate change causing increased rockfall frequency in Austria? *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, S. 3209–3216.
- Smith, D.D., Duffy, J.D., 1990. Field tests and evaluation of rockfall restraining nets. California Department of Transportation, Final Report, CA/TL, 90(5).
- Spang, R., Sönsler, T., 1995. Optimized rockfall protection by »Rockfall«. In: Eight congress of the International Society for Rock Mechanics, Tokyo, 3, S. 1233–1242.
- Stevens, W.D., 1998. Rocfall: A tool for probabilistic analysis, design of remedial measures and prediction of rockfalls. Masterarbeit, University of Toronto. <https://www.rocscience.com/documents/pdfs/uploads/7756.pdf> [14. 11. 2018].
- T-KMG, 2006. Tiroler Katastrophenmanagementgesetz, LGBl. Nr. 33/2006, §2 (1).
- Usiro, T., Kusumoto, M., Onishi, K., Kinoshita, K., 2006. An experimental study related to rock fall movement mechanism. *Journal of Japan Society of Civil Engineers*, F, 62(2), S. 377–386.
- Vijayakumar, S., Yacoub, T., Ranjram, M., Curran, J.H., 2012. Effect of rockfall shape on normal coefficient of restitution. 46th U.S. Rock Mechanics/Geomechanics Symposium. Chicago, Illinois, 8 S.
- Volkwein, A., Schellenberg, K., Labiouse, V., Agliardi, F., Berger, F., Bourrier, F., Dorren, L., Gerber, W., Jaboyedoff, M., 2011. Rockfall characterization and structural protection – a review. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, S. 2617–2651.
- Zinggeler, A., Krummenacher, B., Kienholz, H., 1990. Steinschlagsimulation in Gebirgswäldern, *Berichte und Forschungen der Geographisches Institut der Universität Freiburg*, 3, S. 61–70.

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

18 Extreme bei Hangrutschungen und Hangmuren

Thomas Glade, Nils Tilch und Arben Koçiu*

Zusammenfassung

Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren werden charakterisiert und in den Grundfunktionen anhand einzelner Beispiele beschrieben. Der Bezug zu Extremereignissen wird über die Prozessdimension (z. B. Fläche, Volumen, Geschwindigkeit) und/oder den möglichen Konsequenzen hergestellt. Historische Informationen sind sehr lückenhaft und reflektieren nicht das reale Auftreten solcher Prozesse. Im Rahmen des Schwerpunktprogrammes GEORIOS der Geologischen Bundesanstalt werden die verfügbaren österreichweiten Informationen gesammelt und zusammengeführt. Beispiele für regionale Extremereignisse werden anhand der Ereignisse Gasen/Haslau 2005 und Sellrain 2015 und für lokale Extremereignisse anhand des Ereignisses Danhöfen 2005 vorgestellt. Auf Basis dieser Beispiele werden Einschätzungen zum Sachstand und der diesbezüglichen Unsicherheiten gegeben, wobei hierbei zwischen Prozessdatenerhebung und -management sowie Prozessdatenanalyse und Erstellung gefahrenpräventiver Planungsunterlagen unterschieden wird. Zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen werden dargestellt und in die Perspektiven der Handlungsoptionen gesetzt, die u. a. verstärktes Monitoring, Einbindung in den Risikomanagementzyklus sowie Citizen Science Initiativen umfassen.

Abstract

Soil and debris slides and hillslope debris flows are characterized and described based on their basic functions. The relation to extreme events is given by the process dimensions (e. g. area, volume, velocity) and/or the potential consequences. Historic information are rather incomplete and do not represent the real landslide occurrence in the past. Within the GEORIOS program of the GBA, available and accessible information on Austrian landslides are compiled. Examples of extreme landslides events are presented within regional studies for events in Gasen/Haslau 2005 and Sellrain 2015, and within investigations during the event in Danhöfen 2005. Based on these examples, some indications of the knowledge on extreme events and the associated uncertainties are provided, with a distinction between process data compilation and management and process data analysis

* Thomas Glade, Universität Wien, Institut für Geographie und Regionalforschung, thomas.glade@univie.ac.at.

Nils Tilch, Geologische Bundesanstalt, Abteilung Ingenieurgeologie, nils.tilch@geologie.ac.at.
Arben Koçiu, Geologische Bundesanstalt, Abteilung Ingenieurgeologie, arben.kociu@geologie.ac.at.

and preparation of support documents for hazard prevention. Future developments and respective challenges are presented and put into perspective to options of actions, related to e. g. increased monitoring, embedding into the risk management cycle and the Citizen Science Initiative.

Kernaussagen

- Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren sind typische Prozesse der Gebirgsräume Österreichs.
- Historische Informationen sind zwar vorhanden, doch äußerst lückenhaft. Mittels des GEORIOS-Datenbankmanagements für gravitative Massenbewegungsprozesse und -strukturen werden die zur Verfügung stehenden Informationen gebündelt.
- Die regionalen Ereignisse aus Gasen/Haslau 2005 und Sellrain 2015, sowie das lokale Ereignis aus Danhöfen 2005 sind Beispiele für Extremereignisse für Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren.
- Die Einschätzung des Sachstandes und der diesbezüglichen Unsicherheiten basiert auf Prozessdatenerhebung und -management, sowie Prozessdatenanalyse und Erstellung präventiver Planungsgrundlagen.
- Zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen beinhalten ein verstärktes Prozessmonitoring, die Einbindung in den Risikomanagementzyklus und in Citizen Science Initiativen.

Key Points

- Soil and debris slides and hillslope debris flows are typical processes in alpine regions in Austria.
- Historic information is available, but very sparse. The GEORIOS process database intends to collect and to merge the available and accessible information.
- The regional studies in Gasen/Haslau 2005 and Sellrain 2015 as well as the local survey in Danhöfen 2005 are examples of extreme soil and debris slides and hillslope debris flows.
- The evaluation of the knowledge and the associated uncertainties are based on process data compilation and -management, and the process data analysis and the preparation of planning documents for preventive measures.
- Future developments and resulting challenges include an increased process monitoring, the embedding within risk management cycles and Citizen Science initiatives.

18.1 Einleitung und Prozessgrundlagen

Hangrutschungen (im Folgenden als Lockergesteinsrutschungen bezeichnet) und Hangmuren sind gravitative Massenbewegungen, die ausschließlich in Lockergesteinen stattfinden. Bei diesen Lockergesteinen handelt es sich um die den Felsuntergrund auflagernden lockeren Substrate, die den pedologisch definierten Boden, Hangsedimente und das darunterliegende verwitterte Ausgangsgestein umfassen. Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren sind Typen der gravitativen Massenbewegungen, die je nach dem Bewegungsablauf

den Prozessgruppen Driften, Gleiten, Kriechen und Fließen zuzurechnen sind (vgl. Beitrag 15 zu *Gravitativen Massenbewegungen*).

Das bewegte Volumen dieser Prozesse variiert von einigen m^3 bis zu mehreren Mio m^3 . Flachgründige Hangbewegungen haben Mächtigkeiten von zehner Zentimetern bis mehreren Metern, tiefgründige Hangbewegungen können bis zu einigen zehner Metern mächtig sein, in Ausnahmefällen auch noch mächtiger. Auch deren Geschwindigkeit kann räumlich und zeitlich sehr variieren. Ganz langsam mit einigen Zentimeter pro Jahr kriechende Prozesse sind genauso anzutreffen wie extrem schnelle fließende Prozesse mit Geschwindigkeiten von mehreren Metern pro Sekunde.

Im Fall gravitativer Massenbewegungen im Lockergestein lassen sich insbesondere im Rahmen von regionalen Extremereignissen grob die folgenden Prozesstypen bzw. -entwicklungsstadien unterscheiden (vgl. Abb. 01; Tilch, 2009; Tilch et al., 2011b).

Bei Anrissen hat lediglich eine Lösung des Lockergesteins vom Hang entlang eines Risses stattgefunden (vgl. Abb. 01a), wobei noch kein oder kein bedeutender lateraler Materialtransport erfolgte. Hierbei handelt es sich um das initiale Entwicklungsstadium einer gravitativen Massenbewegung im Lockergestein.



Abbildung 01: Spontan entstandene und entwickelte Prozesse unterschiedlicher Typen und/oder Entwicklungsstadien in der Region »Klingfurth (NÖ)« in Juni 2009: Anriss/ initiale Rutschung (a), Translationsrutschung (b) und Lockergesteinsrutschungen (Initialprozess) die in Hangmuren übergehen können (Sekundärprozess).

Figure 01: Recently triggered and advancing processes of different landslide types and/ or development stage in the region »Klingfurth (Lower Austria)« in June 2009: Crack / initial slide (a), translational slide (b) and slides in unconsolidated material (initial process), which turn into hillslope earth/ debris flows (secondary process).

Bildquellen: Geologische Bundesanstalt

Sind eine oder mehrere Gleitflächen im Lockergestein ausgebildet, entlang derer es zu einer Bewegung der Lockergesteinsmassen kommt, handelt es sich um eine Lockergesteinsrutschung. Je nach den standortspezifischen Gegebenheiten und der Geometrie der ausgebildeten Gleitfläche(n) erfolgt diese Bewegung rotativ,

planar oder in einer Mischform (z. B. Start als Rotationsbewegung und planare Weiterbewegung), wobei sich der jeweils auflagernde Lockergesteinskörper im Verband bewegt (vgl. Abb. 01b). Solche Lockergesteinsrutschungen können sich im Zuge eines Ereignisses spontan oder über mehrere Ereignisse progressiv von einem Anriss ausgehend entwickeln.

Hangmuren entstehen oft ausgehend von Lockergesteinsrutschungen (Initialprozess), in weiterer Folge fließt das freigesetzte Material auf der Geländeoberfläche (Sekundärprozess) ab (vgl. Abb. 01c).

Solche Prozesse können einerseits spontan entstehen und dann sogleich ein stabiles finales Prozessstadium erreichen. Andererseits können sich solche Prozesse aber auch über mehrere Ereigniszeitpunkte hinweg progressiv weiterentwickeln, so dass zunächst einer oder mehrere intermediäre Prozessentwicklungsstadien resultieren. Eine Reaktivierung dieser Prozesse ist dann immer wieder möglich, bis das finale Prozessentwicklungsstadium erreicht ist (vgl. Abb. 02a). Solche sich progressiv weiterentwickelnden Prozesse kommen in Österreich vielerorts aufgrund fluviatiler Ufererosion im Zuge wiederholter Hochwasserereignisse entlang der Gerinne vor (z. B. Tilch, 2009; Chiffard und Tilch, 2013; Janu et al., 2013). Durch den Materialeintrag in das Gerinne werden so auch in siedlungsfernen Gebieten Österreichs beträchtliche Murschuttvolumina mobilisiert, die über die hochwasserführenden Gerinne (fluvialer Materialtransport, Abb. 02b) in die Siedlungsgebiete gelangen, dort beträchtliche Schäden verursachen und eine Gefahr für die Bevölkerung sein können (Abb. 02c).

Im Rahmen der Dokumentation bisheriger regionaler Extremereignisses wurde oftmals festgestellt, dass bereits auf engstem Raum unterschiedliche Prozessstypen und -entwicklungsstadien vorkommen (vgl. Kapitel 18.3.1). Dies ist vornehmlich in der kleinräumigen Variabilität der für diese Prozesse relevanten natürlichen und anthropogenen Verhältnisse am Prozessstandort und im jeweiligen hydrogeologischen Einzugsgebiet (im Folgenden als »Standortfaktoren« bezeichnet) begründet. Hervorzuheben sind die Beschaffenheit und die geotechnischen und hydro(geo)logischen Eigenschaften der Lockergesteinsauflage sowie jene Standortfaktoren, die im Zusammenhang mit den vielerorts seit Jahrhunderten erfolgten anthropogenen Eingriffen in den ursprünglich natürlichen Zustand des Hangsystems stehen (z. B. Art der Landnutzung und Bewirtschaftung, Hangwasserbewirtschaftung (u. a. Hangdrainagen, Quellsamungen), Abgrabung und Anschüttung von Material).

In Österreich treten Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren vorwiegend als Einzelprozesse auf, die jedoch auch durch einen großräumigen Auslöser (z. B. Starkniederschlagsereignis) an vielen Stellen mehr oder weniger zeitgleich freigesetzt werden können und dadurch besonders für raumplanerische Fragestellungen bedeutsam sind.

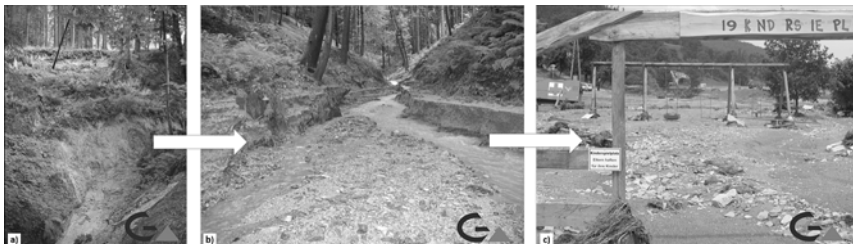


Abbildung 02: Eine der zahlreichen progressiven Lockergesteinsrutschungen in der Region »Klingfurth (NÖ)« im Juni 2009 (a), die im Zuge von Starkniederschlagsereignissen aufgrund der jeweils einsetzenden fluviatilen Ufer- und Sohlerosion immer wieder reaktiviert werden. Das durch die Vielzahl der Lockergesteinsrutschungen gesamthaft freigesetzte Murschuttvolumen gelangt in weiterer Folge entlang der wiederholt einsetzenden Erosion und des fluviaren Materialtransports (b) entlang der hochwasserführenden Bäche sukzessiv-kaskadenartig in den Siedlungsbereich von Klingfurth (c).

Figure 02: One of the many progressive landslides in the region »Klingfurth (Lower Austria)« in June 2009 (a), which has been repeatedly reactivated due to strong precipitation events in combination with fluvial undercutting and incision. The total mobilized material reaches the channel, is eroded by bank erosion and is transported in cascades through the system (fluvial transport, b) and reaches the settlement of Klingfurth (c).

Bildquellen: Geologische Bundesanstalt

In Rahmen eines prozessauslösenden Niederschlagsereignisses können sich die Lockergesteinsmassen u. U. nur wenige Zentimeter bis Meter in unterschiedlichen Dimensionen (Tab. 01) hangabwärts bewegen, sich dann wieder stabilisieren und durch ein folgendes auslösendes Niederschlagsereignis reaktiviert werden. Sie können sich aber auch nach der Initiierung den gesamten Hang in verschiedenen Geschwindigkeiten (Tab. 02) abwärts bewegen und erst in den Tallagen am Hangfuß selbst zum Stillstand kommen oder bis zu einem Gerinne gelangen. Dann ist häufig auch zu beobachten, dass die zunächst kompakten, in sich geschlossenen kriechenden oder abgleitenden Lockersubstratkörper in breiige bis verflüssigte Fließmassen übergehen. Der jeweils stattfindende zeitlich-räumlich variable Bewegungsablauf wird neben der Beschaffenheit, den Eigenschaften und dem Wassergehalt des Substrats auch von der Hangtopographie und Vegetation maßgeblich bestimmt.

Zur Auslösung der gravitativen Lockergesteinsprozesse kommt es im Regelfall erst durch die Infiltration von Wasser in den Untergrund. Hierbei kann es sich ursächlich um räumlich und zeitlich variable kurz- bis mittelfristige Niederschläge (z. B. Regen, Schnee) und die mittel- bis langfristige Witterung (z. B. Bildung einer Schneeeauflage), sowie deren mittelbaren (z. B. Abschmelzen der Schneedecke) und unmittelbaren Einflüsse (z. B. Oberflächenabfluss, Infiltration) handeln. Diese haben wiederum einen raumzeitlich variablen Einfluss auf die Lockergesteinseigenschaften (Aufweichen des Lockergesteins und Kohäsionsverlust) sowie auf die natürlichen bedingten hanghydro(geo)logischen

Prozesse, bei denen es sich letztendlich um die direkten Prozessauslöser handelt (u. a. Ray et al., 2010; Brönnimann, 2011; Zieher et al., 2017).

Tabelle 01: Fläche und Volumen von Lockergesteinsrutschungen.

Table 01: Area and volume of soil and debris slides.

Quelle: Rokic, 2011, S. 442

Rutschungen	Rutschungsfläche (m ²)	Rutschungsvolumen (m ³)
Sehr klein	< 100	< 100
Klein	100–1.000	100–5.000
Mittlere Größe	1.000–10.000	5.000–100.000
Groß	10.000–50.000	100.000–1.000.000
Sehr groß	> 50.000	> 1.000.000

Tabelle 02: Klassifikation der Geschwindigkeit verschiedener Verschiebungen von Lockergesteinsrutschungen.

Table 02: Classification of velocities for different soils and debris slide displacements.

Quelle: Rokic, 2011, S. 442

Rutschungen	Geschwindigkeiten
Extrem langsam	< 0,06 m/Jahr
Sehr langsam	0,06 m/Jahr – 1,5 m/Jahr
Langsam	1,5 m/Jahr – 1,5 m/Monat
Mäßig	1,5 m/Monat – 1,5 m/Tag
Schnell	1,5 m/Tag – 0,3 m/Minute
Sehr schnell	0,3 m/Minute – 3,0 m/Sekunde
Extrem schnell	> 0,3 m/Sekunde

Mancherorts haben aber auch anthropogene Faktoren einen maßgeblichen Einfluss auf die Wirksamkeit der direkten Prozessauslöser, wie z. B. die zeitlich variable Funktionalität von Hangdrainagen und Quellfassungen sowie das unkontrollierte Einleiten von Oberflächenwasser in die Hänge (z. B. aufgrund versiegelter Gebäude- und Siedlungsflächen, Wege- und Straßennetz; Andrecs et al., 2007). Demzufolge ist für die räumlich und zeitlich variable Entstehung und Reaktivierung von gravitativen Lockergesteinsprozessen ein komplexes System von räumlich variablen Standortfaktoren sowie räumlich und zeitlich variablen ursächlichen und direkten Prozessauslösern verantwortlich.

Im Fall der betrachteten eher flachgründigen Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren erfolgt der Materialtransport hangabwärts zumeist in Richtung des maximalen Hanggefälles. Dabei wird der Bewegungsablauf und die Reichweite von Lockergesteinsrutschungen maßgeblich durch verschiedene bewegungskontrollierende Faktoren entlang der Gleitfläche, bzw. des Gleithorizontes (u. a. Materialeigenschaften und -zustand, Grundwasserverhältnisse) sowie bewe-

gungsbehindernde Objekte (u. a. Bauwerke, Vegetation) bestimmt. Diese Faktoren sind auch bei Hangmuren im Fall eines gleitenden Initialprozesses im Herkunftsbereich der Prozessmaterialien relevant. Im weiteren sekundären Prozessverlauf, während dem das Material auf der Geländeoberfläche abfließt (Transportbereich), sind neben bewegungsbehindernden Objekten vor allem die Viskosität und das Wasserbindevermögen des Hangmaterials, die Oberflächenrauigkeit (u. a. Geländeunebenheiten/ Mikrotopographie, Vegetationsbedeckung) sowie die Oberflächenfeuchtigkeit bedeutsam. Aufgrund dieser bewegungskontrollierenden Faktoren im Transportbereich erreichen auch Hangmuren insbesondere im Fall steiler, nasser und glatter Wiesenhänge besonders große Geschwindigkeiten und Reichweiten.

In Österreich kommen Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren als Extremereignisse entweder an einzelnen Hängen in Form von großvolumigen Einzelprozessen (z. B. Danöfen im August 2005; Amt der Vorarlberger Landesregierung, 2005, siehe auch Kapitel 18.3.2) oder aufgrund eines gemeinsamen großräumigen ursächlichen Prozessauslösers (z. B. regionales Starkniederschlagsereignis) in Form von zahlreichen Prozessen unterschiedlicher – aber zumeist kleinerer – Prozessvolumina innerhalb einer Region vor (z. B. Gasen-Haslau im August 2005; Tilch et al., 2011b; siehe auch Kapitel 18.3.1).

Aber auch die Bewegungsgeschwindigkeit ist hierfür ein weiteres zentrales Kriterium. Zusätzlich werden Extrema auch durch die realen oder potenziellen Konsequenzen (z. B. Sachschäden) charakterisiert, was den räumlichen Kontext berücksichtigt (wo passiert etwas?). Das Grundproblem bei allen Untersuchungen zu den Extremen ist jedoch, dass bisher zu wenig langfristige räumlich und zeitlich differenzierende Prozessaufzeichnungen und je nach Region unterschiedlich vollständige Prozessinformationen existieren, die konkrete Informationen zur Identifikation von Extremereignissen im Kontext einer räumlichen Frequenz-/Magnitudenverteilung für das österreichische Staatsgebiet liefern könnten.

18.2 Historischer Kontext und deren Dokumentation

Im historischen Kontext ist festzuhalten, dass Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren seit jeher landschaftsprägend sind, sei es in Form von Einzelprozessen oder in Form von großräumig zahlreich auftretenden Prozessereignissen. Solche Prozesse verursachen, besonders im alpinen Gebiet, immer wieder enorme Schäden in Siedlungsbereichen und an Infrastrukturbauten. Als Auslöser sind hierbei besonders hydrometeorologische Konditionen ausschlaggebend – Erdbeben spielen nach bisherigem Kenntnisstand eine eher unterge-

ordnete Rolle bei der Auslösung von Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren.

Seit vielen Jahrzehnten werden Maßnahmen getroffen, um die negativen Folgen von Extremereignissen bzw. Katastrophenereignissen aufgrund von Lockergesteinsprozessen und Hangmuren einzudämmen, was aber nicht vollständig gelingt. Dies liegt einerseits in den planerischen, technischen und ökonomischen Limitierungen, andererseits in den bestehenden grundsätzlichen Wissenslücken bezüglich der Entstehung, dem Ablauf und den Auswirkungen unwitterbedingter Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren begründet.

Ein wichtiges Mittel zum Verständnis der im Zuge eines Extremereignisses abgelaufenen Prozesse ist deren sorgfältige Dokumentation und eine digitale Zusammenführung von Fakten hinsichtlich der Prozesse sowie den Standortverhältnissen und -eigenschaften (z. B. Geologie, Vegetation, prozessauslösende Faktoren). Die Kenntnis dieser Fakten ist dann auch ein wichtiger Bestandteil der Ursachenforschung und stellt die Grundlage für die Einleitung von Sofortmaßnahmen und nicht zuletzt für die Planung von langfristigen Schutzmaßnahmen dar.

Die vollständige Erfassung der in der Vergangenheit stattgefundenen und in der Gegenwart stattfindenden Prozesse ist äußerst schwer, wenn nicht sogar unmöglich. Schon im Jahre 1938 schrieb J. Stiny: »[...] *eine Hauptschwierigkeit bietet die Lückenhaftigkeit der zugänglichen Angaben. Sie fließen umso spärlicher, je weiter wir die Naturereignisse zurückverfolgen wollen*« (Stiny, 1938). Dies ist auch noch heute festzustellen, denn je weiter die Ereignisse zurückliegen, umso unvollständiger und geringer ist die Qualität der zugänglichen Prozessinformationen.

Dies liegt einerseits darin begründet, dass viele Prozesse in entlegenen Gebieten stattfinden oder aufgrund ihrer kleinen Prozessvolumina und/oder -flächen keine Aufmerksamkeit erlangen. Im Gelände sind diese Prozesse häufig auch nach kurzer Zeit nicht mehr erkennbar, da die Formen nivelliert und die bewegten Materialien sekundär erodiert wurden. Hinzu kommt, dass es keine flächendeckende systematische, auf Standards basierende Prozessdokumentation gibt. Andererseits wurden und werden umfassende Erhebungen unmittelbar nach Extrem- bzw. Katastrophenereignissen leider nur selten durchgeführt. Dies liegt oft daran, dass die zuständigen Gebietskörperschaften und die betroffene Bevölkerung überwiegend mit den Rettungs- und Aufräumarbeiten beschäftigt sind, was zu diesem Zeitpunkt selbstverständlich oberste Priorität hat. Allerdings gehen durch die Aufräumarbeiten zahlreiche Prozessinformationen verloren, die für das Prozessverständnis wichtig sind. Die Prozessdokumentation sollte deshalb möglichst unmittelbar nach einem Extremereignis durch unabhängige Experten erfolgen.

Gegenwärtig sind in die Erhebung von Prozessinformationen im Konnex zu Extremereignissen in Österreich eine Vielzahl an Akteurinnen und Akteuren verschiedener Institutionen und Organisationen eingebunden, was die komplexe Organisationsstruktur auf Bundes- und Landesebene in Österreich widerspiegelt. Ferner sind auch eine Reihe wissenschaftlicher Institutionen und Privatunternehmen daran beteiligt. Da es keine flächendeckende systematische, auf Standards basierende Prozessdokumentationsmethodik gibt, wird jedes Ereignis individuell nach den vorherrschenden Kriterien der jeweils involvierten Institutionen oder Organisationen aufgenommen. Dies erschwert die Vergleichbarkeit der gesamthaft gesammelten Prozessdaten und deren Zusammenführung in einer bundesweiten gemeinsamen digitalen Prozessdatenbank. Dennoch werden seitens der Geologischen Bundesanstalt seit Jahrzehnten, u. a. im Rahmen des Schwerpunktprogrammes GEORIOS (GEORISiken Oesterreich) die verfügbaren Prozessdaten gesammelt und in einer solchen bundesweiten zentralen Prozessdatenbank zusammengeführt (Kociu et al., 2007; Tilch et al., 2011a), was einen wenn auch lückenhaften Überblick ermöglicht (siehe Abb. 03; beispielhaft für Vorarlberg). Gegenwärtig existieren allerdings noch viele Prozessinformationen in den Archiven verschiedenster Institutionen, seien es Universitäten, regionale Geologische Dienste, Ministerien oder Ingenieurbüros, die zukünftig noch in die zentrale Prozessdatenbank eingearbeitet werden müssen. Der darin begründete lückenhafte Kenntnisstand erschwert eine Beurteilung im historischen Kontext sehr.

18.3 Österreichische Fallbeispiele

18.3.1 Regionale Extremereignisse

In den vergangenen Jahrzehnten ereigneten sich in Österreich immer wieder regionale Extremereignisse, die durch zahlreiche Lockergesteinsrutschungen und/oder Hangmuren gekennzeichnet waren. Diese gravitativen Extremereignisse wurden zumeist ursächlich durch regionalspezifisch extreme Niederschlagsereignisse hervorgerufen.

Hierbei handelte es sich entweder um lokal bis regional begrenzte konvektive Niederschlagsereignisse, die durch enorme Niederschlagsintensitäten in kurzer Zeit gekennzeichnet waren, oder um regionale bis überregionale advektive Niederschlagsereignisse, die aufgrund der möglicherweise über Tage andauernden kontinuierlichen Niederschläge enorme Niederschlagssummen hervorgerufen hatten. Beispiele für gravitative Extremereignisse infolge konvektiver Niederschlagsereignisse sind jene vom Juli 2016 in Stanz im Müürztal und Pernegg an der Mur (beide Steiermark; Tilch et al., 2017), wo sich jeweils

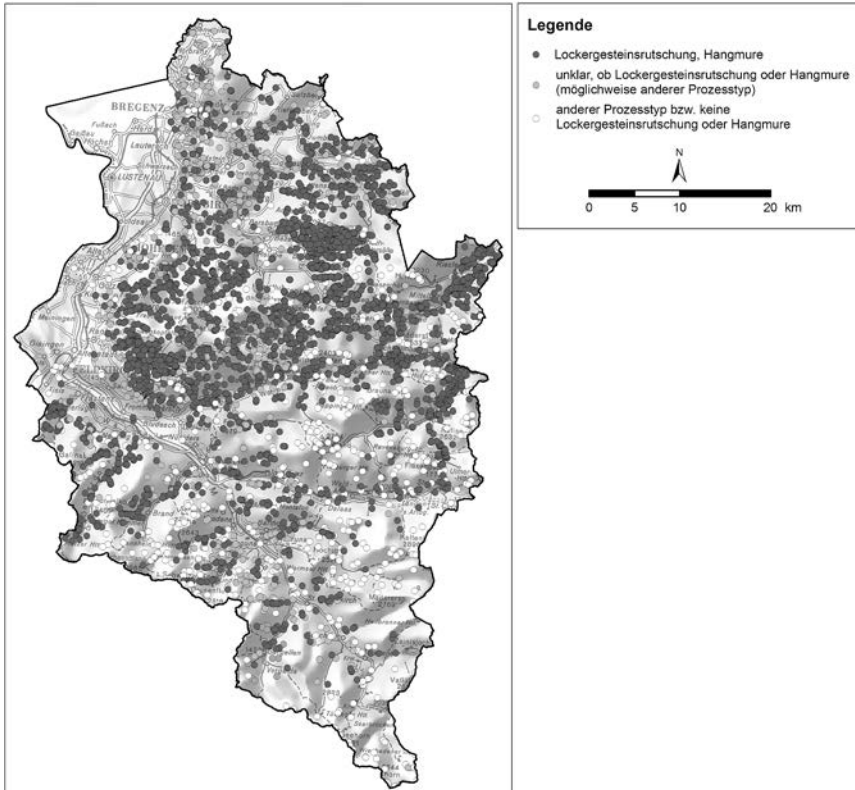


Abbildung 03: Auszug der Prozessdatenbank GEORIOS der Geologischen Bundesanstalt für das Bundesland Vorarlberg mit Informationen zu den bisher zentral erfassten Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren sowie anderen, u. U. unklaren Prozesstypen. Hinweis: Dargestellt sind nur die erfassten, und nicht alle bisher erfolgten Prozesse. Die dargestellten Punkte lassen weder auf die Magnitude noch auf die Frequenz des Auftretens schließen.

Figure 03: Excerpt from the database GEORIOS of the Geological Survey of Austria for the region Vorarlberg including information on currently centrally reported landslides including slope soil and debris flows as well as other process types. Note: Displayed are the recorded processes only, but not all processes that have occurred so far. The presented points do relate to neither magnitude nor frequency of landslides.

Quelle: Geologische Bundesanstalt

hunderte Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren auf Flächen von wenigen Quadratkilometern ereigneten. Beispiele für gravitative Extremereignisse infolge advektiver Niederschlagsereignisse aufgrund einer Vb-Großwetterlage, sind jene im September 1965 sowie im August und November 1966 im Lesachtal (Kärnten; Moser, 1973), im August 1999 in der Buckligen Welt (Niederösterreich; Hübl et al., 2009), im August 2005 im Bregenzerwald (Vorarlberg; Markart et al., 2007; Tilch, 2014), im oberen Lechtal (Tirol) und in Gasen-Haslau (Steir-

ermark; Andrecs et al., 2007; Hübl et al., 2009; Tilch et al., 2011b), im Juni 2009 in Feldbach (Steiermark; Haberler et al., 2009; Hornich et al., 2009) und in Klingfurth (Niederösterreich; Tilch 2009; Chiffard und Tilch, 2013). Diesbezüglich sei an dieser Stelle das Extremereignis im August 2005 im Bereich der Gemeinden Gasen und Haslau exemplarisch hervorgehoben (vgl. Abb. 04), da durch die äußerst zahlreichen Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren sowohl enorme monetäre Schäden (u. a. an Gebäuden und Verkehrswegen) entstanden, als auch zwei Todesfälle zu beklagen waren.

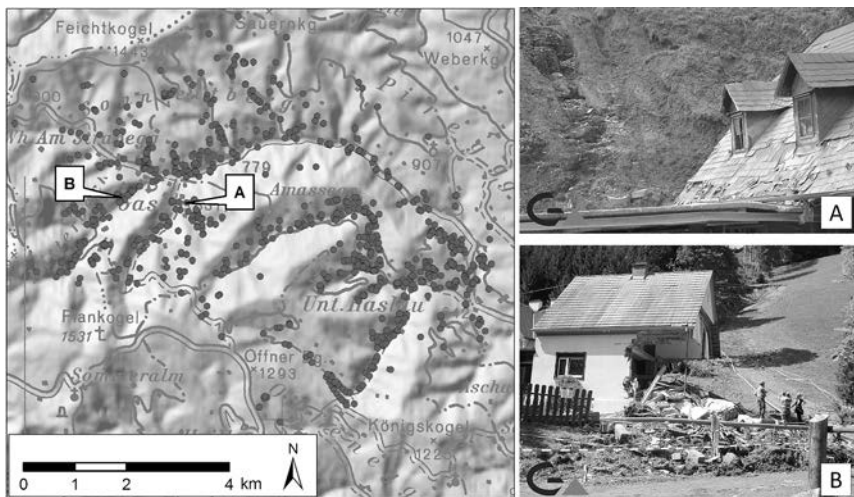


Abbildung 04: Auszug der Prozessdatenbank der Geologischen Bundesanstalt für das Gebiet »Gasen/Haslau (Steiermark)« im August 2005 mit Informationen zu den Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren. Durch eine große Anzahl dieser Prozesse kam es zu beträchtlichen Gebäude- und Straßenschäden (Bsp. A), zudem waren in Gasen aufgrund einer Hangmure zwei Tote zu beklagen (Bsp. B). Hinweis: Dargestellt sind nur die erfassten, und nicht alle bisher erfolgten Prozesse. Die Punkte lassen weder auf die Magnitude noch auf die Frequenz des Auftretens schließen.

Figure 04: Excerpt from the process database of the Geological Survey for the region »Gasen/Haslau (Styria)« from August 2005 including information on currently centrally reported soil slides and hillslope debris flows. A large number of these processes led to considerable damage to buildings and roads. (ex. A). Additionally two people died in Gasen due to hillslope debris flow (ex. B). Note: Displayed are the recorded processes only, but not all processes that have taken place so far. Single points do not refer to neither magnitude nor frequency of landslides.

Quellen: Topographie: GIS-Steiermark; Geologische Bundesanstalt (a, b)

Auch wenn es sich im Fall von regionalen gravitativen Extremereignissen zu- meist um Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren mit relativ kleinen Vo- lumina handelt, ist insbesondere das Schadenpotential im Prozessbereich von Hangmuren groß. Dies ist vornehmlich in der beschleunigten Materialumla-

gerung an steilen Hängen, der daraus resultierenden vergleichsweise großen Reichweite und dem hohen Druckimpuls selbst kleiner Volumina begründet.

Die maximal mögliche Reichweite von Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren ergibt sich zumeist durch hangabwärts folgende Hangverflachungen oder topographische Tiefenlinien, wo das Prozessmaterial akkumuliert oder einem Fließgewässer zugeführt wird. Letzteres kann zur Folge haben, dass das den Fließgewässern (u. a. Wildbäche) zugeführte Material im Rahmen von Hochwasserereignissen weitertransportiert wird und so in Siedlungsbiote gelangt (vgl. Abb. 05).

Im Fall von Hochwasserereignissen werden vielerorts infolge von Ufererosion entlang der Fließgewässer, insbesondere entlang von Wildbächen, zahlreiche gravitative Lockergesteinsprozesse ausgelöst, die den Fließgewässern ebenfalls Geschiebe zuführen. Zusammen mit den Geschiebevolumina der fluvialen Sohl- und Ufererosion können so enorme kumulative Geschiebevolumina hervorgehoben werden. Das in Summe durch die Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren hervorgerufene potentielle Schadens- und Gefahrengebiet beschränkt sich somit nicht nur auf deren Prozessbereiche, sondern auf den Wirkungsbereich der gesamthaften Prozesskaskade (gravitative Lockergesteinsprozesse und fluvialer Feststofftransport).

Solche Extremereignisse treten immer wieder insbesondere in jenen Wildbacheinzugsgebieten auf, wo für die Entstehung von gravitativen Lockergesteinsprozessen sensitive Voraussetzungen vorherrschen (vgl. Kapitel 18.1). Beispiele hierfür sind die verheerenden Extremereignisse in Allerheiligen im Müürztal (Steiermark) im August 1958 (Richter, 1958; Zettl, 1958; Clar, 1959), St. Lorenzen im Paltental (Steiermark) im Juli 2012 (Janu et al., 2013) und Sellrain (Tirol) im Juni 2015 (vgl. Abb. 05; Lager, 2015). Diese Beispiele zeigen, dass Schäden und Gefahren innerhalb des Siedlungsraumes bzw. der raumplanungsrelevanten Bereiche durchaus eine Folge von relativ weit davon entfernt entstandenen gravitativen Massenbewegungen sein können. Deshalb ist es auch wichtig, dass auch solche Prozesskaskaden im Rahmen einer realistischen Gefahreinschätzung und der Ausweisung von Gefahrenzonen für raumplanerische Zwecke berücksichtigt werden.

18.3.2 Lokale Einzelextremereignisse

Während im Fall von regionalen gravitativen Ereignissen ein Extremereignis erst durch die große Anzahl und räumliche Dichte der Einzelprozesse innerhalb einer Region entsteht, können einzelne Lockergesteinsrutschungen oder Hangmuren allein auch aufgrund eines hinreichend großen Prozessvolumens und/oder einer hohen Prozessgeschwindigkeit zu einem bedeutsamen Einzel-

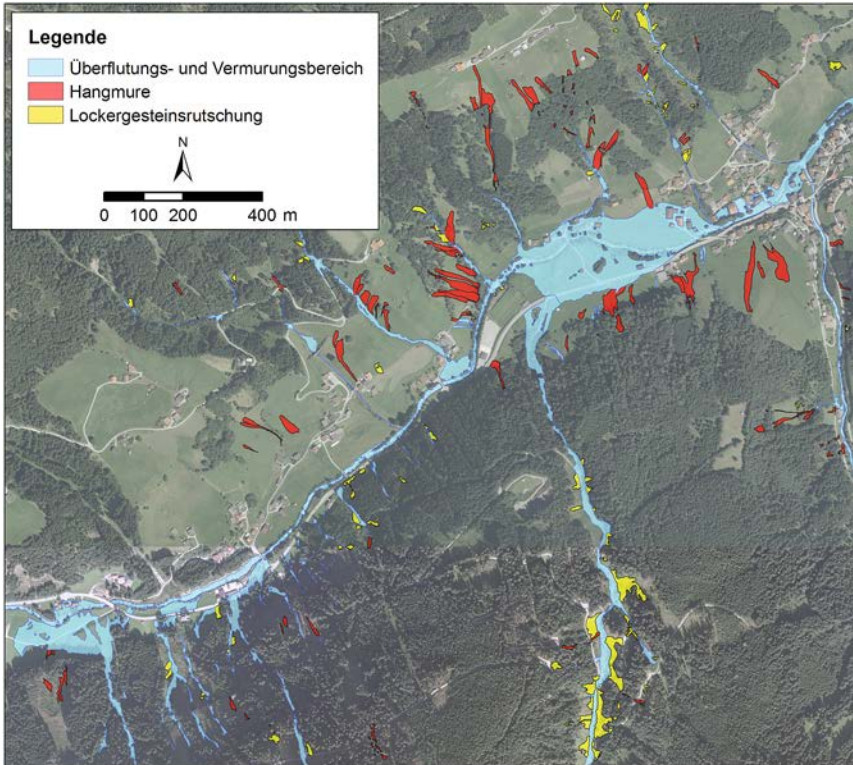


Abbildung 05: Auszug der Prozessdatenbank der Geologischen Bundesanstalt für das Gebiet »Sellrain (Tirol) Juni 2015« mit Informationen zu den Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren sowie zu den Überflutungs- und Vermurungsbereichen. Durch die Sohl- und Ufererosion entlang der Bäche wurden Lockergesteinsrutschungen ausgelöst, die wiederum beträchtlich zur Vermurung im Siedlungsbereich beigetragen hatten (Kaskadeneffekt).

Figure 05: Excerpt from the process database of the Geological Survey for the region »Sellrain (Tyrol) June 2015« including information on Soil and debris slides and hillslope debris flows as well as on flooded and debris covered areas. Due to riverbed erosion, landslides have been initiated which contributed significantly to the debris coverage in the settlements (cascading effect).

Bildquelle: Luftbild des TIRIS – Tiroler Rauminformationssysteme.

ereignis mit großen potenziellen Konsequenzen führen, welches als Einzelextremereignis zu betrachten ist. Ein prominentes Beispiel hierfür ist das Hangmureereignis in Danöfen (Vorarlberg) im August 2005, das Wohnhäuser involvierte (vgl. Abb. 06; Amt der Vorarlberger Landesregierung, 2005).

Dort bewegten sich tausende Kubikmeter Hangschutt talwärts, wodurch mehrere Wohnhäuser stark beschädigt wurden. Ein Wohnhaus musste sogar abgerissen werden, jedoch war nach der Errichtung eines Schutzdammes an gleicher Stelle ein Neubau möglich. Ein weiteres Beispiel für ein lokales Ein-

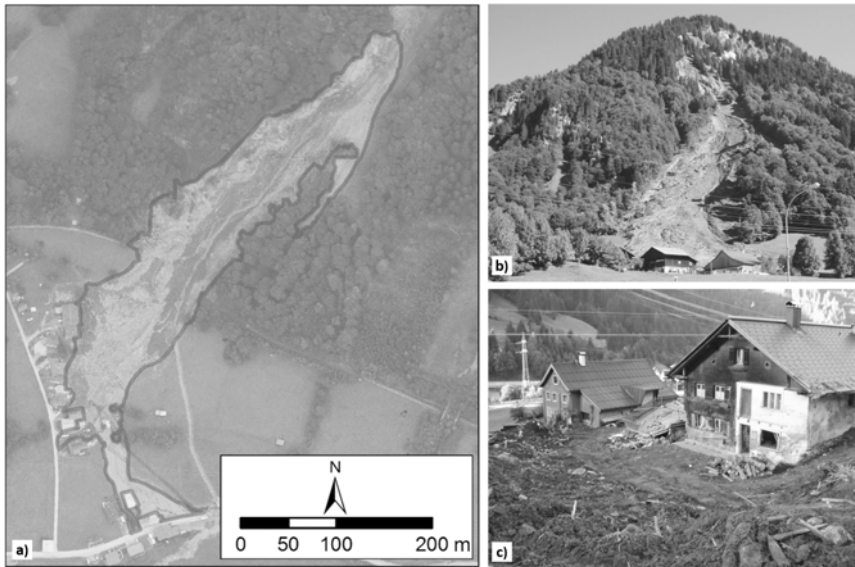


Abbildung 06: Beispiele für ein großes Einzelextremereignis: Hangmure bei Danöfen (Vorarlberg) am 23.08.2005.

Figure 06: Examples of a large individual extreme event: Hillslope debris flow near Danöfen (Vorarlberg) 23.08.2005.

Quellen: VOGIS – Vorarlberger Geographisches Informationssystem (a), Fotoquellen: Reiterer et al., 2018, 18–19 (b,c)

zelextremereignis ist eine große Lockergesteinsrutschung im oberen Drautal (Bereich Scheibenwand – Lienzer Klause) im Februar 2010, wo sich eine Kubatur mit einem Volumen von ca. 1 Mio. Kubikmeter talwärts bewegte, die Drau aufstaute und bis auf den unteren Gegenhang gelangte (Pargger, 2016). Die dort befindlichen Verkehrsstrassen (Schiene, Straße) waren stark beschädigt und aufgrund der aufwändigen Sanierungsmaßnahmen lange Zeit nicht passierbar.

Wenn solche extremen Einzelereignisse in Folge eines extremen regionalen oder überregionalen Niederschlagsereignisses entstehen, sind sie aufgrund des lokal begrenzten enormen Schadens- und Gefahrenpotentials als alleinstehendes Extremereignis zu betrachten, auch wenn im Umfeld weitere zahlreiche kleinere Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren aufgetreten sind.

18.4 Einschätzung des Sachstandes und Unsicherheiten

18.4.1 Prozessdatenerhebung und -management

Daten zu gravitativen Lockergesteinsprozessen, insbesondere zu jenen im Zuge von Extremereignissen, werden durch viele Fachexperten verschiedener Institutionen und Organisationen mittels unterschiedlicher Methoden erhoben und gesammelt sowie zu digitalen Datensätzen aufbereitet. Aufgrund unterschiedlicher Erhebungsziele und -methoden führt dies zu vielen Teildatensätzen, die sich teilweise erheblich hinsichtlich der Datenformate/-inhalte und somit hinsichtlich der Qualitätsmerkmale unterscheiden. Dies stellt eine große Herausforderung für die Kompilation aller Daten zu einen gemeinsamen österreichweiten Datensatz dar (vgl. Kapitel 18.2).

In der Fachwelt gibt es eine übereinstimmende Meinung dahingehend, dass die verschiedenen Erhebungsmethoden unterschiedliche Leistungsmerkmale haben und deshalb durch deren Kombination eine deutliche Verbesserung hinsichtlich des Prozessverständnisses und der Datenqualität, und somit auch hinsichtlich der Aussagekraft für gefahrenpräventive Maßnahmen erreicht wird (Schweigl und Hervàs, 2009; ÖROK, 2015). Im Fall von regionalen Extremereignissen ist eine Kombination von verschiedenen Fernerkundungsmethoden mit Geländeerhebungsmethoden sehr vielversprechend. Dies liegt darin begründet, dass mittels der Auswertung von verschiedenen Fernerkundungsdaten schnell ein Überblick zu den Lockergesteinsprozessen der jeweils betroffenen Region erwartet werden kann. Dies kann per Drohne oder Flugzeug (u. a. Luftbilder (Tilch, 2014) und/oder Laserscans (Schwarz und Tilch, 2018)) sowie per satelliten-gestützter Systeme mit unterschiedlichen Sensoren (z. B. Hölbing et al., 2017) erfolgen. Durch zusätzliche Geländeerhebungen können die nicht per Fernerkundungsmethoden identifizierten Prozesse erfasst und zusätzlich Detaildaten zu den Prozessen und deren Materialien, wie auch zu den Standortfaktoren sowie zu den prozessauslösenden und -hemmenden Faktoren, erhalten werden (z. B. Tilch et al., 2017). Essentiell bei all diesen Methoden ist die möglichst genaue Verortung der Prozesse mit den jeweiligen Charakteristika (z. B. Fläche, Versatz, Gesteinsart, Reichweiten, ggfls. Volumen). Diese sogenannten Prozessinventare geben an sich einen räumlichen Überblick der Prozessverteilungen, stehen darüber hinaus aber auch für weiterführende Modellrechnungen zwecks flächendeckender und -detaillierter Rauminformationen (z. B. heuristischen Abschätzungen, statistischen Analysen und physikalisch-basierten Modellrechnungen) zur Verfügung.

Im Fall von lokalen Einzelextremereignissen variieren die Erhebungsmethoden erheblich, da diese sehr vom Prozesstyp und von der Fragestellung abhängen (u. a. Oberflächenanalyse mittels terrestrischen Laserscanner oder

UAV-Befliegungen bis zu Untergrunderkundungen mithilfe geotechnischer oder geophysikalischer Sondierungsverfahren). Zusätzlich werden im Fall von sich progressiv weiterentwickelnden Prozessen oft Monitoring-Systeme installiert (z. B. Supper und Baron, 2010; Stumvoll et al., 2019), um die zeiträumliche Variabilität des jeweiligen Lockergesteinsprozesses und der prozessauslösenden Faktoren zu beobachten und zu analysieren, was für eine Frühwarnung unerlässlich ist.

Unabhängig von Extremereignissen sind auch Kenntnisse zu allen sonstigen gravitativen Lockergesteinsprozessen im Betrachtungsraum von großer Wichtigkeit, da so erst eine hinreichende Prozessdatenlage entsteht, die für weiterführende Analysen – beispielsweise hinsichtlich der Frage, unter welchen Konditionen ein Extremereignis entsteht – sehr wichtig ist. Deshalb sind ergänzende, meist aufwändige Recherchen in zentralen und dezentralen Archiven immer begleitend durchzuführen.

An dieser Stelle sei betont, dass trotz größter Anstrengungen eine vollständige Prozessdatenlage nicht erreicht werden kann, da es sich bei den betrachteten gravitativen Lockergesteinsprozessen zumeist um Prozesse mit vergänglicher, also nicht dauerhaft identifizierbarer Prozessphänomenologie handelt (z. B. Tilch, 2014). Prozesse, die nicht in Archiven oder sonstigen Dokumenten aufscheinen, können demzufolge später auch weitestgehend nicht mehr identifiziert werden, trotz modernster Erkundungsmethoden. Umso mehr sollte sich daraus für die Zukunft der klare Forschungsauftrag ergeben, das auch zukünftig möglichst viele Prozessinformationen mit unterschiedlichen Erhebungsmethoden gesammelt und zu einem gesamthaften Datensatz zusammengeführt werden. Dies betrifft besonders die Datenaufnahme durch ein Expertenteam direkt nach einem Ereignis. Allerdings fehlen bisher harmonisierte österreichweite Mindeststandards hinsichtlich der Datenerhebung, was eine fachliche Datenkompilation erheblich erleichtern würde. Hinzu kommt, dass die Daten nach wie vor je nach den individuell verfügbaren IT-Technologien sowie Aufgaben- und Fragestellungen digital aufbereitet und verwaltet werden, was eine Zusammenführung aller verfügbaren Prozessdaten zu einer gemeinsamen österreichweiten zentralen Datenbank deutlich erschwert. Dennoch werden seitens der Geologischen Bundesanstalt im gesetzlichen Auftrag (Forschungsorganisationsgesetz, BGBl. 341/1981) seit Jahrzehnten Prozessdaten gesammelt und mit modernen IT-Technologien (u. a. GIS, Datenbank) aufbereitet und zusammengeführt (Tilch et al., 2011a).

18.4.2 Prozessdatenanalyse und Erstellung von gefahrenpräventiven Planungsgrundlagen

Wie im Fall der Erhebung und des Managements der Prozessdaten gibt es bisher in Österreich keine einheitliche, standardisierte Vorgehensweise im Rahmen der entsprechenden Datenanalyse, insbesondere hinsichtlich der Bereitstellung von gefahrenpräventiven Planungsgrundlagen (ÖROK, 2015). Erhebungs- und Managementverfahren werden von den jeweiligen involvierten Institutionen unterschiedlich und orientiert an der jeweiligen Fragestellung durchgeführt. Grundsätzlich besteht einhellige Meinung bei den Fachexperten dahingehend, dass die beste Gefahrenprävention vor Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren darin besteht, dass die bisher von diesen Prozessen betroffenen Hangbereiche im Rahmen nachfolgender Baumaßnahmen berücksichtigt werden sollten. Dies kann einerseits durch entsprechende hangstabilisierende Maßnahmen oder Schutzbauwerke erfolgen (z. B. BMNT/BMLFUW, 2015). Andererseits besteht die Möglichkeit des Meidens bzw. Umgehens der Prozessbereiche, insbesondere jener mit progressiven und initialen bis intermediären Entwicklungsstadien (z. B. Tilch et al., 2015).

Allerdings besteht bei diesen Vorgehensweisen im Fall von regionalen Betrachtungen das Problem, dass nur die bekannten Prozessräume für gefahrenpräventive Maßnahmen berücksichtigt werden, während unklar bleibt, wie viele Ereignisse, die u. U. vor längerer Zeit stattfanden, nicht bekannt sind und wann welche Prozesse zukünftig entstehen könnten. Diesen Umstand wurde in den vergangenen Jahrzehnten nicht zuletzt aufgrund der IT-Entwicklungen zunehmend mit Modellrechnungen begegnet, welche für die entsprechende Region flächendeckende und -detaillierte Karten mit Informationen zur räumlich variablen Prozessdisposition der Hänge liefern, die als Prozessdispositionskarten oder Gefahrenhinweiskarten bezeichnet werden (u. a. Tilch et al., 2011b; Glade et al., 2012; Petschko et al., 2014). In jüngster Zeit werden im Rahmen solcher Modellrechnungen auch zunehmend variable Niederschläge als ursächlich prozessauslösender Faktor berücksichtigt, was in gewisser Weise eine Ergebnisprojektion in mögliche zukünftige Niederschlagszenarien (z. B. extreme Niederschlagsverteilung, -intensität, -summe) ermöglicht (z. B. Schwarz und Tilch, 2017; Canli et al., 2017, 2018). Andere Ansätze integrieren unterschiedliche Landnutzungen in die räumlichen Modellierungen (z. B. Schmaltz et al., 2019).

Hinsichtlich der verwendeten Modellrechnungen lassen sich grob physikalisch basierte, statistische und heuristische Methoden unterscheiden, die sich erheblich hinsichtlich des Anspruches an die Prozessdatenqualität unterscheiden: Während heuristische Methoden Prozessdaten nur für eine Validierung des Modellergebnisses benötigen, werden für statistische Methoden zwecks Mo-

delltraining und Validierung möglichst vollständige oder zumindest repräsentative Prozessdatensätze mit hoher Datenqualität benötigt, da sonst Ergebnisse zufällig hoher oder geringer Güte erzeugt werden (vgl. Abb. 07; Tilch et al., 2011b, 2013; ÖROK, 2015). Hierbei muss besonders auf die Qualität der finalen Kartenwerke geachtet werden (z. B. bei Rutschungsinventaren; Steger et al., 2016). Im Gegensatz zu den statistischen Modellrechnungen werden für physikalisch basierte Modellrechnungen zudem nicht nur relative, qualitative Daten, sondern quantitative Daten zur räumlich variablen Beschaffenheit der Standortfaktoren benötigt, die es häufig, insbesondere für größere Regionen, nicht gibt und die mit aufwändigen Methoden, z. B. mittels Feldkartierungen, erhoben werden müssten. All dies sind Gründe, warum die verschiedenen Modellierungsarten ihre Vor- und Nachteile haben, die nach Fragestellung und vorhandener gesamthafter Datenlage zum Tragen kommen (ÖROK, 2015).

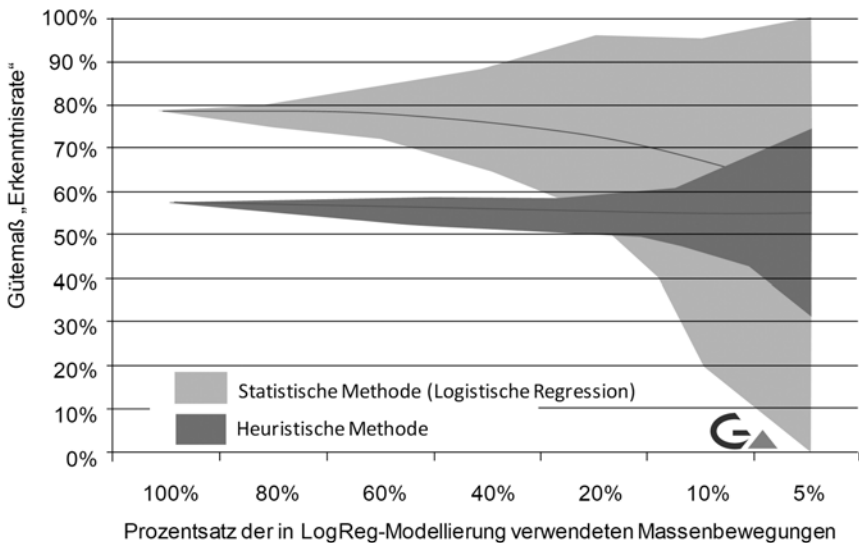


Abbildung 07: Streuung des Validierungsmaßes bzw. Gütemaßes »Erkenntnisrate« in Abhängigkeit von der Anzahl der zur Verfügung stehenden Prozess-Daten (100 %: n = 368) und der angewendeten Modellierungsmethode am Beispiel der Modellergebnisse für die Region Gasen-Haslau (Steiermark).

Figure 07: The spread of the validation measure and the quality criterion »success rate« respectively according to the total number of available process data (100 %: n = 368) and the applied modelling method for the example of the region Gasen-Haslau (Styria).

Quelle: verändert nach ÖROK (2015)

Ferner werden für alle regionalen Modellanwendungen flächendeckende und möglichst flächendetaillierte Daten zu den räumlich variablen prozessrelevanten Standortfaktoren benötigt. Da diese nicht verfügbar sind, werden oft von den

allgemein verfügbaren Basisdaten (z. B. digitales Höhenmodell, Landnutzungskarte, Geologische Karte) ausgehend sogenannte Parameterkarten als Derivate abgeleitet. Die Verwendung insbesondere von Basisdaten mit klassifizierten Einheiten (z. B. Landnutzungskarte, Geologische Karte) beinhaltet jedoch zahlreiche Unsicherheiten, da deren Erstellung auf andere Fragestellungen und Zielsetzungen abzielt und somit die kartenspezifische Klassifikation oft keine direkte Prozessrelevanz hat. Deshalb müssen aus solchen Basisdaten in weiterer Folge mittels Expertenmethoden, die verschieden und individuell sind, prozessrelevante Parameterkarten abgeleitet werden (z. B. Tilch et al., 2011b; Lima et al., 2017). Solche Parameterkarten sind jedoch aufgrund des den jeweiligen Basisdaten zugrundeliegenden Maßstabes oft nicht für großmaßstäbige oder kleinräumige Fragestellungen geeignet. Dies wurde in der Vergangenheit immer wieder dadurch bestätigt, dass die berücksichtigten Parameterkarten, insbesondere jene, die auf Geologischen Karten basierten, meist keinen oder nur geringen Einfluss auf das Ergebnis von statistischen Modellrechnungen hatten. Vor diesem Hintergrund wurde in den letzten Jahren damit begonnen, nach methodischen Alternativlösungen zu suchen. Ein diesbezüglich optimistisch stimmender Ansatz ist beispielsweise, dass aeroradiometrische Daten als Prädiktorvariable zwecks flächendetaillierter Ausweisung von Bereichen gleicher bzw. unterschiedlicher Lockergesteinsbeschaffenheit herangezogen werden (Tilch et al., 2018, 2019). Aufgrund der Unsicherheiten müssen die modellierten Gefahrenhinweiskarten schlussendlich unbedingt validiert und evaluiert werden (u. a. Steger et al., 2016; Steger und Glade, 2017). Hierfür gibt es verschiedenste Methoden (ÖROK, 2015), die jedoch im Fall von Einzelanwendungen zu recht unterschiedlichen Ergebnissen führen können. Deshalb wird auch seitens ÖROK (2015) empfohlen, stets eine Kombination verschiedener Validierungs- und Evaluierungsmethoden anzuwenden.

Über die Modellierung von potentiellen Entstehungsorten von gravitativen Lockergesteinsprozessen hinausgehend werden zunehmend Modellrechnungen hinsichtlich der Abschätzung der Reichweite bzw. Prozessbereiche von Hangmuren durchgeführt (Mergili et al., 2019), was sehr wichtig für eine Abschätzung von potentiellen Schaden- und Gefahrenbereichen ist. Allerdings bestehen noch zahlreiche Daten- und Modellunsicherheiten, so dass im Hinblick auf verlässliche Modellergebnisse noch erheblicher Forschungsbedarf besteht.

Für Fragestellungen im Kontext mit zukünftigen Klimaentwicklungen ist es erforderlich die Schwellenwerte der prozessauslösenden Faktoren im Kontext zu den jeweils gebietsspezifisch vorhandenen räumlich variablen natürlichen und anthropogenen Standortfaktoren zu kennen. Diesbezüglich gibt es bereits eine Vielzahl von Fallstudien, die sich jedoch zumeist auf gut untersuchte und mit Monitoring-Systemen ausgestattete Einzelprozesse beziehen (z. B. Supper et al., 2014; Stumvoll et al., 2019). Eine Übertragbarkeit der diesbezüglichen Er-

kennnisse auf andere Standorte oder gar flächendetailliert auf ganze Regionen ist im Regelfall nicht möglich. Deshalb muss sich für regionale Fragestellungen auf gebietsintegrale statistische Analysemethoden beschränkt werden, mittels derer Niederschlag-bezogene Schwellenwerte für bekannte regionale Extremereignisse der Vergangenheit in Abhängigkeit von den regionalspezifisch dominanten Standortfaktoren abgeleitet werden (z. B. Canli et al., 2017, 2018).

18.5 Mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen

Auf Basis der vorhandenen Kenntnisse zu Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren ist es sehr schwer zukünftige Prozessentwicklungen abzuschätzen. Als gesichert kann gelten, dass diese Prozesse wie in der Vergangenheit und Gegenwart auch in der Zukunft auftreten werden, da noch genügend mobilisierbare Lockersubstrate in den Hängen vorhanden sind.

Inwieweit sich die Einflüsse des Menschen und des Klimawandels auf die komplexen Hangsysteme und somit auch auf die zukünftigen Prozessentwicklungen auswirken, ist zwar in der Forschung thematisiert (z. B. Glade et al., 2014), jedoch noch kaum untersucht. Es kann erwartet werden, dass solche gravitativen Lockergesteinsprozesse sicherlich vor allem in den bekannten, empfindlichen Gebieten auftreten werden, entweder als Neuintiierungen an bisher unbekanntem oder bekanntem, aber noch nicht betroffenen Stellen oder in Lokalitäten, die früher bereits einmal aktiv waren und die sich ggffs. weiter hangaufwärts ausweiten.

Unter den Wissenschaftler*innen Österreichs besteht weitestgehend Konsens dahingehend, dass sich durch die mit den prognostizierten steigenden Lufttemperaturen einhergehende steigende Frequenz und Intensität der Niederschlagsextrema sehr bedeutsam auf die Intensität und Frequenz des Auftretens zukünftiger Extrema gravitativer Lockergesteinsprozesse auswirken wird (Andracs et al., 2010). Allerdings ist die zukünftige Entwicklung der lokalen bis regionalen Niederschlagsextrema derzeit noch nicht sicher, hier besteht erheblicher Forschungsbedarf (u. a. Kromp-Kolb et al., 2014).

In allen Szenarien wird der regionale und globale Wandel von großer Bedeutung sein (Meusburger und Alewell, 2008; Glade et al., 2014). Dieser Wandel beinhaltet ganz maßgeblich die Veränderungen durch das Klima, seien es erhöhte und vermehrte Starkniederschläge oder die veränderten Niederschlagsformen durch wärmere Winter, aber auch durch intensive Kälteperioden mit erhöhtem Schneefall und daraus folgend später im Jahr eine große Wassersättigung des Untergrundes während und nach der Schneeschmelze. Der Wandel

beinhaltet aber auch anthropogene Eingriffe, z. B. die Veränderungen der Vegetationsbedeckung mit den dadurch veränderten Hangstabilitäten oder die Modifikation der Hanghydrologie, sei es durch die Ab- und Umleitung des Oberflächenabflusses oder durch den Einbau von Hangdrainagen. Zusätzlich können Hangsysteme auch komplett modifiziert werden, wenn beispielsweise Hangbereiche für den Tourismus begradigt wurden, oder Hänge großflächig und dauerhaft bewässert werden. Erschwerend kommt hinzu, dass manche der Veränderungen zeitgleich ablaufen, manche aber erst mit einem Zeitversatz von einigen Monaten bis zu mehreren Jahren stattfinden – das erschwert die Abschätzung der zukünftigen Prozessverhaltens bei Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren immens (Glade et al., 2014).

Eine der grundlegenden Fragen bezüglich der zukünftig zu erwartenden Extremereignisse ist, inwieweit die bisher existierenden Konzepte und Methoden der Analyse der Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren überhaupt geeignet sind, mögliche zukünftige Extreme abzubilden. Es bleibt festzustellen, dass die bisherigen Konzepte und Methoden nur begrenzt für die Abschätzung von Extremen herangezogen werden können. Dies ist einerseits darauf zurückzuführen, dass die Datenlage zu weiter zurückliegenden Extremen zu lückenhaft ist, bzw. die vorliegenden Daten nur begrenzte Aussagen zu den damals relevanten vorbereitenden, bewegungsauslösenden und -kontrollierenden Faktoren zulassen. Andererseits sind auch die meisten der existierenden Modellansätze nur sehr bedingt geeignet zukünftige Extremereignisse abzuschätzen, da vollkommen unklar ist, ob die Modelle sich überhaupt für Extreme eignen, da entsprechende Validierungen nicht möglich sind.

Auch im gesellschaftlichen Kontext ist eine Einordnung von Extremereignissen bei Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren eine große Herausforderung. Die Gesellschaft wirkt auf vielfältige Weise auf den Naturraum ein, sei es verursacht durch die Bevölkerungs- oder Tourismusentwicklung im Alpenraum, sei es aber auch durch einen veränderten Schutzbedarf, der nicht zuletzt aufgrund einer limitierten Nutzungsflächen entsteht. Die daraus resultierenden Wechselwirkungen beeinflussen somit auch die Exposition und Vulnerabilität der Gesellschaft durch Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren. Einerseits beinhalten die Extremereignisse ein sehr großes Bedrohungspotential für die exponierten Gesellschaftssysteme, andererseits muss man sich auch verdeutlichen, dass auch in der geologischen Erdgeschichte die Extremereignisse zur ganz natürlichen und normalen Landschaftsentwicklung gehören.

18.6 Perspektiven für Handlungsoptionen

Die Handlungsoptionen bei Lockergesteinsrutschungen und Hangmuren variieren hinsichtlich der Extremereignisse sehr stark. In allen Fällen ist es grundlegend unabdingbar, dass langfristige Monitoring-Programme etabliert werden, sei es bei Extremereignissen an einzelnen Lokalitäten oder im Raum. Im Fall von progressiven Prozessen müssen die Veränderungen an den Oberflächen der bewegten Massen genauso kontinuierlich und in der erforderlichen Auflösung beobachtet und dokumentiert werden wie die Veränderungen im Untergrund, sei es in Bezug auf Verschiebungsmessungen oder hinsichtlich der Variationen der Hanghydrologie und Hanghydrogeologie. Nur mit einem solchen kontinuierlichen Monitoring (z. B. Stumvoll et al., 2019), wie es ja auch in anderen Prozessbereichen vollkommen üblich ist (u. a. Windgeschwindigkeit bei Stürmen, Wasserstand bei Flüssen, Höhe von Schneedecken), kann auch das grundlegende Prozessverständnis verbessert werden, können die existierenden Modelle angepasst werden und können final auch potentielle zukünftige Extremereignisse besser abgeschätzt werden. Nur mit dieser Kenntnis können zukünftige Handlungsoptionen adaptiert und entsprechend an die Erfordernisse durch die Extremereignisse angepasst werden (z. B. Schlögl und Matulla, 2018), sei es auf der Hangskala für Einzelobjekte oder auf der Regionalskala für große Gebiete mit vielen Quadratkilometern Ausdehnung. Da diese Informationen momentan aber noch nicht in der erforderlichen Güte vorliegen, muss versucht werden, Extremereignisse gemäß des momentanen Kenntnisstandes zu adressieren – trotz der vielen Unbekannten.

Im Risikomanagementzyklus müssen in Bezug auf die direkte Bewältigung von Extremereignissen schnell Einsatzkräfte im Sinne einer Task Force zur Verfügung stehen, um einerseits mit den Extremereignissen umzugehen, um aber andererseits auch eine genaue Dokumentation dieser Großereignisse zu ermöglichen (Hübl et al., 2002). Nur damit lassen sich nachhaltige Erkenntnisse aus diesen Ereignissen für zukünftige Extreme ziehen. Für den Wiederaufbau nach einem solchen Extremereignis müssen entsprechende Ressourcen bereitstehen, es muss aber auch eine sorgfältige Planung im Sinne einer zukünftigen Gefährdungsabschätzung und Risikodarstellung vorliegen, um eine nachhaltige Entwicklung zu ermöglichen. Hierbei spielt die Vorsorge eine zentrale Rolle. Dies beinhaltet geotechnische Maßnahmen im Sinne von Schutzbauwerken genauso wie eine zukunftsorientierte Raumplanung, die zukünftig potentiell gefährdete Gebiete berücksichtigt (Pomaroli et al., 2011). Hierzu müssen bereits vorbeugend die potenziellen »Hot Spots« der potentiell zukünftigen Gefahrenstellen erfasst werden. Schlussendlich müssen alle beteiligten Akteure, seien es die betroffenen Behörden, Firmen oder Privatpersonen, besser informiert und geschult werden, um die Extremereignisse besser zu verstehen und mit

diesen in der Zukunft besser umgehen zu können. Die oftmals komplizierten wissenschaftlichen Methoden, Ergebnisse und Erkenntnisse sollten deshalb für Entscheidungsträger und fachfremde Experten sowie für die Bevölkerung immer so aufbereitet werden, dass diese auch verstanden werden können. Diesbezüglich gibt es bereits viele Ansätze (z. B. Glade et al., 2013; Schwarz und Tilch, 2017) und Praxisbeispiele.

Zukünftig sollten solche Aspekte in Form von Citizen Science- und Sparkling Science-Projekten und -Programmen behandelt werden. Das »Denke das Undenkbare« soll also keine Verunsicherung oder gar Panik produzieren, sondern ganz im Gegenteil – es soll vor dem Ereignis die verschiedenen Optionen durchdacht worden sein um dann im real eintretenden Fall die bestmöglichen Handlungsoptionen zu kennen und anzuwenden.

Literatur

- Amt der Vorarlberger Landesregierung, 2005. Das Starkregen- und Hochwasserereignis des August 2005 in Vorarlberg. Ein Bericht des Amtes der Vorarlberger Landesregierung, Bregenz, 54 S.
- Andrecs, P., Hagen, K., Fromm, R., Gauer, P., Höller, P., Klebinder, K., Kohl, B., Lang, E., Markart, G., Perzl, F., Stary, U., Zeidler, A., 2010. Analyse der Sicherheit und Genauigkeit von Bemessungswerten bei gravitativen alpinen Naturgefahren und Ableitung von Anpassungsstrategien an den Klimawandel. Endbericht des BFW im Auftrag des BMLFUW im Rahmen des Projektes AdaptEvent, Wien, 321 S.
- Andrecs, P., Hagen, K., Lang, E., Stary, U., Gartner, K., Herzberger, E., Riedel, F., Haiden, T., 2007. Dokumentation und Analyse der Schadensereignisse 2005 in den Gemeinden Gasen und Haslau (Steiermark). BFW-Dokumentation 6, Wien, 75 S.
- BMNT/BMLFUW, 2015. Leben mit Naturgefahren – Ratgeber für die Eigenvorsorge bei Hochwasser, Muren, Lawinen, Steinschlag und Rutschungen. Ratgeber des BMIT/BMLFUW, Wien, 35 S.
- Brönnimann, C.S., 2011. Effect of Groundwater on Landslide Triggering. Doktorarbeit, École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, 223 S.
- Canli, E., Loigge, B., Glade, T., 2017. Spatially distributed rainfall information and its potential for regional landslide early warning systems. *Natural Hazards*, 91(1), S. 103–127.
- Canli, E., Mergili, M., Thiebes, B., Glade, T., 2018. Probabilistic landslide ensemble prediction systems: lessons to be learned from hydrology. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(8), S. 2183–2202.
- Chiffard, P., Tilch, N., 2013. Learning from Nature – Mapping of Complex Hydrological and Geomorphological Process Systems for More Realistic Modelling of hazard-related maps. 44. Jahrestreffen des Arbeitskreises Hydrologie in Lunz am See, 15.–17. November 2012, *Geographica Augustana*, S. 134–137.
- Clar, E., 1959. Geologische Beobachtungen von der steirischen Unwetterkatastrophe vom August 1958. *Geologie und Bauwesen*, 24(1), S. 131–140.

- Glade, T., Bell, R., Dobesberger, P., Embleton-Hamman, C., Fromm, R., Fuchs, S., Hagen, K., Hübl, J., Lieb, G., Otto, J.-C., Perzl, F., Peticzka, R., Pranger, C., Samimi, C., Sass, O., Schöner, W., Schröter, D., Schrott, L., Zangerl, C., Zeidler, A., 2014. Der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre. In: Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Austrian Panel on Climate Change (Hrsg.), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, S. 557–600.
- Glade, T., Petschko, H., Bell, R., Bauer, C., Granica, K., Heiss, G., Leopold, P., Pomaroli, G., Proske, H., Schweigl, J., 2012. Landslide susceptibility maps for Lower Austria – Methods and Challenges. In: G. Koboltschnig, J. Hübl, J. Braun (Hrsg.), Interpraevent Conference Proceedings. Presented at the 12th Congress Interpraevent 2012, International Research Society Interpraevent, Grenoble, S. 497–508.
- Glade, T., Petschko, H., Bell, R., Leopold, P., Proske, H., 2013. Karten zu gravitativen Massenbewegungen: Möglichkeiten und Grenzen ihrer Aussagekraft. *Raumdialog – Magazin für Raumplanung und Regionalentwicklung in Niederösterreich*, 2, S. 10–13.
- Haberler, A., Schwarz, L., Lotter, M., Kociu, A., 2009. Rutschungen in der Katastrophengregion Feldbach (Steiermark) im Sommer 2009. In: *Geoforum Tirol* (Hrsg.), Tagungsband mit Kurzfassungen. 11. Geoforum, Niederthai/Umhausen, 1 S.
- Hölbling, D., Eisank, C., Albrecht, F., Vecchiotti, F., Friedl, B., Weinke, E., Kociu, A., 2017. Comparing Manual and Semi-Automated Landslide Mapping Based on Optical Satellite Images from Different Sensors. *Geosciences*, 7(2), S. 37.
- Hornich, R., Paar, P., Baumann, N., Adelwöhrer, R., Prem, E., 2009. Leistungsbericht 2009 der Abteilungsgruppe Landesbaudirektion Fachabteilung 19B des Amtes der steirischen Landesregierung. Graz, 41 S.
- Hübl, J., Kienholz, H., Loipersberger, A. (Hrsg.), 2002. DOMODIS – Documentation of Mountain Disasters, State of Discussion in the European Mountain Areas. Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Schriftenreihe 1, Handbuch 1.
- Hübl, J., Kociu, A., Krissl, H., Lang, E., Länger, E., Rudolf-Miklau, F., Moser, A., Pichler, A., Rachoy, Ch., Schnetzer, I., Skolaut, Ch., Tilch, N., Totschnig, R., 2009. Alpine Naturkatastrophen – Lawinen-Muren-Felsstürze-Hochwässer. Leopold Stocker-Verlag, Graz, 120 S.
- Janu, S., Mehlhorn, S., Moser, M., 2013. Ereignisdokumentation und Analyse des Ereignisses vom 21. Juli 2012 in St. Lorenzen. Bericht der Wildbach- und Lawinenverbauung, 77(171), S. 208–219.
- Kociu, A., Kautz, H., Tilch, N., Grösel, K., Heger, H., Reischer, J., 2007. Massenbewegungen in Österreich. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt* 147(1/2), S. 215–220.
- Kromp-Kolb, H., Nakicenovic, N., Steininger, K., Gobiet, A., Formayer, H., Köppl, A., Pretenthaler, F., Stötter, J., Schneider, J. (Hrsg.), 2014. Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14). Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, 1096 S.
- Lager, M. 2015. Sellraintal Juni 2015. Hangexplosionen und Muren – Eine Bestandsaufnahme. Tagungsband zum 17. Geoforum Umhausen, Niederthai, Innsbruck, S. 4–11.
- Lima P., Steger S., Glade T., Tilch N., Schwarz L., Kociu A., 2017. Landslide susceptibility mapping at national scale: a first attempt for Austria. In: M. Mikos, B. Tiwari, Y. Yin, K. Sassa (Hrsg.), *Advancing Culture of Living with Landslides*. 4th World Landslide Forum (WLF4), Ljubljana, Springer, Cham, S. 943–951.

- Markart, G., Perzl, F., Kohl, B., Lizian, R., Kleemayr, K., Ess, B., Mayerl, J., 2007. 22. und 23. August 2005 – Analyse von Hochwasser- und Rutschereignissen in ausgewählten Gemeinden Vorarlbergs. BFW-Dokumentation 5, Innsbruck, 43 S.
- Mergili, M., Schwarz, L., Kociu, A., 2019. Combining release and runout in statistical landslide susceptibility modeling. *Landslides*, 16(11), S. 2151–2165.
- Meusburger, K., Alewell, C., 2008. Impacts of anthropogenic and environmental factors on the occurrence of shallow landslides in an alpine catchment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, S. 509–520.
- Moser, M., 1973. Analyse der Abruchsbildung bei den Hochwasserkatastrophen der Jahre 1965 und 1966 im mittleren Lesachtal (Kärnten). *Carinthia II*, 162./83. Jahrgang, S. 179–234.
- ÖROK (Hrsg.), 2015. Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplanung. ÖROK Schriftreihe 193, Wien.
- Pargger, M., 2016. Die instabile Talflanke südlich der Lienzer Klause – Osttirol. Masterarbeit, Leopold-Franzens-Universität Innsbruck, Innsbruck, 254 S.
- Petschko, H., Brenning, A., Bell, R., Goetz, J., Glade, T., 2014. Assessing the quality of landslide susceptibility maps – case study Lower Austria. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(1), S. 95–118.
- Pomaroli, G., Bell, R., Glade, T., Heiss, G., Leopold, P., Petschko, H., Proske, H., Schweigl, J. 2011., Darstellung der Gefährdung durch gravitative Massenbewegungen im Bundesland Niederösterreich als Grundlage der Raumplanung. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 166, S. 198–213.
- Ray, R. L., Jacobs, J. M., de Alba, P., 2010. Impacts of unsaturated zone soil moisture and groundwater table on slope instability. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 136(10), S. 1448–1458.
- Reiterer, A., Wöhler-Alge, M., Burtcher, D., 2018. Best Practices in der Risikoabschätzung und Gefahrenzonenplanung in Vorarlberg.
- Richter, H., 1958. Die Wildbachkatastrophen des Jahres 1958 in Steiermark und Kärnten. *Österreichische Wasserwirtschaft*, 10(11), S. 241–247.
- Rokic, L.J., 2011. *Fizicka geologija*, Sarajevo.
- Schlögl, M., Matulla, Ch., 2018. Potential future exposure of European land transport infrastructure to rainfall-induced landslides throughout the 21st century. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18, S. 1121–1132.
- Schmaltz, E., van Beek, L.P.H., Bogaard, T.A., Kraushaar, S., Steger, S., Glade, T., 2019. Strategies to improve the explanatory power of a dynamic slope stability model by enhancing land cover parameterisation and model complexity. *Earth Surface Processes and Landforms*, 44(6), S. 1259–1273.
- Schwarz, L., Tilch, N., 2017. Generating Application-oriented susceptibility maps for shallow landslides understandable to the general public. *Tagungsband des 4th World Landslide Forum*, Ljubljana, S. 869–880.
- Schwarz, L., Tilch, N., 2018. Einfluss unterschiedlicher Prozessdatenquellen (ALS, Luftbild) auf die Modellierung von Prozessdispositionskarten für flachgründige Massenbewegungen im Lockergestein – Fallstudie Bregenzerwald. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 158(1–4), S. 73–103.

- Schweigl, J., Hervás, J., 2009. Landslide mapping in Austria. European Commission Joint Research. JRC Scientific and Technical Reports. Centre Institute for Environment and Sustainability, Luxemburg, 65 S.
- Steger, S., Brenning, A., Bell, R., Petschko, H., Glade, T., 2016. Exploring discrepancies between quantitative validation results and the geomorphic plausibility of statistical landslide susceptibility maps. *Geomorphology*, 262, S. 8–23.
- Steger, S., Glade, T., 2017. The Challenge of »Trivial Areas« in Statistical Landslide Susceptibility Modelling. In: M. Mikos, B. Tiwari, Y. Yin, K. Sassa (Hrsg.), *Advancing Culture of Living with Landslides*. 4th World Landslide Forum (WLF4), Ljubljana, Springer, Cham, S. 803–808.
- Stiny, J. (1938). Über die Regelmäßigkeit der Wiederkehr von Rutschungen, Bergstürzen und Hochwasserschäden in Österreich. *Geologie und Bauwesen*, 2, S. 10–48.
- Stumvoll, M.J., Canli, E., Engels, A., Thiebes, B., Groiss, B., Glade, T., Schweigl, J., Bertagnoli, M., 2019. The »Salcher« landslide observatory – Experimental long-term monitoring setup in the Flysch Zone of Lower Austria. *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*, S. 1–18.
- Supper, R., Baron, I. (Hrsg.), 2010. *Landslide: Monitoring Technologies & Early Warning Systems – Current Research and Perspectives for the Future*. Book of extended abstracts, open workshop in frame of the EU FP7 »Safeland« project, February 24th. *Berichte der Geologischen Bundesanstalt*, 82, 68 S.
- Supper, R., Ottowitz, D., Jochum, B., Kim, J.-H., Römer, A., Baron, I., Pfeilder, S., Lovisolo, M., Gruber, S., Vecchiotti, F., 2014. Geoelectrical monitoring: an innovative method to supplement landslide surveillance and early warning. *Near Surface Geophysics*, 12, S. 133–150.
- Tilch, N., 2009. Gravitative Massenbewegungen in der Katastrophenregion Klingfurth (Walpersbach, Südliches Niederösterreich) im Juni 2009 – Erkundungsergebnisse und eine erste Abschätzung des rutschungsinduzierten Gefahrenpotentials. 11. *Geoforum Umhausen* 15.–16.10.09, Niederthai.
- Tilch, N., 2014. Identifizierung gravitativer Massenbewegungen mittels multitemporaler Luftbildauswertung in Vorarlberg und angrenzender Gebiete. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 154(1–4), S. 21–39.
- Tilch, N., Gruber, A., Schattauer, I., Motschka, K., 2019. Potentiale aerogeophysikalischer Methoden für Fragestellungen im Rahmen der Geologischen Landesaufnahme. In: G.E.U. Griesmeier, C. Iglseider (Hrsg.), *Arbeitstagung 2019 der Geologischen Bundesanstalt – Geologie des Kartenblattes GK25 Radenthein-Ost, Murau* 24.–27. Juni 2019, Tagungsband, *Geologische Bundesanstalt, Wien*, S. 196–202.
- Tilch, N., Haberler, A., Koçiu, A., 2017. Wissenschaftliche Dokumentation von Rutschungen und Hangmuren im Konnex zur Unwetterkatastrophe in Stanz im Mürztal (Steiermark) im Juli 2016. In: I. Wimmer-Frey, A. Römer, C. Janda (Hrsg.), *Arbeitstagung 2017 – Angewandte Geowissenschaften an der Geologischen Bundesanstalt*, 19.–22. Juni 2017, Bad Ischl, Hallstatt, Gmunden, S. 223–224.
- Tilch, N., Kociu, A., Haberler, A., Melzner, S., Schwarz, L., Lotter, M., 2011a. The Data Management System GEORIOS of the Geological Survey of Austria (GBA). In: Moelk et al. (Hrsg.), *Interdisciplinary workshop on rock fall protection 2011*, Innsbruck, S. 31–32.

- Tilch, N., Schwarz, L., Hagen, K., Aust, G., Fromm, R., Herzberger, E., Klebinder, K., Perzl, F., Proske, H., Bauer, Ch., Kornberger, B., Kleb, U., Granica, K., Pistotnik, G., Haiden, Th., 2011b. Modelling of Landslide Susceptibility and affected Areas – Process-specific Validation of Databases, Methods and Results for the Communities of Gasen and Haslau (AdaptSlide). Endbericht des Projektes ADAPTSIDE im Rahmen des EU-Projektes ADAPTALP, Wien/Innsbruck/Graz, 325 S.
- Tilch, N., Schwarz, L., Kociu, A., Proske, H., Bauer, Ch., Hagen, K., Klebinder, K., Lang, E., Andrecs, P., Schmid, F., Ribitsch, R., Hermann, S., Loizenbauer, J., Pistotnik, G., 2015: Gefahrenprävention – von Katastrophen für die Zukunft lernen und Planungsgrundlagen schaffen. In: R. Schuster, T. Ilickovic (Hrsg.), Geologie der Kartenblätter GK50 ÖK 103 Kindberg und ÖK 135 Birkfeld. Tagungsband der Arbeitstagung 2015 der Geologischen Bundesanstalt, Mitterdorf im Mürztal (Stmk), S. 155–160.
- Tilch, N., Schwarz, L., Koçiu, A., Winkler, E., Motschka, K., 2018. Potentiale aerogeophysikalischer Daten hinsichtlich der Modellierung von realitätsnäheren Dispositionskarten für flachgründige Massenbewegungen – eine Fallstudie im Bregenzerwald (Vorarlberg, Österreich). Tagungsband zum 20. Geoforum Umhausen, Niederthai, S. 240–245.
- Tilch, N., Schwarz, L., Winkler, E., 2013. Gefahren(hinweis)karten für gravitative Massenbewegungen – Herausforderungen, Limitierungen, Chancen. Berichte der Geologischen Bundesanstalt, 100, S. 47–53.
- Zettl, H., 1958. Die Unwetterkatastrophe in der Steiermark am 12. und 13. August 1958. Mitteilungsblatt des Hydrographischen Dienstes in Österreich, 23, 17 S.
- Zieher, T., Markart, G., Ottowitz, D., Römer, A., Rutzinger, M., Meißl, G., Geitner, C., 2017. Water content dynamics at plot scale – comparison of time-lapse electrical resistivity tomography monitoring and pore pressure modelling. Journal of Hydrology, 544, S. 195–209.

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

19 Muren

Roland Kaitna, David Prenner und Johannes Hübl*

Zusammenfassung

Murgänge sind Massenverlagerungsprozesse an der Schnittstelle zwischen Rutschungen, Hochwasserereignissen und Bergstürzen, die im Alpenraum meist durch Starkregen oder langanhaltenden Niederschlag ausgelöst werden. Aufgrund der großen Abflussmengen, dem spontanen Auftreten, der hohen Geschwindigkeit und Sedimentkonzentration stellen Muren in besiedelten Gebieten eine erhebliche Gefahr dar. In den Alpen bewegen sich typische Ereignisvolumina zwischen wenigen 1.000 m³ bis zu mehreren 100.000 m³. Aufgrund der eingeschränkten Datenlage sind Ereignisgröße oder Wiederkehrperiode von Extremereignissen in Bezug auf Muren nicht eindeutig zu definieren. Wir gehen davon aus, dass es sich bei extremen Muren entweder um Ereignisse mit außergewöhnlicher Ereignisgröße handelt (vergleichbar mit einem »extremen« Hochwasser, definiert mit einer 300-jährlichen Wiederkehrperiode), oder der eingetretene Schaden infolge von Prozessüberlagerung, Kaskadeneffekten oder Ähnlichem sehr hoch ist. Obwohl die Forschung zu Muren in den letzten Jahrzehnten große Fortschritte gemacht hat, bleibt gerade bei der Vorhersage von extremen Muren eine große Unsicherheit. Auf jeden Fall ist eine weitere Verbesserung des Wissensstandes zum Prozess selbst, aber auch zu Schutzmaßnahmen erstrebenswert.

Abstract

Debris flows are mass wasting processes situated between landslides, rock avalanches, and flood events that typically initiate due to short-duration storm events or long-lasting rainfall. Due to high discharges, high velocities and large content of sediment, debris flows represent a severe hazard for settlements and infrastructure. In alpine regions typical event volumes range from a view 1.000 m³ to several 100.000 m³. Due to limited data, the definition of event magnitude and return period of extreme debris flows is rather ambiguous. Here we consider extreme debris flow as rare events of extraordinary high event magnitudes (comparable to an »extreme« flood event with 300 year return period), or by significant damage due to the superposition of different processes, cascade-effects or

* Roland Kaitna, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren, roland.kaitna@boku.ac.at.

David Prenner, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren, david.prenner@boku.ac.at.

Johannes Hübl, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren, johan.nes.huebl@boku.ac.at.

similar. Although research on debris flows has made great strides in recent decades, there is a great deal of uncertainty surrounding the prediction of extreme mudflows. In any case, a further improvement in the level of knowledge about the process itself, but also on protective measures is desirable.

Kernaussagen

- Muren stellen ein großes Gefahrenpotential in alpinen Regionen dar.
- Extreme Muren sind seltene Ereignisse mit großer Magnitude und/oder hoher Schadenswirkung.
- In den letzten Jahrzehnten ist keine Steigerung der Ereignisrate dokumentierter Muren und Extremereignisse in Österreich zu erkennen.
- Eine Änderung durch eine Veränderung der klimatischen Bedingungen ist nicht ausgeschlossen.
- Datengrundlagen und Modellierungsansätze entsprechen dem Stand-der-Technik, sollten aber laufend verbessert werden.

Key Points

- Debris flows represent a serious hazard in alpine regions.
- Extreme debris flows are rare events with a high event magnitude and/or high degree of damage.
- We find no explicit increase of occurrence rate of documented debris flows and extreme events in Austria within the last decades.
- This may change due to changing climatic conditions.
- Available data and modeling approaches are at the state-of-the-art, but should be continuously improved.

19.1 Definition und Charakteristika

Muren sind Verlagerungsprozesse von Sediment, Wasser und oft auch Wildholz in Wildbacheinzugsgebieten, welche in besiedelten Regionen der Alpen ein erhebliches Gefahrenpotential darstellen. Nach der Klassifikation von Hungr et al. (2001) werden Muren als schnell bis extrem schnell (> 5 m/s) fließende Mischungen von gesättigtem Lockermaterial beschrieben. Abhängig von der Korngrößenverteilung des Sediments und des Wassergehaltes unterscheidet man zwischen Schlammuren (engl. »mudflow«) und granularen Muren (engl. »granular debris flows«). Besondere Charakteristika von Muren sind der oft beobachtete schubweise Abfluss (z. B. Zanuttigh und Lamberti, 2007), eine hohe Feststoffkonzentration an der Front (Pierson, 1986) und der Fließvorgang innerhalb eines Gerinnes. Letzteres unterscheidet Muren von Hangmuren, die keine seitliche Begrenzung des Fließweges zeigen und sich meist aus flächgründigen Rutschungen am Hang entwickeln (Rickenmann, 2014).

Der Spitzenabfluss von Muren kann um ein Vielfaches größer sein als der eines Hochwasserereignisses innerhalb des gleichen Wildbachgerinnes

(Rickenmann, 1999; Pfitscher et al., 2016). In den Alpen liegen diese Abflüsse typischerweise im Bereich von $10 \text{ m}^3/\text{s}$ bis mehrere $100 \text{ m}^3/\text{s}$. Zusammen mit Geschwindigkeiten von meist 5–10 m/s und der hohen Dichte zeichnen sich Muren durch ein hohes Zerstörungspotential für Infrastruktureinrichtungen und Gebäuden (besonders auch Personen in Gebäuden) aus. Gerade die mitgeführten Gesteinsblöcke haben eine hohe zerstörerische Wirkung und sind in der Ingenieurspraxis als Einzellasten mit extrem hoher Energie bei der Bemessung von Schutzbauwerken anzusetzen. Trotz des häufigen Auftretens von Schüben (»pulsierender Murgang«) kann jedoch eine grobe Korrelation zwischen Ereignisvolumen und Spitzenabfluss gefunden werden (Rickenmann, 1999).

In der Literatur werden verschiedene Auslösemechanismen für Muren beschrieben. Die Murmobilisierung kann durch Rutschungsprozesse gesteuert sein, die sich in einen oder mehrere Murschübe entwickeln können (Iverson, 2000; Take et al., 2004). Andererseits können Muren aus Gerinnesediment entstehen (Berti und Simoni, 2005; Theule et al., 2012). Weiters scheinen Muren auch durch kurzzeitigen Aufstau von Sediment (zum Beispiel bei Verklauung durch Wildholz oder bei einem Gefällsknick) und schneller Remobilisierung entstehen (McGuire et al., 2017). Die Entstehung von Muren kann zusätzlich durch tektonische Aktivität (z. B. Dadson et al., 2003), vulkanische Aktivität (z. B. Pierson et al., 1990), von Gletscherseenausbrüchen (GLOFs, z. B. Breien et al., 2008; Schwanghart et al., 2016), oder durch Prozesstransformation aus Fels-Eis Lawinen entstehen (Evans et al., 2009; Huggel et al., 2005). Die tatsächlichen Auslösemechanismen von Muren in Österreich werden meist nur in Einzelfällen, bei einer detaillierten Ereignisdokumentation bestimmt (siehe beschriebene Fallbeispiele).

19.1.1 ONR 24800

Die österreichische Normungsregel 24800 (ONR, 2009) unterscheidet zwischen fluviatilen und murartigen Prozessen. Letztere unterscheiden sich in murartigen Feststofftransport und Murgang. Hier sind Murgänge als »langsam bis schnell fließende Suspension aus Wasser, Feststoffen und Wildholz« definiert, mit einer volumetrischen Feststoffkonzentration (C_v) typischerweise zwischen 0,4 und 0,7; was einer Dichte zwischen 1.700 kg/m^3 und 2.400 kg/m^3 entspricht. Murartiger Feststofftransport kennzeichnet den Übergangsbereich zwischen fluviatilen Feststofftransport und Murgängen und liegt im Bereich von $C_v \sim 0,2\text{--}0,4$. Im Feld bzw. bei der Ereignisdokumentation erfolgt die Unterscheidung anhand der morphologischen Beurteilung der Ablagerung, was besonders beim Übergang zwischen fluviatilem und murartigem Feststofftransport schwierig ist.

19.1.2 Extremereignisse im Zusammenhang mit Muren

In der Ingenieurspraxis werden Naturgefahrenprozesse meist anhand der Beziehung zwischen Magnitude und Frequenz (bzw. Ereignisgröße und Wiederkehrperiode) definiert. Ein Extremereignis ist dementsprechend ein seltenes Ereignis mit einer außergewöhnlich hohen Intensität (meist Volumen [m³] oder Spitzenabfluss [m³/s]). In Anlehnung an ein extremes Hochwasser würde eine extreme Mure einem Ereignis mit einer Wiederkehrperiode von 300 Jahren entsprechen. Dieser *Prozess-basierte Ansatz* ist allerdings aufgrund der schwachen statistischen Aussagekraft der vorhandenen Daten mit großen Unsicherheiten verbunden und wird in der Praxis in Österreich (z. B. in der Gefahrenzonenplanung) derzeit nicht verwendet.

Ein *Auswirkungs-basierter* (Risiko-basierter) Ansatz zur Bewertung von extremen Muren wäre eine Bewertung aufgrund des aufgetretenen Schadens, der ökonomischen Folgen, der Anzahl der Betroffenen und/oder der Möglichkeit einer Gemeinde oder Region im Ereignisfall ohne Hilfe von außen das Ereignis zu bewältigen. Wenn die Größe des Schadens in den Mittelpunkt gestellt wird, kann eine extreme Mure auch eine kleinere Ereignisgröße mit einer kürzeren Wiederkehrdauer haben. Das ist meist dann der Fall, wenn sich verschiedene Ereignisse überlagern (z. B. Vorverfüllung eines Geschieberückhaltebereichs durch Feststofftransport und anschließender Murgang), oder wenn Kaskadeneffekte auftreten (z. B. Unterbrechung einer Infrastruktureinrichtung durch eine Mure).

In vielen Fällen wird die Bewertung von *Extremereignissen* in Bezug auf Muren eine Kombination von beiden Ansätzen beinhalten. Im Folgenden skizzieren wir die historische Entwicklung von Muren, die als extrem eingestuft wurden und fassen verschiedene Fallbeispiele zusammen.

19.2 Historische Entwicklung

In den Alpen wurden Murgangvolumina meist zwischen wenigen 1.000 m³ und mehreren 10.000 m³ beobachtet. Ereignisse mit über 100.000 m³ sind eher außergewöhnlich und können wahrscheinlich als *Extremereignisse* bewertet werden. Wie im Kapitel 19.1.2 argumentiert, können allerdings auch Ereignisse von wenigen 10.000 m³ in manchen Einzugsgebieten Extremereignisse darstellen.

Ein Versuch der Quantifizierung von extremen Muren ermöglicht die Ereignisdatenbank des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinverbauung (WLV). In dieser Datenbank wurden historische Informationen über Wildbachereignisse inklusive Muren innerhalb der letzten Jahrhunderte flächendeckend für ganz Österreich gesammelt (Hübl et al., 2009). Wichtig zu

erwähnen ist, dass die Datenbank sich nur auf Schadereignisse bezieht, d. h. auf Muren, die einen Schaden verursacht haben und von einer Beobachterin/einem Beobachter dokumentiert wurden, was meist in Bereichen mit Besiedelung oder Infrastruktureinrichtungen der Fall ist. Es ist daher davon auszugehen, dass die Ereignisdatenbank heterogen und nicht komplett ist. Für besiedelte Gebiete ist der Datensatz ab dem Jahr 1945 aussagekräftig (Heiser et al., 2019). Außerhalb dieser Bereiche, im sogenannten Naturraum, ist eine Beurteilung aufgrund fehlender Daten oder Zugänglichkeit sehr schwierig.

Auf dem Bundesgebiet von Österreich wurden seit dem Jahr 1800 rund 5.000 Murgänge registriert, von denen etwa 3.700 Ereignisse eine subjektive Intensitätsangabe (*gering, mittel, stark und extrem*) haben. Davon sind 230 Ereignisse als *extrem* bewertet worden. Abbildung 01a zeigt die zeitliche Entwicklung sowie die Ereignisrate der dokumentierten Muren. Die Ereignisrate wird als Anzahl der Ereignisse pro Jahr dividiert durch Gesamtzahl der Ereignisse gerechnet. Die Linien stellen ein gleitendes Mittel mit einer Fenstergröße von 10 Jahren dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Ereignisrate im Verlauf der letzten zwei Jahrhunderte zugenommen und danach wieder abgenommen hat. Der Anstieg bis zur Mitte des 20. Jahrhunderts ist sicherlich mit der immer konsequenteren Dokumentation der Murgangereignisse durch die WLW zu erklären und muss nicht notwendigerweise einen Anstieg der tatsächlichen Aktivität entsprechen. Der markante Peak in den 1960er Jahren spiegelt die außergewöhnlich feuchten Wetterlagen im Herbst der Jahre 1965 und 1966 wieder, die zu zahlreichen Hochwasser- und Murgangereignissen vor allem in Kärnten und Osttirol geführt haben. In den letzten Jahrzehnten lässt sich kein Anstieg der dokumentierten Murgangereignisse in Österreich feststellen. Extreme Muren wurden vor allem am Ende des 19. Jahrhunderts und in den 1960er Jahren dokumentiert. In Abbildung 01b ist die mittlere Intensität der Ereignisse pro Jahr seit 1800 zu sehen. In der ersten Hälfte des 19. Jahrhunderts wurden wenige und meist große Ereignisse dokumentiert, was sich in einer hohen mittleren Intensität pro Jahr widerspiegelt. Im Verlauf des 20. Jahrhunderts wurden immer mehr Muren dokumentiert, auch kleine Ereignisse. Dadurch sinkt die mittlere Intensität pro Jahr. Wichtig zu betonen ist aber, dass diese Daten nicht unbedingt den Verlauf der natürlichen, ungestörten Aktivität von Muren in Österreich darstellen, sondern stark von geänderten Siedlungsraum, der Beobachtung (inklusive der subjektiven Wahrnehmung) und dem Effekt von Schutzmaßnahmen beeinflusst sind.

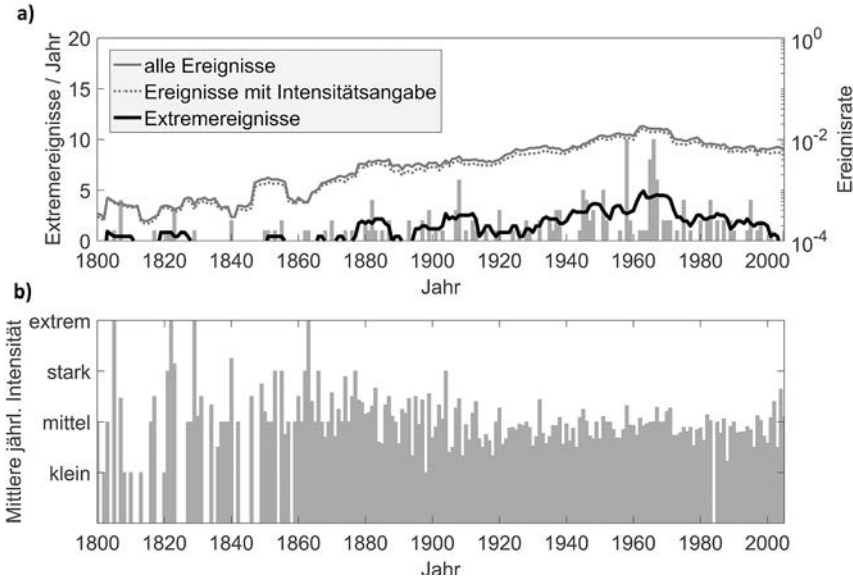


Abbildung 01: Historische Entwicklung dokumentierter Murgangereignisse in Österreich zwischen 1800 und 2005 (a). Die Intensitätsangaben (b) beziehen sich auf der Einteilung in der Ereignisdatenbank des Forsttechnischen Diensts für Wildbach- und Lawinenverbauung.

Figure 01: Historical development of documented debris flow events in Austria between 1800 and 2005 (a). The given intensities (b) follow the classification given by the Austrian Forest Service for Torrent and Avalanche Control.

Datenquelle: Ereignisdatenbank WLW

19.3 Fallbeispiele

Weltweit ist es in den letzten Jahrzehnten zu mehreren extremen Murgangereignissen gekommen. Zu erwähnen sind sicherlich die katastrophalen Muren am Huascarán in Peru (Evans et al., 2009) und Kolka/Karmadon im russischen Kaukasus (Huggel et al., 2005), die sich in Folge einer Prozesstransformation (Schmelzen von Eis und Schnee) aus großen Fels-/Eislawinen entwickelt haben und mehrere tausend Todesopfer gefordert haben. Auch die hohe Anzahl von Muren nach Erdbeben stellen außergewöhnliche und fatale Katastrophen dar, wie nach dem Chi-Chi Erdbeben in Taiwan (z. B. Lin et al., 2004).

Ein Beispiel von extremen Muren in den Alpen sind der Murgang von Stože, Slowenien (Mikoš et al., 2004), der sich aus einer großen Rutschmasse gebildet hat, oder die Mure nach dem Bergsturz vom Piz Cengalo, in Bondo, Schweiz (Baer et al., 2017).

Historisch gab es in Österreich eine Reihe von extremen Murgangereignissen mit teilweise katastrophalen Folgen für die lokale Bevölkerung. Der Murgang am

Rastötzenbach vom 14. Juni 1569 zerstörte im Markt Hofgastein 52 Häuser und kostete 147 Menschen das Leben (Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, 2009). Als rezente Beispiele von extremen Muren in Österreich können wahrscheinlich die Ereignisse am Schallerbach (See in Tirol), Lorenzerbach (St. Lorenzen im Paltental), Tronitzerbach (Afritz am See) oder die Mure vom Sattelkar im Obersulzbachtal (Neukirchen am Großvenediger) bewertet werden, die im Folgenden kurz beschrieben werden.

19.3.1 Schallerbach (See in Tirol)

In der Nacht vom 07. zum 08. Juni 2015 ereignete sich ein außergewöhnliches Murgangereignis am Schallerbach in der Gemeinde See/Tirol (Hübl et al., 2016). Der Auslöser war ein intensiver Niederschlag mit einer rekonstruierten Intensität von rund 50 mm innerhalb von sechs Stunden. Durch eine intensive Schneeschmelze und gewittrigen Niederschlägen an den zwei Vortagen war das Einzugsgebiet hydrologisch vorbelastet. Infolge des stark Geschiebe-belasteten Abflusses wurde das Rückhaltebecken oberhalb des Ortes bis zu den Sperrenflügel verfüllt. Anschließend kam es zu einem großen und mehreren kleinen Murschüben, die anfänglich die Sperre überflossen und in den Vorfluter abgeleitet wurden. Der nachfolgende Abfluss erodierte den orographisch linken Teil des Erddamms der Sperre, was zu einer massiven Verschotterung der Ortsteile Gries und Elis führte. Insgesamt wurden rund 126.000 m³ Lockermaterial im Einzugsgebiet mobilisiert und etwa 60.000 m³ im Siedlungsraum abgelagert. Neben Schäden an Infrastruktur und Umweltschäden durch ausgetretene Betriebsmittel, wurden bei dem Ereignis 70 Gebäude beschädigt und vier weitere zerstört (Abbildung 02). Obwohl der einzelne Murschub etwa der Größenordnung des Bemessungereignisses entsprach, kann durch die Prozessüberlagerung und dem eingetretenen Schaden dieses Ereignis als extrem betrachtet werden.

19.3.2 Lorenzerbach (St. Lorenzen im Paltental)

Am Morgen des 21. Juli 2012 kam es im Lorenzerbach zu einem Murenabgang, der im Gemeindegebiet von St. Lorenzen im Paltental großflächige Vermurungen und Schäden zur Folge hatte (Hübl et al., 2012). Der Auslöser für den Murgang war eine Kaltfront mit intensiven Niederschlägen von 100–120 mm innerhalb von 24 Stunden, mit sehr feuchten Vorbedingungen. Der rekonstruierte Spitzenabfluss erreichte mit 500–800 m³/s ein Vielfaches des abgeschätzten Bemessungsabflusses für Reinwasser (HQ₁₅₀) von 34 m³/s und dürfte ursächlich mit einer Verklausung durch eine Rutschung im Oberlauf des Lorenzerbaches



Abbildung 02: Ablagerungen des Schallerbachs in der Gemeinde See in Tirol.

Figure 02: Deposits of the Schaller creek in the community See in Tyrol.

Quelle: WLV Tirol

zusammenhängen. Insgesamt wurden 67 Gebäude beschädigt, davon sieben komplett zerstört.

19.3.3 Tronitzerbach (Afritz am See)

Das Einzugsgebiet des Tronitzerbachs in der Gemeinde Afritz am See, Kärnten, hat eine Fläche von 1,99 km² und erstreckt sich zwischen 720 m und 1.844 m ü.A. In diesem bewaldeten Einzugsgebiet kam es am 29. August zu einem großen und mehreren kleinen Murschüben mit einem Gesamtvolumen von 25–30.000 m³ (Hübl et al., 2016). Sediment und Wildholz lagerten sich am Schwemmkegel ab und führten zu großen Schäden vor allem im Ortsteil Krah (Abbildung 03). Der Auslöser war Starkniederschlag mit Regenmengen von bis zu 35 mm in 90 Minuten. Noch während der Arbeiten zur Ereignisbewältigung kam es am 04. September 2016 zu einer weiteren Mure. Durch die instabilen Einhänge in Folge des ersten Murganges konnten wiederum etwa 30–35.000 m³ Sediment und Wildholz entlang des Bachlaufes mobilisiert werden, die nachmals den betroffenen Ortsteil vermurten. Auch hier war mit rund 50 mm in 135 Minuten

ein Starkniederschlag der Auslöser. Durch eine rechtzeitige Evakuierung kam es zu keinen Personenschäden. Obwohl beide Niederschlagsereignisse als 2- bis 10-jährliche Ereignisse einzustufen sind, kann durch die kurze Abfolge und Beeinflussung der zweiten Mure durch die erste und den damit verbundenen Schäden von einem Extremereignis gesprochen werden.



Abbildung 03: Ablagerungen am Schwemmkegel des Tronitzerbachs, Gemeinde Afritz am See.
Figure 03: Debris flow deposits on the fan of the Tronitzer creek, community Afritz am See.
Quelle: GLB Kärnten Nordost, WLV

19.3.4 Sattelkar, Obersulzbachtal (Neukirchen am Grossvenediger)

In der Nacht von 30. auf den 31. Juli 2014 führten anhaltende und ergiebige Niederschläge zu Massenverlagerungsprozessen in den Oberpinzgauer Achen-tälern. Außergewöhnlich war der Murenabgang aus dem Sattelkar ($\sim 0,4 \text{ km}^2$), dessen unbedeutendes Gerinne ein rechtsufriger Zubringer des Obersulzbaches ist. Die Ablagerungen dieses Murgangs verlegten den Obersulzbach kurzzeitig (Abbildung 04). Eine Bestimmung des Sedimentbudgets anhand eines DEM-Differenzenmodells ergab, dass insgesamt rund 170.000 m^3 Material im Talboden des Obersulzbachtals abgelagert wurden. Davon stammten etwa 70.000 m^3 aus dem Einzugsgebiet oberhalb der Karschwelle auf 2.000 m ü.A. und 100.000 m^3 wurden durch Erosion des Lockermaterials am Hang mobilisiert.

Zwei Aspekte sind hier besonders hervorzuheben: Zum einen die rezente morphologische Dynamik im Sattelkar, die möglicherweise mit peri-glazialen Prozessen in Zusammenhang steht (siehe Beitrag 21 zu *Permafrostgefahren*), und zum andern die extreme Erosionsleistung im Gerinne. Aus einer Länge von mehr als 200 m wurde eine Eintiefung von mindestens 10 m erreicht. Die maximale Eintiefung betrug 14 m. Berechnet man eine mittlere Abtragsfläche aus mehreren Querprofilen, lässt sich eine Erosionsleistung von rund 300 m³ pro Laufmeter ermitteln.



Abbildung 04: Ablagerung der Mure aus dem Sattelkar im Obersulzbachtal.

Figure 04: Deposition of the debris flow from the Sattelkar.

Quelle: L. Fegerl, Landesgeologischer Dienst Salzburg

19.4 Einschätzung des Sachstandes

19.4.1 Auftreten von Muren

Das Auftreten von Muren ist von einer kritischen Kombination von ausreichend Lockermaterial, Wasser und Neigung abhängig (Rickenmann, 2014). Diese Bedingungen werden in den österreichischen Alpen häufig erreicht, wobei das Wasser zur Ereignisauslösung in den meisten Fällen vom Niederschlag, seltener aus Schneeschmelze, stammt. Eine detaillierte Studie über die hydro-meteoro-

logischen Auslösebedingungen von Muren in unterschiedlichen Regionen in Österreich zeigte, dass etwa 50–70 % der Muren von kurzen, intensiven Gewitterniederschlägen und 20–44 % von langanhaltenden Niederschlag ausgelöst wurden. In bis zu 15 % war Schneeschmelze von großer Bedeutung (Prenner et al., 2019, Abbildung 05). Bei vielen Murgangereignissen wird auch Hagel beobachtet, wobei dessen Bedeutung für die Auslösung bisher nicht geklärt ist.

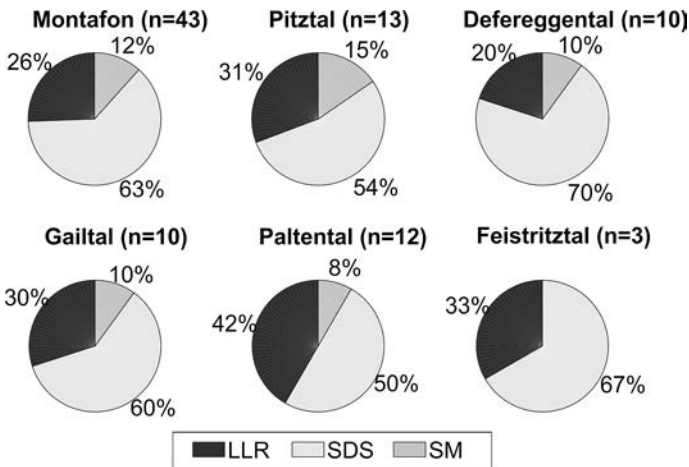


Abbildung 05: Vereinfachte meteorologische Auslösetypen für Muren in verschiedenen Regionen Österreichs. LLR = langanhaltender Niederschlag (long-lasting rainfall), SDS = Gewitter (short-duration storm), SM = Schneeschmelze (snow melt).

Figure 05: Simplified meteorological trigger types for debris flows in different regions in Austria. LLR = long-duration rainfall, SDS = short-duration storm, SM = snow melt.

Quelle: Kaitna et al.; Daten basieren auf einer Studie von Prenner et al., 2019

Zur Vorhersage von Muren werden oft kritische Niederschlagsbedingungen gesucht, meist in der Form einer Grenzbedingung von Intensität und Dauerstufe (I-D Kurven). Einen Überblick über I-D Kurven in verschiedenen Regionen der Welt findet sich bei Guzzetti et al. (2008). Die Verlässlichkeit solcher Grenzwertkurven und auch die Übertragbarkeit zwischen Regionen ist derzeit wenig zufriedenstellend und daher werden I-D Kurven in der Praxis selten verwendet. Ein alternativer Ansatz versucht auf Basis des Vergleichs von Muren-auslösenden-Niederschlägen und Muren-nicht-auslösenden-Niederschlägen Auslöse-Wahrscheinlichkeit zu bestimmen (Berti et al., 2012), die wiederum in der Vorwarnung verwendet werden können. Für Österreich hat es bisher nur lokale Auswertungen von ereignisauslösenden Niederschlägen gegeben (z. B. Moser und Hohensinn, 1983; Projekt MUWA von ZAMG/BFW). Eine systematische Aufarbeitung für dokumentierten Muren ist erst seit Kurzem verfügbar (Braun und Kaitna, 2016; Enigl et al., 2019) und muss in der Praxis noch getestet

werden. Die oft eingeschränkte Praxistauglichkeit der genannten Methoden liegt hauptsächlich an der unzureichenden Erfassung von Niederschlägen, da diese oft räumlich und zeitlich sehr stark variieren. Nikolopoulos et al. (2014) führt vor allem kleinräumige aber kurze und intensive Niederschlagsereignisse an, die hohe Unsicherheiten in die Erstellung von I-D Kurven als auch in die Gefahrenbewertung bringen. Selbst das relativ dichte Messnetz von Niederschlagsstationen im Alpenraum mit einem Abstand von rund 10 km (Borga et al., 2014) ist dabei oft unzureichend, um kleinräumige (konvektive) Niederschlagsereignisse aufzuzeichnen, die für etwa 2/3 der Muren in Österreich auslösend sind (Prenner et al., 2019). Auch alternative, flächige Methoden mittels Satelliten, Wetterradar oder Mobilfunknetzen stellen zurzeit noch keine ausreichende Verbesserung für die Muren-Vorhersage im Vergleich zu klassischen Stationsmessungen dar (Llasat et al., 2005; Leijnse et al., 2007; Marra et al., 2014; Devoli et al., 2015; Salio et al., 2015). Maßgeblich sind auch die Unsicherheiten bei Verwendung von Tagessummen für die Erstellung von Grenzwertkurven/-wahrscheinlichkeiten. Laut Peres et al. (2018) werden die Summen nicht idealerweise zwischen 0:00–23:59 Uhr gebildet, sondern je nach Betreiber unterschiedlich (z. B. ZAMG und HD jeweils um 07:00 Uhr, die italienische Annali Idrologici jeweils um 9:00).

Da das Auftreten von Muren in alpinen Regionen weder durch regionale noch durch lokale Niederschlagsgrenzwerte exakt vorhersagbar ist, wird oft das Dispositionskonzept nach Kienholz (1995) verwendet. Danach tritt ein Murgang nur in Einzugsgebieten mit einer gewissen Grunddisposition (z. B. Reliefenergie) auf. In weiterer Folge bestimmt das Zusammenspiel von variabler Disposition und einem direktem Auslöser (meist Niederschlag) das Auftreten eines Murgangs. Bei der variablen Disposition kann es sich zum Beispiel um periodische Änderung der Sedimentverfügbarkeit (saisonal oder abhängig von Verwitterung und Prozesshäufigkeit) oder von der hydrologischen Gegebenheiten im Einzugsgebiet handeln. Abbildung 06 zeigt am Beispiel einer rezenten Studie für das Pitztal, Tirol, wie die regionale Murgang Wahrscheinlichkeit von hydrologischen Vorbedingungen wie der Schneeschmelze und der Bodenfeuchte abhängt (Mostbauer et al., 2018). Hohe Auslösewahrscheinlichkeiten ergeben sich im Frühjahr bei einer Kombination von Schneeschmelze und hoher Bodenfeuchte, wobei nur moderate auslösende Niederschläge gemessen wurden. Die höchsten Wahrscheinlichkeiten zeigen sich wie erwartet bei sehr intensiven, teilweise konvektiven Niederschlägen, wobei hier die Vorfeuchte und die Schneeschmelze eine geringe Rolle spielen. Wir interpretieren diese Resultate dahingehend, dass extreme Muren nicht notwendigerweise mit extremen Niederschlägen verbunden sein müssen, sondern bei besonders ungünstigen Vorbedingungen auch von moderaten Niederschlägen ausgelöst werden können.

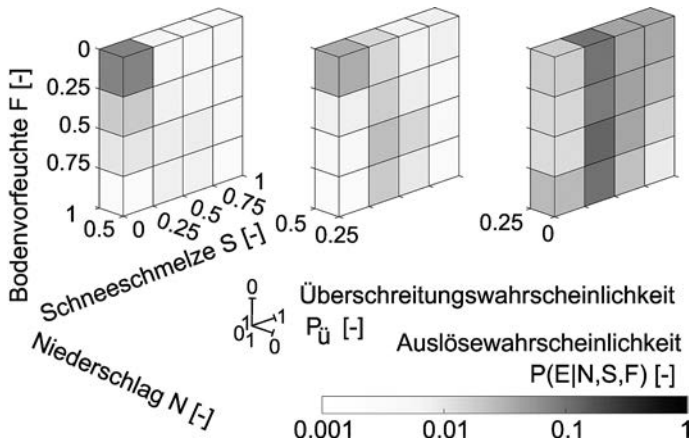


Abbildung 06: Murgang Wahrscheinlichkeit in Abhängigkeit von Bodenfeuchte, Schneeschmelze und Niederschlag in der Region Pitztal.

Figure 06: Debris flow occurrence probability conditional to soil moisture, snowmelt, and rainfall for the Pitztal region.

Quelle: modifiziert nach Mostbauer et al., 2018

19.4.2 Gefahrenanalyse Muren

Wie Rickenmann (2014) ausführt, sind die wichtigsten Punkte der Gefahrenanalyse das Erkennen der Murfähigkeit eines Wildbaches, sowie die Abschätzung der Ereignisgröße und der gefährdeten Flächen im Ablagerungsbereich. Die Murfähigkeit eines Baches wird meist über das Gefälle ($> 25\text{--}30\%$), Sedimentpotential, dem Vorhandensein von »Stummen Zeugen« (Aulitzky, 1992) und anhand geomorphologischer Kenngrößen bestimmt. Die genaue Bestimmung des zu erwartenden Ereignisvolumens ist schwierig und erfolgt meist aus einer Kombination von rückwärts gerichteter Indikation (was geschah in der Vergangenheit?) und vorwärts gerichteter Indikation (Feldaufnahmen möglicher Sedimentquellen).

Für die Modellierung der Fließdynamik und der gefährdeten Flächen im Ablagerungsbereich wird immer häufiger auf numerische Simulationsprogramme gesetzt. Diese Simulationsprogramme verwenden tiefengemittelten Flachwassergleichungen und basieren auf der Annahme, dass Muren sich als äquivalente Flüssigkeit darstellen lassen. Diese Annahme sollte in der Interpretation der Ergebnisse Berücksichtigung finden. Der Fließwiderstand kann durch konzeptionelle oder rheologische Ansätze beschrieben werden (*Modellparameter*). Neuere Ansätze betrachten Muren als 2-Phasen Gemische, wobei die feste Phase (das Sediment) und die flüssige Phase (Wasser oder eine homogene

Mischung von Feinsediment und Wasser), sowie deren Interaktionen, getrennt modelliert werden (z. B. Iverson und George, 2014; Mergili et al., 2017). Wichtig für eine realistische Modellierung ist die Wahl der Modellparameter, die am besten durch Rückrechnung von gut dokumentierten Ereignissen erfolgt. In der Realität können sich Modellparameter entlang des Fließweges ändern und müssen nicht konstant für alle Muren in einem Einzugsgebiet oder in einer Region sein.

Neben der Wahl der Modellparameter liegt die Hauptproblematik bei jeder Modellierung in der Einschätzung der Ausgangslage. Wo beginnt der Murgang? Mit welcher Ganglinie ist zu rechnen? Gibt es einen Murschub oder mehrere? In der Praxis ist es daher wichtig, durch Szenarien-Bildung eine Bandbreite realistischer Gefährdungssituationen zu identifizieren. Bei der Szenarien-Bildung könnten Extremereignisse als Ereignisse außergewöhnlicher Magnitude (z. B. + 50 % Volumen) oder als Kombination von ungünstigen Ausgangsbedingungen abgebildet werden (z. B. zweiter Murgang nach einem Bemessungs-Murgang) und so als Restrisiko dargestellt werden.

Es gibt verschiedene Prozesse, die typischerweise mit Murgängen verbunden sind und von denen erwartet wird, dass sie das Fließ- und Ablagerungsverhalten maßgeblich beeinflussen. Diese sekundären Prozesse umfassen die Entwicklung von Schüben (Roll-Wellen), Levée-Bildung (selbst-induzierte Kanalisierung), oder Korngrößensegregation, die zu inverser Sortierung und der Ausbildung einer granularen Murenfront führen kann. Der Effekt von Wildholz und kurzzeitiger Verklausung kann hier auch eine Rolle spielen. In der Praxis werden diese Prozesse von Muren-Simulationsmodellen bisher nicht berücksichtigt.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass es mittlerweile eine recht gute Datenbasis zu Volumen und Ablagerungsflächen von Murgangereignissen gibt, die gemäß den Richtlinien zur Ereignisdokumentation laufend aktualisiert werden sollten. Durch das relative dichte Messnetz sowie neuer Methoden der Fernerkundung sind Daten zu auslösenden Niederschlägen im internationalen Vergleich regional überdurchschnittlich gut vorhanden. Da jedoch die Prozesse in Wildbacheinzugsgebieten auf sehr kleiner räumlicher und zeitlicher Skala ablaufen, ist trotzdem eine ständige Verbesserung anzustreben. Die derzeitigen eingesetzten Modellierungsansätze sind auf dem Stand-der-Technik, allerdings gibt es noch viele Unsicherheit in der Bestimmung der Eingangsparameter der Modelle, da nur in wenigen Einzugsgebieten die relevanten Material- und Fließparameter erfasst werden. Durch die Komplexität in der Prozessentstehung und -dynamik basieren diese Simulationsmodelle allerdings auf starken Vereinfachung und könnten durch ein besseres Prozessverständnis verbessert werden.

19.5 Mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen

19.5.1 Entwicklungen Naturraum

Neben der *Grunddisposition* eines Einzugsgebietes (z. B. Reliefenergie) und variabler *Disposition* (z. B. saisonale Veränderungen der Geschiebefüchtigkeit) bestimmt im österreichischen Alpenraum der Regeninput, seien es konvektive oder advektive Niederschläge, das Prozessverhalten. Es ist daher zu erwarten, dass Änderungen des Klimasystems (vor allem Temperatur, Niederschlag) auch Änderungen der Häufigkeit und Magnitude von Muren mit sich führen. Die Prognose des zukünftigen Niederschlags mit einer hohen zeitlichen Auflösung (sub-Tagesbasis), und im Besonderen von konvektiven Niederschlägen, stellt die Klimaforschung derzeit noch vor eine große Herausforderung (Gobiet et al., 2013). Die Änderung der Disposition ist ebenso schwer zu quantifizieren. Die qualitativen Argumente unterscheiden meist zwischen kurzfristigen Änderungen in Wildbacheinzugsgebieten (höhere Temperaturen, frühere Schneeschmelze) und verzögerten Effekten (Auftauen von Permafrost, Sedimentfreilegung durch Gletscherrückgang, Frost-Tau Wechsel in höheren Regionen). Eine Zusammenstellung möglicher Effekte findet sich zum Beispiel bei Jomelli et al., (2006), Keiler et al., (2010), oder Stoffel und Huggel (2012).

Da das Klima in Österreich von unterschiedlichen Einflüssen geprägt ist (Auer, 2001) ist es denkbar, dass die Veränderung regional unterschiedlich ausfallen kann. Beniston (2006) erwartet für die Schweizer Alpen eine Verlagerung der Niederschläge von den Sommermonaten ins Frühjahr und den Winter. Da diese beiden Saisonen auch zukünftig kälter wären als die heutigen Sommer, ist mit mehr Schneefall in hochalpinen Lagen zu rechnen. Die Niederschlagshäufigkeit im Sommer wäre zwar geringer, die dabei auftretenden Intensitäten blieben aber zumindest genauso heftig wie heute. Stoffel et al. (2014) schlussfolgern, dass sich aufgrund potentiell häufiger Regen-auf-Schnee Ereignissen, die Murgang-Saison zukünftig auf die Monate März bis Dezember erweitert. Ähnliches wird auch von einer rezenten Studie von Prenner (2018) für Österreich bestätigt. In Bezug auf die verfügbaren Sedimentvolumina sind extremere Ereignisse erwartbar – vor allem gegen Saisonende. Einerseits ermöglichen die geringer werdenden, intensiven Sommerniederschläge eine größere Sedimentakkumulation im Gerinne (Lugon und Stoffel 2010; Stoffel et al., 2011) und andererseits vergrößert sich das verfügbare Sedimentvolumen durch das Auftauen von Permafrostboden über den Sommer, sofern ein solcher im Einzugsgebiet vorhanden ist (Stoffel et al., 2014; Kaitna und Huber, 2017). Da Extremereignisse oft als Folge eines ungewöhnlichen Zusammentreffens ver-

schiedener Prozesse im Einzugsgebiet auftreten, könnten bei einer Änderung eines stabilen Systems vermehrt außergewöhnliche Ereignisse auftreten.

19.5.2 Entwicklungen Lebensraum

Wie in den letzten Jahrzehnten beobachtet ist mit steigenden Siedlungsdruck zu rechnen, was zu einer Erhöhung des Murenrisikos führen kann. Aufgrund von unterschiedlichen Nutzungsinteressen werden derartige Ereignisse oft auch intensiver wahrgenommen. Die Betrachtung der Geländemorphologie kann auf intensive Murgänge aus der Vergangenheit hindeuten, wobei solche Ereignisse heute aufgrund intensiver Besiedelung und Nutzung des Naturraums meist als besondere Gefahr gesehen und dann oftmals als »Extrem« eingestuft werden. Während z. B. früher in Kellern meist nur geringwertige Güter gelagert waren, sind heute wertvolle Einrichtungen situiert, die natürlich auch einen großen Schaden im Ereignisfall nach sich ziehen. Früher wurden Siedlungen teilweise aufgegeben (z. B. Umhausen im Ötztal), was heute eher kaum umsetzbar erscheint. Aussagen zur möglichen Entwicklung des Lebensraums sind in Glade et al. (2014) zu finden.

19.6 Perspektiven für Handlungsoptionen

19.6.1 Analyse

Um fundierte Aussagen über zukünftige Murgangereignisse zu treffen, ist es essentiell aus Vergangenheit und aktuellen Ereignissen zu lernen. Hierfür spielt die Dokumentation und das Monitoring von Muren eine große Rolle. Extremereignissen muss dabei besonderes Augenmerk geschenkt werden, zum einen weil es seltene Ereignisse sind, und zum anderen, weil extreme Schadereignisse meist durch ungewöhnliche Umstände, wie Prozessüberlagerung oder Kaskadeneffekte, ausgelöst werden (siehe Definition von extremen Muren in Kapitel 19.1.2).

In diesem Zusammenhang wäre es günstig, die hydro-meteorologischen Bedingungen in Kombination mit dem jeweiligen Auslösemechanismus von Muren besser zu verstehen, was der Modellierung zukünftiger Ereignisse direkt zugutekommt. Dazu sind Untersuchungen der Entstehungszone nötig. Besonders stellt sich die Frage der Feststoff-Mobilisierung im Zusammenspiel mit der Bodenfeuchte, die selten in Wildbacheinzugsgebieten gemessen wird. Ebenso wurde die Erosion im Gerinne bisher wenig untersucht. In höheren Lagen spielen unter Umständen die freigewordenen Flächen durch den Gletscher-

rückgang und dem Auftauen von Permafrost eine Rolle. Neue Möglichkeiten der Niederschlagsaufzeichnung und -prognose werden voraussichtlich eine probabilistische, regionale Murenwarnung ermöglichen. Extremereignisse vorherzusagen wird schwierig bleiben.

19.6.2 Schutzmaßnahmen

Für eine weitere Verbesserung zum Schutz vor Muren ist die Weiterentwicklung von neuen und Überprüfung von vorhandenen Schutzmaßnahmen nötig. Dort wo als Leitprozess Muren festgelegt sind, ist zu überprüfen, ob die Bemessungsgrößen dem derzeitigen Stand der Technik entsprechen. In Bezug auf den Überlastfall ist zu prüfen, ob die Standsicherheit gegeben ist. In gewissen Fällen wäre wahrscheinlich auch eine Neubeurteilung der Bemessungsgrößen aufgrund Änderungen im Einzugsgebiet wünschenswert.

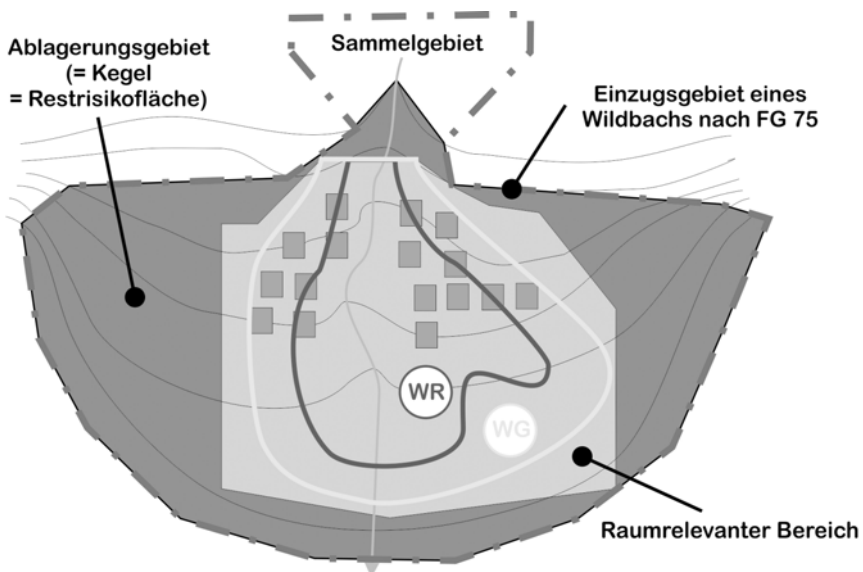


Abbildung 07: Ablagerungskegel eines Wildbachs als Teil des Einzugsgebiets, ausgewiesen als Restrisikofläche.

Figure 07: The fan of a torrent as part of the watershed represents the area of residual risk.
Quelle: Kaitna et al.

Die Eigenvorsorge zum Schutz vor Muren wird eher nur im distalen Ablagerungsbereich relevant, da im proximalen Bereich mit sehr hohen Einwirkungskräften zu rechnen ist. In diesem Bereich ist eher eine Aussiedelung rat-

sam. Hinsichtlich Extremereignissen sind Eigenvorsorgemaßnahmen mit sehr großen Kosten verbunden und daher eher nicht realisierbar.

Um die Funktion von Schutzmaßnahmen im Kegelbereich zu gewährleisten, wäre es sinnvoll für das Gerinne mehr Platz zur Verfügung zu stellen (etwa ein Betreuungstreifen, oder Sicherheitstreifen entlang des Gerinnes). Das würde den verantwortlichen Ingenieuren einen höheren Handlungsspielraum für zukünftige Maßnahmen oder zur Bewältigung von Extremereignissen geben. Ein weiterer Vorschlag wäre den gesamten potentiellen Ablagerungsraum der Wildbäche (d. h. gesamter Kegel), wie im Forstgesetz definiert, auch als Wildbach Einzugsgebiet abzugrenzen (Abbildung 07). Dieser Bereich könnte unabhängig von der Abgrenzung der Gefahrenzonen als Restrisikobereich definiert werden, was vor allem für Extremereignisse relevant wäre.

Danksagung

Wir möchten uns bei Dr. Markus Stoffel und einem unbekanntem Reviewer für die konstruktiven Kommentare bedanken.

Literatur

- Auer, I., 2001. Die Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik 1851–2001. Öklim, digitaler Klimaatlas Österreichs: eine interaktive Reise durch die Vergangenheit, Gegenwart und Zukunft des Klimas. Leykam, CD-ROM. <https://books.google.at/books?id=OKOiDAEACAAJ>.
- Aulitzky, H., 1992. Die Sprache der Stummen Zeugen. International Conference Interpraevent Bern, 6, S. 139–174.
- Baer, P., Huggel, C., McArdell, B.W., Frank, F., 2017. Changing debris flow activity after sudden sediment input: a case study from the Swiss Alps. *Geology Today*, 33(6), S 216–223.
- Beniston, M., 2006. August 2005 intense rainfall event in Switzerland: Not necessarily an analog for strong convective events in a greenhouse climate. *Geophysical Research Letters*, 33(5), L05701. <https://doi.org/10.1029/2005GL025573>.
- Berti, M., Martina, M., Franceschini, S., Pignone, S., Simoni, A., Pizziolo, M., 2012. Probabilistic rainfall thresholds for landslide occurrence using a Bayesian approach. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 117, F04006. DOI: 10.1029/2012JF002367.
- Berti, M., Simoni, A., 2005. Experimental evidences and numerical modelling of debris flow initiated by channel runoff. *Landslides*, 2, S. 171–182. DOI: 10.1007/s10346-005-0062-4.

- Borga, M., Stoffel, M., Marchi, L., Marra, F., Jakob, M., 2014. Hydrogeomorphic response to extreme rainfall in headwater systems: Flash floods and debris flows. *Journal of Hydrology*, 518, S. 194–205. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.05.022.
- Braun, M., Kaitna, R., 2016. Analysis of meteorological trigger conditions for debris flows on a daily time scale. In: S.A. Makarov, J.V. Atutova, A.I. Shekhovtsov (Hrsg.), *Fourth International Conference – Debris flows: risks, forecast, protection*. Publishing House of Sochava, Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, Russland.
- Breien, H., Blasio, F.V. de, Elverhøi, A., Høeg, K., 2008. Erosion and morphology of a debris flow caused by a glacial lake outburst flood, Western Norway. *Landslides*, 5, S. 271–280. DOI: 10.1007/s10346-008-0118-3.
- Dadson, S.J., Hovius, N., Chen, H., Dade, W.B., Hsieh, M.-L., Willett, S.D., Hu, J.-C., Horng, M.-J., Chen, M.-C., Stark, C.P., Lague, D., Lin, J.C., 2003. Links between erosion, runoff variability and seismicity in the Taiwan orogen. *Nature*, 426, S. 648–651.
- Devoli, G., Kleivane, I., Sund, M., Orthe, N.K., Ekker, R., Johnsen, E., Colleuille, H., 2015. Landslide early warning system and web tools for real-time scenarios and for distribution of warning messages in Norway. *Engineering Geology for Society and Territory*, 2, S. 625–629.
- Enigl, K., Matulla, C., Schlögl, M., Schmid, F., 2019. Derivation of canonical total-sequences triggering landslides and floodings in complex terrain. *Advances in Water Resources* (in Begutachtung).
- Evans, S.G., Bishop, N.F., Smoll, L.F., Murillo, P.V., Delaney, K.B., Oliver-Smith, A., 2009. A re-examination of the mechanism and human impact of catastrophic mass flows originating on Nevado Huascarán, Cordillera Blanca, Peru in 1962 and 1970. *Engineering Geology*, 108, S. 96–118. DOI: 10.1016/j.enggeo.2009.06.020.
- Glade, T., Bell, R., Dobesberger, P., Embleton-Hamann, C., Fromm, R., Fuchs, S., Hagen, K., Hübl, J., Lieb, G., Otto, J.C., Perzl, F., Peticzka, R., Prager, C., Samimi, C., Sass, O., Schöner, W., Schröter, D., Schrott, L., Zangerl, C., A. Zeidler, A., 2014. Der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre. In: *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14)*. Austrian Panel on Climate Change (Hrsg.), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, Österreich, S. 557–600.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M., 2013. 21st century climate change in the European Alps – a review. *Science of the Total Environment*, 493, S. 1138–1151. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2013.07.050.
- Guzzetti, F., Peruccacci, S., Rossi, M., Stark, C.P., 2008. The rainfall intensity – duration control of shallow landslides and debris flows: an update. *Landslides*, 5, S. 3–17. DOI: 10.1007/s10346-007-0112-1.
- Heiser, M., Scheidl, C., Hübl, J., 2019. Completeness Analysis of the Austrian Torrential Event Catalogue. Accepted in *Landslides*.
- Hübl, J., Beck, M., Kyriazis, G., Sauermoser, C., Frankl, D., 2016. Ereignisdokumentation. IAN Report 185. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (unveröffentlicht).
- Hübl, J., Beck, M., Zöchling, M., Moser, M., Kienberger, C., Jenner, A., Forstlechner, D., 2016. Ereignisdokumentation 2015. IAN Report 175(1). Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien (unveröffentlicht).

- Hübl, J., Eisl, J., Schraml, K., Chiari, M., Ornetzmüller, C., Braitto, S., Heidger, C., 2012. Ereignisdokumentation 2012, Lorenzgerbach. IAN Report 150(1). Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien (unveröffentlicht).
- Hübl, J., Sitter, F., Totschnig, R., Schneider, A., Krawtschuk, A., 2009. Historische Ereignisse: Zusammenstellung und Analyse dokumentierter Ereignisse in Österreich bis 2009. IAN Report 111(4). Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien (unveröffentlicht).
- Huggel, C., Zraggen-Oswald, S., Haeblerli, W., Käab, A., Polkvoj, A., Galushkin, I., Evans, S., 2005. The 2002 rock/ice avalanche at Kolka/Karmadon, Russian Caucasus: assessment of extraordinary avalanche formation and mobility, and application of QuickBird satellite imagery. *Natural Hazards and Earth System Science*, 5, S. 173–187. DOI: 1684-9981/nhess/2005-5-173.
- Hungr, O., Evans, S., Bovis, M., Hutchinson, J., 2001. A review of the classification of landslides of the flow type. *Environmental and Engineering Geoscience*, 7, S. 221–238.
- Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent (Hrsg.), 2009. Alpine Naturkatastrophen. Lawinen, Muren, Felsstürze, Hochwässer. Leopold Stocker Verlag, Graz, 124 S.
- Iverson, R.M., 2000. Landslide triggering by rain infiltration. *Water Resources Research*, 36, S. 1897–1910.
- Iverson, R.M., George, D.L., 2014. A depth-averaged debris-flow model that includes the effects of evolving dilatancy. I. Physical basis. *Proceedings of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 470, S. 20130819. DOI: 10.1098/rspa.2013.0819.
- Jomelli, V., Brunstein, D., Grancher, D., Pech, P., 2006. Is the response of hill slope debris flows to recent climate change univocal? A case study in the Massif des Ecrins (French Alps). *Climatic Change*, 85(1), S. 119–137. DOI: 10.1007/s10584-006-9209-0.
- Kaitna, R., Huber, T., 2017. Debris flow activity in permafrost regions in Austria during the 20th century. In: M. Mikos, N. Casagli, Y. Yin, K. Sassa (Hrsg.), *Advancing Culture of Living with Landslides. Diversity of Landslide Forms*, 4, S. 707.
- Keiler, M., Knight, J., Harrison, S., 2010. Climate change and geomorphological hazards in the eastern European Alps. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 368, S. 2461–2479. DOI:10.1098/rsta.2010.0047.
- Kienholz, H., 1995. Gefahrenbeurteilung und -bewertung. Auf dem Weg zu einem Gesamtkonzept. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 146(9), S. 701–725.
- Leijnse, H., Uijlenhoet, R., Stricker, J.N.M., 2007. Rainfall Measurement Using Radio Links from Cellular Communication Networks: rapid communication. *Water Resources Research*, 43(3), W03201. DOI: 10.1029/2006WR005631.
- Lin, C.W., Shieh, C.L., Yuan, B.D., Shieh, Y.C., Liu, S.H., Lee, S.Y., 2004. Impact of Chi-Chi earthquake on the occurrence of landslides and debris flows: example from the Chenyulan River watershed, Nantou, Taiwan. *Engineering Geology*, 71(1/2), S. 49–61.
- Llasat, M.C., Rigo, T., Ceperuelo, M., Barrera, A., 2005. Estimation of Convective Precipitation: The Meteorological Radar versus an Automatic Rain Gauge Network. *Advances in Geosciences*, 2, S. 103–109.
- Lugon, R., Stoffel, M., 2010. Rock-glacier dynamics and magnitude-frequency relations of debris flows in a high-elevation watershed: Ritigraben, Swiss Alps. *Global and Planetary Change*, 73(3/4), S. 202–210. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2010.06.004.

- Marra, F., Nikolopoulos, E.I., Creutin, J.D., Borga, M., 2014. Radar Rainfall Estimation for the Identification of Debris-Flow Occurrence Thresholds. *Journal of Hydrology*, 519, S. 1607–1619. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.039.
- McGuire, L.A., Rengers, F.K., Kean, J.W., Staley, D.M., 2017. Debris flow initiation by runoff in a recently burned basin: Is grain-by-grain sediment bulking or en-masse failure to blame? *Geophysical Research Letters*, 44(14), S. 7310–7319. DOI: 10.1002/2017GL074243.
- Mergili, M., Fischer, J.-T., Krenn, J., Pudasaini, S.P., 2017. r.avaflow v1, an advanced open-source computational framework for the propagation and interaction of two-phase mass flows. *Geoscientific Model Development*, 10(2), S. 553–569.
- Mikoš, M., Četina, M., Brilly, M., 2004. Hydrologic conditions responsible for triggering the Stože landslide, Slovenia. *Engineering Geology*, 73, S. 193–213. DOI: 10.1016/j.enggeo.2004.01.011.
- Moser, M., Hohensinn, F., 1983. Geotechnical aspects of soil slips in Alpine regions. *Engineering Geology*, 19(3), S. 185–211.
- Mostbauer, K., Kaitna, R., Prenner, D., Hrachowitz, M., 2018. The temporally varying roles of rainfall, snowmelt and soil moisture for debris flow initiation in a snow-dominated system. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22, S. 3493–3513. DOI: 10.5194/hess-22-3493-2018.
- Nikolopoulos, E.I., Crema, S., Marchi, L., Marra, F., Guzzetti, F., Borga, M., 2014. Impact of uncertainty in rainfall estimation on the identification of rainfall thresholds for debris flow occurrence. *Geomorphology*, 221, S. 286–297. DOI: 10.1016/j.geomorph.2014.06.015.
- ONR 24800, 2009. Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung (Protection works for torrent control – Terms and their definitions as well as classification). Österreichisches Normungsinstitut.
- Peres, D.J., Cancelliere, A., Greco, R., Bogaard, T.A., 2018. Influence of uncertain identification of triggering rainfall on the assessment of landslide early warning thresholds. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(2), S. 633–646. DOI: 10.5194/nhess-18-633-2018.
- Pfitscher, M., Kaitna, R., Hübl, J., 2016. Towards an empirical method to determine an engineering design peak discharge for debris flows. 13th International Congress Interpraevent Lucerne, S. 232–233.
- Pierson T.C., 1986. Flow behavior of channelized debris flows, Mount St. Helens, Washington. In: A.D Abrahams (Hrsg.), *Hillslope Processes*. Allen & Unwin, Boston, S. 269–296.
- Pierson, T.C., Janda, R.J., Thouret, J.-C., Borrero, C.A., 1990. Perturbation and melting of snow and ice by the 13 November 1985 eruption of Nevado del Ruiz, Colombia, and consequent mobilization, flow and deposition of lahars. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 41, S. 17–66.
- Prenner, D., 2018. The influence of climate change on debris flow trigger conditions from a hydro-meteorological perspective. Masterarbeit, Universität für Bodenkultur, Wien, 97 S. (unveröffentlicht).
- Prenner, D., Hrachowitz, M., Kaitna, R., 2019. Trigger characteristics of torrential flows from high to low alpine regions in Austria. *Science of the Total Environment*, 658, S. 958–972. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.12.206

- Rickenmann, D., 1999. Empirical relationships for debris flows. *Natural Hazards*, 19(1), S. 47–77.
- Rickenmann, D., 2014. Methoden zur quantitativen Beurteilung von Gerinneprozessen in Wildbächen. *WSL Berichte*, 9, 108 S.
- Salio, P., Hobouchian, M.P., García Skabar, Y., Vila, D., 2015. Evaluation of high-resolution satellite precipitation estimates over southern South America using a dense rain gauge network. *Atmospheric Research*, 163, S. 146–161. DOI: 10.1016/j.atmosres.2014.11.017.
- Schwanghart, W., Worni, R., Huggel, C., Stoffel, M., Korup, O., 2016. Uncertainty in the Himalayan energy-water nexus: estimating regional exposure to glacial lake outburst floods. *Environmental Research Letters*, 11(7), 074005. DOI: 10.1088/1748-9326/11/7/074005.
- Stoffel, M., Bollschweiler, M., Beniston, M., 2011. Rainfall characteristics for periglacial debris flows in the Swiss Alps: past incidences-potential future evolutions. *Climatic Change*, 105(1/2), S. 263–280. DOI: 10.1007/s10584-011-0036-6.
- Stoffel, M., Huggel, C., 2012. Effects of climate change on mass movements in mountain environments. *Progress in Physical Geography*, 36(3), S. 421. DOI: 10.1177/0309133312441010.
- Stoffel, M., Mendlik, T., Schneuwly-Bollschweiler, M., Gobiet, A., 2014. Possible impacts of climate change on debris-flow activity in the Swiss Alps. *Climatic Change*, 122(1/2), S. 141–155. DOI: 10.1007/s10584-013-0993-z.
- Take, W., Bolton, M., Wong, P., Yeung, F., 2004. Evaluation of landslide triggering mechanisms in model fill slopes. *Landslides*, 1, S. 173–184. DOI: 10.1007/s10346-004-0025-1.
- Theule, J.I., Liebault, F., Loye, D., Laigle, D., Jaboyedoff, M., 2012. Sediment budget monitoring of debris-flow and bedload transport in the Manival Torrent, SE France. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, S. 731–749.
- Zanuttigh, B., Lamberti, A., 2007. Instability and surge development in debris flows. *Reviews of Geophysics*, 45, RG3006. DOI: 10.1029/2005RG000175.

20 Lawinen

Arnold Studeregger, Alexander Podesser, Christoph Mitterer,
Jan-Thomas Fischer, Willi Ertl, Patrick Nairz und Rudi Mair*

Zusammenfassung

Lawinen gefährden seit Jahrhunderten lebensnotwendige alpine Infrastrukturen. Neben dem menschlichen Leben entsteht der größte Schaden für die Bevölkerung durch Zerstörung von Infrastruktur, Verlust von Eigentum, Unterbrechung von Nahversorgungsketten und Kommunikationsnetzwerken, Sperren von Verkehrswegen, Evakuierung von Siedlungen, Unterbrechung der Energieversorgung sowie die Zerstörung von Energieanlagen. In der Praxis gibt es mehrere Möglichkeiten, um den menschlichen Lebensraum zu schützen. Einerseits sind extreme Lawinen Naturkatastrophen, welche große Schäden in der Infrastruktur anrichten können, andererseits sind diese auch natürliche Bestandteile im alpinen Raum.

Abstract

Avalanches have endangered vital Alpine infrastructures for centuries. In addition to human life, the biggest harm to the population is caused by destruction of infrastructure, loss of property, disruption of local supply chains and communication networks, closure of traffic routes, evacuation of settlements, interruption of energy supply and destruction of energy facilities. In practice, there are several ways to protect the human habitat. On one hand, very large («extreme») avalanches are natural disasters that can cause immense damage to the infrastructure; on the other hand, they are natural components in the Alpine area.

* Arnold Studeregger, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Kundenservice Steiermark/Lawinenwarndienst Steiermark, arnold.studeregger@zamg.ac.at.
Alexander Podesser, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Kundenservice Steiermark/Lawinenwarndienst Steiermark, alexander.podesser@zamg.ac.at.
Christoph Mitterer, Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Zivil- und Katastrophenschutz, chris.mitterer@tirol.gv.at.
Jan-Thomas Fischer, Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Institut für Naturgefahren, jt.fischer@bfw.gv.at.
Willi Ertl, Amt der Kärntner Landesregierung, Kompetenzzentrum Umwelt, Wasser und Naturschutz/Lawinenwarndienst Kärnten, wilfried.ertl@ktn.gv.at.
Patrick Nairz, Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Zivil- und Katastrophenschutz/Lawinenwarndienst Tirol, patrick.nairz@tirol.gv.at.
Rudi Mair, Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Zivil- und Katastrophenschutz/Lawinenwarndienst Tirol, rudi.mair@tirol.gv.at.

Kernaussagen

- Der Bericht befasst sich mit den Extremereignissen der letzten Jahrzehnte in den Alpen, speziell auf das österreichische Bundesgebiet.
- Die Autoren sehen Handlungsbedarf bei Politik, Verwaltung und Wirtschaft zum Schutz vor extremen Lawinen.
- Katastrophenlawinen sind gravitative Massenbewegungen von Schnee oder Eis, die sich von Berghängen lösen und teilweise mit hoher Geschwindigkeit zu Tal gleiten oder stürzen und Infrastruktur erreichen.
- Diese Lawinen erreichen die Talböden, verwüsten die Landschaft und haben ein typisches Volumen von mehr als 100.000 m³ (EAWS Size 4–5).
- Skifahrerlawinen sind hingegen Lawinen, die vom Sportler meist selbst ausgelöste Lawinen, die den Alpinisten verschütten können.
- Die Typische Kubatur beträgt weniger als 100.000 m³ (EAWS Size 1–3).
- Maßnahmen zum Schutz vor Extremereignissen müssen langfristig geplant werden.
- Die Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung, Politik und Wirtschaft spielt daher eine große Rolle.
- Besiedelungen und Infrastruktur können auf unterschiedlichste Art und Weise vor extremen Lawinen geschützt werden – die Entstehung von Lawinen mit Wald oder Verbauungen verhindern, die Auswirkungen von Lawinen mit Schutzbauten wie Galerien minimieren oder Lawinen mit Sprengungen auslösen, Einhaltung des Gefahrenzonenplans sowie durch Bewusstseinsbildung der Bevölkerung.

Key Points

- The report deals with extreme events of the last decades in the Alps, especially on Austrian territory.
- The authors see a need for action in politics, administration and the economy to protect from extreme avalanches.
- Catastrophic avalanches are mass transports of snow or ice, which detach from mountain slopes and slide or fall at high speed to the valley and reach infrastructure.
- These avalanches reach the valley floor, devastate the landscape and have a typical volume of 100.000 m³ (EAWS Size 4–5).
- Skier avalanches, on the other hand, are avalanches; who are usually triggered by the athlete themselves.
- The typical volume is less than 100.000 m³ (EAWS Size 1–3).
- Measures to protect against extreme events must be planned for the long term.
- Awareness rising in the population, politics and economy therefore plays a major role.
- Settlements and infrastructure can be protected from extreme avalanches in a wide variety of ways – preventing avalanches from forming with forests or burrows, minimizing the impact of avalanches by protective structures such as galleries, causing avalanches with explosions, adherence to the Danger Zone Plan, and raising awareness among the population.

20.1 Definition/Terminologie des Sachverhaltes

Unter einer »Lawine« (nach Gabl et al., 1996) sind Schneemassen zu verstehen, die bei raschem Absturz auf steilen Hängen aufgrund ihrer Bewegungsenergie oder der von ihr verursachten Luftdruckwelle oder durch ihre Ablagerung Gefahren bzw. Schäden verursachen können. Als »Lawine« bezeichnet man den ganzen Bewegungsvorgang, beginnend mit dem Anriss im Abbruchgebiet, der Sturzbahn bis hin zum Ablagerungsgebiet. Die Sturzbahn ist durch das Gelände vorgegeben. Ist das Gelände ausreichend flach (10° – 20°), spricht man von der Auslaufstrecke, bei Beendigung der Bewegung bleibt der Schnee im Ablagerungsgebiet liegen.

In der Technischen Richtlinie der WLV 2015 wird die Lawine folgendermaßen beschrieben: »Unter einer Lawine (im Sinne des ForstG, 1975, § 99, Abs. 2) sind Schneemassen zu verstehen, die bei raschem Absturz auf steilen Hängen, Gräben u. ä. infolge der kinetischen Energie oder der von ihnen verursachten Luftdruckwelle oder durch ihre Ablagerung Gefahren oder Schäden verursachen können.«

Zusätzlich wird in eine »Fließlawine« und eine »Staublawine« unterschieden, die folgendermaßen definiert werden: »Eine Fließlawine (im Sinne der ONR-24805) bewegt sich vorwiegend fließend (turbulent) oder gleitend auf der Unterlage (Boden- oder Schneeoberfläche), flächig oder kanalisiert. Eine Staublawine stürzt in stiebender Form in der sie umgebenden Luft als Aerosol, d. h. als Mischung von Luft und relativ wenig Schneepartikeln je Volumeneinheit, ganz oder teilweise vom Boden abgehoben, zu Tal.« Nach Harvey et al. (2012) sind Schneelawinen Schneemassen, die schnell steile Hänge hinabstürzen. Sie können Steine, Erde, Vegetation oder Eis enthalten. Es gibt zwei Arten der Auslösung: Lockerschneelawinen und Schneebrettlawinen. Lockerschneelawinen beginnen an einer Stelle in einer relativ kohäsionslosen Oberflächenschicht aus trockenem oder nassem Schnee. Das anfängliche Versagen ist analog zum Rotationsrutsch von kohäsionslosen Sanden oder Böden, tritt aber innerhalb eines kleinen Volumens (1 m^3) im Vergleich zu viel größeren Initiationsvolumina in Erdbeben auf. Schneebrettlawinen beinhalten die Auslösung eines zusammenhängenden Schneebretts über einer ausgedehnten Schwachschicht.

Die europäischen Lawinenwarndienste (EAWS, 2018) definieren folgende Lawinengrößen:

»Schifahrerlawinen« sind zwar oft »kleine« (Größe 1) oder knapp »mittlere« (Größe 2) Lawinen, erreichen aber dennoch beachtliche Ausmaße: Sie sind typischerweise 150 m lang, wobei die Anrissfläche etwa 50 m mal 80 m und die mittlere Anrissmächtigkeit rund 50 cm betragen. Dies entspricht einem Anrissvolumen von etwa 2.000 m^3 oder ca. 400 Tonnen. Demgegenüber stehen »Katastrophenlawinen«, die von »sehr großen« (Größe 4) bis hin zu »extremen«

(Größe 5) Lawinen reichen. Innerhalb der existierenden, internationalen Klassifikationen von Lawinengrößen gehört die EAWS-Definition zu den absoluten Skalen und ermöglicht es, Lawinen qualitativ anhand ihres Schadenspotentials, ihrer Reichweite oder quantitativ anhand ihres typischen Ausmaßes (Länge, Volumen) einzuteilen (siehe www.avalanches.org).

20.2 Historische Entwicklung

20.2.1 Lawinenereignisse in den Alpen

Seit der Besiedlung der Alpentäler wurden die Menschen, ihre Häuser, Höfe, Siedlungen und Wege von Lawinen bedroht. Dabei betraf die Wahrnehmung von Lawinen in der Vergangenheit überwiegend die von Katastrophenergebnissen und deren Folgen. Erst mit der touristischen Erschließung der Alpen rückte die Lawinengefahr bei der Ausübung von Wintersportaktivitäten in den Mittelpunkt.

Der älteste, genau belegte Bericht über ein Lawinenunglück am Gr. St. Bernhard stammt aus dem Winter 1128/29. Die älteste Bildquelle einer Lawine entstammt einer Darstellung in der Biographie des Kaisers Maximilian aus dem Jahre 1517, als dieser mit einer Lawine in Kontakt kam.

Im Jahre 1689 wurde von einer Lawinenkatastrophe im Montafon mit angeblich 120 Todesopfern berichtet. In der Schweiz kamen in einem Lawinenwinter um 1720 ca. 200 Menschen ums Leben.

Im Jahre 1820 ereignete sich bei der Ersteigung des Montblanc der erste touristische Lawinenunfall, acht Jahre später folgte der erste touristische Lawinenunfall in Österreich beim Erstbesteigungsversuch des Großvenedigers durch Erzherzog Johann.

Der Erste Weltkrieg weist ein finsternes Kapitel in der Geschichte der Lawinen auf: Immer wieder wurden von den beiden Kriegsparteien Italien und Österreich aus strategischen Gründen auch Lawinen durch Artilleriefire absichtlich ausgelöst. Im Dezember 1916 starben an der Dolomitenfront – allein als Folge eines Lawinenereignisses 6.000 österreichische Soldaten. Schätzungen gehen sogar von 40.000 bis 80.000 Lawinentoten an der Südfront aus.

Die schwersten Lawinenunfälle des 20. Jahrhunderts ereigneten sich im Winter 1950/51: In den österreichischen Bergen waren 135 Tote zu beklagen, auch die Innsbrucker Stadtteile Mühlau und Hötting waren betroffen. In der Schweiz starben in jenem Winter 98 Personen, davon kamen 73 in Gebäuden ums Leben. Insgesamt starben im Alpenraum 265 Menschen durch Lawinen.

Im Jänner 1954 wiederholte sich die Situation von 1951, allerdings mit anderen Schwerpunkten: Betroffen war vor allem Vorarlberg mit dem Großen

Walsertal mit 280 Verschütteten und 125 Toten, in den österreichischen Alpen starben 143 Personen durch Lawinen.

Drei schwere Lawinenkatastrophen ereigneten sich 1970: Im Februar starben dabei in Val d'Isère 39 Menschen, in Reckingen im Wallis 30 Menschen. Im April kamen in einer Lawine am Plateau d'Assy 71 Menschen um, darunter waren 56 tote Kinder.

Der letzte schwere Lawinenwinter ereignete sich 1999: Bei den Lawinenergebnissen in Österreich in Galtür und Valzur waren 38 Tote zu beklagen. In der Schweiz starben 17 Personen, in Frankreich bei Chamonix 12 Personen.

Schneereiche Winter mit Lawinen gab es in den Alpen aber auch danach, so etwa alpenordseitig vor allem die Winter 2005/06, 2008/09, 2011/12 und 2017/18 sowie alpensüdseitig 2013/14; größere Lawinenkatastrophen blieben allerdings aus. Trotzdem starben in den Alpen in den vergangenen 8 Jahren (2010/11–2017/18) 759 Menschen durch Lawinen, vorwiegend bei der Ausübung wintersportlicher Aktivitäten, wobei in der Unfallstatistik der Schitourenbereich den weitaus größten Anteil hat.

20.2.2 Gefahrenzonenplanung in Österreich

20.2.2.1 Gesetzliche Basis

In Österreich stellt das Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus (BMNT) auf Basis des Forstgesetzes 1975 (i. d. g. F.), § 11, dem Stand der Technik entsprechende, aktualisierte Gefahrenzonenpläne zur Verfügung. Anlass für die Entwicklung der Gefahrenzonenpläne waren vor allem die verheerenden Hochwasser der Jahre 1965/66 in Kärnten und Osttirol. Man kam damals überein, dass eine Wiederholung derartiger Schäden durch entsprechende bauliche Maßnahmen verhindert werden muss.

20.2.2.2 Die Wildbach- und Lawinenverbauung als Ersteller der Gefahrenzonenpläne

Die Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) ist eine nachgeordnete Dienststelle des BMNT, hat 7 Sektionen und 21 Gebietsbauleitungen und steht unter fachlicher Leitung und Koordination der Abteilung III/5 (Stand 09.2018). Seit knapp 30 Jahren werden von ihr Gefahrenzonenpläne verfasst und in Form flächenhafter Gutachten den Gemeinden als zuständige Instanzen für die örtliche Flächenwidmung und Bauplanung zur Verfügung gestellt. Diese enthalten für alle österreichischen Gemeinden innerhalb raumrelevanter Bereiche je nach Gefährdung 2 Gefahrenzonen, die von Wildbächen, Lawinen und Erosionsge-

bieten bedroht sind sowie 3 weitere Vorbehaltszonen und Hinweisbereiche. Darüber hinaus ist der Gefahrenzonenplan die Basis für die Planung der Schutzmaßnahmen und für die Abschätzung deren Dringlichkeit.

20.2.2.3 Arbeitsweise bei der Erstellung von Gefahrenzonenplänen

Bei der Erstellung eines Gefahrenzonenplanes durch die Diplomingenieur*innen der Wildbach- und Lawinenverbauung werden alle naturräumlichen Daten erhoben und bewertet. Dabei wird auch das Expertenwissen von Personen verwandter Fachrichtungen, wie Geologen, Bodenmechaniker, Hydrologen oder Meteorologen herangezogen. Dazu kommen Einsichten in Chroniken oder alten Aufzeichnungen, Befragungen der ortsansässigen Bevölkerung sowie Begehungen vor Ort. Häufig geben »stumme Zeugen« in der Natur Auskunft über den Ablauf und das Ausmaß früherer Schadensereignisse. Bei der Lawinengefährdung spielt vor allem die Druckbelastung des Lawinenschnees eine große Rolle, welche – ausgehend von Extremwertstatistiken über maximale Schneehöhen (150-jähriges Ereignis) – inzwischen mit numerischem Modellieransatz erfolgt.

20.2.2.4 Zonierung nach Gefährdung

In der »Roten Gefahrenzone« ist die Gefährdung durch Wildbäche und Lawinen so groß, dass ihre ständige Benützung für Siedlungs- und Verkehrszwecke wegen der voraussichtlichen Schadenswirkungen des Bemessungsereignisses oder der Häufigkeit der Gefährdung nicht oder nur mit unverhältnismäßig hohem Aufwand möglich ist. Für diese Zone besteht ein absolutes Bauverbot. Ausgenommen sind nur Modernisierungen bestehender Gebäude, wenn damit eine Erhöhung der Sicherheit verbunden ist (z. B. in Form von Schutzmauern).

In der »Gelben Gefahrenzone« ist die ständige Benützung für Siedlungs- und Verkehrszwecke beeinträchtigt. Eine Bebauung ist hier nur eingeschränkt und unter Einhaltung von Auflagen möglich. »Blaue Vorbehaltsbereiche« sind für technische oder biologische Schutzmaßnahmen freizuhalten oder bedürfen einer besonderen Art der Bewirtschaftung. Mit »Braunen Hinweisbereichen« wird auf andere als durch Wildbäche und Lawinen hervorgerufene Naturgefahren hingewiesen. »Violette Hinweisbereiche« kennzeichnen jene Flächen, deren gegenwärtiger Zustand erhalten werden muss, weil sie bereits einen natürlichen Schutz bieten.

20.2.2.5 Genehmigungsablauf

Ein Entwurf eines neuen Gefahrenzonenplanes liegt über vier Wochen im jeweiligen Gemeindeamt auf. Die betroffenen Bürger*innen haben in dieser Zeit

die Möglichkeit der freien Einsicht und können Inhalte schriftlich beanspruchen. Anschließend überprüft eine Kommission den Entwurf unter Berücksichtigung der Stellungnahmen. Die Genehmigung erfolgt durch den Bundesminister für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft.

Die geltenden Gefahrenzonenpläne liegen bei den Landesregierungen, den Bezirksverwaltungsbehörden, den Gemeinden sowie den zuständigen Gebietsbauleitungen auf. Die Gültigkeit hängt von den möglichen Veränderungen in den Einzugsgebieten ab, Anpassungen erfolgen bspw. bei Kenntnis neuer Katastrophenereignisse.

20.2.3 Entwicklung der Lawinenwarnung

Lawineninformationen werden in den Alpenländern etwa seit den 50er Jahre des vergangenen Jahrhunderts erstellt. Unter dem damaligen Eindruck der Lawinenkatastrophen in der Schweiz und in Österreich (1951 und 1954) richteten sich Warnungen anfangs vornehmlich an den gefährdeten Siedlungs- und Verkehrsbereich. Erst später wurde mit dem aufkommenden Wintertourismus auch der sogenannte »freie Schiraum« in die Beurteilung der Lawinengefahr miteinbezogen, wobei in den Lawinenlageberichten bis zum Ende der 90er Jahre meist eine strikte Trennung zwischen dem zu sichernden und dem ungesicherten alpinen Gelände erfolgte. Nach dem schwierigen Prozess der Vereinheitlichung der Gefahrenstufen unter Zugrundelegung möglichst objektiver lawinenrelevanter Parameter für die Einstufung der Lawinengefahr wurde ein zunehmend integrativer Warnansatz verfolgt: In Abhängigkeit von der Schneedeckensituation wurden die Schwerpunkte eher auf das schitouristische als auf das sicherungspflichtige Gelände gelegt, da der technische Lawinenschutz mit seinen Verbauungen die Schadlawinengefahr deutlich reduzierte. Ein weiterer wichtiger Fortschritt erfolgte parallel mit den sich stetig entwickelnden, verbesserten Kommunikationsmöglichkeiten.

Seit den späten 90er Jahren haben die Lawinenwarndienste im Alpenbogen begonnen, automatische meteorologische Messnetze aufzubauen. Mittlerweile ist die Anzahl der meteorologischen Stationen sehr stark angestiegen. Vor 1999 zeigte sich ein anderes Bild. Zum Beispiel gab es in Niederösterreich und der Steiermark keine automatischen Wetterstationen, in Oberösterreich waren es zumindest vier. Aufgrund des Lawinenunglücks in Galtür im Februar 1999 investierten die Lawinenwarndienste Österreichs in den Ausbau des meteorologischen Stationsnetzes. Ziel war es, die lokalen Bedingungen besser erfassen zu können. Die neu gewonnenen Daten mussten allerdings von den Benutzern interpretiert werden, um Aussagen über die Prozesse der Schneedeckenentwicklung (Entstehung von Schwachschichten) tätigen zu können.

Die Lawinenkommissionsmitglieder, die Mitarbeiter der Lawinenwarndienste, aber auch das breite Anwenderpublikum (Schitourengeher, Variantenfahrer, Schneeschuhgeher etc.) haben die Möglichkeit, die Daten zu nutzen. Gerade durch die ganzheitliche Zusammenschau auf die Schneedeckenentwicklung, die meteorologischen Daten der Gebirgsstationen (Temperaturverlauf, Schneedeckenverlauf, Windverlauf ...) sowie die Wetterprognose hat sich die Gefahrenbewertung durch die Lawinenkommissionsmitglieder und die Lawinenwarndienste wesentlich verbessert.

20.3 Fallbeispiele, fokussierend auf den österreichischen Alpenraum

Der Siedlungsraum und Infrastrukturbereiche wurden in den letzten 25 Jahren häufig von katastrophalen Fließ- und Staublawinen bedroht. Folgende Perioden stechen dabei markant hervor:

- 1) der Lawinenwinter 1998/99
- 2) der Lawinenwinter 2004/05
- 3) der Lawinenwinter 2008/09
- 4) der Lawinenwinter 2013/14
- 5) hohe Lawinenaktivität Anfang März 2017
- 6) Katastrophensituation Jänner 2018

20.3.1 Der Lawinenwinter 1998/99

Der Lawinenwinter 1998/99 zählt zusammen mit den Lawinenwintern 1950/51 und 1967/68 zu den katastrophalsten Wintern im gesamten Alpenraum. Alle drei Winter forderten eine hohe Anzahl an Opfern im Siedlungsgebiet und verursachten massive Schäden an Siedlungen, Infrastruktur und Wald.

Der Winter 1998/99 war betreffend Niederschlag und Lawinenaktivität in jeder Hinsicht außergewöhnlich. Drei kurz aufeinanderfolgende Niederschlagsperioden mit stürmischen Nordwestwinden brachten zwischen dem 27.01.1999 und dem 25.02.1999 in den Nordweststaulagen Tirols bis zu 400 cm Neuschneezuwachs, vereinzelt auch mehr. Diese Mengen lagen oft über den sonst üblichen Neuschneesummen für eine komplette Wintersaison.

Trotz dieser sehr ergiebigen Neuschneefälle war der Schneedeckenaufbau aber recht stabil, sodass während der ersten zwei Niederschlagsperioden nur wenige Großlawinen abgingen. Die Stabilisierung der Schneedecke erfolgte vor allem durch kurze Niederschlagspausen und ebenso kurzfristige, markante

Temperaturanstiege. Gegen Ende Februar hin hatten sich in den Lawinenbruchgebieten enorme Schneemengen durch Niederschlag und Windtransport abgelagert. Als Folge dieser Überlast kam es schließlich trotz einer eher stabilen Schneedecke vielfach zum Bruch innerhalb der Schneedecke und damit zum Abgang ungewöhnlich riesiger Schadenslawinen mit teilweise bisher nicht bekannten Auslauflängen.

Der Schwerpunkt der Lawinenaktivität lag im westlichen Tirol und gipfelte in den Lawinenkatastrophen von Galtür am 23.02.1999 mit 31 Todesopfern und Valzur (Gemeinde Ischgl) am 24.02.1999 mit sieben Toten. Beim Niedergang der »Äußeren Wasserleiterlawine« in Galtür handelte es sich um eine Staublawine mit verhältnismäßig kleinem Fließanteil. Die zerstörerische Wirkung und die außergewöhnlich große Reichweite sind vor allem auf die mit 2,5 m bis 3,5 m sehr hohen Anrissmächtigkeiten zurückzuführen. Die größten Aufpralldrücke und damit verbundenen Zerstörungen sind dabei mit größter Wahrscheinlichkeit der Saltations- oder fluidisierten Schicht, also dem Bereich mit mittleren Dichten und hohen Geschwindigkeiten, zuzuordnen. Diese großen Anrissmächtigkeiten sowie die große Anrissbreite führten zu extremen Massen an abgleitendem Schnee, der in der Sturzbahn durch die Aufnahme von zusätzlichen Schneemengen noch vergrößert wurde (Entrainment). Die entlang der »Äußeren Wasserleiterlawine« abstürzenden Schneemassen konnten sich, bedingt durch Topographie und flächenhaften Absturz, seitlich nur wenig ausbreiten, durchflossen den Talboden mit großer Geschwindigkeit und stießen dadurch stark konzentriert in Richtung des Ortsteils Winkl vor, wo es zu den größten Schäden mit teilweise völlig zerstörten Gebäuden kam.

20.3.2 Steiermark, Februar 2005 – über 300 Katastrophenlawinen

Die Steiermark war, wie kein anderes Bundesland, im Februar 2005 von Katastrophenlawinen betroffen. Es begann mit dem Durchzug einer Kaltfront vom 18.01.–19.01.2005. Diese Kaltfront läutete eine Schlechtwetterphase mit teils kräftigen Schneefällen ein. Vom 01.02. bis 04.02.2005 intensivierten sich die Schneefälle. Neuschneehöhen von 120 cm in 24 h und Schneezuwächse über 3 m in 4 Tagen wurden im Bereich der Nordalpen gemessen. Diese Neuschneemengen, verbunden mit der anhaltenden Nordströmung, führten an 3 Tagen (02.02.–04.02.2005) zur Lawinengefahrenstufe 5. Entlang der Nordalpen sowie auf der Nordabdachung der Niederen Tauern kam es zu Auslösungen von Lawinen, welche zum Teil als Jahrhundertereignisse zu werten waren. Besonders betroffen waren die Planneralm (diese musste mit den Heereshubschraubern evakuiert werden), das Ausseer Land (Bad Aussee, Grundlsee, Bad Mitterndorf und die Tauplitz waren von der Außenwelt abgeschnitten), das Gesäuse sowie

das Hochschwabmassiv im Bereich Wildalpen. Zwischen 02.02. und 05.02.2005 gab es in der Steiermark mehr als 200 registrierte Lawinen, dabei wurden große Flächen an Schutzwald vernichtet und es entstanden neue Lawinengänge.

20.3.3 Winter 2008/09 in der Steiermark

Der Winter 2008/09 hatte in den steirischen Alpen aufgrund seines Verlaufes mit anfänglich tiefen Temperaturen und darauf folgenden großen Schneemengen neben zahlreichen künstlich ausgelösten Lawinen auch eine große Anzahl an spontanen, selbst ausgelösten Lawinen zu verzeichnen. Diese Lawinen erreichten zum Teil enorme Dimensionen und beschädigten die Infrastruktur erheblich.

Vergleicht man die Schnee- und Lawinensituation vom Februar 2009 mit jener vom Februar 2005 (in beiden Fällen herrschte Gefahrenstufe 5 mit extrem großen Lawinen), so gibt es kaum Ähnlichkeiten. Im Jahr 2005 gab es deutlich größere Schneefallintensitäten, beispielsweise wurde auf der Tauplitzalm eine 3-Tages-Neuschneesumme von 289 cm registriert. Der Unterschied in den beiden Ereignissen liegt darin, dass es im Februar 2009 an 19 Tagen eine durchgehende Nordwest- bis Nordströmung bei zwar geringeren, jedoch länger anhaltenden Niederschlagsintensitäten gab. So wurde auch die höchste Gesamtschneehöhe am 28.02.2009 mit 408 cm gemessen.

Aufgrund der anhaltenden Niederschläge, die bei recht tiefen Temperaturen und bei Windeinfluss fielen, musste am 24.02. von »sehr großer« Lawinengefahr in den Bereichen der steirischen Nordalpen ausgegangen werden.

Als Beispiel für dieses Ereignis steht die »Klöchgrabenlawine« in Eisenerz. Die Lawine ging in den Abendstunden des 24.02.2009 vom Pfaffenstein (1.871 m) im Bereich Kölchgraben nieder. Das Einzugsgebiet der »Kölchgrabenlawine« ist südexponiert und weist im Anbruchgebiet in ca. 1.500 m Seehöhe eine durchschnittliche Hangneigung von 35 Grad auf. Im letzten Drittel der Lawinenbahn ging die Genese der Lawine von einer Staub- in eine Fließlawine über, sie teilte sich im Ablagerungsgebiet in drei Ausläufer. Neben einer unbekannt Menge Schadholz wurde ein 110-kV-Hochspannungsmast leicht beschädigt sowie zwei unbewohnte Gartenhäuser völlig zerstört. Als Ursache für den spontanen Abgang fungierte ein solider, dicker Schmelzharschdeckel, der sich aufgrund der Südexposition im Jänner gebildet hatte. Diese Schmelzharschdeckel sind nie Schwachschichten, aber ein Hort für Schwachschichten, meist sind es kantige Kristalle. Dieser schwache Schneedeckenaufbau blieb bis zum Niederschlagsereignis im Februar erhalten, bei welchem ergiebige Schneemengen über einen vergleichsweise langen Zeitraum von 19 Tagen gefallen waren und sich auf dieser Schicht ablagerten.

20.3.4 Kärnten 2014

Mit fast ausschließlichen Wetterlagen aus Süd und Südwest brachte im Jahr 2014 der wärmste Jänner im Süden sowie der neuntwärmste Februar der Messgeschichte (246 Jahre, vgl. ZAMG Monatsbericht) im Südwesten Kärntens bis zu siebenmal mehr Niederschlag als im langjährigen Mittel. Ähnliche Niederschlagsmengen, mit rund 10 % weniger Niederschlag, traten in Oberkärnten zuletzt 1951 auf. Im Jahre 1951 waren in Heiligenblut am Großglockner durch Katastrophenlawinen 13 Todesopfer und verheerende Schäden an 36 Wohn- und Wirtschaftsgebäuden sowie Straßen und Versorgungsanlagen zu beklagen.

Im Jahr 2014 erfasste ein in eine föhnige Südwestströmung eingelagertes Frontensystem am 30.01. Oberkärnten. Auf die mit härteren Krusten durchzogene Altschneedecke, unter welcher sich kantige Kristalle gebildet hatten, fielen bei einer Schneefallgrenze um 1.500 m innerhalb von 48 Stunden 200 cm Neuschnee. In den nächsten 48 Stunden waren es dann noch einmal 100 cm. In höheren Lagen wurde der Schneefall von stürmischem Wind begleitet, was zu teils extremen Schneeverfrachtungen führte.

Die Schneedecke mit ihren Schwachschichten hielt der extremen Zusatzbelastung des Neuschnees nicht stand, was zu mehreren extremen Lawinen im südlichen Oberkärnten führte. Die meisten der extrem großen Lawinen wurden im nicht besiedelten Raum registriert, weshalb die Infrastruktur größtenteils verschont blieb. Mit der Lawinenwarnung, »sehr große Lawinengefahr (Stufe 5)«, wurden rechtzeitig Verkehrswege gesperrt und exponierte Gebäude evakuiert, sodass keinerlei Personenschäden zu beklagen waren.

Durch extreme Lawinen wurde in Kötschach-Mauthen die Hauptwasserversorgung und in Dellach im Gailtal ein Wasserspeicher zerstört.

Der sehr feuchte Schnee in tieferen Lagen führte zu einer hohen Anzahl von Baumbrüchen, welche Verkehrswege unpassierbar machten und die Stromversorgung zum Erliegen brachten.

Auf Grund der weiteren Schneefälle und Lawinenabgänge war die Plöckenpassbundesstraße für 25 Tage gesperrt und erst nach mühevollen Räumarbeiten und Instandsetzungsmaßnahmen wieder befahrbar.

20.3.5 Eine der lawinenreichsten Perioden seit Jahrzehnten: 09.03. bis 10.03.2017

Die Tage zwischen dem 09.03. und 10.03.2017 waren außergewöhnlich. Selten zuvor beobachtete man in Tirol über so viele Regionen verteilt so zahlreiche und großflächige Lawinen. Die Lawinenaktivität war beispielsweise im Vergleich zu jener des Katastrophenwinters 1998/99 höher, das Schadenspotential allerdings

aufgrund der unterdurchschnittlichen Schneehöhe deutlich geringer. Durch die fehlende Aufnahme von Schnee innerhalb der Sturzbahn (Entertainment) konnten die Lawinen kaum längere Ausmaße erreichen und in tiefliegende Siedlungsbereiche vorstoßen. Exponierte Infrastruktur, wie z. B. Alpenverzinshütten oder höhergelegene Verkehrswege, waren allerdings durchaus gefährdet. Am meisten betroffen waren die Regionen der Silvretta, das hintere Paznauntal, das Kaunertal und das Kühtai. Den entscheidenden Impuls für diese seit Jahrzehnten lawinenreichsten Tage gab eine am 08.03.2017 heranziehende Warmfront. Sie brachte lokal Neuschneemengen von über 100 cm, einen deutlichen Temperaturanstieg sowie stürmische Verhältnisse auf den Bergen. Die Lawinengefahr stieg in vielen Regionen auf »groß« an. Die Hauptlawinenaktivität war am 09.03.2017. Bei beginnender Wetterbesserung spielte am 10.03.2017 vor allem die durch Windverfrachtungen verursachte Zusatzbelastung eine wesentliche Rolle für Lawinenauslösungen. Ausgedehnte Erkundungsflüge zeigten, dass alle Expositionen von Lawinenabgängen betroffen waren, vermehrt jedoch der Sektor West über Nord bis Ost oberhalb von etwa 2.200 m. Vergleichsweise gering waren die Folgen dieser heiklen Phase: Es gab wenige verletzte Wintersportler – die große Masse war sehr defensiv unterwegs – und nur einige Sachschäden. Außergewöhnliches Ausmaß nahm auch eine Lawine unterhalb der »Vorderen Jamspitze« an, die am 10.03.2017 um 13:00 Uhr spontan abging. Der Anrissbereich lag bei einer Seehöhe von 3.150 m, der Ablagebereich bei 2.450 m, die Gesamtlänge betrug 1.820 m.

20.3.6 Katastrophensituation vom 22.01. bis 24.01.2018

Am 22.01.2018 wurde das erste Mal seit dem Katastrophenwinter 1998/99 wieder die Gefahrenstufe 5, (»sehr groß«), für weite Teile Tirols ausgegeben. Zwei kurz aufeinanderfolgende Niederschlagsereignisse waren für diese kritische Situation verantwortlich: Zunächst eine Warmfront in der Nacht auf Sonntag, den 21.01.2018, mit Neuschneesummen zwischen 30 und 60 cm in den westlichen Gebieten des Tiroler Oberlandes, und eine weitere Warmfront in der Nacht auf den 22.01.2018 mit Neuschneesummen zwischen 50 und 80 cm, die von stürmischem Nordwestwind begleitet wurden. Vom 20.01. bis 22.01.2018 (2 Tage) fielen in jenen Gebieten, in welchen die Gefahrenstufe 5 ausgegeben wurde, lokal über 1 Meter Neuschnee. Am Beispiel der Beobachterstation Nauders (Datensatz seit 1896) wird klar, dass die Summe des Neuschnees im Bereich einer 20-jährigen Wiederkehr war:

21.01.2018: 50 cm = 1d-Neuschneesumme alle 6 Jahre

22.01.2018: 35 cm -> 2d-Neuschneesumme (21.01. + 22.01. = 85 cm) alle 13 Jahre

23.01.2018: 20 cm -> 3d-Neuschneesumme (21.01. + 22.01. + 23.01. = 105 cm) ca. alle 18 Jahre

Die Lawinenaktivität war vor allem im Tiroler Oberland, d. h. im Kaunertal, Paznauntal, Ötztal und Pitztal, sehr hoch und führte zu weitreichenden Straßensperrungen. Schäden betrafen vor allem Bergwälder und technische Verbauungen, d. h. Stützverbauungen. Infrastruktur wurde kaum beschädigt.

Obwohl es in diesem Zeitraum zu extremen Lawinen (vgl. Definitionen EAWS) gekommen kam, wurden weder Personen getötet noch die Infrastruktur bedeutend beschädigt. Daraus ist ersichtlich, dass die baulichen, planerischen und waldbaulichen Maßnahmen, die nach 1999 gesetzt wurden, erfolgreich sind. Die wichtigsten organisatorischen sowie die temporären Maßnahmen (Warnung und Sperrung) haben gewirkt.

20.4 Einschätzung des Sachstandes und Unsicherheiten

Schutzmaßnahmen für Lawinen werden in aktive und passive Interventionen mit permanenter temporärer Wirkdauer unterschieden. Extremereignisse sind in diesem Zusammenhang insbesondere für Gefahrenzonenpläne, eine raumplanerische Maßnahme des permanenten Lawinenschutzes, von entscheidendem Interesse. In der Gefahrenbeurteilung für den raumrelevanten Bereich wird auf Basis des Forstgesetzes 1975 ein Ereignis mit einer Wiederkehrwahrscheinlichkeit von ca. einmal in 150 Jahren als Bemessungsereignis definiert. Generelle Richtlinien für die Abgrenzung von Gefahrenzonen beinhalten die historische, die numerisch-mathematische, die empirisch-statistische, die morphologische oder die physikalische Methode.

Grundsätzliche Quellen für Unsicherheiten finden sich an vielen Stellen im Beurteilungsprozess: Bei der Aufnahme von Felddaten, der Erstellung von Eingangsdaten (z. B. Gelände oder Wetter), der vereinfachenden Annahmen zur Modellbildung, der numerischen Näherungslösung oder deren Implementierung in Softwaretools.

Konkret finden sich Unsicherheiten in der Beurteilung historischer Ereignisse (historische Methode) sowie in der Gefahrenbeurteilung mittels computergestützter Simulationsmodelle (numerisch-mathematische Methode). Beide Methoden erfordern die Abschätzung eines Bemessungsereignisses. Einerseits erfolgt eine Zuordnung der Wiederkehrwahrscheinlichkeit zu einem bestimmten historischen (dokumentierten) Ereignis und andererseits werden Ein-

gangsgrößen (z. B. Anbruchvolumen) für computergestützte Lawinensimulationen bestimmt, welche das Bemessungsereignis abbilden sollen. Ein Beispiel für ein solches Simulationswerkzeug ist die Lawinensimulationssoftware »SamosAT«, welche für die Gefahrenzonenplanung in Österreich angewendet wird und für Staublawinen, aber vor allem die Beschreibung von Fließlawinen für eine Vielzahl von nachgerechneten realen Lawinenereignissen zufriedenstellende Ergebnisse liefert.

Zur Simulation von Extremereignissen gibt es für Fließlawinen unterschiedliche Werkzeuge (SamosAT, RAMMS etc.), welche in der Ingenieurpraxis bereits breite Anwendung finden. Zusätzlich zu den existierenden Simulationswerkzeugen finden auch Open Source- Werkzeuge ihren Weg in die Lawinensimulation. Für die Beschreibung von Staublawinen existieren vereinzelt Lösungen: in Österreich z. B. SamosAT (Sampl und Granig 2009), welche allerdings aufgrund der hohen Komplexität des Fließprozesses bei den damit verbundenen Modellen oder dem Simulationsaufwand (z. B. der Rechendauer oder Datenanalyse) in der Praxis nur eingeschränkt Anwendung finden. An dieser Stelle – also für komplexere Prozessmodelle, die z. B. auch die detaillierte Aufnahme von Schnee bei unterschiedlichen Temperaturen des Schnees oder Mehrphaseninteraktion und damit verbundene Prozessketten simulieren können – gilt es in Zukunft existierende wissenschaftliche Ergebnisse für die praktische Anwendung zur Simulation von Extremereignissen verfügbar zu machen.

20.4.1 Beurteilung der Lawinengefahr

Im Winter wird jeden Tag die aktuelle Lawinengefahr in den Alpenländern von den Lawinenwarndiensten in Form von sogenannten Lawinenlageberichten bekanntgegeben. Zenke (2015) beschreibt, dass sich die Lawinenlageberichte in Europa unterschiedlich in Aufmachung und Layout präsentieren. Grundsätzlich haben sie aber alle den gleichen Aufbau. Sie folgen dem Prinzip der »Informationspyramide«, d. h. das Wichtigste steht plakativ an der Spitze. Detailinformationen: An der Spitze der Lageberichte findet man also allgemein die Schlagzeile, die Gefahrenstufe(n) und auch Hinweise auf die typische Lawinensituation (Neuschnee, Triebsschnee, Nassschnee, Altschnee, Gleitschnee). Danach folgt in den Berichten die Beschreibung der Gefahrenstellen, häufig unterstützt durch eine grafische Darstellung kritischer Expositionen und Höhenlagen. Zu den Gefahrenstellen gehört auch die Information über die Auslösewahrscheinlichkeit (spontan, geringe oder große Zusatzbelastung) und die zu erwartende Lawinenart. Die Beschreibungen lawinenrelevanter Gegebenheiten in der Schneedecke bilden das Fundament der Informationspyramide.

Hier wird die Schneedecke mit ihren eventuell vorhandenen Schwachschichten charakterisiert.

Örtliche Lawinenbewertungen erfolgen durch Lawinenkommissionen, welche Behörden hinsichtlich der Erforderlichkeit von Schutzmaßnahmen für Siedlungen, Schigebiete und Verkehrswege beraten. Behörden und Kommissionen müssen die im Lawinenlagebericht überregional vorhandenen Gefahrenstellen auf lokale Lawinenhänge übertragen und Wahrscheinlichkeit sowie Auswirkungen eines Lawinenabgangs beurteilen. Renner und Studeregger (2018) beschreiben, dass die Qualität des Risikomanagements sowohl von technischen Hilfsmitteln (Modelle, Wetterstationen etc.) als auch von der Kommunikation zwischen dem professionellen Akteursnetzwerk beeinflusst ist.

Die Lawinenkunde wurde in den letzten Jahrzehnten laufend mit neuen Erkenntnissen weiterentwickelt, trotzdem sind Lawinen (zeitlich, räumlich und nach der Größe) schwer zu prognostizieren. Das Problem ist, dass die Einflussfaktoren auf kleinstem geographischen Raum sehr stark variieren können. Kronthaler und Zenke führten 2006 die »Systematische Schneedeckendiagnose« ein, welche den Kommissionen erlaubt systematisch zu einer Empfehlung zu kommen. Studeregger et al. (2012) beschreibt die Interpretation von Messdaten an alpinen Wetterstationen als weitere systematische Datengrundlage für die Entscheidungsfindung vor Ort. Was bleibt, ist bei allen verwendeten Methoden, Modellen und Analysen der Faktor Mensch.

20.4.2 Modelle in der Bewertung der Lawinengefahr

Die klassische Kriechbruchmechanik liefert dazu verschiedene Modelle, welche das Risswachstum in Abhängigkeit verschiedener Belastungsparameter setzt und das asymptotische Verhalten eines Risses daraus ableitet (z. B. Gittus, 1975; Lackinger, 1987). Manchmal beschleunigt sich dieser Vorgang zusehends und es kommt zur Lawine. Oft aber verlangsamt sich der Vorgang und es kommt zum Stillstand. Warum das so ist und wann genau es zu einem Lawinenabgang kommt, lässt sich bis heute nicht zufriedenstellend erklären oder genau vorhersagen. Das belegen auch Beobachtungen, die zeigen, dass Gleitschneelawinen sowohl am kältesten als auch am wärmsten Tag des Jahres abgehen können (Mair und Nairz, 2011).

Spontane Schneebrettlawinen gleiten im Gegensatz zu Gleitschneelawinen an Schwachschichten innerhalb der Schneedecke ab. Forschungen widerlegen das Scherriss-Modell (Gabl et al., 1996), welches besagt, dass es zum Bruch kommt, wenn die Zugbelastung der darüberliegenden Schneedecke die Festigkeit in der Schwachschicht übersteigt. Beim neueren Antirissmodell nach Heierli et al. (2008, 2010) bzw. bei der Weiterentwicklung der Modelle nach Gaume et al.

(2017) erhält der Bruch seine Fortpflanzungsenergie aus dem Kollaps der Schwachschicht, wodurch sich damit auch Fernauslösungen und »Wumm-Geräusche« im Flachgelände erklären lassen.

20.4.3 Schneemodellierung

Existierende Ansätze zur Simulation schneehydrologischer Prozesse ermöglichen unter anderem die Berechnung des Auf- und Abbaus der Schneedecke über Temperaturindex- oder Energiebilanzverfahren (z. B. Pellicciotti et al., 2005; Liston und Elder, 2006). Hier zählen zu aktuellen State-of-the-Art-Modellen das SNOWPACK-Modell (z. B. Bartelt und Lehning, 2002; Lehning et al., 2002), das AMUNDSEN-Modell (Strasser, 2008) und das CROCUS-Modell (z. B. Brun et al., 1992). Diese Modelle berücksichtigen im Detail die Energie- und Masseflüsse an der Grenzschicht zur Schnee-Atmosphäre. Für die Simulation der schneehydrologischen Prozesse Akkumulation, Ablation sowie ggf. der lateralen Umverteilung werden Messungen der vorherrschenden Temperaturbedingungen, der aktuellen Globalstrahlung, des Niederschlags und seiner Phase, der Windgeschwindigkeit sowie der Luftfeuchtigkeit benötigt.

Das CROCUS- und SNOWPACK-Modell berechnet neben den Energieflüssen auch die Entstehung von Schwachschichten, wie z. B. Oberflächenreif. Jedoch wird eine einmalig vorhandene Schwachschicht im Modell nicht mehr abgebaut. Um den Umwandlungsprozessen und somit der Entstehung sowie dem Abbau von Gleitschichten innerhalb der Schneedecke Rechnung zu tragen, können Solid-State und Liquid-Phase Sintering-Modelle (z. B. Riedel et al., 1994) angewandt werden, welche bisher erfolgreich bei der Modellierung des Sinterprozesses von Molybdänpulver eingesetzt wurden (Riedel et al., 2009).

Einer der wichtigsten lawinenbildenden Faktoren ist der Triebsschnee, der in windabgewandte Hänge, Rinnen sowie Mulden verfrachtet wird und durch seinen kompakten, störanfälligen Aufbau sehr leicht als Schneebrett abgleiten kann. Folgende Schneeverfrachtungsmodelle bilden zurzeit den Stand der Technik: Alpine3D (Lehning et al., 2006), oder M-CFD (Meteo-disciplinary Computational Fluid Dynamics). Letzteres wurde von 2008 bis 2011 entwickelt und validiert (Schneiderbauer et al., 2008; Wurzer et al., 2010).

Obwohl die Berechnungsmethoden für den Schneedeckenaufbau, die Schneeverfrachtung, die Lawinenausläuflängen, die Nassschneelawinenprognose, usw. immer genauer werden, können weder Wetter noch Lawinen genau vorhergesagt werden. Zu komplex sind die dynamischen Zusammenhänge und Wechselwirkungen in der Natur.

20.5 Mögliche zukünftige Entwicklungen und daraus resultierende Herausforderungen

Eine Verbesserung der Früherkennung des Risikos von Schneelawinen durch eine Weiterentwicklung der Prognosemodelle (Modellkette), durch die Erforschung von Nassschneelawinen (Reiweger und Mitterer, 2017), eine bessere Sensoren-Technik und eine verbesserte Kommunikation zwischen den im und vor dem Krisenfall nötigen Institutionen ist unbedingt notwendig, um in Zukunft auf Extremereignisse vorbereitet zu sein.

20.5.1 Problematik der Nassschneelawinen im Zuge des Klimawandels

Der Klimawandel hat im Alpenraum Einzug gehalten und bedeutet Veränderung. Der alpine Lebensraum wird durch den Klimawandel stark beeinflusst. Als Folge der Klimaänderung wird in Zukunft eine Erwärmung der mittleren Lufttemperatur sowie eine Zunahme der Winterniederschläge und der Häufigkeit extremer Wettersituationen erwartet. Bisher existieren nur wenige Studien, die ausschließlich den Einfluss der Temperaturerhöhung auf die Schneedecke und die Lawinenaktivität untersuchen (vgl. Föhn, 1992). Der Einfluss von klimatologischen Veränderungen und ihres Zusammenwirkens auf die Lawinenaktivität ist noch nicht ausreichend geklärt.

Castebrunet et al. (2014) geht davon aus, dass aufgrund des Klimawandels eine Zunahme Nassschneelawinenaktivität in großen Höhen zunimmt. Diese Annahme kann auch auf die österreichischen Alpen umgelegt werden, weil die meteorologischen Bedingungen, die für Nassschneelawinen in der Wintersaison früher vorhanden sind. In den Wintersaisons 2005/2006, 2012/2013 und 2016/2017 (vgl. Berichte der österreichischen Lawinenwarndienste, o. J.) wurde dieses Phänomen beobachtet. Daraus abgeleitet werden auch veränderte Auslaufbahnen der Lawinen entstehen bzw. sind teilweise auch schon entstanden. Als Beispiel kann die Lawine vom Gr. Schober 2009 (vgl. Studeregger et al., 2010) genannt werden.

In den Hochlagen der Alpen wird in den Wintermonaten, bedingt durch den Klimawandel, leichter Schneezuwachs erwartet (vgl. Frei et al., 2018). Für den Lawinenschutz bedeutet dies, dass neue Herausforderungen auftreten werden.

20.5.2 Prognosemodelle

Das vorrangige Ziel ist ein optimiertes Management des Risikos »Lawine«, die in die Risikoprognose einfließenden physikalischen Stand-Alone-Modelle – ein numerisches Wetter-, Schneedecken-, Schneeverfrachtungs- und dynamisches Lawinenmodell – zu harmonisieren und zu koppeln. Derzeit gibt es in Österreich keine operationelle Modellkette im operationellen Dienst der Lawinenwarndienste.

Die Informationen der Modelle ergänzen das Wissen der Experten, sind aber nicht als Ersatz für diese zu verstehen.

20.5.3 Sensor-Technik

Derzeit stellen die Interpretation von Daten meteorologischer Stationen und aus Felduntersuchungen gewonnene Erkenntnisse über den Schneedeckenaufbau die Grundlage für die Bewertung der Lawinengefahr dar. Dazu wurden einheitliche und strukturierte Vorgehensweisen formuliert (z. B. Studeregger et al., 2012; Zenke und Kronthaler, 2012). Es ergeben sich jedoch folgende Wissenslücken und Schwierigkeiten in der Informationsbeschaffung: schlechte Erreichbarkeit potenzieller Gefahrenstellen zur Gewinnung notwendiger Informationen über den Schneedeckenaufbau, Unmöglichkeit einer Befliegung bei Schlechtwetter, Schwierigkeit der Ableitung der Lawinensituation aus punktuellen Feldversuchen und fehlendes theoretisches Wissen über den Zusammenhang von meteorologischen Einflüssen und den Abgang von Gletschneelawinen.

Es fehlt ein Sensor, welcher im Anrissgebiet angebracht wird und Schneedeckendaten liefern kann.

20.5.4 Kommunikation

Die Gefahr von Schadlawinen für kritische Infrastruktur lässt sich zumindest örtlich gut eingrenzen, da potenzielle Lawinenhänge aus der Vergangenheit bekannt sind. In der Praxis gibt es mehrere Möglichkeiten, um die Bevölkerung und Infrastrukturen vor Lawinen zu schützen: Lawinensprengungen, Straßensperren, Evakuierungen etc. All diesen Maßnahmen muss eine örtlich und zeitlich genaue Lawinenprognose zugrunde liegen. Neben den Problemen in der Lawinenprognose spielt die Kommunikation zwischen Lawinenwarndiensten, Kommissionen und Behörden eine große Rolle. In der Praxis sind die professionellen Akteure in ihrem Risikomanagement durch fehlerhafte oder ineffizi-

ente Kommunikation innerhalb ihres Teams behindert, was zu Fehlentscheidungen und Zeitverlusten mit weitreichenden Konsequenzen führen kann.

Neben der technischen Unterstützung spielt die Kommunikationsstruktur im Krisenfall eine entscheidende Rolle für ein erfolgreiches Risikomanagement. Durch die Analyse informeller Beziehungen bzw. den Vergleich zwischen informellen und formellen Beziehungen im Akteursnetzwerk werden Defizite im Risikomanagement und Bedingungen für die Entwicklung leistungsfähiger, stabiler Informationssysteme aufgezeigt. Dadurch soll sowohl die Transparenz (Nachvollziehbarkeit) als auch die Leistungsfähigkeit (Zeit und Qualitätsfaktoren) der Kommunikation zur Prävention/Prognose von Lawinenereignissen gesteigert werden.

Kommunikationsschnittstelle zwischen professionellen Akteuren und potenziell persönlich Betroffenen stellt die Risiko- und Krisenkommunikation in der Praxis vor bekannte Herausforderungen (vgl. Rappold und Ottisch, 2004; Siegrist und Gutscher, 2006; Volgger et al., 2006).

Die Risikovorsorgepraxis ist zum Beispiel bei den Lawinenkommissionen a.) von lokalen Bedingungen und b.) von netzwerkinternen Faktoren beeinflusst. Lieb et al., 2015 veranschaulichten, wie verschieden lokale Bedingungen sein können und wie die Gefahrenzone, ökonomische Abhängigkeiten, finanzielle und personelle Ressourcen etc. die Lawinenrisikovorsorge beeinflussen.

Eine Herausforderung in der Zukunft ist, dass Informationen der Modelle das Wissen der Experten ergänzen, diese jedoch nicht ersetzen können, wodurch sich eine enge Verknüpfung zwischen sozialen und technischen Aspekten ergeben wird. Um der Herausforderung »Zeitdruck und Probleme in der Kommunikation zwischen den Experten« begegnen zu können, wird die Kommunikation zwischen den Experten vor und während des Krisenfalls zu einem Zukunftsthema.

20.6 Perspektiven für Handlungsoptionen

Neben der Neu- und Weiterentwicklung der bestehenden Simulationswerkzeuge durch Verbesserung der zugrundeliegenden Prozessmodelle oder der numerischen Lösung durch neuartige Verfahren und Hardware bilden qualitativ hochwertige Grundlagendaten von Extrem- und Normalereignissen in einer quantitativ hohen Anzahl das Fundament für eine stetige Verbesserung der Gefahrenbeurteilung.

Darüber hinaus ist die probabilistische Untersuchung des Bemessungsereignisses, weg von einem singulären Ereignis zu einer wahrscheinlichkeitsbasierten Bestimmung, die explizit Unsicherheiten im Beurteilungsprozess darstellt, eine große Herausforderung.

Forschungsbedarf besteht bei Nassschnee- und Gleitschneelawinen, aber auch in anderen Fachgebieten.

Daraus ergeben sich folgende Handlungsempfehlungen:

- 1) Orte der *Vernetzung und Reflexion*, des persönlichen Kennenlernens und Wissens- und Erfahrungsaustausches ermöglichen es, dass lokale Netzwerke sich entwickeln, perspektivenvielfältig und lösungsorientiert werden.
- 2) Einheitliche Ausbildung im Bereich »Schnee und Lawinen«, sowohl auf Ebene der Praxis (Kommissionen, Bergführer, Schiführer, alpine Vereine), aber auch unterhalb der Lawinenwarner.
- 3) Ausbildung der Lawinenkommissionen im Sinne »Regionaler Risiko Governance« als staatliche Möglichkeiten zur Sicherung von Kontinuität und Qualität der freiwilligen Risikovorsorge.
- 4) Austauschprogramme für Lawinenwarner, damit alle Warner in Österreich zu ähnlichen Ergebnissen in der Vorhersage kommen.
- 5) Optimierung der Gefahrenzonenpläne.
- 6) Notfallpläne für Lawinenkommissionen aus exponierten Gemeinden aus sozialwissenschaftlicher und technischer Sicht.
- 7) Forschung im Bereich »Gleitschneelawinen – Nassschneelawinen« – die nasse Bruchmechanik ist noch nicht erforscht.
- 8) Aufbau einer Modellkette (Wetter-, Schnee-, und Lawindynamik) für die operationelle Lawinenvorhersage. Dieser Problematik könnte man mit geeigneten Schneemodellen und günstiger, innovativer Schneemesstechnik entgegenwirken. Zurzeit gibt es zwar regionale Wetter-, Schneedecken- und Schneeverfrachtungsmodelle, welche für sich alleine in einer Vielzahl von Anwendungen getestet und validiert wurden, jedoch fehlt zurzeit eine passende Modellkopplung, um die Schneesituation in Österreichs Bergen über einen längeren Zeitraum genau abzubilden.
- 9) Forschung: Aufbau einer Staublawine (im Vertikalschnitt).
- 10) Ausbau der lokalen und regionalen Warnsysteme.
- 11) Forschung: Veränderung des Schutzwaldes durch den Klimawandel.
- 12) Österreichische Datenbank für Lawinen (auch wenn sie nicht ganz die Infrastruktur erreichen), Zugänge für Kommissionen, BFW, WLV, Behörden, LWD's, Unis usw. – dies wäre wichtig für eine einheitliche Datenerhebung.
- 13) Ausbau der temporären Maßnahmen durch eine Maßnahmenkombination
- 14) Forcierung der Normenarbeiten (Schutzbauten, Warnung, ...)
- 15) Sensibilisierung der Kinder und Jugendlichen für Lawinen (z. B. in Schulen bzw. über die alpinen Vereine)
- 16) Bewusstseinsbildung in der Bevölkerung

Literatur

- Bartelt, P., Lehning, M., 2002. A physical Snowpack model for the Swiss avalanche warning: Part I: numerical model. *Cold Regions Science and Technology*, 35(3), S. 123–14.
- Brun, E., David, P., Sudul, M., Brunot, G., 1992. A numerical model to simulate snow-cover stratigraphy for operational avalanche forecasting. *Journal of Glaciology*, 38(128), S. 13–22.
- Castebrunet, H., Eckert, N., Giraud, E., Durand, Y., Morin, S., 2014. Projected changes of snow conditions and avalanche activity in a warming climate: the French Alps over the 2020–2050 and 2070–2100 periods. *The Cryosphere*, 8, S. 1673–1697.
- EAWS, 2018. European Avalanche Warning Services. <http://www.avalanches.org/eaws/en/main.php> [25.08.2018].
- Föhn, P., 1992. Climatic change, snow-cover and avalanches. *Catena Supplement*, 22, S. 11–21.
- ForstG, 1975. Bundesgesetz vom 3. Juli 1975, mit dem das Forstwesen geregelt wird. <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010371> [11.12.201].
- Frei, P., Kotlarski, S., Liniger, M.A., Schär, C., 2018. Future snowfall in the Alps: projections based on the EURO-CORDEX regional climate models. *The Cryosphere*, 12, S. 1–24.
- Gabl, K., Lackinger, B., Mayer, R. (Hrsg.), 1996. *Lawinenhandbuch*. Tyrolia-Verlag, Innsbruck, 247 S.
- Gaume, J., Herwijnen, A. van, Chambon, G., Wever, N., Schweizer, J., 2017. Snow fracture in relation to slab avalanche release: critical state for the onset of crack propagation. *Cryosphere*, 11(1), S. 217–228.
- Gittus, J., 1975: *Creep, Viscoelasticity and Creep Fracture in Solids*. Applied Science Publishers, London.
- Harvey, S., Rhyner, H., Schweizer, J., 2012. *Lawinenkunde: Praxiswissen für Einsteiger und Profis zu Gefahren, Risiken und Strategien*. Outdoor-Praxis. Bruckmann, München, S. 192.
- Heierli, J., Gumbsch, P., Zaiser, M., 2008. Anticrack nucleation as triggering mechanism for snow slab avalanches. *Science*, 321, S. 240–243.
- Heierli, J., Zaiser, M., Gumbsch, P., 2010. Der Knall im Lawinenhang. *Physik in unserer Zeit*, 1(41), S. 31–34. DOI:10.1002/piuz.201001224.
- Kronthaler, G., Zenke, B., 2006. Schneedeckendiagnose, Bergundsteigen – Zeitschrift für Risikomanagement im Bergsport. Österreichischer Alpenverein, Innsbruck, 15(4), S. 56–64.
- Lackinger, B., 1987. Stability and fracture of the snowpack glide avalanche. *Davos Symposium*, S. 229–241.
- Lawinenwarndienst Steiermark, o. J. Saisonberichte der österreichischen Lawinenwarndienste. <http://www.lawine-steiermark.at> [07.06.2018].
- Lehning, M., Bartelt, P., Brown, B., Fierz, C., Satyawalia, P., 2002. A physical SNOWPACK model for the Swiss avalanche warning Part II: Snow microstructure. *Cold Regions Science and Technology*, 35(3), S. 169–184. [https://doi.org/10.1016/S0165-232x\(02\)00073-3](https://doi.org/10.1016/S0165-232x(02)00073-3).

- Lehning, M., Völsch, I., Gustafsson, D., Nguyen, T.A., Stähli, M., Zappa, M., 2006. ALPINE3D: a detailed model of mountain surface processes and its application to snow hydrology. *Hydrological Process*, 20(10), S. 2111–2128. <https://doi.org/10.1002/hyp.6204>.
- Lieb, G., Renner, R., Studeregger, A., 2015. Die Planneralp – Naturfaktoren, Wintertourismus und Lawinenprävention. In: GEOGRAZ Grazer Mitteilungen der Geographie und Raumforschung.
- Liston, G.E., Elder, K., 2006. A Distributed Snow-Evolution Modeling System (SnowModel). *Journal of Hydrometeorology*, 7(2), S. 217–234.
- Mair, R., Nairz, P., 2011. Lawine. Tirolia Verlag, S. 215.
- ONR-24805, 2010. Permanenter technischer Lawinenschutz – Benennung und Definition sowie statistische und dynamische Einwirkungen. Austrian Standards Institute, 26 S.
- Pellicciotti, F., Brock, B., Strasser, U., Burlando, P., Funk, M., Corripio, J.G., 2005. An enhanced temperature-index glacier melt model including the shortwave radiation balance: development and testing for Haut Glacier d’Arolla, Switzerland. *Journal of Glaciology*, 51(175), S. 573–587.
- Rappold, G., Ottisch, A., 2004. Bürgerbeteiligung im Rahmen des Naturgefahrenmanagements. In: Lebensministerium (Hrsg.), *Neue Methoden zur Gefahrenabschätzung. Planung und Entwicklung zum Schutz vor Naturgefahren*. Wien, S. 13–15.
- Reiweger, I., Mitterer, C., 2017. Schneebruch und Schneegleiten – Neues aus der Lawinenforschung. Zweites internationales Lawinensymposium. Naturfreunde Österreich, Referat Skitouren, Graz, 2, S. 78–80.
- Renner, R., Studeregger, A., 2018. Österreichische Lawinenkommissionen als Beispiel für lokale Netzwerke im gesellschaftlichen Umgang mit Naturgefahren. In: A. Kanonier, F. Rudolf-Miklauer (Hrsg.), *Regionale Risiko Governance: Recht, Politik und Praxis*. Verlag Österreich, Wien, S. 475–489.
- Riedel, H., Meyer, D., Svoboda, J., Zipse, H., 1994. Numerical simulation of die pressing and sintering – Development of constitutive equations. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 12(2), S. 55–60.
- Riedel, H., Svoboda, J., Huber, K., Plankensteiner, A., 2009. Proceedings of 17th International Plansee Seminar. In: L.S. Sigl, P. Rödhammer, H. Wildner (Hrsg.), *Plansee AG, Austria, WS 5*, S. 1–12.
- Sampl, P., Granig, M., 2009. Avalanche Simulation with SAMOS-AT. *International Snow Science Workshop ISSW09*, Davos.
- Schneiderbauer, S., Tschachler, T., Fischbacher, J., Hinterberger, W., Fischer, P., 2008. Computational Fluid Dynamic (CFD) Simulation of Snow Drift in Alpine Environments, Including a Local Weather Model for Operational Avalanche Warning. *Annals of Glaciology*, 48, S. 150–158.
- Siegrist, M., Gutscher, H., 2006. Flooding Risks: A Comparison of Lay People’s Perceptions and Expert’s Assessments in Switzerland. *Risk Analysis*, 26(4), S. 971–979.
- Strasser, U., 2008. Modelling of the mountain snow cover in the Berchtesgaden National Park. *Forschungsbericht 55*. Nationalparkverwaltung Berchtesgaden, Berchtesgaden.
- Studeregger, A., Rieder, H., Ertl, W., 2012. Interpretation von meteorologischen Messstationen als Entscheidungsgrundlage für die Lawinenwarnung. *Interpraevent Grenoble*, S. 351–360.

- Studeregger, A., Rieder, H., Riegler, A., Zenkl, G., 2010. Case study: »Schober avalanche on February 28th, 2009, Styria, Austria«. ISSW Squaw Valley, S. 795–799.
- Volgger, S., Walch, S., Kumnig, M., Penz, B., 2006. Kommunikation vor, während und nach der Krise. Leitfaden für Kommunikationsmanagement anhand der Erfahrungen des Hochwasserereignisses Tirol 2005. Amt der Tiroler Landesregierung, Abteilung Öffentlichkeitsarbeit in Zusammenarbeit mit SVWP Kommunikationsmanagement und dem Management Center Innsbruck. STUDIA Universitätsverlag, Innsbruck, 130 S.
- Wurzer, A., Studeregger, A., Fischer, P., 2010. Critical review of challenges and potentials for snow drift. International Snow Science Workshop, Lake Tahoe, USA, S. 450–458.
- Zenke, B., 2015. Fehlinterpretation von Lawinengefahrenstufen. In: Naturfreunde Österreich (Hrsg.), Internationalen Lawinensymposiums Graz 2015. Graz, 77 S.
- Zenke, B., Kronthaler, G., 2012. Strukturiertes Vorgehen in der Beurteilungstätigkeit der örtlichen Lawinenkommissionen in Bayern. Interpraevent Grenoble, S. 619–628.
- Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 2018. <http://www.zamg.ac.at> [06.09.2018].

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

D Glaziale und periglaziale Extremereignisse

21 Permafrostgefahren

Jan-Christoph Otto, Michael Krautblatter und Katrin Sattler*

Zusammenfassung

Der Begriff »Permafrost« bezeichnet Boden, Fels- oder Lockermaterial, dessen Temperatur über einen Zeitraum von mindestens zwei aufeinanderfolgenden Jahren unter 0 °C beträgt. Regionale Modellierungsansätze schätzen die potenzielle Permafrostverbreitung in Österreich auf 1,7 % bzw. 3,2 % der Landesfläche, wobei sich die Vorkommen auf die Hochgebirgslagen in Vorarlberg, Tirol, Kärnten und Steiermark beschränken.

Als Temperaturphänomen sind Permafrostvorkommen vom Klimawandel beeinflusst, insbesondere durch Änderungen in der Strahlungsbilanz, der Schneemächtigkeit und des Zeitpunkts des Einschneiens und Ausaperns. Steigende Lufttemperaturen führen mit zeitlicher Verzögerung zu einer Erwärmung von Permafrosttemperaturen, zunehmender Mächtigkeit der oberflächlichen sommerlichen Auftauschicht sowie einer beschleunigten Kriechbewegung von dauerhaft gefrorenen, eisreichen Schuttmassen (sog. Blockgletschern). Die damit verbundene, bereits beobachtbare Destabilisierung von Felswänden, Freiwerdung vormals konsolidierter Lockergesteinsmassen und der Transport von Schutt in Bereiche mit kritischen Hangneigungen, lässt auf eine zukünftige Zunahme in Felsstürzen und Murgängen aus Permafrostgebieten schließen. An einzelnen Standorten in den Alpen, wie z. B. im Mont Blanc Gebiet, sind bereits statistisch verlässliche Daten über die Zunahme von Felsstürzen erhoben worden. Extreme Ereignisse sind hierbei im Zusammenhang mit Anomalien in klimatischen Bedingungen wie extremen Hitzewellen oder extremen Niederschlagsereignissen zu erwarten. Trotz allem sind diesbezügliche Aussagen noch weitgehend theoretisch und mit großen Unsicherheiten behaftet. Zu wenig ist bis jetzt bekannt über die tatsächliche kleinmaßstäbige Permafrostverbreitung sowie über die zur Auslösung von Felsstürzen oder Murgängen beitragenden Faktoren. Mechanische Versuche und Modellierungen zeigen, dass mit dem Auftauen die Gesteinsstabilität um 25–50 % abnimmt und auch insbesondere eisgefüllte Klüfte stark an Scher- und Zugfestigkeit verlieren. Besseres Prozessverständnis und geeignete räumliche Daten sind notwendig um theoretisches Wissen in praktische Applikationen für die Abschätzung

* Jan-Christoph Otto, Universität Salzburg, Fachbereich Geographie und Geologie, jan-christoph.otto@sbg.ac.at.

Michael Krautblatter, Technische Universität München, Fachgebiet Hangbewegungen, michael.krautblatter@tum.de.

Katrin Sattler, Universität Wien, Institut für Geographie und Regionalforschung, katrin.sattler@univie.ac.at.

zukünftiger Risiken durch Massenbewegungen aus Permafrostgebieten umsetzen zu können. Gezieltes Temperaturmonitoring an als besonders kritische erachteten Felshängen könnte besseren Aufschluss über den Permafrostzustand geben sowie ein Schritt in Richtung Frühwarnung sein. Räumliche Analysen von vorbereitenden und auslösenden Faktoren sowie die Modellierung potenzieller Prozesse und Prozessketten im Permafrostbereich sind die Basis für die frühzeitige Planung von Schutz und Adaptionsmaßnahmen.

Abstract

The term »permafrost« refers to rock, debris and soil material, whose temperature stays below 0 °C for at least two consecutive years. Regional scale modelling results suggest that 1.7 % to 3.2 % of the area of Austria is potential permafrost area, restricted to the high-alpine areas of Vorarlberg, Tyrol, Salzburg, Carinthia and Styria.

As a temperature phenomenon, permafrost is highly susceptible to climatic changes including changes in solar radiation balances as well as thickness and timing of the snow cover appearance and melt. Rising air temperatures lead to a delayed warming of permafrost, increasing thickness of the active layer and increasing velocities of permanently frozen, ice-rich debris (so called rock glaciers). The presently observed destabilisation of rock walls, release of previously consolidated debris and the transport of debris towards critically inclined slopes points towards a future increase in rock slope failures and debris flows in permafrost areas. In certain areas, like the Mont Blanc Area, hundreds of recent rock falls already provide reliable data on the increasing activity of rock slope failures. Extreme events are likely to occur subsequent to heat waves or upon extreme precipitation events. Nevertheless, predictions are presently theoretical and include considerable uncertainties. Fine-scale permafrost distribution and the release mechanisms of rock slope failures and debris flows are still not fully understood. Mechanical experiments point towards a 25–50 % decrease in rock stability and especially shear strength and tensile strength of ice-filled fractures decrease significantly when warming at sub-zero temperatures or upon thaw.

A better process understanding and appropriately scaled spatial data are necessary to upscale theoretical knowledge for determining future risks in permafrost areas. A dedicated monitoring of temperatures at critical sites could provide valuable insights into permafrost systems and prepare early warning strategies. Spatial analysis of preparatory and triggering factors as well as the modelling of potential processes and process chains in permafrost zones are the basis for an early planning of protection and adaptation measures.

Kernaussagen

- Klimawandel-bedingte Erwärmung und Abtauen von alpinen Permafrostvorkommen kann einen signifikanten Beitrag zur Entstehung von gravitativen Massenbewegungen, wie Felsstürzen, Sackungen und Muren, leisten.
- Der Kenntnisstand über die tatsächliche Permafrostverbreitung, den aktuellen Permafrostzustand und dessen zukünftige Entwicklung in Hochgebirgstälern sowie über auslösende und vorbereitende Faktoren von Massenbewegungen muss verbessert werden.
- Die mechanischen Grundlagen der Destabilisierung liegen in der Festigkeitsabnahme von Fels, Deformierbarkeit von Eis in Klüften und verringerter Bruchfestigkeit an Fels-

Eiskontakten beim Auftauen. Die Übertragung der Laborerkenntnisse auf spezielle Gebirgssituationen ist derzeit in Erforschung.

- Wichtigste Handlungsempfehlung ist die frühzeitige Detektion von Permafrost in gefährdeten Hängen und im Umfeld von hochalpiner Infrastruktur. Auf Basis räumlicher Analysen von vorbereitenden und auslösenden Faktoren sowie der Modellierung potenzieller Prozesse und Prozessketten können Schutz und Adaptionsmaßnahmen frühzeitig geplant werden.

Key Points

- Climate-change induced warming and thawing of alpine permafrost can significantly contribute to the development of gravitational mass movements like rock slope failures and debris flows.
- Knowledge of the actual permafrost distribution, the current permafrost state and its future development in high mountain valleys, as well as triggering and preparatory factors of mass movements must be improved.
- Laboratory experiments show that failure mechanisms in rock walls relate to the reduction in intact rock strength, change in plasticity of ice in fractures and a reduced fracture toughness at the rock-ice contact zone during permafrost thawing. Transfer of laboratory findings to field settings is currently an active field of research.
- The most important recommendation for action is the early detection of permafrost in endangered slopes and in the surrounding of high alpine infrastructure. Spatial analyses of preparatory and triggering factors as well as the modelling of potential processes and process chains are required for implementation of risk reduction and adaptation measures at an early stage.

21.1 Einführung

Permafrost ist ein Temperaturphänomen, bei dem im Untergrund über mindestens zwei aufeinanderfolgende Jahre, jedoch meist über sehr lange Zeit (Jahrtausende und mehr) Temperaturen unter $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ herrschen. Diese Definition schließt somit alle Materialien ein, die den Untergrund aufbauen können, also Festgestein, Lockergestein, Boden und die darin enthaltenen Stoffe. Eis kann z. B. in Porenräumen oder in Form von Eislinsen vorhanden sein. Auch Reste von schuttbedeckten Lawinenkegeln oder kleinen Gletschern zählen dazu. Oberflächennah bildet sich im Sommer eine meist metertiefe Auftauschicht. Permafrostbedingungen herrschen vor allem in den hohen Breiten der Nordhalbkugel und in den Hochgebirgen der Welt. Im Gegensatz zu den Polargebieten ist die genaue Verbreitung von Permafrost im Gebirge nicht flächendeckend bekannt. Die Standortbedingungen für Permafrost im Gebirge sind sehr variabel. Ausschlaggebend ist hierfür das komplexe Relief und die daraus resultierend, kleinräumig stark variierenden Einflüsse von Solarstrahlung und Temperatur sowie der Schneedecke mit ihrer modifizierenden Funktion dieser

beiden klimatischen Faktoren. Außerdem spielt die Zusammensetzung des Untergrunds, ob Fels, grob- oder feinkörniges Lockergestein, eine entscheidende Rolle. Dort wo sich Eis im Lockermaterial anreichert und erhält, kann gefrorener Gesteinsschutt bei ausreichender Hangneigung und im Zusammenspiel mit weiteren Faktoren aufgrund der plastischen Verformbarkeit des Eises zu kriechen beginnen. Es entstehen häufig lavastromartigen Loben, die sogenannten Blockgletscher. Sie sind die größten und auffälligsten oberflächlichen Ausprägungen von Permafrostvorkommen im Hochgebirge und bilden sich häufig am Fuß von Felswänden und in Karen (Abbildung 01).



Abbildung 01: Der Blockgletscher im Ölgrubenkar, Kaunertal, Tirol (10.75765 O, 46.89378 N), ist schon seit mehr als 50 Jahren ein Untersuchungsobjekt (Krainer et al., 2012). Die Schuttmasse kriecht immer weiter in Richtung Karausgang. Die steile Front des Blockgletschers ist ein Anzeichen für andauernde Kriechaktivität.

Figure 01: The rock glacier in the Ölgrubenkar, Kaunertal, Tyrol (10.75765 O, 46.89378 N), has been studied for more than 50 years (Krainer et al., 2012). The debris mass is creeping towards the exit of the cirque. The steep frontal lobe of the rock glacier is an indicator for active movement.

Foto: J. Götz

Als Temperaturphänomen ist die Permafrostverbreitung vom Klimawandel beeinflusst. Steigende Lufttemperaturen wirken sich auch auf die Temperaturen im Untergrund aus. Als Konsequenz folgt, dass durch Permafrost beeinflusste

Felswände, Gipfel und Schutthalden, abhängig von ihrer Schneebedeckung, wärmer werden und vermehrt bis in große Tiefen auftauen. Gemessene Bohrlochtemperaturen in europäischen Gebirgen zeigen eine deutliche Erwärmung bis in 60–80 m Tiefe, die als Folge des Temperaturanstiegs seit der Kleinen Eiszeit interpretiert werden. Dadurch können Naturgefahrenprozesse, wie Felsstürze oder Muren, entstehen. Verstärkte Kriechbewegungen und Setzungerscheinungen sind zudem für die Stabilität von Bauten im Hochgebirge ein großes Problem; Dutzende Gebirgshütten und Seilbahninfrastrukturen sind hiervon betroffen. Besonders in den letzten zwei Dekaden hat die Frequenz von kleineren Felsstürzen zugenommen. Extreme Hitzesommer mit spektakulären Sturzereignissen, etwa 2003 am Matterhorn (Schweiz) oder 2017 am Piz Cengalo (Schweiz) mit 8 Todesopfern, haben die Thematik Gebirgsspermafrost und Naturgefahren in den Fokus der Öffentlichkeit und Forschung gerückt.

Permafrostbedingungen und deren Veränderungen entstehen vor allem durch konduktiven Wärmetransport (Wärmeleitung; Zenklusen Mutter et al., 2010). Die Übertragung von Wärme aus der Luft in den Untergrund wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Variable Oberflächenverhältnisse (Fels, Schutt, Schneebedeckung), inhomogene Untergrundbedingungen (Material, Klüfte, Porenräume, Eisgehalt) und Wasser im Untergrund wirken sich dämpfend oder verstärkend auf den Wärmetransport aus (Zhang et al., 2001; Schneider et al., 2012; Marmy et al., 2013). Dadurch bilden sich lokal sehr heterogene Temperaturbedingungen aus (Otto et al., 2012). In den Alpen sind die Untergrundtemperaturen, bis auf die höchsten Gipfelbereiche relativ warm, also nahe 0 °C.

Untergrundtemperaturen reagieren in der Regel mit einer zeitlichen Verzögerung auf Veränderungen der Lufttemperatur. Warme Sommertemperaturen führen beispielsweise erst nach einigen Wochen oder Monaten zu Reaktionen in oberflächennahen Felsschichten (siehe Abbildung 02; Hilbich et al., 2008; Zenklusen Mutter et al., 2010). In größerer Tiefe werden die Felstemperaturen von kurzfristigen Schwankungen nicht beeinflusst. Veränderungen, die dort auftreten, sind das Resultat länger andauernder Trends. Dieses Phänomen ist relevant für die Entstehung von Fels- oder Bergstürzen. Während oberflächennahe, kurzzeitige Temperaturerhöhungen zu kleineren Stürzen führen, entstehen große Ereignisse erst, wenn über einen längeren Zeitraum von Jahrzehnten oder Jahrhunderten die Temperatur zunimmt und Permafrost in großer Tiefe wärmer wird.

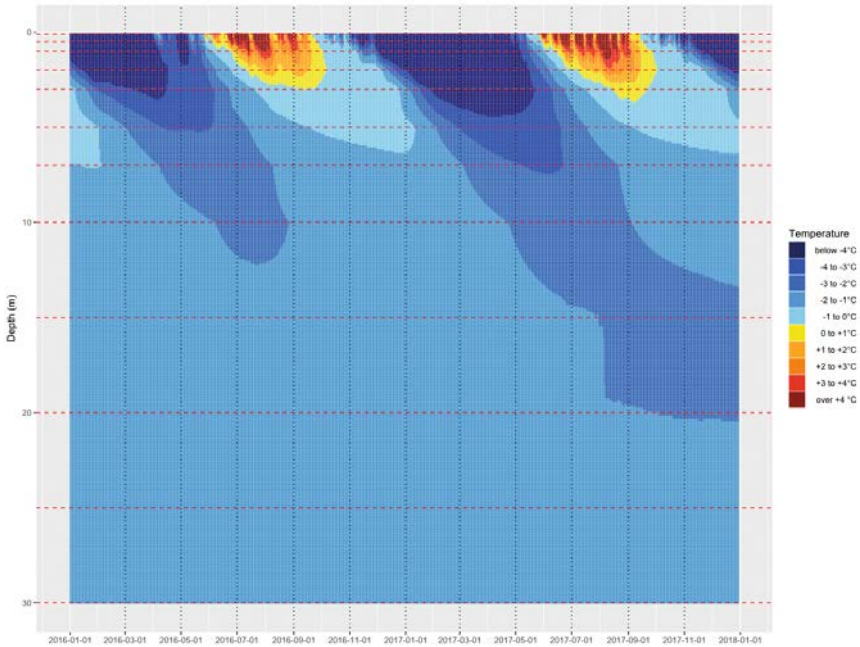


Abbildung 02: Verlauf der Felstemperatur in einem Bohrloch am Kitzsteinhorn, Hohe Tauern, Salzburg.

Figure 02: Rock temperature development in a borehole at the Kitzsteinhorn, Hohe Tauern, Salzburg.

Quelle: Georesearch GmbH

21.1.1 Permafrost und Extremereignisse

Extremereignisse im alpinen Permafrost entstehen einerseits durch kurzfristige Anomalien in den klimatischen Bedingungen, wie etwa extreme Hitze oder extreme Niederschläge, welche eine extreme Vergrößerung der Auftauschicht, die Auslösung von vermehrten Steinschlägen sowie die Beschleunigung von Kriechprozessen bedingen. Andererseits führen langfristige Trends zu tiefgründigen Temperaturveränderungen mit der Folge, dass extrem große Sturzeignisse auftreten können. Der Hitzesommer 2003 war, beispielsweise, durch erhöhte Mittel- und Extremwerte vor allem in den Gebirgslagen der Alpen charakterisiert (Rebetez, 2004). Die Folge war eine deutliche Zunahme der Auftauschicht gegenüber den Vorjahren (Gruber et al., 2004). Am Schilthorn in der Schweiz fand eine Verdopplung der Auftauschicht von 4 auf 8 Meter statt (Hilbich et al., 2008). Als Konsequenz dieses intensiven, oberflächennahen Auftauens ereignete sich eine Vielzahl an Felsstürzen im gesamten Alpenraum.

Auch Bewegungsraten von Blockgletschern nahmen in diesem Jahr enorm zu, wie Messungen an mehreren Blockgletschern in den Alpen gezeigt haben (Delaloye et al., 2008; Kellerer-Pirklbauer und Kaufmann, 2012; siehe Abbildung 03). Eine ähnliche Reaktion zeigten Blockgletscher alpenweit auch in den extrem warmen Sommern 2014 und 2015 (Hartl et al., 2016; PERMOS, 2016; Kenner et al., 2017; Bodin et al., 2018). Neben Hitzesommer können jedoch auch warme Winter, wie 2006/2007, zu direkte Konsequenzen in der Permafrost-dynamik (Felstemperaturen) führen (Krautblatter et al., 2010).

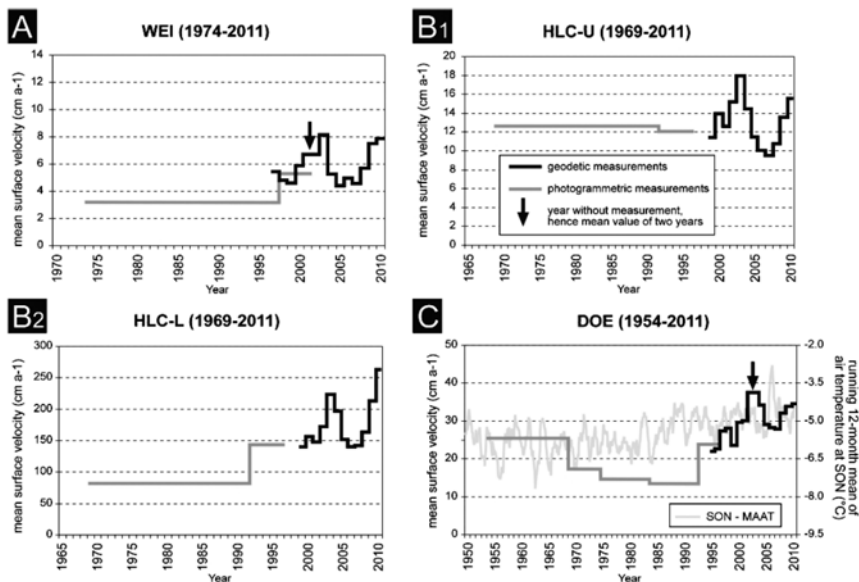


Abbildung 03: Entwicklung der Bewegungsraten verschiedener Blockgletscher in Österreich zwischen 1950 und 2010. WEI – Weissenkar, HLC – Hinteres Langtalkar, DOE – Dösenkar. **Figure 03:** Development of horizontal surface velocities of selected rock glaciers in Austria between 1950 and 2010. WEI – Weissenkar, HLC – Hinteres Langtalkar, DOE – Dösenkar. *Quelle:* Kellerer-Pirklbauer und Kaufmann, 2012

21.1.2 Permafrostforschung in Österreich

Permafrostforschung in Österreich konzentriert sich traditionell auf Arbeiten an Blockgletschern. Einige Blockgletscher, besonders in Tirol und Kärnten, werden schon seit den 1920er Jahren untersucht. Dabei liegt der Fokus auf Bewegungsraten, Aufbau und Eisgehalt sowie der hydrologischen und geochemischen Signifikanz von Blockgletschern (Lieb, 1996; Hausmann et al., 2007; Kellerer-Pirklbauer und Kaufmann, 2012; Krainer et al., 2012; Wagner et

al., 2016; Winkler, 2016; Kellerer-Pirklbauer und Kaufmann, 2018). Flächendeckende Informationen zur Blockgletscherverbreitung in Österreich liegen vor allem für die Hohen Tauern und Tirol vor (Lieb, 1996; Kellerer-Pirklbauer et al., 2012b; Krainer und Ribis, 2012); eine Gesamtverbreitung ist derzeit in Arbeit. Diese Daten gehen, als indirekter Nachweis für Permafrostbedingungen, in die Modellierung der Permafrostverbreitung ein. Andere Nachweise basieren vor allem auf weiteren indirekten Methoden, wie Geophysik, Bodenoberflächentemperaturen und Basistemperatur der winterlichen Schneedecke. Modelle für die Permafrostverbreitung gibt es in hoher Auflösung für die Hohen Tauern (Schrott et al., 2012), sowie mit geringerer Detailschärfe für den ganzen Alpenraum (Boeckli et al., 2012a) (siehe Kapitel 20.2). Direkte Messungen von Untergrundtemperaturen in Bohrlöchern finden derzeit am Hohen Sonnblick und am Kitzsteinhorn (Land Salzburg), sowie am Dachstein (Oberösterreich, Steiermark) statt (Hartmeyer et al., 2012; Schöner et al., 2012; Schnepfleitner et al., 2016). Diese Daten gehen in die globale Datenbank zu Permafrostbeobachtung als Teil der globalen Klima-beobachtungsprogramme ein (GTN-P 2018). Veränderungen im Permafrostbereich werden, neben den Blockgletscherbewegungen, zum einen über Oberflächenveränderungen bzw. Setzungen als Ausdruck von Eisschwund im Untergrund untersucht (Klug et al., 2017). Zum anderen findet ein Monitoring von steilen Felswänden statt, um die Höhe der Auftauschicht und die Felssturzaktivität im Permafrost im Umfeld von Seilbahnen und alpiner Infrastruktur zu überwachen (Hartmeyer et al., 2012; Keuschnig et al., 2017).

21.2 Permafrostverbreitung in Österreich

Flächenhafte Erkenntnisse über die Verbreitung von Permafrost in Österreich basieren auf empirisch-statistischen Modellen. Dabei werden direkte und indirekte Permafrostnachweise (Bohrlochtemperaturen, Bodenoberflächentemperaturen, Blockgletscher, Geophysik) statistisch und räumlich analysiert mit dem Ziel, einen Verbreitungsschlüssel von günstigen Geländepositionen zu generieren, an denen Permafrostbedingungen auftreten können (Schrott et al., 2012). Alternativ wird die räumliche Verbreitung von Klimavariablen, wie mittlere jährliche Lufttemperatur, potenzielle Solarstrahlung und mittlere jährliche Niederschlagssumme statistisch ausgewertet und je nach Oberflächenbeschaffenheit (Fels, Schutt) in ein räumliches Verbreitungsmodell übersetzt (Boeckli et al., 2012b). Beiden Ansätzen ist gemein, dass das Auftreten von Permafrost als Index einer nicht näher definierten Wahrscheinlichkeit formuliert wird, die aber keine statistische Wahrscheinlichkeit ist, sondern eher eine Art Flächenanteil pro Zelle oder eine Aussage zur möglichen Mächtigkeit des

Permafrostkörper (Boeckli et al., 2012b). Für die Hohen Tauern wurde das Modell Permakart 3.0 angewandt (Schrott et al., 2012). Für ganz Österreich liegen Daten des alpenweiten Modells APMOD vor (Boeckli et al., 2012b).

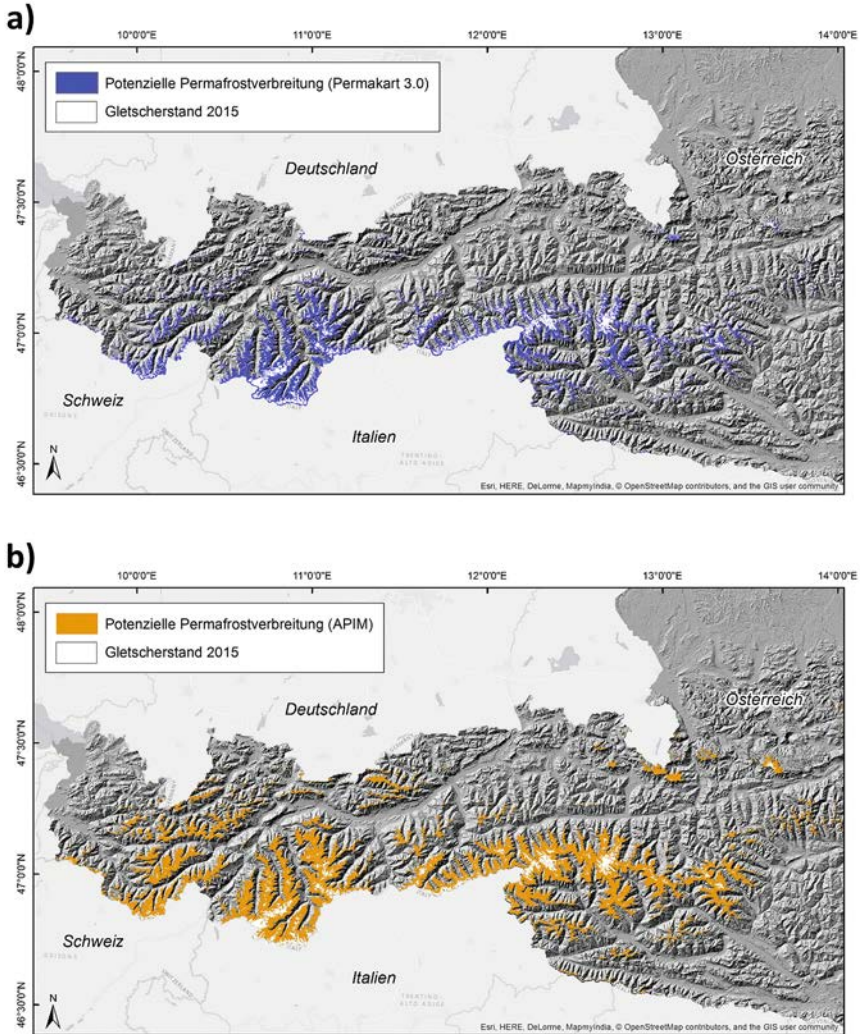


Abbildung 04: Potenzielle Permafrostverbreitung in Österreich abgeleitet mit dem Modell Permakart 3.0 (a) und APMOD (b).

Figure 04: Potential permafrost distribution in Austria, modelled by using the distribution model Permakart 3.0 (a) and APMOD (b).

Datenquelle DGM: <https://www.data.gov.at/>; *Modellierung*: basierend auf Schrott et al., 2012 (a); Boeckli et al., 2012a (b)

Zur Abschätzung der Permafrostverbreitung in den Hohen Tauern mittels Permakart 3.0 wurden mehr als 650 Datensätze zum Permafrostnachweis verwendet, die hauptsächlich aus BTS-Daten (Basistemperatur der winterlichen Schneedecke) und aus Geophysikdaten (Elektrische Widerstandsmessung, Georadar) bestehen. Das Modell verwendet ein digitales Geländemodell (DGM) mit einer 10 m Auflösung. Wendet man das Modell auf einen Datensatz für Gesamtösterreich an, wird eine Fläche von 1.400 km², bzw. 1,7 % der Landesfläche, als potenzielle Permafrostfläche modelliert (Abbildung 04a). Diese umfasst Gebirgsregionen in Nordlagen ab 2.400 m und Südlagen ab 3.000 m Meereshöhe. Diese Höhengrenzen wurden allerdings nur in den Hohen Tauern validiert und können in den übrigen Landesteilen deutlich abweichen.

Das Modell APMOD basiert auf einer alpenweiten Kompilation von Klimadaten und Permafrostnachweisen (Boeckli et al., 2012b). Die Datenauflösung (30 m DGM) und die Anzahl eingegangenen Validierungsdaten (74 für Österreich) ist geringer als bei Permakart 3.0. Im Vergleich dazu weist das Modell APMOD eine Fläche von 3.200 km², bzw. 3,2 % der österreichischen Landesfläche, als potenziellen Permafroststandort aus (Abbildung 04b).

Grundsätzlich sind beide Modelle nur Annäherungen an die Realität und mit großen, derzeit nicht zu quantifizierenden Unsicherheiten verbunden. Eine genaue Abgrenzung der Permafrostvorkommen ist damit nicht möglich. Wichtig ist auch zu bedenken, dass der Zeitraum des empirischen Nachweises im Gelände deutlich zurück liegt; in der Zwischenzeit können sich lokal bereits wieder deutliche Veränderungen eingestellt haben. Weiters geben die Modellierungen ausschließlich räumliche Aussagen wieder und enthalten keine Information über Temperaturverhältnisse oder die wirkliche vertikale Ausdehnung des Permafrostkörpers.

21.3 Permafrost und Naturgefahren

21.3.1 Entstehung von Fels- und Bergstürzen im Permafrostbereich

Das Zusammenspiel von Permafrost und Felsstabilität ist um einiges komplexer als die in den Medien oft lapidar verwendete Metapher »Permafrost hält wie ein Kleber den Fels zusammen« andeutet. Labor- und Feldstudien der letzten zehn Jahre zeigen, dass Permafrostbedingungen neben stabilisierenden Effekten auch als treibende Kräfte zum Gleichgewicht der Hangstabilität beitragen (Murton et al., 2006; Girard et al., 2013; Krautblatter et al., 2013). In mechanischen Tests zeigen sich vier relevante Versagensmechanismen: (i) Die Druck- und Zugfestigkeit intakten Gesteins nimmt mit Auftauen um 25 bis > 50 % ab; (ii) Die Bruchfestigkeit von Eis und Fels-Eiskontakten nimmt um eine zweistellige

Prozentzahl pro Grad Erwärmung (-5° bis 0°C) ab; (iii) Die duktile Deformierbarkeit von Eis in Klüften nimmt von -5° bis 0°C stark zu; (iv) Die Festigkeit von feinmaterialgefüllten Klüften nimmt von 5° bis 0°C stark ab (Krautblatter et al., 2013; Mamot et al., 2018). Gleichzeitig treten in degradierenden Permafrostfelsen hohe cryo- und hydrostatische Drücke auf und alpine Felswände befinden sich bereits oft in einem kritischen Spannungszustand (Krautblatter und Leith, 2015). Daraus ergeben sich nicht-lineare Zusammenhänge zwischen dem Temperaturregime im Untergrund und der Felsstabilität, auch wenn in besonders heißen Sommern vermehrt Felsstürze beobachtet wurden. Permafrostbedingungen können durchaus stabilisierende Eigenschaften auf Hänge haben. Mechanische Tests zeigen hierbei jedoch eine klare Temperaturabhängigkeit: Je wärmer die Temperatur einer gefrorenen Gesteinsprobe, desto leichter kann in künstlichen Scherversuchen ein Bruch im Gestein herbeigeführt werden (Krautblatter et al., 2013). Im Umkehrschluss bedeutet dies, dass extrem kalte Felsbereiche und eisgefüllte Klüfte einen höheren Scherwiderstand aufweisen als Bereiche nahe 0°C und somit eine höhere Stabilität zeigen. Eine deutliche Verminderung der Stabilität entsteht dabei nicht erst bei völligem Auftauen, also bei Felstemperaturen über 0°C . Bereits bei Temperaturerhöhungen im Minusbereich nehmen Bewegungen und Brüche im Fels rapide zu (Davies et al., 2000). Permafrosterwärmung in den Felswänden der Alpen kann daher eine negative physikalische Wirkung auf die Felsstabilität zugeschrieben werden. Zusätzlich können Eiswachstum in Klüften und Spalten (sog. Segregationeis) und das Auftreten von Frost-Tau-Zyklen zu erhöhtem Druck im Fels führen, und somit zu vorbereitenden Faktoren für Felsstürze werden. Daraus ergibt sich, dass nicht allein eine Temperaturerhöhung ausschlaggebend für die Entstehung von Fels- und Bergstürzen im Permafrostbereich ist, sondern oft eine meist unbekannt Anzahl an Faktoren das Ereignis vorbereitet und ausgelöst haben. Während kleinere Ereignisse ($< 100.000\text{ m}^3$) meist als Reaktion auf kurzfristige, extreme Temperaturerhöhungen (Hitzeperioden) entstehen und somit gehäuft in den Sommermonaten stattfinden, treten größere Stürze das ganze Jahr über auf (Luethi et al., 2015). Derzeit werden drei Mechanismen diskutiert wie ein Temperaturanstieg im Permafrost zur Auslösung von Sturzprozessen führen kann:

- 1) Erwärmung von Klufteis und Felskontakten durch konduktiven Wärmetransport. Hierbei wird mit zunehmender Tiefe ein zeitlicher Verzögerungseffekt angenommen, bis ein Temperaturimpuls in den Permafrostbereich vordringt. So lassen sich auch Felsstürze erklären, die im Hochwinter in Permafrostgebieten entstehen (Phillips et al., 2017).
- 2) Eindringendes Schmelzwasser in Klüften führt zum Auftauen von Eis im Untergrund und Aufbau von Klufwasserdruck und setzt somit die Stabilität herab.

- 3) Außerdem entsteht durch Temperaturveränderungen im Fels und den Klüften (Auftauen und Gefrieren) thermo-mechanischer Stress, welcher zu Hangversagen führen kann (Luethi et al., 2015).

In Österreich wurden bisher einige Felssturzereignisse direkt mit dem Vorhandensein oder Auftauen von Permafrostbedingungen in Verbindung gebracht, so zum Beispiel das kleine Bergsturzereignis 2007 an der Bliggspitze mit 1–1,5 Mio. m³ Felsmaterial, sowie verstärkte Steinschlag- und Blocksturzaktivität an zahlreichen Orten wie z. B. am Kitzsteinhorn mit Volumina bis zu mehreren Hundert m³ oder dem Mittleren Burgstall (Pasterzenkees, Hohe Tauern, Kärnten). Der Mittlere Burgstall (2933 m) ist ein Gipfel, der in der Kleinen Eiszeit von verschiedenen Zungen des Pasterzenkees umflossen wurde. Im Jahr 2007 ereigneten sich mehrere Felsstürze vom Südostgrat des Berges, die zusammen ein Volumen von ca. 56.000 m³ Material lieferten. Nachträgliche Messungen der Felsoberflächentemperatur oberhalb der Anrisszone zeigten, dass an dem Standort Permafrostbedingungen knapp unter 0 °C vorherrschten (Kellerer-Pirklbauer et al., 2012a). Meistens liegen aber keine direkten Nachweise für Permafrostvorkommen in den Anbruchgebieten vor, so dass Permafrost als Ursache oder Einfluss auf das Ereignis nicht belegbar ist. Ein Beispiel dafür ist der Felssturz am Kleinen Wiesbachhorn (3.283 m, Fuschertal, Hohe Tauern, Salzburg). Dort ereignete sich im Oktober 2017 ein Felssturz mit mehr als 150.000 m³ Gestein. Das Ereignis entstand in ca. 3.000 m Höhe an einem Südost-exponierten Hang. Die Geländedeposition befindet sich in einem Bereich wo, gemäß dem Verbreitungsmodell Permakart 3.0, Permafrostbedingungen möglich sind (Schrott et al., 2012). Bei dem Ereignis entstanden keinerlei Schäden, da die Sturzmasse in unbewohntem Gebiet niederging. Allerdings fiel das Gestein auf einen Gletscher, wodurch sich eine ca. 2 km lange Auslaufzone entwickelte. Viele Ereignisse fanden in unmittelbarer Umgebung zu noch existierenden Gletschern statt und weisen auf einen Kausalzusammenhang der Entstehung von Massenbewegungen zwischen dem Gletscherrückgang und der Permafrostverbreitung hin (siehe Beitrag 22 zu *Gletschergefahren* in diesem Band). Neben den Einflüssen der Permafrostbedingungen können hier auch Druckentlastungen nach Abschmelzen des Gletschereises zum Hangversagen beigetragen haben. Eine Trennung der jeweiligen vorbereitenden und auslösenden Faktoren ist in diesen Fällen schwierig. Auch dem Bergsturzereignis an der Bliggspitze 2007 gingen seit 2003 deutliche Veränderungen des aufliegenden Gletschers voraus, die von tiefer Spaltenbildung und dem Einleiten von Gletscherwasser angezeigt wurden. Es liegt nahe davon auszugehen, dass der vorher sehr steile kalte Gletscherteil sich stark erwärmt hatte und dadurch beim Erreichen von 0 °C an der Gletscher-Basis Wasser in den darunterliegenden, geklüfteten Fels eingeleitet hat, wodurch dieser tiefgreifend aufgetaut ist. Dies

zeigen auch Geophysikmessungen direkt nach dem Ereignis. Der Bergsturz an der Bliggspitze erodierte große Mengen Eis und die dabei ausgelöste Fels-Eis-Lawine verhielt sich deutlich mobiler als reine Bergsturzmassen, da aufgrund der hohen Energiefreisetzung das Gletschereis schnell zu Wasser wurde. Eine 2-Phasen (fest-flüssig) Modellierung zur Reichweitenbestimmung von Fels-Eislawinen wurde von Pudasaini und Krautblatter (2014) entwickelt und mit Zeitabschnitten der Fels-Eislawine an der Bliggspitze verglichen. Dieses Ereignis ist ein Beispiel für häufig auftretende Prozessketten im Hochgebirge. Neben der Kombination Felssturz-Gletscher-Fels/Eislawine sind vor allem Ereignisse im Zusammenhang mit Gletscheseen relevant (siehe Beitrag 22 zu *Gletschergefahren* in diesem Band). Sturzereignisse in Seen können zu katastrophalen Flutwellen führen, deren Reichweite und Schadenspotential weit über das Initialereignis hinausgehen. Neue Modellierungsansätze sind in der Lage diese Prozessketten und deren mögliche Folgen darzustellen und werden als Planungstool weltweit eingesetzt (Schneider et al., 2014; Mergili et al., 2018).

21.3.2 Entstehung von Murgängen im Permafrostbereich

Die Entstehung von Murgängen kann auf verschiedene Weise durch das Vorhandensein von Permafrost begünstigt werden. Permafrostvorkommen in Lockersedimenten sind generell eisgesättigt oder eisübersättigt, d. h. die Hohlräume zwischen dem Substrat sind zur Gänze mit Eis gefüllt. Die Oberfläche des Permafrostkörpers, die sogenannte Permafrosttafel, wirkt dadurch als wasserundurchlässige Grenzfläche. Plötzlicher Niederschlagseintrag, wie etwa bei einem Sommergewitter, kann zur Übersättigung der dem Permafrostkörper aufliegenden sommerlichen Auftauschicht bzw. von direkt hangabwärts gelegenen Sedimenten führen und dadurch die Auslösung eines Murgangs bedingen (Zimmermann und Haerberli, 1992; Schneuwly-Bollschweiler und Stoffel, 2012). Kriechbewegungen von aktiven Blockgletschern können Sedimente in Bereiche mit kritischen Hangneigungen, wie beispielsweise markanten Geländestufen oder Karschwellen, verfrachten, wo sich Murgänge leichter entwickeln können (Lugon und Stoffel, 2010). Feldbeobachtungen der Begünstigung der Murgangentstehung durch gegenwärtige Permafrostvorkommen in Lockersedimenten oder durch Blockgletscherkriechen stammen bis dato vorrangig aus Einzugsgebieten in Frankreich, Norditalien und insbesondere aus dem Mattertal in den Schweizer Alpen (Zischg et al., 2011). In Österreich sind ca. 10 % der in der Ereignisdatenbank des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV) dokumentierten Murgänge mit Schadwirkung in Einzugsgebieten mit mehr als 5 % Permafrostvorkommen entstanden (Kaitna und Huber, 2017). In diesen Einzugsgebieten treten Murgänge mit größerer Fre-

quenz, aber geringerer Magnitude auf als in Einzugsgebieten ohne Permafrost. Permafrostvorkommen sind hier jedoch neben steilem Relief und intensiver Frostverwitterung nur einer der möglichen begünstigenden Faktoren für erhöhte Aktivität in diesen hochalpinen periglazialen Gebieten.

Auch ist derzeit kein langfristiger Trend für Muren in österreichischen Permafrostgebieten beobachtbar, wie er z. B. aus der Schweiz berichtet wurde (Kaitna und Huber, 2017). Eine potenzielle Zunahme in Frequenz und Magnitude von Murgängen wird jedoch auch hier durch das klimabedingte Abtauen von Permafrostvorkommen in Lockersedimenten vermutet (z. B. APCC, 2014). Lockersedimentkörper, wie Schutthalden, Blockgletscher oder Moränen, welche vormals durch Eis gebunden waren, werden durch Abschmelzen als Materialquellen für gravitative Prozessen verfügbar gemacht. Ein solcher Zusammenhang wird bei der seit Sommer 2005 beobachteten Zunahme an Murgängen aus dem hochalpinen Sattelkar im Obersulzbachtal, Salzburg, vermutet (Anker et al., 2016; Otto et al., 2018; siehe Abbildung 05). Das Sattelkar liegt zwischen 2.130 und 2.730 m Meereshöhe und ist geprägt von Moränenschutt und Felssturzablagerungen von den umgebenden Granitgneiswänden. Die topografische Lage, Höhe und westliche Exposition lassen auf nur sporadisches Permafrostvorkommen in den obersten Bereichen schließen. Seit 2003 wird eine Zunahme an Massenverlagerungsprozessen beobachtet, wobei sich die Lockermaterialbedeckung des Karbodens rückschreitend in Bewegung gesetzt hat. Die glazialen und periglazialen Ablagerungen im Kar rutschen auf der vermutlich glatten Felsoberfläche mit Bewegungsraten von bis zu 30 m/a in Richtung Karausgang. Dadurch entsteht eine aktive Materialquelle, die zur Bildung von Murgängen aus dem Sattelkar führt. Im August 2014 löste sich während eines Starkregenereignisses ein Murgang von 170.000 m³, welcher den Obersulzbach verlegte und Fahrzeuge beschädigte. Im Unterlauf traten zusammen mit einer generellen Hochwassersituation im Obersulzbachtal weitere schwerwiegende Verwüstungen auf. Die Materialverfügbarkeit für die Murgangentstehung kann zuletzt auch durch erhöhte Felssturzaktivität aus tauenden Permafrostfelswänden begünstigt werden (siehe Kapitel 21.3.1). Generell ist eine Abschätzung und Dokumentation dieses Zusammenhangs schwierig, da betroffene hochalpine periglaziale Einzugsgebiete aufgrund steilem Reliefs und intensiver Frostverwitterung generell hohe Sturzaktivität erfahren. Vermehrtes Auftreten von Extremereignisse durch Prozessverkettungen, wie beispielsweise im August 2017 in Graubünden, Schweiz, wo 2–3 Mio. m³ Fels vom Piz Cengalo auf einen Gletscher stürzten und danach als Murgang das Dorf Bondo verschütteten (Amann et al., 2018), sind jedoch durchaus als realistische Gefahren einzuschätzen.



Abbildung 05: Schuttablagerungen eines Murgangs im August 2014 im Obersulzbach führten zur Verlegung des Bachbetts.

Figure 05: Deposits of a debris flow that entered the Obersulzbach in August 2014 caused the displacement of the streambed.

Foto: M. Keuschnig

21.4 Permafrost und Klimawandel – mögliche zukünftige Entwicklungen

Alpenweit haben Permafrosttemperaturen im letzten Jahrzehnt zugenommen (PERMOS, 2016; siehe Abbildung 06). Felsbereiche scheinen sich dabei stärker zu erwärmen als Lockermaterial oder Boden. Kältere Permafrosttemperaturen steigen zudem stärker an als wärmere. Dies wird auf den Energieverbrauch durch das Schmelzen des Bodeneises zurückgeführt, der eine Temperaturänderung nahe $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ verzögert. Im Alpenraum liegen die Bohrlochtemperaturen zwischen 0 ° und $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Haeberli et al., 2010; Schöner et al., 2012). Zwischen 1990 und 2010 ist die Temperatur in alpinen Bohrlöchern in 20 m Tiefe um $0\text{--}0,4$ Grad Celsius angestiegen (Vaughan, 2013). Im Zusammenhang mit den beobachteten zunehmenden Lufttemperaturen in den Alpen seit den 1980er Jahren deutet dies auf steigende Raten der Permafrosterwärmung auch in Österreich hin (APCC, 2014). Auch die Mächtigkeit der Auftauschicht steigt im Alpenraum sukzessive an. Hierbei wird eine hohe interannuelle Variabilität beobachtet, sodass sich einzelne extrem warme Sommer in deutlich mächtigeren Auftauschichten widerspiegeln (Gruber und Haeberli, 2007; Hilbich et al., 2008). Als weitere Folge der Erhöhung der Permafrosttemperaturen verringert sich auch die räumliche Ausdehnung der Permafrostgebiete, wenn Bereiche dauerhaft auftauen. Physikalische Modellierungen der Energiebilanz im Untergrund zeigen deutlich, dass Temperaturerhöhungen zur Reduzierung des Permafrostbereichs führen und die Reliefposition eine entscheidende

Rolle spielt (Nötzli et al. 2007). Flächenhafte Analysen wie sich die Permafrostverbreitung in den Alpen verändert hat, oder verändern wird, gibt es derzeit nicht.

Veränderungen im Temperaturregime haben auch Auswirkungen auf die Bewegung von Blockgletschern. Bewegungsraten sind im Vergleich zu den 1990er Jahren in den letzten Jahren um den Faktor 2–10 erhöht, von wenigen Dezimetern hin zu mehreren Metern pro Jahr (Hartl et al., 2016; Abbildung 07). Neben den Bewegungsraten zeigen sich in den letzten Jahren auch Hinweise auf Destabilisierungen der Blockgletscher in Form von aufgehenden Rissen und Rutschungen im Zungenbereich.

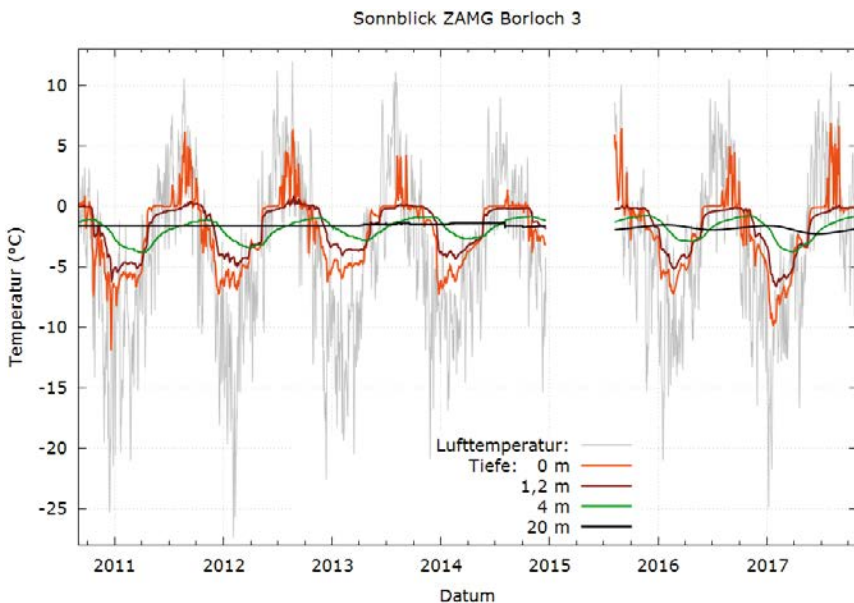


Abbildung 06: Verlauf der Felstemperatur im Bohrloch 3 am Hohen Sonnblick, Hohe Tauern, Salzburg.

Figure 06: Rock temperature development in borehole 3 at the Hoher Sonnblick, Hohe Tauern, Salzburg.

Quelle: C. Riedl, ZAMG

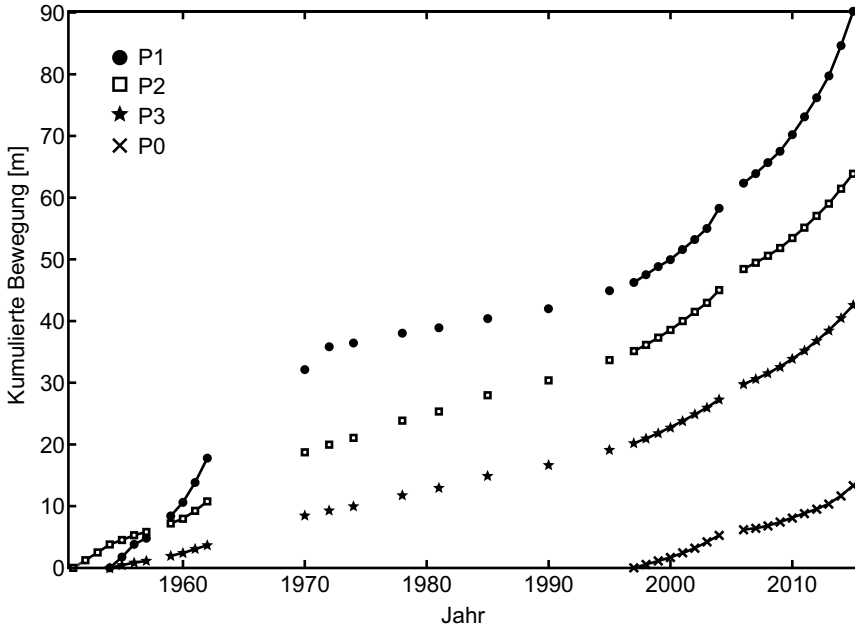


Abbildung 07: Kumulative Bewegungsraten von verschiedenen Messlinien (P0-3) auf dem Äußeren Hochebenenkar Blockgletscher, Ötztal, Tirol.

Figure 07: Cumulative surface movement at selected measure lines (P0-3) on the Äußeren Hochebenenkar rock glacier, Ötztal, Tyrol.

Quelle: geändert nach Hartl et al., 2016

21.5 Einschätzung des Sachstandes und Unsicherheiten

Basierend auf aktuellen Klimaprojektionen für den Alpenraum, Feldbeobachtungen der fortschreitenden Reaktion von Permafrostvorkommen auf Temperatur- und Niederschlagsänderungen und der aufgezeigten Zusammenhänge zwischen Permafrost und Naturgefahren gehen Experten von einer möglichen zukünftigen Zunahme an Massenbewegungen aus Permafrostgebieten aus, die sich heute in einigen Gebieten bereits andeutet (APCC, 2014). Aufgrund der schnellen und starken Veränderungen der Kryosphäre besteht die Möglichkeit, dass bestehende Frequenz-Magnituden Beziehungen nicht für die Abschätzung zukünftiger Ereignisse herangezogen werden können. Besonders bei der Verkettung von Prozessen (siehe auch Beitrag 24 zu *Multi-Hazards und Kaskadeneffekte* in diesem Band), z. B. im Zusammenhang mit Gletscherseen, sind Extremereignisse von bisher nicht dokumentierter Magnitude möglich (Haerberli et al., 2017). Beniston et al. (2018) betonen jedoch zurecht, dass Aussagen

diesbezüglich noch weitgehend theoretisch und mit großen Unsicherheiten behaftet sind. Viele beitragende Faktoren sind noch wenig bekannt oder verstanden und eine Abschätzung möglicher zukünftiger Auswirkungen für Siedlungen und Infrastruktur, vor allem auf der für Raumplaner und Entscheidungsträgern wichtigen lokalen Maßstabsebene, sind in der Regel derzeit nicht möglich. Alleine die Frage nach der kleinräumigen aktuellen Permafrostverbreitung innerhalb eines Einzugsgebiets stellt nach wie vor eine große Herausforderung dar (Etzelmüller, 2013). Schon statische (d. h. zeitunabhängige, Istzustand) und noch viel mehr dynamische Permafrostmodelle für Felswände oder schuttbedeckte Hänge benötigen neben Informationen zu Oberflächenmaterial und Schneedeckenverteilung auch räumliche Daten zu physikalischen Eigenschaften des Untergrunds, wie Wärmeleitfähigkeit, Klüftung, Porosität oder Eisgehalt. Vor allem der Einfluss von eindringendem Wasser ins Kluftsystem eines Permafrostkörpers, z. B. bei der Schneeschmelze oder bei Regen ist eine große Herausforderung bei der Modellierung der Untergrundreaktionen auf Erwärmung. Die Erfassung räumlicher Daten zu Untergrundeigenschaften stellt derzeit eine aktive Front der Permafrostforschung dar (Beniston et al., 2018). Verlässliche räumliche Daten zu Permafrostmächtigkeit und der zukünftigen Entwicklung von Bodentemperaturen sind essenzielle Eingangsdaten zu dynamischen prozess-orientierten Permafrostmodellen. Mit GIS-basierten räumlichen Analysen von kritischen Flankenneigungen und Permafrosttemperaturen (z. B. Fischer et al., 2012) kann schon heute die potenzielle zukünftige Anfälligkeit für Massenbewegungen grob abgeschätzt werden. Solche räumliche Information hilft bei der Bestimmung von zukünftig möglichen Hotspots und entsprechender Priorisierung weitergehender Analysen.

Direkte Messungen aus Bohrlöchern, welche zum einen Aufschluss über die Untergrundkomposition, zum anderen Aufschluss über die aktuelle Untergrundtemperatur geben, erteilen dabei wichtige Auskunft über den aktuellen Zustand von entsprechenden Permafrostvorkommen. Nicht zuletzt sind jedoch auch Massenbewegungen wie Bergstürze, Felsstürze und Muren selbst Resultate des komplexen Zusammenspiels vorbereitender und auslösender Faktoren (siehe Beitrag 16 zu *Felsgleitung*, *Felslawine*, *Erd-/Schuttstrom*, Beitrag 17 zu *Steinschlag und Felsturz* und Beitrag 19 zu *Muren* in diesem Band). Das sich verbessernde grundlegende Verständnis der beitragenden Prozesse und Faktoren sowie geeignete räumliche Daten erlauben derzeit erste Benchmark-Modellierungen, die progressives Felsversagen reproduzieren können und die nun für Risikobewertungen umgesetzt werden müssen. Damit können dann zukünftige Auswirkungen für Siedlungen und Infrastruktur durch das klimabedingte Abtauen von Permafrostvorkommen abgeschätzt werden. Für eine Bedrohung durch Muren liegen solche Modelle bislang nicht vor.

21.6 Handlungsoptionen und Risikomanagement in Permafrostgebieten

Die Wissenschaftlergruppe »GAPHAZ« (Joint Standing Group on Glacier and Permafrost Hazards in High Mountains of the International Association of Cryospheric Sciences (IACS) and the International Permafrost Association (IPA)) hat kürzlich ein technisches Richtlinienpapier herausgegeben, dass die Einschätzung von Gefahrensituation und Risiko für diverse Permafrostgefahren im Hochgebirge schematisiert (www.gaphaz.org). Dort wird die Naturgefahrenereinschätzung für (i) Felsstürze/Bergstürze, (ii) Eislawinen, (iii) Gletscherseeausbrüche, (iv) Murgänge und (v) »On Site Permafrost Hazards« also solche unter alpiner Infrastruktur en detail beschrieben und die Vorgehensweise für das Impact Assessment vorgeschlagen. Genereller Unterschied ist, dass bei (v) On Site Hazards vor allem der Standort der Infrastruktur durch Absenkung, differentielles Bodenkriechen und um sich greifende Felsstabilität bedroht ist, wie das in Österreich derzeit bei mehreren Gebirgshütten und Seilbahninfrastrukturen bereits zu beobachten ist. Bei (i) bis (iv) sind Gebiete außerhalb des Startgebiets bzw. Permafrostvorkommen durch schnelle Massenbewegungen, Eislawinen und Flutwellen bedroht. Deswegen kommt hier dem »Impact Assessment« besondere Bedeutung zu.

Grundlage für Planungs- und Managementstrategien im Bereich Permafrost sind detaillierte Kenntnisse zur Permafrostverbreitung sowie der Permafrosttemperatur, da nur so festgestellt werden kann, ob (1) Permafrostbedingungen ein Faktor für die Stabilität von Fels und Lockermaterial sind und (2) in welchem Temperaturzustand Permafrost vorliegt. Aufgrund der technischen und logistischen Einschränkungen ist eine flächendeckende Messung von Permafrosttemperaturen nicht möglich. Als Handlungsoption folgt daraus, dass die potenzielle, flächendeckende Verbreitung für Österreich durch eine Modellierung möglichst genau abgeschätzt und in Form von Karten/WebGIS dokumentiert werden sollte. Diese Modellierung sollte möglichst viele direkte und nur geprüfte indirekte Nachweise als Datengrundlage enthalten. Aufgrund der zunehmenden Lufttemperaturen ist es notwendig diese Modellierung im Abstand von 10 Jahren zu wiederholen und die Datengrundlage zu aktualisieren. Die Verbreitungskarte ist dann als Planungsinstrument an die Landesbehörden und Ingenieurbüros weiterzugeben. Auch für eine räumliche Analyse des Impact Assessment sind Verbreitungsmodelle eine wichtige Basis. Geeignete Modellierungswerkzeuge liegen vor und müssen für eine räumliche Analyse von möglichen Ereignis- und Schadensszenarien angewandt werden. Als Beispiele seien hier die Ausbreitung von Muren aus Permafrostgebieten oder die potenzielle Ausbreitung von Felsstürzen oder Gletscherseeausbrüchen mit Auswir-

kungen bis in die Täler genannt. Sowohl zur auftaubedingten Destabilisierung sowie zu den Auslaufweiten gibt es verschiedene Modellansätze (Krautblatter et al. 2013; Pudasaini und Krautblatter 2014), die realitätsnahe Voraussagen über den potenziellen Impact liefern können. Durch den Einsatz von Intensitätsszenarien können Unsicherheiten aufgrund der zukünftigen Klima- und Umweltveränderung im Impact Assessment berücksichtigt werden. Fernerkundungsansätze sowie lokale geotechnische und geophysikalische Beobachtung ermöglichen es Bedingungen in den Startgebieten bzw. in potenziellen On Site Gefahrengebieten zu überwachen und Aussagen über das erwartete Schadensausmaß und den Schadenszeitpunkt zu treffen.

An Hotspots mit alpiner Infrastruktur ist ein hochaufgelöstes Monitoring der Permafrostdynamik erforderlich. Hotspots sind zum Beispiel stark frequentierte Seilbahnen, Gipfelstationen, sowie Berghütten. Die Ausweisung der Hotspots unterliegt dabei den Betreiber*innen und den Landesgeolog*innen. In Wert gesetzt werden die Monitoringdaten dann durch eine Umsetzung der Temperaturveränderungen in mechanische Vorhersagen durch Labormessungen und kleinräumige Prozessmodelle zur Hangstabilität. Geotechnische und geophysikalische Untersuchungen an Infrastrukturstandorten mit Permafrost können zu verlässlichen Aussagen über die zukünftige mechanische Entwicklung kombiniert werden und die Planung von Infrastrukturprojekten in Bezug auf zukünftige Permafrostveränderungen deutlich verbessern.

Zunehmende Bewegungsraten und beschleunigte Vorstöße der Blockgletscher werden zu einer Vergrößerung der Schuttverfügbarkeit an Karschwellen führen. Zur Abschätzung zukünftiger Muraktivität müssen Blockgletscherkataster diesen Aspekt aufgreifen und durch die Analyse der Frontposition potenziell gefährdende Blockgletscher ausweisen, die zum einen große Bewegungsraten und zum anderen nur noch wenig Abstand der Blockgletscherfront zur Karschwelle aufweisen.

Eine Zunahme an Massenbewegungsereignissen oder eine Vergrößerung der involvierten Magnituden durch das Auftauen von Permafrost kann die bestehende Frequenz-Magnituden Beziehung verändern. Da diese als Planungsinstrument für die Bemessung von Schutzbauwerken verwendet werden, müssen sie in Permafrostgebieten wiederholt neu berechnet und entsprechende Bemessungsgrenzen angepasst werden. Das impliziert nicht nur die Anwendung dieser neuen Grenzwerte bei Neuplanungen, sondern auch die Überprüfung bereits existierender Bauwerke, damit diese ihre Schutzfunktion auch unter geänderten Bedingungen erhalten.

Literatur

- Amann, F., Kos, A., Phillips, M., Kenner, R., 2018. The Piz Cengalo Bergsturz and subsequent debris flows. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 20, S. 14700.
- Anker, F., Fegerl, L., Hübl, J., Neumayr, F., Keuschnig, M., Kaitna, R., 2016. Geschiebetransport in Gletscherbächen der Hohen Tauern: Beispiel Obersulzbach. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 177, S. 86–96.
- APCC, 2014. Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014. Austrian Assessment Report AAR14. Austrian Panel on Climate Change, Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 1096 S.
- Beniston, M., Farinotti, D., Stoffel, M., Andreassen, L.M., Coppola, E., Eckert, N., Fantini, A., Giacomoni, F., Hauck, C., Huss, M., Huwald, H., Lehning, M., López-Moreno, J.I., Magnusson, J., Marty, C., Morán-Tejedá, E., Morin, S., Naaim, M., Provenzale, A., Rabatel, A., Six, D., Stötter, J., Strasser, U., Terzago, S., Vincent, C., 2018. The European mountain cryosphere: a review of its current state, trends, and future challenges. *The Cryosphere*, 12(2), S. 759–794. DOI: 10.5194/tc-12-759-2018.
- Bodin, X., Thibert, E., Sanchez, O., Rabatel, A., Jaillet, S., 2018. Multi-Annual Kinematics of an Active Rock Glacier Quantified from Very High-Resolution DEMs: An Application-Case in the French Alps. *Remote Sensing*, 10(4). DOI: 10.3390/rs10040547.
- Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S., Noetzli, J., 2012a. Permafrost distribution in the European Alps: Calculation and evaluation of an index map and summary statistics. *Cryosphere*, 6(4), S. 807–820. DOI: 10.5194/tc-6-807-2012.
- Boeckli, L., Brenning, A., Gruber, S., Noetzli, J., 2012b. A statistical approach to modelling permafrost distribution in the European Alps or similar mountain ranges. *The Cryosphere*, 6(1), S. 125–140. DOI: 10.5194/tc-6-125-2012.
- Davies, M.C.R., Hamza, O., Lumsden, B.W., Harris, C., 2000. Laboratory measurement of the shear strength of ice-filled rock joints. *Annals of Glaciology*, 31, S. 463–467. DOI: 10.3189/172756400781819897.
- Delaloye, R., Perruchoud, E., Avian, M., Kaufmann, V., Bodin, X., Hausmann, H., Ikeda, A., Käab, A., Kellerer-Pirklbauer, A., Krainer, K., Lambiel, C., Mihajlovic, D., Staub, B., Roer, I., Thibert, E., 2008. Recent Interannual Variations of Rock Glacier Creep in the European Alps, Ninth International Conference on Permafrost, Fairbanks, Alaska, S. 343–348.
- Etzelmueller, B., 2013. Recent Advances in Mountain Permafrost Research. *Permafrost and Periglacial Processes*, 24(2), S. 99–107. DOI: 10.1002/ppp.1772.
- Fischer, L., Purves, S.R., Huggel, C., Noetzli, J., Haeberli, W., 2012. On the influence of topographic, geological and cryospheric factors on rock avalanches and rockfalls in high-mountain areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, S. 241–254. DOI: 10.5194/nhess-12-241-2012.
- Girard, L., Gruber, S., Weber, S., Beutel, J., 2013. Environmental controls of frost cracking revealed through in situ acoustic emission measurements in steep bedrock. *Geophysical Research Letters*, 40(9), S. 1748–1753. DOI: 10.1002/grl.50384.
- Gruber, S., Haeberli, W., 2007. Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 112(F2). DOI: 10.1029/2006JF000547.

- Gruber, S., Hoelzle, M., Haeberli, W., 2004. Permafrost thaw and destabilization of Alpine rock walls in the hot summer of 2003. *Geophysical Research Letters*, 31(13). DOI: 10.1029/2004GL020051.
- GTN-P, 2018. Homepage Global terrestrial network for permafrost. <https://gtnp.arcticportal.org/> [15. 10. 2018].
- Haeberli, W., Noetzli, J., Arenson, L., Delaloye, R., Gärtner-Roer, I., Gruber, S., Isaksen, K., Kneisel, C., Krautblatter, M., Phillips, M., 2010. Mountain permafrost: development and challenges of a young research field. *Journal of Glaciology*, 56(200), S. 1043–1058. DOI: 10.3189/002214311796406121.
- Haeberli, W., Schaub, Y., Huggel, C., 2017. Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges. *Geomorphology*, 293, S. 405–417. DOI:10.1016/j.geomorph.2016.02.009.
- Hartl, L., Fischer, A., Stocker-Waldhuber, M., Abermann, J., 2016. Recent speed-up of an Alpine rock glacier: an updated chronology of the kinematics of Outer Hochebenkar rock glacier based on geodetic measurements. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 98(2), S. 129–141. DOI: 10.1111/geoa.12127.
- Hartmeyer, I., Keuschnig, M., Schrott, L., 2012. A scale-oriented approach for the long-term monitoring of ground thermal conditions in permafrost-affected rockfaces, Kitzsteinhorn, Hohe Tauern range, Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105(2), S. 128–139.
- Hausmann, H., Krainer, K., Bruckl, E., Mostler, W., 2007. Internal structure and ice content of reichenkar rock glacier (Stubai alps, Austria) assessed by geophysical investigations. *Permafrost and Periglacial Processes*, 18(4), S. 351–367. DOI: 10.1002/ppp.601.
- Hilbich, C., Hauck, C., Hoelzle, M., Scherler, M., Schudel, L., Völksch, I., Vonder Mühl, D., Mäusbacher, R., 2008. Monitoring mountain permafrost evolution using electrical resistivity tomography: A 7-year study of seasonal, annual, and long-term variations at Schilthorn, Swiss Alps. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 113(F1). DOI: 10.1029/2007JF000799.
- Kaitna, R., Huber, T., 2017. Debris flow activity in permafrost regions in Austria during the 20th century. In: M. Mikos, N. Casagli, Y. Yin, K. Sassa (Hrsg.), *Advancing Culture of Living with Landslides*. Springer International Publishing, Cham, S. 421–427. DOI: 10.1007/978-3-319-53485-5.
- Kellerer-Pirklbauer, A., Kaufmann, V., 2012. About the relationship between rock glacier velocity and climate parameters in central Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105(2), S. 94–112.
- Kellerer-Pirklbauer, A., Kaufmann, V., 2018. Deglaciation and its impact on permafrost and rock glacier evolution: New insight from two adjacent cirques in Austria. *Science of the Total Environment*, 621, S. 1397–1414. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.10.087.
- Kellerer-Pirklbauer, A., Lieb, G.K., Avian, M., Carrivick, J., 2012a. Climate change and rock fall events in high mountain areas: numerous and extensive rock falls in 2007 at Mittlerer Burgstall, Central Austria. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 94(1), S. 59–78. DOI: 10.1111/j.1468-0459.2011.00449.x.
- Kellerer-Pirklbauer, A., Lieb, G.K., Kleinfürchner, H., 2012b. A new rock glacier inventory of the Eastern European Alps. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105(2), S. 78–93.

- Kenner, R., Phillips, M., Beutel, J., Hiller, M., Limpach, P., Pointner, E., Volken, M., 2017. Factors Controlling Velocity Variations at Short-Term, Seasonal and Multiyear Time Scales, Ritigraben Rock Glacier, Western Swiss Alps. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(4), S. 675–684. DOI: 10.1002/ppp.1953.
- Keuschnig, M., Krautblatter, M., Hartmeyer, I., Fuss, C., Schrott, L., 2017. Automated Electrical Resistivity Tomography Testing for Early Warning in Unstable Permafrost Rock Walls Around Alpine Infrastructure. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(1), S. 158–171. DOI: 10.1002/ppp.1916.
- Klug, C., Rieg, L., Ott, P., Mössinger, M., Sailer, R., Stötter, J., 2017. A Multi-Methodological Approach to Determine Permafrost Occurrence and Ground Surface Subsidence in Mountain Terrain, Tyrol, Austria. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(1), S. 249–265. DOI: 10.1002/ppp.1896.
- Krainer, K., Kellerer-Pirklbauer, A., Kaufmann, V., Lieb, G.K., Schrott, L., Hausmann, H., 2012. Permafrost research in Austria: History and recent advances. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105(2), S. 2–11.
- Krainer, K., Ribis, M., 2012. A Rock Glacier Inventory of the Tyrolean Alps (Austria). *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105(2), S. 32–47.
- Krautblatter, M., Funk, D., Günzel, F.K., 2013. Why permafrost rocks become unstable: a rock-ice-mechanical model in time and space. *Earth Surface Processes and Landforms*, 38(8), S. 876–887. DOI: 10.1002/esp.3374.
- Krautblatter, M., Leith, K., 2015. Chapter 9: Glacier- and permafrost-related slope instabilities. In: C. Huggel, M. Carey, J. Clague, A. Kääb (Hrsg.), *The High-Mountain Cryosphere*. Cambridge University Press, S. 147–165. <http://dx.doi.org/10.1017/CBO9781107588653.009>.
- Krautblatter, M., Verleysdonk, S., Flores-Orozco, A., Kemna, A., 2010. Temperature-calibrated imaging of seasonal changes in permafrost rock walls by quantitative electrical resistivity tomography (Zugspitze, German/Austrian Alps). *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 115, F02003. DOI: 10.1029/2008JF001209.
- Lieb, G.K., 1996. Permafrost und Blockgletscher in den östlichen österreichischen Alpen. *Zeitschrift für Geomorphologie*. Neue Folge 35.
- Luethi, R., Gruber, S., Ravel, L., 2015. Modelling transient ground surface temperatures of past rockfall events: towards a better understanding of failure mechanisms in changing periglacial environments. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 97(4), S. 753–767. DOI: 10.1111/geoa.12114.
- Lugon, R., Stoffel, M., 2010. Rock-glacier dynamics and magnitude-frequency relations of debris flows in a high-elevation watershed: Ritigraben, Swiss Alps. *Global and Planetary Change*, 73(3), S. 202–210.
- Mamot, P., Weber, S., Schröder, T., Krautblatter, M., 2018. A temperature- and stress-controlled failure criterion for ice-filled permafrost rock joints. *The Cryosphere Discussions*, S. 1–31. DOI: 10.5194/tc-2018-57.
- Marmy, A., Salzmann, N., Scherler, M., Hauck, C., 2013. Permafrost model sensitivity to seasonal climatic changes and extreme events in mountainous regions. *Environmental Research Letters*, 8(3), 035048.
- Mergili, M., Emmer, A., Juřicová, A., Cochachin, A., Fischer, J.-T., Huggel, C., Pudasaini, S.P., 2018: How well can we simulate complex hydro-geomorphic process chains? The

- 2012 multi-lake outburst flood in the Santa Cruz Valley (Cordillera Blanca, Perú). *Earth Surface Processes and Landforms* 43(7), S. 1373–1389. DOI: 10.1002/esp.4318.
- Murton, J.B., Peterson, R., Ozouf, J.-C., 2006. Bedrock Fracture by Ice Segregation in Cold Regions. *Science*, 314(5802), S. 1127. DOI: 10.1126/science.1132127.
- Noetzi, J., Gruber, S., Kohl, T., Salzmann, N., Haeberli, W., 2007. Three-dimensional distribution and evolution of permafrost temperatures in idealized high-mountain topography. *Journal of Geophysical Research-Earth Surface*, 112, F02S13. DOI: 10.1029/2006JF000545.
- Otto, J.C., Hartmeyer, I., Keuchnig, M., 2018. Naturgefahren in alpinen Permafrostregionen und Permafrostmonitoring. *Geographische Rundschau*, 11, 6 S.
- Otto, J.-C., Keuschnig, M., Götz, J., Marbach, M., Schrott, L., 2012. Detection of mountain permafrost by combining high-resolution surface and subsurface information. An example from the Glatzbach catchment, Austrian Alps. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 94(1), S. 43–57. DOI: 10.1111/j.1468-0459.2012.00455.x.
- PERMOS, 2016. Permafrost in Switzerland 2010/2011 to 2013/2014, Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences, 85 S.
- Phillips, M., Wolter, A., Lüthi, R., Amann, F., Kenner, R., Bühler, Y., 2017. Rock slope failure in a recently deglaciated permafrost rock wall at Piz Kesch (Eastern Swiss Alps), February 2014. *Earth Surface Processes and Landforms*, 42(3), S. 426–438. DOI: 10.1002/esp.3992.
- Pudasaini, S.P., Krautblatter, M., 2014. A two-phase mechanical model for rock-ice avalanches. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119(10), S. 2272–2290. <https://doi.org/10.1002/2014JF003183>.
- Rebetz, M., 2004. Summer 2003 maximum and minimum daily temperatures over a 3.300 m altitudinal range in the Alps. *Climate Research*, 27(1), S. 45–50.
- Schneider, D., Huggel, C., Cochachin, A., Guillén, S., García, J., 2014. Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru. *Advances in Geosciences*, 35, S. 145–155. <https://doi.org/10.5194/adgeo-35-145-2014>.
- Schneider, S., Hoelzle, M., Hauck, C., 2012. Influence of surface and subsurface heterogeneity on observed borehole temperatures at a mountain permafrost site in the Upper Engadine, Swiss Alps. *The Cryosphere*, 6(2), S. 517–531. DOI: 10.5194/tc-6-517-2012.
- Schnepfleitner, H., Kellerer-Pirklbauer, A., Rode, M., 2016. The permafrost borehole »Koppenkarstein North Face«, Dachstein Massif: An Austrian contribution to the Global Global Terrestrial Network for Permafrost (GTN-P). *Joannea Geologie und Palaontologie*, 12, S. 28–36.
- Schneuwly-Bollschweiler, M., Stoffel, M., 2012. Hydrometeorological triggers of periglacial debris flows in the Zermatt valley (Switzerland) since 1864. *Journal of Geophysical Research*, 117, F02033. DOI: 10.1029/2011jg002262.
- Schöner, W., Boeckli, L., Hausmann, H., Otto, J.C., Reisenhofer, S., Riedl, C., Seren, S., 2012. Spatial patterns of permafrost at hoher sonnblick (Austrian Alps). Extensive field-measurements and modelling approaches. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105(2), S. 154–168.
- Schrott, L., Otto, J.C., Keller, F., 2012. Modelling alpine permafrost distribution in the Hohe Tauern region, Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105(2), S. 169–183.

- Vaughan, D.G., Comiso, J.C., Allison, I., Carrasco, J., Kaser, G., Kwok, R., Mote, P., Murray, T., Paul, F., Ren, J., Rignot, E., Solomina, O., Steffen, K., Zhang, T., 2013. Climate Change 2013. The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex, P.M. Midgley (Hrsg.), *Observations: Cryosphere*. Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, S. 317–382. DOI: 0.1017/CBO9781107415324.012.
- Wagner, T., Pauritsch, M., Winkler, G., 2016. Impact of relict rock glaciers on spring and stream flow of alpine watersheds: Examples of the Niedere Tauern Range, Eastern Alps (Austria). *Austrian Journal of Earth Sciences*, 109(1). DOI: 10.17738/ajes.2016.0006.
- Winkler, G., Pauritsch, M., Wagner, T., Kellerer-Pirklbauer, A., 2016. Reliktische Blockgletscher als Grundwasserspeicher in alpinen Einzugsgebieten der Niederen Tauern. *Berichte zur wasserwirtschaftlichen Planung Steiermark*, 87, 134 S.
- Zenkulus Mutter, E., Blanchet, J., Phillips, M., 2010. Analysis of ground temperature trends in Alpine permafrost using generalized least squares. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 115(F4). DOI: 10.1029/2009JF001648.
- Zhang, T., Barry, R.G., Haeberli, W., 2001. Numerical simulations of the influence of the seasonal snow cover on the occurrence of permafrost at high latitudes. *Norsk Geografisk Tidsskrift – Norwegian Journal of Geography*, 55(4), S. 261–266. DOI: 10.1080/00291950152746621.
- Zimmermann, M., Haeberli, W., 1992. Climatic change and debris flow activity in high-mountain areas. A case study in the Swiss Alps. *Catena Supplement*, 22, S. 59–72.
- Zischg, A., Curtaz, M., Galuppo, A., Lang, K., Mayr, V., Riedl, C., Schoeneich, P., 2011. Chapter 2: Permafrost and debris-flows. In: P. Schoeneich, M. Dall'Amico, P. Deline, A. Zischg (Hrsg.), *Hazards related to permafrost and to permafrost degradation*. PermaNET project, State-of-the-art report 6.2, S. 29–66.

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

22 Gletschergefahren

Andrea Fischer, Wolfgang Schöner und Jan-Christoph Otto*

Zusammenfassung

Gletschergefahren gehen von Geometrieänderungen, Sturzprozessen und Gletscherabflüssen aus. Extrema müssen aufgrund der starken zeitlichen Änderungen an den Gletschern und der kleinen Datenstichproben meist prozessorientiert und szenariobasiert betrachtet werden. Das historisch gesehen größte Schadenspotential zeigen Gletscherhochwässer in Zusammenhang mit dem Ausbruch von Gletscherseen. Für die Abschätzung zukünftiger Gefahrenquellen fehlen derzeit noch auf die österreichische Situation bezogene Prozessanalysen. Für ein Gefahrenmanagement ist ein integrativer und ereignisbasierter Ansatz nötig, bei dem Schätzverfahren und Modellrechnungen, Monitoring- und Frühwarnkonzepte eine entscheidende Rolle spielen.

Abstract

Glacier hazards result from changes in geometry, gravitational processes and glacial hydrology. As glaciers are actually in a phase of extreme change, with few observational data available, extrema have to be quantified from process understanding and scenario simulations rather than from past records. The greatest hazard potential comes from floods related to meltwater release from glaciers, often connected to the outbreak of glacial lakes. To date, there is a lack of process analyses of the current situation of glacier hazards in Austria, which are needed to assess future changes. Hazard management requires an integrated and scenario-based approach that brings together methods of estimation with modelling, monitoring and early warning systems as have been developed in Switzerland.

Kernaussagen

- Von Gletschern ausgehende Gefahren zeigen starke zeitliche Änderungen.
- Gletscherseeausbrüche und Gletscherhochwässer haben das größte Schadenspotential.
- Genaue Prozessstudien welche die österreichische Situation betreffend Gletschergefahren erfassen fehlen derzeit.

* Andrea Fischer, Österreichische Akademie der Wissenschaften, Institut für Interdisziplinäre Gebirgsforschung der ÖAW, andrea.fischer@oeaw.ac.at.
Wolfgang Schöner, Karl-Franzens-Universität Graz, Institut für Geographie und Raumforschung, wolfgang.schoener@uni-graz.at.
Jan-Christoph Otto, Universität Salzburg, Fachbereich Geographie und Geologie, jan-christoph.otto@sbg.ac.at.

- Ein Inventar potentiell gefährlicher Gletschersituationen sollte erstellt und laufend nachgeführt werden.

Key Points

- The occurrence and frequency of processes resulting in glacier hazards change significantly over time and most rapidly with the state of glaciers and their disappearance.
- The highest potential for damages comes from glacier floods, especially the outburst of glacier lakes.
- Process studies, monitoring and early warning systems of glacier risks are largely lacking for Austria.
- In the light of ongoing rapid changes and resulting potentially dangerous glacier conditions, an inventory of these sites should be compiled, with options for deploying monitoring and warning concepts and systems.

22.1 Einleitung

Die in der Vergangenheit am häufigsten aufgetretenen und durch Gletscher verursachten Extremereignisse in den Alpen sind Abflußereignisse, die zu schweren Hochwässern und großen Sachschäden in Gebirgstälern geführt hatten. Die Ausbrüche glazialer Seen und die Erforschung ihrer Ursachen stehen daher auch am Beginn der Erforschung der Gletscher vor mehr als 400 Jahren (Fischer et al., 2018), und stellten bis Ende des 19. Jahrhunderts akute Bedrohungen in Österreich dar (Nicolussi, 2013). Als Folge des starken Gletscherrückgangs in den letzten Jahrzehnten wird vermehrt die Entstehung neuer Gletscherseen in den Österreichischen Alpen beobachtet (Otto et al., 2018) so dass eine Zunahme der Gefahrenszenarien für die Zukunft möglich erscheint.

Gletscher sind durch starke Änderungen in Raum und Zeit charakterisiert und stehen in Wechselwirkung mit Permafrost, Felswänden sowie hydrologischen und geomorphologischen Systemen der unmittelbaren Umgebung (Abbildung 01). Aus diesem Grund bezieht sich der Begriff des Systems Gletscher nicht allein auf den Eiskörper zu einem bestimmten Zeitpunkt, sondern wird in diesem Beitrag auf die unmittelbar mit dem Gletscher und dessen Änderungen stehenden Prozesse erweitert. Kürzlich vom Gletscher abgetrenntes schutt- oder wasserbedecktes Toteis, durch Eisschmelze entstandene Hohlformen oder etwa neue und zukünftige Gletscherseen werden in diesem Beitrag daher als Teil des Systems Gletscher behandelt, auch wenn kein unmittelbarer Kontakt zum Gletschereis mehr besteht. Gletschernahe Massenbewegungen, wie etwa an der Bliggspitze (Fey et al., 2017), sind ebenfalls nicht immer eindeutig einem System allein zuordnebar.

Die aktuellen und vor allem in Zukunft zu erwartenden extremen Zustandsänderungen der Gletscher und ihrer Vorfelder und Randbereiche, aber

auch Änderungen der menschlichen Nutzung des glazialen und periglazialen Raumes erfordern eine umfassende und szenariobasierte Beurteilung der potentiellen Gefahren, die in heute noch vergletscherten Gebieten entstehen können.



Abbildung 01: Beispiel eines Alpengletschers (Jamtalferner/Silvretta) und seiner Teilzonen sowie den typischen morphologischen Formen.

Figure 01: Alpine glacier (Jamtalferner/Silvretta) with the typical morphological features.

Quelle: A. Fischer

Von Gletschern und glaziale Prozessen ausgehende Gefahren werden in Kapitel 22.1 dargestellt. Eine exemplarische Darstellung historischer Ereignisse (Kapitel 22.2) und die historische Entwicklung von Extremereignissen (Kapitel 22.3) illustriert die Verknüpfung zwischen Stand und Zustand der Gletscher und ihrer Änderungen und den Auswirkungen von Extremereignissen. Die Einschätzung des derzeitigen Sachstandes und der Unsicherheiten (Kapitel 22.4) zeigt den Bereich gesicherten Wissens, aber auch den Forschungsbedarf auf. Zukunftsszenarien der Extremereignisse (Kapitel 22.5) sind eng mit der zukünftigen Entwicklung des Systems Gletscher im Klimawandel verknüpft. Dies beinhaltet die rasche, aber für Generationen irreversible Landschaftsveränderungen im heute noch vergletscherten Hochgebirge und damit ver-

bundene gefährliche Prozessketten. Daraus ergeben sich schließlich Perspektiven für Handlungsfelder (Kapitel 22.6).

22.2 Definition/Terminologie Gletschergefahren

22.2.1 Gletscher und glaziale Prozesse

Gletscher bestehen nicht nur aus Schnee, Firn und Eis sondern auch aus Gestein verschiedener Korngröße, Schmelzwasser, biotischen Komponenten und verschiedenen Stoffeinträgen. Rasche zeitliche Veränderungen gehören zu ihren augenscheinlichsten Eigenschaften. Gebirgsgletscher werden nach Benn und Evans (2007) selbst vom Klima beeinflusst, und beeinflussen ihrerseits wieder Landschaft (biotische und abiotische Komponenten) und Ozeane. Für Österreich werden die Änderungen der Gletscher durch Messungen der Flächen- und Volumsänderungen in Gletscherinventaren (seit dem Hochstand der Kleinen Eiszeit um 1850), der Massenänderungen (seit 1952/53) und der Längenänderungen (seit 1891) beschrieben (Fischer et al., 2016).

Die mit dem Klima direkt gekoppelte Gletschermassenbilanz ist die Summe der, über die Zeit stattfindenden, Massengewinne und Massenverluste. Massengewinn (Akkumulation), durch Schneefall und seiner Umverlagerung, erfolgt im Alpenraum hauptsächlich während der Akkumulationsperiode zwischen 1. Oktober und 1. Mai des hydrographischen Jahres. Massenverluste (Ablation) von Schnee, Firn und Eis, sind vorwiegend während der Ablationsperiode zwischen 1. Mai und 30. September zu beobachten. Die Ablation wird vom Energieaustausch zwischen Atmosphäre und Gletscheroberfläche gesteuert, welche nicht nur von den atmosphärischen Bedingungen, sondern auch vom Zustand der Gletscheroberfläche, etwa den Strahlungseigenschaften (Albedo) abhängt. Die Summe aus (jährliche) Ablation und Akkumulation ergeben die Massenbilanz eines Gletschers. Ist die Massenbilanz negativ, verringern sich das Volumen und damit Fläche und Länge des Gletschers (Dichteänderungen sind vernachlässigbar), wobei die Reaktionszeit gletscherspezifisch ist. Die Fließgeschwindigkeit eines Gletschers ergibt sich aus den zwei Teilkomponenten (i) Gleiten an der Basis und (ii) Eisdeformation. Die Fließgeschwindigkeit eines Gletschers hat Einfluss auf die Massenbilanz und damit auf die Schmelzwasserbildung, da bei zunehmenden Fließgeschwindigkeiten mehr Eis in Gebiete mit hohen Schmelzraten transportiert wird. Umgekehrt wird die Fließgeschwindigkeit auch von der Massenbilanz beeinflusst. So etwa beschleunigt erhöhter Eintrag von Schmelzwasser (neben den thermischen Bedingungen am Gletscherbett) die Fließgeschwindigkeiten. Die Fließgeschwindigkeit eines

Gletschers ist eine wichtige Antriebsgröße für die basale Erosion sowie den Sedimenttransport.

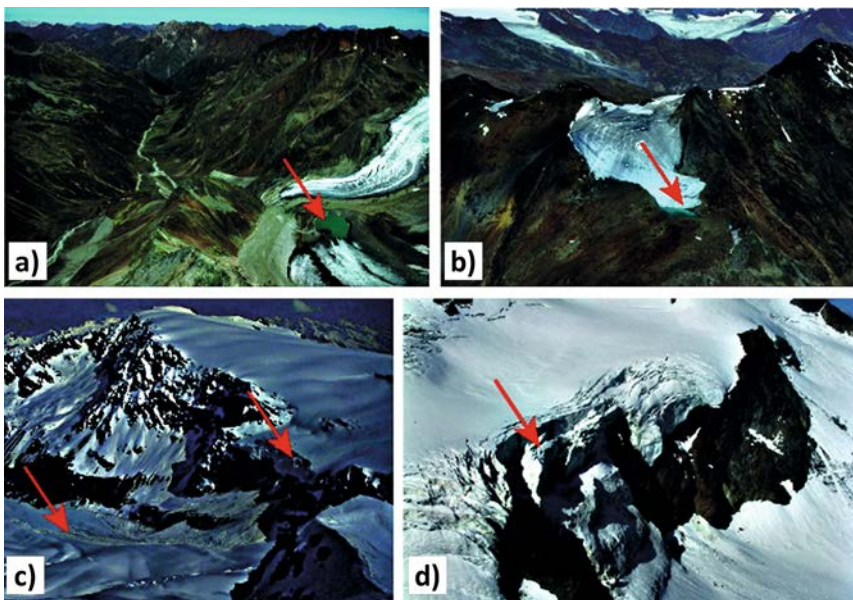


Abbildung 02: Beispiele für Gletschergefahren: Eisabbruch am Gepatschferner mit großer Reichweite (rote Pfeile) (a), Eisbruch mit labiler Konfiguration am Taschachferner (b), See Neubildungen in den Ötztaler Alpen (c, d).

Figure 02: Examples of glacier hazards: ice fall at Gepatschferner glacier with long-range impact (a), crevasse zone with unstable configuration at Taschachferner glacier (b), new glacier lakes in the Ötztal Alps (c, d).

Quelle: A. Fischer

Die unmittelbare Wirkung des Gletschers betrifft nicht nur die vergletscherte Fläche, sondern auch das pro-, para- und periglaziale Umfeld. Dieses kann, da durch den Gletscher überformt und teils noch mit Toteis oder Permafrost durchsetzt, labiler sein als Gebiete, die schon seit mehreren hundert Jahren eisfrei sind. Dies betrifft etwa die im Zuge von Gletschervorstößen abgelagerten Moränen, die noch Eis enthalten und auch Seen aufstauen können. Nach dem Rückgang des Gletschers sind sie der Erosion ausgesetzt und liefern Sedimente ins Tal. Ebenfalls von Änderungen der Gletscher besonders betroffen ist der unmittelbare Untergrund des Gletschers bzw. die umgebenden Hang- oder Felsflanken, in denen sich das Spannungsfeld und das Temperaturregime durch den Gletscherrückgang deutlich ändert. Hierbei kann es sowohl zu deutlicher Temperaturzunahme kommen, wenn das ehemals kalte Gletscherbett wärmeren Lufttemperaturen und Strahlung ausgesetzt wird. In großen Höhen kann auf-

grund der isolierenden Wirkung des Eises aber auch die Felstemperatur sinken und sich neue Permafrostkörper bilden (Wegmann et al., 1998; Otto und Keuschnig, 2014; Klug et al., 2017). Änderungen im Spannungsfeld der treibenden und haltenden Kräfte einer Felswand können als Folge der Freilegung durch den Gletscher zu Sturzprozessen führen. Über den glazialen Abfluss beeinflusst der Gletscher auch flußabwärts gelegene Abschnitte in und entlang von Fließgewässern.

22.2.2 Gletscherbedingte Naturgefahren und ihre Modellierung

Ein allgemein gültiger theoretischer Rahmen für Gletschergefahren wird in Haeblerli und Whiteman (2015) dargestellt. Nach Tufnell (1984) resultieren Gletschergefahren aus Geometrieänderungen der Gletscher, aus von Gletschern verursachten Hochwässern und aus Gletscherstürzen (Eisstürzen, Eislawinen), wobei die einzelnen Prozessgruppen miteinander verknüpft sind (VAW, o. J.). So kann etwa eine Änderung der Gletschergeometrie zum Aufstauen eines Sees und Seeausbrüchen führen. Weiters gibt es auch Wechselwirkungen mit anderen Naturgefahren, etwa Erdbeben oder Felsstürzen, die Ereignisse auf Gletschern auslösen können oder, umgekehrt, die durch Gletscher in ihrer Auswirkung verändert werden (etwa die Reichweite von Bergsturzereignissen auf Eis).

22.2.2.1 Änderungen der Gletschergeometrie

In Anbetracht der gegenwärtigen Eisdicken- und Flächenverluste sind vor allem die Freilegung von Felswänden und geringverfestigtes Lockermaterial für die Entstehung von Naturgefahren relevant. Die relevanten Ereignisse, etwa Fels- und Bergstürze sowie Muren sind jedoch gravitativer Natur und nicht dem glazialen Prozessbereich zugeordnet. Aufgrund der kausalen Verknüpfung mit dem Einfluss des Gletschers werden sie in der Fachliteratur unter dem Begriff paraglaziale Prozesse/paraglaziale Landschaftsanpassung zusammengefasst. Damit werden Abtragungsprozesse bezeichnet, die durch Gletscher bedingt sind und entweder im vom Gletscher beeinflussten Fels, oder im vom Gletscher abgelagerten Lockermaterial stattfinden (Church und Ryder, 1972). Diese paraglaziale Aktivität nimmt mit der Zeit ab, bis die vom Gletscher verursachte Antriebsgröße abgearbeitet ist. Die Zeitskala kann zwischen Jahrzehnten und Jahrtausenden liegen (Ballantyne, 2003). Kurzfristige Reaktionen finden vor allem an Moränenablagerungen statt, die innerhalb weniger Jahrzehnte nach dem Abschmelzen der Gletscher durch Abspülung und Murgänge erodiert werden können. Besonders Endmoränenwälle und andere glaziale Ablagerungen in Karen sind häufig Quellgebiet für Muren mit Wirkungen bis in die Täler

(Zanoner et al., 2017). Ausschmelzen von Toteis oder Permafrost in diesen Sedimentspeichern führt dabei zu einer verzögerten Reaktion (Anker et al., 2016, siehe auch Beitrag 21 zu *Permafrostgefahren* in diesem Band). Auch im Felsbereich lassen sich bereits wenige Jahre nach dem Rückgang des Gletschers eine erhöhte Steinschlag- und Felssturzaktivität beobachten (Hartmeyer et al. 2015). Auf längeren Zeitskalen treten große Fels- und Bergstürze auf, die sich mitunter erst Jahrhunderte bis Jahrtausende nach dem Verschwinden der Gletscher ereignen, dennoch das Resultat von Druckentlastungen im Fels darstellen (McColl, 2012; Leith et al., 2014). Die Entstehung der größten Bergstürze der Alpen, z. B. in Köfels, Tschirgant oder Flims wurden in diesem Zusammenhang diskutiert, die Entwicklung von Datierungsmethoden für Massenbewegungen ergibt allerdings keinen Hinweis auf Ereignishäufungen im Zuge von Entgletscherungen (Prager et al., 2008) (siehe auch Beitrag 16 zu *Felsgleitung, Felslawine, Erd-/Schuttstrom* in diesem Band).

Vorstößende Gletscher können neben der unmittelbaren Gefährdung von Infrastruktur durch das Eis vor allem durch Aufstauen von Seen zur Naturgefahr werden (siehe Kapitel 22.2.2.2).

Zudem können auch, aber nicht nur, durch vorstößende Gletscher an Geländekanten Eisstürze ausgelöst werden. Geometrieänderungen an Gletschern beeinflussen durch die sich ändernden Steilheit des Geländes und damit der Erosion und Deposition von Schnee die Bildung von Lawinen, aber auch die Reichweite von Felsstürzen in der unmittelbaren Umgebung.

Die numerische Modellierung von Geometrieänderungen wird auf verschiedenen Skalen durchgeführt. Je nach gewählten Ansatz gibt es eine Reihe von Unsicherheiten, etwa die der modellierten Eisdicke, die in Folge für weitere Rechenschritte verwendet wird. Der Vergleich der Ergebnisse von 17 verschiedenen Modellen mit Messdaten zeigt eine Schwankung von nur 10 ± 24 % in der mittleren Eisdicke, aber erhebliche Abweichungen in der lokalen Topographie (Farinotti et al., 2017). Modelle der Gletschergeometrie sind also auf der kleinen räumlichen und zeitlichen Skala auf der Ereignisse stattfinden notwendig um das Prozessverständnis im Rahmen von Monitoring zu verbessern, aber (noch) nicht dia- oder prognosefähig.

22.2.2.2 Von Gletschern verursachte Hochwässer

Von Gletschern verursachte Hochwässer in Fließgewässern entstehen entweder durch die plötzliche Entleerung von im Gletscher gespeicherten Wasser, durch die plötzliche Entleerung von Gletscherseen, oder durch extreme Gletscherschmelze. Dabei kann wenig verfestigtes Sediment im, unter oder vor dem Gletscher mobilisiert werden (Haerberli, 1983; Zraggen-Oswald, o. J.). Ein

Schadensereignis wird dabei nicht nur durch die Wassermenge, sondern auch durch den hohen Sediment- und Geschiebeanteil verursacht.

Große Mengen an Wasser können im Gletscher in Form von Wassertaschen (intraglaziale Speicherung), randglaziale, supraglaziale und proglaziale Seen gespeichert werden. Proglaziale Seen können durch Eis, Fels, oder Moränen-schutt gestaut werden. Während oberflächliche Seen im Volumen, aber oft nicht in der Stabilität ihres Dammes beurteilt werden können, sind Wasseransammlungen im Gletscher meist nicht feststellbar. Katastrophale Ausbrüche von Gletscherseen, sog. Gletscherläufe (*Glacial Lake Outburst Floods, GLOFs*), gehören zu den Gebirgsgefahren mit der größten Fernwirkung, da die Flutwelle des Gletschersees Schäden in mehrere Zehnerkilometer Distanz zum See generieren kann (Haerberli, 1983; Richardson und Reynolds, 2000; Carrivick und Tweed, 2016). GLOFs werden auf verschiedene Weise ausgelöst: (a) Entweder stürzen Fels, Eis, Schnee oder Sedimentmassen in den Seen. Hierbei ist die Distanz der Seen zu steilen Felsbereichen, Eisbrüchen oder instabilen Schuttmassen ein entscheidender Faktor, oder (b) es kommt zum Versagen des Damms. Letzteres tritt bei Seen auf, die durch Moränenablagerungen oder durch Gletscheis aufgestaut werden. Eine Kombination beider Fälle ist auch möglich. Ausschlaggebend für die Reichweite des GLOFs ist die entstehende Flutwelle, die vor allem durch die Wassermenge und die Geschwindigkeit der Massenverlagerung bestimmt wird.

Man unterscheidet mechanische und hydraulische Brüche von Dämmen, sowie die Erosion von Moränenendämmen durch progressiven Wasserabfluss, Murgänge oder der Labilisierung des Damms durch Ausschmelzen des konsolidierenden Toteises aus dem Lockermaterial. Aufgrund der Prozesskette sind eine große Zahl an Faktoren und Ursachen bei der Entstehung von GLOFs beteiligt und eine Vorhersage schwierig.

In den letzten Jahren wurde sowohl die Rolle der zurückgehenden Gletscher im Wasserhaushalt insgesamt (Kuhn und Escher-Vetter, 2004; Koboltschnig und Schöner, 2011; Viviroli, 2011; Nachtnebel et al., 2014; Weber et al., 2015), die Auswirkung der Änderung in der Schneebedeckung (Helfricht et al., 2014, 2015; Förster et al., 2018) mit Mitteln der numerischen Modellierung untersucht. In Hochwasserprognosemodellen wird auch der glaziale Abfluss modelliert (Achleitner et al., 2012; Schöber, 2014), wobei die Schneegrenze, Schneefallgrenzen und Sediment- sowie geschiebetransport nach wie vor Herausforderungen darstellen. Gletscheränderungen werden in den Modellen nicht berücksichtigt.

22.2.2.3 Eisabbrüche und Gletscherstürze (Eisstürze)

Eisabbrüche (Eislawinen) kommen bei Hängegletschern, die am Untergrund angefroren sind, durch die gravitative Bewegung des Eises regelmäßig vor.

Eisabbrüche mit großem Volumen werden als Gletscherstürze (Eisstürze) bezeichnet. In den Ostalpen wurde mittlerweile kaltes Eis (am Bett angefroren) nachgewiesen (Bohleber et al., 2018). Bei rückschmelzenden Talgletschern treten Eisabbrüche vermehrt im Übergang zwischen den steilen Talflanken und dem Kar auf, sind somit ein temporäres Phänomen, das mit weiterem Rückzug des Eises ins Kar verschwindet. Die Hangneigung des Gletscherbettes spielt daher eine entscheidende Rolle. Besonders rasche Eisbewegung, etwa durch Eindringen von Wasser, Änderungen der thermischen Bedingungen und dabei stattfindende Verringerung des Reibungswiderstandes, oder durch Surges (extremes Ansteigen der Fließgeschwindigkeit in sehr kurzer Zeit) kann das Volumen von Eisstürzen vergrößern. In bisher bekannten Fällen ist vor dem Auftreten von Eisabbrüchen eine Zunahme von Mikrobeben, Rissbildungen oder Fließgeschwindigkeiten (Faillertaz et al., 2015) beobachtbar. Bei Kenntnis des Gefahrenpotential besteht somit die Möglichkeit eines Monitorings zur Risikoprävention bzw. Frühwarnung.

Die Modellierung von Sturzereignissen impliziert die Berechnung nichtlinearer Prozesse, deren Vorhersagbarkeit stark von der zeitlichen Auflösung der Messwerte am Ort des Ereignisses abhängt (Pralong et al., 2005) und somit die Existenz eines Monitoringprogrammes samt vorheriger Klassifizierung gefährlicher Situationen (also der naturräumlichen Prozessanalyse und des Schadenspotentials) bedingt.

Für die Modellierung komplexer geomorphologischer Ereignisketten (siehe auch Beitrag 24 zu *Multi-Hazards & Kaskadeneffekte* in diesem Band) potenziert sich diese Unsicherheit (Mergili et al., 2018).

22.2.3 Stand und Zustand österreichischer Gletscher

Im internationalen Vergleich zählen die österreichischen Gletscher zu den am längsten und besten untersuchten (Fischer et al., 2018). Sie haben seit ihrem Hochstand am Ende der Kleinen Eiszeit um 1850 mehr als die Hälfte ihrer Fläche verloren, wobei Ausmaß und Auswirkung/Ausprägung des Gletscherschwundes regional und individuell unterschiedlich sind (Fischer et al., 2015). Die Messungen im Rahmen des österreichischen Gletschermonitorings umfassen jährliche Beobachtungen der Gletscherlänge (seit 1891, Fischer et al., 2018) von etwa 100 Gletschern, der Gletschermassenbilanz von etwa 10 Gletschern (Fischer et al., 2016), vereinzelt Abflussmessungen und die Erfassung der Fläche und Oberflächengeometrie aller Gletscher in Zeitreihen von Gletscherinventaren (1850–1969–1998–2006, Fischer et al., 2015). Einzelne Geschwindigkeitsmessungen zeigen die hohe Variabilität der Fließgeschwindigkeiten (Fischer et al., 2018). Die Eisdicke österreichischer Gletscher ist mit direkten Messungen an

etwa 70 Gletschern im internationalen Vergleich gut erfasst (Fischer und Kuhn, 2013). Es bestehen auch Modellrechnungen der Gletscherbettgeometrie und ihrer Unsicherheiten mit verschiedenen Modellen (Farinotti et al., 2017), die zur Abschätzung der zukünftigen Entwicklung von Gletscherseen verwendet werden (Otto et al., 2018).

Für die Erfassung der Gletscheränderungen vor der Kleinen Eiszeit werden vor allem dendrochronologische Befunde, aber auch Radiokarbondatierungen von Makroresten in Böden (Patzelt, 2016) und Mikroresten im Eis (Hoffmann et al., 2017) sowie die Datierung von glazialen Ablagerungen mittels kosmogener Nuklide verwendet.

Für Reaktion und Sensitivität der Gletscher auf den Klimawandel, aber auch auf Extremereignisse wie Starkniederschläge ist der Zustand der Gletscher, insbesondere ihrer Oberfläche wesentlich. Für die Albedo der Oberfläche spielen deren Art (Schnee, Firn, Eis) und Alter eine Rolle, sowie das Vorhandensein von Staubeinträgen oder einer Schuttbedeckung (deren Wirkung von Dicke und Korngröße des Materials abhängt). Für das Retentionsvermögen des Gletschers im Fall von Starkniederschlägen spielen Art, Dicke und Ausdehnung einer permeablen porösen Oberflächenschicht (Schnee oder Firn) eine Rolle. Einzelne Arbeiten zeigen die Zunahme von schuttbedeckten Oberflächen (Kellerer-Pirklbauer et al., 2012; Fischer et al., 2018) und die Abnahme von Firnkörpern (Fischer, 2010). Es gibt jedoch noch keine veröffentlichte Arbeit zur Abschätzung dieser Effekte für alle österreichischen Gletscher. Auch dürfte die Datenbasis bezüglich der flächenhaften Ausdehnung der Firnkörper und Schuttbedeckung erst seit den 1970er Jahren ausreichend sein. Informationen zu Mächtigkeit und hydrologischen Eigenschaften des Firnkörpers sind nur einzeln an Bohrstellen (am Kesselwandferner) oder aus seismischen Messungen (Aric und Brückl, 2001) verfügbar. Für die Auswirkungen von Extremereignissen, insbesondere Starkniederschlägen, sind auch Ausmaß und Tempo des Gletscherrückgangs relevant, da kürzlich eisfrei gewordenen Flächen zwar potentiell labil sind, aber je nach lokalen Bedingungen mehr oder weniger schnell wieder stabil werden, wozu geomorphologische Prozesse (Heckmann und Morche, 2019), aber auch die Sukzession der Biota (Erschbamer et al., 2008; Fickert, 2017) beitragen.

22.2.4 Begriffsdefinitionen Extremereignisse im System Gletscher

Aufgrund der die starken kumulativen Veränderungen der Gletscher ist eine robuste Definition des Begriffs Extremereignis im Kontext Gletscher schwierig. Für extreme Änderungen der Geometrie oder der Frequenz von Sturzereignissen lassen die geringe Anzahl von Stichproben, die kumulativen Änderungen

während der Messreihen und ein Bias der Messungen zu großen Gletschern eine statistische Analyse der Ereignisse nicht zu. Die zeitliche Auflösung der Inventare ist zu niedrig, und in den instrumentellen Längenänderungsdaten sind extreme Ereignisse wie Zerfall und rascher Vorstoß im Allgemeinen nicht quantifiziert.

Extreme Abflussereignisse kann man durch die mehr als hundert Jahre umfassenden, seit einigen Jahrzehnten quasikontinuierlichen, Abflussmessungen für einige vergletscherte Einzugsgebiete statistisch analysieren. Allerdings haben sich die Einzugsgebiete gletschnaher Pegel im Hinblick auf ihren Vergletscherungsgrad, aber auch auf die stattfindenden Prozesse stark geändert, dass ein allein statistischer Ansatz unzulänglich ist.

Im Kontext der Berechnung von Risiken oder Schäden sind die Auswirkungen von Geometrieänderungen und Eisstürzen meist auf den Nahbereich des Gletschers und die dort vorhandenen Infrastruktur (Seilbahnen, Hütten, Wege, Straßen) begrenzt. Große Risiken/Schäden mit Auswirkungen auf Siedlungsgebiet wurden nur in Zusammenhang mit hydrologischen Ereignissen berichtet (siehe auch Kapitel 22.3.1).

22.3 Fallbeispiele in den österreichischen Alpen

22.3.1 Seeausbrüche

Ausbrüche von historischen Gletscherseen sind für den Zeitabschnitt der Kleinen Eiszeit in Österreich, aufgrund der damals häufig eintretenden Ereignisse, gut untersucht. Das Aufstauen von Seen durch vorstoßende Gletscher kommt heute in Österreich dagegen nicht mehr vor, die Prozesse und das Systemverhalten haben sich maßgeblich geändert. Im Ötztal brachen etwa der Rofener Eisstausee (Nicolussi, 2013) und der Gurgler Eisstausee (Richter, 1892) wiederholt aus. In beiden Fällen stauten vorstoßende Gletscherzungen Seen auf. Für den Rofener Eisstausee sind Ausbrüche für 1600, 1678, 1679, 1680, 1771, 1845, 1846 (drei Ausbrüche), 1847, 1848 und 1868, für den Gurgler Eisstausee in den Jahren 1717, 1718, 1724, 1770, 1834 und 1867 dokumentiert. Besonders der Rofener Eisstausee ist gut untersucht, etwa das aufgestaute Seevolumen (Nicolussi, 2013) und die Rekonstruktion der beim Abfluss entstandenen Hochwasserwelle. Die Abschätzung der jährlich größten Hochwässer der Rofenache zeigt, dass an der Messstelle Rofenache zwischen dem Systemzustand der kleinen Eiszeit und dem heutigen Systemzustand etwa ein Faktor 10 Unterschied besteht (Gattermayr, 2013).

Weitere Berichte über Hochwässer aus gletschergestauten Seen in Österreich gibt es unter anderem vom Suldenferner (Sonklar, 1857), Schwemser Ferner

(supraglazialer See; Greim, 1894), Übeltalferner (Pfaundler, 1871) und dem Karlesferner (Erhard und Pechtl, 1985). Für die wiederkehrenden historischen Hochwässer des Martelltals wurde als Ursache eine Entleerung von Wasserstuben im Furkele- und Zufallfirn vermutet, aber auch hier entleerte sich ein See (Richter, 1889). Es gibt zwar weitere Berichte über mit Gletscher in Verbindung gebrachte historische Murgänge in Tälern, etwa für das Wildlahner Tal, eine genaue Analyse der Ursachen und Prozesse wurde aber noch nicht durchgeführt.

Berichte über rezente Ausbruchereignisse von großen Wassermassen aus Gletschern gibt es nur wenige. Diese stehen oft in Zusammenhang mit Starkniederschlägen und/oder dem Ausbruch supraglazialer Seen im Zuge glazialer Zerfallsprozesse (etwa für den Gepatschferner, Stocker Waldhuber et. al., 2016). In den letzten Jahren zeigten vor allem proglaziale Seen wie etwa am Sulzenaufener (Stubaital, mit Ausbruch im Jahr 2017, <https://www.sulzenauhuette.at/der-sulzenausee-im-wandel/>) oder der See im Bereich des Goldbergkees (Hohe Tauern, mit mehreren Ausbrüchen seit 2011), bedingt durch den starken Gletscherrückgang, ein Ausbruchsverhalten.

Rezente Ereignisse in Südtirol und dem Engadin wurden im Rahmen des ClimOpt Projektes untersucht. Im Detail wurde etwa ein Murgang im Pfossental an der Grenze zu Österreich untersucht (Zischg et al., 2014), der aufgrund der Stauung eines Schmelzwasser-Spitzenabflusses an einem schuttbedeckten To-teiskörper erfolgte. Im Rahmen von ClimOpt wurden auch ein Prozessanalysen, ein Screening potentieller Gefahrenstellen und die Analyse von möglichen Schadensfolgen samt Erarbeitung eines Maßnahmenkataloges durchgeführt. Emmer et al. (2015) klassifizieren Gletscherseen in Westösterreich hinsichtlich ihres Ausbruchrisikos mittels eines qualitativen Schemas. Von den analysierten Gletscherseen werden 8 mit erhöhtem Risiko klassifiziert, wobei die höchste Bedrohung durch Eisabbrüche von Gletscherzungen (Kalbung) ausgeht. Diese Gefahr besteht jedoch aufgrund des fortschreitenden Gletscherrückzugs für die untersuchten Seen heute nicht mehr. Für Österreich wurde kürzlich ein Verzeichnis aller Gletscherseen und deren Eigenschaften und Veränderungen seit 1850 erarbeitet (Buckel et al., 2018). Es wurden insgesamt 1.410 Gletscherseen kartiert, von denen mehr als 260 seit dem Ende der Kleinen Eiszeit entstanden sind. Die Rate der Seeneubildung durch den Gletscherrückgang hat innerhalb der letzten 180 Jahren stark zugenommen und sich besonders in den letzten Dekaden, mit den steigenden Temperaturen gegenüber der Mitte des 19. Jahrhunderts verachtfacht. Es wird davon ausgegangen, dass dieser Trend zumindest noch in den kommenden Jahren andauern wird. Im Zusammenhang mit Naturgefahren ist dabei entscheidend, dass die neugebildeten Seen deutlich höher gelegen sind und oft viel näher zu steilen Felswänden und labilen Lockersedimenten in Gletschnähe gebildet werden. Besonders in diesen Kar- und Talchlussbereichen wird in Zukunft bei steigenden Temperaturen durch das

Auftauen von Permafrost und dem Rückgang des Eises mit steigender Felssturzaktivität gerechnet, was wiederum zu Wechselwirkungen mit den Seen führen kann (Haeberli et al., 2016; Buckel et al., 2018).

Geomorphologische Größen, etwa die Sedimentationsrate, die neben anderen Faktoren die Geschwindigkeit der Verlandung eines Sees bestimmt, wurden im Vorfeld des Gepatschferners (Heckmann und Morche, 2019) sowie im Oberulzbachtal untersucht (Geilhausen et al., 2013).

22.3.2 Eisstürze, Felsstürze und andere Instabilitäten

In den österreichischen Alpen wurden in den letzten Jahren einzelne Fälle von Eisstürzen analysiert (Slupetzky, 2000a,b, 2001, 2002). Die Reichweiten dieser Ereignisse sind meist auf den unmittelbaren Nahbereich beschränkt, Infrastruktur ist bis auf wenige Ausnahmen, wie am Nördlichen Bockkarkees (Kellerer-Pirklbauer et al., 2012), nicht betroffen.

Felsstürze auf Gletscher aus jüngst ausgeaperten Bereichen sind häufig zu beobachten (Fischer et al., 2016). Es gibt Lokalitäten mit detailliertem Monitoring von Ereignissen wie etwa am Kitzsteinhorn, am Hohen Sonnblick und am Ödenwinkelkees (Hartmeyer et al., 2012; Keuschnig et al., 2015; Ewald, 2018). An Kitzsteinhorn und Hohen Sonnblick sowie am Hochjochferner im Bereich Grawand (Mair, 2011) werden auch Messungen der Felstemperatur durchgeführt. Felswandmonitoring mittels terrestrischem Laserscanning am Kitzsteinhorn zeigt, dass die Steinschlagfrequenz an Karrückwänden in rezent freigelegten Bereichen nur wenige Meter über der Gletscheroberfläche deutlich zunimmt (Hartmeyer et al., 2015). Die Wirkungszusammenhänge zwischen Steinschlagaktivität und Gletscherrückgang sind derzeit im Fokus der Forschung und weisen noch große Wissenslücken auf (siehe auch Beitrag 21 zu *Permafrostgefahren* in diesem Band).

In Einzelfällen kam es zu Unfällen aufgrund instabiler Eisformen, wie etwa Firnkörpern oder ausgehöhlten Toteisformen (Slupetzky, 2002, 2007; Slupetzky et al., 2009), eine statistische Auswertung ist aufgrund der wenigen zur Verfügung stehenden Daten aber nicht möglich.

22.3.3 Glazial-bedingte Hochwässer

Durch Gletscherabflüsse bedingte Hochwässer im vergletscherten Einzugsgebieten sind in größerem Ausmass und Häufigkeit für die Kleinen Eiszeit dokumentiert. Durch Gletscherabflüsse und zeitgleiche Starkniederschläge bedingte Hochwässer sind auch aus jüngerer Zeit bekannt, etwa 1987 im Stubaital

(Blättler et al., 1990) und im Ötztal (Gattermayr, 2013) wobei der Einfluss des Gletschers mit der Größe des Einzugsgebietes und dem abnehmenden Vergletscherungsgrad rasch abnimmt.

22.4 Unsicherheiten und Herausforderungen für die Zukunft

Aufgrund der limitierten Datenbasis für alle drei Ereignistypen der Gletschergefahren ist es nicht möglich, Aussagen über Änderungen der empirischen Häufigkeiten der Ereignisse oder deren Ausmass zu treffen. Extremereignisse wie Seenausbrüche wurden seit 1927 nicht mehr beobachtet. Auch wenn es beispielsweise in der Schweiz Kataster zu Gletschern mit potentiellen Gefahren gibt (<http://glacier-hazards.glaciology.ethz.ch/inventar.html>) und eine Datenbank zu vergangenen Ereignissen existiert (Haerberli et al., 2006) weicht der derzeitige Ansatz der Naturgefahrenforschung für Gletscher von anderen Gefahrenprozessen deutlich ab. Im Vergleich zu anderen Naturgefahrenprozessen, wo Ereigniskataster als Basis für Prognosen und Risikanalysen verwendet werden, können vergangene Ereignissen im Gletscherkontext aufgrund der hohen Prozessdynamik und den extrem starken Veränderung der Gletscher im Vergleich zur historischen und holozänen Entwicklung nur bedingt für die Vorhersage zukünftiger Ereignisse herangezogen werden (Huggel et al., 2004,). Vielfach sind die Gletscher durch den Klimawandel so stark abgeschmolzen und soweit zurückgezogen, dass zukünftige Ereignisse ganz andere Bereiche betreffen als historische Ereignisse. Eine Gefahrenzonierung auf Basis historischer Ereignisse ist daher nicht möglich. Eine Abschätzung von Gefahren im glazialen Prozessbereich kann aber durch den Einsatz von GIS-basierten Ansätzen erfolgen. Diese Modelle liefern zwar nicht Abbildungen der Prozessmuster, erlauben aber eine grundsätzliche Abschätzung von Prozessreichweiten und Gefahrengebieten (GAPHAZ, 2017).

Im Unterschied zur Schweiz, in der die Erforschung, Inventarisierung und das Monitoring gefährlicher Gletscher schon seit langem betrieben wurde (etwa für Gletscherhochwässer von Haerberli, 1983 oder in der Synthese des Inventars gefährlicher Gletscher) gibt es noch keine spezifischen Analysen von Gletschergefahren oder ein Gletschergefahrenkataster in Österreich.

Während in der Schweiz 84 Gletscher durch Analyse der historischen Dokumente und der gegenwärtigen Situation als gefährliche Gletscher inventarisiert sind, von denen 53 kurz- bis mittelfristig Schäden anrichten können, gibt es für Österreich keine entsprechende Zusammenstellung. Der Sachstand für Österreich besteht also auf Prozessanalysen von Einzelfällen aus der Vergangenheit. Auch die Grundlagenforschungen zu den Prozessen wurden hauptsächlich in der Schweiz und in Frankreich durchgeführt, etwa zu Mechanismen

von Eisstürzen (Pralong und Funk, 2006; Huss et al., 2007; Faillettaz et al., 2012), Hangstabilität (Haeberli et al., 1997) oder die Bildung von Wassertaschen (Vincent et al., 2012). Die geomorphologischen, geologischen und klimatischen Gegebenheiten der Untersuchungsgebiete unterscheiden sich zum Teil deutlich von den Bedingungen in Österreich, die Unsicherheiten in der Übertragung des Prozesswissens sind dementsprechend hoch.

Die Analyse der beobachteten Ereignissen zeigt eine Änderung der beteiligten Prozesse im Zuge des Klimawandels und des dadurch bedingten Rückganges der Gletscher. Etwa kommt es derzeit nicht zur Bildung von Eisstauseen durch den Stau von Fließgewässern im Zuge von Gletschervorstößen: Neu entstandene Seen sind moränen- oder durch Festgestein gestaute Seen. Die von den Gletschern abfließenden Schmelzwassermengen dürften durch die abnehmenden Gletscherflächen und die zunehmende Schuttbedeckung ihr Maximum bereits überschritten haben. Das mobilisierbare Sediment und Geschiebe dürfte noch zunehmen, wenn auch das Datenmaterial in diesem Fall keine statistische Analyse erlaubt.

Mit Sicherheit verändern sich die Gletscher Österreichs und damit ihr Gefahrenpotential in Zukunft weiter, wenn auch noch große Unsicherheiten bestehen in welcher Weise. Beobachtete Ereignisse aus Nachbarländern, aber auch ein Einzelereignis aus Österreich zeigen, dass Eisabbrüche und proglaziale Seen potentielle Gefahrenquellen darstellen können, wobei besonders letztere hohes Schadenspotential aufweisen.

Um die zukünftigen Risiken abzuschätzen, muß a) eine Inventarisierung gefährlicher Situationen und b) die Einrichtung entsprechender Monitoringsites zur Entwicklung eines besseren Prozessverständnisses erfolgen. Als potentiell gefährdeter Bereich sind vor allem steile Felsbereiche im Permafrostbereich im Umkreis der Gletscher, Eisabbruch im Übergang zwischen Tal und Kar, bzw. bei Hängegletscher, sowie neue Seen zu überprüfen.

Nach einer systematischen und integrativen Gefahren- und Risikoabschätzung kann für gefährdete Bereiche nach Schweizer Vorbild ein Monitoringsystem mit entsprechenden weiteren Zivilschutzmaßnahmen eingerichtet werden (Haeberli et al., 2006; GAPHAZ, 2017). Es sind sowohl langfristige Szenarien wie auch eine kurzfristige Neubeurteilung wichtig, da manche Gefahren nur über kurze Zeit bestehen. Schon jetzt können Trends für zukünftige Gefahren abgeschätzt und daraus konkrete lokale, konkrete Strategien entwickelt werden (Haeberli et al., 2016). Die Unsicherheit bezüglich zukünftiger Gletscherabflüsse sind derzeit aber noch hoch (Huss, 2008; Farinotti et al., 2012).

Danksagung

Wir danken Prof. Wilfried Haeberli und einem anonymen Gutachter für die konstruktiven Hinweise und Kommentare.

Literatur

- Achleitner, S., Schöber, J., Rinderer, M., Leonhardt, G., Schöberl, F., Kirnbauer R., Schönlaub, H., 2012. Analyzing the operational performance of the hydrological models in an alpine flood forecasting system. *Journal of Hydrology*, 412/413, S. 90–100.
- Anker, F., Fegerl, L., Hübl, J., Neumayr, F., Keuschnig, M., Kaitna, R., 2016. Geschiebetransport in Gletscherbächen der Hohen Tauern: Beispiel Obersulzbach. *Wildbach- und Lawinenverbauung*, 177, S. 86–96.
- Aric, K., Brückl, E., 2001. Eisdickenmessungen auf Gletschern der Ostalpen. In: C. Hammerl, W. Lenhardt, R. Steinacker, P. Steinhauser (Hrsg.), *Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 1851–2001. 150 Jahre Meteorologie und Geophysik in Österreich*. Leykam, Graz, S. 768–780. ISBN 978-3701174379.
- Ballantyne, C.K., 2003. Paraglacial landform succession and sediment storage in deglaciated mountain valleys: theory and approaches to calibration. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 132, S. 1–18.
- Benn, D., Evans, D., 2010. *Glaciers & Glaciation*. Hodder Education, London, 816 S.
- Blättler, R., Baumhauer, R., Hagedorn, H., 1990. Naturkatastrophen. Unwetterereignisse 1987 und 1988 im Stubaital. *Berichte der Bayerischen Akademie für Naturschutz und Landschaftspflege*, 4, S. 47–56.
- Bohleber, P., Hoffmann, H., Kerch, J., Sold, L., Fischer, A., 2018. Investigating cold based summit glaciers through direct access to the glacier base: a case study constraining the maximum age of Chli Titlis glacier, Switzerland. *The Cryosphere*, 12, S. 401–412. DOI: 10.5194/tc-12-401-2018.
- Buckel J., Otto, J.C., Prasicek, G., Keuschnig, M., 2018. Glacial lakes in Austria. Distribution and formation since the Little Ice Age. *Global and Planetary Change*, 164, S. 39–51. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2018.03.003.
- Carrivick, J.L., Tweed, F.S., 2016. A global assessment of the societal impacts of glacier outburst floods. *Global and Planetary Change*, 144, S. 1–16. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2016.07.001.
- Church, M., Ryder, J.M., 1972. Paraglacial sedimentation: a consideration of fluvial processes conditioned by glaciation. *Geological Society America Bulletin*, 83, S. 3059–3071.
- Emmer, A., Merkl, S., Mergili, M., 2015. Spatiotemporal patterns of high-mountain lakes and related hazards in western Austria. *Geomorphology*, 246, S. 602–616.
- Erhard, B., Pechtl, W., 1985. *Die Menschen im Tal. Bilder und Berichte vom kargen Leben*. Haymon Verlag, Innsbruck, 174 S.
- Erschbamer, B., Niederfriniger Schlag, R., Winkler, E., 2008. Colonization processes on a central Alpine glacier foreland. *Journal of Vegetation Science*, 19, S. 855–862.

- Ewald, A., Hartmeyer, I., Lang, A., Otto, J.-C., 2018. Fracture Dynamics and Rock Slope Stability in Deglaciating Headwalls. Posterpräsentation bei der EGU General Assembly 2018, Geophysical Research Abstracts, 20, 6383 S.
- Faillettaz, J., Funk, M., Sornette, D., 2012. Instabilities on Alpine temperate glaciers: new insights arising from the numerical modelling of Allalingletscher (Valais, Switzerland). *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12, S. 2977–2991. DOI: 10.5194/nhess-12-2977-2012.
- Faillettaz, J., Funk, M., Vincent, C., 2015. Avalanching glacier instabilities: Review on processes and early warning perspectives. *Review of Geophysics*, 53, S. 203–224. DOI: 10.1002/2014RG000466.
- Farinotti, D., Brinkerhoff, D.J., Clarke, G.K.C., Fürst, J.J., Frey, H., Gantayat, P., Gillet-Chaulet, F., Girard, C., Huss, M., Leclercq, P.W., Linsbauer, A., Machguth, H., Martin, C., Maussion, F., Morlighem, M., Mosbeux, C., Pandit, A., Portmann, A., Rabatel, A., Ramsankaran, R., Reerink, T.J., Sanchez, O., Stentoft, P.A., Singh Kumari, S., Pelt, W.J.J. van, Anderson, B., Benham, T., Binder, D., Dowdeswell, J.A., Fischer, A., Helfricht, K., Kutuzov, S., Lavrentiev, I., McNabb, R., Gudmundsson, G.H., Li, H., Andreassen, L.M., 2017. How accurate are estimates of glacier ice thickness? Results from ITMIX, the Ice Thickness Models Intercomparison eXperiment. *The Cryosphere*, 11, S. 949–970. DOI: 10.5194/tc-11-949-2017.
- Farinotti, D., Usselman, S., Huss, M., Bauder, A., Funk, M., 2012. The runoff evolution in the Swiss Alps: Projections for selected high-alpine catchments based on ENSEMBLES scenarios. *Hydrological Processes*, 26(13), S. 1909–1924.
- Fey, C., Wichmann, V., Rett, H., Perzmaier, S., 2017. Multi-temporal Long-range Laser Scanning for Spatial Deformation Monitoring of Alpine Slopes. In: K. Hanke, T. Weirand (Hrsg.), 19. Internationale Geodätische Woche Obergurgl, S. 247–252.
- Fickert, T., 2017. Chapter 6: Glacier Forelands. Unique Field Laboratories for the Study of Primary Succession of Plants. In: D. Godone (Hrsg.), *Glaciers Evolution in a Changing World*. InTech Open, S. 125–146.
- Fischer, A., 2010. Glaciers and climate change: Interpretation of 50 years of direct mass balance of Hintereisferner. *Global and Planetary Change*, 71(1/2), S. 13–26.
- Fischer, A., Helfricht, K., Wiesenegger, H., Hartl, L., Seiser, B., Stocker-Waldhuber, M., 2016. Chapter 9: What Future for Mountain Glaciers? Insights and Implications from Long-Term Monitoring in the Austrian Alps. In: B. Gregory Greenwood, J.F. Shroder (Hrsg.), *Developments in Earth Surface Processes*. Elsevier, 21, S. 325–382. DOI: 10.1016/B978-0-444-63787-1.00009-3.
- Fischer, A., Kuhn, M., 2013. GPR measurements of 64 Austrian glaciers as a basis for a regional glacier volume inventory. *Annals of Glaciology*, 54(64), S. 179–188.
- Fischer, A., Patzelt, G., AchRAINER, M., Groß, G., Lieb, G.K., Kellerer-Pirklbauer, A., Bendler, G., 2018. *Gletscher im Wandel: 125 Jahre Gletschermessdienst des Alpenvereins*. Springer Spektrum, 140 S. DOI: 10.1007/978-3-662-55540-8.
- Fischer, A., Seiser, B., Stocker, M., Waldhuber, M., Mitterer C., Abermann, J., 2015. Tracing glacier changes in Austria from the Little Ice Age to the present using a lidar-based high-resolution glacier inventory in Austria. *The Cryosphere*, 9, S. 753–766. DOI: 10.5194/tc-9-753-2015.
- Förster, K., Hanzer, F., Stoll, E., Scaife, A., MacLachlan, C., Schöber, J., Huttenlau, M., Achleitner, S., Strasser, U., 2018. Retrospective forecasts of the upcoming winter sea-

- son's snow accumulation in the Inn headwaters (European Alps). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 22, S. 1157–1173.
- GAPHAZ, 2017. Assessment of Glacier and Permafrost Hazards in Mountain Regions. Mit: Allen, S., Frey, H., Huggel, C., Bründl, M., Chiarle, M., Clague, J.J., Cochachin, A., Cook, S., Deline, P., Geertsema, M., Giardino, M., Haeblerli, W., Kääb, A., Kargel, J., Klimes, J., Krautblatter, M., McArdell, B., Mergili, M., Petrakov, D., Portocarrero, C., Reynolds, J., Schneider, D. Technical Guidance Document (GAPHAZ) of the International Association of Cryospheric Sciences (IACS) and the International Permafrost Association (IPA). Zürich/Lima, 72 S.
- Gattermayr, W., 2013. Das hydrographische Regime der Ötztaler Ache. In: E.-M. Koch, B. Erschbamer (Hrsg.), *Wetter und Klima im Wandel*. Innsbruck university press, Innsbruck, S. 121–155.
- Geilhausen, M., Morche, D., Otto, J.-C., Schrott, L., 2013. Sediment discharge from the proglacial zone of a retreating Alpine glacier. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 57(2), S. 29–53.
- Greim, G., 1894. Der Ausbruch des Schwemser Ferners. *Mitteilung des Deutschen und Oesterreichischen Alpenvereins*, 20, 286 S.
- Haeblerli, W., 1983. Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 4, S. 85–90.
- Haeblerli, W., 2016. Disappearing ice, new landscapes and altered natural hazards in high mountain regions. In: G. Paravicini, C. Wiesmann (Hrsg.), *Only Human Beings Can Recognize Catastrophes, Provided They Survive Them; Nature Recognizes No Catastrophes*. 13th Interpraevent Luzern, Kantonaler Lehrmittelverlag, S. 177–189.
- Haeblerli, W., Buetler, M., Huggel, C., Lehmann Friedli, Th., Schaub, Y., Schleiss, A.J., 2016. New lakes in deglaciating high-mountain regions – opportunities and risks. *Climatic Change*, 139(2), S. 201–214. DOI: 10.1007/s10584-016-1771-5.
- Haeblerli, W., Huggel, C., Kaeab, A., Gruber, S., Noetzi, J., Zraggen-Oswald, S., 2006. Development and perspectives of applied research on glacier and permafrost hazards in highmountain regions: the example of Switzerland. *International Conference on High Mountain Hazard Prevention, Vladikavkaz/Moscow*, S. 219–228.
- Haeblerli, W., Wegmann, M., Muehll, D. von der, 1997. Slope stability problems related to glacier shrinkage and permafrost degradation in the Alps. *Eclogae Geologicae Helveticae*, 90, S. 407–414.
- Haeblerli, W., Whiteman, C., 2015. *Snow and Ice-Related Hazards, Risks, and Disasters: A General Framework*. Academic Press, S. 1–34. DOI: 10.1016/B978-0-12-394849-6.00001-9.
- Hartmeyer, I., Keuschnig, M., Delleske, R., Wichmann, V., Hoffmann, T., Schrott, L., 2015. Spatial patterns of rockfall in recently deglaciating high-alpine rock faces: Analysing rockfall release zones and volumes based on a multiannual LiDAR time series, Kitzsteinhorn, Austria. *Geophysical Research Abstracts*, 17, EGU2015-14687.
- Hartmeyer, I., Keuschnig, M., Schrott, L., 2012. Long-term monitoring of permafrost-affected rock faces – A scale-oriented approach for the investigation of ground thermal conditions in alpine terrain, Kitzsteinhorn, Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences*, 105, S. 128–139.

- Heckmann, T., Morche, D., 2019, *Geomorphology of Proglacial Systems. Landform and Sediment Dynamics in Recently Deglaciated Alpine Landscapes*. Springer International Publishing, 464 S.
- Helfricht, K., Lehning, M., Sailer, R., Kuhn, M., 2015. Local Extremes in the Lidar-Derived Snow Cover of Alpine Glaciers. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 97, S. 721–736, DOI: 10.1111/geoa.12111.
- Helfricht, K., Söber, J., Schneider, K., Sailer R., Kuhn, M., 2014. Interannual persistence of the seasonal snow cover in a glacierized catchment. *Journal of Glaciology*, 60, S. 889–904, DOI: 10.3189/2014JG13J197.
- Hoffmann, H., Preunkert, S., Legrand, M., Leinfelder, D., Bohleber, P., Friedrich R., Wagenbach, D., 2017. A New Sample Preparation System for Micro-14C Dating of Glacier Ice with a First Application to a High Alpine Ice Core from Colle Gnifetti (Switzerland). *Radiocarbon*, S. 1–17. DOI: 10.1017/RDC.2017.99.
- Huggel, C., Haeberli, W., Kääb, A., Bieri, D., Richardson, S., 2004. An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, S. 1068–1083.
- Huss, M., Bauder, A., Werder, M., Funk, M., Hock, R., 2007. Glacier-dammed lake outburst events of Gornersee, Switzerland. *Journal of Glaciology*, 53(181), S. 189–200. DOI: 10.3189/172756507782202784.
- Huss, M., Farinotti, D., Bauder A., M. Funk, M., 2008. Modelling runoff from highly glacierized alpine drainage basins in a changing climate. *Hydrological Processes*, 22, S. 3888–3902. DOI: 10.1002/hyp.7055.
- Kellerer-Pirklbauer, A., Slupetzky, H., Avian, M., 2012. Ice-avalanche impact landforms: The event in 2003 at the glacier Nördliches Bockkarkees, Hohe Tauern Range, Austria. *Geografiska Annaler, Series A, Physical Geography*, 94, S. 97–115. DOI: 10.1111/j.1468-0459.2011.00446.x.
- Keuschnig, M., Hartmeyer, I., Höfer-Öllinger, G., Schober, A., Krautblatter, M., Schrott, L., 2015. Permafrost-Related Mass Movements: Implications from a Rock Slide at the Kitzsteinhorn, Austria. In: G. Lollino, A. Manconi, J. Clague, W. Shan, M. Chiarle (Hrsg.), *Engineering Geology for Society and Territory*, Springer International Publishing, S. 255–259.
- Klug, C., Rieg, L., Ott, P., Mössinger, M., Sailer, R., Stötter, J., 2017. A Multi-Methodological Approach to Determine Permafrost Occurrence and Ground Surface Subsidence in Mountain Terrain, Tyrol, Austria. *Permafrost and Periglacial Processes*, 28(1), S. 249–265.
- Koboltschnig, G.R., Schöner, W., 2011. The relevance of glacier melt in the water cycle of the Alps: the example of Austria. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, S. 2039–2048.
- Kuhn, M., Escher-Vetter, H., 2004. Die Reaktion der österreichischen Gletscher und ihres Abflusses auf Änderungen von Temperatur und Niederschlag. *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 56(1/2), S. 10–16.
- Leith, K., Moore, J.R., Amann F., Loew, S., 2014. Subglacial extensional fracture development and implications for Alpine Valley evolution. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 119, S. 62–81. DOI: 10.1002/2012JF002691.
- Mair, V., Zischg, A., Lang, K., Tonidandel, D., Krainer, K., Kellerer-Pirklbauer, A., Deline, P., Schoeneich, P., Cremonese, E., Pogliotti, P., Gruber, S., Böckli, L., 2011. PermaNET –

- Permafrost Long-term Monitoring Network. Synthesebericht. Interpraevent Klagenfurt, 1(3), 24 S.
- McColl, S.T., 2012. Paraglacial rock-slope stability. *Geomorphology*, 153/154, S. 1–16.
- Mergili, M., Emmer, A., Juřicova, A., Cochachin, A., Fischer, J.T., Huggel, C., Pudasaini, S., 2018. How well can we simulate complex hydro-geomorphic process chains? The 2012 multi-lake outburst flood in the Santa Cruz Valley (Cordillera Blanca, Perú). *Earth Surface Processes and Landforms*, 43, S. 1373–1389. DOI: 10.1002/esp.4318.
- Nachtnebel, H.P., Dokulil, M., Kuhn, M., Loiskandl, W., Sailer, R., Schöner, W., 2014. Der Einfluss des Klimawandels auf die Hydrosphäre. *österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14)*. Austrian Panel on Climate Change, Verlag der österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, S. 411–466.
- Nicolussi, K., 2013. Die historischen Vorstöße und Hochstande des Vernagtferners 1600–850 AD. *Zeitschrift für Gletscherkunde und Glazialgeologie*, 45/46, S. 9–23.
- Otto, J.-C., Helfricht, K., Prasicek, G., Keuschnig, M., Buckel, J., Kocher, M. 2018. Glacial lakes in Austria – current trends and future development. *Geophysical Research Abstracts*, 20, 17009 S.
- Otto, J.-C., Keuschnig, M., 2014. Permafrost-Glacier Interaction. Process Understanding of Permafrost Reformation and Degradation. In: M. Rutzinger, K. Heinrich, A. Borsdorf, J. Stötter (Hrsg.), *permafrost – Austrian Permafrost Research Initiative*. Final Report, S. 3–16.
- Patzelt, G., 2016. Das Bunte Moor in der Oberfernau (Stubai Alpen, Tirol). Eine neu bearbeitete Schlüsselstelle für die Kenntnis der nacheiszeitlichen Gletscherschwankungen der Ostalpen. *Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt*, 156, S. 97–107.
- Pfaundler, L., 1871. Der Ueblethalferner und seine Umgebung. *Zeitschrift des Deutschen und österreichischen Alpenvereins*, 2, S. 16–47.
- Prager, C., Zangerl, C., Patzelt, G., Brandner, R., 2008. Age distribution of fossil landslides in the Tyrol (Austria) and its surrounding areas. *Natural Hazards and Earth System Science*, 8(2), S. 377–407.
- Pralong, A., Birrer, C., Stahel W., Funk, M., 2005. On the Predictability of Ice Avalanches. *Nonlinear Processes in Geophysics*, 12, S. 849–861.
- Pralong, A., Funk, M., 2006. On the instability of avalanching glaciers. *Journal of Glaciology*, 52(176), S. 31–48.
- Richardson S.D., Reynolds, J.M., 2000. An overview of glacial hazards in the Himalayas. *Quaternary International*, 65–66, S. 31–47. DOI: 10.1016/S1040-6182(99)00035-X.
- Richter, E., 1889. Der Gletscherausbruch im Martellthal und seine Wiederkehr. *Mitteilung des Deutschen und Oesterreichischen Alpenvereins*, 15, S. 231–233.
- Richter, E., 1892. Urkunden über die Ausbrüche des Vernagt- und Gurglergletschers im 17. und 18. Jahrhundert. *Forschungen zur deutschen Landes- und Volkskunde*, 6, S. 345–440.
- Schöber, J., 2014. Improved snow and runoff modelling of glacierized catchments for flood forecasting. *Dissertation, Universität Innsbruck*, 246 S.
- Slupetzky, H., 2000a. Furlegg-Eisbruch, Mt. Blanc, Simony Kees. *Berg&Steigen*, 2(2), Innsbruck, 5 S.
- Slupetzky, H., 2000b. Eine tödliche Fall. *Analyse der Naturprozesse nach einem Alpinunfall*. *Berg&Steigen*, 2(2), Innsbruck, S. 16–17.
- Slupetzky, H., 2001. eisSturz. *Berg&Steigen*, 37, 4(1), S. 14–15.

- Slupetzky, H., 2002. Der Eissturz vom Nördlichen Bockkarkees (Hohe Tauern, Glocknergruppe, Käfertal) im Jahr 1945. In: Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung (=WAKONIGG-Festschrift), Graz, S. 211–226.
- Slupetzky, H., 2007. Tod in der Eiskapelle. Analyse eines tödlichen Eiskletterunfalls. *Berg&Steigen*, Oesterreichischer Alpenverein, 1(7), Innsbruck, S. 30–33.
- Slupetzky, H., Ghetta, S., Fellin W., Lackinger, B., 2009. Zur Standsicherheit von Eis- und Firnüberhängen. *Jahrbuch des KURASI*, S. 176–183.
- Sonklar, K.v., 1857. Der neuerliche Ausbruch des Suldengletschers. Sitzungsbericht. Akademie der Wissenschaften Wien, mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Wien, 23.
- Stocker-Waldhuber, M., Fischer, A., Keller, L., Morche, D., Kuhn, M., 2016. Funnel-shaped surface depressions. Indicator or accelerant of rapid glacier disintegration? A case study in the Tyrolean Alps. *Geomorphology, Special Issue: SEDIBUD*. DOI: 10.1016/j.geomorph.2016.11.006.
- Tufnell, L., 1984. *Glacier hazards*. Longman, London/New York, 112 S.
- VAW, o. J. Auszug aus dem Inventar gefährlicher Gletscher der Schweiz, 1 Zusammenfassende Betrachtungen. ETH Zürich, 12 S. <http://glacier-hazards.glaciology.ethz.ch/download/synthese.pdf> [15.10.2018].
- Vincent, C., Desclotres, M., Garambois, S., Legchenko, A., Guyard H., Gilbert, A., 2012. Detection of a subglacial lake in Glacier de Tête Rousse (Mont Blanc area, France). *Journal of Glaciology*, 58(211), S. 866–878. DOI: 10.3189/2012JoG11J179.
- Viviroli D., D.R. Archer, W. Buytaert, H.J. Fowler, G.B. Greenwood, A.F. Hamlet, Y. Huang, G. Koboltschnig, Litaor, M.I., López-Moreno, J.I., Lorentz, S., Schädler, B., Schreier, H., Schwaiger, K., Vuille, M., Woods, R., 2011. Climate change and mountain water resources: overview and recommendations for research, management and policy. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15, S. 471–504.
- Weber, M., Prasch, M., Kuhn, M., Lambrecht, A., 2015. Future Changes in the Ice Reservoir. In: W. Mauser, M. Prasch (Hrsg.), *Regional Assessment of Global Change Impacts*. Springer International Publishing, Cham, S. 243–249.
- Wegmann, M., Gudmundsson, G.H., Haeberli, W., 1998. Permafrost changes in rock walls and the retreat of alpine glaciers: a thermal modelling approach. *Permafrost and Periglacial Processes*, 9, S. 23–33.
- Zanoner, T., Carton, A., Seppi, R., Carturan, L., Baroni, C., Salvatore, M.C., Zumiani, M., 2017. Little Ice Age mapping as a tool for identifying hazard in the paraglacial environment: The case study of Trentino (Eastern Italian Alps). *Geomorphology*, 295, S. 551–562.
- Zraggen-Oswald, S., Haeberli W., Käab, A., o. J. Glacier floods, Zertifikatslehrgang Klima-Auswirkungen. http://www.geo.uzh.ch/microsite/nathaz/cvsdownload/natural_hazard/module02/02020502/media/02020502txt01.pdf [15.10.2018].
- Zischg, A., Dinale, R., Geier, G., Staffler, H., 2014. Gletscherseeausbruch und Murgangereignis im Pfossental am 29 Juli 2005. Analyse der meteorologischen und geomorphologischen Bedingungen. In: *Autonome Provinz Bozen-Südtirol und Kanton Graubünden (Hrsg.), ClimOpt, Optimierung des Managements klimabedingter Naturgefahren*. Interreg Italien Schweiz 2007–2013, 21 S. http://www.provinz.bz.it/sicherheit-zivilschutz/zivilschutz/veroeffentlichungen.asp?publ_action=300&publ_image_id=349348 [15.10.2018].

E Weitere Extremereignisse

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

23 Erdbeben

Wolfgang Lenhardt, Christa Hammerl, Maria de Puy Papi-Isaba und Stefan Weginger*

Zusammenfassung

Österreichs Seismizität und deren Auswirkungen können als moderat in einem europäischen Kontext eingestuft werden – dennoch müssen bestimmte Vorsichtsmaßnahmen getroffen werden, da Erdbeben auch zu Todesopfern geführt haben. Die letzte Version der Baunorm für die erdbebensichere Gestaltung von Bauwerken wurde vom Österreichischen Normungsinstitut im Jahr 2011 herausgegeben, wobei die Bemessungswerte auf jenen der Norm von 1997 basieren. Diese Norm folgt bereits den Vorgaben des EURO-CODE, womit detaillierte Angaben der zu berücksichtigenden Bodenbeschleunigung verbunden sind. Die höchsten Bodenbeschleunigungen sind im Wiener Becken, dem Mur- und Mürztal, dem Inntal und im südlichen Kärnten zu erwarten. Besonders wichtig erscheint die Aufarbeitung historischer (Stark-)Beben, um die Seismizität eines Gebietes besser einschätzen zu können. Der Erdbebendienst der ZAMG entwickelt Erschütterungskarten (Shake Maps) um den Katastrophen- und Zivilschutzeinrichtungen bereits kurz nach einem Erdbebenereignis eine detaillierte Information über das Ausmaß der Erdbebenauswirkungen zukommen lassen zu können.

Abstract

In European context the seismicity in Austria can be considered as moderate but certain steps must still be taken to counteract possible catastrophes as some earthquakes already claimed fatalities. The last version of the building code for earthquake resistant design was released by the Austrian Institute of Standards in 2011, which was based on the version of 1997. This code adheres to EUROCODE regulations, thus giving detailed information of ground accelerations in Austria. Highest ground accelerations are expected in the Vienna Basin, the Mur and Mürz Valley, the Inn Valley and Southern Carinthia. The importance of completing the earthquake catalogue, permitting more precise earthquake hazard esti-

* Wolfgang Lenhardt, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Geophysik, wolfgang.lenhardt@zamg.ac.at.

Christa Hammerl, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Geophysik, christa.hammerl@zamg.ac.at.

Maria de Puy Papi-Isaba, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Geophysik, maria.papi-isaba@zamg.ac.at.

Stefan Weginger, Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, Abteilung Geophysik, stefan.weginger@zamg.ac.at.

mates, is emphasized. Shake maps in real-time will be implemented soon thus supplying disaster relief organizations with realistic estimates of the earthquake effects.

Kernaussagen

- Die Historische Erdbebenforschung erfordert eine Aktualisierung des Erdbebenkatalogs und führt somit zu einer Verbesserung der Erdbebengefährdungseinschätzung. Dies ist eine wichtige Grundlage für die erdbebensichere Bauweise.
- Beispiele extremer Erdbeben rechtfertigen diese Notwendigkeit.
- Eine neue Norm befindet sich in Ausarbeitung.
- Für Belange des Zivilschutzes werden derzeit neue Informationszusammenstellungen entwickelt, die schnelle Szenarieneinschätzungen erlauben.

Key Points

- Historical Earthquake Research leads to an improved earthquake hazard estimation which serve as basis for the building code.
- Examples of extreme earthquakes in Austria justify this activity.
- A new building code is currently being drafted.
- For civil protection purposes new tools are under development to provide scenarios in near real-time.

23.1 Einleitung

Österreich liegt im Gürtel der alpinen Gebirgsbildung, der durch die Kollision der Eurasischen und der Afrikanischen Platte entstanden ist. Aufgrund neuester GPS-Messungen weiß man, dass diese Bewegungen heute noch andauern und jährlich eine Einengung zwischen Europa und Afrika von mehreren Millimetern bewirken. Diese Kompression drückt sich in der Gebirgsbildung aus, wobei die Alpen nicht nur horizontal zusammengedrängt, sondern auch über- und unterschoben werden, was zu einer Verdoppelung der Erdkrustenmächtigkeit in diesem Bereich führt. Eine Folge dieser tektonischen Bewegungen sind Erdbeben, die aber verglichen mit der Türkei, Italien oder Griechenland von geringerer Stärke sind. Dennoch war man sich schon vor über 100 Jahren aufgrund der Erfahrungen mit dem Laibacher Beben im Jahre 1895 bewusst, dass auch Erdbeben in Mitteleuropa eine erstzunehmende Bedrohung für die Bevölkerung darstellen.

Obwohl Erdbeben im Alpenraum selten sind, wurden seit 1900 doch über zweitausend Erdbeben in Österreich verspürt. Davon verursachten mehr als 50 Erdbeben leichte Gebäudeschäden entsprechend dem Intensitätsgrad 6 (EMS-98, zwölfteilige makroseismische Skala, s. a. Grünthal, 1998), und neun Erdbeben führten zu mittleren Gebäudeschäden (Intensitätsgrad VII bzw. VIII). Blickt man weiter zurück, so erkennt man, dass Österreich immer wieder – wenn auch

in Abständen von 100 bis 200 Jahren – von Erdbeben der Intensität 8° und darüber heimgesucht wurde.

Meistens werden schwächere Beben nicht im gesamten Bundesgebiet wahrgenommen, aber tatsächlich finden viele dieser kleinen Beben in Bereichen statt, in denen es vor nicht allzu langer Zeit auch stärkere Erdbeben gegeben hat, die dann mit schweren Gebäudeschäden verbunden waren. Oft kann man sich aber an solche Ereignisse nicht erinnern – oder hat gar keine Kenntnis davon, weil diese Erdbeben schon sehr lange zurück liegen und sich der Erinnerung entziehen. Nur wenige Personen können sich inzwischen noch an das Erdbeben von Schwadorf bei Wien im Jahr 1927 oder Obdach 1936 oder Puchberg 1939 erinnern. Auch das Erdbeben von Seebenstein im Jahr 1972 ist bereits der jüngeren Generation kein Begriff mehr, obwohl die Auswirkungen auf Wien beachtlich waren (Drimmel und Duma, 1974). Obwohl das Epizentrum 60 km von Wien entfernt war stürzten damals u. a. 15 Meter der Balustrade der Universität Wien auf den Bürgersteig, und die Feuerwehr musste hunderte Male ausrücken um herabgestürzte Kamine von den Straßen und Gehwegen zu beseitigen.

Seit 1. April 2000 existiert im Erdbebendienst ein Bereitschaftsdienst, der gewährleistet, dass die entsprechenden Stellen des Staatlichen Krisenmanagements über ein wahrgenommenes Erdbeben sofort Kenntnis erhalten.

Fachbegriffe und Definitionen (Abbildung 01)

Epizentrum: Projektion des Erdbebenherdes an der Erdoberfläche, entspricht meist dem Ort der stärksten Auswirkung (Fühlbarkeit bzw. Schäden).

Erdbebengefährdung: Als »Erdbebengefährdung« wird eine Bodenbewegung (meist in horizontalen Beschleunigungen des Bodens) angegeben, die mit einer bestimmten Wahrscheinlichkeit an einem definierten Standort nicht überschritten wird (Lenhardt, 1995, 1997). Damit unterscheiden wir sie grundsätzlich vom »Erdbebenrisiko«, das die Wahrscheinlichkeit eines bestimmten Schadens – meist als Schadenskosten ausgedrückt – beschreibt. Dieser hängt von der Erdbebengefährdung sowie der Anfälligkeit und Nutzung von Bauobjekten ab. Manchmal werden auch Produktionsausfälle mitberücksichtigt. Das Erdbebenrisiko ist nicht nur für Versicherungen von Interesse, sondern zeigt auch die wirtschaftlichen Konsequenzen von Erdbeben in ihrer vollen Bandbreite (Schäden an wichtigen Infrastrukturen, Unterbrechung von Verkehrswegen bzw. Transportrouten, Tourismus) auf. Für die Planung und Errichtung von Bauwerken sind deshalb Standortbewertungen von großer Bedeutung, welche die Gebäudebelastungen in Abhängigkeit der Nutzungsdauer (in Europa werden 50 Jahre für gewöhnliche Wohngebäude angenommen) und dem akzeptablen Restrisiko (in Europa 10 %) berücksichtigen (Lenhardt, 2010).

Im Weiteren unterscheidet man zwischen »probabilistischen« und »deterministischen« Gefährdungsaussagen. Während erstere auf statistischen Be-

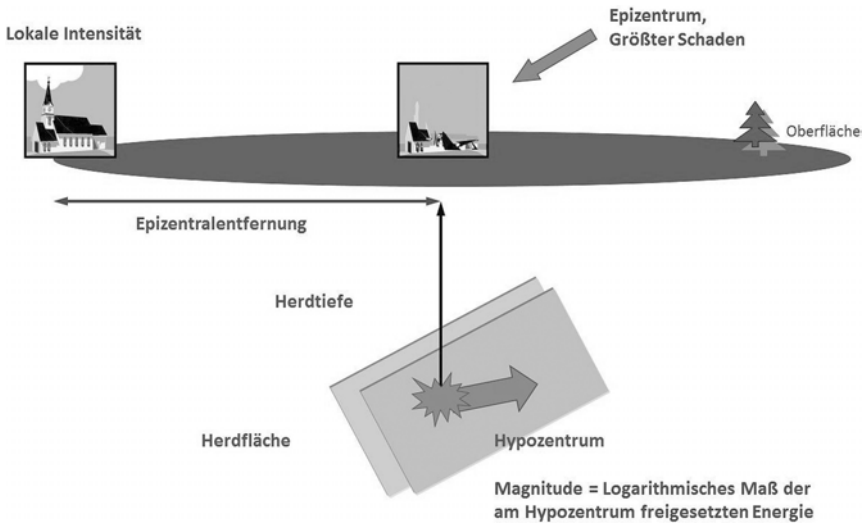


Abbildung 01: Fachbegriffe.

Figure 01: Terminology.

Quelle: ZAMG/Geophysik, 2018

rechnungen basieren, so gründen sich die »deterministischen« auf Einzel- bzw. Extremszenarien. Für letztere bedeutet dies, dass ein Erdbeben mit einer bestimmten Magnitude und Herdtiefe auf Grund geologischer, topographischer und seismotektonischer Gesichtspunkte festgelegt wird, und dessen Auswirkung für einen definierten Standort berechnet wird. Je nach Wissensstand lassen sich beide Methoden miteinander verbinden. Sind zum Beispiel aufgrund geologischer Bodenuntersuchungen Hinweise auf Erdbeben in geologischen Zeiträumen gegeben (z. B. Sieh, 1978), so kann diese Information in probabilistische Methoden mit einbezogen werden. Gerade für besondere Bauwerke, zu denen vor allem Talsperren, Endlager oder Atomkraftwerke zählen, ist dieser Aspekt von wesentlicher Bedeutung, da für diese Bauten zusätzliche Nachweise für die Betriebssicherheit erbracht werden müssen, die weit über die allgemeinen Baunormen hinausgehen.

Extremereignis: Die Definition eines Extremereignisses ist je nach Themenschwerpunkt anders. In diesem Fall werden Erdbeben als extrem angesehen, die sich der Erfahrung eines Menschen mit einer durchschnittlichen Lebensdauer von 80 Jahren gerade noch entziehen können (50 % Überschreitungswahrscheinlichkeit in 80 Jahren). Dies führt bei einer Poisson-Verteilung zu einem durchschnittlichen Wiederkehrzeitraum von 115 Jahren, welcher etwa dem Wiederkehrzeitraum von Erdbeben der Intensität VIII in Österreich entspricht. Solche Erdbeben werden in diesem Rahmen somit als extreme Ereignisse definiert, weil sie mit mehreren Beispielen hinsichtlich der Auswirkungen auf die

Bevölkerung aus den letzten 1.000 Jahren belegt werden können. Weit darüber hinausreichende Zeiträume sind für kritische Infrastrukturen zu berücksichtigen, werden hier aber nicht weiter diskutiert, da dies der gegebene Rahmen nicht ermöglicht.

Herdtiefe: Tiefe des Erdbebenvorganges unter der Oberfläche (Distanz zwischen dem Epizentrum und dem Hypozentrum).

Historische Erdbebenforschung: Diese wissenschaftliche Disziplin befasst sich mit der Rekonstruktion der Intensitäten eines Bebens und ermöglicht daraus die Abschätzung von Magnitude und Herdtiefe.

Hypozentrum: Lage des Erdbebenvorganges im Erdinneren.

Intensität: Größe zur Beschreibung der Auswirkung von Erdbebeneffekten mittels Fühlbarkeits- und Schadensbeschreibung (s. a. 12-teilige Europäische Makroseismische Skala EMS-98). Sie bezieht sich auf Effekte an der Oberfläche die in »Grad« angegeben und früher oft in römischen Ziffern angeführt wurden um sich von der Magnitude zu unterscheiden. Intensität 6° entspricht leichten Gebäudeschäden, 7° mittleren Gebäudeschäden (Rissbildungen), 8° starken Gebäudeschäden und 9° sehr starken Gebäudeschäden, wobei bereits eine Vielzahl der Gebäude einstürzt. Früher fand in Österreich die Mercalli-Sieberg Skala und danach die Medwedew-Sponheuer-Karnik Skala ihre Anwendung. Im Epizentrum spricht man von der Epizentralintensität »Io«. Mit zunehmender Distanz vom Epizentrum spricht man von einer lokalen Intensität.

Magnitude: Logarithmisches Maß der am Bebenherd freigesetzten Schwingungsenergie eines Erdbebens.

Quelle (im historischen Sinn): Zeitgenössische Texte, bildliche Darstellungen, Bauwerke, etc., welche Informationen zu Erdbeben aufweisen.

23.2 Historische Entwicklung der Erdbebenerfassung

23.2.1 Historische Erdbebenforschung

Die Erforschung historischer Erdbeben – d. h. von Erdbeben vorwiegend vor 1900 – ist nicht nur von geschichtlichem Interesse. Die Kenntnis über aufgetretene Schäden und das Fühlbarkeitsgebiet eines Erdbebens lassen auf die Intensität und Stärke schließen und in der Folge auf die Erdbebengefährdung eines Gebietes.

Um historische Erdbeben möglichst genau einschätzen zu können, ist es notwendig, auf Originalquellen zurückzugreifen (Hammerl, 2017). Dafür werden zum Beispiel Annalen, Chroniken, Briefe, Rechnungen und vieles mehr in Archiven und Bibliotheken ausgehoben. Diese Quellen werden unter Berücksichtigung des Zeitgeistes und der gerade gültigen Vorstellung von der Ursache

der Erdbeben kritisch analysiert und interpretiert. Dies erfolgt in interdisziplinärer Zusammenarbeit (Lenhardt und Hammerl, 2010).

23.2.2 Messtechnik

Der Werdegang der Errichtung der seismischen Beobachtungsstationen in Österreich lässt sich bis 1895 bzw. sogar bis 1856 zurückverfolgen. Damals wurden Pendel zur Registrierung der Bodenbewegungen genutzt, da es elektromagnetische Systeme zur messtechnischen Erfassung von Bodenbewegungen noch nicht gab. Die Messung und Aufzeichnung erfolgte mit einem und demselben Gerät – dem Seismographen. Später wurden die beiden Einheiten voneinander getrennt, sodass die Messungen zwar noch analog über ein Pendel erfolgten (Seismometer), aber die Aufzeichnungen bereits auf einem eigenen Schreiber erfolgten. Diese Art der Aufzeichnungen wurde letztlich Ende der 80er Jahre des 20. Jahrhunderts durch digitale Registrierungen ersetzt. Heute verfügt der Österreichische Erdbebendienst über zwei Gruppen von Messgeräten. Sie ermöglichen die Registrierung von Nah- und Fernbeben nach internationalen Standards (s. a. Melichar, 1989, Lenhardt et al., 2001). An mehreren Orten in Österreich sind auch Erdbebenmessstationen zur Aufzeichnung starker Bodenbewegungen («Strong Motion») installiert.

23.2.3 Baunorm

In Österreich regelte nach 1945 die ÖNORM B 4000-3 »Berechnung und Ausführung der Tragwerke – allgemeine Grundlagen – Windlasten und Erdbebenkräfte« in den drei Ausgaben 1955, 1956 und 1961 die Berücksichtigung der Erdbebeneinwirkungen. Drei Jahre nach dem schweren Erdbeben im Friaul 1976 wurde 1979 eine neue ÖNORM B 4015-1 »Erdbebenkräfte an nicht schwingungsanfälligen Bauwerken« herausgegeben (siehe oben). Ein weiterer geplanter Teil (Teil 2, Berechnungsanleitung) wurde damals nicht fertiggestellt. Die in der Gefährdungskarte angeführten effektiven horizontalen Bodenbeschleunigungswerte bezogen sich auf das 100-jährliche Erdbeben und die Isolinien gleicher Erdbebenbelastung auf das 200-jährliche Erdbeben.

Die Einführung des EUROCODE 8, der die Bemessungswerte mit 10 % Nichtüberschreitungswahrscheinlichkeit in 50 Jahren vorschreibt, erforderte eine grundlegende Überarbeitung, die am 1. Oktober 1997 in einer neuen Fassung der ÖNORM B 4015-1 mündete und sich auf einer Studie für die Staubeckenkommission gründete (s. a. Lenhardt, 1995). Im August 1999 folgte dann zum ersten Mal der 2. Teil der ÖNORM, der sich mit den Berechnungs-

methoden befasste. Im Juni 2002 erschien dann die Version der ÖNORM B 4015, die die beiden Teile 1 und 2 zusammenfasste. Ende Mai 2009 wurde die ÖNORM B 4015 zurückgezogen. An ihre Stelle trat die ÖNORM EN 1998-1, die dem EUROCODE-8 entspricht. Nationale Festlegungen und Erläuterungen sind in der dazugehörigen ÖNORM B 1998-1 geregelt. Die in der letzten Version der ÖNORM B 4015 (Version 1997) erwähnten Erdbeben-Bemessungswerte blieben bestehen und entsprechen den damaligen effektiven horizontalen Bodenbeschleunigungen für die quasistatische Berechnungsmethoden. Inzwischen finden Bemessungen aufgrund von Antwortspektren ihre Anwendung und daher müssen die entsprechenden Bemessungswerte in der aktuellen Norm auf Spitzenbodenbeschleunigungen angepasst werden. Das erfordert im Durchschnitt eine Erhöhung der Bemessungswerte um ca. 40 %.

23.3 Fallbeispiele

Die folgenden neun Erdbebenereignisse können als extreme Beispiele angesehen werden. Das Erdbeben vom 4. Dezember 1690 scheint in dieser Auflistung nicht auf, da eine grundlegende Studie nach den Kriterien der Historischen Erdbebenforschung noch aussteht. Einige andere bekannte Erdbeben werden hier nicht extra vorgestellt, da sie nach rezenten Studien (Hammerl, 2017) Epizentralintensitäten aufwiesen, die einen Grad von 7 nicht mehr überschritten (z. B. Leoben 1794) oder sich als »fake« heraus gestellt haben (z. B. Wiener Neustadt 1668).

23.3.1 Kärnten – 04.05.1201

In älteren Erdbebenkatalogen (Toperczer und Trapp, 1950) wurde das Epizentrum dieses Bebens in Murau angenommen, das am westlichen Ende der geologischen Mur-Mürztal-Störungszone liegt, und die maximale Intensität mit 9° auf der 12-teiligen Mercalli-Sieberg Skala abgeschätzt.

Aufgrund einer quellenkritischen Studie (Hammerl, 1995) der zeitgenössischen Originaltexte für das Ereignis stellte sich heraus, dass jene Orte, über die Schadensberichte zu finden waren, in Kärnten zu suchen sind und nicht, wie früher angenommen, in der Steiermark. Die Angaben in den Originalquellen sind aber zu dürftig, um auch ein neues Epizentrum, die Epizentralintensität, Magnitude und die Herdtiefe abschätzen zu können. Dieses Erdbeben wird hier nur deshalb angeführt, weil es oft in der Sekundärliteratur angesprochen wird.

23.3.2 Kindberg?/Steiermark – 08.05.1267

Auch dieses Erdbeben wird in früheren Erdbebenkatalogen (Toperczer und Trapp, 1950) als Starkbeben mit einer maximalen Intensität von 8° auf der Mercalli-Sieberg Skala angeführt. Wenige zeitgenössische Quellen berichten über dieses Beben. Schaden wird unspezifisch nur an der Burg Kindberg berichtet, mehr weiß man über dieses Beben nicht. Daraus folgt, dass man keine Erdbebenparameter abschätzen kann.

23.3.3 Ried am Riederberg/Niederösterreich – 15.09.1590

Das Erdbeben vom 15. September 1590 gilt wohl einerseits als eines der interessantesten, am besten dokumentierten und andererseits als das stärkste historische Beben in Österreich.

Durch Auffinden von neuen Quellen in einer aktuellen Studie (Hammerl und Lenhardt, 2013) wurde das Epizentrum mit Ried am Riederberg (48,26/16,06) festgelegt, die Epizentralintensität mit $I_0 = 9^\circ$ EMS, die Herdtiefe aufgrund der MDPs mit 6 km abgeschätzt.

Aus der Herdtiefe und der Reichweite der Erschütterungen errechnet sich im Mittel eine Magnitude von 5,8. Die Intensität für Wien wurde mit 7° EMS-98 abgeschätzt, was bedeutet, dass an vielen Häusern solider Bauart mäßige Schäden, wie kleine Mauerrisse, Abfall von Putz oder Herabfallen von Schornsteinteilen auftreten. Vornehmlich Gebäude in schlechterem Zustand zeigen größere Mauerrisse und den Einsturz von Zwischenwänden. Dokumentierte Schäden sind u. a. der Einsturz des Turmes der Michaelerkirche und eines Gasthauses in der Rotenturmstraße. Hier wurde auch von Todesopfern berichtet. Der wahrscheinliche Fehler des Epizentrums ergibt sich zu 10 km.

23.3.4 Hall in Tirol – 17.07.1670

Das stärkste und folgenschwerste Beben Tirols mit dem Epizentrum in Hall in Tirol ereignete sich am 17. Juli 1670. Aus zahlreichen zeitgenössischen Quellen war es möglich, die Epizentralintensität mit 8° EMS-98 und die Magnitude, bei einer angenommenen Herdtiefe von 6 km, mit 5,2 zu rekonstruieren (Hammerl et al., 2012). 8° EMS-98 bedeutet, dass viele Personen das Gleichgewicht verlieren, an vielen Gebäuden einfacher Bausubstanz schwere Schäden auftreten, d. h. Giebelteile und Dachgesimse und einige Gebäude sehr einfacher Bauart sogar einstürzen. Dies trifft für Hall in Tirol zu, viele Häuser wurden beschädigt, einige Gebäude und der Pfarrturm stürzten ein. Das Beben forderte mindestens

neun Todesopfer in Hall in Tirol und Thaur. Die errichteten Stützmauern (Erdbebenfeiler) prägen noch heute das Stadtbild.

23.3.5 Innsbruck bis Hall in Tirol – 22. 12. 1689

Dieses Erdbeben zählt mit dem vom 17. Juli 1670 zu den stärksten bekannten Beben in Tirol. Das Epizentrum lag 1689 näher bei Innsbruck. Auch dieses Beben forderte, wie jenes im Jahr 1670, Todesopfer, mindestens elf in Hall in Tirol und elf in Innsbruck.

Die Epizentralintensität konnte aus zahlreichen historischen Quellen mit 7–8° EMS-98 abgeschätzt werden. Die Magnitude wurde mit 4,8 bei einer angenommenen Herdtiefe von 6 km abgeschätzt. Betrachtet man die Schäden im Epizentrum in Innsbruck, so würde man eine größere Magnitude erwarten. Da aus den historischen Quellen das Gebiet, wo das Erdbeben noch verspürt werden konnte, relativ klein ist, erscheint die Annahme dieser Magnitude gerechtfertigt (Hammerl et al., 2012).

23.3.6 Nassereith/Tirol – 28. 11. 1886

Das Erdbeben vom 28. November 1886 ist sehr gut durch zahlreiche zeitgenössische Quellen belegt. Es wurde berichtet, dass in Nassereith beinahe an jedem Haus innen und außen Risse entstanden und Schornsteine von den Dächern fielen. In einigen Häusern brachen ganze Plafonds herunter. Die höchste Intensität wurde für Nassereith mit 7–8° EMS-98 und die Magnitude mit 5,1 bei einer Herdtiefe von 8 km abgeschätzt.

23.3.7 Schwadorf/Niederösterreich – 08. 10. 1927

Am 8. Oktober 1927 erschütterte ein Erdbeben Schwadorf in Niederösterreich. Es war das stärkste Erdbeben des 20. Jahrhunderts in Österreich. Die Epizentralintensität wurde auf Grund der Schäden mit 8° EMS-98 bestimmt. Im Erdbebenkatalog der ZAMG ist das Hauptbeben mit einer Magnitude 5,2 und einer Herdtiefe von 6 km vermerkt. In der Gemeinde Schwadorf bei Wien wurden viele Häuser einfacher Bausubstanz beschädigt, einzelne Objekte mussten in der Folge abgetragen werden. Auch in Enzersdorf an der Fischa wurden einige Gebäude stark in Mitleidenschaft gezogen.

23.3.8 Namlos/Tirol – 07.10.1930

Am 7. Oktober 1930 erschüttert ein Erdbeben der Stärke 5,3 die Ortschaft Namlos, einem Seitental des Lechtals. Die meisten Kamine stürzten ein und auch einige Häuserfassaden wiesen Risse auf. Insgesamt verursachte das Beben einen hohen Sachschaden. Das Beben war weit über die Grenzen Österreichs hinaus deutlich fühlbar. Die Epizentralintensität wurde mit 7–8° EMS-98 abgeschätzt, die Herdtiefe mit 9 km. (Hammerl und Lenhardt, 1997)

23.3.9 Seebenstein/Niederösterreich – 16.04.1972

Die Epizentralintensität des Bebens mit dem Epizentrum in Seebenstein betrug 7–8° EMS-98, die Magnitude 5,3 bei einer Herdtiefe von 10 km. In Guntrams und in Schwarzau stürzten zwei ältere Gebäude ein. Zwei Eisenkreuze fielen von den Türmen der Kirche in Schwarzau. In Katzelsdorf brach eine Statue vom Kirchturm ab und die Kirche in Seebenstein erlitt beträchtlichen Sachschaden. In Wiener Neustadt konnte die Bundesstraße stundenlang nicht befahren werden, da erst die heruntergestürzten Gesimse und Kamine beseitigt werden mussten. Im Dom von Wiener Neustadt fielen Mauerteile herab, Autos wurden vor allem am Hauptplatz durch herabfallende Bauteile beschädigt. In Wien musste die Feuerwehr hunderte Male ausrücken, um eingestürzte Kamine oder herabgefallene Dachziegel zu beseitigen, wie z. B. die abgestürzte Balustrade an der Universität Wien. (Hammerl und Lenhardt, 1997)

23.4. Sachstand

Die folgende Tabelle 01 listet alle stärkeren Erdbeben in und um Österreich auf, auch jene wo detaillierte Studien noch fehlen. Dies betrifft hauptsächlich die Bundesländer Kärnten, Salzburg, Oberösterreich und das Burgenland.

Tabelle 01: Historische Erdbeben mit stärkeren Gebäudeschäden in Österreich.
Table 01: Historical earthquakes causing intense building damage in Austria.

Datum	Geogr. Breite	Geogr. Länge	M* Io	Epizentrum	Land	Literatur
1201.05.04			?	Katschberg?	KÄ	H1995
1267.05.08	47,51	15,45	?	Kindberg	ST	LH2002
1348.01.25	46,40	13,40	10	Friaul	IT	A1976
1590.09.15	48,26	16,07	5,2 8	Riederberg	NÖ	HL2013
1590.09.15	48,26	16,07	5,8 9	Riederberg	NÖ	HL2013

((Fortsetzung))

Datum	Geogr. Breite	Geogr. Länge	M*	Io	Epizentrum	Land	Literatur
1670.07.17	47,28	11,51	5,2	8	Hall	TI	HL2012
1689.12.22	47,27	11,39	4,8	7-8	Innsbruck	TI	HL2012
1690.12.04				?	Friaul, Kärnten?	IT/ KÄ	A1976
1712.04.10	47,82	16,24	4,0	6	Wr. Neustadt	NÖ	HL2013
1766.08.05	47,81	16,61	4,6	7	St. Margarethen	BU	DT1982
1766.08.16	47,81	16,61	4,6	7	St. Margarethen	BU	DT1982
1767.11.21	46,89	14,33	4,8	7	Strassburg	KÄ	DT1982
1768.02.27	47,82	16,24	5,0	7	Wr. Neustadt	NÖ	H2000, HL2013
1794.02.06	47,38	15,09	4,7	7	Leoben	ST	H1996, H2000, LH2002
1810.07.18	47,58	14,46	4,5	6	Admont	ST	LH2002
1820.07.17	47,35	11,71	4,5	7	Schwaz	TI	DT1982
1837.03.14	47,61	15,67	4,7	7	Mürzzuschlag	ST	LH2002
1857.12.25	46,59	14,02	4,6	7	Rosegg	KÄ	DT1982
1885.04.30	47,51	15,45	5,0	7	Kindberg	ST	LH2002
1886.11.28	47,32	10,84	5,1	7-8	Nassereith	TI	DT1982
1888.04.12	47,78	16,54	4,6	7	Siegendorf	BU	DT1982
1910.07.13	47,32	10,84	4,8	7	Nassereith	TI	DT1982
1916.05.01	47,17	14,66	4,7	7	Judenburg	ST	DT1982
1927.07.25	47,53	15,49	5,1	7	Wartberg	ST	DT1982
1927.10.08	48,07	16,58	5,2	8	Schwadorf	NÖ	DT1982
1930.10.07	47,36	10,66	5,3	7-8	Namlos	TI	DT1982
1936.10.03	47,07	14,70	5,0	7	Obdach	ST	DT1982
1938.11.08	47,96	16,40	5,0	7	Ebreichsdorf	NÖ	DT1982
1939.09.18	47,77	15,91	5,0	7	Puchberg Seebenstein/	NÖ	DT1982
1972.04.16	47,71	16,18	5,3	7-8	Pitten	NÖ	DD1974
1976.05.06	46,25	13,22	6,5	10	Friaul	IT	A1976

Legende: M = Magnitude (*vor 1950 aus der Intensität abschätzt), Io = Epizentralintensität nach EMS-98 (Fühlbarkeit und Schäden entsprechend der Europäischen Makroseismischen Skala (Grünthal, 1998).

Literaturkürzel: A1976 – Ambraseys, 1976, H1995 – Hammerl, 1995, H1996 – Hammerl, 1996, H2000 – Hammerl, 2000, LH2002 – Lenhardt und Hammerl, 2002, HL2012 – Hammerl et al., 2012, HL2013 – Hammerl und Lenhardt, 2013, DD1974 = Drimmel und Duma, 1974, DT1982 = Drimmel und Trapp, 1982).

Die Häufigkeit der Erdbeben lässt sich mit Durchschnittswerten wie folgt beschreiben: Durchschnittlich wird heute etwa einmal die Woche irgendwo in Österreich ein Erdbeben von der Bevölkerung wahrgenommen. Deutlich spürbare Erdbeben (Io = 4) finden etwa jeden Monat in Österreich statt und stark

gefühlte Erdbeben ($I_0 = 5$) treten zweimal im Jahr auf. Schadenbeben ($I_0 = 6$) finden alle 2–3 Jahre statt, Erdbeben mit mäßigen Gebäudeschäden ($I_0 = 7$) etwa alle 30 Jahre und starke Beben ($I_0 \geq 8$) ereignen sich in Österreich im Abstand mehrerer 100 Jahre. Sie können als Beispiele extremer Ereignisse angesehen werden.

Die zunehmende messtechnische Erfassung von Erdbeben seit den 1990er Jahren hat zu einer Vielzahl neuer Erkenntnisse geführt. Heute können Nuklearartests und bergbaubedingte seismischen Erschütterungen, Erdbebenschwärme, Felsstürze aber auch gelegentlich Meteoritendurchgänge registriert werden. Es ist weiter vorgesehen, dieses Messnetz in jenen Bereichen zu verdichten (Abbildung 02), die seismisch weniger aktiv sind, um eine verbesserte Lokalisierung von Erdbeben durch eine optimale geometrische Verteilung von Erdbebenstationen zu ermöglichen. Derzeit variiert die Lokalisierungsgenauigkeit zwischen 2 und 5 km, je nach Dichte des Stationsnetzes.

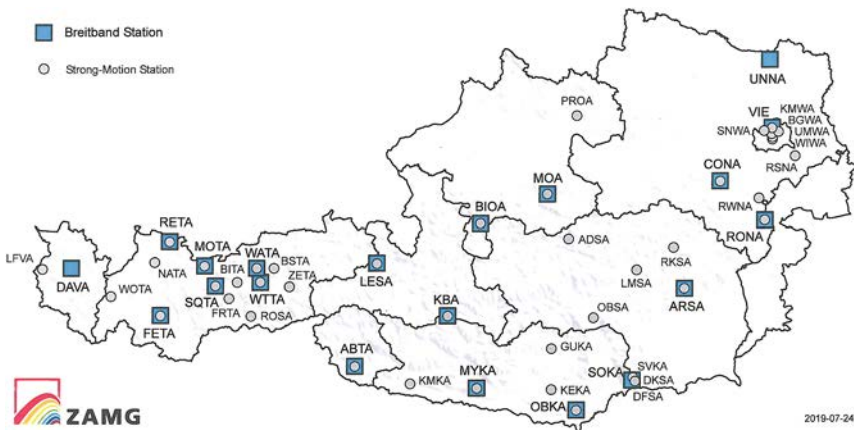


Abbildung 02: Seismisches Messnetz.

Figure 02: Seismic Network.

Quelle: ZAMG/Geophysik, 2018

Ein weiterer Aspekt der Erdbebenerfassung betrifft die Berücksichtigung von Berichten aus der Bevölkerung. Diese sogenannten »makroseismischen« Daten werden heute als Ergänzung zu den parametrischen Daten genutzt, um die tatsächlichen Auswirkungen schnell zu erfassen und Szenarienmodelle zu verifizieren. Abbildung 03 zeigt ein Beispiel um zu demonstrieren, wie stark diese Möglichkeit der Informationsweitergabe von der Bevölkerung angenommen wird. Dies stellt eine seit über 100 Jahren etablierte Zusammenarbeit mit der Bevölkerung dar, die heute als Beitrag zu »Citizen Science« bezeichnet wird. In der gezeigten Grafik sind die Rückmeldungen von vier Erdbeben aus dem

Wiener Becken aus dem Jahr 2013 dargestellt, wobei fast 10.000 Mitteilungen den Österreichischen Erdbebendienst an der Zentralanstalt für Meteorologie (ZAMG) erreichten.

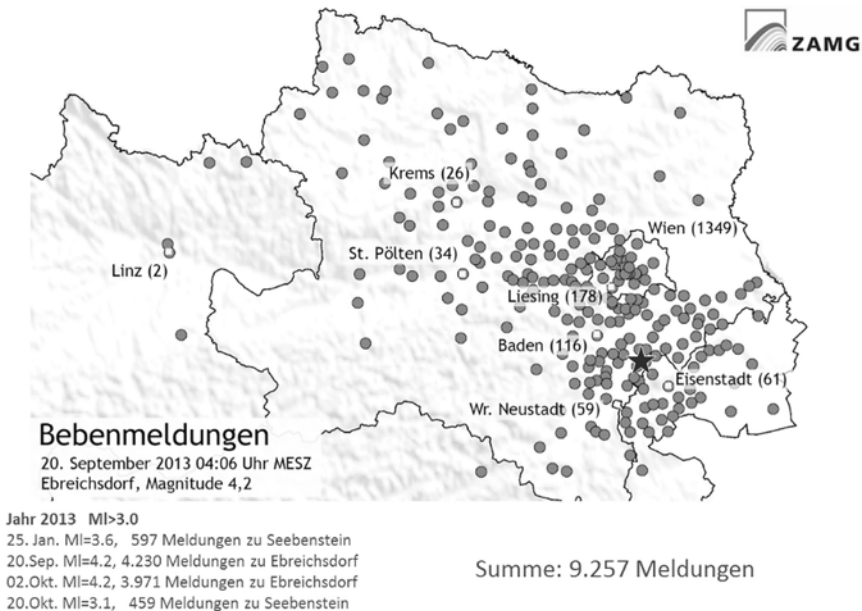


Abbildung 03: Beispiel der Makroseismik (graue Punkte = Meldungsorte).

Figure 03: Example of a macroseismic map (gray dots = sites with responses).

Quelle: ZAMG/Geophysik, 2018

Meldungen über Erdbebenauswirkungen können seit 2000 über www.zamg.ac.at/bebenmeldung an die ZAMG vermittelt werden. Es existiert inzwischen auch eine Android-Version unter den Namen »QuakeWatch Austria«, die es erlaubt direkt vom Smartphone Meldungen an die ZAMG zu übermitteln.

Um der Erdbebengefährdung bautechnisch Rechnung zu tragen, ist die in Abbildung 04 gezeigte Landkarte erstellt worden (<https://geoweb.zamg.ac.at/hazard/norm98.html>). Diese Karte weist die Zonen unterschiedlicher Erdbebenbelastung auf, die dazu dient entsprechende Vorkehrungen bei der Planung von Gebäuden treffen zu können. Diese Karte wird demnächst aktualisiert und an die bereits erwähnten heute im EUROCODE 8 vorgeschriebenen Parameter angepasst.

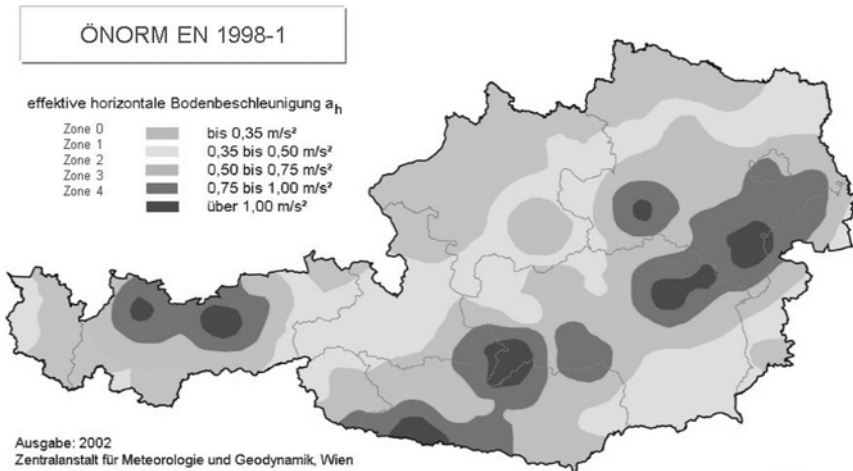


Abbildung 04: Aktuelle Erdbebengefährdungskarte von Österreich.

Figure 04: Current earthquake hazard map of Austria.

Quelle: ZAMG/Geophysik, 2018

23.5 Zukünftige Entwicklungen und Herausforderungen

Standardmäßig wird durch die Anwendung der Baunorm das Auftreten von Erdbeben berücksichtigt. Die Zielsetzung der Norm, dass Bauwerke schwache Erdbeben ohne Schäden überstehen müssen, ist dabei wesentlich. Durch Verwirklichung der Normempfehlungen wird somit ein wichtiger Schritt zur Reduktion des Erdbebenrisikos vollzogen, da nicht nur die zu erwartende Erdbebenbelastung sondern auch die Anfälligkeit von Gebäuden in der Baunorm, der Untergrund und die Geländeform ihre Berücksichtigung findet.

Ein gewisses Restrisiko bleibt aber dennoch erhalten, da eine 10 % Nicht-Überschreitungswahrscheinlichkeit per Definition nicht abgedeckt wird. Dieses Restrisiko gebietet, Überlegungen anzustellen, welche Bauwerke besonders gefährdet sind und von welchen Bauwerken eine besondere Gefahr ausgehen könnte, wie z. B. der Einsturz von historischen Gebäuden. Dazu dienen auch Untersuchungen historischer Erdbeben (z. B. Hammerl, 2000) und geologische Aufnahmen.

Historische Erhebungen befassen sich meist mit den Quellen der letzten 1.000 Jahre. Dies erscheint ausreichend für die Zwecke der Baunorm. Für wichtige bzw. kritische oder strategische Infrastrukturen (Staudämme, Kraftwerke, Flughäfen und dergleichen) werden höhere Sicherheitsstandards verlangt (z. B. International Commission on Large Dams »ICOLD«), die dazu führen, dass weit größere Zeiträume berücksichtigt werden müssen oder sogar

ein »maximales Ereignis« definiert werden muss. Die Bestimmung des maximalen Bemessungsbebens gestaltet sich jedoch äußerst schwierig. Ein Ansatz, der auch schon im zunehmenden Maße verfolgt wird, stellt die Untersuchung der geologischen Störungen (z. B. Sieh, 1978, McCalpin, 1998) dar. Aufgrund der gut dokumentierten Beziehung zwischen Störungslänge und Magnitude (z. B. Wells und Coppersmith, 1994) ist es verbessert möglich physikalisch plausible Ansätze zu erarbeiten, die aber für Belastungsannahmen, wie diese in der Baunorm gefordert werden, aufgrund der geringer Häufigkeit von untergeordneter Bedeutung sind.

Extreme sekundäre Schäden durch Bergstürze (z. B. Lenhardt, 2007) oder durch induzierte Erdbeben (Lenhardt, 1998) sowie geplante nukleare Endlager rechtfertigen eine enge Zusammenarbeit mit den Erdbebendiensten der Nachbarländer. Solche grenzüberschreitenden Projekte wurden bereits in der Vergangenheit erfolgreich durchgeführt (ACORN = Alpine Carpathian Research Network, mehrere Interreg-Projekte mit Italien) und werden auch in Zukunft verfolgt, wie dies mit Italien und Tschechien im Rahmen von Interreg V der Fall ist. Dazu hat auch das Central and Eastern European Earthquake Research Network (CE³RN) wesentlich beigetragen.

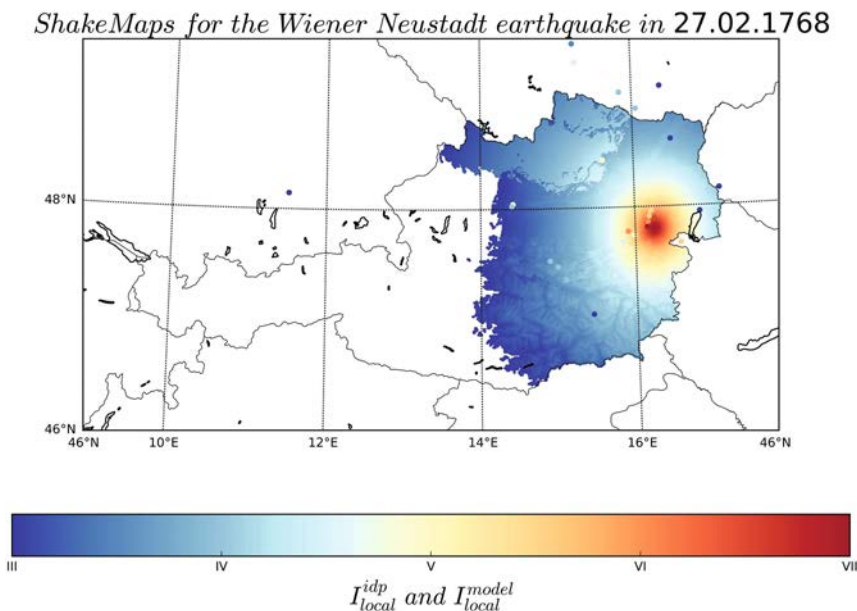


Abbildung 05: Beispiel einer Shake Map des Erdbebens bei Wiener Neustadt im Jahr 1768.
Figure 05: Example of a shake map of the earthquake near Wiener Neustadt in 1768.
Quelle: ZAMG/Geophysik, 2018

Ungeachtet dessen wird der Bedarf an Erschütterungsmonitoring wichtiger Infrastrukturen in Zukunft zunehmen um Sicherheitsmaßnahmen auf lokaler Ebene rechtzeitig einleiten zu können. Zur Abschätzung der Auswirkungen historischer aber auch rezenter Erdbeben dienen heute Erschütterungskarten (»Shake Maps«). Diese stellen ein bestimmtes Szenario dar, das durch die Magnitude und die Herdtiefe vorgegeben wird, wobei Einflüsse des lokalen Untergrunds und der Geländeform Berücksichtigung finden. Abbildung 05 zeigt solch eine Shake Map, die das Erschütterungsfeld des historischen Erdbebens von Wiener Neustadt, 1768 darstellt. Derzeit werden die Karten mit Fallbeispielen aus der Vergangenheit verifiziert, und demnächst werden solche Landkarten nach jedem stärkeren Erdbeben in Österreich auf der Homepage der ZAMG veröffentlicht.

23.6 Perspektiven von Handlungsoptionen

Die europäische Baunorm wird in den nächsten Jahren eine Aktualisierung erfahren, welche die Erstellung einer neuen Erdbebengefährdungskarte von Österreich erfordert. Diese Karte befindet sich derzeit in Ausarbeitung. Die Bauindustrie wird die neuen Bemessungswerte in ihre Planungen miteinbeziehen nachdem Anpassungen in der österreichischen Baunorm durchgeführt wurden.

Auch werden das Bewusstsein und das Medieninteresse an induzierten Erdbeben (Bergbau, Sprengungen und Explosionen, Fracking, Geothermie) stark anwachsen und daher wird sich die Öffentlichkeitsarbeit mit diesem Themenkreis in Zukunft vermehrt befassen.

Um diese Erschütterungen, aber auch natürliche Ereignisse wie Felsstürze und Höhleneinstürze, seismisch umfangreicher erfassen zu können, wird das Erdbebenmessnetz weiter ausgebaut. Dies führt nicht nur zu einer Verbesserung der Lokalisierungsgenauigkeit der Erschütterungsquellen sondern dient auch der besseren Einschätzung der Einwirkungen auf wichtige Infrastrukturen.

International gesehen führt die EU-Initiative EPOS (European Plate Observing System, www.epos-ip.org) in Zukunft zu einer Etablierung gemeinsamer Erdbebenerfassung- und Forschungsstrukturen, die eine abgestimmte Strategie erlauben.

Ganz im Sinne der Praxisorientierung nimmt die ZAMG auch aktiv an ARISTOTLE (All Risk Integrated System Towards Trans-boundary Early-warning, <http://aristotle.ingv.it/>) teil, einem europäischen Frühwarnsystem für Naturkatastrophen, welches das Emergency Response Coordination Centre (ERCC) in Brüssel mit Information im Anlassfall versorgt.

Danksagung

Unser Dank richtet sich an alle weiteren Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des Österreichischen Erdbebendienstes, nämlich Christiane Freudenthaler, Helmut Hausmann, Nikolaus Horn, Yan Jia, Rita Meurers, Ulrike Mitterbauer und Anton Vogelmann.

Literatur

- Ambraseys, N.N., 1976. The Gemona di Friuli earthquake of 6 May 1976. In: P. Pichard, N.N. Ambraseys, G.N. Ziogas (Hrsg.), *The Gemona di Friuli earthquake of 6 May 1976*. UNESCO, Restricted Technical report RP/1975–76. Paris, 2, S. 1–111.
- Drimmel, J., Duma, G., 1974. Bericht über Ausmaß und Ursachen der anomalen Wirkungen des Seebensteiner Starkbebens vom 16. April 1972 im Raume Wien. *Mitteilungen der Erdbeben-Kommission, Österreichische Akademie der Wissenschaften*, Wien, 74, 12 S.
- Drimmel, J., Trapp, E., 1982. Die Erdbeben Österreichs 1971–1980. *Sitzungsbericht. Österreichischen Akademie der Wissenschaften, mathematisch-naturwissenschaftliche Klasse, Abteilung 1*, Wien, 191(1/4), S. 73–102.
- Grünthal, G. (Hrsg.), 1998. *European Macroseismic Scale 1998 (EMS-98)*. Conseil de l'Europe, Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie, Luxembourg, 15, 99 S.
- Hammerl, Ch., 1995. Das Erdbeben vom 04. Mai 1201. *Mitteilungen des Instituts für Österreichische Geschichtsforschung*, 103(3/4), S. 350–368.
- Hammerl, Ch., 1996. The 1794 earthquake in Leoben/Austria. In: B. Thorkelsson (Hrsg.), *Seismology in Europe. Fifteenth ESC General Assembly*. Reykjavik, Iceland, S. 631–633.
- Hammerl, Ch., 2000. Zur Rekonstruktion der Erdbeben von Wiener Neustadt (1768) und Leoben (1794). In: F. Eybl, H. Heppner, A. Kernbauer (Hrsg.), *Elementare Gewalt. Kulturelle Bewältigung. Jahrbuch der Österreichischen Gesellschaft zur Erforschung des achtzehnten Jahrhunderts*. WUV Universitätsverlag, 14/15, S. 163–183.
- Hammerl, Ch., 2017. Historical earthquake research in Austria. *Geoscience Letters*, 4(7), 13 S. DOI: 10.1186/s40562-017-0073-8.
- Hammerl, Ch., Lenhardt, W.A., 1997. *Erdbeben in Österreich*. Leykam Verlag, Graz, 191 S.
- Hammerl, Ch., Lenhardt, W.A., 2013. *Erdbeben in Niederösterreich von 1000 bis 2009 n. Chr. Abhandlungen der Geologischen Bundesanstalt*, 67, 297 S.
- Hammerl, Ch., Lenhardt, W.A., Innerkofler, M., 2012. Forschungen zu den stärksten historischen Erdbeben in Tirol im Rahmen des INTERREG IV-Projekts HAREIA (Historical And Recent Earthquakes in Italy and Austria). In: *Forum Hall in Tirol. Neues zur Geschichte der Stadt*, 3, S. 174–204.
- Lenhardt, W.A., 1995. Regional earthquake hazard in Austria. In: G. Duma (Hrsg.), *Tenth European Conference on Earthquake Engineering*. Balkema, 3, S. 63–68.
- Lenhardt, W.A., 1997. Neue Erdbeben-Baunorm für Österreich. *Österreichische Bauwirtschaftszeitung*, 10, S. 10–12.

- Lenhardt, W.A., 1998. Erdbeben der vierten Art. Bautechnik 75(10), S. 781–791.
- Lenhardt, W.A., 2007. Earthquake triggered landslides in Austria – Dobratsch revisited. Jahrbuch der Geologischen Bundesanstalt, Wien, 147(1/2), S. 193–199.
- Lenhardt, W.A., 2010. Seismologische Grundlagen erdbebenbedingter Gebäudebelastungen, Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift, 155(1/6), S. 45–48.
- Lenhardt, W.A., Gangl, G., Flesch, R., 2001. Erdbebengefährdung in Österreich. In: Ch. Hammerl, W.A. Lenhardt, R. Steinacker, P. Steinhauser (Hrsg.), Meteorologie und Geophysik in Österreich. Festschrift anlässlich des 150-Jahr Jubiläums der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Leykam Verlag, Wien, S. 505–515.
- Lenhardt, W.A., Hammerl, Ch., 2002. Erdbebengefahr in der Steiermark – Erfassung der Erdbebengefahr in der Steiermark mit Hilfe neu errichteter Erdbebenstationen und allen verfügbaren Quellen sämtlicher historischer Erdbeben. Projektendbericht. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik (GZ-ZAMG 1355/98), gefördert vom Bundesministerium für Bildung, Wissenschaft und Kultur (GZ 30.721/2-III/A/5a/98) und der Steiermärkischen Landesregierung (StC 62/98), Wien.
- Lenhardt, W.A., Hammerl, Ch., 2010. Seismologische Analyse historischer Erdbebeninformation aus Niederösterreich seit 1000 n.Chr. Erfassung von lokalen Erdbebenauswirkungen und Interpretation im Vergleich mit der rezenten Erdbeben-tätigkeit zur Schaffung einer Grundlage für Fragestellungen der Bauwerkssicherheit, Raumordnung, des Zivil- und Katastrophenschutzes. Projektbericht NC 65-2006, BD1-G-5101/001-2006. Projekt der Niederösterreichischen Landesregierung, Baudirektion, Abteilung Allgemeiner Baudienst – Geologischer Dienst.
- Lenhardt, W.A., Melichar, P., Steiner, R., Horn, N., 2001. Erdbebenstationen in Österreich. In: Ch. Hammerl, W.A. Lenhardt, R. Steinacker, P. Steinhauser (Hrsg.), Meteorologie und Geophysik in Österreich. Festschrift anlässlich des 150-Jahr Jubiläums der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik. Leykam Verlag, Wien, S. 567–576.
- McCalpin, J. (Hrsg.), 1998. Paleoseismology. Academic Press, 588 S.
- Melichar, P., 1989. Der österreichische Erdbebenwarndienst im Großraum Innsbruck – Hall in Tirol. Festschrift anlässlich der Eröffnung des Österreichischen Erdbebenwarndienstes ÖEW Tirol. Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik, 330, S. 5–8.
- Sieh, K. E., 1978. Prehistoric large earthquake produced by slip on the San Andreas Fault at Pallett Creek, California. Journal of Geophysical Research, 83(B8), S. 3907–3939.
- Toperczer, M., Trapp, E., 1950. Ein Beitrag zur Erdbebengeographie Österreichs, nebst Erdbebenkatalog 1904–1948 und Chronik der Starkbeben. Mitteilungen der Erdbeben-Kommission, Neue Folge 65, S. 13.
- Wells, D. L., Coppersmith, K. J., 1994. New empirical relationships among magnitude, rupture length, rupture width, rupture area and surface displacement. Bulletin Seismological Society of America, 84(4), S. 974–1002.

24 Multi-Hazards und Kaskadeneffekte

Ronald E. Pöpl und Oliver Sass*

Zusammenfassung

Extremereignisse entstehen oftmals durch ein gegenseitiges Verstärken (= Kaskadeneffekt) von verschiedenen potenziell schadenbringenden Prozessen (= Multi-Hazards). In diesem Beitrag wird eine Begriffsklärung vorgenommen, eine Typisierung von Multi-Hazards vorgestellt sowie ein historischer Abriss über empirische Untersuchungen von Extremereignissen mit Multi-Hazard bzw. Kaskadeneffekt-Bezug im Alpenraum präsentiert. Des Weiteren wird ein Fallbeispiel aus dem österreichischen Alpenraum näher erläutert und abschließend eine Einschätzung des Sachstandes und der Unsicherheiten, sowie möglicher zukünftige Entwicklungen und daraus resultierender Herausforderungen gegeben.

Eine systematische, modellierende Analyse von Multi-Hazards und Kaskadeneffekten findet erst seit ein bis zwei Jahrzehnten statt, wobei frühere Publikationen meist von beschreibenden Einzelbeobachtungen von Prozessketten handeln. Folgende Prozesskombinationen weisen für den Alpenraum eine besondere Relevanz auf: Gerinnestauende Massenbewegungen, welche bei einem Durchbruch Flutereignisse zur Folge haben; Starkregenereignisse bzw. langanhaltende Niederschläge bzw. Kombination von Niederschlägen und Schneeschmelze im Frühjahr, welche Überschwemmungen und gehäuftes Auftreten von Hangbewegungen hervorrufen; sowie durch Gletscherschmelze oder auftauendem Permafrost bedingte Ausbruchsfluten oder verstärkte Bereitstellung von erodierbarem Lockermaterial. Aufgrund des geringen Kenntnisstandes und einer unzureichenden Datenbasis sind jedoch solide statistische Trendbetrachtungen sowie pauschale Aussagen über mögliche zukünftige Entwicklungen kaum möglich.

Abstract

Extreme events often result from multiple – potentially hazardous – cascading processes (Multi-Hazards). In this chapter »multi-hazards« and »cascade effects« are defined, different types of multi-hazards are classified, and a short literature review of empirical studies on multi-hazards and cascade effects in the European Alps as well as a case study from Austria is presented. Finally, the current state of research on multi-hazards and cascade effects in the context of natural hazards is evaluated, and potential future developments and challenges are assessed.

* Ronald E. Pöpl, Universität Wien, Institut für Geographie und Regionalforschung, ronald.poepl@univie.ac.at.

Oliver Sass, Universität Bayreuth, Fakultät für Biologie, Chemie und Geowissenschaften, oli.ver.sass@uni-bayreuth.de.

Early research on multiple hazards and cascading effects in a natural hazard context focused on an exemplary description of process chains in singular events, while systematic research just started to evolve in the last few years and is still in its infancy. The following types of multi-hazards have shown to be of specific relevance for alpine environments: breaching landslide dams that cause flood events, high precipitation rates (combined with snowmelt processes in spring) that trigger floods and hillslope processes, (peri-)glacial degradation and related outburst floods and increased sediment availability. However, due to a lack of long-term datasets general statements on trends and future developments are not possible.

Kernaussagen

- Frühe Publikationen von Multi-Hazards und Kaskadeneffekten handeln meist von beschreibenden Einzelbeobachtungen
- Eine systematische, modellierende Analyse von Multi-Hazards und Kaskadeneffekten findet erst seit ein bis zwei Jahrzehnten statt
- Aufgrund des geringen Kenntnisstandes und einer unzureichenden Datenbasis sind solide statistische Trendbetrachtungen sowie pauschale Aussagen über mögliche zukünftige Entwicklungen kaum möglich

Key Points

- Early research on multiple hazards and cascading effects in a natural hazard context focused on an exemplary description of singular events
- Systematic research on multi-hazards and cascading effects just started to evolve in the last few years and is still in its infancy
- Due to a lack of long-term datasets general statements on trends and future developments are not possible

24.1 Einleitung

Extremereignisse im Naturgefahrenkontext entstehen oftmals durch einzelne (*Single-Hazard*) oder mehrere (*Multi-Hazard*) Prozesse, die über mehrere Stufen allmählich stärker werden. Hierbei spricht man von einem *Kaskadeneffekt*. Ein weltweit bekanntes Extremereignis, das durch solche Kaskadeneffekte verursacht wurde, ist die Banqiao-Überschwemmung in der Provinz Henan in China. Hier kam es im Jahr 1975 aufgrund eines Taifuns zu einer verheerenden Überschwemmung am Fluss Ru, welche den Bruch des Banqiao-Staudamms zur Folge hatte. Die daraus resultierende Flutwelle verursachte den Bruch von insgesamt 62 weiteren Staudämmen. Dieser Kaskadenbruch erzeugte anschließend eine mehrere Meter hohe Welle, die sich mit beinahe 50 km/h flussabwärts ins dichter besiedelte Flachland ergoss und dort zahlreiche Städte, Dörfer und tausende Quadratkilometer Land überflutete, über eine Million Menschen einschloss und unmittelbar mehrere tausend Todesopfer forderte (People, 2005). Von *Prozess- oder Event-Kaskaden* (Cascading Events) spricht man im Allgemeinen dann, wenn

Gefahrenprozesse zusammentreffen (European Commission, 2011). Als Beispiel wäre hierbei ein Hangrutsch zu nennen, der durch ein Hochwasserereignis hervorgerufen wurde. Auch im (österreichischen) Alpenraum sind solche Kaskadeneffekte immer wieder für Extremereignisse verantwortlich. Westen et al. (2014) unterscheiden zusätzlich je nach Interaktionsgrad zwischen gekoppelten Ereignissen, verknüpften Ereignissen (*Prozesskombinationen*) sowie Ereignissen, die die Prädisposition für weitere Ereignisse verändern (*Prozessketten*). Bei den ersteren handelt es sich um Ereignisse, die simultan ausgelöst werden (z. B. ein Erdbeben, das Felsstürze und Schneelawinen auslöst), während zweiteere zwar zusammenhängen, aber zeitlich nacheinander ablaufen (z. B. Aufstau eines Gewässers durch eine Hangrutschung und ein nachfolgender Dammbruch mit Hochwasser). Ein Beispiel für veränderte Disposition ist die Bodenschädigung durch einen Waldbrand, die die Niederschlagsinfiltration vermindert und damit die Disposition für Murgänge erhöht, ohne diese direkt auszulösen.

Unter Multi-Hazards werden in einem Naturgefahrenkontext alle möglichen und relevanten Naturgefahren und deren Interaktion in einem bestimmten räumlichen Ausschnitt und/oder zeitlichen Periode verstanden (Kappes et al., 2012a; Duncan, 2014; Gill und Malamud, 2014; Duncan et al., 2016). Multi-Hazard Risikoanalysen bilden eine wichtige Grundlage für die Durchführung von Maßnahmen zur Risikoverringerung in Gebieten mit diversen Naturgefahren (Kappes et al., 2012a). Dadurch können gezielte Schutzmaßnahmen implementiert und somit damit verbundene Kosten reduziert werden (Pfurtscheller und Thieken, 2013). Es gibt jedoch immer noch sehr wenige Ansätze zur gleichzeitigen Analyse von mehreren Gefahrentypen in einer Region (Westen et al., 2014). Große Herausforderungen für solche Analyseansätze ergeben sich vor allem aufgrund von schlechter Datenlage in Bezug auf vergangene Ereignisse, der Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Naturgefahren aufgrund ihrer unterschiedlichen Prozesseigenschaften sowie der Erfassung und Parametrisierung von Wechselwirkungen (inkl. Kaskadeneffekten) zwischen den einzelnen Prozessen (Chen et al., 2016). Um unterschiedliche Gefahrenprozesse miteinander zu vergleichen, werden in einem Naturgefahrenkontext häufig die Parameter Prozessintensität und Eintrittswahrscheinlichkeit herangezogen (z. B. Kunz und Hurni, 2008; Loat, 2010), die spärliche Datenbasis führt jedoch bei Kaskadeneffekten zu besonders hohen Unsicherheiten (Chen et al. 2016). Zur Erfassung von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Naturgefahrenprozessen können beispielsweise Interaktions-Matrizen (Abbildung 01a) oder Netzwerk-Diagramme (Abbildung 01b) verwendet werden.

Reduziert man Abbildung 01a auf diejenigen Prozesskombinationen, die für den Alpenraum relevant sind und die eine potenzielle Veränderung durch den Klimawandel erfahren, bleiben nur bestimmte Prozessketten in der Praxis bedeutsam. Diese werden im Folgenden typisiert:

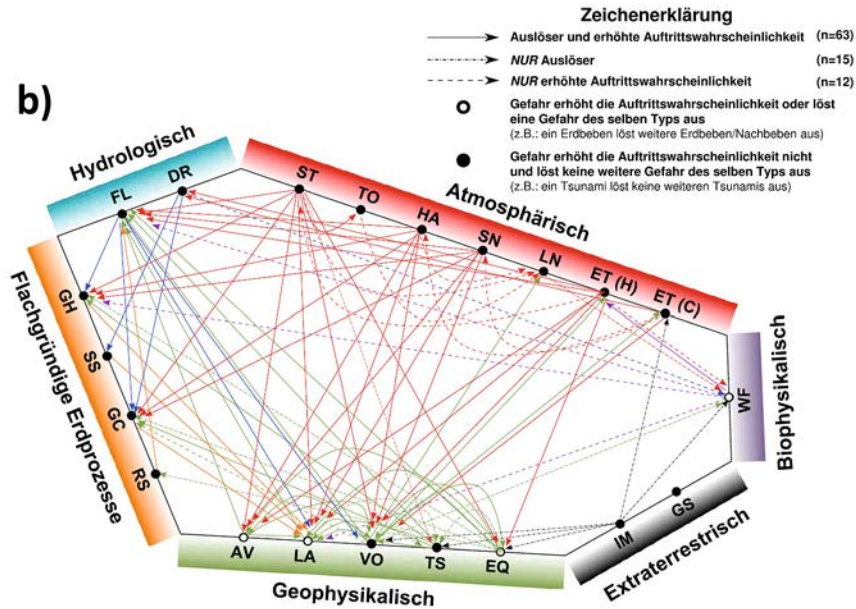


Abbildung 01: Arten der Erfassung von Wechselwirkungen zwischen verschiedenen Naturgefahrenprozessen: Identifizierung von Gefahreninteraktionen (a). Die Abbildung zeigt eine 21 × 21 Interaktionsmatrix mit primären Gefahren auf der vertikalen Achse und sekundären Gefahren auf der horizontalen Achse. Die Matrix zeigt Fälle, in denen eine Primärgefahr eine Sekundärgefahr auslösen könnte (oben links schattiert) und Fälle, in denen eine Primärgefahr die Wahrscheinlichkeit für eine Sekundärgefahr erhöhen könnte (unten rechts schattiertes Dreieck). Dunkelgrau schattiert sind die Wirkungszusammenhänge, bei denen eine Primärgefahr ein mehrfaches Auftreten der Sekundärgefahr auslösen oder begünstigen kann. Es werden sechs Gefahrengruppen unterschieden: geophysikalische (grün), hydrologische (blau), flache Oberflächenprozesse (orange), atmosphärische (rot), biophysikalische (violett) und extraterrestrische (grau). Netzwerkdiagramm (b) der möglichen Gefahrenartenverknüpfungen zwischen 21 Naturgefahren.

Figure 01: Identification of interrelationships between different natural hazard processes: Identification of hazard interactions (a): A 21 × 21 matrix with primary hazards on the vertical axis and secondary hazards on the horizontal axis. These hazards are coded, as explained in the key. This matrix shows cases where a primary hazard could trigger a secondary hazard (upper left triangle shaded) and cases where a primary hazard could increase the probability of a secondary hazard being triggered (bottom-right triangle shaded). Where both triangles are shaded, this indicates that the primary hazard could both trigger and increase the probability of a secondary hazard. Also distinguished are those relationships where a primary hazard has the potential to trigger or increase the probability of multiple occurrences of the secondary hazard (dark grey) and few or single occurrences of the secondary hazard (light grey). Hazards are grouped into geophysical (green), hydrological (blue), shallow Earth processes (orange), atmospheric (red), biophysical (purple), and space/celestial (grey); Network diagram (b) showing the potential hazard type linkages between 21 natural hazards.

Quelle: beide Abbildungen verändert nach Gill und Malamud, 2014

24.2 Historischer Abriss über empirische Untersuchungen von Multi-Hazards und Kaskadeneffekten im Alpenraum – von Einzelbeobachtungen hin zu räumlichen Modellierungen

Eine systematische, modellierende Analyse von Multi-Hazards und Kaskadeneffekten findet erst seit ein bis zwei Jahrzehnten statt (Kappes et al., 2012a). Frühere Publikationen handeln meist von beschreibenden Einzelbeobachtungen (Tabelle 01).

Tabelle 01: Historischer Abriss (Auswahl) über empirische Untersuchungen von Extremereignissen im Alpenraum mit explizitem oder implizitem Kaskadeneffekt- (C) und oder Multi-Hazard-Bezug (M).

Table 01: Historical overview (selection) on empirical investigations of extreme events in the Alps in the context of multi-hazards (M) and/or cascading events (C)

Prozesse/Inhalt	Region	Literatur	Typ
Bergsturz + Flutwelle	Gailtal (Dobratsch), Österreich	Till, 1907	C-1b
Rutschung und Flutwelle	Vajont, Italien	Kiersch, 1964	C-1a
GLOF	Schweiz	Haeberli, 1983	C-3a
Dammbruch und Flutwelle	Reintal, Deutschland	Morche und Schmidt, 2012	C-2
Multi-Hazard Analyse	Barcelonette, Frankreich	Kappes et al., 2012b	M
GLOF	Grindelwaldgletscher, Schweiz (u. a.)	Worni et al., 2014	C-3a
Multi-Hazard Analyse	Orco- und Soana-Tal, Italien	Turconi et al., 2015	M

Eine der ersten wissenschaftlichen Publikationen, in welcher näher auf Kaskadeneffekte im Kontext eines Extremereignisses im Alpenraum eingegangen wird, ist die von Till (1907), welcher versuchte die Bergstürze des Dobratsch zu rekonstruieren. Am 25. Jänner 1348 kam es im Friaul zu einem Erdbeben mit einer Intensität von 8 bis 9 auf der zwölfteiligen EMS-98-Skala, welches im Raum Villach den Dobratsch-Bergsturz auslöste, im Zuge dessen ca. 30 Millionen m³ Bergsturzmaterial im Gailtal abgelagert wurden (Hammerl, 1992). Durch die Ablagerung der Schuttmassen kam es zum Aufstau der Gail und dadurch bedingt zur Bildung eines bis zu 13 km langen und mehr als 15 m tiefen Bergsturzsees. Diese brach sich später einen neuen Lauf durch die Sturzmassen, was talabwärts Überschwemmungen verursachte, von welcher auch mehrere Siedlungen betroffen waren (Neumann, 1988). Rohr (2005; S. 173) schrieb über das Dobratsch-Extremereignis: »Wir haben es somit nicht nur mit einem Erdbeben, sondern

mit einer ›multiplen‹ Naturkatastrophe in Form einer Kettenreaktion zu tun«; also in der zuvor genannten Terminologie eine Kette verknüpfter Ereignisse.

Ein weiteres bekanntes Beispiel für ein durch Kaskadeneffekte entstandenes Extremereignis im Alpenraum ist die Katastrophe von Vajont, die erstmalig von Kiersch (1964) wissenschaftlich aufgearbeitet und international publiziert wurde. Am 9. Oktober 1963 kam es am Monte Doc zu einem katastrophalen Bergsturz, wobei ca. 240 Millionen m³ Fels in den Vajont-Stausee glitten und das Staubecken großteils füllten. Eine daraus resultierende Flutwelle überströmte die Staumauer und floss durch das dammabwärts gelegene enge Tal und zerstörte dabei die Kleinstadt Longarone sowie einige angrenzende kleinere Ortschaften, wobei insgesamt ca. 2.000 Menschen starben (Guzetti und Lollino, 2011). Aufgrund der Gleichzeitigkeit der involvierten Prozesse wäre dies als ein gekoppeltes Ereignis einzuordnen. Guzetti und Lollino (2011) schreiben diese Katastrophe teilweise dem Vajont-Staudamm zugrundeliegenden Risikomanagement-Konzept zu, in welchem das potenzielle Auftreten von Kaskadeneffekten keinerlei Berücksichtigung finden.

Ähnliche Gefahren können auch von ausbrechenden Gletscherseen ausgehen. Im Juli 1968 kam es am Grubengletscher im Walliser Saastal durch einen Gletscherseeausbruch sowie durch eine Verkettung weiterer Ereignisse zu einem Extremereignis. Hierbei brach der auf 2.852 m Seehöhe gelegene so genannte Randsee 3, bedingt durch ein Zufrieren seines natürlichen Abflusses, aus. Die Flutwelle traf anschließend auf einen Moränenstausee, durchbrach diesen und nahm ca. 400.000 m³ Geröll mit auf ihrem Weg in den Ort Saas Baalen, wo eine daraus resultierende Schlammlawine enorme Schäden verursachte (Haerberli et al., 2001). Als Reaktion auf dieses Extremereignis gab es nach dem Ausbruch des Gletschersees am Grubengletscher zahlreiche Sanierungsmaßnahmen, um eine weitere »[...] fatale Kettenreaktion zu verhindern« (Der Spiegel, 1995; S. 206). Eine ähnliche Prozesskette fand auch am 30. Mai 2008 am Grindelwaldgletscher (Schweiz) statt (Worni et al., 2014), als ein supraglazialer See plötzlich einen Abfluss unter dem Eis fand. Etwa 570.000 m³ Wasser wurden innerhalb von drei Stunden freigesetzt. Die Fluten strömten durch eine tiefe, schmale Schlucht, wobei erhebliche Sedimentmengen aufgenommen wurden. Unterhalb der Ausmündung der Schlucht wurde die Flussaue der Weißen Lutschine überschwemmt, und die turbulent fließende Wassermasse verursachte flussab weitere Überschwemmungen und Ufererosion. Die Überflutung wurde dabei durch die umfangreichen Sedimentablagerungen verstärkt, die den Gerinnequerschnitt stark verkleinerten.

Ein weiteres Beispiel für eine Flutwelle, welche durch eine zeitlich nacheinander folgende Verknüpfung mehrerer Prozesse entstand, wird in Morche et al. (2007) sowie in Morche und Schmidt (2011) näher beschrieben. An der Partnach im Reintal (Wettersteingebirge, Deutschland) kam es im August 2005 zu einem

extremen Niederschlagsereignis im Einzugsgebiet (max. Tagessumme von 230 mm). Das von den Felswänden abfließende Wasser zerschneidet die angrenzenden Schutthalden und verursachte zahlreiche Hangmuren. Durch diese wurde ein vor ca. 200 Jahren aufgestauter Bergsturzsee, die »Vordere Blaue Gumpe«, komplett verfüllt. Das abfließende Wasser konnte sich nun ungebremst und ohne Verlust der Sedimente in den Bergsturzdamm einschneiden, der schließlich durchbrach. Daraufhin ergoss sich eine sedimentbeladene Flutwelle mit einer maximalen Durchflussmenge von ca. 1.900 m³/s in das unterhalb angrenzende unbewohnte Tal. Durch weitere Erosionsprozesse wurden insgesamt ca. 107.000 t Sediment umgelagert, sowie wurden die Geomorphologie und das Kaskadensystem des Sedimenttransports nachhaltig verändert (Abbildung 02).

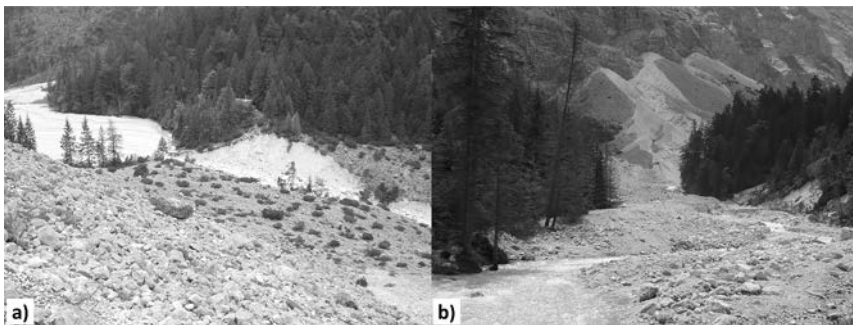


Abbildung 02: Geomorphologische Veränderungen durch ein Extremereignis an der Partnach im Reintal: Durchbruch durch den Bergsturzdamm an der Vorderen Blauen Gumpe, der verfüllte ehemalige See liegt links im Bild (a). Verfüllung des unterhalb anschließenden Tals mit umgelagerten Sedimenten (b).

Figure 02: Geomorphic changes caused by an extreme event along the Partnach River (Reintal): Breached rockslide dam along the Vorderen Blauen Gumpe (left: former lake filled by sediments) (a). Valley floor sediment deposits located downstream of the breached rockslide dam (b).
Fotos: O. Sass, 2010

Im Gegensatz zu diesen Beispielen von Kaskadeneffekten stehen Multi-Hazard-Ansätze, die nicht primär auf die Interaktion zwischen verschiedenen Prozess-typen abzielen, sondern eine möglichst vollständige Inventarisierung verschiedener Gefahrenprozesse anstreben. Ein Beispiel hierfür ist die Arbeit von Kappes et al. (2012b), in welcher ein indikatorbasierter Ansatz verwendet wurde um das Anfälligkeitspotenzial von Risikoelementen gegenüber multiplen Naturgefahren zu berechnen. Ein weiteres Beispiel ist die Arbeit von Turconi et al. (2015), die für zwei nordwest-italienische Täler Hangrutschungen, Felsstürze, Murgänge, Flusshochwasser und Schneelawinen erfassten, um Multi-Risikokarten zu erstellen.

24.3 Fallbeispiel aus dem österreichischen Alpenraum – Extremereignis im Schwarzenzeebachtal

In diesem Kapitel wird ein Fallbeispiel eines Multi-Hazard-Extremereignisses aus dem österreichischen Alpenraum präsentiert, welches auf das Auftreten von Kaskadeneffekten zurückzuführen ist. Besonderes Augenmerk liegt hierbei auf einer näheren Beschreibung der Bedeutung von Prozessverkettungen auf die Prozessintensität und dem daraus resultierenden Schadensausmaß (Multi-Hazard-Kontext).

Am Abend des 17.07.2010 kam es im Weststeirischen Schwarzenzeebachtal (Gemeinde Sölk, Bezirk Liezen; Abbildung 03a) durch die Verkettung verschiedenster hydro-geomorphologischer Prozesse zu einem Extremereignis, welches zahlreiche Schäden zur Folge hatte. Der Schwarzenzeebach, Hauptquellarm des Kleinsölkbaches, hat ein Einzugsgebiet von ca. 57 km², welches zur Gänze in den Schladminger Tauern gelegen ist. Der lithologische Untergrund besteht aus unterschiedlichen kristallinen Gesteinen, v. a. Paragneisen, Hornblende-Quarziten, Granit (-gneisen) und Glimmerschiefern, welche in Kessel-, Hangfuß- und Tallagen von teilweise mächtigen quartären – teilweise leicht mobilisierbaren – Schuttdecken überlagert werden. Die Talmorphologie weist eine deutliche glaziale Prägung mit teilweise übersteilten Talhangbereichen auf (alpines Trogtal), welche von zahlreichen kleineren Gräben entwässert werden (Abbildung 03b). Die höchste Erhebung im Einzugsgebiet ist die Deichsel Spitze mit einer Höhe von 2.684 m ü.NN. Der tiefste Punkt (Auslass) des Einzugsgebietes liegt auf ca. 988 m ü.NN. Das Klima ist geprägt durch eine mittlere jährliche Temperatur von 5,8 °C und eine mittlere jährliche Niederschlagsmenge von ca. 1.200 mm mit Maxima zwischen Juni und September (Station Kleinsölk, ZAMG). Die mittlere Hangneigung des Einzugsgebietes beträgt ca. 37°. Die Talbodenbereiche werden almwirtschaftlich genutzt, steilere bewaldete Gebiete unterliegen forstwirtschaftlicher Nutzung.

Zwischen 16:30 und 18:30 des 17.07.2010 kam es im Schwarzenzeebachtal zu einem Starkregenereignis mit einer Niederschlagssumme von ca. 130 mm, welches zahlreiche Hang- und Gerinnemuren auslöste sowie Hochwasser und fluviatilen Feststofftransport in den Hauptgerinnesystemen zur Folge hatte (Abbildung 03c). Alleine im Schwarzenzeebachtal wurden von Seiten der Wildbach- und Lawinerverbauung (WLV, Sektion Liezen) in den bewirtschafteten Talbodenbereichen 173 Schadensflächen (Flächen mit Vermurungen und/oder sonstigen Sedimentablagerungen) mit einer Gesamtfläche von ca. 151 ha verzeichnet. Teilweise wurden Hänge großflächig blankgespült, was u. a. auch auf die in diesen Bereichen zuvor vorhandenen – durch einen Borkenkäferbefall verursachten – abgestorbenen Bäume zurückzuführen ist. Abgestorbene Baum-

wurzeln stellen bevorzugte Infiltrationsbahnen für Oberflächenwasser in das darunter liegende Erdreich dar, was wiederum Erosionsprozesse fördern kann (Ghestem et al., 2011).

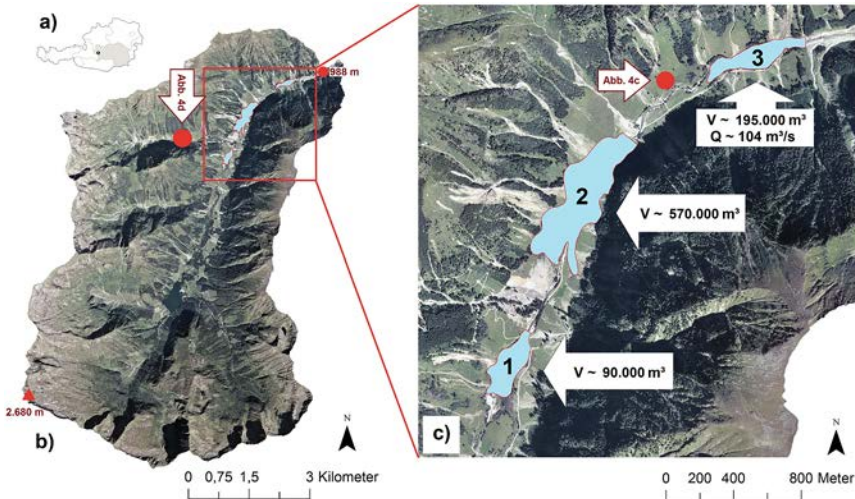


Abbildung 03: Situation im Schwarzeniseebachtal nach dem Extremereignis: Verortung des Schwarzeniseebachtals in Österreich (a); Flussinzugsgebiet des Schwarzeniseebaches inkl. Verortung der Abbildung 03c und 04d (b); Flächenhafte Darstellung der durch Murdämme bedingten Staubebereiche entlang des Schwarzeniseebaches inkl. quantitativer Angaben zu Volumina und Durchflussraten (c).

Figure 03: The Schwarzeniseebachtal after the extreme event: Location of the Schwarzeniseebachtal in Austria (a); The Schwarzeniseebach catchment incl. locations of Figures 3c and 04d (b); Location, areal extent and storage volumes of landslide-dammed lakes incl. information on discharge rates at the outlet of the system (c).

Quelle: WLW, Sektion Liezen; Datenquelle: Orthofoto 2011, Land Steiermark

In drei Bereichen wurde der Schwarzeniseebach während des Ereignisses durch ins Hauptgerinne eingetragenes dammbildendes Murgangsmaterial temporär eingestaut (Abbildung 03c). Insgesamt wurden hierbei ca. 881.000 m³ Wasser und Sediment zurückgehalten (siehe Abbildung 04a). Die Murdämme konnten dem Druck dieser Wassermassen nicht standhalten und es kam um ca. 21:30 zu deren Durchbruch und einer darauffolgenden Flutwelle mit einer von der WLW für eine flussab des Staubeereiches 3 gelegenen Gerinnestrecke ermittelten Durchflussmenge von ca. 104 m³/s (siehe Abbildung 03c; siehe auch Hochwassermarken an Baumstämmen bedingt durch mitgeführtes Geschiebe in Abbildung 04b; der Mittlere Durchfluss (MQ) des Schwarzeniseebaches beträgt ca. 2 m³/s; für die Gerinnestrecke oberhalb der Staubebereiche wurde während des Ereignisses eine Durchflussmenge von deutlich geringeren ~ 47 m³/s ermittelt).

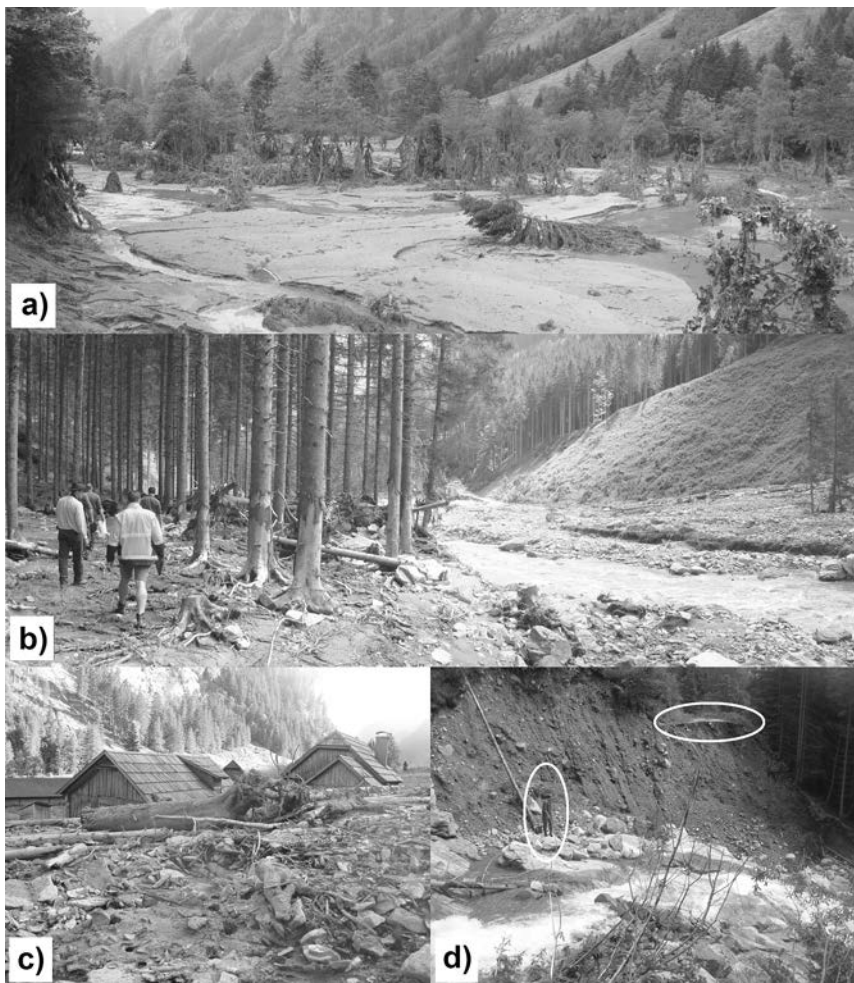


Abbildung 04: Auswirkungen des Schwarzenzeebach-Extremereignisses: Hochwassermarken an Bäumen und Sedimentablagerungen im Staubereich 2 (a) (siehe auch Abbildung 03c); Hochwassermarken an Baumstämmen bedingt durch mitgeführtes Geschiebe flussab von Staubereich 3 (b) (siehe auch Abbildung 03c); Vermurungen im Bereich der Sacherseealm (c) (siehe auch Abbildung 03c); Böschungsanbruch entlang des Stumberbaches (d) (siehe auch Abbildung 03c) mit unterspülter und zerstörter Forststraße (weiße Ellipse rechts; Tiefenerosion des Flussbettes durch Tiefenerosion von ca. 6 m – siehe erwachsene Person als Referenz in der linken weißen Ellipse).

Figure 04: Consequences of the Schwarzenzeebach extreme event: Flood marks in former lake area 2 (a) (see also Figure 03c); flood marks on tree trunks caused by fluvial bedload transport downstream of lake 3 (b) (see also Figure 03c); debris flow deposits at the Sacherseealm (c) (see also Figure. 03c); channel incision (ca. 6 m; see adult male for reference in left ellipse), lateral erosion and road undercutting (right ellipse) along the Stumberbach (d) (see also Figure 03c).
Fotos: M. Mayerl, 2010

Die Flutwelle riss mehrere kleine Brücken mit sich und verursachte flussab entlang des Sölkbaches in vier Ortsteilen von Stein an der Enns eine über einen halben Meter hohe Überschwemmung. Im Sinne der vorgeschlagenen Terminologie (Kapitel 24.1) handelt es sich mithin um ein verknüpftes Ereignis mit einer Kombination der Typen 1b und 2.

Im Schwarzenseebachtal wurden insgesamt 60 Menschen eingeschlossen. Am Vormittag des 23.07.2010 war vom Österreichischen Roten Kreuz ein Großunfallzug der Sondereinsatzgruppe nach Stein an der Enns beordert worden und mit Hilfe der Bundesheer-Hubschrauber wurden insgesamt 55 Eingeschlossene zum Rotkreuz-Stützpunkt Gröbming ausgeflogen. Zum Einsatz mit insgesamt 60 Rotkreuz-Helfern kam auch das Rotkreuz-Kriseninterventionsteam samt Notarzt. Darüber hinaus wurden durch die aufgetretenen geomorphologischen Prozesse einige Hütten vermurt (Abbildung 04c) oder zur Gänze vernichtet, sowie Forststraßen beschädigt bzw. zerstört (Abbildung 04d).

24.4 Einschätzung des Sachstandes und der Unsicherheiten, mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen

Der Begriff »Multi-Hazard« wird im Kontext von alpinen Prozessketten erst seit kaum mehr als einem Jahrzehnt verwendet. Auch zu Kaskadeneffekten gibt es bislang keine systematischen Gesamtbetrachtungen. Hinsichtlich einer Trendanalyse müssen die verschiedenen Interaktionstypen getrennt betrachtet werden. Da frühere Publikationen sich meist auf singuläre Ereignisse – oft mit speziellen, nicht auf andere Gebiete übertragbaren Prozesskombinationen – beziehen, ist die Datenbasis für eine solide statistische Trendbetrachtung aktuell nicht ausreichend.

Die zukünftige Entwicklung ist getrennt nach den möglichen Prozesskombinationen zu bewerten. Für einen klimabedingten Anstieg der Frequenz und Magnitude von Massenbewegungen (Stürze, Rutschungen) außerhalb von Permafrost- und Gletschergebieten gibt es zurzeit keine klare Evidenz (Glade et al., 2014). Damit lässt sich auch keine Aussage zu einer Häufung von mit Massenbewegungen beginnenden Kaskadenprozessen treffen (Typ 1a und 1b). In den Hochlagen ist jedoch eine Häufung von erwärmungsbedingten Felsstürzen zu erwarten, die in hochalpinen Einzugsgebieten verstärkt Kaskadenprozesse auslösen können. Außerdem ist lokal eine verstärkte Sedimentbereitstellung durch Permafrostschmelze in Lockermaterial zu erwarten. Trotz im 21. Jahrhundert tendenziell rückläufiger Sommerniederschläge wird eine Intensivie-

rung von Starkregenereignissen prognostiziert (z. B. Gobiet et al., 2014). Vorwiegend diese Ereignisse sind für die Auslösung von Wildbach-Überschwemmungen und flachgründigen Hangbewegungen verantwortlich. Diese Prozesskombination kann zu verstärkten Murschüben durch Sedimenteintrag in Wildbachgerinne und temporären Aufstau führen (vgl. Fallbeispiel; Typ 2). Die »große Unbekannte« ist dabei die zukünftige Entwicklung des Sedimenttransports im Gerinne. Im Falle von quasi unlimitierter Sedimentverfügbarkeit (z. B. im Bereich glazigener Lockersedimente und Talfüllungen) ist mit einer Zunahme von schadensträchtigen Ereignissen zu rechnen. In Bezug auf den Sedimenttransport in alpinen Gerinnen besteht jedoch noch erheblicher Forschungsbedarf (Rickenmann et al., 2012) zumal zahlreiche Einflussfaktoren wie Gerinnerauigkeit, Korngrößenverteilung, step-pool-Morphologie und Sedimentverfügbarkeit noch nicht zur Gänze verstanden sind (Church und Zimmermann, 2007; Nitsche et al., 2012).

Nur wenige gängige Modelle können diese komplexen Faktoren sowie die Mobilisierung größerer Sedimentmengen adäquat abbilden. Ausbruchsfluten (GLOFs, Typ 3a) durch verstärkte Gletscherschmelze können eine lokale Gefährdung darstellen und eine Kaskade von Folgeprozessen hervorrufen. Aufgrund der recht geringen prozentualen Gletscherfläche im österreichischen Alpenraum stehen diese problematischen Gebiete meist unter verhältnismäßig intensiver Beobachtung. Kartierungen und Modellierungen zeigen überdies, dass sich häufig im eisfrei werdenden Gletschervorfeld temporäre Seen bilden werden, die als Puffer zumindest in Bezug auf den Sedimentaustrag dienen können (Carrivick und Tweed, 2013).

Aufgrund des individuellen und vielfältigen Charakters möglicher Kaskadeneffekte sind pauschale Aussagen zu Handlungsoptionen wenig sinnvoll. Zukünftige Forschungsaktivitäten sollten sich allgemein stärker um eine integrative Betrachtung verschiedener Prozesse und ihrer Interaktionen in numerischen Modellen bemühen (Worni et al., 2014) und dabei auch geomorphologische Überlegungen zur Kopplung und Entkopplung von Prozessen einfließen lassen (z. B. Brierley et al., 2006; Bracken et al., 2013; Pöpl et al., 2017; Rascher et al., 2018). Die aktuell beobachtbare Reaktion auf schadbringende Naturgefahrenereignisse ist der deutlich vergrößerte Neubau von Schutzbauwerken (Retentionsdämmen etc.) falls diese beschädigt wurden oder sich als zu klein erwiesen haben. Diese Strategie ist naheliegend, stößt jedoch an ihre Grenzen, unter anderem da der aufwändige Unterhalt zu einer Spirale von Folgekosten führt (z. B. Thaler et al., 2018). Wie auch bei anderen Naturgefahren sind raumplanerische Maßnahmen (Freihalten potenziell betroffener Bereiche von permanenter Nutzung) und punktuelle Frühwarnsysteme häufig die bessere Option. Beide Strategien erfordern jedoch ein vertieftes Prozessverständnis.

Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei DI Markus Mayerl (Die Wildbach, Sektion Liezen) für die Bereitstellung von Daten und Fotoaufnahmen zum Extremereignis im Schwarzenseebachtal 2010.

Literatur

- Bracken, L.J., Wainwright, J., Ali, G.A., Tetzlaff, D., Smith, M.W., Reaney, S.M., Roy, A.G., 2013. Concepts of hydrological connectivity: Research approaches, pathways and future agendas. *Earth-Science Reviews*, 119, S. 17–34.
- Brierley, G., Fryirs, K., Jain, V. 2006. Landscape connectivity: the geographic basis of geomorphic applications. *Area*, 38(2), S. 165–174.
- Carrivick, J.L., Tweed, F.S., 2013. Proglacial lakes: character, behaviour and geological importance. *Quaternary Science Reviews*, 78, S. 34–52.
- Chen, L., Westen, C.J. van, Hussin, H., Chavarro-Rincon, D., Shrestha, D.P., 2016. Integrating expert opinion with modelling for quantitative multi-hazard risk assessment in the Eastern Italian Alps. *Geomorphology*, 273, S. 150–167.
- Church, M., Zimmermann, A., 2007. Form and stability of step-pool channels: research progress. *Water Resources Research*, 43(3).
- Der Spiegel, 1995. Mahlstrom im toten Eis – SPIEGEL-Redakteur Joachim Hoelzgen über einen schmelzenden Gletscher in den Walliser Alpen. *Der Spiegel*, 42, S. 196–206.
- Duncan, M., 2014. Multi-Hazard Assessments for Disaster Risk Reduction: Lessons from the Philippines and Applications for Nongovernmental Organisations. Dissertation, University College London, London.
- Duncan, M., Edwards, S., Kilburn, C., Twigg, J., Crowley, K., 2016. An interrelated hazards approach to anticipating evolving risk. In: GFDRR (Hrsg.), *The Making of a Riskier Future: How Our Decisions Are Shaping Future Disaster Risk*. Global Facility for Disaster Reduction and Recovery, Washington, S. 114–121.
- European Commission, 2011. Risk assessment and mapping guidelines for disaster management. Commission staff working paper, Europäische Union, Brüssel, 42 S.
- Ghestem, M., Sidle, R.C., Stokes, A., 2011. The influence of plant root systems on subsurface flow: implications for slope stability. *BioScience*, 61(11), S. 869–879.
- Gill, J.C., Malamud, B.D., 2014. Reviewing and visualizing the interactions of natural hazards. *Reviews of Geophysics*, 52(4), S. 680–722.
- Glade, Th., Bell, R., Dobesberger, P., Embleton-Hamann, C., Fromm, R., Fuchs, S., Hagen, K., Hübl, J., Lieb, G., Otto, J.C., Perzl, F., Peticzka, R., Prager, C., Samimi, C., Sass, O., Schöner, W., Schröter, D., Schrott, L., Zangerl, C., Zeidler, A., 2014. Der Einfluss des Klimawandels auf die Reliefsphäre. In: APCC (Hrsg.), *Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel 2014 (AAR14)*. Austrian Panel on Climate Change (APCC), Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, Wien, S. 557–600.

- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M., 2014. 21st century climate change in the European Alps – a review. *Science of the Total Environment*, 493, S. 1138–1151.
- Guzzetti, F., Lollino, G., 2011. Book Review of »The Story of Vaiont Told by the Geologist Who Discovered the Landslide«. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, S. 485–486.
- Haeberli, W., 1983. Frequency and characteristics of glacier floods in the Swiss Alps. *Annals of Glaciology*, 4, S. 85–90.
- Haeberli, W., VonderMühll, D., Teyssere, P., 2001. Prevention of outburst floods from periglacial lakes at Gruben Glaciers, Valais, Swiss Alps. *Journal of Glaciology*, 47, S. 111–122.
- Hammerl, C., 1992. Das Erdbeben vom 25. Jänner 1348 – Rekonstruktion des Naturereignisses. Dissertation, Universität Wien.
- Kappes, M.S., Keiler, M., Elverfeldt, K. von, Glade, Th., 2012a. Challenges of analyzing multi-hazard risk: a review. *Natural Hazards* 64(2), S. 1925–1958.
- Kappes, M.S., Papatoma-Koehle, M., Keiler, M., 2012b. Assessing physical vulnerability for multi-hazards using an indicator-based methodology. *Applied Geography*, 32(2), S. 577–590.
- Kiersch, G.A., 1964. Vaiont reservoir disaster. *Civil Engineering*, 34, S. 32–39.
- Kunz, M., Hurni, L., 2008. Hazard maps in Switzerland: state-of-the-art and potential improvements. Sixth ICA Mountain Cartography Workshop, Lenk, Switzerland.
- Liu, C., A. T. Linde, Sacks, I.S., 2009. Slow earthquakes triggered by typhoons, *Nature*, 459(7248), S. 833–836.
- Loat, R., 2010. Risk management of natural hazards in Switzerland. Technical report. Federal Office for the Environment FOEN, Bern, 15 S. http://www.cenat.ch/ressources/planat_product_en_1308.pdf [23.07.2010].
- Morche, D., Schmidt, K.H., 2012. Sediment transport in an alpine river before and after a dambreak flood event. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, S. 347–353.
- Morche, D., Schmidt, K.H., Heckmann, T., Haas, F., 2007. Hydrology and geomorphic effects of a high-magnitude flood in an Alpine river. *Geografiska Annaler: Series A, Physical Geography*, 89(1), S. 5–19.
- Neumann, W., 1988. Zu den Folgen des Erdbebens von 1348. 2. Teil: Im Gailtal bei Arnoldstein. *Neues aus Alt-Villach*, 25. Jahrbuch, S. 9–68.
- Nitsche, M., Rickenmann, D., Turowski, J.M., Badoux, A., Kirchner, J.W., 2012. Verbesserung von Geschiebevorhersagen in Wildbächen und Gebirgsflüssen durch Berücksichtigung von Makrorauigkeit. *Wasser, Energie, Luft*, 104(2), S. 129–139.
- People, 2005. After 30 years, secrets, lessons of China's worst dams burst accident surface. http://en.people.cn/200510/01/eng20051001_211892.html [16.08.2010].
- Pfurtscheller, C., Thieken, A.H., 2013. The price of safety: Costs for mitigating and coping with Alpine hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(10), S. 2619–2637.
- Pöppl, R.E., Keesstra, S.D., Maroulis, J., 2017. A conceptual connectivity framework for understanding geomorphic change in human-impacted fluvial systems. *Geomorphology*, 277, S. 237–250.
- Rascher, E., Rindler, R., Habersack, H., Sass, O., 2018. Impacts of gravel mining and renaturation measures on the sediment flux and budget in an alpine catchment (Johnsbach Valley, Austria). *Geomorphology*, 318, S. 404–420.

- Rickenmann, D., Turowski, J.M., Fritschi, B., Klaiber, A., Ludwig, A., 2012. Bedload transport measurements at the Erlenbach stream with geophones and automated basket samplers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, S. 1000–1011.
- Rohr, C., 2005. Eine schreckliche Warnungsglocke? Zum Umgang mit Erdbebenkatastrophen im österreichischen Raum und ihren Auswirkungen auf die Stadtentwicklung (14.–16. Jahrhundert). In: W. Schenk, A. Dix (Hrsg.), *Naturkatastrophen und Naturrisiken in der vorindustriellen Zeit und ihre Auswirkungen auf Siedlungen und Kulturlandschaft*. Siedlungsforschung. Archäologie – Geschichte – Geographie, 23. Selbstverlag ARKUM e.V., Bonn, S. 9–18.
- Thaler, T., Attems, M-S., Fuchs, S., 2018. Neue gesellschaftliche Herausforderungen im Naturgefahrenmanagement: welche Entwicklungen kommen auf uns zu? *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 70(3/4), S. 230–235.
- Till, A., 1907. Das große Naturereignis von 1348 und die Bergstürze des Dobratsch. *Mitteilungen der Geographischen Gesellschaft*, Wien, 50, S. 534.
- Turconi, L., Tropeano, D., Savio, G., De, S.K., Mason, P.J., 2015. Landscape analysis for multi-hazard prevention in Orco and Soana valleys, Northwest Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15, S. 1963–1972.
- Westen, C. van, Kappes, M.S., Luna, B.Q., Glade, T., Malet, J.P., 2014. Medium-scale multi-hazard risk assessment of gravitational processes. *Advances in Natural and Technological Hazards Research*, 34, S. 201–231.
- Worni, R., Huggel, C., Clague, J.J., Schaub, Y., Stoffel, M., 2014. Coupling glacial lake impact, dam breach, and flood processes: A modeling perspective. *Geomorphology*, 224, S. 161–176.

Teil III: Weitere gesellschaftsrelevante Aspekte

25 Schutzwald und Extremereignisse

Karl Kleemayr, Thomas Cech, Walter Fürst, Gernot Hoch, Thomas Ledermann, Gerhard Markart, Frank Perzl, Silvio Schüller, Michaela Teich und Peter Wiltsche*

Zusammenfassung

Durch die Ausdehnung des Siedlungsraums und den intensiven Ausbau der Infrastruktur im österreichischen Alpenraum hat die Bedeutung des Waldes als effizienter Schutz vor alpinen Naturgefahren in den letzten einhundert Jahren zugenommen. Waren Schutzwirkung und Zustand des Waldes unzureichend folgten oft Katastrophenereignisse, was die Entwicklung der österreichischen Forstgesetzgebung und die Gründung wichtiger Institutionen (z. B. Forsttechnischer Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung) maßgeblich prägte. In diesem Beitrag werden die wichtigsten historischen und waldbaulichen Entwicklungen zusammengefasst sowie Interaktionen zwischen Schutzwald und Hochwasser, Rutschungen, Steinschlag, Wind und Lawinen kurz erläutert und – soweit bekannt – die Grenzen der Wirksamkeit gegenüber extremen Gefahrenprozessen diskutiert. Zusätzlicher Stress durch fortschreitenden Klimawandel und resilienzreduzierende Bewirtschaftungspraktiken, verminderte Anpassungsfähigkeit und höhere Schadensanfälligkeit führen zu großen Unsicherheiten, welche mit der Möglichkeit zu extremen Waldentwicklungen und flächenhaftem Bestockungsverlust verbunden sind.

* Karl Kleemayr, Bundesforschungszentrum für Wald, Institut für Naturgefahren, karl.kleemayr@bfw.gv.at.

Thomas Cech, Bundesforschungszentrum für Wald, Institut für Waldschutz, thomas.cech@bfw.gv.at.

Walter Fürst, Bundesforschungszentrum für Wald, Institut für Waldwachstum und Waldbau, walter.fuerst@bfw.gv.at.

Gernot Hoch, Bundesforschungszentrum für Wald, Instituts für Waldschutz, gernot.hoch@bfw.gv.at.

Thomas Ledermann, Bundesforschungszentrum für Wald, Institut für Waldwachstum und Waldbau, thomas.ledermann@bfw.gv.at.

Gerhard Markart, Bundesforschungszentrum für Wald, Institut für Naturgefahren, gerhard.markart@bfw.gv.at.

Frank Perzl, Bundesforschungszentrum für Wald, Institut für Naturgefahren, frank.perzl@bfw.gv.at.

Silvio Schüller, Bundesforschungszentrum für Wald, Institut für Waldwachstum und Waldbau, silvio.schueler@bfw.gv.at.

Michaela Teich, Bundesforschungszentrum für Wald, Institut für Naturgefahren, michaela.teich@bfw.gv.at.

Peter Wiltsche, Universität für Bodenkultur Wien, Universitätsbibliothek, peter.wiltsche@boku.ac.at.

Notwendige Strategien zur Aufrechterhaltung der Schutzleistung des Waldes müssen waldbauliche Anpassungskonzepte und Klimaschutzmaßnahmen gleichermaßen beinhalten.

Abstract

Due to the expansion of settlements and the intensive development of infrastructure in the Austrian Alps, the importance of forest as an efficient protection against alpine natural hazards has increased over the last one hundred years. Inadequat protection and forest conditions were often followed by catastrophic events, which significantly influenced the development of the Austrian forest legislation and the founding of important institutions (e. g. Forest Technical Service for Torrent and Avalanche Control). In this contribution, the most important historical and silvicultural developments are summarized and interactions between protection forests and floods, landslides, rockfall, wind and avalanches are briefly explained and, as far as known, the limits of effective protection against extreme hazard processes are discussed. Additional stress due to progressive climate change and resilience-reducing management practices, reduced adaptability and higher susceptibility to damage lead to great uncertainties, which are associated with the possibility of extreme forest developments and large-scale loss of forest cover. Necessary strategies for maintaining the protective function of forests must include silvicultural adaptation concepts and climate protection measures.

Kernaussagen

- Der Wald spielt eine entscheidende Rolle im Schutz gegen Hochwasser, Rutschungen, Steinschlag und Lawinen.
- Allerdings ist die Schutzwirkung gegen extreme Naturgefahren – oft ausgelöst durch meteorologische Extremereignisse – gering.
- Der Schutzwald selbst unterlag in der Vergangenheit extremen Entwicklungen, da Übernutzungen immer wieder zu flächenhaftem Waldverlust und somit zum Verlust der Schutzwirkung führten.

Key Points

- Forests play a major role in the protection against floods, landslides, rockfall and avalanches.
- However, the protective effect against extreme natural hazard events – often triggered by meteorological extremes – is low.
- In the past, protection forests themselves were subject to extreme developments where overuse repeatedly led to large-scale losses of the forest cover and thus to the loss of protection.

25.1 Einleitung

Insgesamt sind 58 % der österreichischen Landesfläche als Intensivzonen des Schutzes vor alpinen Naturgefahren ausgewiesen. Der Wald als Schutz vor Naturgefahren spielt dabei eine entscheidende Rolle: von den 48 % Wald (in Bezug auf Österreichs Gesamtfläche) sind ca. 1/5 Waldflächen mit direkter Objekt-

schutzfunktion, die Gebäude, Siedlungen, Straßen oder Industrieeinrichtungen schützen sollen (vgl. Abbildung 01).

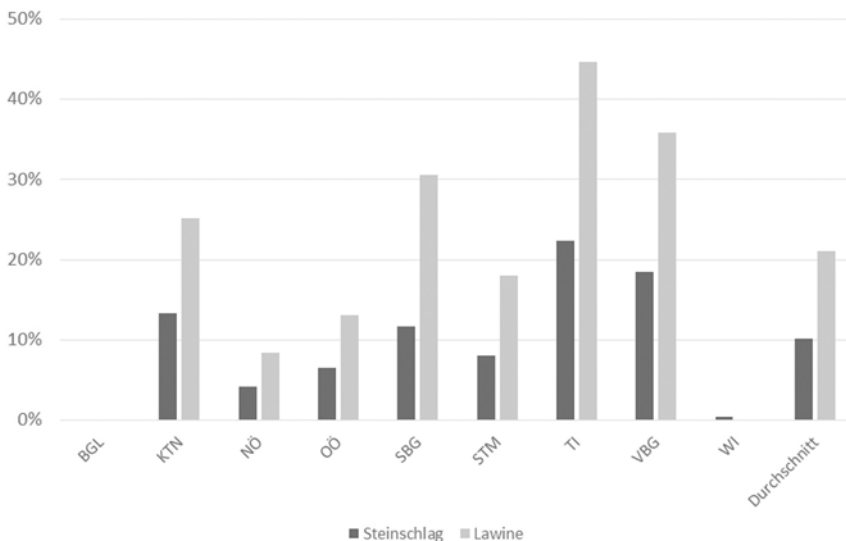


Abbildung 01: Verteilung der gesamten Objektschutzwaldfläche Österreichs auf die Bundesländer (BGL: Burgenland, KTN: Kärnten, NÖ: Niederösterreich, OÖ: Oberösterreich, SBG: Salzburg, TI: Tirol, VBG: Vorarlberg, WI: Wien).

Figure 01: Percentage of forested area with object protection function in the Austrian provinces. *Datenquelle:* Huber et al., 2017

Die Herausforderungen angesichts Klima- und Gesellschaftswandel sind beträchtlich. Neben dem Einfluss des Klimawandels, der Häufigkeit und Intensität von Extremereignissen (Ereignisse, welche mit besonders hoher oder niedriger Intensität einhergehen) sind es u. a. die Holzmarktsituation, das Wildtiermanagement und die touristische Nutzung der Landschaft, die es den Waldbewirtschaftern erschweren, die Schutzleistungen für den Erhalt des Lebensraums aufrechtzuerhalten.

Schutzwald schützt nicht nur vor Naturgefahren, er wird auch maßgeblich von Naturgefahren beeinflusst: Niederschläge, Sturm, gravitative und fluviatile Prozesse prägen Struktur, Entwicklung und Stabilitätszustand, und beeinflussen folglich die Schutzwirkung von Wäldern mit direkter Objektschutzfunktion. Extremereignisse, wie z. B. Starkniederschläge, Stürme oder Dürreperioden, können dabei als Auslöser von »extremen Naturgefahrenprozessen« sowie in der Entwicklung der Schutzwälder zukünftig eine noch größere Rolle spielen.

Hinzu kommt, dass der Zustand des Waldes über die Jahrhunderte durch sozioökonomische Bedingungen und Einflüsse besonders stark geprägt wurde.

Zunächst führten intensive Landnutzung (u. a. durch Almen und Waldweide) und vorindustrielle Holznutzung (z. B. für Salinen und Erzwinnung) zu massivem Waldverlust, der in den letzten beiden Jahrhunderten durch die Forstwirtschaft sowie Auflassung und Extensivierung landwirtschaftlicher Flächen zwar rückgängig gemacht wurde, dabei aber teilweise Waldgesellschaften, Baumartenmischungen und Waldzustände erzielt wurden, die in manchen Regionen hinsichtlich ihrer Stabilität und Schutzwirkung kritisch zu beurteilen sind.

Der Beitrag »Schutzwald und Extremereignisse« beleuchtet im Folgenden drei Aspekte, welche die Schutzwirkung des Waldes gegen Naturgefahren maßgeblich beeinflussen: Erstens, die extrem niedrige Waldbestockung die etwa in der 2. Hälfte des 19. Jhs. in Österreich zu finden war und einen gesellschaftlich relevanten Verlust der Schutzwirkung nach sich zog, infolgedessen es zur Gründung von Schutzeinrichtungen und zur Etablierung von Schutzstrategien kam. Zweitens, den Einfluss von Klimawandel und Extremereignissen auf Waldstruktur, -entwicklung und -stabilität, auch aus Sicht des Forstschutzes. Und drittens wird zusammengefasst, gegenüber welchen »extremen Naturgefahrenprozessen« – wie sie in den Alpen typischerweise auftreten – die Schutzwirkung des Waldes limitiert ist.

25.2 Der Schutzwald – Schutz durch Wald

»Es gibt Wohltaten, die der Mensch nicht mehr hoch genug einschätzt, wenn er sie lange genießen durfte und sich an sie wie an etwas Selbstverständliches gewöhnte. Bis dann Katastrophen kommen, die ihm die verloren Werte zeigen! So geht es im staatsbürgerlichen, so geht es im wirtschaftlichen Leben. Die wohltätigen Wirkungen des Waldes werden auch als etwas Selbstverständliches hingenommen, sie sind auch so natürlich! Großer Schaden folgte, wenn man den Wohltäter vernachlässigte oder gar vernichtete.« (Kautz, 1922)

25.2.1 Extreme Waldentwicklung – ein historischer Abriss

Früh wurde die Schutzwirkung des Waldes vor allem gegen Lawinen und Wildbäche erkannt, denn die einst schonungslose Abholzung und Brandrodung von ganzen Berghängen hatte oft katastrophale Folgen für den Schutz vor Naturgefahren. Während vor 10.000 bis 5.000 Jahren primär Klimavariationen für Änderungen der Waldgesellschaften und Fluktuationen der Waldgrenze verantwortlich waren, dominierte danach der menschliche Einfluss (Staffler et al., 2011). In vielen inneralpinen Tälern wurden die sonnseitigen Flanken teilweise

oder vollständig entwaldet bzw. die Waldgrenze deutlich gedrückt – ein Relikt der frühen Nutzung und Besiedlung dieser Talschaften, oft schon seit vorge-schichtlicher Zeit (Wopfner, 1951; Schiechl und Stern, 1983). Nur eine Ein-schränkung oder ein Verbot der Holznutzung in den gefährdeten Lagen konnte Abhilfe schaffen. Ein Mittel hierzu war die Ausmarkung von Bannwäldern, wie sie auch für andere Zwecke, z. B. zur Sicherung von Holz für bestimmte Auf-gaben, oder auch nur zur Ermöglichung der Regeneration übermäßig bean-spruchter Waldflächen bereits für die mittelalterliche dörfliche Gemein-schaftsnutzung häufig durchgeführt wurde.

Weitaus gefährlicher aber war die *Kahlschlagnutzung für Salinen und Hüt-tenwerke*. Ab dem ausgehenden Mittelalter wurden für den Bergbau enorme Mengen an Holz benötigt. Seit dem 13. Jh. ist z. B. die Salzgewinnung im Inntal dokumentiert. Auch Landesordnungen, z. B. 1532 zur Regulierung der Ausfuhr von Fichte, Lärche und Zirbe, konnten den Raubbau an diesen Schutzwald-hauptbaumarten nicht eindämmen. Die Saline forcierte großflächige Kahl-schläge. Diese erfolgen zumeist nach Mast- bzw. Samenjahren, um die Flächen rasch wieder in Bestand zu bringen. Viele der bis ins 18. Jh. durchgeführten Großkahlschläge bewirkten jedoch eine Verarmung der Standorte und eine deutliche Ertragsminderung für die Folgegenerationen in vielen Talschaften (Stern, 1966).

Trotz dieser Exploitation wurde bereits ab der beginnenden Neuzeit versucht, über *Holzordnungen oder »Waldbereitungen«* dem Waldschutzgedanken Rechnung zu tragen. In einer kaiserlichen Bergwerksordnung findet sich ein Schlägerungsverbot als Schutz gegen Schneeverwehungen. Gegen Erdverwehungen richtet sich der Entwurf einer Waldordnung von Erzherzog Karl II. (Tersch, 1994). Da jedoch viele der handelnden Personen dem Bergbau unter-standen, dienten solche Maßnahmen wieder primär der gesicherten Holzver-sorgung für den Bergbau (z. B. Stern, 1966).

Neben der Holzversorgung für den Bergbau wurde versucht, den Bedarf an landwirtschaftlichen Flächen durch Anlage von Blößen im Wald, also der Schaffung von Bergmähdern im Waldgürtel zu decken. Über 500 Jahre währte daher ein Kampf zwischen der Saline und den Gemeinden der schlussendlich 1847 in der »Waldpurifikation« mit einem Sieg der Gemeinden endete (Stern, 1966). Dadurch brach jedoch eine erneute Periode unkontrollierter Waldnut-zung aus, deren Folgen teils bis heute sichtbar sind, z. B. in Form von »Plün-derwäldern« (aufgelichtete Bestände, vielfach bis auf kleine Kronen geastet) oder degradierten Böden als Folge der Streunutzung. Diese unkontrollierten Eingriffe hatten z. B. in den Seitentälern des Tiroler Wipptales eine Waldre-duktion um ca. 15 % zur Folge (Stern, 1966). Auch die Häufung von Lawinen-ereignissen Ende des 19. Jhs. und in der ersten Hälfte des 20. Jhs. trug vielerorts maßgeblich zur Reduktion der Waldfläche bei.

Nach einigen verheerenden Hochwasserkatastrophen in der ersten Hälfte des 19. Jhs. (z. B. 1830 Wien, 1847 Salzburg) stieg das Bewusstsein für die Notwendigkeit einer ausreichenden Waldbedeckung als wirksamer Schutz gegen Extremereignisse. Unter dem Eindruck der Hochwasserkatastrophen mit schweren Schäden bis ins Alpenvorland wurde das *Österreichische Forstgesetz 1852* erlassen, um den Waldzustand zu verbessern und damit künftige Katastrophen, wenn nicht gänzlich verhindern, so doch weitgehend abschwächen zu können.

Die Vorschriften für Schutzwälder nach dem Reichsforstgesetz waren zwar auf die Erhaltung des Waldes selbst und nicht auf deren externe Wirkungen ausgerichtet, trugen jedoch maßgeblich zur Verbesserung der Schutz- und Wohlfahrtswirkungen bei (Tersch, 1994). Die Forstgesetzgebung war lange Zeit Landessache. Die Bestrebungen aller Bundesländer bzw. Kronländer hatten zum gemeinsamen Ziel, die Waldzerstörung zu verhindern und die Schutzfunktion des Waldes zu verdeutlichen und zu fördern (Bobek und Johann, 1994). Das *Forstgesetz 1975* ermächtigte die Landesgesetzgebung, zu einzelnen Bestimmungen Landesausführungsgesetze sowie durch eine größere Zahl von Detailregelungen Verordnungen zu erlassen (Bobek und Johann, 1994). In Tabelle 01 wird ein Überblick über die forstgesetzlichen Bestimmungen, welche Struktur, Entwicklung und Stabilitätszustand von Schutzwäldern in Österreich beeinflussten, gegeben.

Tabelle 01: Historische Entwicklung der für Schutzwälder wichtigen forstgesetzlichen Bestimmungen in Österreich.

Table 01: Historical development of the Austrian forest legislation and regulations that are important for protection forests.

Quelle: Eckhart und Mayer, 1983

Waldordnung 15. September 1766 Maria Theresia	Forstgesetz 3. Dezember 1852	Forstgesetz 3. Juli 1975
Erhaltung der beständigen Dauerhaftigkeit des jährlichen Holzschlages	Allgemeines Waldverwüstungsverbot	Verbot der direkten und indirekten Waldverwüstung (Wind, Schnee, Immissionen, Wild) und unzweckmäßigen Bewirtschaftung
Rodungsverbot	Rodungsverbot Ausscheidung von Bannwäldern mit Plenterungsgebot (Kahlschlagverbot)	Rodungsverbot Bannwaldausscheidung, standorts- und bestandesindividuelle Pflege des Schutzwaldes zur nachhaltigen Erhaltung der Schutzfunktion; Schutzwaldsanierung

((Fortsetzung))

Waldordnung 15. September 1766 Maria Theresia	Forstgesetz 3. Dezember 1852	Forstgesetz 3. Juli 1975
	Überwachung der Waldbewirtschaftung durch die Forstbehörden	Forstaufsicht durch die Behörden zur Einhaltung der forstgesetzlichen Bestimmungen
	Nachwuchsschonende Fällung und Bringung	Gebot einer möglichst bestandesschonenden Bringung
	Verbot der Waldweide im Jungwuchs	Verbot der Waldweide im Jungwuchs; waldschonende Waldweide

Erneute massive Hochwasserereignisse und Lawinenkatastrophen in den Nachkriegsjahren führten dazu, dass der Forsttechnische Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung (WLV) und die Forstdienste (FD) eine alte Idee der Naturgefahrenprävention wiederaufnahmen, die *Hochlagenaufforstung*. Durch Hochlagenaufforstungen sollten die bisherigen Waldverluste rückgängig gemacht, und die schutzwirksame Waldfläche erweitert werden.

Allein in Tirol sollten 50.000 ha und in ganz Österreich ca. 200.000 ha in der subalpinen Stufe wieder bewaldet werden (Hampel, 1954 zitiert in Aulitzky, 1958). Zu Beginn des Aufforstungsprogramms war vor allem die Hebung der Waldgrenze das allgemein akzeptierte Ziel. Unter dem Eindruck begrenzter Erfolge und aufgrund des hohen Aufwands wurde dieses Ziel fast gänzlich zugunsten der Verbesserung der direkten Schutzwirkung aufgegeben (Weiss, 1999). Im Zusammenhang mit der Debatte um das Waldsterben und die Überalterung der Wälder ab den 1980er Jahren verlagerte sich der Schwerpunkt der Maßnahmen zur Schutzwaldverbesserung im Rahmen der sogenannten FWP-Projekte (flächenwirtschaftliche Projekte) zunehmend auf die Pflege des bestehenden Schutzwaldes in tieferen Lagen.

Aufforstungen können auch als Ausgleichsmaßnahmen zur Versiegelung oder sonstigen hydrologischen Verschlechterungen von Flächen eingesetzt werden. Die Neubegründung von Wald wirkt ausgleichend auf das Abflussgeschehen, wobei die Wirkung mit zunehmendem Bestandesalter wächst (Binder et al., 2006). Von der WLV wurden seit Ende des Zweiten Weltkrieges umfangreiche verbessernde Maßnahmen in Wildbach- und Lawineneinzugsgebieten durchgeführt, so z. B. das Projekt der »Integralmelioration« – die Vorbeugung Vorderes und Mittleres Zillertal (Stauder, 1963; Markart et al., 1996; Kohl et al., 2008). Es erfolgten eine Reihe von Aufforstungen zum Lawinenschutz mit Modellcharakter, z. B. die Hochlagenaufforstung bei Haggen im Tiroler Sellraintal (Hensler, 1972; Markart et al., 2002). Insgesamt wurden von der WLV zwischen

1906 und 2017 5.360 Aufforstungsflächen mit einer Gesamtfläche von ca. 15.000 ha angelegt (vgl. Abbildung 02). Allerdings würde ein effizienter Ausgleich für die negativen Auswirkungen der Flächenversiegelung einen Flächengewinn mit hydrologisch optimal wirksamem Waldbestand im Verhältnis von mindestens 1 zu 4 bis 5 (Kohl et al., 2009) erfordern. Daher müssten nur für den Ausgleich der derzeitigen Flächenversiegelungen täglich mindestens 22 bis 29 ha bzw. jährlich ca. 8.300 bis 10.000 ha Waldflächen neu entstehen, die bis zu 50 Jahre benötigen, um hydrologisch ausreichend wirksam zu werden.

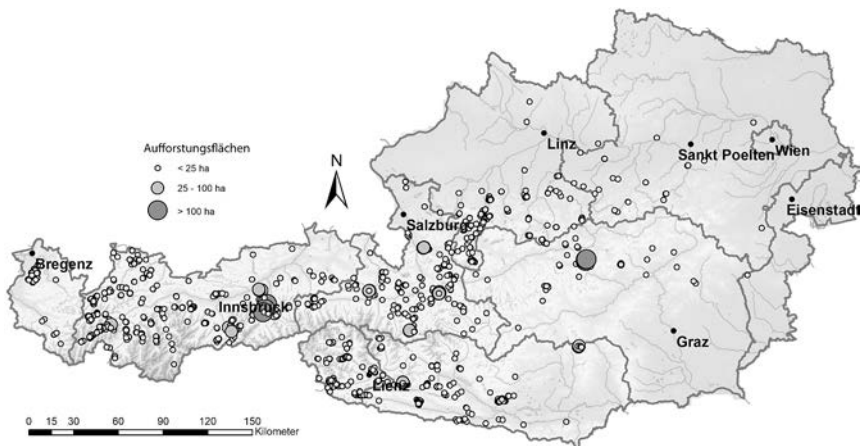


Abbildung 02: Vom Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung durchgeführte Hochlagenaufforstungen in Österreich zwischen 1906 und 2016.

Figure 02: Afforestations in high altitudes conducted by the Forest Technical Service for Torrent and Avalanche Control in Austria between 1906 and 2016.

Datengrundlage: Wildbach- und Lawinenkataster, Wildbach- und Lawinenverbauung, Stand 2016

Bereits wenige Jahre nach Beginn der Hochlagenaufforstungen Anfang der 1950er Jahre waren großflächige Verluste an jungen Bäumen zu verzeichnen (Donaubauer, 1980). Diese waren die Folge einer Reihe von epidemischen Pilzkrankheiten vor allem bei Zirben und Lärchen (Donaubauer, 1983). Die zentrale Rolle kam dabei der großflächigen künstlichen Bestandesbegründung in Seehöhen über 1.800 m ohne Beachtung kleinstandörtlicher und mikroklimatischer Gegebenheiten als Prädisposition für diese Epidemien zu (Donaubauer, 1980). Erst die Erforschung der für einen Aufforstungserfolg in Hochlagen essentiellen Faktoren ermöglichte eine nachhaltige künstliche Bestandesbegründung von Schutzwäldern in Hochlagen (vgl. Donaubauer und Stephan, 1988). Diese kann nur durch kleinflächige Begründungen von Horsten, unter Berücksichtigung der in dieser Höhenstufe vorhandenen topographischen,

standörtlichen sowie klimatischen kleinräumig wechselnden Gegebenheiten erreicht werden.

Wo die Fichte in höheren Lagen in Schutzwäldern die Hauptbaumart darstellt, ist eine optimale Pflege zur Erzielung nachhaltig stabiler Bestände notwendig. Das betrifft im Alpenraum vor allem den Schutz der Wurzelsysteme und Stämme vor der Rotfäule (*Heterobasidion annosum*), welche das Risiko von Windbrüchen bzw. Windwürfen erhöht und somit Erosion im Schutzwaldbereich begünstigt. Erforderliche Maßnahmen sind hier vor allem Schutz vor mechanischen Verletzungen im Stammanlauf bzw. Wurzelbereich (Trittschäden durch Weidevieh, Verletzungen durch Holzernte, Forststraßenbau etc.) bzw. die Anwendung biotechnischer Maßnahmen durch Applikation bzw. Förderung von antagonistisch wirkenden Pilzen (Steyrer et al., 2008; Tomiczek et al., 2008). Stabile Bestände sind auch die beste prophylaktische Maßnahme zur Verhinderung von Borkenkäferkalamitäten, denen ja meist ein großer Anfall bruttauglichen Materials durch abiotische Ereignisse, wie Windwurf, Schnee- oder Eisbruch, vorangeht.

25.2.2 Fazit: Herausforderungen für das Schutzwaldmanagement

Schutzwälder können bei konsequenter und vor allem nachhaltiger, standortangepasster Bewirtschaftung eine zentrale Rolle im Schutz vor Naturgefahren übernehmen. Die Katastrophenereignisse bewirkten in Österreich entscheidende Systemverbesserungen, um die Wiederholung der historischen Extremereignisse bestmöglich zu verhindern. Strukturelle Probleme bedürfen jedoch erhöhter Aufmerksamkeit. Der Österreichischen Waldinventur (ÖWI, 2018) zufolge sind:

- 1) 56 % der Schutzwaldbestände stabil, bei lokal starker Überalterung; diese führt zu kritisch-instabilen Beständen,
- 2) 34 % der Schutzwaldfläche im Stadium der Terminal- bzw. Zerfallsphase,
- 3) 76 % der verjüngungsnotwendigen und bereits verjüngten Flächen im Schutzwald im Ertrag und 68 % im Schutzwaldes außer Ertrag durch Wildverbiss geschädigt.

25.3 Forstschutz im Schutzwald – Klimawandel, Extremereignisse und »extreme Schädigungen«

Der Klimawandel hat nicht nur direkten Einfluss auf die Pflanzen- bzw. Ökophysiologie, Wachstumsprozesse oder Konkurrenzverhältnisse im Wald. Dürreperioden, Stürme oder Verletzungen durch Naturgefahren gehen mit Stress-

situationen einher, die sekundäre Schäden und eine hohe Dynamik von tlw. waldverwüstenden Schäden verursachen.

25.3.1 Großflächige Borkenkäfermassenvermehrungen im Bergwald

In den vergangenen Jahrzehnten kam es zu großflächigen Massenvermehrungen von Borkenkäfern in höheren Lagen, die bedeutende Verluste von Nadelholzaltbeständen mit teils wichtiger Schutzfunktion zur Folge hatten. Galt der Buchdrucker (*Ips typographus*), der bedeutendste Borkenkäfer an der Fichte, bis in die 1980er Jahre in erster Linie als Problem in den sekundären Fichtenwäldern der Tieflagen, hat sich diese Einschätzung mittlerweile geändert. Auch in hohen Lagen ermöglichen höhere Temperaturen im Frühjahr einen früheren Schwärmbeginn, eine raschere und damit meist erfolgreichere Entwicklung der Nachkommen und gegebenenfalls die Anlage und fertige Entwicklung einer weiteren Generation (Wermelinger und Seifert, 1998; Baier et al., 2007). Dadurch steigt der Befallsdruck erheblich. Der Buchdrucker zeichnet sich durch seine Fähigkeit aus, bei entsprechend großer Populationsdichte großflächig auch stehende Fichten zu befallen. Großer Schadholzanfall durch Borkenkäfer (vor allem Buchdrucker) auch in größerer Seehöhe trat in den Jahren 1993, 2003 und Folgejahre, und 2009 auf (Dokumentation der Waldschädigungsfaktoren, BFW, o. J.), die jeweils durch für den Buchdrucker günstige klimatische Bedingungen gekennzeichnet und denen große Windwürfe vorangegangen waren (2002, 2007 und 2008).

Aber nicht nur die Fichte ist von Borkenkäfern betroffen, auch Kiefernarten werden immer wieder durch verschiedene Arten befallen. Als besonders aggressiv hat sich in den letzten Jahren der Sechszähnlige Kiefernborkeäfer (*Ips acuminatus*) erwiesen, z. B. kam es im südlichen Alpenraum zu großflächigen Massenvermehrungen (Faccoli et al., 2010). Seit 2010 ist in Kärnten eine ausgedehnte Kalamität aktiv. Durch das flächige Absterben von Kiefern wurde die Steinschlagschutzwirkung des Waldes stark herabgesetzt und machte technische Schutzmaßnahmen notwendig.

Das einzige Mittel zur Bekämpfung von Borkenkäfermassenvermehrungen ist die rechtzeitige Entnahme oder bekämpfungstechnische Behandlung von frisch befallenen Bäumen sowie bruttauglichen Materials. In Schutzwäldern stehen dem häufig die Unzugänglichkeit des Geländes oder fehlende Aufschließung entgegen. Darüber hinaus hat die vollständige Räumung zusammenhängender Flächen oft ungünstige Folgen für die Schutzwirkung, die bei allen Maßnahmen zum Borkenkäfermanagement im Schutzwald auch mit zu bedenken ist (Teich et al., 2019).

25.3.2 Schädigung von Bodenschutzwäldern in den Tieflagen

In warm-trockenen Tieflagen kommt es immer wieder zu Phasen mit stark verminderter Gesundheit der Waldbestände bis hin zu besorgniserregender Mortalität. Die Ursachen sind oft komplex: mangelnde Wasserversorgung, eventuell begleitet von anderen abiotischen Schadfaktoren und verbunden mit dem Befall durch verschiedene Schadorganismen. Unter den rindenbrütenden Schadinsekten nimmt an der Weißkiefer auch hier *Ips acuminatus* eine bedeutende Rolle ein. Die Schwarzkiefernwälder im Osten Österreichs sind wie bereits in den 1990er Jahren derzeit wieder von hoher Mortalität betroffen. Im Falle der Schwarzkiefer ist es in erster Linie das Diplodia-Triebsterben (hervorgerufen durch den Pilz *Diplodia sapinea*), welches, begünstigt durch hohe Temperaturen und trockengestresste Wirtsbäume, zur massiven Schädigung der Krone bis hin zum Absterben des Baumes führt (Hoch et al., 2016). Hygienemaßnahmen und waldbauliche Behandlungskonzepte, auch unter Berücksichtigung anderer Baumarten, bieten Lösungsansätze.

25.3.3 Bedrohung von Schutzwaldbaumarten durch invasive Schadorganismen

Invasive Schadorganismen sind während der vergangenen Jahrzehnte im Waldschutz in den Vordergrund der Aufmerksamkeit gerückt. Das hat seine Ursache in der Globalisierung und hier speziell im weltweit enorm gestiegenen Pflanzenhandel, durch den Krankheitserreger unbemerkt über große Strecken transportiert werden. So haben sich im Alpenraum einige invasive Krankheitserreger etablieren können, die gegenwärtig zunehmend zum Problem werden, da sie als Primärpathogene in ihrem Ausbreitungspotenzial nicht auf Schwächungsfaktoren angewiesen sind.

Zwei Nadelkrankheiten bedrohen verschiedene Kiefernarten, vor allem aber Latschen und Zirben lebensgefährdend, da sie über mehrere Jahre hinweg zu steigenden Nadelverlusten führen (Dothistroma-Nadelröte und Lecanosticta-Nadelbräune). Arten der Gattung *Phytophthora* (Verwandtschaftsgruppe der Eipilze) spielen eine zunehmende Rolle als Wurzel- und Wurzelhalsfäule-Erreger bei vielen Pflanzenarten und werden primär fast ausschließlich über Pflanzgut verbreitet. Vor allem über einige intensiv gehandelte Zierpflanzen (z. B. Rhododendron) werden häufig neue *Phytophthora*-Arten aus anderen Kontinenten eingeschleppt, wobei infizierte Pflanzen symptomfrei sind und die Krankheit meist erst Jahre nach dem Setzen ausbricht. Die sekundäre Verbreitung erfolgt effizient über Oberflächenwasser (Überschwemmungen). Die Gefahr der Hybridisierung zu neuen Arten mit veränderter Pathogenität ist bei *Phytophthora* weit höher als bei den echten Pilzen. Im Ostalpenraum ist das

Absterben von Schwarz- und Grauerlen, das von mehreren *Phytophthora*-Arten in Kombination mit anderen Faktoren verursacht wird, das auffälligste Beispiel.

Nachdem Symptome des Eschentriebsterbens seit 2005 beobachtet wurden (Cech, 2006), wurde der aus Ostasien stammende Erreger (*Hymenoscyphus fraxineus*) 2008 erstmals in Österreich nachgewiesen (Halmschlagler und Kirisits, 2008). Seither hat sich die Krankheit in allen Teilen Österreichs etabliert und gefährdet die Eschen in ihrem Bestand. Die später nachgewiesenen Infektionen am Stammfuß, und dadurch verursachte Nekrosen und Folgebefall durch Fäule erregende Pilze (z. B. Hallimasch), können zu Standfestigkeitsverlust führen. So werden aus Sicherheitsgründen zahlreiche Eschen gefällt. Eine Hoffnung liegt auf der Selektion und Züchtung gegen die Krankheit resistenter Eschen (Unger et al., 2017).

25.3.4 Wildverbiss an der Naturverjüngung

In hohem Maße problematisch für die Waldentwicklung in Österreich ist der seit Jahrzehnten überhöhte Wildbestand. Neben den lokal tlw. beträchtlichen Schäl- und Fegeschäden, vor allem in der Nähe von Fütterungseinrichtungen, muss für große Teile der Mischwälder eine völlige Entmischung von Tanne und Bergahorn festgestellt werden. Der Verbissdruck auf die beiden Baumarten führte in einigen Regionen zum völligen Ausfall von Tanne und Bergahorn. Dies hat beträchtliche Konsequenzen für die Bestandesentwicklung von Schutzwäldern, deren Stabilität und Resilienz gerade in Zeiten des Klimawandels nur durch einen ausreichenden Anteil dieser Baumarten erreicht werden kann.

Fazit: Schutzwaldgesundheit, Klimawandel und Extremereignisse

Alle Klimaszenarien prognostizieren steigende Temperaturen. Dies bedeutet auch in den Hochlagen bessere Entwicklungsbedingungen für viele Borkenkäferarten, wie z. B. den Buchdrucker mit seiner flexiblen Generationsentwicklung. Aber nicht alle Forstinsekten profitieren vom Klimawandel, so können z. B. zu früh auftretende hohe Temperaturen auch störend für überwinternde Stadien sein, wie etwa für den Grauen Lärchenwickler (*Zeiraphera diniana*) (Baltensweiler, 1993). Mit höheren Temperaturen geht höhere Evapotranspiration einher, so dass auch bei gleichbleibenden Niederschlägen die Bäume häufiger unter Wasserdefizit leiden könnten. Sollte es zu vermehrten Trockenperioden bzw. vermehrtem Anfall von Niederschlägen in Form von Starkregen kommen, dann ist mit zunehmend schwierigerer Wasserversorgung der Bäume zu rechnen. Zahlreiche Schadorganismen, in erster Linie solche, die sich an oder in verholzten Organen entwickeln (z. B. Borkenkäfer und pilzliche Triebsterbenserreger), werden von dieser Situation profitieren (Jactel et al., 2012). Auch

wenn Bäume allein aufgrund der physiologischen Effekte von Trockenheit absterben können, sind doch sehr häufig sekundären Schadorganismen an der Mortalität beteiligt und führen zu einer beträchtlichen Beschleunigung punktueller aber auch flächiger Mortalität und allgemein einem Verlust der Resilienz (Klein, 2015).

25.4 Schutzwald und Naturgefahren

25.4.1 Schutzwald und Hochwasser

Schon Engler (1919) erkannte die Wirkung von Waldvegetation als ein zentrales Element der Dämpfung von Hochwasserspitzen in alpinen Einzugsgebieten. Die Ursachen für die Hochwasserkatastrophen im frühen 19. Jh. sind auch am Beispiel der Osttiroler Hochwasserkatastrophe 1965/66 erkennbar und sind damals wie heute begründet durch:

- 1) Gering bewaldete Wildbacheinzugsgebiete mit ungenügender Wasserzurückhaltung,
- 2) Starken oberflächlichen Abfluss der Niederschläge auf den durch Waldweide verdichteten Böden,
- 3) Ausplenterung (Plünderung) von Schutz- und Bannwäldern auf labilen Standorten,
- 4) Absenkung der Waldgrenze.

Je nach Baumart werden zwischen 4 und 6 mm je Niederschlagsereignis im Kronenraum zurückgehalten. Viel wichtiger als dieser Kronenrückhalt ist jedoch das Brechen der kinetischen Energie des Niederschlages durch die Waldvegetation. Bei Starkregenereignissen werden die mit hoher Geschwindigkeit auftreffenden Tropfen dosiert über das Kronendach, eine eventuell vorhandene Zwischenschicht, Bodenvegetation und Humusablage in den Mineralboden abgeleitet; eventuell auftretender Oberflächenabfluss wird aufgrund der vielfach raueren Oberfläche deutlich verzögert (Markart et al., 2017). Waldvegetation ist daher als die bestmögliche Vegetationsform in Bezug auf Abfluss- und Erosionsprozesse anzusehen (Pichler, 2018).

Auswertungen der Berechnungsdatenbank des BFW – diese enthält mittlerweile Ergebnisse von ca. 400 Berechnungsversuchen in ca. 40 Regionen bzw. Gebieten des Ostalpenraumes – belegen eine deutlich geringere Abflussdisposition auf Waldstandorten in Relation zu anderen Landbedeckungsformen (z. B. Grünland, Acker oder Brache) bei vergleichbaren Bodenverhältnissen. Diese Waldwirkungen werden auch durch Ergebnisse anderer Untersuchungen bestätigt (z. B. Bunza et al., 1996; Nordmann, 2011).

Die hydrologische Wirksamkeit flächenwirtschaftlicher Maßnahmen (z. B. Weidestellung und -verbesserung, Aufforstung oder Bestandesumwandlung) konnte für Einzugsgebiete unterschiedlicher Größe im vorderen Zillertal schlüssig nachgewiesen werden. Die vergleichende Niederschlag-/Abfluss-Modellierung (1953 versus 2003) mit dem hydrologischen Modell ZEMOKOST (Kohl, 2010) ergab für Teileinzugsgebiete des Finsingtales (Zillertal, Tirol), den bereits 1953 voll bewaldeten Hundsbach (0,9 km²) keine Änderung in der Abflussreaktion, für den benachbarten Taleggbach (1,7 km²) aufgrund der in den 50 Jahren zuvor erfolgten Maßnahmen eine um 50 % niedrigere und deutlich verzögerte Abflussspitze (vgl. Abbildung 03). Auch für das übergeordnete Einzugsgebiet des Finsingbaches (46,6 km²) konnten, obwohl nur auf 15 km² von flächenwirtschaftlichen Maßnahmen betroffen, die positiven Effekte der Waldwirkung nachgewiesen werden (Kohl et al., 2004).

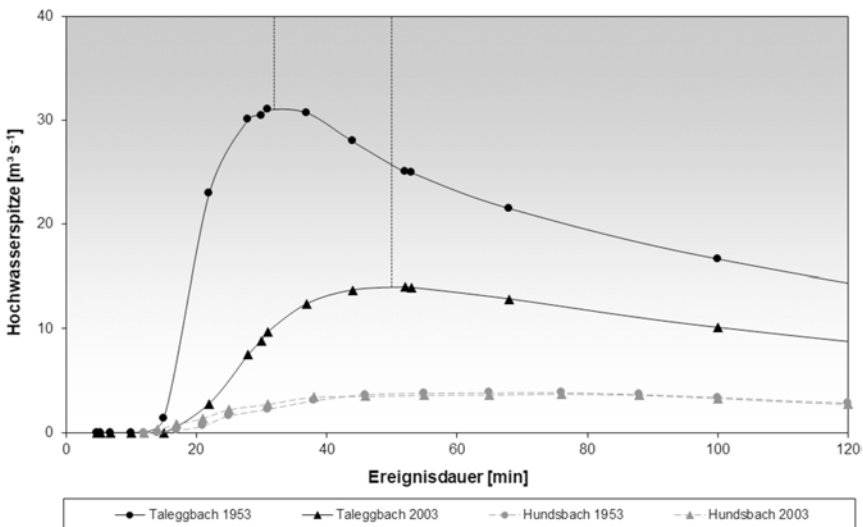


Abbildung 03: Geänderte Hochwasserspitzen bei Niederschlägen unterschiedlicher Dauer in den Einzugsgebieten Hundsbach und Taleggbach (Teileinzugsgebiete des Finsingbaches – nördlichstes rechtsufriges Seitental des Zillertales in Tirol) nach flächenwirtschaftlichen Maßnahmen (Integralmelioration).

Figure 03: Altered peak discharges during precipitation of varying duration in the catchments Hundsbach and Taleggbach (sub catchments of the Finsingbach – northernmost right-sided side valley of the Zillertal in Tyrol) after integral melioration measures.

Quelle: Kohl et al., 2004

Eine bessere Waldausstattung äußert sich in Einzugsgebieten der Mikroskala (≤ 10 km² Fläche) und der Mesoskala (10–100 km²) in Form geänderter Bemessungsergebnisse, d. h. die Anlaufzeit (Phase vom Beginn des Nieder-

schlagsereignisses bis zum Einsetzen des Abflusses) wird, bei späterer und niedrigerer Abflussspitze, länger (Markart et al., 2017).

Fazit: Schutzwald und extreme Niederschläge

Durch Extremereignisse in Form von Langzeitniederschlägen (Dauerregen) ausgelöste Hochwässer und Schadereignisse haben in den letzten Jahrzehnten an Bedeutung gewonnen. Aufgrund der Transpirationsleistung der Waldvegetation ist i. d. R. ein höherer freier Bodenspeicher in Relation zum umgebenden Freiland im Ereignisfall gegeben. Dieser mindert den Direktabfluss (Schumann et al., 2016). Die Retentionswirkung von Waldböden ist jedoch umso geringer, je flachgründiger (z. B. geringmächtige Böden auf Fels- oder stauender Unterlage) und je skelettreicher das Substrat (z. B. grober Hangschutt, Blockschutt) ist. Mit zunehmender Niederschlagsmenge und -dauer, und steigendem Verfüllungsgrad des Bodens nähert sich das Abflussverhalten von Waldflächen jenem der umgebenden waldfreien Einheiten an, insbesondere an Hängen mit geringmächtigen Böden, bei hoher Vorbefeuchtung, geringem Bodenspeicher und hohen Anteilen an Zwischen- bzw. unterirdischem Abfluss (Hegg, 2006).

So zeigten detaillierte Luftbildauswertungen der Landbedeckung für das Tiroler Paznauntal nach den dramatischen Hochwasserereignissen vom 22./23. August 2005, dass die Bewaldung seit 1950 von 19 auf 21 %, also relativ um 8 % gestiegen ist. Drei Viertel der Waldausstattung wiesen 2005 bessere hydrologische Eigenschaften als 1950 auf. Diese Veränderung hin zu dichterem, kleinflächigerem und stufiger-strukturiertem Wald wirkt sich hydrologisch günstig aus. Jedoch wird die seit 1950 eingetretene Verbesserung der hydrologischen Schutzwirkung aus dem Waldbereich durch die abflussverschärfende Wirkung anthropogener Veränderungen (Zunahme an Verkehrs-, Wohn- und Wirtschaftsflächen, Planien und Schipisten) mehr als egalisiert (Kohl et al., 2009).

25.4.2 Schutzwald und Rutschungen

Der Gefahrenprozess Rutschung wurde in Österreich in der Gefahren-, Risiko- und Waldforschung erst relativ spät beachtet. Da in Österreich auch heute noch alle spontanen Materialverlagerungen durch die abtragenden Kräfte des Wassers pauschal als »Muren« bezeichnet werden, sind historische Fälle schwer zu identifizieren bzw. von Hochwasserereignissen mit Geschiebetrieb zu trennen.

Rutschungen werden meist durch extreme Niederschlagsereignisse ausgelöst. Die Wirkung des Waldes bei extremen Niederschlagsereignissen hängt von der Art der Rutschung ab. Rutschungen können nach der zeitlichen Anlage der Gleitung in zwei Hauptgruppen eingeteilt werden: die (1) permanenten (meist

tiefgründigen) Rutschungen mit Gleitflächen im Grundgestein und die (2) spontan auftretenden (überwiegend mittel- bis flachgründigen) Rutschungen (auch als spontane Lockergesteinsrutschungen oder Bodenrutschungen bezeichnet) mit Gleitflächen in der Deckschicht (Keusen et al., 2004). Je nach dem räumlichen Bezug zu einem Fließgewässer sind spontane Lockergesteinsrutschungen Hangrutschungen oder Uferrutschungen. Spontane Hangrutschungen treten im Alpenraum in zwei Hauptformen auf (Perzl et al., 2017): spontanen Rutschungen ohne und mit Hangmure. Abbildung 04 fasst die im Folgenden besprochenen Rutschungstypen zusammen.

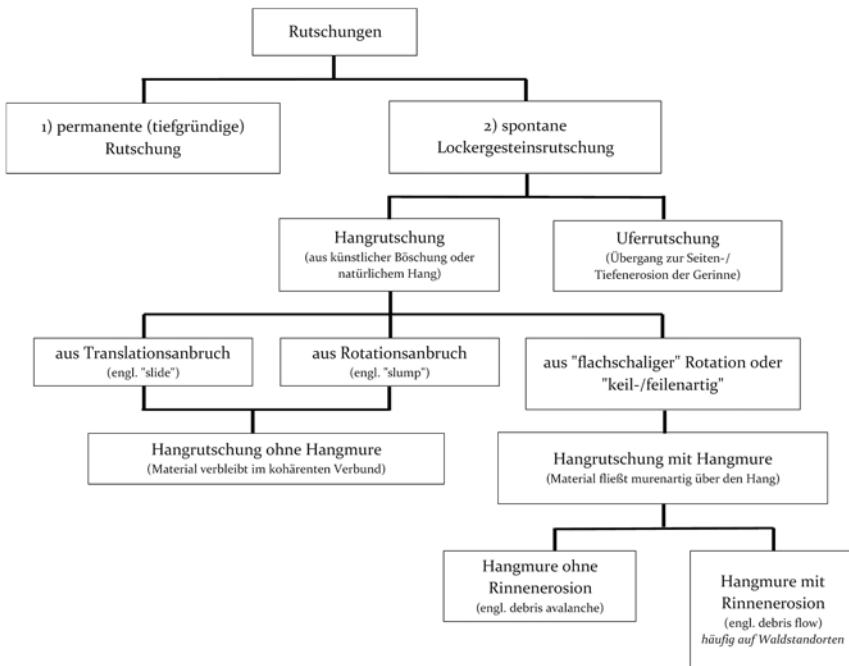


Abbildung 04: Klassifizierung von Rutschungen.

Figure 04: Classification of landslides.

Quelle: nach Perzl et al., 2017; modifiziert nach Varnes, 1978; Keusen et al., 2004; Hungr et al., 2014

Waldvegetation beeinflusst permanente Rutschungen durch Entwässerung im Einzugsgebiet und direkt auf der Rutschmasse (Rickli et al., 2004). Die Bedeutung dieser Wirkung wird aber sehr unterschiedlich beurteilt. Die meisten Autoren (z. B. Gerstel und Badger, 2002) betonen die Möglichkeit einer Wirkung des Waldes auf tiefgründige Rutschungen. Ein Nachweis ist aber schwierig. Generell wird dem Wald nur ein geringer bzw. untergeordneter, indirekter

Einfluss auf tiefgründige Rutschungen durch die Entwässerung der Rutschung im Einzugsgebiet zugeschrieben (z. B. Frehner et al., 2005; Bollinger et al., 2008; Giamboni, 2008), da die bodenstabilisierende Wirkung von Baumwurzeln im Verhältnis zur Lage der Gleitflächen nicht tief genug reicht. Demgegenüber beeinflussen das Vorkommen von Wald und der Waldzustand deutlich das Auftreten (Anbrechen) als auch die Reichweite flach- bis mittelgründiger spontaner Lockergesteinsrutschungen (z. B. Glade, 2003; Markart et al., 2007; Moos, 2014; Reichenbach et al., 2014).

Gehölze verringern die Niederschlagsintensität am Boden und können durch Wirkungen auf den Bodenzustand und den Ausgleich des Bodenwassergehalts zur Ufer- und Hangstabilität beitragen (z. B. Keim und Skaugset, 2003). Der Interzeptionspuffer und die Hangentwässerung durch die Evapotranspiration beeinflussen aber im Verhältnis zur Wurzelkohäsion in humiden Regionen die Hangstabilität nur wenig (z. B. Sidle und Ziegler, 2017) mit saisonalen und niederschlagspezifischen Unterschieden. Als entscheidender Mechanismus der Schutzwirkung des Waldes gilt die Armierung des Bodens durch die Baumwurzeln (z. B. Schwarz et al., 2013; Vergani et al., 2014). Diese Schutzwirkung haben auch Wurzelstöcke noch bis etwa 5 bis 10 (15) Jahre nach der Fällung (z. B. Vergani et al., 2016). Die Bodenarmierung ist an steilen Uferböschungen und Grabeneinhängen – also in Bezug auf Uferrutschungen – geringer als an Hängen ohne Einfluss des Gerinnenetzes (Furbish und Rice, 1983). Bei einer Unterschneidung des Böschungsfußes durch das Fließgewässer unter den Wurzelhorizont ist die stabilisierende Wirkung der Bestockung auf der Uferböschung begrenzt (z. B. Abernethy und Rutherford, 1998).

Lebende Baumbestockungen und Totholz können am Hang und in Gerinnen niedriger Ordnung Hangrutschungen bzw. Geschiebe zurückhalten und dadurch Vermurungen reduzieren (Johnson et al., 2000; May und Gresswell, 2003; Lancaster et al., 2003).

Mehrere Studien kommen übereinstimmend zum Schluss, dass vor allem ältere, geschlossene Baumholzbestände ohne größere Lücken vor der Auslösung von Rutschungen schützen. Relativ hohe Rutschungsdichten treten in Lücken, Blößen und Jungwaldbeständen bis in das Dickungsstadium auf (z. B. Robison et al., 1999; Casadei et al., 2003; Miller und Burnett, 2007; Moos, 2014; Perzl und Rössel, 2017).

Der Grund dafür dürfte das tiefgründigere Wurzelsystem älterer Bestände und das differenziertere Wurzelsystem stufiger Bestände im Vergleich mit Jungwald sein. Auch das Bestandesgewicht von Starkholzbeständen könnte sich positiv bei nicht bindigen, flach- bis mittelgründigen Böden, die zu Rinnenanbrüchen neigen, auswirken (Medicus, 2009). Der Einfluss der Auflast der Bäume ist aber gering, sodass Hangentlastung durch Schlägerung starker Bäume nur bei bereits aktivierten tiefgründigen Rutschungen zweckmäßig ist.

Perzl und Rössel (2017) untersuchten im Laternsertal/Vorarlberg in welchen Bestandestypen zwischen 2001 bis 2006 Rutschungen in Bezug auf den Waldzustand nach den Luftbildern aus dem Jahr 2001 aufgetreten sind. Im Verhältnis zum Flächenanteil des Bestandestyps war der Anteil der Rutschungen in einschichtigen geschlossenen und lockeren Baumhölzern (Überschirmung $\geq 55\%$) am geringsten und somit die Schutzwirkung am größten. Die geringste Schutzwirkung hatten Blößen (Überschirmung $< 15\%$, Breite ≥ 50 m, Fläche < 2.000 m²) und Kleinblößen (Breite < 50 m) gefolgt von Strauch-/Jungwuchsflächen sowie locker-räumigen (Überschirmung $< 55\%$) gestuften oder zweischichtigen Beständen.

Die schutzwirksame Überschirmung liegt demnach über der Minimalanforderung (Überschirmung $\geq 40\%$) der Waldbau-Richtlinie NaiS (Frehner et al., 2005) im Bereich der in der Richtlinie empfohlenen idealen Überschirmung von $\geq 60\%$. Zum diesem Schluss kommt auch Moos (2014). Die Interpretation der Ergebnisse von Moos (2014) und die Daten aus dem Laternsertal lassen allerdings aufgrund des geringen Anteils von Rutschungen in mehrschichtigen oder gestuften Beständen keine generell bessere Schutzwirkung dieser Waldstrukturen im Verhältnis zu einschichtigen Beständen vermuten.

Zusätzlich zur Struktur eines Bestandes, ist die Schutzwirkung des Waldes möglicherweise vom Ablauf des Niederschlagsereignisses abhängig. Im Laternsertal war beim Starkregenereignis 21./22. Mai 1999 die Rutschungsdichte im Wald im Verhältnis zum Nicht-Wald wesentlich geringer (1:2) als beim Ereignis 22./23. August 2005 (1:1,1) (Perzl und Rössel, 2017). Maßgebliche Änderungen des Waldzustands können im Zeitraum zwischen den Ereignissen ausgeschlossen werden, und bei beiden Ereignissen lag der Gesamtniederschlag bei ca. 250 mm in zwei bis drei Tagen (Zieher et al., 2017). Im Mai 1999 erreichte der kumulierte Niederschlag zum Zeitpunkt der maximalen Intensität von ca. 13 mm/h ca. 150 mm. Zu diesem Zeitpunkt lag im August 2005 der kumulierte Niederschlag ähnlich hoch bei 140 mm, aber die maximale Intensität erreichte ca. 18 mm/h. Bis dahin wurde innerhalb von 10 Stunden eine Niederschlagsintensität von 10 mm/h 6-mal erreicht. Beim Mai-Ereignis wurden 10 mm/h in den 10 Stunden vor der maximalen Intensität nur 2-mal knapp überschritten. Obwohl beide Ereignisse die bekannten Niederschlags-Dauer-Intensitäts-Schwellenwerte für Rutschungsauslösungen deutlich überstiegen, wurden auf Waldflächen durch das Ereignis im Mai 1999 mit geringeren Kurzzeit-Intensitäten deutlich weniger Rutschungen ausgelöst als durch das Ereignis im August 2005.

Fazit: Schutzwald und Rutschungen bei extremen Niederschlägen

Waldvegetation weist vermutlich gegen Rutschungsauslösungen bei Extremereignissen mit längerer Niederschlagsdauer aber geringerer Intensität einen

höheren Schutzwirkungsgrad auf als bei solchen mit kurzzeitiger hoher Intensität. Niederschlags-Dauer-Intensitäts-Schwellenwerte für bestimmte Waldtypen bzw. Waldzustände sind aber nicht bekannt und könnten derzeit nur experimentell angenähert werden. Eine größere Anzahl von Rutschungen wird meist nur bei extremen Niederschlagsereignissen ausgelöst. Da der Zeitpunkt der Auslösung der einzelnen Rutschungen auf Waldflächen bestimmten Typs nur in seltenen Fällen genau bekannt ist, kann auch nicht festgestellt werden, ob bestimmte Bestandesstrukturtypen (bei vergleichbarem Standort) unterschiedlich auf den Niederschlagsverlauf oder extreme Niederschläge reagieren.

25.4.3 Schutzwald und Steinschlag

Mit dem Ausbau der Infrastruktur in den österreichischen Tälern hat die Bedeutung des Waldes vor allem als Schutz gegen Steinschlag deutlich zugenommen. Trotz der Tatsache, dass die Wirkung des Waldes bei extremen Steinschlagereignissen (Definitionsgrenze zum Bergsturz) gering ist, sollen im Folgenden die Wirkmechanismen und Grenzen skizziert werden.

Etwa 13 % des Österreichischen Waldes (440.000 ha) haben nach den Berechnungen des BFW eine Steinschlag-Schutzfunktion. Viele Studien haben gezeigt, dass Wälder einen effizienten und kostengünstigen Steinschlagschutz bieten (Wehrli et al., 2006; Notaro und Paletto, 2012), insbesondere bei kleinen Massenergebnissen ($< 5 \text{ m}^3$) (Berger et al., 2002).

Auf bewaldeten Hängen hat ein fallender Stein nach dem Kontakt auf einen Baum zwei Reaktionsmöglichkeiten: der Stein wird entweder gestoppt oder abgelenkt (Dorren et al., 2006). Bei jedem Aufprall wird die Gesamtenergie des Gesteins teilweise reduziert (Dorren und Berger, 2006; Bertrand et al., 2013). Daher tragen Wälder dazu bei, sowohl die Energie als auch die Anzahl der Gesteine zu reduzieren, die das Leben und die Infrastruktur von Menschen bedrohen (Stoffel et al., 2006).

In Berggebieten ist die Optimierung der Waldbewirtschaftung zur Abmilderung von Naturgefahren bei gleichzeitiger Aufrechterhaltung anderer Ökosystemleistungen ein langfristiges, grundlegendes Ziel. Zu diesem Zweck wurden mehrere empirische Zielwerte für Bestandsparameter (hauptsächlich Stammdichte, Grundfläche, Baumdurchmesser und räumliche Verteilung) vorgeschlagen, um die Schutzwirkung von Wäldern zu optimieren (Gsteiger, 1993; Wasser und Frehner, 1996; Perret et al., 2004).

Diese Ansätze haben den Vorteil, dass sie für Waldbewirtschafter einfach und direkt durchführbar sind. Sie basieren jedoch hauptsächlich auf Expertenbeobachtungen und sind daher nicht ausreichend, um die funktionalen Prozesse der Wechselwirkungen zwischen Wald und Steinschlag zu beschreiben und zu

verstehen. In neueren Studien (Dupire et al., 2016a) wurde vorgeschlagen, prozessbasierte Steinschlagmodellierungsansätze zu verwenden, die die Steinschlagbahnen einschließlich der Auswirkungen gegen Bäume genau beschreiben (Stoffel et al., 2006; Radtke et al., 2014; Fuhr et al., 2015). Zum Beispiel hat das RockyFor3D-Modell verschiedene Steinschlagmuster für mehrere bewaldete und nicht bewaldete Standorte in bergigem Gelände genau vorhergesagt (Dorren et al., 2006). Die Abbildungen 05 und 06 zeigen die aus den Modellierungen abgeleiteten Reduktionen der Steinschlagenergie durch den Wald. Sie dienen gleichzeitig als Empfehlungen für den Aufbau geeigneter Bestandesstrukturen.

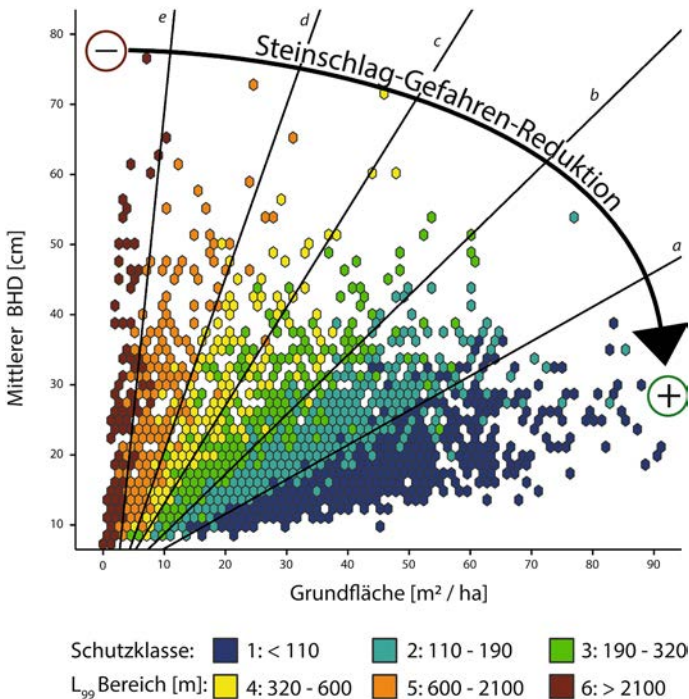


Abbildung 05: Einfluss der Verteilung von Grundfläche und BHD auf die Reduktion der Steinschlaggefahr.

Figure 05: Rockfall hazard reduction dependent on basal area and DBH.

Quelle: Dupire et al., 2016a

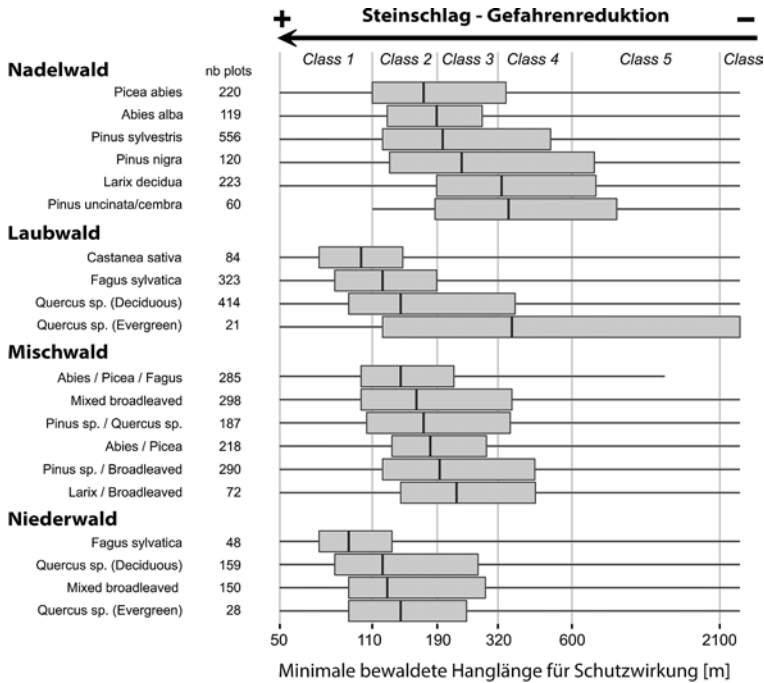


Abbildung 06: Reduktion der Steinschlaggefahr für unterschiedliche Bestandestypen. Class 1 höchste Reduktion; Class 6 geringste Reduktion.

Figure 06: Rockfall hazard reduction for various forest types. Class 1: highest reduction, Class 6: lowest reduction.

Quelle: Dupire et al., 2016b

Fazit: Schutzwald und Steinschlagextremereignisse

Als maximalen Grenzwert an Energie, den eine ca. 120 Jahre alte Fichte mit einem Durchmesser von 45 cm aufnehmen kann, geben Dorren et al. (2017) ca. 300 kJ an.

Ähnlich wie beim Lawinenprozess, ist die Wirksamkeit des Waldes gegen extremen Steinschlag begrenzt. Zahlreiche Beispiele in den Alpen zeigen große Steinblöcke, die dicht bestockte Hänge durchschlagen und erst am Talboden zu liegen kommen.

25.4.4 Schutzwald und Wind

Stürme und die dadurch verursachten Schäden und Folgeschäden haben einen ganz wesentlichen Einfluss auf unsere Wälder. So wird geschätzt, dass in Europa mehr als 50 % aller biotischen und abiotischen Primärschäden auf Stürme zu-

rückzuführen sind (Schelhaas, 2008). In Österreich variieren die durch Sturm und Schnee verursachten jährlichen Schadh Holz mengen zwischen 1 und 3 Mio. m³. In Jahren mit großflächigen Sturmereignissen (z. B. Vivian/Wiebke 1990, Kyrill 2007, Paula/Emma 2008) lagen die Schadh Holz mengen mit 7–10 Mio. m³ deutlich darüber (BFW, o. J.). Für Projektionen der künftigen Waldentwicklung mit Hilfe von Waldwachstumssimulatoren spielt die Abschätzung von Schadh Holz mengen, insbesondere unter dem Aspekt einer Klimaveränderung eine zentrale Rolle.

Die österreichische Waldinventur ist eine repräsentative Datenquelle für »Zufallsnutzungen« (Kalamitätsnutzungen) für das gesamte Bundesgebiet über einen Zeitraum von fast 40 Jahren. Auf dieser Datengrundlage wurden Modelle entwickelt, die das Kalamitätsrisiko durch Sturm in Abhängigkeit von Baumeigenschaften (Baumart, Brusthöhendurchmesser (BHD), Höhe, Höhe/Durchmesser-Verhältnis (H/D-Wert) etc.), Standortparametern (Boden und Topografie) und der Häufigkeit von Starkwindereignissen darstellen.

Insgesamt zeigt sich, dass die Windgeschwindigkeit in Wechselwirkung mit der Bestandeshöhe einen entscheidenden Einfluss darauf hat, ob es auf einer Fläche zu einer Kalamitätsnutzung kommt. Vor allem ab einer Bestandeshöhe von 25 m steigt die Wahrscheinlichkeit für eine Kalamitätsnutzung deutlich an (vgl. Abbildung 07).

Einige Faktoren der Windgefährdung lassen sich aber durch rechtzeitige waldbauliche Maßnahmen beeinflussen, denn es wurden signifikante Zusammenhänge zwischen der Windgefährdung und Parametern der Baumstabilität identifiziert. So zeigt sich zum Beispiel, dass die Wahrscheinlichkeit für einen Baum, vom Wind geworfen zu werden, mit zunehmendem H/D-Wert ansteigt. Auch die Eingriffsstärke bei Durchforstung oder einzelstamm-orientierter Endnutzung beeinflusst die Wahrscheinlichkeit einer Zufallsnutzung: wird in einem Bestand nicht oder nur schwach eingegriffen (bis max. 15 % Grundflächenabsenkung), so hat ein verbleibender Baum eine höhere Wahrscheinlichkeit, Opfer eines Schadh ereignisses zu werden, als bei einer Grundflächenabsenkung von etwa 25 %. Darüberhinausgehende, stärkere Eingriffe, erhöhen wiederum die Wahrscheinlichkeit für eine Zufallsnutzung. Unabhängig von der Eingriffsstärke ist ein Baum umso stärker gefährdet, je lichter der Bestand nach einem Eingriff zurückbleibt. Generell sind Nadelhölzer stärker gefährdet als Laubhölzer (vgl. Abbildung 07).

Die Analysen der österreichischen Waldinventurdaten stehen im Einklang mit früheren Untersuchungen, die zeigen, dass die Windgefährdung mit zunehmender Bestandeshöhe steigt (Schmidt et al., 2010; Albrecht et al., 2012). Im neu entwickelten Modell (Ledermann, 2017) kann eine solche kritische Bestandeshöhe mit 25–30 m angegeben werden. Der signifikante Zusammenhang zwischen Windgeschwindigkeit und Zufallsnutzung belegt, dass es zu einem

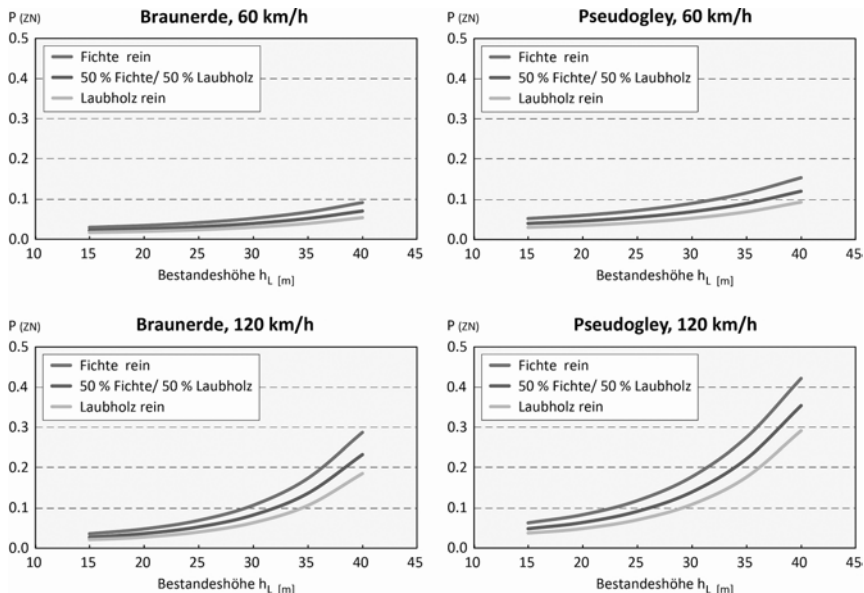


Abbildung 07: Wahrscheinlichkeit einer Zufallsnutzung (P_{ZN}) in Abhängigkeit von der Bestandesmittelhöhe, Windgeschwindigkeit, Boden- und Bestandestyp.

Figure 07: Probability of harvest by nature (P_{ZN}) depending on stand height, wind speed, soil and forest type.

Quelle: Ledermann, 2017

Zusammentreffen von hohen Windgeschwindigkeiten und großen Bestandeshöhen kommen muss, damit es im Wald zu Schäden bzw. Zufallsnutzungen kommt.

Fazit: Schutzwald, Wind und andere Extremereignisse

Bestände im Jungwuchs- und Dickungsalter werden selbst bei schweren Stürmen kaum geschädigt, Baum- und Althölzer mit einer entsprechenden Höhe unterliegen jedoch einem sehr hohen Risiko. Sturmereignisse stehen aber auch mit anderen Extremereignissen in enger Wechselwirkung. Kommt es zum Beispiel nach einem Sturmereignis zu Trockenphasen und hohen Temperaturen, so folgt aufgrund des erhöhten Angebots an bruttauglichem Material und idealen Witterungsbedingungen oftmals eine Borkenkäfergradation. Darüber hinaus ist nach einem Sturmereignis vielfach das Wurzelsystem der Bäume gelockert, sodass die Wasseraufnahme aus dem Boden beeinträchtigt ist. Daher sind bei der Bestandesbehandlung nicht allein die direkten, sondern auch die indirekten Auswirkungen von Sturmereignissen zu berücksichtigen.

25.4.5 Schutzwald und Lawinen

Der Wald wirkt gegen Lawinen in zweierlei Weise:

- 1) er verhindert den Anbruch von Lawinen, und
- 2) er kann – in beschränktem Ausmaß – den Lawinenprozess selbst bremsen oder stoppen.

25.4.5.1 Wirkung des Waldes gegen Lawinenanbrüche

Mehrere Faktoren fördern das Entstehen von Lawinenanbrüchen: Geländeform, meteorologische Bedingungen, Schneedeckenverhältnisse, natürliche oder künstliche Zusatzbelastungen der Schneedecke, Bodenoberfläche, Wassergehalt an der Bodenoberfläche, Bodenvegetation und -rauigkeit, Waldstruktur oder Baumartenzusammensetzung. Um die Neigung zu großen (»extremen«) Lawinenanbrüchen und die mögliche Schutzwirkung des Waldes beurteilen zu können, müssen drei unterschiedliche Anbruchmechanismen unterschieden werden (vgl. Tabelle 02).

Tabelle 02: Überblick über Lawinenanbruchmechanismen und die entsprechende Schutzwirkung des Waldes.

Table 02: Overview of avalanche release types and associated protective effects of forests.

Anbruchtyp	Beschreibung	Wirkung des Waldes
Schneebrettlawine	Spontaner Bruch mit hoher Bruchgeschwindigkeit; typischerweise ist eine homogene, flächenhafte Schwachschicht in der Schneedecke vorhanden. <i>Typische Anbruchform von Großlawinen</i>	Primäre Wirkung: durch Schneeeinterzeption und die Störung des Windfeldes ist die Schneedeckenmächtigkeit und, zusätzlich durch ungleichmäßige Beschattung der Schneedecke und herabfallendes Material, die Bildung von einheitlichen Schwachschichten verringert. Sekundär stützen Baumstämme und Totholz die Schneedecke.
Gleitschneelawine	Geringe Bruchgeschwindigkeit; die Bruch- bzw. Gleitfläche befindet sich typischer zwischen Schneedecke und Boden. Voraussetzung ist ein hoher Wassergehalt an einer glatten Bodenoberfläche. <i>Bildet selten große Ereignisse</i>	Primäre Wirkung: bei ausreichender Stammzahl wird die Schneedecke in ihrer Gleitbewegung behindert. Bereits bei einer Lückenbreite von 4–5 m tritt aber – bei glatter Oberfläche – eine Gleitbewegung auf.

((Fortsetzung))

Anbruchtyp	Beschreibung	Wirkung des Waldes
Lockerschneelawine	Verlust der Schneefestigkeit an der Schneedeckenoberfläche durch Erwärmung oder durch herabfallendes Material; Voraussetzung ist steiles Gelände (Hangneigung > 45°). <i>Bildet selten große Ereignisse</i>	Primäre Wirkung: Durch die Beschattung der Bäume ist die direkte Einstrahlung geringer; allerdings lösen aus den Baumkronen herabfallende Schneeklumpen leicht Lockerschneelawinen aus.

Natürliche Lawinenauslösungen und vor allem große Schadlawinen sind auf außergewöhnliche Wetterverhältnisse mit starken oder langanhaltenden Schneefällen (3-Tages-Neuschneesummen von mindestens 30 bis 50 cm), Schneeverfrachtungen, großen Temperaturänderungen oder Regen zurückzuführen, die im breiten Rahmen der klimatischen Verhältnisse in den Alpen in gewissen Abständen immer wieder auftreten können (Perzl und Walter, 2012; Teich et al., 2012a). Extreme Ereignisse, die Lawinen im bewaldeten Gelände auslösen, sind (1) starke Neuschneefälle bei niedrigen Temperaturen und hoher Schneedecke in Verbindung mit geringer Sonneneinstrahlung (Schneebrettlawinen), (2) plötzliche starke Erwärmung meist in Verbindung mit starker Strahlung (Lockerschneelawinen), oder (3) Durchfeuchtung der Schneedecke durch Regen oft in Verbindung mit Erwärmung, meist nach Phasen größerer Schneefälle bzw. in Wintern mit überdurchschnittlicher Schneehöhe (Gleitschneelawinen) (Konetschny, 1990; Meyer-Grass und Schneebeil, 1992; EISLF, 2000; Teich et al., 2012a). Die erforderliche 3-Tages-Neuschneehöhe für Lawinenanbrüche im Wald durch Neuschneefälle liegt bei ca. 50 cm, sofern die Gesamtschneehöhe etwa 100 bis 150 cm erreicht. Auslösungen von Nassschneerutschen im Wald durch Erwärmung und/oder Regen sind schon bei Schneehöhen von 30 cm möglich (diese sind aber selten Katastrophenereignisse); bei am BFW dokumentierten Schadensereignissen lagen die Schneehöhen der Freiland-Referenzstationen auch bei den Nass- und Gleitschneelawinen über 100 cm.

Größere Lawinenanbrüche entstehen in bewaldetem Gelände nur auf Freiflächen, also in größeren Lücken und Blößen (Lückenbreite > 10–20 m), in räumig-aufgelösten Nadelholzbeständen (Überschirmungsgrad < 30–60 %, je nach Lärchenanteil und Hangneigung), auf Strauchflächen und bei niedrigem Jungwald (< 2 m), sowie – auch bei geschlossenem Kronendach – in stammzahlarmen Laubwaldbeständen (z. B. Saeki und Matsuoka, 1970; Imbeck, 1984; Gubler und Rychetnik, 1991; Meyer-Grass und Schneebeil, 1992; McClung, 2001; Schneebeil und Bebi, 2004; Bebi et al., 2009; Viglietti et al., 2010).

Da Wald in den höheren, schneereichen und steilen Lagen der Alpen auf großer Fläche aus geschlossenen Beständen mit hohen Anteilen an wintergrünen Nadelhölzern besteht, brechen im bewaldeten Gelände auch bei extremen Schneedecken- und Wetterverhältnissen (z. B. Winter 1988, 1999) Schneebrettlawinen im Wald im Verhältnis zu anderen Landnutzungsformen und Vegetationseinheiten nur relativ selten an. Häufiger auftretende kleinere Locker- bzw. Gletschneelawinen werden oft von der Bestockung abgefangen, ohne dass die Infrastruktur im Talraum erreicht wird. Auch auf Blößen (durch Holzschlag) und auf Flächen mit liegendem Totholz (durch Waldschadensereignisse) vermindert die hohe Bodenrauigkeit Lawinenanbrüche (Schönenberger et al., 2002). Dieser Umstand sowie die Verdichtung des Waldes in Steillagen (Bebi et al., 2009, 2016), und technische Verbauung und Aufforstung vieler potentieller Anbruchgebiete in den letzten Jahrzehnten (Teich et al., 2012a), verringern das Lawinenanbruchpotenzial an steilen Waldhängen ($> 35^\circ$). Bis Ende der 1980er Jahre wurden Waldlawinenanbrüche mit Schäden im Siedlungsraum und an der Infrastruktur regelmäßig beobachtet, von da an werden sie seltener, obwohl das Bekanntwerden von Schadensereignissen durch damals noch nicht verfügbare Informationstechnologien (Internet, Mobiltelefone, soziale Netzwerke) heute wahrscheinlicher geworden ist. Häufig kam es zur Verschüttung von Straßen und Eisenbahnen durch Lawinenanbrüche in Laubwaldbeständen; die meisten dieser Streckenabschnitte sind heute durch Schutzbauten gesichert oder werden bei Gefahr gesperrt.

Im Gegensatz zum Nadelwald, können Lawinen in laubholzreichen Wäldern auch bei geschlossenem Kronendach anbrechen, vor allem, wenn es sich um sehr steile Flächen mit geringer Bodenrauigkeit handelt. Im Laubwald sind die primären Schutzwirkungsmechanismen des Waldes (die Verringerung der Schneehöhe und die flächige Ausbildung von Schwachschichten in der Schneedecke) durch geringere Kroneninterzeption, Kronenabtrauf und Dämpfung des Temperaturgradienten wesentlich geringer als im Nadelwald, und es entstehen oft bindungslose Schneedecken durch Regen und Erwärmung (Kohnetschny, 1990). Die Stützwirkung von Stämmen und Bodenrauigkeitselementen ist entscheidend, aber bei nasser Schneedecke ebenfalls reduziert. Laubholzbestände können auch bei geschlossenem Kronendach eine geringe Stammzahl haben, sodass keine ausreichende Stützung der Schneedecke und Abbremsung der Lawine erfolgt. Angaben über erforderliche Baumzahlen für eine ausreichende Abstützung der Schneedecke schwanken sehr stark und können nicht als zuverlässig angesehen werden (Perzl et al., 2012; Höller, 2017). Hinzu kommt, dass die Dichte – vor allem die Stammzahl – von Waldbeständen im Gebirgswald kleinräumig sehr stark variiert und nur schwer mit ausreichender Genauigkeit erfassbar ist. Auch die Empfehlungen zu kritischen Größen von Lücken bzw.

Blößen in Waldbau-Richtlinien sind nur in Bezug auf hohe Oberflächenrauigkeiten und trockene Schneesverhältnisse gültig (Feistl et al., 2014a).

Fazit: Schutzwald und extreme Lawinenauslösungen

Die Erfahrung hat zeigt, dass geschlossener Nadelwald (Überschirmung ≥ 50 bis 60 %, je nach Lärchenanteil und Hangneigung), stammzahlreichere Laub- und Mischwaldbestände sowie Blößen mit hoher Bodenrauigkeit (Baumstümpfe, Wurzelteller, liegendes Totholz Jungwuchs höher > 2 m) auch bei extremen Bedingungen vor großen Lawinenanbrüchen schützen können. Allerdings gibt es derzeit keine gesicherten wissenschaftlichen Erkenntnisse über den Zusammenhang von Lawinenanbruchmechanismen, Waldstrukturtypen und der Charakteristik bzw. Intensität der auslösenden meteorologischen Vorbedingungen und Extremereignissen.

25.4.5.2 Wirkung des Waldes in der Lawinensturzbahn

Für die Beurteilung der Schutzwirkung des Waldes in der Sturzbahn vor allem extremer Lawinenereignisse müssen unterschiedliche Lawinentypen (mit unterschiedlichen Strömungsverhalten) und unterschiedliche Waldstrukturen berücksichtigt werden.

Lawinen können Wälder durchschneiden und hinterlassen oft Schneisen mit gebrochenen Ästen und Baumstämmen (Quervain, 1978; Bartelt und Stöckli, 2001). Die Waldzerstörung liefert nicht nur wichtige Informationen zur Lawinenfrequenz, sondern auch zur räumlichen Ausdehnung des Lawinenaufpralldrucks (z. B. Bartelt et al., 2018; Casteller et al., 2018). Wichtig ist die Fähigkeit von Gebirgswäldern, Lawinen abzubremsen und sogar zu stoppen (Takeuchi et al., 2011, 2018; Teich et al., 2012b). Das Fließverhalten kann sich aber während des Durchströmens und durch das Brechen der Bäume maßgeblich ändern, wobei die Einwirkungen mit dem Strömungsregime zusammenhängen (Faug et al., 2010; Sovilla et al., 2014; Feistl et al., 2015; Vera et al., 2015): Sowohl Staub- und Mischlawinen als auch klassische Fließ- und Nassschneelawinen können zu einer weitgehenden Waldzerstörung in der Sturzbahn führen (Feistl et al., 2014b, 2015).

Die Schutzkapazität von Wäldern hängt von der Fähigkeit der Bäume und Baumgruppen ab, die Lawinenbelastung zu überstehen und gleichzeitig die Geschwindigkeit zu reduzieren. Wälder können kleine, häufige Lawinen aufhalten, weil die Bäume nicht zerstört werden (Teich et al., 2012b). Kleine Lawinen können keinen erheblichen Aufpralldruck erzeugen, um Bäume zu fällen und auszureißen. In diesem Fall dienen Bäume als starre Hindernisse, welche die Lawine verlangsamen. Die Schneemasse wird hinter dichten Baumgruppen gestoppt und aus der Lawine »entfernt« (engl. detrainment; Feistl et al., 2014b),

und die Lawine verhungert. Die Schutzkapazität des Waldes hängt dabei von Strukturparametern wie Stammzahl, BHD, Grundfläche und Bestandeshöhe ab (Teich et al., 2012b, 2014).

Kleinere Lawinen mit geringeren Geschwindigkeiten und geringerer Masse können daher von einem Waldbestand aufgehalten werden. Als Grenzwert kann eine Geschwindigkeit von < 20 m/s, (Feistl et al., 2014b, 2015) und eine Lawinenmasse von < 30.000 m³ (Bartelt und Stöckli, 2001) für immergrüne, fichtendominierte Bestände angenommen werden. Für Lärche kann als Geschwindigkeitsgrenzwert < 30 m/s dienen.

Wenn Geschwindigkeit und/oder Masse so groß werden, dass Bäume brechen, dann können diese nicht mehr als starre Hindernisse dienen und andere physikalische Prozesse, wie das Mitführen von Holzmaterial und Wurzelplatten, verlangsamen die Lawine (Bartelt und Stöckli, 2001). Großlawinen mit einer Geschwindigkeit > 40 m/s können vom Wald – unabhängig von der Bestandesstruktur – nicht mehr aufgehalten werden und werden bestenfalls gebremst (Takeuchi et al., 2018). Durch das mitgeführte Material (ganze Bäume) ist die zerstörerische Wirkung (z. B. auf Gebäude) tlw. sogar größer.

Fazit: Schutzwald und extreme Lawinenereignisse

Die zahlreichen Lawinenextremereignisse in Österreich in den Lawinenwintern 1951, 1988 oder 1999 haben klar gezeigt, dass der Wald bei großen Lawinenereignissen eine sehr geringe Wirkung besitzt. Die Lawinen haben auf mehreren 100 Metern den Wald überstrichen und das Holz mitgenommen. Derartige Großereignisse besitzen in der Sturzbahn Geschwindigkeiten von über 40 m/s und übersteigen die Schutzkapazität des Waldes deutlich. Lediglich im Auslaufbereich – bei bereits reduzierter Geschwindigkeit – können vereinzelt Lärchenbestände mit geeignetem BHD-Wert den verbleibenden Lawinenkräften widerstehen, jedoch ohne signifikante Schutzwirkung.

25.5 Herausforderungen und Handlungsoptionen für die Zukunft

25.5.1 Klimawandel und Waldentwicklung: Extrema in der Waldverbreitung und Auswirkung auf den derzeitigen Schutzwald

Der gegenwärtig gemessene und künftig prognostizierte Klimatrend deutet darauf hin, dass sich die klimatischen Bedingungen vor allem für das Baumwachstum in den Hochlagen ändern. Bis zum Jahr 2100 wird für Österreich eine Zunahme um 3–3,5 °C erwartet (Böhm, 2008, 2010).

Bezüglich der Auswirkungen des Klimawandels auf das Baumwachstum an der Waldgrenze gibt es unterschiedliche Interpretationen. Die bisher festge-

stellten Anstiege der Waldgrenze in den Alpen sind (möglicherweise nutzungsbedingt) relativ gering (Zimmermann et al., 2006). Es ist kein »Losgrippieren« der Arten nach oben zu erwarten. Änderungen in der Zusammensetzung der Pflanzengemeinschaften erfolgen mit deutlicher Verzögerung auf Klimaänderungen (Alexander et al., 2018). Nach Wieser et al. (2016) profitieren die Baumarten an der Waldgrenze (Fichte, Zirbe, Lärche) von Erwärmung und CO₂-Düngung und reagieren mit einer Steigerung des Zuwachses. Folglich ist an der Waldgrenze keine klimawandelbedingte Änderung der Baumarten-Zusammensetzung zu erwarten. Allerdings können günstige Wachstumsbedingungen von mehreren Jahrzehnten durch wenige schlechte Jahre egalisiert werden, d. h. Pflanzen, die sich »weiter nach oben vorgewagt« haben, könnten binnen kurzer Zeit ausfallen.

In den tieferen Lagen der nördlichen Kalkalpen zeigen Buche und Tanne positive Reaktionen selbst in Trockenjahren. Ebenso hat Kiefer eine sehr hohe Trockenheitstoleranz, wohingegen Fichte als die Baumart mit der höchsten Trockenheitsempfindlichkeit identifiziert wurde (Hartl-Meier et al., 2014). Die Tanne hätte daher höheres Potenzial im Schutzwald unter der Voraussetzung einer »waldgerechten« Jagd (Fürst et al., 2017). Denn in hohem Maße problematisch für die Waldentwicklung in Österreich ist der seit Jahrzehnten überhöhte Wildbestand, der beträchtliche Konsequenzen für die weitere Bestandesentwicklungen, deren Stabilität und Resilienz in Zeiten des Klimawandels hat.

Auf flachgründigeren (Karbonat-) Standorten ist Wasserstress in Trockenperioden zu erwarten, insbesondere für Fichte und Lärche. Die Lärche verringert ihren Wasserverbrauch bei Trockenheit nicht und schränkt die Verdunstung über die Spaltöffnungen auch bei vermindertem Wasserangebot längere Zeit nicht ein (Leo et al., 2013; Schuster et al., 2016). In solchen trockenheitslimitierten Schutzwäldern sind besonders für die zweite Hälfte des 21. Jhs. höhere Mortalitätsraten bei Bäumen zu erwarten.

Sowohl in den Hochlagen als auch in den tiefer gelegenen Bergwaldzonen ist die Resilienz der natürlichen Waldgesellschaften gegenüber Wetterextremen (Dürre, Wind, Niederschlag) grundsätzlich ausreichend und nur auf wenigen Standorten, die z. B. bereits jetzt zu Trockenheit neigen, kritisch.

25.5.2 Mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen für das Schutzwald-Management

Die Daten der Österreichischen Waldinventur zeigen, dass nur die Hälfte der ausgewiesenen Schutzwälder in Österreich einen annähernd naturnahen Zustand aufweisen (BMLFUW, 2015). Die Gründe dafür sind vielfältig: unange-

passtes Waldmanagement, signifikante Überalterung (Niese, 2011), fehlende Verjüngung und negative Effekte durch Waldweide oder jahrzehntelang überhöhte Wildstände.

Der Klimawandel wirkt in unterschiedlicher Weise negativ auf das Ökosystem Wald ein: trotz eines durchweg besseren Baumwachstums aufgrund höherer Temperaturen und einer längeren Vegetationsperiode, können längere Trockenperioden zu erhöhten Stresssituationen und damit zu einer erhöhten Anfälligkeit gegenüber Schädlingen und geringerer Resilienz nach Schadereignissen führen. Die unterschiedliche Toleranz der verschiedenen Baumarten gegenüber Stresssituationen führt zu neuen Konkurrenzverhältnissen und zu Veränderungen der Artenzusammensetzung. Die erwartete Zunahme intensiver Niederschläge führen zu einer Erhöhung der Erosions- und Rutschungsaktivität und generell verstärkter Denudation des Bodens.

Die bisherigen klimatischen Entwicklungen lassen vermuten, dass die Änderungen – zumindest in besonders sensiblen Wäldern – nicht kontinuierlich verlaufen wird. Extreme Bestandesentwicklungen und flächiger Waldverlust müssen für besonders sensible Regionen angenommen werden mit möglicherweise gravierenden und weitreichenden Folgen.

Großflächigen Störungen und der mögliche flächige Verlust des Bergwaldes reduzieren dessen Fähigkeit die Folgen von Extremereignissen abzumildern und zu einer intensiven Zunahme der indirekten Auswirkungen des Klimawandels: geringe Schutzwirkungen gegen Steinschlag, Lawinen (verstärkt auch Nassschneelawinen), Erosionsprozesse und eine Verringerung der Interzeption und Transpiration als wichtige Elemente des Hochwasserschutzes.

Der lokal bereits heute kritische Zustand der Schutzwälder und die erwarteten Veränderungen stellen dessen Bewirtschaftung vor zahlreiche Herausforderungen:

- Notwendigkeit einer deutlichen Erhöhung des Anteils an standortsangepassten und klimawandeltoleranten Baumarten (z. B. tiefwurzelnde Baumarten wie Tanne),
- Kürzere Umtriebszeiten (um eine höhere Vitalität und Sturmresistenz zu erreichen),
- Aufbau mehrschichtiger Bestände (um Bodenbeschattung und Interzeption zu erhalten, die Bestandesstabilität zu erhöhen und Ausfälle einzelner Bestandesglieder leichter kompensieren zu können).

Ziel muss eine Erhöhung der Resilienz der Schutzwälder durch Anpassung der waldbaulichen Strategien zur Optimierung der Schutzwirkung sein. Dabei gilt es neben den steigenden Anforderungen an die Schutzwirkung auch weitere gesellschaftliche Ansprüche (direkte und indirekte Schutzwirkung, Wohlfahrt und

Erholung) im Nahbereich der Ballungsregionen und in den peripheren Tourismuszentren zu berücksichtigen.

25.5.3 Anpassung von Rahmenbedingungen

Die Sicherung des Lebensraumes vor Naturgefahren erforderte schon unter den Rahmenbedingungen der jüngeren Vergangenheit beträchtliche öffentliche Aufwendungen. In Österreich wurden von der WLW in den letzten 18 Jahren durchschnittlich 126 Mill. Euro/Jahr für den Schutz vor Naturgefahren aufgebracht (Sinabell et al., 2016). Ein anschauliches österreichisches Beispiel ist Hallstatt, wo seit 1945 Kosten von 72 Mio. Euro (ca. 1 Mio. Euro/Jahr (Schiffer, 2018) in technische und schutzwaldbauliche Maßnahmen investiert wurden.

Die von der Gesellschaft verstärkt aktiv eingeforderten Erwartungen an den Wald (Schutz vor Naturgefahren, Erholungsfunktion, Freizeit wie Tourismus und Sport, Wohlfahrtfunktion, Kohlenstoffbindung etc.), die zunehmenden Belastungen durch den Klimawandel, sowie Auswirkungen von Landnutzungsänderungen (z. B. vermehrte N-Einträge, vermehrter Anfall von Oberflächenwässern u. a.), machen es für den Waldbesitzer zunehmend schwieriger, eine ökologisch-ökonomische Balance im Sinne einer nachhaltigen Forstwirtschaft zu finden. Die gesetzlichen Rahmenbedingungen müssen diese Problematik in Zukunft stärker berücksichtigen. Zudem sollte sich die Umsetzung von Maßnahmen und Behandlungsvorschlägen stärker an Governanceprinzipien (Regelung von Beteiligungen und Verantwortung) und partizipativen Prozessen orientieren. Konfliktsituationen müssen aktiv vermieden werden, um die Handlungsfähigkeit zur Vermeidung von Extrem- bzw. Katastrophenszenarien zu erhalten oder zu verbessern.

25.5.4 Verbesserung von Grundlagen und Methoden für ein ökosystembasiertes Risikomanagement

In etablierten Instrumenten der forstlichen Raumplanung (Waldentwicklungsplan) wurden Schutzwälder bezogen auf statische Umweltbedingungen gutachtlich beschrieben. Der Wald mit seiner Schutzfunktion und Schutzwirkung wurde jedoch nur im Problem- oder Anlassfall berücksichtigt und nicht als systematischer Teil des Risikomanagements integriert (Kleemayr, 2017).

Naturgefahrenprozesse werden unter anderem durch die Ausprägung der Landschaft bedingt. Die einem Landschaftselement und dem darauf stehenden Wald zukommende Schutzfunktion ist unter anderem abhängig von topographischen Attributen und relevantem Schadenspotential. Diesem landschafts-

bezogenen Konzept entsprechend wurden Waldflächen mit Objektschutzfunktion gegen Lawinen, Steinschlag und Lockergesteinsrutschungen mit einem einfachen statistisch-topographischen Auslaufmodell flächendeckend für Österreich auf Maßstabsebene einer Gefahrenhinweiskarte modelliert (Perzl und Huber, 2014). Vorliegende Ergebnisse dieser Objektschutzwaldmodellierung sind ein erster Schritt zu einer einheitlichen Integration des Waldes in das österreichische Schutzsystem (Kleemayr, 2017). Im Hinblick auf steigende Risiken und Extremereignisse liefern diese räumlich expliziten Simulationen Grundlagen für eine effektivere, risikoorientierte Landnutzungsplanung und unterstützen damit die Priorisierung von Schutzmaßnahmen, die Allokation von Aufforstungen (im Besonderen Hochlagenaufforstungen) und Schwerpunktsetzungen in der Schutzwaldbewirtschaftung. Möglichen Schadenssituationen durch Naturgefahren bei negativen Bestandesentwicklungen kann durch diese diagnostischen Werkzeuge vorgebeugt und der Einfluss des Klimawandels auf die Gesellschaft reduziert werden.

25.5.5 Notwendige Optimierung des forstlichen Managements

Gegenwärtiges Schutzwaldmanagement basiert noch auf statischen ökologischen Einheiten bzw. Potentialen und Referenzen (sozio-ökologische Typisierungen, potentielle natürliche Waldgesellschaft). Eine aktive Adaptation an den Klimawandel und damit verknüpfte Extreme im Schutzwaldmanagement erfordert darüber hinaus eine dynamische Beurteilung der Vulnerabilität des Schutzwaldes gegenüber Störungen (Füssel, 2006).

Derartige Vulnerabilitätskonzepte berücksichtigen die jeweiligen Schutzwaldökosysteme und die darauf aufbauenden Mensch-Umwelt-Systeme. Der Klimawandel und die Klimavariabilität wirken auf das Ökosystem ein, das je nach Exponiertheit und Sensitivität Reaktionen zeigt. Im Vulnerabilitätskonzept wird zwischen Systemzuständen (z. B. Exponiertheit, Auswirkung auf das Ökosystem) und den Steuerungsgrößen (z. B. Sensitivität, Anpassungsfähigkeit) unterschieden (vgl. Abbildung 08). Teile dieses Beziehungsgefüges können durch ökologische Modellbildungen abgedeckt werden, z. B. die Nutzung von biogeographischen Baumartennischenmodellen, die eine klimabedingte Arealverschiebung für Baumarten auf prozessrelevanten Flächen ermöglichen.

Des Weiteren kann das dynamische Verhalten von Ökosystemen unter geänderten Umweltbedingungen durch empirische und prozessbasierte Modelle simuliert (Pretzsch et al., 2008) und auf projizierte zukünftige Klimaverhältnisse im Alpenraum angewendet werden (Elkin, 2013; Kindermann, 2013; Bircher, 2015). Das Adaptionskonzept berücksichtigt neben den klimatischen Regel-

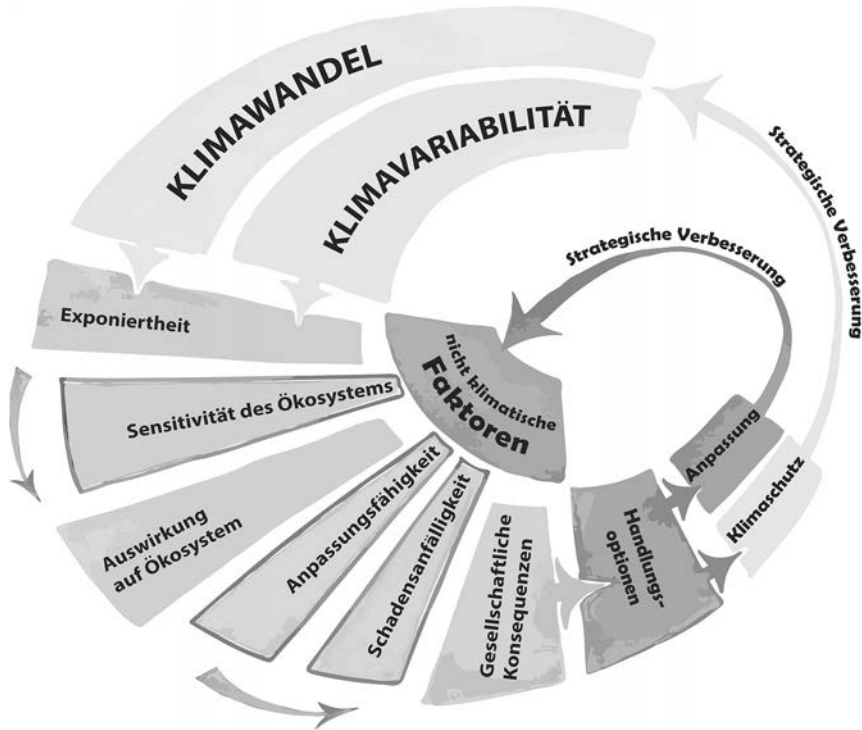


Abbildung 08: Konzeptioneller Rahmen für eine dynamische Anpassung und Vulnerabilitätsbeurteilung.

Figure 08: Conceptual frame for a dynamic vulnerability assessment.

Quelle: Kleemayr et al.

kreislaufen auch die anthropogenen, nicht-klimatischen Einflüsse und ermöglicht damit auch ein zeitnahes Reagieren.

Eine Stärkung der Anpassungsfähigkeit und Resilienz kann und muss durch einen geeigneten Adaptionsplan sofort begonnen werden, um negative Entwicklungen, die zu Extrema bezüglich Wald und Risiko führen, zu vermeiden.

Neben der Modellierung als Basis für ein besseres Prozessverständnis und der Abschätzung von Auswirkungen der jeweiligen waldbaulichen Maßnahmen auf den Schutzwald und dessen Wirkungen, ist ein effizienteres und umfassenderes Monitoring des aktuellen Schutzwaldzustandes dringend geboten. Insbesondere die Identifizierung von kleinräumigen Kalamitäten und das Einleiten von zeitgerechten phytosanitären Maßnahmen auf schwer zugänglichen Standorten, um großräumige Gefährdungen der Schutzwälder zu verhindern, verlangt automatisierte Methoden der Fernerkundung (mittels Satelliten und Drohnen). Zudem sind geeignete Informationskanäle zwischen den zu schaffenden Mo-

nitoringsystemen und den lokal agierenden Waldbewirtschaftern zu etablieren, die eine schnelle Aufarbeitung von Schadholz ermöglichen.

Fazit

Das System des Naturgefahrenmanagements kommt – gerade im Hinblick auf Extremereignisse – von mehreren Seiten in Bedrängnis: einerseits ist aufgrund der sich ändernden meteorologischen Extremereignisse mit neuen Szenarien und Ausprägungen von Naturgefahrenprozessen zu rechnen. Andererseits bewirken geänderte Umweltbedingungen auch Änderungen der Eigenschaften der Ökosysteme an sich sowie deren lebenswichtiger Leistungen für die Gesellschaft. Österreich ist mit seinem hohem Bergland- und Schutzwaldanteil davon besonders betroffen.

Aufbauend auf der bestehenden Palette integraler Schutzmaßnahmen und deren Anwendung sollte das Naturgefahrenmanagement in Zukunft verstärkt vom Gefahrenmanagement zum ökosystembasierten Risikomanagement weiterentwickelt werden.

Denkbare Handlungsoptionen für den Einsatz des speziellen Instrumentes Schutzwald im Naturgefahrenmanagement, sind: 1) konservativ handeln (agieren wie bisher), 2) passiv (agieren, wenn etwas passiert) oder 3) aktiv handeln (trendbewusste Arbeit an klimafitem Schutzwald). Angesichts wissenschaftlich gut begründeter Entwicklungstrends erscheint trotz verbleibender Unsicherheiten ein aktives adaptives Schutzwaldmanagement zur Erhaltung von Schutzleistung und Reduktion von Klimawandel-Vulnerabilität und Risiko – besonders zur Verhinderung von extremen Schadereignissen – die beste Wahl zu sein.

Literatur

- Abernethy, B., Rutherford, I.D., 1998. Where along a river's length will vegetation most effectively stabilize stream banks. *Geomorphology*, 23, S. 55–57.
- Albrecht, A., Hanewinkel, M., Bauhus, J., Kohnle, U., 2012. How does silviculture affect storm damage in forests of south western Germany? Results from empirical modeling based on long-term observations. *European Journal of Forest Research*, 131, S. 229–247.
- Alexander J.M, Chalmandrier, L., Lenoir, J., Burgess, T.I., Essl, F., Haider, S., Kueffer, C., McDougall, K., Milbau, A., Nunez, M.A., Pauchard, A., Rabitsch, W., Rew, L.J., Sanders, N.J., Pellissier, L., 2018. Lags in the response of mountain plant communities to climate change. *Global Change Biology*, 24, S. 563–579. DOI: 10.1111/gcb.13976.
- Aulitzky, H., 1958. Hinweise für eine naturnahe Waldwirtschaft im Bereich der Waldgrenze. Sonderdruck aus »Allgemeine Forstzeitung«, 1(2).

- Baier, P., Pennerstorfer, J., Schopf, A., 2007. PHENIPS – A comprehensive phenology model of *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytinae) as a tool for hazard rating of bark beetle infestation. *Forest Ecology and Management*, 249, S. 171–186.
- Baltensweiler, W., 1993. Why the larch bud-moth cycle collapsed in the subalpine larch-cembra pine forests in the year 1990 for the first time since 1850. *Oecologia*, 94, S. 62–66.
- Bartelt, P., Bebi, P., Feistl, T., Buser, O., Caviezel, A., 2018. Dynamic magnification factors for tree blow-down by powder snow avalanche air blasts. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(3), S. 759–764.
- Bartelt, P., Stöckli, V., 2001. The influence of tree and branch fracture, overturning and debris entrainment on snow avalanche flow. *Annals of Glaciology*, 32, S. 209–216.
- Bebi, P., Bugmann, H., Lüscher, P., Lange, B., Brang, P., 2016. Auswirkungen des Klimawandels auf Schutzwald und Naturgefahren. In: A.R. Pluess, S. Augustin, P. Brang, Bundesamt für Umwelt BAFU, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft (Hrsg.), *Wald im Klimawandel. Grundlagen für Adaptationsstrategien*. Haupt, Bern, S. 269–285.
- Bebi, P., Kulakowski, D., Rixen, C., 2009. Snow avalanche disturbances in forest ecosystems – State of research and implications for management. *Forest Ecology and Management*, 257, S. 1883–1892.
- Berger, F., Quetel, C., Dorren, L.K., 2002. Forest: a natural protection mean against rockfalls, but with which efficiency. *International congress Interpraevent*, 2, S. 815–826.
- Bertrand, D., Bourrier, F., Olmedo, I., Brun, M., Berger, F., Limam, A., 2013. Experimental and numerical dynamic analysis of a live tree stem impacted by a Charpy pendulum. *International Journal of Solids and Structures*, 50(10), S. 1689–1698.
- BFW, o. J. Dokumentation der Waldschädigungsfaktoren. Schadholzmengen durch Sturm, Schnee und Borkenkäferbefall. https://bfw.ac.at/cms_stamm/050/PDF/schadholz_SturmSchnee_bis2017_oe.pdf [20.03.2019].
- Binder, F., Macher, C., Klöcking, B., 2006. Integrale Planung von Erstaufforstungen am Beispiel der Paar in der Gemeinde Geltendorf. *LWF-Wissen*, 55, S. 73–82.
- Bircher, N., Cailleret, M., Huber, M., Bugmann, H., 2015. Empfindlichkeit typischer Schweizer Waldbestände auf den Klimawandel. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 166(6), S. 408–419.
- BMLFUW (Hrsg.), 2015. Nachhaltige Waldwirtschaft in Österreich. *Österreichischer Waldbericht 2015*. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 159 S.
- Bobek, H.P., Johann, E., 1994. Forstgesetze. In: *Österreichs Wald. Eigenverlag Autoren-gemeinschaft »Österreichs Wald«*, Wien, S. 190–200.
- Böhm, R., 2008. *Heiße Luft: Reizwort Klimawandel: Fakten – Ängste – Geschäfte*. Edition Va Bene, 262 S.
- Böhm, R., 2010. Harte und weiche Fakten zum Klimawandel – ein Überblick. In: *Lebensministerium (Hrsg.), Auswirkungen des Klimawandels auf die österreichische Wasserwirtschaft*. AV+Astoria Druckzentrum GmbH, Wien, S. 53–72.
- Bollinger, D., Bonnard, C., Keusen, H., 2008. Beurteilung der Wirkung von Schutzmassnahmen gegen Naturgefahren als Grundlage für ihre Berücksichtigung in der Raum-

- planung. Teil D: Rutschungen. Nationale Plattform Naturgefahren PLANAT und Schweizerische Eidgenossenschaft, 38 S.
- Bunza, G., Jürging, P., Löhmannsröben, R., Schauer, T., Ziegler, R., 1996. Abfluß- und Abtragsprozesse in Wildbacheinzugsgebieten – Grundlagen zum integralen Wildbachschutz. Schriftenreihe des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft, 27, S. 25–36.
- Casadei, M., Dietrich, W.E., Miller, N., 2003. Controls on shallow landslide size. *Debris-flow Hazards Mitigation: Mechanics, Prediction, and Assessment*, 1(2), S. 91–101.
- Casteller, A., Häfelfinger, T., Cortés Donoso, E., Podvin, K., Kulakowski, D., Bebi, P., 2018. Assessing the interaction between mountain forests and snow avalanches at Nevados de Chillán, Chile and its implications for ecosystem-based disaster risk reduction. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 18(4), S. 1173–1186.
- Cech, T.L., 2006. Eschenschäden in Österreich. *Forstschutz Aktuell*, 37, S. 18–20.
- Quervain, M. de, 1978. Wald und Lawinen. IUFRO Seminar Mountain Forests and Avalanches, Davos, Schweiz, S. 219–231.
- Donaubauer, E., 1980. Über Pilzkrankheiten in Hochlagenaufforstungen. *Mitteilungen der forstlichen Bundesversuchsanstalt*.
- Donaubauer, E., 1983. Forstschäden biotischen Ursprungs. *Allgemeines Forstgesetz*, 94, S. 199–201.
- Donaubauer, E., Stephan, R., 1988. Neuere Forschungen über das Scieroderris-Triebsterben der Koniferen. IUFRO Working Party, *Mitteilungen der Forstlichen Bundesversuchsanstalt*, Wien, S. 162–167.
- Dorren, L.K.A., Berger, F., 2006. Stem breakage of trees and energy dissipation during rockfall impacts. *Tree physiology*, 26(1), S. 63–71.
- Dorren, L.K.A., Berger, F., Putters, U.S., 2006. Real-size experiments and 3-D simulation of rockfall on forested and non-forested slopes. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 6(1), S. 145–153.
- Dorren, L.K.A., Moos, C., Stoffel, M., Trappmann, D. 2017. Wirkung des Waldes bei Steinschlag. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 180, S. 70–79.
- Dupire, S., Bourrier, F., Monnet, J.M., Bigot, S., Borgniet, L., Berger, F., Curt, T., 2016a. Novel quantitative indicators to characterize the protective effect of mountain forests against rockfall. *Ecological indicators*, 67, S. 98–107.
- Dupire, S., Bourrier, F., Monnet, J.M., Bigot, S., Borgniet, L., Berger, F., Curt, T., 2016b. The protective effect of forests against rockfalls across the French Alps: Influence of forest diversity. *Forest Ecology and Management*, 382, S. 269–279.
- Eckhart, G., Mayer, H., 1983. Waldbaukonzepte und waldbauliche Wirklichkeit im 19. und 20. Jahrhundert. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen*, 100(2/3), S. 98–120.
- EISLF (Hrsg.), 2000. *Der Lawinenwinter 1999. Ereignisanalyse*. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Davos.
- Elkin, C., Gutierrez, A., Leuzinger, S., Manusch, C., Temperli, C., Rasche, L., Bugmann, H., 2013. A 2 °C warmer world is not safe for ecosystem services in the European Alps. *Global Change Biology*, 19, S. 1827–1840.
- Engler, A., 1919. Untersuchungen über den Einfluss des Waldes auf den Stand der Gewässer. *Mitteilungen der Schweizerischen Zentralanstalt für das forstliche Versuchswesen*, Band 12.

- Faccoli, M., Colombari, F., Dal Pont, C., Finozzi, V., D'Ambros, E., Battisti, A., 2010. Gravi infestazioni di bostrico acuminato in formazioni alpine di pino silvestre. *Forest@ – Journal of Silviculture and Forest Ecology*, 7(6), S. 259.
- Faug, T., Chanut, B., Beguin, R., Naaim, M., Thibert, E., Baroudi, D., 2010. A simple analytical model for pressure on obstacles induced by snow avalanches. *Annals of Glaciology*, 51(54), S. 1–8.
- Feistl, T., Bebi, P., Christen, M., Margreth, S., Diefenbach, L., Bartelt, P., 2015. Forest damage and snow avalanche flow regime. *Natural Hazards and Earth System Science*, 15(6), S. 1275–1288.
- Feistl, T., Bebi, P., Dreier, L., Hanewinkel, M., Bartelt, P., 2014a. Quantification of basal friction for technical and silvicultural glide-snow avalanche mitigation measures. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(11), S. 2921.
- Feistl, T., Bebi, P., Teich, M., Bühler, Y., Christen, M., Thuro, K., Bartelt, P., 2014b. Observations and modeling of the braking effect of forests on small and medium avalanches. *Journal of Glaciology*, 60(219), S. 124–138.
- Frehner, M., Wasser, B., Schwitter, R., 2005. Nachhaltigkeit und Erfolgskontrolle im Schutzwald. Wegleitung für Pflegemassnahmen in Wäldern mit Schutzfunktion. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft, Bern.
- Fuhr, M., Bourrier, F., Cordonnier, T., 2015. Protection against rockfall along a maturity gradient in mountain forests. *Forest Ecology and Management*, 354, S. 224–231.
- Furbish, D.J., Rice, R.M., 1983. Predicting landslides related to clearcut logging, Northwest California, U.S.A. *Mountain Research and Development*, 3(3), S. 253–259.
- Fürst, W., Lipp, S., Jandl, R., Schüler, S., 2017. Schutzwald im Klimawandel: Auswirkungen, Maßnahmen und Forschungsbedarf. *Wildbach- und Lawinenverbau*, 180(81), S. 220–230.
- Füssel, H.M., Klein, R., 2006. Climate Change Vulnerability Assessments: An evolution of conceptual thinking. *Climatic Change*, 75, S. 301–329.
- Gerstel, W.J., Badger, T.C., 2002. Hydrologic controls and forest land management implications for deep-seated landslides; examples from the Lincoln Creek Formation, Washington. *Abstracts with Programs. Geological Society of America*, 34(5), S. 89.
- Giamboni, M., 2008. *SilvaProtect-CH – Phase I. Projektdokumentation*. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern.
- Glade, T., 2003. Landslide occurrence as a response to land use change: a review of evidence from New Zealand. *Catena*, 51, S. 297–314.
- Gsteiger, P., 1993. Steinschlagschutzwald. Ein Beitrag zur Abgrenzung, Beurteilung und Bewirtschaftung. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 144(2), S. 115–132.
- Gubler, H., Rychetnik, J., 1991. Effects of forests near the timberline on avalanche formation. *International Association of Hydrological Sciences*, 205, S. 19–38.
- Halmshlager, E., Kirisits, T., 2008. First report of the ash dieback pathogen *Chalara fraxinea* on *Fraxinus excelsior* in Austria. *Plant Pathology*, 57(6).
- Hartl-Meier, C., Dittmar, C., Zang, C., Rothe, A., 2014. Mountain forest growth response to climate change in the Northern Limestone Alps. *Trees*, 28(3), S. 819–829.
- Hegg, C., 2006. Waldwirkung auf Hochwasser. *LWF Wissen*, 55, S. 29–33.
- Hensler, W., 1972. Erfahrungen bei der Hochlagenaufforstung Haggen. *Mitteilungen der forstlichen Bundesversuchsanstalt, Wien*, 96, S. 209–219.

- Hoch, G., Cech, T.L., Perny, B., 2016. Die Profiteure vom Wald ohne Wasser: Warum Trockenheit Borkenkäfer, Triebsterbenspilze und andere Schadorganismen begünstigt. BFW-Praxisinformation, 40, S. 9–11.
- Höller, P., 2017. Die Bedeutung des Waldes beim Schutz vor Lawinen. Wildbach- und Lawinenverbau, S. 116–123.
- Huber, A., Kofler, A., Fischer, J.T., Kleemayr, K., 2017. DAKUMO Projektsbericht. Bundesforschungszentrum für Wald, Innsbruck.
- Hungr, O., Leroueil, S., Picarelli, L., 2014. The Varnes classification of landslide types, an update. *Landslides*, 11, S. 167–194. DOI: 10.1007/s10346-013-0436.
- Imbeck, H., 1984. Lawinenbildung im Wald und deren Wirkung im Raum Davos. Schlussbericht des Forschungsprojektes 307.80. Eidgenössisches Institut für Schnee- und Lawinenforschung, Weissfluhjoch-Davos.
- Jactel, H., Petit, J., Desprez-Loustau, M.-L., Delzon, S., Piou, D., Battisti, A., Koricheva, J., 2012. Drought effects on damage by forest insects and pathogens: a meta-analysis. *Global Change Biology*, 18, S. 267–276.
- Johnson, A.C., Swanston, D.N., McGee, K.A., 2000. Landslide initiation, runout, and deposition within clearcuts and old-growth forests of Alaska. *Journal of the American Water Resources Association*, 36(1), S. 17–30.
- Kautz, H., 1922. Schutzwald. Forst- und wasserwirtschaftliche Gedanken. Springer, Berlin, S. 65.
- Keim, R.F., Skaugset, A.E., 2003. Modelling effects of forest canopies on slope stability. *Hydrological Processes*, 17, S. 1457–1467.
- Keusen, H.R., Bollinger, D., Rovina, H., Wildberger, A., Wyss, R., 2004. Gefahreneinstufung Rutschungen i.w.S. – Permanente Rutschungen, spontane Rutschungen und Hangmuren. Arbeitsgruppe Geologie und Naturgefahren. Schweizerische Fachgruppe für Ingenieurgeologie, Bundesamt für Wasser und Geologie, Bern.
- Kindermann, G., 2013. Auswirkungen des Klimawandels auf die Wuchsleistung der Fichte in Österreich. Poster P29. 14. Österreichischer Klimatag, Climate Change Center Austria (CCCA).
- Kleemayr, K., 2017. Die Bedeutung der Objektschutzwaldmodellierung für die Raumplanung und forstliche Praxis. BFW Praxisinformation, 45, S. 3–7.
- Klein, T., 2015. Drought-induced tree mortality: from discrete observations to comprehensive research. *Tree Physiology*, 35, S. 225–228.
- Kohl, B., 2010. ZEMOKOST – Entwicklung eines praktikablen Niederschlag-/Abflussmodells zur Modellierung von Hochwasserabflüssen in Wildbacheinzugsgebieten unter Einbeziehung verbesserter Felddaten. Dissertation, Fakultät für Geo- und Atmosphärenwissenschaften, Institut für Geographie, Universität Innsbruck, Innsbruck.
- Kohl, B., Perzl, F., Markart, G., Klebinder, K., Pirkl, H., Riedl F., Stepanek, L., 2009. Hochwasser Paznaun 2005: Wald – Abfluss – Potentiale. Bericht der Wildbach- und Lawinenverbauung, Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Wien, 192 S.
- Kohl, B., Sauermoser, S., Frey, D., Stepanek, L., Markart, G., 2004. Steuerung des Abflusses in Wildbacheinzugsgebieten über flächenwirtschaftliche Maßnahmen. Internationales Symposium Interpraevent Riva/Trient, 1(3), S. 159–169.
- Kohl, B., Sotier, B., Klebinder, K., Jochem, A., Markart, G., 2008. Hydrologie Finsing – Szenarienanalyse. Bericht an den Forsttechnischen Dienst für Wildbach- und Lawinenverbauung, Sektion Tirol, 40 S.

- Konetschny, H., 1990. Schneebewegungen und Lawinentätigkeit in zerfallenden Bergwäldern. Informationsberichte, Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, 3.
- Lancaster, S., Hayes, S.K., Grant, G.E., 2003. Effects of wood on debris flow runout in small mountain watersheds. *Water Resources Research*, 39(6), S. 1168. DOI: 10.1029/2001WR001227.
- Ledermann, T., 2017. Ein Modell zur Abschätzung der Zufallsnutzungen in Österreich. In: Beiträge zur Jahrestagung 2017 in Untermarchtal/Baden-Württemberg. Deutscher Verband forstlicher Forschungsanstalten, Sektion Ertragskunde, Freiburg, S. 9–19.
- Leo, M., Oberhuber, W., Schuster, R., Grams, T.E.E., Matysek, R., Wieser, G., 2013. Evaluating the effect of plant water availability on inner alpine coniferous trees based on sap flow measurements. *European Journal of Forest Research*, 133(4), S. 691–698. DOI: 10.1007/s10342-013-0697-y.
- Markart, G., Kohl, B., Zanetti, P., 1996. Einfluss von Bewirtschaftung, Vegetation und Boden auf das Abflussverhalten von Wildbacheinzugsgebieten – Ergebnisse von Abflussmessungen in ausgewählten Teileinzugsgebieten des Finsingtales (Zillertal/Tirol). Symposium Interpraevent Garmisch-Partenkirchen, 1, S. 135–144.
- Markart, G., Kronfuß, H., Havranek, M., 2002. Die Hochlagenaufforstung von Haggen im Tiroler Sellraintal. In: E. Steinicke (Hrsg.), Geographischer Exkursionsführer Europaregion Tirol, Südtirol, Trentino. Band 2: Spezialexkursionen im Bundesland Tirol. Innsbrucker Geographische Studien 33/2, S. 195–207.
- Markart, G., Perzl, F., Kohl, B., Luzian, R., Kleemayr, K., Ess, B., Mayerl, J., 2007. 22. und 23. August 2005 – Analyse von Hochwasser- und Rutschungsereignissen in ausgewählten Gemeinden Vorarlbergs. BFW-Dokumentation 5, Wien.
- Markart, G., Sotier, B., Stepanek, L., Lechner, V., Kohl, B., 2017. Waldwirkung auf die Abflussbildung bei unterschiedlichen Betrachtungsmaßstäben. Wildbach- und Lawinenverbau, 180, S. 100–115.
- May, C.L., Gresswell, R.E., 2003. Processes and rates of sediment and wood accumulation in headwater streams of the Oregon coast range, USA. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28, S. 409–424.
- McClung, D.M., 2001. Characteristics of terrain, snow supply and forest cover for avalanche initiation caused by logging. *Annals of Glaciology*, 32, S. 223–229.
- Medicus, G., 2009. Massenbewegungen und Vegetationsbedeckung. Diplomarbeit, Universität Innsbruck, Innsbruck.
- Meyer-Grass, M., Schneebeli, M., 1992. Die Abhängigkeit der Waldlawinen von Standorts-, Bestandes- und Schneeverhältnissen. Internationales Symposium Interpraevent Bern. Tagungspublikation, 2, S. 443–445.
- Miller, D.J., Burnett, K.M., 2007. Effects of forest cover, topography and sampling extent on the measured density of shallow, translational landslides. *Water Resources Research*, 43, W03433. DOI: 10.1029/2005WR004807.
- Moos, C., 2014. How does forest structure affect landslide susceptibility? Statistical prediction models for shallow landslides integrating forest structure. Masterarbeit, ETH Zürich, Zürich.
- Niese, G., 2011. Österreichs Schutzwälder sind total überaltert. Waldinventur 2007/2009. BFW-Praxisinformation, 24, S. 29–31.

- Nordmann, B., 2011. Einfluss der Forstwirtschaft auf den vorbeugenden Hochwasserschutz – Integrale Klassifizierung abflusssensitiver Waldflächen. Dissertation, TU-München, Fachgebiet für Waldernährung und Wasserhaushalt, München.
- Notaro, S., Paletto, A., 2012. The economic valuation of natural hazards in mountain forests: An approach based on the replacement cost method. *Journal of Forest Economics*, 18(4), S. 318–328.
- ÖWI, 2018. Schutzwald, Waldfläche, Bestandesstabilität. <http://bfw.ac.at/rz/wi.auswahl> [07.08.2018].
- Perret, S., Dolf, F., Kienholz, H., 2004. Rockfalls into forests: analysis and simulation of rockfall trajectories – considerations with respect to mountainous forests in Switzerland. *Landslides*, 1(2), S. 123–130.
- Perzl, F., Huber, A., 2014. Verbesserung der Erfassung der Schutzwaldkulisse für die forstliche Raumplanung, Synthese und Zusammenfassung. Projektbericht im Auftrag des BMLFUW.
- Perzl, F., Maier, B., Walter, D., 2012. Klimawandel, Naturgefahren und Schutzwald. *BFW-Praxisinformation*, 30, S. 24–26.
- Perzl, F., Rössel, M., 2017. Die BFW-Rutschungsdatenbank und das C3S-ISLS Rutschungsinventar. Grundlagen für die Analyse und Modellierung von (flachgründigen) Rutschungen. Vortrag. Innsbrucker Hofburggespräche 2017-04-06, Innsbruck.
- Perzl, F., Rössel, M., Kofler, A., 2017. GRAVIMOD II. Erstellung von Grundlagen zur bundeseinheitlichen Ausweisung von Waldflächen mit Schutzfunktion vor Boden- und Felsrutschungen. Grundlagen, Methoden und Ergebnisse der Modellierung von Waldflächen mit Schutzfunktion vor spontanen Lockergesteinsrutschungen (Hangrutschungen). Projektbericht im Auftrag des BMLFUW, Bundesforschungszentrum für Wald, Innsbruck.
- Perzl, F., Walter, D., 2012. Die Lawinen-Schutzwirkung des Waldes im Klimawandel. Literaturüberblick über gegenwärtige Klimatrends in den Alpen, mögliche Auswirkungen der Klimaveränderung auf die Schneedeckenparameter, die Lawinenaktivität und die Lawinen-Schutzwirkung des Waldes. Deliverables Projekt MANFRED, Alpine SPACE Program. Bundesforschungszentrum für Wald, Innsbruck.
- Pichler, A., 2018. Sicherung der Schutzwirkung des Waldes – eine Herausforderung(?). Bundesministerium für Nachhaltigkeit und Tourismus. https://www.arching.at/fileadmin/user_upload/redakteure/Veranstaltungen/Tagung_NatRes_2018/Pichler_Schutzwald.pdf [19.03.2019].
- Pretzsch, H., Grote, R., Reineking, B., Rötzer, T. H., Seifert, S. T., 2008. Models for forest ecosystem management: a European perspective. *Annals of botany*, 101(8), S. 1065–1087.
- Radtke, A., Toe, D., Berger, F., Zerbe, S., Bourrier, F., 2014. Managing coppice forests for rockfall protection: lessons from modeling. *Annals of forest science*, 71(4), S. 485–494.
- Reichenbach, P., Busca, C., Mondini, A.C., Rossi, M., 2014. The influence of land use change on landslide susceptibility zonation: the Briga catchment test site (Messina, Italy). *Environmental management*, 54(6), S. 1372–1384. DOI: 10.1007/s00267-014-0357-0.
- Rickli, C., Graf, F., Gerber, W., Frei, M., Böll, A., 2004. Der Wald und seine Bedeutung bei Naturgefahren geologischen Ursprungs. *Forum für Wissen* 2004, S. 27–34.

- Robison, G.E., Mills, K.A., Paul, J., Dent, L., Skaugset, A., 1999. Storm Impacts and Landslides of 1996: Final Report. Forest Practices technical Report Number 4. Oregon Department of Forestry, 145 S.
- Saeki, M., Matzuoka, H., 1970. Ground Avalanche Prevention Function of Broad-Leaved Young Stand. Journal of the Japanese Society of Snow and Ice, 32(3), S. 43–54.
- Schelhaas, M.J., 2008. Impacts of natural disturbances on the development of European forest resources: application of model approaches from tree and stand levels to large-scale scenarios. Dissertationes Forestales 56. Alterra Scientific Contributions, 23, 168 S.
- Schiechl, H.M., Stern, R., 1983. Die Zirbe (*Pinus cembra* L.) in den Ostalpen – III. Teil. Angewandte Pflanzenzoologie. Veröffentlichungen der forstlichen Bundesversuchsanstalt Wien, Österreichischer Agrarverlag, Heft 27.
- Schiffer, M. 2018. Steinschlagschutzwälder. Neue Beurteilungsmethoden und nachhaltiges Schutzmanagement. Zweite Fachtagung »Stand der Technik im Naturgefahren-Ingenieurwesen«, Wien.
- Schmidt, M., Hanewinkel, M., Kändler, G., Kublin, E., Kohnle, U., 2010. An inventory-based approach for modeling single-tree storm damage – experiences with the winter storm of 1999 in southwestern Germany. Canadian Journal of Forest Research, 40, S. 1636–1652.
- Schneebeli, M., Bebi, P., 2004. Snow and Avalanche Control. In: J. Burley, J. Evans, J. Youngquist (Hrsg), Encyclopedia of Forest Sciences. Elsevier Academic Press, Amsterdam, S. 397–402.
- Schönenberger, W., Fischer, A., Innes, J.L., 2002. Vivian's Legacy in Switzerland – impact of windthrow on forest dynamics. Storm Vivian. Forest Snow and Landscape Research, 77(1/2).
- Schumann, A., Fischer, B., Büttner, U., Bohn, E., Walther, P., Wolf, E., 2016. Die größten Hochwasser im Einzugsgebiet der Mulde im meteorologisch-hydrologischen Vergleich. Schriftenreihe des Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Heft 18.
- Schuster, R., Oberhuber, W., Gruber, A., Wieser, G., 2016. Soil drought decreases water-use of pine and spruce but not of larch in a dry inner alpine valley. Austrian Journal of Earth Sciences, 133(1), S. 1–17.
- Schwarz, M., Giadrossich, F., Cohen, D., 2013. Modelling root reinforcement using root-failure Weibull survival function. Hydrology and Earth System Sciences, 17, S. 4367–4377.
- Sidle, R.C., Ziegler, A.D., 2017. The canopy-landslide initiation conundrum: insight from a tropical secondary forest in northern Thailand. Hydrology and Earth System Sciences, 21, S. 651–667.
- Sinabell, F., Pennerstorfer, D., Lackner, S., 2016. An Economic Assessment of Torrent and Avalanche Control Measures in Austria. The Supply of Protective Constructions and Future Demand. WIFO Studies.
- Sovilla, B., Margreth, S., Schaer, M., Thiebert, E., Fischer, J.-T., Baroudi, D., Ancey, C., 2014. Taking into account wet avalanche load for the design of tower-like structures. In: Proceedings of the International Snow Science Workshop ISSW 2014, Banff, Alberta, Canada.
- Staffler, H.P., Nicolussi, K., Patzelt, G., 2011. Postglaziale Waldgrenzentwicklung in den Westtiroler Zentralalpen. Gredleriana, 11, S. 93–114.

- Stauder, S., 1963. Das Projekt »Wildbach- und Lawinenvorbeugung Vorderes Zillertal und seine wirtschaftliche Bedeutung«. In: Ökologische Untersuchungen in der Subalpinen Stufe. 2. Teil. Mitteilung der forstlichen Bundesversuchsanstalt Mariabrunn, Wien, S. 721–741.
- Stern, R., 1966. Der Waldrückgang im Wipptal. Mitteilung der forstlichen Bundesversuchsanstalt Mariabrunn, Heft 70.
- Steyrer, G., Cech, T., Fürst, A., Hoyer-Tomiczek, U., Krehan, H., Perny, B., Tomiczek, C., 2008. Noch keine Beruhigung in Sicht. Forstzeitung, 4, S. 15–17.
- Stoffel, M., Wehrli, A., Kühne, R., Dorren, L.K.A., Perret, S., Kienholz, H., 2006. Assessing the protective effect of mountain forests against rockfall using a 3D simulation model. *Forest Ecology and Management*, 225(1/3), S. 113–122.
- Takeuchi, Y., Nishimura, K., Patra, A., 2018. Observations and numerical simulations of the braking effect of forests on large-scale avalanches. *Annals of Glaciology*, S. 1–9.
- Takeuchi, Y., Torita, H., Nishimura, K., Hirashima, H., 2011. Study of a large-scale dry slab avalanche and the extent of damage to a cedar forest in the Makunosawa valley, Myoko, Japan. *Annals of Glaciology*, 52(58), S. 119–128.
- Teich, M., Bartelt, P., Grêt-Regamey, A., Bebi, P., 2012b. Snow avalanches in forested terrain: Influence of forest parameters, topography, and avalanche characteristics on runout distance. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 44(4), S. 509–519.
- Teich, M., Fischer, J.-T., Feistl, T., Bebi, P., Christen, M., Grêt-Regamey, A., 2014. Computational snow avalanche simulation in forested terrain. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 14(8), S. 2233–2248.
- Teich, M., Giunta, A.D., Hagenmuller, P., Bebi, P., Schneebeil, M., Jenkins, M.J., 2019. Effects of bark beetle attacks on forest snowpack and avalanche formation – Implications for protection forest management. *Forest Ecology and Management*, 438, S. 186–203.
- Teich, M., Marty, C., Gollut, C., Grêt-Regamey, A., Bebi, P., 2012a. Snow and weather conditions associated with avalanche releases in forests: rare situations with decreasing trends during the last 41 years. *Cold Regions Science and Technology*, 83, S. 77–88.
- Tersch, F., 1994. Leistungen des Waldes. Infrastrukturleistungen. In: Österreichs Wald. Eigenverlag Autorengemeinschaft »Österreichs Wald«, Wien, S. 129–140.
- Tomiczek, C., Cech, T.L., Fürst, A., Hoyer-Tomiczek, U., Krehan, H., Perny, B., Steyrer, G., 2008. Forstschutzsituation 2008 in Österreich. *Forstschutz Aktuell*, Wien, 42, S. 3–7.
- Unger, G.M., Kirisits, T., Konrad, H., Schüler, S., Geburek, T., 2017. Züchtungs- und Erhaltungsinitiative »Esche in Not« – Unterstützung weiterhin gefordert! BFW-Praxisinformation, 43, S. 3–6.
- Varnes, D.J., 1978: Slope movement types and processes. In: R.L. Schuster, R.J. Krizek (Hrsg.), *Landslides: Analysis and Control*, Transportation and Road Research Board. Special Report 176, National Academy of Science, Washington D.C., S. 11–33.
- Vera, C., Wikstroem, K., Bühler, Y., Bartelt, P., 2015. Release temperature, snowcover entrainment and the thermal flow regime of snow avalanches. *Journal of Glaciology*, 61, S. 173–184. DOI: 10.3189/2015JogG14J117.
- Vergani, C., Schwarz, M., Cohen, D., Thormann, J.J., Bischetti, G.B., 2014. Effects of root tensile force and diameter distribution variability on root reinforcement in the Swiss and Italian Alps. *Canadian Journal of Forest Research*, 44, S. 1426–1440.

- Vergani, C., Schwarz, M., Soldati, M., Corda, A., Giadrossich, F., Chiaradia, E.A., Morando, P., Bassaneli, C., 2016. Root reinforcement dynamics in subalpine spruce forests following timber harvest: a case study in Canton Schwyz, Switzerland. *Catena*, 143, S. 275–288.
- Viglietti, D., Letey, S., Motta, R., Maggioni, M., Freppaz, M., 2010. *Cold Regions Science and Technology*, 64, S. 167–173.
- Wasser, B., Frehner, M., 1996. *Wegleitung Minimale Pflegemassnahmen für Wälder mit Schutzfunktion. Vollzug Umwelt. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft.*
- Wehrli, A., Dorren, L.K.A., Berger, F., Zingg, A., Schönenberger, W., Brang, P., 2006. Modelling long-term effects of forest dynamics on the protective effect against rockfall. *Forest Snow and Landscape Research*, 80(1), S. 57–76.
- Weiss, G., 1999. *Die Schutzwaldpolitik in Österreich. Einsatz forstpolitischer Instrumente zum Schutz vor Naturgefahren. Schriftenreihe des Instituts für Sozioökonomik der Forst- und Holzwirtschaft. Band 39, BOKU Wien.*
- Wermelinger, B., Seifert, M., 1998. Analysis of the temperature dependent development of the spruce bark beetle *Ips typographus* (L.) (Col., Scolytidae). *Journal of Applied Entomology*, 122, S. 185–191.
- Wieser, G., Oberhuber, W., Gruber, A., Leo, M., Matyssek, R., Grams, T.E.E., 2016. Stable Water Use Efficiency under Climate Change of Three Sympatric Conifer Species at the Alpine Treeline. *Frontiers in Plant Science*, 7, S. 799. DOI: 10.3389/fpls.2016.00799.
- Wopfner, H., 1951. *Bergbauernbuch I. Tyrolia Verlag, Innsbruck.*
- Zieher, T., Rutzinger, M., Schneider-Muntau, B., Perzl, F., Leidinger, D., Formayer, H., Geitner, C., 2017. Sensitivity analysis and calibration of a dynamic physically based slope stability model. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 17, S. 971–992.
- Zimmermann, N.E., Bollinger, J., Gehrig-Fasel, J., Guisan, A., Kienast, F., Lischke, H., Rickebusch, S., Wohlgemuth, T., 2006. Wo wachsen die Bäume in 100 Jahren? In: *Wald und Klimawandel. Forum für Wissen 2006, Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft, Bern*, S. 63–71.

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

26 Schutz kritischer Infrastrukturen

Kurt Hager*

Zusammenfassung

Für die »Alpenrepublik« Österreich ist der alpine Raum ein unverzichtbarer Teil ihres Wirtschafts- und Lebensraums. Die geografischen und meteorologischen Besonderheiten von Gebirgsregionen stellen die, in diesem Gebiet angesiedelten Unternehmen, bei der Errichtung ihrer Betriebsanlagen und der Aufrechterhaltung ihrer Betriebsprozesse vor besondere Herausforderungen. Dies gilt insbesondere für kritische Infrastrukturen, die das Rückgrat des Wirtschafts- und Lebensraums Alpen bilden.

Kommt es auf Grund des Klimawandels zu einem Anstieg von Extremereignissen, führt dies zu einer steigenden wirtschaftlichen und sozialen Vulnerabilität dieses Raums. Bund, Länder und Betreiber, unterstützt von Wissenschaft und Forschung, müssen gemeinsam an einer Steigerung der Resilienz der kritischen Infrastrukturen arbeiten, um den Wirtschafts- und Lebensraum Alpen nachhaltig abzusichern. Das Österreichische Programm zum Schutz kritischer Infrastrukturen (APCIP) und das Katastrophenschutzmanagement bilden den sicherheitspolitischen Rahmen für diese Anstrengungen.

Abstract

For the »Alpine Republic« Austria, alpine space is an indispensable part of its economic and living space. The geographic and meteorological characteristics of mountainous regions present particular challenges to companies located in the area in the construction of their facilities and in the maintenance of their operations. This applies in particular to critical infrastructures, which form the backbone of the economic and living space of the Alps.

If extreme events increase as a result of climate change, this will increase the economic and social vulnerability of the area. The Federal Government, Federal States and operators, supported by science and research, must work together to increase the resilience of critical infrastructures in order to secure the economic and living space of the Alps in the long term. The Austrian Program for Critical Infrastructure Protection (APCIP) and Civil Protection Management form the security framework for these efforts.

* Kurt Hager, Bundesministerium für Inneres, Abteilung I/11 (Sicherheitspolitik), kurt.hager@bmi.gv.at.

Kernaussagen

- Der Anstieg von Extremereignissen in Folge des Klimawandels bedroht die kritischen Infrastrukturen der Alpenregion und kann damit deren Bestand als Wirtschafts- und Lebensraum gefährden.
- In einer Public Private Partnership müssen Bund, Länder und Betreiber, unterstützt von Wissenschaft und Forschung, nachhaltige Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz der kritischen Infrastrukturen ergreifen.

Key Points

- The rise of extreme events as a result of climate change threatens the critical infrastructures of the Alpine region and can thus jeopardize their existence as an economic and living space.
- In a public-private partnership, the Federal Government, Federal States and operators, supported by science and research, must take sustainable measures to increase the resilience of critical infrastructures.

26.1 Schutz kritischer Infrastrukturen als sicherheitspolitisches Konzept

26.1.1 Moderne Sicherheitspolitik

Klassische Sicherheitspolitik konzentrierte sich auf den Schutz des Staatsgebietes vor Angriffen von außen und die Bewahrung der staatlichen Souveränität. Nach dem Ende des Kalten Krieges erweiterte sich dieses Verständnis von nationaler Sicherheit. Neue Risiken und Bedrohungen, wie der internationale Terrorismus, die grenzüberschreitende organisierte Kriminalität, natürliche und von Menschen verursachte Katastrophen, Cyber Attacken sowie die Bedrohung kritischer Infrastrukturen, führten zum Entstehen einer modernen Sicherheitspolitik.

Moderne Sicherheitspolitik, wie in der Österreichischen Sicherheitsstrategie (ÖSS) beschrieben, verfolgt einen Ansatz des Risikomanagements und der Gefahrenabwehr. Sie ist umfassend und integriert. D. h., »innere und äußere sowie zivile und militärische Sicherheit sind aufs Engste verknüpft« und sie achtet »auf eine Arbeitsteilung zwischen den involvierten staatlichen und nichtstaatlichen Akteuren« (BMI, 2013).

Dieses umfassende Verständnis von Sicherheit stellt den Staat vor große Herausforderungen. Angesichts eines breiten Risiko- und Bedrohungsszenarios und des Anspruchs, Staat, Gesellschaft und Wirtschaft gleichermaßen zu schützen, greift moderne Sicherheitspolitik auf zwei Konzepte zurück: das Subsidiaritätsprinzip und die Erhöhung der Resilienz.

Das Subsidiaritätsprinzip bedeutet, dass der Staat nur dann selbst tätig wird, wenn Gesellschaft und Wirtschaft nicht für ihren eigenen Schutz sorgen können. Die vom Staat dabei vorrangig eingesetzten Mittel sind die Schaffung eines Risikobewusstseins bei den Betroffenen (awareness raising) sowie die Hilfe zur Selbsthilfe. Staatliche Interventionen sind, wie im Masterplan 2014 des Österreichischen Programms zum Schutz kritischer Infrastrukturen ausgeführt, von den Prinzipien der Komplementarität (»Bestehende Maßnahmen und Pläne sollen weiter genutzt und den neuen Bedrohungen angepasst werden.«), Kooperation zwischen den beteiligten Stakeholdern sowie der Verhältnismäßigkeit (»Die Maßnahmen und Kosten zur Erhöhung des Schutzniveaus müssen in einem ausgeglichenen Verhältnis zum jeweiligen Risiko und zu den Möglichkeiten zur Gefahrenminderung stehen«), geprägt (BMI, 2015).

26.1.2 Resilienz als Konzept der modernen Sicherheitspolitik

Das erweiterte Verständnis der modernen Sicherheitspolitik führt dazu, das angesichts der Vielfalt, der Komplexität und der Unvorhersehbarkeit moderner Risiken, keine allumfassende Sicherheitsgarantie möglich ist. An die Stelle des Versuchs, für einen umfassenden Schutz aller relevanten Systeme von Staat und Gesellschaft zu sorgen, tritt das Konzept der Resilienz. Dieses hat das Ziel, die Widerstands- und Regenerationsfähigkeit dieser Systeme zu stärken.

Die ÖSS stellt die Steigerung der Resilienz Österreichs, die »Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit von Staat und Gesellschaft nach Krisen« (BMI, 2013), in den Mittelpunkt der Umfassenden Sicherheitsvorsorge. Der Masterplan 2014 zum Schutz kritischer Infrastrukturen versteht Resilienz im Sinne der Definition der United Nations International Strategy for Disaster Reduction (UN, 2009) als:

»die Fähigkeit eines Systems, einer Gemeinschaft oder einer Gesellschaft, welche(s) Gefahren ausgesetzt ist, deren Folgen zeitgerecht und wirkungsvoll zu bewältigen, mit ihnen umzugehen, sich ihnen anzupassen und sich von ihnen zu erholen, auch durch Bewahrung und Wiederherstellung seiner bzw. ihrer wesentlichen Grundstrukturen und Funktionen« (BMI, 2015).

Bei der praktischen Umsetzung des Konzeptes Resilienz sind grundlegende Fragen zu beantworten:

1) *Welche Art von Resilienz ist notwendig?*

Dazu sind zwei Ansätze möglich: »bounce back« oder »adaption«. Bounce back, das »wieder auf die Beine kommen« setzt auf die schnelle Erholung des betroffenen Systems von der Krise und die rasche Rückkehr zum Normalbetrieb. Diese Form von Resilienz wird im Katastrophenschutz angestrebt.

Adaption ist ein länger dauernder Prozess, bei dem das System durch Lern- und Anpassungsprozesse seine Funktionalität selbst wiedererlangt. Zum Schutz kritischer Infrastrukturen sind beide Ansätze notwendig.

2) *Was soll resilient werden?*

In komplexen Systemen, wie Staaten oder Unternehmen kann zwischen dem sozialen, dem institutionellen und dem technischen Subsystem unterschieden werden. Um einen Betreiber kritischer Infrastrukturen resilienter zu machen, sind Maßnahmen in allen drei Subsystemen notwendig.

3) *Welcher Akteur ist für Resilienz verantwortlich?*

Wie bereits oben ausgeführt, kann der Staat nicht mehr alleine für die Sicherheit von Wirtschaft und Gesellschaft sorgen. Daher sind alle relevanten Stakeholder gemeinsam für die Steigerung der Resilienz verantwortlich. Aufgabe des Staates ist es dabei, den politischen, strategischen und rechtlichen Rahmen für solche Public Private Partnerships zu schaffen.

4) *Wie kann Resilienz gefördert werden?*

Programme zur Erhöhung der Resilienz umfassen Maßnahmen in den Kategorien Capacities, Capabilities and Culture. Aufbau von Capacities heißt, Reserven zu bilden und Redundanzen einzubauen. Capabilities (Fähigkeiten) werden dadurch entwickelt, dass Notfallsituationen geübt sowie Krisen- und Katastrophenschutzpläne erstellt werden. Wesentlich ist auch das Entstehen einer Kultur der Resilienz zu fördern, z. B. durch ein Bekenntnis zu den Grundätzen einer Lernenden Organisation sowie der Förderung von Kooperationsbereitschaft und -fähigkeit.

5) *Wie kann Resilienz gemessen werden?*

Konzepte wie Resilienz und Vulnerabilität sind schwer messbar. Das US Department of Homeland Security hat z. B. 1.500 Datenpunkte in 6 Schlüsselbereichen (physische Sicherheit, Sicherheitsmanagement, Sicherheitskräfte, Umfang des Informationsaustauschs, Überprüfung von Schutzmaßnahmen, Abhängigkeiten) identifiziert und versucht damit in einer komplexen mathematischen Operation, Resilienz zu messen. Österreich hat sich mit dieser schwierigen Frage bisher nur im Rahmen eines Sicherheitsforschungsprojektes beschäftigt, ohne dass dieser Ansatz weiterverfolgt wurde.

Die Resilienz Österreichs kann nicht mit einer einzigen, allgemein wirksamen Maßnahmen erhöht werden. Daher wird in den vier großen Arbeitsfeldern Katastrophenschutzmanagement, Cyber Sicherheit, Sicherheitsforschung und Schutz kritischer Infrastrukturen, mit einer Vielzahl von Maßnahmen an der Steigerung der Resilienz von Staat und Gesellschaft gearbeitet.

Eine wichtige Rolle kommt dabei der Sicherheitsforschung zu. Im nationalen Sicherheitsforschungsprogramm KIRAS und im EU Programm HORIZON 2020 wird in anwendungsorientierter Forschung die Wissensbasis erhöht sowie von

universitären und außeruniversitären Forschungseinrichtungen gemeinsam mit den Bedarfsträgern aus der öffentlichen Verwaltung, praxistaugliche technologische Lösungen zum Schutz kritischer Infrastrukturen entwickelt.

26.2 Das Österreichische Programm zum Schutz kritischer Infrastrukturen

Das Österreichische Programm zum Schutz kritischer Infrastrukturen (APCIP) wurde mit einem Beschluss der Bundesregierung im Jahr 2008 eingerichtet. Den Impuls für diesen Schritt gab die Schaffung des Europäischen Programms zum Schutz kritischer Infrastrukturen (EPCIP) im Dezember 2006. Das EPCIP entstand als Reaktion der Europäischen Union auf die Terroranschläge von Madrid im Jahr 2004. Das APCIP ist kein Teil des EPCIPs sondern ein autonomes nationales Programm. Wobei darauf geachtet wird, dass dieses komplementär und kompatibel zum europäischen Programm entwickelt wird.

2014 wurde von der Bundesregierung ein neuer Masterplan für das APCIP verabschiedet, der die Grundlage der Umsetzung des Programms durch Bundeskanzleramt und BMI ist. 2016 beschloss die Konferenz der Landeshauptleute die Beteiligung der Bundesländer am APCIP. Dadurch ist eine enge Abstimmung zwischen den Programmen für das Katastrophenschutzmanagement und den Schutz kritischer Infrastrukturen sichergestellt.

APCIP definiert kritische Infrastrukturen als

»...jene Infrastrukturen (Systeme, Anlagen, Prozesse, Netzwerke oder Teile davon), die eine wesentliche Bedeutung für die Aufrechterhaltung wichtiger gesellschaftlicher Funktionen haben und deren Störung oder Zerstörung schwerwiegende Auswirkungen auf die Gesundheit, Sicherheit oder das wirtschaftliche und soziale Wohl großer Teile der Bevölkerung oder das effektive Funktionieren von staatlichen Einrichtungen haben würde« (BMI, 2015).

Kritische Infrastrukturen in diesem Sinne sind daher nicht nur das technische Subsystem strategisch wichtiger Einrichtungen, sondern das gesamte Unternehmen, also auch das soziale und das institutionelle Subsystem. Strategisches Ziel des Programms ist es, das gesamte Unternehmen resilienter zu machen und damit einen Beitrag zur Sicherung des Wirtschaftsstandortes Österreich und zur Daseinsvorsorge der österreichischen Bevölkerung zu leisten. Dazu fördert der Staat die Eigenvorsorge der Unternehmen und unterstützt diese bei der Implementierung einer umfassenden Sicherheitsarchitektur. Mit der Bereitstellung staatlicher Risikoanalysen sollen eigene betriebliche Risikoanalysen gefördert und es soll darauf aufbauend, ein umfassendes betriebliches Sicherheits- und Business Continuity-Management implementiert werden.

Beim Schutz kritischer Infrastrukturen stellen sich zwei zentrale Herausforderung: erstens, die Ausweisung der relevanten Unternehmen und zweitens, die Betreiber dieser Infrastrukturen zur Kooperation mit dem Staat zu bewegen.

Die Ausweisung der kritischen Infrastrukturen erfolgt auf der Grundlage der in einem KIRAS Sicherheitsforschungsprojekt entwickelten KRITIS-Methode. Die dabei angewandten Kriterien sind Redundanz (wieviele weitere Unternehmen gibt es im Sektor), Umsatzgröße (wie wichtig ist das Unternehmen für den Markt) und die Anzahl der Beschäftigten.

Derzeit sind österreichweit rund 400 Unternehmen als kritische Infrastrukturen in der sogenannten ACI-Liste (Austrian Critical Infrastructure) ausgewiesen. Zwei Drittel sind nationale kritische Infrastrukturen, die vom Bund und ein Drittel regionale kritische Infrastrukturen, die von den Ländern betreut werden. Die Liste dieser Unternehmen ist, so wie die staatliche Risikoanalyse, aus Sicherheitsgründen klassifiziert.

Um die Beratungs- und Unterstützungsangebote, wie Lagebilder, Early Warnings oder Risikoanalysen treffsicherer zu machen, werden die Unternehmen der ACI-Liste in 12 Sektoren kategorisiert: Chemische Industrie, Energie, Finanzen, Forschungseinrichtungen, Gesundheit, Hilfs- und Einsatzkräfte, Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT), Lebensmittel, soziale Einrichtungen, Transport, verfassungsmäßige Einrichtungen, Wasser. Alle Sektoren sind für die Versorgungssicherheit relevant, trotzdem ragen nach Einschätzung des Verfassers drei Sektoren heraus, bei denen eine Unterbrechung der Dienste, Auswirkungen auf das Funktionieren der Infrastrukturen anderer Sektoren hat und damit zu nicht abschätzbaren Kaskadeneffekten führen kann. Dies sind die Sektoren Energie (vor allem Strom), IKT und Transport. Darüber hinaus ist die technische Infrastruktur dieser drei Sektoren (Energie/Strom: Speicherkraftwerke, Hochspannungsleitungen,...; IKT: Sendemasten, Glasfaserkabel,...; Verkehr: Gleisanlagen, Straßen, Brücken, Tunnels,...) sind besonders vulnerabel gegenüber Naturgefahren wie Sturm, Erdbeben, Starkregen, Lawinen, usw.

Staatliche Risikoanalysen sind eine der Maßnahmen, die die Kooperation der Betreiber kritischer Infrastrukturen sicherstellen sollen. Das APCIP verzichtet bewusst auf gesetzliche Verpflichtungen, wie die Einhaltung von Sicherheitsstandards und Meldepflichten über Sicherheitsvorfälle. Durch Bewusstmachen der Verwundbarkeit und staatliche Unterstützungsmaßnahmen wie Risikoanalysen, Lagebilder, Frühwarnungen sowie speziellen Beratungsangeboten, soll die Bereitschaft der Betreiber kritischer Infrastrukturen zur Mitwirkung am Programm gefördert werden.

Zuletzt zur Frage, in welchem Verhältnis Schutz kritischer Infrastrukturen und Katastrophenschutz zueinander stehen. Katastrophenschutzmanagement sind die umfassend angelegten Maßnahmen des Bundes, der Länder und der

Gemeinden in den Bereichen Katastrophenvermeidung, Katastrophenvorsorge, Katastrophenbewältigung und Wiederherstellung nach Katastrophen. Der Katastrophenschutz bezieht kritische Infrastrukturen in genereller Form in die Prävention und Vorsorge von Katastrophen mit ein. Das APCIP fokussiert ausschließlich auf kritische Infrastrukturen und sieht eine umfassende Erhöhung der Resilienz dieser Unternehmen vor. Staatliche Maßnahmen zur Katastrophenbewältigung und zur Beseitigung von Katastrophenfolgen, die kritische Infrastrukturen betreffen, sind im APCIP nicht vorgesehen. Eine enge Abstimmung der Programme zum Schutz kritischer Infrastrukturen und zum Katastrophenschutz ist daher unumgänglich und wird durch die Beteiligung der Länder am APCIP sichergestellt.

26.3 Risiken für kritische Infrastrukturen im alpinen Raum

Der Verfasser nähert sich der Frage der besonderen Vulnerabilität kritischer Infrastrukturen im alpinen Raum aus einer sicherheitspolitischen Perspektive. Daher wird auf eine ausführliche Literaturrecherche verzichtet. Grundlage der Aussagen dieses Kapitels sind Einschätzungen von Praktikern aus dem Bereich des Katastrophenschutzes sowie Unternehmen, die kritische Infrastrukturen betreiben.

26.3.1 Risikoanalyse 2017

Moderne Sicherheitspolitik versteht sich als Risikomanagement, daher ist die Durchführung staatlicher Risikoanalysen eine der zentralen Maßnahmen im APCIP. Diese sind die Grundlage für die Festlegung der Schutzstandards der kritischen Infrastrukturen und die Planung staatlicher Maßnahmen, wie Lagebilder oder Beratungen.

Der Staat beschränkt sich auf Risikoanalysen. D. h. die systematische Ermittlung und den Gebrauch von Informationen, um ein Risiko zu verstehen und Wahrscheinlichkeit sowie Auswirkung auf ein System einschätzen zu können. Die Implementierung eines umfassenden Risikomanagement, das auch Risikobewältigung umfasst, ist die Aufgabe der Betreiber kritischer Infrastrukturen, die dabei durch die staatlichen Risikoanalysen unterstützt werden.

Im APCIP werden vier Ebenen des Risikomanagements unterschieden:

- 1) Ebene: gesamtstaatlich und alle Sektoren
- 2) Ebene: gesamtstaatlich nach Sektoren
- 3) Ebene: jedes Bundesland und alle Sektoren
- 4) Ebene: die einzelnen strategischen Unternehmen

2017 wurden ein Handbuch Staatliche Risikoanalysen SKI entwickelt, in dem die Methode für alle staatlichen Risikoanalysen festgelegt wird und die erste gesamtstaatliche Risikoanalyse (1. Ebene gesamtstaatlich und alle Sektoren) vorbereitet.

Das Handbuch unterscheidet vier Kategorien von potentiellen Quellen von Risiken, die zu einem plötzlich eintretenden Schadensereignis führen können:

- 1) Von der Natur ausgehende Gefahren
- 2) Von Menschen aus kriminellen, extremistischen und terroristischen Motiven verursachte Gefahren
- 3) Sonstige von Menschen verursachte Gefahren
- 4) Technische Gefahren

Extremereignisse fallen in die Kategorie Naturgefahren.

26.3.2 Vulnerabilität kritischer Infrastrukturen im Alpenraum

Dem Autor sind keine wissenschaftlichen Untersuchungen bekannt, die sich spezifisch mit der Vulnerabilität von kritischen Infrastrukturen im Alpenraum beschäftigen.

Aussagen können daher nur auf der Grundlage politisch-administrativer Dokumente getroffen werden. So werden in der Risikoanalyse 2017, Hochwasser (Überschwemmungen), Sturm, Erdbeben und schneebedingte Gefahren (Lawinen) als vier der insgesamt fünf relevanten Naturgefahren identifiziert. In der Schweizer Nationalen Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen 2018–2022 (Bundesamt für Bevölkerungsschutz, 2017) werden diese Ereignisse gleichfalls als Beispiele für Naturgefahren genannt. Sowohl in Österreich als auch in der Schweiz beziehen sich diese Aussagen aber auf das gesamte Staatsgebiet, also auch Regionen, die außerhalb der Alpen liegen.

Es können daher dzt. keine gesicherten Aussagen über die besondere Verletzbarkeit kritischer Infrastrukturen im Alpenraum getroffen werden. Zur weiteren wissenschaftlichen Untersuchung dieser Fragestellung können aber folgende Hypothesen formuliert werden:

- 1) Die technischen Subsysteme kritischer Infrastrukturen im Alpenraum sind gegenüber Naturgefahren vulnerabler als solche außerhalb des Alpenraums.
- 2) Die Sektoren Energie (insbesondere Strom), IKT und Transport sind im Alpenraum gegenüber Naturgefahren verletzlicher, da es auf Grund der geografischen Besonderheiten schwieriger und teurer ist, (technische) Redundanzen aufzubauen.
- 3) Der Anstieg von Extremereignissen auf Grund des Klimawandels wird die Vulnerabilität der kritischen Infrastrukturen im Alpenraum erhöhen.

- 4) Dies wird die Kosten für den Betrieb kritischer Infrastrukturen erhöhen, da zusätzliche Maßnahmen zur Steigerung der Resilienz aller Subsysteme (Betriebsanlagen, Krisenvorsorge, Business Continuity Management,...) notwendig sind.
- 5) Dies kann zu betriebswirtschaftlichen Überlegungen führen, kritische Infrastrukturen oder zumindest Teile ihrer Betriebsanlagen in weniger gefährdete Regionen zu übersiedeln.
- 6) Bei jenen kritischen Infrastrukturen, bei denen die Übersiedlung des Unternehmens oder von Betriebsanlagen auf Grund der Art des Betriebes (Speicherkraftwerke in den Alpen) oder einer staatlichen Versorgungsverpflichtung (Energie, Verkehr, verfassungsmäßige Einrichtungen, Gesundheit, Hilfs- und Einsatzkräfte) nicht möglich ist, werden sich die Betriebskosten wesentlich erhöhen.
- 7) Nur durch die Verstärkung von Vorsorgemaßnahmen gegenüber den Auswirkungen steigender Extremereignisse wird es möglich sein, die Alpen als Wirtschafts- und Lebensraum nachhaltig abzusichern.

26.4 Handlungsempfehlungen

Zuletzt zur Frage, wie die Resilienz kritischer Infrastrukturen gegenüber einer wachsenden Bedrohung durch Extremereignisse erhöht werden kann? Wie eingangs festgestellt, kann Resilienz nicht durch einzelne und isolierte Maßnahmen sondern nur durch ein breites und umfassendes Aktionsprogramm erhöht werden. Hier sind drei Aktionsfelder maßgeblich:

1) *Ausbau der Forschung*

Dem politisch-administrative Programm APCIP fehlen dzt. wissenschaftlich gesicherte Erkenntnisse, welche Auswirkungen ein Anstieg von Extremereignissen in Folge des Klimawandels auf die kritischen Infrastrukturen im Alpenraum haben wird. Dazu müsste in universitären Einrichtungen die Grundlagenforschung zu dem Thema aufgenommen werden. Ergänzend könnte das nationale Sicherheitsforschungsprogramm KIRAS helfen, anwendungsorientierte Lösungen zur Erhöhung der Resilienz der technischen Subsysteme kritischer Infrastrukturen zu entwickeln.

2) *Vertiefung der Zusammenarbeit mit den Betreibern kritischer Infrastrukturen*

APCIP beruht auf der Public Private Partnership zwischen der Verwaltung und den Betreibern kritischer Infrastrukturen. Diese Zusammenarbeit muss genutzt werden, um die wachsende Bedrohung bestimmter Sektoren der kritischen Infrastrukturen durch den Klimawandel bewusster zu machen und die Bereitschaft der Betreiber zu fördern, Maßnahmen zur Stärkung der Resilienz ihrer Einrichtungen zu ergreifen. Die Schaffung eines

Anreizsystems zur Förderung solcher Maßnahmen sollte überlegt werden, wenn dies notwendig ist, den Wirtschafts- und Lebensraum Alpen nachhaltig zu sichern.

3) *Verstärkung der Abstimmung zwischen den Programmen zum Schutz kritischer Infrastrukturen und Katastrophenschutz*

Die Zusammenarbeit zwischen dem Bund, der primär für den Schutz kritischer Infrastrukturen zuständig ist und den Ländern, in deren primäre Zuständigkeit das Katastrophenschutzmanagement fällt, muss verstärkt werden. Besondere Priorität sollten Maßnahmen zur Stärkung der Resilienz der technischen Subsysteme der Sektoren Energie, IKT und Verkehr haben.

Der vorliegende Sammelband leistet einen wichtigen Beitrag, sich mit dem bisher vernachlässigten Thema der Auswirkungen von Extremereignissen auf kritische Infrastrukturen im alpinen Raum, zu beschäftigen. Der Wissenschaft kommt dabei die Rolle zu, den Praktikern aus Verwaltung und Wirtschaft die Auswirkungen des Klimawandels auf den Wirtschafts- und Lebensraum Alpen vor Augen zu führen und zu helfen, gemeinsam, praxistaugliche Lösungen zur Erhöhung der Resilienz dieser Infrastrukturen zu entwickeln.

Literatur

- BMI, 2013. Österreichischen Sicherheitsstrategie. Sicherheit in einer neuen Dekade – Sicherheit gestalten. Bundeskanzleramt Österreich, Wien, 24 S. <https://www.bundeskanzleramt.gv.at/documents/131008/1022458/%c3%96sterreichische+Sicherheitsstrategie/c3693996-de75-45a9-9e32-285fb0b02f23> [13. 11. 2018].
- BMI, 2015. Österreichisches Programm zum Schutz kritischer Infrastrukturen (APCIP). Masterplan 2014. Digitalprintcenter BM.I, Wien, 20 S. [https://www.bundeskanzleramt.gv.at/documents/131008/1022581/%C3%96sterreichisches+Programm+zum+Schutz+kritischer+Infrastrukturen+\(APCIP\)/](https://www.bundeskanzleramt.gv.at/documents/131008/1022581/%C3%96sterreichisches+Programm+zum+Schutz+kritischer+Infrastrukturen+(APCIP)/) [13. 11. 2018].
- Bundesamt für Bevölkerungsschutz, 2017. Nationale Strategie zum Schutz kritischer Infrastrukturen 2018–2022, 540 S. <https://www.babs.admin.ch/de/aufgabenbabs/ski.html> [13. 11. 2018].
- UN, 2009. International Strategy for Disaster Reduction (ISDR): Disaster Risk Reduction in the United Nations. Roles, mandates and areas of work of key United Nations entities. UNISDR, Genf, 137 S. https://www.unisdr.org/files/9866_DisasterRiskReductionintheUnitedNat.pdf [13. 11. 2018].

27 Vulnerabilität

Maria Papathoma-Köhle und Sven Fuchs*

Zusammenfassung

Das Konzept der Vulnerabilität stützt sich auf naturwissenschaftliche und sozialwissenschaftliche Theorien, und bedarf einer multidisziplinären Herangehensweise im Rahmen des integralen Risikomanagements. Unter Berücksichtigung der unterschiedlichen disziplinären Paradigmen werden für Österreich Fragen der physischen, sozialen, ökonomischen und institutionellen Vulnerabilität gegenüber Naturgefahren diskutiert, mit einem besonderen Schwerpunkt auf Extremereignissen. Es wird argumentiert, dass physische Vulnerabilität als Ausgangspunkt für eine erhebliche wirtschaftliche Vulnerabilität gesehen werden kann, die durch die institutionellen Rahmenbedingungen im Umgang mit Naturgefahren entsteht und durch den gesamtgesellschaftlichen Rahmen geprägt ist. Wenn Vulnerabilität über einen umfassenden Ansatz analysiert und bewertet wird, kann langfristig eine Reduktion des Risikos erreicht werden. Hierzu besteht jedoch für viele Naturgefahren-Typen noch erheblicher Forschungsbedarf, da bislang – vor allem in Hinblick auf Extremereignisse – kaum entsprechende Daten zur Verfügung stehen.

Abstract

The concept of vulnerability is pillared on theories from natural and social sciences, and requires a multidisciplinary approach embedded in the paradigm of integral risk management. Taking into account its multi-disciplinary roots, issues of physical, social, economic and institutional vulnerability to natural hazards are discussed, with a particular focus on extreme events. It is argued that physical vulnerability can be seen as the starting point for a significant economic vulnerability arising from the institutional framework in dealing with natural hazards, and framed by the overall societal framework. If vulnerability is analyzed and assessed through a comprehensive approach, risk reduction can be achieved. However, for many types of natural hazards there is still considerable need for research, since so far – especially with regard to extreme events – only for few hazard types data is available.

* Maria Papathoma-Köhle, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren, maria.papathoma-koehle@boku.ac.at.

Sven Fuchs, Universität für Bodenkultur Wien, Institut für Alpine Naturgefahren, sven.fuchs@boku.ac.at.

Kernaussagen

- Die Schadensanfälligkeit (Vulnerabilität) gegenüber Extremereignissen in Österreich ist bislang kaum untersucht worden.
- Grundsätzlich kann Vulnerabilität aus verschiedenen Blickwinkeln heraus betrachtet werden, und umfasst zumindest physische, soziale, ökonomische und institutionelle Komponenten, die in Wechselwirkung zueinander stehen.
- Der dringendste Forschungsbedarf wird in der Erarbeitung von Datengrundlagen gesehen, die es erlauben, unterschiedliche Vulnerabilitäten zu quantifizieren.

Key Points

- Vulnerability to extreme events in Austria has been hardly studied so far.
- Basically, vulnerability is a multi-dimensional concept which can be captured entirely only when physical, social, economic and institutional components and their interaction are considered.
- Changes in the frequency and magnitude of natural hazards do not have a direct effect on the vulnerability. Nevertheless, changes in the socio-economic context do have an influence on it.
- Since the assessment of vulnerability relies on data availability, the most urgent research needs are seen in the development of databases that allow its quantification and visualization.

27.1 Einführung

Vulnerabilität (Verwundbarkeit oder Schadensanfälligkeit) und Resilienz sind zwei zentrale Begriffe im Management von Naturgefahren. Das Management beinhaltet eine Analyse jener gesellschaftlichen Bedingungen, die darüber entscheiden, ob die Auswirkungen eines Prozesses (z. B. Erdbeben oder Überschwemmung) Schäden verursachen können, und ob die Bewältigungskapazität ausreicht, diese Auswirkungen zu reduzieren oder zu vermeiden. Vulnerabilität ist dabei ein wesentlicher Bestandteil der Risikoanalyse und bringt die Schadensanfälligkeit einer Gesellschaft gegenüber Einwirkungen eines potenziell gefährlichen Prozesses zum Ausdruck. In den vergangenen Jahren entwickelte sich die Auseinandersetzung mit Vulnerabilität als wichtiges Forschungsfeld in der österreichischen Naturgefahrenforschung (Fuchs, 2009; Papatoma-Köhle et al., 2017). Mehrere wissenschaftliche Disziplinen bearbeiteten die Thematik der Vulnerabilität aus verschiedenen Perspektiven (Birkmann et al., 2013). Die Vulnerabilitätsforschung im Kontext von Naturgefahren setzt deshalb unterschiedliche Schwerpunkte, wie die Frage nach der Schadensanfälligkeit innerhalb einer Gesellschaft, mögliche interne gesellschaftliche Selbstverstärkungseffekte oder Effekte des Globalen Wandels und deren lokale Auswirkungen auf den Umgang mit Naturgefahren (Füssel, 2007; Renn, 2008a, b; Cutter, 2018). Vorherrschende Konzepte – auch zur Resilienz – betonen in der Naturgefahr-

renforschung vorbeugende Maßnahmen zur Verringerung negativer Auswirkungen in der Gesellschaft; andere Ansätze fokussieren auf Ereignismanagement und Wiederaufbau. In der Vulnerabilitätsforschung sind verschiedene Ansätze bereits seit Jahrzehnten Gegenstand der wissenschaftlichen Auseinandersetzung. Dabei haben sich Schwerpunkte (wenn auch unterschiedliche) im Bereich der empirischen Datenanalyse sowie indikatorengestützte Verfahren zur Beschreibung von Vulnerabilität herausgebildet. Dementsprechend kann sich Vulnerabilität beispielsweise nur auf die physische Schadenanfälligkeit von Risikoelementen (z. B. Infrastruktur oder Gebäude) beziehen, welche durch Einwirkungen einer bestimmten Prozessstärke (Wassertiefe, Fließgeschwindigkeiten, Windstärke) geschädigt werden; die Analyse der sozialen Vulnerabilität hingegen fokussiert auf Bedingungen und Prozesse, die die unterschiedliche Stärke von Auswirkungen eines Ereignisses in verschiedenen Teilen der Gesellschaft erklären. Darüber hinaus kann die ökonomische von der institutionellen Vulnerabilität unterschieden werden, während erstere auf die wirtschaftlichen Verluste aufgrund von (Natur-)Gefahren fokussiert, definiert letztere die rechtlichen und normativen Rahmen, unter denen die Schadenanfälligkeit ansteigen oder absinken kann.

Ein grundlegendes Konzept zur Erfassung der unterschiedlichen Dimensionen von Vulnerabilität leitete Chambers (1989) und später Bohle (2001) zunächst in Bezug auf Dürre und daraus resultierende Auswirkungen ab: Sie beschrieben eine doppelte Struktur von Verwundbarkeit im Spannungsfeld zwischen äußerer Bedrohung (Exposition) und internen Bewältigungsmechanismen. Die internen Bewältigungsmechanismen können auch als eine Form der Resilienz gesehen werden, welche die Bewältigungskapazität einer betroffenen Gesellschaft gegenüber Naturgefahren bestimmen. Betreffend der Auseinandersetzung mit den Begrifflichkeiten argumentiert Alexander (2013), dass die Ursachen für Vulnerabilität und Resilienz in Armut, Marginalisierung gesellschaftlicher Gruppen und der Gefährlichkeit bestimmter Örtlichkeiten zu suchen sind. In beiden Fällen seien folglich Anpassungsmechanismen im Sinne von (oft kulturell oder historisch bedingten) Entscheidungsprozessen notwendig, um negative Auswirkungen zu verringern.

Zunächst werden in den folgenden Kapiteln die unterschiedlichen Dimensionen von Vulnerabilität mit einem Bezug auf die Situation in Österreich vorgestellt. Anschließend erfolgt ein Review zu unterschiedlichen Naturgefahren-Prozessen mit einem Fokus auf Extremereignissen.

27.2 Unterschiedliche Dimensionen von Vulnerabilität

In Bezug auf das Management von Naturgefahren erfolgt die Analyse der Vulnerabilität standardgemäß im Rahmen einer Risikoanalyse. Das Konzept der Risikoanalyse hat sich hierbei nicht erst seit der Implementierung der EU Hochwassermanagement-Richtlinie (Commission of the European Communities, 2007) etabliert, vor allem in Bezug auf alpine Naturgefahren existieren seit Jahren entsprechende Vorschläge (Kienholz, 1994; Borter, 1999), die in ihren Wurzeln auf die frühen Arbeiten der sogenannten Chicagoer Schule in den Vereinigten Staaten von Amerika zurückgehen (White, 1945; Kates, 1962; Burton et al., 1978).

Die zeitlich-räumliche Analyse von Vulnerabilität begann mit Versuchen, das steigende Ausmaß von Hochwasserschäden in den Vereinigten Staaten von Amerika in Verbindung mit beispiellosen Anstrengungen und Aufwendungen Reduktion von naturgefahren-bedingten Schäden zu erklären (White, 1945; White et al., 1958). Einige von White's bemerkenswertesten Arbeiten (White, 1945) waren ein besonderer Stimulus für nachfolgende Studien und beinhalteten die Identifizierung und Klassifizierung gesellschaftlicher Anpassungsmechanismen an Überschwemmungen, die generelle Wahrnehmung von Naturgefahren und die Wahl geeigneter Managementstrategien (Hinshaw, 2006). Somit wurde schon lange vor der von Starr (1969) veröffentlichten wegweisenden Arbeit ein Versuch unternommen, gesellschaftliche Anpassung an Risiken und damit verbundener Vulnerabilität zu erklären. Ein wesentliches Merkmal jener frühen Arbeiten war es bereits, zwischen Extremereignissen und jenen Ereignissen, die häufiger auftreten, zu unterscheiden, eine Diskussion, die bis heute die Auseinandersetzung mit Vulnerabilität auch in Österreich prägt.

Anpassung an ein Leben mit Naturgefahren und eine Verringerung der Vulnerabilität können grundsätzlich baulicher und nicht-baulicher Natur sein. Bereits White propagierte, soweit machbar, eine nicht-bauliche (zum Beispiel planerische) Anpassung an Naturgefahren anstelle der baulichen Maßnahme (wie zum Beispiel Dämme, Rückhaltebecken), die die Diskussion im frühen 20. Jahrhundert beherrschten. Vor allem die nicht-baulichen Maßnahmen, wie sie beispielsweise über die gesetzlichen Rahmenbedingungen geschaffen werden können, werden in den vergangenen Jahren wieder vermehrt diskutiert, und bleiben zentral in Bezug auf eine Reduktion der Vulnerabilität. Nach Atkisson et al. (1984) bestehen private und/oder öffentliche Aufwendungen zur Reduktion der Vulnerabilität zum größten Teil aus Anlageinvestitionen (Dämme, Rückhaltebecken, usw.), während andere hauptsächlich wiederkehrende Ausgaben für Personal beinhalten (Lawinenwarndienste). Während einige Aufwendungen für Anpassungsstrategien durch die öffentliche Hand getätigt werden (gesetzliche Regelungen), haben andere einen starken privaten Charakter (lokaler

Objektschutz). Einige Aufwendungen beinhalten physikalische Eingriffe in das Prozessverhalten einer Naturgefahr (technischer Schutz in den Prozessbruchgebieten), während andere darauf abzielen, die Auswirkungen natürlicher Prozesse zu reduzieren (Retentionsbecken) und wieder andere nur die Verminderung der Exposition betroffener Bürgerinnen und Bürger beinhalten (Evakuierung).

Die Vulnerabilität im Zusammenhang mit Naturgefahren in Österreich ist von Seiten der Praktiker – beispielsweise der Wildbach- und Lawinerverbauung oder der Wasserbauverwaltungen der Länder – üblicherweise definiert als die physische Auswirkung gefährlicher Ereignisse auf exponierte Elemente (Gebäude, Infrastruktur, vgl. auch BMLFUW, 2005, 2009). Dementsprechend wird Vulnerabilität, wenn sie quantitativ bewertet wird, als der erwartete Verlust für ein Element definiert, das aufgrund der Auswirkungen eines potentiellen Ereignisses gefährdet ist. Diese Ereignisse sind ihrerseits durch eine bestimmte Intensität, Häufigkeit und Einwirkungsdauer charakterisiert, die alle die Vulnerabilität beeinflussen. Diese Perspektive aus den Natur- und Ingenieurwissenschaften fokussiert auf bauliche oder strukturelle Empfindlichkeit, und dementsprechend nimmt Vulnerabilität einen Wert von 0 (keine Schädigung) bis 1 (vollständige Zerstörung) an (Varnes, 1984). Die Analyse und Bewertung der physischen Vulnerabilität benötigt neben entsprechenden Angaben auf der Gefahrenseite Information über unterschiedliche Eigenschaften der betroffenen Objekte, wie Gebäudekategorien oder -typen, Baumaterialien und -techniken, Wartungszustand, Vorhandensein von Schutzstrukturen, Vorhandensein von Warnsystemen usw. (Fell et al., 2008a,b). Aus diesem Grund beschreiben Vulnerabilitätswerte die Empfindlichkeit gefährdeter Elemente gegenüber verschiedenen Prozesstypen mit unterschiedlicher räumlicher und zeitlicher Intensität (Fließstiefen, Einstauhöhen, Strömungsgeschwindigkeiten, Drücke, usw.).

Im Bereich der Sozialwissenschaften ist eine deutliche konzeptionelle Trennung zwischen Vulnerabilität, Gefährdung und Risiko zu beobachten (Renn, 2008a). Vulnerabilität wird als eine Prädisposition und ein Potenzial für eine Schädigung der Gesellschaft oder eines Individuums verstanden. Folglich ändert sich die Schadensanfälligkeit nicht, wenn sich die Gefahr ändert – vielmehr wird die Höhe des Risikos über eine geänderte Exposition beeinflusst. Ansätze zur Bestimmung der Vulnerabilität unterscheiden sich nicht nur in Hinblick auf die Freiwilligkeit eingegangener Risiken (Starr, 1969), sondern berücksichtigen auch individuelle und soziale Einflüsse, die durch die Risikowahrnehmung eines Individuums gefiltert werden. Abhängig von verschiedenen Charakteristika einer Gefahr, wie Eintrittswahrscheinlichkeit, Schadensausmaß, Wahrnehmung, Unsicherheit, Allgegenwart, Persistenz, Reversibilität, Zeitverzögerung und Mobilisierungspotential kann sich der Grad der Vulnerabilität erheblich ver-

ändern (Renn, 2008a). Eine große Herausforderung in der Vulnerabilitätsforschung besteht darin, dass »nicht nur Menschen anders sind, sondern sich kontinuierlich verändern, sowohl als Einzelpersonen als auch als Gruppen. Diese ständige Veränderung innerhalb des menschlichen Systems [...] interagiert mit dem physischen System, um Gefährdung, Exposition und Verwundbarkeit [...] dynamisch zu sehen« (Mileti, 1999, S. 119, Übersetzung durch Autoren). Diese Veränderungen führen zu dem Postulat, dass die alleinige Berücksichtigung von physischer oder sozialer Vulnerabilität nicht ausreicht, um die Schadensanfälligkeit umfassend zu bewerten. Vielmehr müssen weitere institutionelle und wirtschaftliche Aspekte in eine gesamthafte Betrachtung integriert werden. Schädigungen können dabei als Voraussetzung für physische und ökonomische Anfälligkeit angesehen werden, während institutionelle Vulnerabilität und soziale Aspekte den Rahmen für eine Schadensanfälligkeit im Allgemeinen bilden. Auf diese Weise existieren mehrere Interaktionen zwischen diesen Konzepten der Vulnerabilität.

27.2.1 Physische Vulnerabilität

Unter dem Gesichtspunkt der Natur- und Ingenieurwissenschaften (und somit unter Vernachlässigung jeglicher sozialer Komponente) wird Vulnerabilität als ein funktionaler Zusammenhang zwischen Prozessgröße oder -intensität, der daraus resultierenden Auswirkung auf gefährdete Elemente (Gebäude, Infrastruktur oder auch Personen, vgl. beispielsweise Totschnig und Fuchs, 2013; Milanesi et al., 2016; Unterrader et al., 2018) und exponierten Werten betrachtet. In Bezug auf konstruktive Risikoelemente bezieht sich Vulnerabilität auf die Anfälligkeit von physischen Strukturen und ist definiert als der erwartete Schadensgrad, der sich aus den Auswirkungen eines bestimmten (Bemessungs-)Ereignisses auf die gefährdeten Elemente ergibt. Die Quantifizierung von Vulnerabilität erfordert die Bewertung verschiedener Parameter und Faktoren wie Art des Elementes, das gefährdet ist, Widerstand und implementierte Schutzmaßnahmen (beispielsweise lokaler Objektschutz, Holub et al., 2012). Im Hinblick auf die gefährlichen Prozesse müssen empirische Parameter wie Größe und Häufigkeit bewertet werden. Dabei spielt das Magnitude-Frequenz-Konzept eine Schlüsselrolle. Wenn die Aktivität verschiedener Gefahrenprozesse auf einer gegebenen Zeitskala verglichen wird, treten einige Prozesse kontinuierlich auf, während andere nur unter bestimmten Auslösebedingungen auftreten. Der Begriff der Episodizität wurde von Crozier (2004) verwendet, um auf die Tendenz zu verweisen, dass viele Naturgefahrenprozesse diskontinuierliches Verhalten zeigen und sporadisch als eine Reihe einzelner Ereignisse auftreten. Dies ist bei vielen Naturgefahrenstypen in Österreich evident, wenn die Beziehung

zwischen auslösendem Ereignis (beispielsweise intensiver, aber diskontinuierlicher Niederschlag) und der Reaktion im System (beispielsweise Bildung von Murgängen infolge von Erosion und Mobilisierung von Feststoffen in einem Gerinnebett) nicht konstant ist. Deshalb werden stattdessen häufig auslösende Schwellenwerte verwendet, um indirekt die Wahrscheinlichkeit des Auftretens eines bestimmten Bemessungsereignisses zu ermitteln, und es wird angenommen, dass eine Relation zwischen dem Auftreten einer Naturgefahr und dem auslösenden Ereignis besteht (Fuchs, 2009).

Auch wenn das Konzept der physischen Vulnerabilität in den letzten Jahrzehnten Gegenstand umfangreicher Forschungsaktivitäten und zahlreicher praktischer Anwendungen gewesen ist, bestehen nach wie vor erhebliche Lücken in Bezug auf standardisierte funktionale Zusammenhänge zwischen einwirkenden Kräften durch auftretende Gefahrenprozesse und den verursachten strukturellen Schäden (Papathoma-Köhle et al., 2017). Diese Lücken ergeben sich zu einem großen Teil aus dem allgemeinen Mangel an verfügbaren Daten, insbesondere in Bezug auf (1) die Schadenshöhe und (2) die tatsächlich aufgetretenen und für unterschiedliche Schadensbilder ursächlichen Schäden (Fuchs et al., 2018). Folglich werden mögliche Schäden aufgrund zukünftiger Ereignisse häufig nur auf der Grundlage vorhandener empirischer Beobachtungen vorhergesagt (Fuchs et al., 2007; Totschnig et al., 2011; Papathoma-Köhle, 2016). Als Konsequenz spiegeln die Ergebnisse das durchschnittlich erwartete Systemverhalten (erwartete Zerstörung durch einwirkende Kräfte) für eine bestimmte Anzahl gefährdeter Elemente wider, beispielsweise die gesamte Fläche eines Wildbachkegels oder eines Lawinenauslaufbereichs, die theoretisch von einem Bemessungsereignis bestimmter Größe betroffen sein kann. Wie Ereignisse in der Vergangenheit zeigten, werden jedoch bei einem Ereignis häufig nur Teile eines Ablagerungs- oder Auslaufbereiches betroffen, was operationell durch räumliche Reduktionsfaktoren berücksichtigt werden sollte (beispielsweise BMLFUW, 2005). Da der Widerstand gegen Aufprallkräfte auch von der Art der exponierten Risikoelemente abhängt, die typischerweise eine hohe räumliche Variabilität aufweisen, ist die Bestimmung der physischen Vulnerabilität sehr zeit- und damit kostenintensiv. Darüber hinaus sind die Auswirkungen bestimmter Naturgefahrenprozesse im Auslaufbereich noch nicht vollständig untersucht, so dass modellierte Staudrücke oft nur eine grobe Abschätzung des realen Systemverhaltens darstellen. In Bezug auf alpine Naturgefahren gab es Beispiele, wo eine Lawine ein senkrecht zur Lawinenachse gelegenes Gebäude zerstörte (im Weiler Valzur, Paznaun, Österreich, im Februar 1999), und es gab Fälle, in denen ein solches Gebäude in der Lage war, eine Lawine vollständig zu stoppen (im Dorf Airolo, Tessin, Schweiz, Februar 1951). Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die Komponente der physischen Vulnerabilität innerhalb der Risikoanalyse für Naturgefahren aufgrund fehlender experimenteller oder

beobachteter Daten oft nur angenähert werden kann (Sturm et al., 2018a,b). Dennoch wird in der vorliegenden Studie die physische Vulnerabilität als Quelle für jedes andere Vulnerabilitätskonzept verstanden, da, wenn es keine Auswirkungen aufgrund eines gefährlichen Ereignisses auf gefährdete Elemente gäbe, kein Verlust entstehen und die Gesellschaft als Ganzes nicht Schaden erleiden würde (Fuchs, 2009).

27.2.2 Institutionelle Vulnerabilität

Wenn das Konzept der Vulnerabilität über einen anthropozentrischen Ansatz definiert wird, hängt menschliches Verhalten mit den Auswirkungen von Naturgefahren zusammen. Dementsprechend haben Einzelpersonen eine Reihe von Wahlmöglichkeiten, um die Exposition zu reduzieren und die Vulnerabilität zu verringern, die durch ein Rahmenwerk bestimmt wird, das aus dem vorherrschenden politischen System und den damit verbundenen institutionellen Strukturen besteht (Papathoma-Köhle und Thaler, 2018). Daher wird die Perspektive der institutionellen Vulnerabilität durch die soziopolitischen, kulturellen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen definiert, die zusammen die Gefährdung ausdifferenzieren und die damit verbundene Auswirkung sowie die Fähigkeit, sich von Schäden zu erholen und zukünftige Bedrohungen abzuwehren, bestimmt (Eakin und Luers, 2006). Das Konzept der institutionellen Vulnerabilität betont die Interaktion zwischen Mensch und Umwelt und ist definiert durch bestehende Ungleichheiten bei der Verteilung von und dem Zugang zu Ressourcen (Wisner et al., 2004; Eakin und Luers, 2006). Maßgeblich hierfür sind Faktoren wie die Ausgestaltung des rechtlichen Rahmens und dessen Umsetzung, Kommunikationsdefizite und mangelnde Beteiligung der maßgeblichen Akteure, die verfügbaren Risikotransfersysteme, sowie Landnutzungsplanung (Papathoma-Köhle und Thaler, 2018). Im Hinblick auf das Ziel, die Vulnerabilität zu verringern, und unter Berücksichtigung der dargelegten Komplexität der Schadensanfälligkeit gegenüber Naturgefahren, wird der Umgang mit Naturgefahren weitgehend dem politischen Entscheidungsträger zugewiesen (Rudolf-Miklau et al., 2015). Daher wird in Österreich die individuelle Vorsorge zunehmend vernachlässigt, und die Institutionen übernehmen die Verantwortung für Entscheidungen und Maßnahmen, um das Naturgefahrenrisiko zu mindern und die Schadensanfälligkeit zu verringern (Kanonier, 2006). Zu diesen Entscheidungen und Maßnahmen gehören (1) die Verringerung der Eintrittswahrscheinlichkeit potentiell gefährlicher Prozesse, die in Österreich seit Jahrzehnten institutionell von unterschiedlichen Akteuren (BMNT, BMI, Wasserbauverwaltungen der Länder, Wildbach- und Lawinenvorbauung) wahrgenommen werden, und (2) die Reduktion der negativen

Auswirkungen von Naturgefahren (Schäden) durch Übertragung der Verlustwahrscheinlichkeit auf eine größere Gemeinschaft (Versicherungen, Katastrophenfonds). Nach Frey (1990) können Institutionen aufgrund verschiedener Aspekte in drei Typen eingeteilt werden:

- 1) Institutionen definiert als Verfahren und Systeme, durch die Entscheidungen innerhalb einer Gesellschaft getroffen werden. Zu den wichtigsten Systemen gehören der Markt (aus wirtschaftlicher Sicht), das politische System der Demokratie, andere Verhandlungssysteme wie rationalisierte Hierarchien und die damit verbundenen Handlungsweisen.
- 2) Institutionen definiert als formelle und informelle Regeln, die menschliches Handeln bestimmen, wie das Rechtssystem, das von der jeweiligen politischen Entität festgelegt wird, den traditionellen Rahmen, der aufgrund der Religion geschaffen wurde, und die durch die Geschichte entwickelten sozialen Normen.
- 3) Institutionen, die als Organisationen definiert sind, wie etwa die Gesamtstruktur des Staates, Organisationen und Bürokratien, aber auch Vereine, die Familie und informelle Gruppen von Individuen, die ein gemeinsames Ziel verfolgen.

Nach North (1990) prägen diese Institutionen die Regeln innerhalb einer Gesellschaft und zwischen verschiedenen gesellschaftlichen Akteuren; und in Bezug auf die Vulnerabilität sind diese Institutionen von erheblicher Bedeutung, um die Auswirkungen von Naturgefahren für Einzelpersonen und die Gesellschaft zu reduzieren (Papathoma-Köhle und Thaler, 2018). Verhaltensmuster in Gesellschaften spiegeln jedoch individuelle Entscheidungen wider, bei denen Individuen versuchen, ihren Nutzen zu maximieren und ihre Kosten zu minimieren. Daher treffen Individuen Entscheidungen darüber, wie sie handeln sollen, indem sie die Kosten und den Nutzen verschiedener Handlungsmöglichkeiten vergleichen. Infolgedessen werden in der Gesellschaft Verhaltensmuster entwickelt, die sich aus diesen Entscheidungen ergeben.

In Österreich ist der institutionelle Rahmen für den Umgang mit Naturgefahren durch das allgemeine Prinzip der staatlichen Verantwortung für die Reduktion verschiedener Risiken geprägt (Fuchs, 2009; Papathoma-Köhle und Thaler, 2018). Herausforderungen im Zusammenhang mit einer Reduktion der institutionellen Vulnerabilität wurden jedoch bisher nicht explizit berücksichtigt: Zum einen ist die Gesetzgebung zu Naturgefahren aufgrund der föderalen Struktur der Republik Österreich vielfältig (Hattenberger, 2006; Kanonier, 2006; Kerschner, 2008). Mehrere Artikel auf Bundesebene werden durch verschiedene Regelungen auf Ebene der Bundesländer (Länderebene) und sogar darunter auf Gemeindeebene ergänzt, insbesondere in Bezug auf die Flächennutzungsplanung. Zum anderen ist das Risikobewusstsein der Bevölkerung in Österreich

aufgrund eines Informationsdefizits in Bezug auf (1) das zeitliche und räumliche Auftreten von Naturgefahren und (2) Ansätze und Konzepte zur Vermeidung von Verlusten nicht sehr weit verbreitet (Thaler et al., 2018a). Darüber hinaus existieren in Österreich unterschiedliche Strategien, um die Auswirkungen von Naturgefahren zu verringern, insbesondere in Bezug auf die Kompensation von Schäden (Prettenhaler und Vettors, 2005). Diese Strategien, vor allem der staatliche Katastrophenfonds (Republik Österreich, 1996, 2005) und private Versicherungslösungen, sind weder in Bezug auf die Risikominimierung besonders koordiniert noch schaffen sie erhebliche Anreize, Verluste zu vermeiden, ein Aspekt, der in Bezug auf die institutionelle Vulnerabilität in den folgenden Absätzen detaillierter diskutiert wird.

Mehrere Autoren argumentieren, dass neben politischen Gremien und nachgeordneten Behörden – oft aufgrund der jeweiligen rechtlichen Rahmenbedingungen – ein Versicherungssystem ein vielversprechender institutioneller Rahmen sein könnte, um die Vulnerabilität durch Naturgefahren zu reduzieren (für eine Zusammenstellung vgl. Ungern-Sternberg, 2004; Fleischhauer et al., 2006; Fleischhauer et al., 2012). In anderen Studien wurde parallel dargelegt, dass der institutionelle Rahmen von Versicherungen im Bereich von Naturgefahren nur eine suboptimale Lösung darstelle, zumal der Versicherungsmarkt in Österreich nicht oder nur unzureichend funktioniert (Prettenhaler et al., 2017). Der generelle Grund für diese Defizite liegt in den Phänomenen der adversen Selektion und des moralischen (subjektiven) Risikos (Jaffee und Russell, 2003; Raschky, 2008). Beide Phänomene sind in Österreich aufgrund einer – zumindest im Bereich privater Haushalte – freiwilligen Versicherung gegen Naturgefahren anwendbar (Holub und Fuchs, 2009; Papatoma-Köhle und Thaler, 2018). Adverse Selektion ist definiert als die nachteilige Auswirkung auf einen Versicherer, wenn Risiken gezeichnet werden, die eine höhere Verlustwahrscheinlichkeit haben als die, die durch den anwendbaren Versicherungstarif vorgesehen ist. Dies tritt in dem zur Zeit in Österreich vorherrschenden System auf, da nur Personen und Unternehmen, die sich in gefährdeten Gebieten befinden, dazu neigen, Versicherungen abzuschließen. Subjektives Risiko wird ein Phänomen bezeichnet, bei dem Individuen sich so verhalten, dass sie ihre eigenen Bedürfnisse befriedigen können, aber ihr Verhalten auf Kosten anderer (oder der Allgemeinheit) geht. Das Phänomen des moralischen (subjektiven) Risikos in Bezug auf Naturgefahren beschreibt eine Situation, in der eine Person, die teilweise durch ein Verlustkompensationssystem (beispielsweise Katastrophenfonds) geschützt ist, weniger aufmerksam gegenüber negativen Folgen von Gefährdungen ist, da diese negativen Folgen (teilweise) vom Entschädigungssystem getragen werden – dies führt schlussendlich zu einem Marktversagen für Vorsorgeleistungen (Commission of the European Communities, 2013).

Dieses Marktversagen führte zu alternativen institutionellen Rahmenbedingungen in Österreich, wie unterschiedlichen Formen staatlichen Eingreifens, um eine bestimmte Katastrophenhilfe, Entschädigung oder staatliche Hilfe zu garantieren. In Ländern ohne Pflichtversicherung wie Österreich liegt der Risikotransfer daher oft – und vor allem in Bezug auf Schäden in Privathaushalten – in der Verantwortung der politischen Institutionen. Auf internationaler Ebene sind staatliche Ausgleichszahlungen eine bewährte Lösung zur Entschädigung von Hochwasserschäden (Arnell, 2000), die Wirksamkeit ist jedoch unterschiedlich, Programme werden oft ineffizient verwaltet und Entscheidungen politisch motiviert (Priest et al., 2005; Thaler und Hartmann, 2016; Thaler et al., 2018b). Abgesehen von dieser allgemeinen Kritik wird jede Übernahme von staatlichen Entschädigungsleistungen neben einer bestehenden kommerziellen Versicherungsbranche als kontraproduktiv betrachtet, da sie ein großes Hemmnis gegenüber Individuen darstellen würde, die eine eigene Versicherung abschließen (Gruber, 2008). Die Neigung von Individuen, sich aufgrund der Abhängigkeit von einer erwarteten finanziellen Unterstützung durch staatliche Hilfsprogramme oder Spenden anderer Personen nicht zu versichern (oder andere Maßnahmen zur Risikoreduktion zu ergreifen), wird als *Charity Hazard* bezeichnet (Raschky und Weck-Hannemann, 2007). Wie von Raschky und Weck-Hannemann (2007) ausführlicher erläutert, kann derartige staatliche Hilfe oder der Bezug von Spendengeldern dazu führen, dass Individuen gar nicht oder nur unzureichend versichert sind. Zusätzlich zu einem unzureichenden Versicherungsschutz könnte eine finanzielle Entschädigung durch die Regierung zu einer ineffizienten Zuweisung öffentlicher Mittel führen, wie Garrett und Sobel (2003) in Bezug auf die staatlichen Katastrophen-Ausgleichszahlungen in den Vereinigten Staaten von Amerika argumentierten.

Abgesehen von den Auswirkungen der adversen Selektion und des subjektiven Risikos ist die Marktdurchdringung von (in der Tat erheblich limitierten) Versicherungspolizen in Österreich aufgrund des Mechanismus der Verlustkompensation durch den Katastrophenfonds relativ gering. Der durch das Bundesgesetz über den Katastrophenfonds von 1966 (Republik Österreich, 1966) geregelte Fonds bildete die Rechtsgrundlage für die Bereitstellung nationaler Ressourcen für (1) vorbeugende Maßnahmen zur Errichtung und Erhaltung von Schutzmaßnahmen vor Naturgefahren und (2) finanzielle Unterstützung der Länder, damit sie Einzelpersonen und private Unternehmen für Verluste durch Naturgefahren in Österreich entschädigen können. Um den Katastrophenfonds zu finanzieren, wurden Zuschläge auf Einkommenssteuern, Lohnsteuern, Kapitalertragsteuern und Körperschaftssteuern erhoben. Nach mehreren Änderungen wurde der Rechtsakt von 1966 durch das sogenannte Bundesgesetz über den Katastrophenfonds von 1996 revidiert (Republik Österreich, 1996). Das Budget des Katastrophenfonds stammt aus einem fest-

gelegten Prozentsatz (seit 1996: 1,1 %) des Bundesanteils an den Einkommensteuern, den Kapitalertragsteuern und den Körperschaftssteuern, der für private Haushalte etwa 7 € und für Unternehmen 30 € beträgt (Vetters und Prettenthaler, 2004). Finanzmittel, die nicht in einem jeweiligen Jahr ausgegeben werden, unterliegen einer Rückstellung. Gemäß Rechnungshof sind die Höchstgrenzen des Katastrophenfonds auf 29 Mio. € begrenzt. Um von diesen Kompensationen zu profitieren, müssen Individuen weder spezielle Prämien zahlen, noch müssen sie anderweitig zu den verfügbaren Mitteln beitragen – ein starker Anreiz für risikoreicheres Verhalten. Darüber hinaus, und dies ist vermutlich ein weiterer Grund für die geringe Marktdurchdringung, werden die Entschädigungen des Katastrophenfonds regelmäßig gekürzt, sobald (private) Versicherungsentschädigungen ausbezahlt werden (Holub und Fuchs, 2009). Dies hat zur Folge, dass risikobewusste Personen, die private Naturgefahrenversicherungen abschließen, de facto schlechter gestellt sind als weniger risikobewusste Personen, die keine Vorsorgemaßnahmen treffen, was wiederum zu einer rückläufigen Nachfrage in der Naturgefahrenversicherung in Österreich führt. Daher sind Menschen nicht aufgrund politischer Instabilität verletzbar, sondern aufgrund des institutionell festgelegten Systems des Verlustausgleichs, und wenn Institutionen versagen, entsteht Vulnerabilität.

27.2.3 Ökonomische Vulnerabilität

Institutionelle Vulnerabilität, wie oben skizziert, führt, in Kombination mit physischer Vulnerabilität aufgrund der Auswirkungen von Naturereignissen auf die menschliche Umwelt, zu einer ökonomischen Vulnerabilität von exponierten Werten. Dadurch wird die Widerstandsfähigkeit einzelner oder institutioneller Eigentümer reduziert. Dabei wird eine bestimmte Auswirkung (ein Schaden aufgrund) eines Naturereignisses nur in Bezug auf bestehende Werte zu einer Gefahr. Wie bereits in Russell (1970) dargelegt, kann die Quantifizierung von Schäden durch Naturgefahren mit dem Begriff der ökonomischen Vulnerabilität bezeichnet werden, in der Regel als ein relatives Verhältnis einer Schadenhöhe in Bezug auf die – wie auch immer geartete – wirtschaftliche Aktivität in der untersuchten Region.

Für das Gebiet der Republik Österreich kam es beispielsweise zwischen 1972 und 2004 zu insgesamt 4.894 Schadensereignissen durch Wildbachgefahren (Oberndorfer et al., 2007). Bei fast 4.300 Ereignissen konnte der Prozessstyp aufgrund der Ereignisdokumentation der Wildbach- und Lawinverbauung ex-post ermittelt werden, was zu einer Klassifizierung führte zwischen Überschwemmungen (0,3 %), Überschwemmungen mit Geschiebetransport (21,8 %), hyperkonzentrierten Abflüssen (49,2 %) und Murgängen (28,7 %). Der durchschnittli-

che direkte Schaden pro Ereignis aufgrund dieser 4.300 Datensätze belief sich auf ca. 170.000 €, und die jährlichen Verluste beliefen sich im Schnitt auf rund 25 Millionen €. Etwa zwei Drittel der Schäden könnten Gebäuden und ein Drittel Infrastruktureinrichtungen zugeschrieben werden. Im Untersuchungszeitraum wurden 21 Menschen körperlich geschädigt und 49 Menschen starben. In Abbildung 01 ist die jährliche Verteilung der Schäden dargestellt, wobei in den Jahren 1975, 1978 und 1991 ein kumulativer Gesamtschaden von mehr als 1 Million € pro Ereignis auftrat. Demgegenüber betrug der durchschnittliche Schaden pro Ereignis in den Jahren 1976 und 1984 lediglich 11.000 € bzw. 16.000 €. Aus den Jahren 1974, 1990 und 2002 wurde eine beträchtliche Anzahl von Ereignissen gemeldet, was zu der Schlussfolgerung führte, dass eine hohe Anzahl von Ereignissen nicht notwendigerweise zu hohen ökonomischen Schäden führt und umgekehrt (Fuchs, 2009).

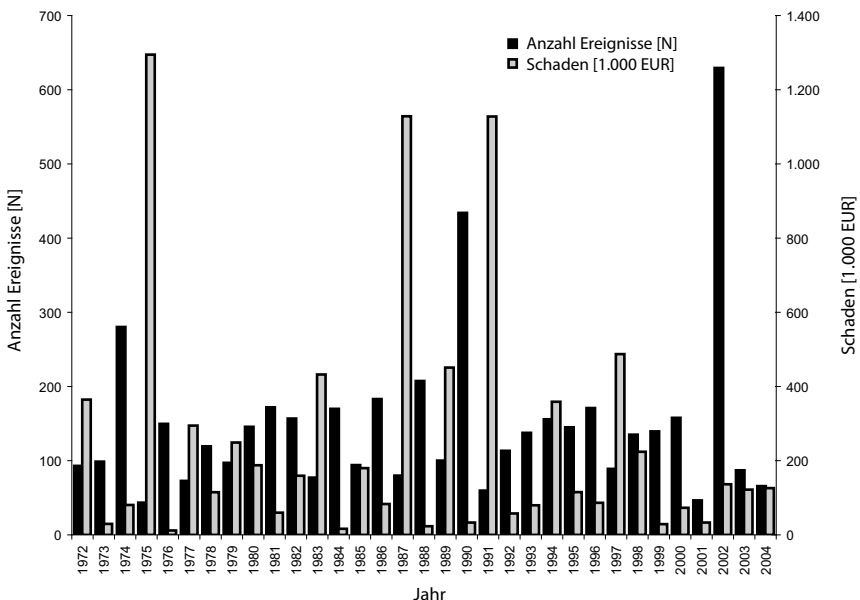


Abbildung 01: Wildbachereignisse 1972–2004 (N=4.296): Anzahl der Ereignisse und Schäden pro Jahr.

Figure 01: Annual number of torrential events and distribution of resulting average losses for the period 1972–2004 (N=4,296).

Quelle: Fuchs, 2009, S. 343

Eine Untersuchung ausgewählter gut dokumentierter Einzelereignisse und damit verbundener Schäden wurde durchgeführt, um die oben beschriebenen Gesamtwerte für den Zeitraum von 33 Jahren zu differenzieren. Diese Daten

wurden über Gemeinden und die für die Auszahlung staatlicher Beihilfen zuständigen Behörden der Länder nach dem oben genannten Bundesgesetz über den Katastrophenfonds von 1996 (Republik Österreich, 1996) zur Verfügung gestellt. Innerhalb dieses Bundesgesetzes ist die Zuteilung von Ressourcen gesetzlich vorgeschrieben. Verluste von Privathaushalten und Unternehmen aufgrund von Naturgefahren werden zu einem gewissen Grad vom Katastrophenfonds über Zuschüsse der Länder kompensiert. Der Katastrophenfonds, bzw. die Republik Österreich, subventioniert die Länder bis zu fast zwei Drittel jener finanziellen Unterstützung, die von den Ländern zur Unterstützung von Naturkatastrophen ausbezahlt wurde. Durch diese Entschädigungen erhalten die betroffenen Parteien eine Entschädigung bis zu einem bestimmten Prozentsatz des Gesamtbetrags der erlittenen Verluste (Fuchs, 2009):

- 1) Bei den Wildbachereignissen 1997 im Einzugsgebiet des Wartschenbachs in den Gemeinden Nußdorf-Debant und Lienz ergibt sich ein Gesamtschaden von 2 Millionen €; dieser wurde von den zuständigen Landesbehörden anerkannt, was zu einem Durchschnittsschaden von ca. 50.000 € je Antragsteller (bei einer Streuung von 300 bis 840.000 €) führt. Aufgrund gesetzlicher Regelungen des Katastrophenfonds wurde im Durchschnitt als staatliche Beihilfe an die Geschädigten ein Anteil von nur 52,6 % des anerkannten Schadens ausgezahlt, mit einer Spannweite zwischen 35 % und 80 % der individuell beantragten Summe.
- 2) Die Hochwasserereignisse im Jahr 2002 in der Gemeinde Maria Alm führten zu offiziell anerkannten Schäden in der Höhe von 1,5 Millionen € mit durchschnittlich 22.300 € pro Antragsteller. Die individuell anerkannten Schadenshöhen lagen zwischen 100 und 300.000 € – in beiden Fällen für Schäden durch Murgänge. Ein durchschnittlicher Anteil von fast 60 % wurde vom Katastrophenfonds zur Entschädigung angenommen. Die generelle Spanne lag zwischen 25 % und 100 % der individuell beantragten Schadenshöhe, wobei der Maximalanteil auch für Fälle eines konstruktiven Totalschadens bei Gebäuden galt. Einige Antragsteller erhielten jedoch keine Unterstützung, da ihre Verluste durch Versicherungsverträge gedeckt waren.
- 3) Die Wildbachereignisse 2003 in Achenkirch-Unteraubach, westlich des Achensees, führten zu einem amtlich anerkannten Gesamtschaden von 150.300 € mit durchschnittlich rund 8.000 € – diese geringen Schäden führten zu einem durch den Katastrophenfonds übernommenen durchschnittlichen Anteil von nur 23,7 %; mit einer Spanne zwischen 0 % und 45 %.
- 4) Zum Vergleich der Verluste aus Wildbachereignissen mit anderen Naturgefahren in Österreich wird als Beispiel das Lawinenereignis aus dem Jahr 1999 in der Gemeinde Galtür, herangezogen (Heumader, 2000; Keiler, 2004). Ein Gesamtschaden von 7,45 Millionen € wurde offiziell anerkannt, was im

Durchschnitt rund 60.000 € pro Antragsteller (einschließlich notwendiger Bestattungskosten) entspricht. Die individuell akzeptierten Förderungen lagen zwischen 220 € für kleinere Schäden an mobilen Gütern und 1,3 Millionen € für ein völlig zerstörtes Gebäude. Ein durchschnittlicher Anteil von rund 60 % wurde als staatliche Unterstützung für die geschädigten Parteien ausgezahlt, was gleichzeitig dem zulässigen durchschnittlichen Maximalwert der Unterstützung entspricht (Republik Österreich, 1996). Ein Teil der Gebäudeschäden sowie der notwendige Transfer von Verstorbenen wurden zu 100 % subventioniert, während andere Antragsteller keine staatliche Hilfe aus dem Katastrophenfonds erhielten.

Diese exemplarische Auflistung liefert starke Indizien dafür, dass Verluste tendenziell ereignisspezifisch sind, und somit die individuellen Schäden die zwischen 1972 und 2004 für das gesamte Land gemeldeten Durchschnittswerte deutlich übersteigen könnten. Die Auflistung zeigt jedoch einige Herausforderungen im Zusammenhang mit der ökonomischen Vulnerabilität auf (Fuchs, 2009):

- 1) Erstens sind Schäden, die sich aus der Gefährdung durch Naturgefahren ergeben, eine Funktion der individuellen Auswirkungen des Ereignisses auf gefährdete Elemente und der Lokalisierung dieser Elemente in Bezug auf das räumliche Auftreten dieses Ereignisses. Folglich sind die Schäden räumlich betrachtet hoch variabel und daher – aufgrund der Wahrscheinlichkeit des Auftretens mehrerer Ereignisse an demselben Ort – auch zeitlich variabel, was eine genaue Schätzung der Vulnerabilität erschwert. Folglich könnten Bürgerinnen und Bürger, wie in der Literatur berichtet, ihre eigene Vulnerabilität insbesondere in Bezug auf verlustreiche Ereignisse mit geringer Wahrscheinlichkeit unterschätzen. Detailliertere Studien für Österreich stehen jedoch hier jedoch aus.
- 2) Zweitens betragen die Verluste, die sich aus solchen Ereignissen ergeben, zwischen einigen vernachlässigbaren Hunderten von Euro und mehreren hunderttausend Euro im Falle der vollständigen Zerstörung von Gebäuden. Bedenkt man das mittlere jährliche Bruttojahreseinkommen der unselbstständig Erwerbstätigen in Österreich von rund 30.100 € (Männer) und 18.600 € (Frauen), können solche Schäden in Abhängigkeit von den persönlichen Verdienstmöglichkeiten Betroffener zu einer individuellen Insolvenz führen (Statistik Austria, 2013). Letzteres ist von besonderer Bedeutung, da Naturgefahren in Privathaushalten in Österreich bisher nicht vollständig einem umfassenden Versicherungssystem unterliegen (Schieferer, 2006; Holub und Fuchs, 2009; Pretenthaler und Albrecher, 2009). Versicherungsschutz gegen Schäden durch Naturgefahren gibt es bisher nur in Bezug auf Verluste durch Sturm (definiert als Luftströmung mit Geschwindigkeiten

- > 60 km/h), Hagel, Schneelast (Krafteinwirkung durch natürlich angehäufte Schneedecke), Steinschlag und Erdrutsche (hangabwärts gerichtete Bewegung von Boden und Gesteinsmassen entlang einer Scherfläche unter der Oberfläche, Schieferer, 2006). Im Gegensatz zu einer sehr begrenzten Deckung für diese Ereignisse sind Verluste aus anderen Naturgefahren nicht versicherbar, da das Risiko nicht von der Versicherung übernommen wird (Gruber, 2008). Daher muss der Entschädigungsmechanismus des Katastrophenfonds als einziges Instrument institutionalisierter Katastrophenhilfe in Österreich betrachtet werden. In den meisten Bundesländern wird der vom Katastrophenfonds ausgezahlte Entschädigungsanteil jedoch durch etwaige Versicherungsentschädigungen des Antragstellers gekürzt, was mit den oben skizzierten Problemen der institutionellen Vulnerabilität verbunden ist und die wirtschaftliche Anfälligkeit von betroffenen Personen erhöhen könnte.
- 3) Drittens könnte aufgrund des Bundesgesetzes über den Katastrophenfonds von 1996 (Republik Österreich, 1996) nur ein bestimmter Teil der entstandenen Verluste gedeckt sein. Damit bleibt ein erheblicher Teil des individuellen Schadens bestehen und die damit verbundene individuelle wirtschaftliche Anfälligkeit von Individuen dürfte noch immer hoch sein. Diese Finanzierungslücke wird (zumindest teilweise) nur dann geschlossen, wenn ausreichende private Katastrophenhilfe oder Spenden von Unternehmen zur Verfügung gestellt werden – wobei die Auswirkungen einer Naturgefahr zu einem typischen *Charity Hazard* werden (Raschky und Weck-Hannemann, 2007).

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass gesellschaftliche und politische Entscheidungen zur Verringerung der Vulnerabilität nicht unbedingt den individuellen Anforderungen an wirtschaftliche Resilienz entsprechen (vgl. auch Pfurtscheller und Thieken, 2013). Wenn Verluste aufgrund von Naturgefahren auftreten, bleibt für einzelne Bürgerinnen und Bürgern ein erheblicher Teil des Schadens aufgrund fehlender garantierter Zahlungen oder Verbindlichkeiten aus Versicherungspolicen übrig. Ein wesentliches Merkmal jeder finanziellen Maßnahme zur Verringerung der Vulnerabilität gegenüber Naturgefahren in Österreich ist, dass der private Sektor sie angesichts des potenziellen wirtschaftlichen Nutzens für die Gesellschaft nicht in ausreichender Menge bereitstellt, weshalb diese Maßnahmen Merkmale öffentlicher Güter oder gemeinsamer (Pool-)Ressourcen aufweisen (Fuchs und McAlpin, 2005). In der Theorie öffentlicher Güter wird davon ausgegangen, dass sich die Individuen ihrer Präferenzen bewusst sind, jedoch aufgrund der weitgehend kostenfreien Bereitstellung von Kompensationszahlungen oder staatlicher Subvention keine eigenen Maßnahmen zur Reduktion der Schadensanfälligkeit erfolgen. Daher wird die Bereitstellung von Schutz vor Naturgefahren zur Verringerung der

ökonomischen Vulnerabilität allgemein als eine staatliche Aufgabe angesehen. Da die Zuständigkeit für den Ausgleich von Schäden aufgrund von Naturgefahren auf Ebene der Länder aufgeteilt wird, sind die Länder nicht nur für die Bemessung des Schadens, sondern auch für die Schadenzahlung zuständig. Im Allgemeinen werden Entschädigungen, die von einer vor Ort ansässigen Expertenkommission erfasst wurden, direkt vom jeweiligen Bundesland an die betroffenen Personen ausbezahlt. Dennoch gibt es weder einen durchsetzbaren Rechtsanspruch auf finanzielle Unterstützung noch eine bestimmte Höhe der garantierten finanziellen Unterstützung aus dem Katastrophenfonds, wie die oben genannten Beispiele gezeigt haben. Folglich könnte eine erhebliche soziale Vulnerabilität resultieren.

27.2.4 Soziale Vulnerabilität

Soziale Vulnerabilität kann definiert werden als »die Merkmale einer Person oder gesellschaftlichen Gruppe und ihre Möglichkeiten und Fähigkeiten, die Auswirkungen einer Naturgefahr abzuwehren, zu bewältigen, zu widerstehen und sich davon zu erholen« (Wisner et al., 2004, S. 11, Übersetzung durch Autoren). Auf diese Weise definiert, umfasst Vulnerabilität eine Kombination von Faktoren, die den Grad bestimmen, in dem ein Individuum oder die Gesellschaft durch ein bestimmtes Ereignis in der Natur geschädigt wird. Dabei sind einige gesellschaftliche Gruppen anfälliger für Schäden, Verlust und Leid als andere; zu den die soziale Vulnerabilität beeinflussenden Schlüsselgrößen gehören gemäß gängigen Definitionen Zugehörigkeit zu einer bestimmten gesellschaftlichen Schicht, ethnische Zugehörigkeit, Beruf und Bildung, Geschlecht, Gesundheitszustand, Alter sowie Art und Ausmaß der vorhandenen sozialen Netzwerke. Aus diesem Grund sind benachteiligte Gruppen diejenigen, die aufgrund fehlender Ressourcen erhebliche Schwierigkeiten bei der Wiederherstellung ihrer Lebensgrundlage nach Katastrophen haben (Cutter, 2016, 2018). Zu diesen Ressourcen gehören Information, kulturelles Wissen, soziale Netzwerke, gesetzliche Rechte sowie physische Ressourcen (Wisner et al., 2004) – und finanzielle Reserven oder andere institutionelle Gegebenheiten.

Darüber hinaus deutet das Konzept der Sozialwissenschaften darauf hin, dass Vulnerabilität sozialen Charakter hat und nicht auf den potenziellen physischen Schaden oder die demografischen Determinanten beschränkt ist (Fekete und Montz, 2018). Die Veränderung der sozialwissenschaftlichen Ansätze in den Theorien zum Vulnerabilitätsparadigma spiegelt eine gewisse Dynamik innerhalb der Disziplin wider. Ausgehend von einer »unpolitischen« Orientierung des verhaltensorientierten Ansatzes in den 1980er und 1990er Jahren, die darauf abzielte, dass das menschliche Verhalten von der Umwelt bestimmt wird, kon-

zentrierte sich die Vulnerabilitätsforschung auf das Verständnis, wie Individuen und Gruppen auf Katastropheneignisse reagierten (Pelling, 2003). Folglich fokussierten die Managementempfehlungen eher auf Katastrophenreaktion und -wiederherstellung als auf die Verringerung der Anfälligkeit bestimmter sozialer Gruppen. Im Gegensatz dazu entwickelten sich neomarxistische Theorien in den Sozialwissenschaften, die Katastrophen und die zugrunde liegende Vulnerabilität als eingebettet in soziale Strukturen betrachteten (Hewitt, 1983), was es dem Management von Naturgefahren und -risiken erlaubte, die Bereitschaft einer Gesellschaft zur Reduktion der Vulnerabilität in die Handlungsempfehlungen miteinzubeziehen, einzubeziehen, um die Anfälligkeit zu reduzieren.

Wie Cutter (1996) feststellte, gibt es in den Sozialwissenschaften keine eindeutigen und weitgehend übereinstimmenden Definitionen von Vulnerabilität, im Gegensatz dazu unterscheiden sich Mehrfachdefinitionen nicht nur in mehreren Graden der Freiwilligkeit bei der Bewältigung von Naturgefahren, sondern berücksichtigen auch individuelle sowie soziale Einflüsse. Diese sind gefiltert durch bestimmte Bedingungen, die die Risikowahrnehmung eines Individuums bestimmen. Das kulturelle Umfeld bietet dabei die Basis, und soziale Faktoren verstärken die Wahrnehmung von Vulnerabilität. Soziale Faktoren, die die Bewertung der Vulnerabilität bestimmen, interagieren mit individuellen Faktoren wie dem Grad der Freiwilligkeit (wie fühlen sich Individuen gegenüber einer Gefahr ausgesetzt?), der persönlichen Erfahrung aus früheren Ereignissen, der Betroffenheit und generellen Lebenseinstellung, entwickelten Anpassungsstrategien und der Verarbeitung von Informationen. Schließlich führt die Bewertung der Vulnerabilität zu Anpassungs- und Bewältigungsstrategien, um entweder die Gefährdung zu kontrollieren oder die Schadensanfälligkeit zu verringern. Vulnerabilität ist in den Handlungen und multiplen Attributen beteiligter Akteure verwurzelt, manifestiert sich gleichzeitig auf mehr als einer (zeitlichen und räumlichen) Skala und ist durch multiple Belastungen (siehe auch Birkmann, 2006) und Kommunikation beeinflusst und gesteuert (Downing et al., 2005). Folglich ist das Konzept der sozialen Vulnerabilität in das Gesamtkonzept der Vulnerabilität – wie auch immer definiert – eingebettet und bezieht sich auf mehr als soziale Merkmale von Individuen und Teilen einer Gesellschaft, da auch Merkmale potenzieller physischer Exposition umfasst werden (Cutter et al., 2003).

Zahlreiche Rahmenwerke, konzeptionelle Modelle und Techniken zur Bewertung von Vulnerabilität wurden diskutiert, um sowohl die theoretischen Grundlagen als auch die praktische Anwendung des Konzepts der sozialen Vulnerabilität voranzutreiben. Eine detaillierte Darstellung würde den Rahmen dieses Kapitels sprengen, vgl. beispielsweise Adger (2006), McLaughlin und Dietz (2008) oder Cutter et al. (2008) – allen gemeinsam ist eine Argumentation im Sinne einer sozial-ökologischen Perspektive und integrierten Mensch-Um-

welt-Betrachtung. Die Interaktion zwischen Mensch und Umwelt ist von besonderem Interesse, da argumentiert wird, dass »menschliches Handeln und soziale Strukturen integraler Bestandteil der Natur sind und daher jede Unterscheidung zwischen sozialen und natürlichen Systemen willkürlich ist« (Adger, 2006, S. 268, Übersetzung durch Autoren). Vulnerabilität wird eingestuft als der Grad, in dem ein System für nachteilige Effekte empfänglich ist und die Belastung, mit denen dieses System nicht fertig werden kann. Daher sind die Empfindlichkeit und die Anpassungskapazität des Systems Schlüsselparameter, die beide als Widerstandsfähigkeit des Systems definiert werden können – die Größe der Störung, die absorbiert werden kann, bevor sich ein (soziales) System in einen radikal anderen Zustand verändert (Holling, 1973), oder der Widerstand des Systems gegen Störungen und die damit verbundene Geschwindigkeit der Rückkehr in den Gleichgewichtszustand oder Stabilität (Holling und Gunderson, 2002). Indem die Vulnerabilität als Gegenstück zur Resilienz definiert wird und folglich beide Begriffe als getrennte, aber miteinander verbundene Konzepte betrachtet werden, haben die beiden Aspekte für die Stabilität des Systems erhebliche Konsequenzen (zur Diskussion einer Koppelung von Vulnerabilität und Resilienz siehe Cutter, 2018). Beide Aspekte konzentrieren sich auf die Dynamik der sozialen Struktur bei der Erklärung der Vulnerabilität, entweder im Hinblick auf Systemänderungen oder auf die Stabilität des Systems.

Der erste Aspekt, der auf die Größe der Störungen fokussiert, die vor einer Veränderung der Systemkontrolle und -struktur auftreten können, bezieht sich auf die Fähigkeit einer Gesellschaft, die Auswirkungen von Naturgefahren zu bewältigen. Der zweite Aspekt konzentriert sich auf die Stabilität des Systems und dürfte daher im Rahmen der Bewältigung von Naturgefahren in Österreich besser anwendbar sein (Fuchs, 2009). Auch bei Extremereignissen ist die Anfälligkeit des (sozialen) Systems gegenüber Stress (aufgrund sozialer Netzwerke, wirtschaftlicher Rahmenbedingungen sowie institutioneller und politischer Faktoren) relativ gering, und folglich die Geschwindigkeit der Rückkehr in den Ausgangszustand erheblich höher als in vielen anderen (nicht-europäischen) Ländern. Mit anderen Worten, selbst wenn das Ausmaß eines Naturgefahrenereignisses hoch ist, ist die Anfälligkeit aufgrund der zahlreichen in den europäischen Gesellschaften installierten Ausgleichsmechanismen relativ gering, aufgrund der Überwälzung des Risikos auf eine größere Gemeinschaft bis hin zu staatlicher Entschädigung und privater Spende. Daher ist die Wiederherstellung nach einem Ereignis gut organisiert, und der anfängliche Systemzustand wird sofort oder mit nur geringer Verzögerung wiederhergestellt. Dafür spricht die relativ unmittelbare Rückkehr zur Normalität im öffentlichen Leben nach dem Lawinenereignis 1999 in großen weiten Teilen des europäischen Alpenraumes (Nöthiger et al., 2005) oder nach den Überschwemmungen 2005, 2013 und 2015. Nach diesen Argumenten ist es nicht die soziale Ungerechtigkeit, fehlender

Zugang zu Bildung oder eine Frage des Geschlechts, die den Rahmen für die soziale Vulnerabilität in Österreich bildet, im Gegensatz dazu ist der institutionelle Rahmen aus Landnutzungsvorschriften, Risikotransfermechanismen, individuellen Wünschen und erwarteten wirtschaftlichen Vorteilen von Individuen oder (einzelnen) gesellschaftlichen Gruppen. Folglich kann dieser Rahmen genutzt werden, um die soziale Vulnerabilität gegenüber Naturgefahren zu verringern.

In Bezug auf natürliche Extremereignisse liegen viele Landnutzungsvorschriften und die sich daraus ableitende regionale Entwicklung in der Hoheit der österreichischen Bundesländer, ebenso wie entsprechende gesetzliche Regelungen (Hattenberger, 2006; Kanonier, 2006). Sowohl für die regionale als auch für die lokale Planungsebene existieren unterschiedliche Gesetze in Bezug auf Landnutzung, Flächennutzungsplanung und Gebäudeentwicklung. In Anbetracht von Gebieten, die durch Naturgefahren gefährdet sind, ist das Ziel, Entwicklungsaktivitäten in nicht exponierte Gebiete zu lenken, ein allgemeines Prinzip zur Verringerung der Vulnerabilität, aber auch gleichzeitig aufgrund der zunehmenden Knappheit (sicherer) Flächen eine wichtige Aufgabe für lokale Verwaltungsbehörden. Obwohl die übergeordnete Regionalplanung und die nachgeordnete Raumplanung gesetzlich geregelt sind, ist eine Umsetzung auf lokaler Ebene nicht unbedingt ableitbar. Aufgrund der besonderen Interessen der beteiligten Akteure könnten Vorschriften höherer Ordnung in Bezug auf individuelle lokale Bedürfnisse alternativ gelöst werden, was zu einer verringerten Belastbarkeit und damit zu einer höheren sozialen Vulnerabilität führen würde.

In Bezug auf Risikotransfermechanismen, die darauf abzielen, die soziale Vulnerabilität zu verringern, liegt der Schwerpunkt in Österreich bislang auf der Kompensation von entstandenen Schäden, beispielsweise indem die Kosten für die Entschädigung auf einen Versicherungspool übertragen werden oder indem öffentliche Ausgaben oder staatliche Beihilfen ausgezahlt werden. Wie in Kapitel 27.2.2 erörtert, spielen solche staatlichen Beihilfen eine große Rolle bei der Schadenersatzleistung in Österreich, da Naturgefahren bisher nicht der Pflichtversicherung unterliegen (Holub und Fuchs, 2009). Da die staatliche Entschädigung nur einen gewissen Teil der monetären Verluste abdeckt, ergibt sich eine signifikante verbleibende soziale Vulnerabilität (vgl. Kapitel 27.2.3). Diese wird regelmäßig durch private Spenden verringert, was zeigt, dass inhärente Mechanismen innerhalb des gesellschaftlichen Netzwerks in der Lage sind, die negativen Auswirkungen von natürlichen Extremereignissen zu bewältigen und somit die Vulnerabilität erheblich zu reduzieren. Es wird allgemein postuliert, dass das Leben in von Naturgefahren bedrohten Gebieten zur Kategorie der unfreiwillig eingegangenen Risiken gehört – auch wenn dies nur zum Teil der Fall ist, da Betroffene grundsätzlich zwischen verschiedenen alternativen Le-

bens- und Wirtschaftsstandorten wählen können. Daher kann die soziale Vulnerabilität gegenüber Naturgefahren nicht alleine dem geografischen Standort selbst zugeschrieben werden (Hazard-of-Place-Modell, Cutter, 1996; Cutter et al., 2003), sondern ist auch das Ergebnis individueller Entscheidungen und Präferenzen. Es wird angenommen, dass das Thema der Freiwilligkeit, gemeinsam mit einer geeigneten Bewusstseinsbildung zukünftig zur Verringerung der sozialen Vulnerabilität in Österreich eine größere Rolle spielen wird (Rudolf-Miklau, 2005; Rudolf-Miklau et al., 2015).

Um das sich aus natürlichen Extremereignissen ergebende Risiko zu bewältigen, ist ein breiteres Verständnis des Konzepts der Vulnerabilität erforderlich (Fuchs, 2009). Es existieren verschiedene Konzepte von Vulnerabilität, die aufgrund sektoraler disziplinärer Schwerpunkte Unterschiede in den zugrunde liegenden Theorien zeigen. In Anerkennung dieser unterschiedlichen Wurzeln der vielfältigen Konzepte von Vulnerabilität wird deutlich, dass nur durch einen mehrdimensionalen Ansatz das Gesamtziel der Reduzierung des Naturgefahrenrisikos erreicht werden kann. In den vorangegangenen Kapiteln wurde gezeigt, dass disziplinäre Ansätze in der Vulnerabilitätsbewertung sich gegenseitig überschneiden, was zu der Schlussfolgerung führt, dass physische, wirtschaftliche, institutionelle und soziale Vulnerabilität voneinander abhängen und interagieren (Fuchs und Thaler, 2018).

27.3 Vorhandene Studien für das österreichische Staatsgebiet

Im Folgenden werden vorhandene und in wissenschaftlichen Datenbanken zugängliche Studien zu Vulnerabilität präsentiert, die sich auf Untersuchungen in Bezug auf extreme Wetterereignisse und deren Folgen innerhalb Österreichs beziehen und einen Rückschluss auf die Schadensanfälligkeit für Risikoelemente (Gebäude, Infrastruktur, aber auch Personen) erlauben. Dieses Vorgehen impliziert, dass möglicherweise vorhandene sogenannte »graue« Literatur keinen Eingang in die Untersuchung fand. Gemäß Vorgehen in der Studie wird »extrem« nicht mit einer bestimmten (und für alle Prozesse durchgängigen) Jährlichkeit definiert, sondern es wird vielmehr ein Augenmerk auf extreme (= von der Norm abweichende) Folgen aus unterschiedlichen Ereignissen gelegt. Mit Österreichbezug finden sich allgemeine Schadenbilder für unterschiedliche Naturgefahrenprozesse in Hübl und Tscherner (2015), die, genauso wie die zugrunde liegenden Vorstudien (Holub und Hübl, 2008) jedoch keine Rückschluss auf quantitative Vulnerabilitätsbeziehungen zulassen. Dies ist, trotz der ausführlichen Schadensdokumentationen, eine Herausforderung, die bei vielen derartigen Ereignissen zu beobachten ist (beispielsweise Habersack und Moser, 2003; BMLFUW, 2006; Hübl et al., 2006; Andrecs et al., 2007).

27.3.1 Hitze und Dürre

Der Bericht von Wanka et al. (2014) ist die erste Untersuchung in Österreich, die sich systematisch mit der Erstellung einer umfassenden Wissensdatenbank zur Hitzewahrnehmung, zum Bewusstsein hinsichtlich der Risiken von Hitze und zu Anpassungs- bzw. Bewältigungsstrategien von Personen (älteren Erwachsenen) befasst. Die Ergebnisse zeigen, dass Klimawandel und steigende Temperaturen tatsächlich eine bedeutende Determinante für die Vulnerabilität darstellen, vor allem für ältere Person, wobei gemäß der zugrunde liegenden Studie ältere Erwachsene (> 65 Jahre) mit niedrigem sozioökonomischen Status und schlechtem Gesundheitszustand sowie der Tendenz zur sozialen Isolation die höchste Schadensanfälligkeit aufweisen. Wie sehr Individuen unter Hitzestress leiden, und somit die Höhe der individuellen Vulnerabilität, hängt in hohem Maße von den eingesetzten Anpassungsstrategien ab (Trinkmenge, Wahl geeigneter Bekleidung, Aufenthalt im Freien bzw. in Innenräumen). Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass an Tagen mit mäßiger, starker und extremer Wärmebelastung die Mortalität steigt, wie eine Untersuchung von Muthers et al. (2010) auf Basis eines Vergleichs bioklimatologischer Daten mit Mortalitätsdaten für die Stadt Wien zeigte. Demnach weisen Hitzeperioden mit einer Wärmebelastung > 35 °C am ersten Tag eine mit 2,6 % signifikant erhöhte Mortalität auf, die in den folgenden Tagen ansteigt und am sechsten Tag mit 15,6 % das Maximum erreicht.

In Bezug auf Dürre in der Landwirtschaft haben Hohmann et al. (2018) für das Einzugsgebiet der Raab im südlichen Alpenvorland festgestellt, dass der sommerliche Abfluss um 40–70 % abnimmt, falls die Projektionen (plus2–4 K; minus15–30 % Niederschlag) zutreffen, mit einer entsprechend steigenden Anfälligkeit für Trockenperioden und einer resultierenden Vulnerabilität im Landwirtschaftssektor (Falloon und Betts, 2010), wie auch bereits früher von Alexandrov et al. (2002) für das nordöstliche Alpenvorland beschrieben (Abnahme der Getreideproduktion, jedoch Zunahme der Produktion von Sojabohnen). Jedoch muss bei der Interpretation derartiger Studien beachtet werden, dass die Schadensanfälligkeit unterschiedlicher Ackerfrüchte (wie auch anderer Früchte) je nach Pflanzentyp und Naturgefahrenstyp im Jahresverlauf hochvariabel ist (Punge und Kunz, 2016), und diese mit Bezug auf Österreich bislang nicht im Sinne von Schadensfunktionen dokumentiert ist (vgl. auch Dutta et al., 2003).

27.3.2 Sturm

Huttenlau und Stötter (2011) zeigen in einer Studie die räumlichen Variationen von Vulnerabilität in Bezug auf exponierte Gebäude im Bundesland Tirol auf. Die Methode basiert auf dem Konzept von absoluten und relativen Schäden, wobei der absolute Schaden monetär ausgedrückt wurde, und der relative Schaden im Sinne einer Schadenlast oder eines Schadensgrades in Abhängigkeit der spezifischen Gebäudewerte. Als allgemeine Schlussfolgerung halten die Autoren fest, dass das Gefährdungspotential in Nordtirol sehr hoch ist, während das entsprechende Gefährdungspotenzial südlich des Alpenhauptkammes in Osttirol eher gering ist. Die Ergebnisse der Studie zeigen, dass das Potenzial für absolute Schäden durch Stürme im Bereich von ca. 100–150 Millionen € ausschließlich für Gebäude und Inventar liegen. Der Begriff Vulnerabilität wurde jedoch ausschließlich als physische Anfälligkeit von Gebäuden und Inventar betrachtet. Um die (langfristigen) negativen Gesamtauswirkungen auf die betroffene (nationale) Wirtschaft oder Volkswirtschaft abzuschätzen, empfehlen die Autoren weitere Analysen.

Pretenthaler et al. (2012) präsentieren ein stochastisches Modell zur Bewertung des Sturmrisikos in Österreich, das die Windgeschwindigkeit und die tatsächlichen Verluste berücksichtigt. Aufgrund eines Gebäudewert-gewichteten Windindex verwenden sie für die Kalibrierung des Modells historische normierte Schadendaten von Wohngebäuden und entsprechende Daten zu Windgeschwindigkeiten. Szenarienbasiert werden darauf aufbauend Vulnerabilitätskurven generiert, die auf regionaler Ebene Auskunft über potentielle Verluste geben.

27.3.3 Starkniederschläge und Hagel

Bei Redaktionsschluss sind den Autoren keine Studien zur Vulnerabilität bekannt.

27.3.4 Sturzfluten

Bei Redaktionsschluss sind den Autoren keine Studien zur Vulnerabilität bekannt. In Bezug auf Gebäudeschäden können möglicherweise die gängigen Modelle für Überschwemmungsschäden verwendet werden, dieses ist jedoch noch zu validieren.

27.3.5 Überschwemmungen

Aufbauend auf dem Modell FLEMOps (Thieken et al., 2008) präsentieren Thieken et al. (2016) eine Fallstudie zur physischen Vulnerabilität von Wohngebäuden in der Gemeinde Lechaschau in Tirol. Die notwendigen Anpassungen der Schadenfunktion ist in Cammerer et al. (2013) beschrieben. Das Modell basiert, ähnlich wie auch die in Kapitel 27.3.7 vorgestellten Ansätze, auf der Einpassung von Kurven in empirisch ermittelte Schadensdaten, die ihrerseits einen Bezug zwischen Wasserstand und Schadenlast herstellen.

27.3.6 Bodenerosion

Bei Redaktionsschluss sind den Autoren keine Studien zur Vulnerabilität bekannt.

27.3.7 Sedimentkatastrophen, Feststoffereignisse

Da die Vulnerabilität eines Gebäudes von der Prozessintensität abhängt, muss neben der Schadenlast auch die den Schaden hervorrufende Intensität pro Gebäude bestimmt werden. Der gewählte Intensitätsparameter ist dabei vom zu untersuchenden Prozess abhängig. Im Falle von geschiebeführenden Wildbachprozessen (fluviatiler Feststofftransport bis Murgang) ist die Ablagerungshöhe ein häufig gewählter Intensitätsparameter (Fuchs et al., 2007; Totschnig et al., 2011; Totschnig und Fuchs, 2013), obwohl dieser Parameter den Einfluss von Fließgeschwindigkeit und Druckphänomenen auf die Gebäudestruktur vernachlässigt (Mazzorana et al., 2014). Ein Grund hierfür ist, dass Ablagerungshöhen üblicherweise ex-post nach dem Ereignis bestimmt werden, wohingegen Fließgeschwindigkeiten und Drücke selbst während des Ereignisses für geschiebeführende Wildbachprozesse kaum bestimmbar sind (Fuchs et al., 2007).

Fuchs et al. (2007) und in weiterer Folge Totschnig et al. (2011) und Totschnig und Fuchs (2013) präsentieren empirisch ermittelte Vulnerabilitätsfunktionen für Gebäude, die die Ablagerungshöhe nach einem Ereignis der beobachteten Schadenlaste gegenüberstellen. Eine typische Vulnerabilitätskurve ist in Abbildung 02a und b dargestellt, einen weiteren Überblick in Bezug auf andere europäische Alpenländer bieten Papatoma-Köhle et al. (2017). In Fuchs et al. (2019) findet sich darüber hinaus, aufbauend auf den erwähnten Studien, ein Modell zur Berechnung der Vulnerabilität für Gebäude, das bei Bedarf für eigene Studien verwendet und weiterentwickelt werden kann.

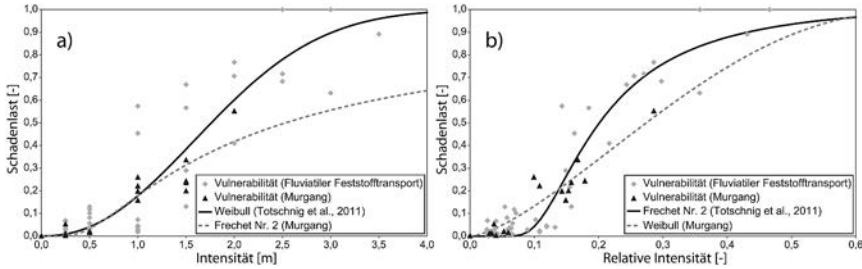


Abbildung 02: Vergleich von Vulnerabilitätskurven für fluviatilen Feststofftransport (Totschnig et al., 2011) und Murgänge (Fuchs et al., 2007). Der Vergleich wurde für absolute (a) sowie relative Intensitätswerte (b) durchgeführt.

Figure 02: Comparison of vulnerability functions for fluvial sediment transport (Totschnig et al., 2011) and for debris flows (Fuchs et al., 2007). The comparison is shown for absolute (a) and relative (b) process intensities.

Quelle: Totschnig und Fuchs, 2012, S. 1110

Die Formel zur Berechnung der Vulnerabilität von Wohngebäuden (V) in Abhängigkeit der Prozessintensität in Form der Ablagerungshöhe (I) lautet für fluviatilen Feststofftransport

$$V = 1 - e^{-0,443 \left(\frac{I+1,442}{1,442} - 1 \right)^{2,233}} \quad (27.1)$$

mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,835; und für Murgänge

$$V = 1 - e^{-1,458 \left(\frac{I+2,284}{2,284} - 1 \right)^{2,337}} \quad (27.2)$$

mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,931. Diese Arbeiten wurden in Folge in einen größeren Rahmen gestellt, basierend auf mehr als 200 Schadensfällen aus Österreich und Südtirol. Mit der nun vorliegenden Schadenfunktion (Papa-thoma-Köhle et al., 2015) liegt somit für den östlichen Alpenraum eine umfassende Darstellung zur physischen Vulnerabilität von gegenüber Wildbachprozessen exponierten Gebäuden vor.

Darüber hinaus sind in BMLFUW (2005) basierend auf Hübl und Kraus (2003) für die Verwendung in der Kosten-Nutzen-Untersuchung für Wildbach- und Lawinenschutzmaßnahmen Vulnerabilitätswerte für Gebäude in Österreich angegeben. Diese variieren zwischen 0,1 für Wohngebäude in einer gelben und 0,3 bzw. 0,2 für Wohngebäude bzw. andere Gebäude in einer roten Wildbach-Gefahrenzone, siehe auch Fuchs und Zischg (2013).

In Bezug auf Wildbachgefahren wurde für eine Fallstudie in Kärnten nachgewiesen, in welcher Höhe lokaler Objektschutz in der Lage ist, die ökonomische Vulnerabilität zu verringern (Holub und Fuchs, 2008).

27.3.8 Rutschungen und Erdschuttströme

Am 28. November 2007 hatte sich witterungsbedingt im Gschliefgraben ein Erd(schutt)strom in Richtung der Häuser am Schwemmkegel bewegt und diese gefährdet. In Folge wurden Sofortmaßnahmen gesetzt mit dem kurz- und mittelfristigen Ziel, Wasser aus dem Rutschkörper abzuleiten und diesen somit zu stabilisieren. Die latente Bedrohung durch die Großrutschung im Gschliefgraben ist bereits seit mehreren Jahrhunderten bekannt. Dementsprechend liegen zahlreiche Informationen in Form von Chroniken, Studien sowie wissenschaftlichen Arbeiten vor, deren systematische Analyse, Zusammenführung und Visualisierung bzw. digitale Abrufbarkeit von grundlegender Bedeutung für künftige Maßnahmen sind (Hübl et al., 2009; Weidinger et al., 2011). Die physische Vulnerabilität der betroffenen Gebäude ist hier über die Zeit mit »1« zu beurteilen, da diese entweder zerstört oder gemeinsam mit den Schuttmassen in den Traunsee geschoben wurden. Gleichmaßen gilt dies für die betroffenen landwirtschaftlichen Flächen, sowie für die betroffene Infrastruktur. Aufgrund der Vorwarnzeit ist eine Evakuierung betroffener Personen möglich. Eine Herausforderung in Bezug auf die Exposition, und somit auch auf die Vulnerabilität, stellten allerdings immer wieder Sekundärereignisse im Bereich des Schuttstroms dar, wie beispielsweise murartige Prozesse (vgl. auch Weidinger, 2003).

In den Gemeinden Gasen und Haslau ereigneten sich im Zuge der Unwetter vom August 2005 zahlreiche Rutschungen, die erhebliche Schäden an Gebäuden, landwirtschaftlichen Flächen und Infrastruktur zur Folge hatten (Andreca et al., 2007). Über die Vulnerabilität bei diesen Rutschungen sind, trotz zweier Todesopfer, keine näheren Angaben auffindbar.

27.3.9 Murgänge

In Bezug auf Studien zu Murgängen siehe Kapitel 27.3.7.

27.3.10 Felsgleitung und Bergsturz

Für Bergstürze finden sich in Huttenlau und Stötter (2012) Angaben zu modellierten potentiellen Schadenshöhen, in Bezug auf die Vulnerabilität sind jedoch keine näheren Angaben enthalten. Es muss davon ausgegangen werden, dass bei einem derartigen größeren Worst-Case Szenario diese jedenfalls (aus Sicht der physischen Vulnerabilität) mit »1« zu beurteilen wäre.

27.3.11 Steinschlag und Felssturz

Im Juli 1999 ereignete sich am Eiblschrofen (Schwaz) eine Serie von Felsstürzen, bei dem mehrere Tausend Kubikmeter Gestein den unterhalb des Berges gelegenen Waldbestand zerstörten. Aufgrund der Bedrohung des Ortsteils Ried wurden 256 Personen aus 56 Gebäuden evakuiert, und acht Gewerbebetriebe vorübergehend geschlossen werden (Bayer et al., 2000; Meissl et al., 2002). In Bezug auf die Vulnerabilität sind in der Literatur keine Angaben enthalten, aufgrund der Sturzenenergie ist jedoch bei derartigen Prozessen von einem Wert in der Höhe von »1« auszugehen, falls Treffer erfolgen.

27.3.12 Lawinen (Fließ- und Staublawinen)

In Bezug auf die Vulnerabilität gegenüber Staublawinen ist aus österreichischer Sicht eine Studie von Barbolini et al. (2004) bekannt, die aufbauend auf einer ex-post Analyse der durch die Wolfsgrabenlawine in St. Anton im Jahr 1988 und einiger in Galtür im Jahr 1999 verursachten Schäden eine empirische Vulnerabilitätsfunktion für Gebäude in Abhängigkeit des auftretenden Lawinendruckes präsentiert. Die resultierende Schadensfunktion ist in Abbildung 03 dargestellt. Der durchschnittliche Staudruck (P_{imp}) und die durchschnittliche Schadenlast für jede Gebäudeklasse wurden über eine lineare quadratische Regression einer Kurve angepasst, die resultierende Beziehung ist in Gleichung (27.3) dargestellt.

$$Schaenlast = \begin{cases} 0,0297P_{imp} & \text{if } P_{imp} \leq 34kPa \\ 1 & \text{if } P_{imp} > 34 kPa \end{cases} \quad (27.3)$$

Darüber hinaus sind in BMLFUW (2005) basierend auf Hübl und Kraus (2003) für die Verwendung in der Kosten-Nutzen-Untersuchung für Wildbach- und Lawenschutzmaßnahmen Vulnerabilitätswerte für Gebäude in Österreich angegeben. Diese variieren zwischen 0,2 für Gebäude in einer gelben und 0,5 für Gebäude in einer roten Lawinen-Gefahrenzone, siehe auch Fuchs und Zischg (2013).

27.3.13 Permafrostgefahren

Bei Redaktionsschluss sind den Autoren keine Studien zur Vulnerabilität bekannt.

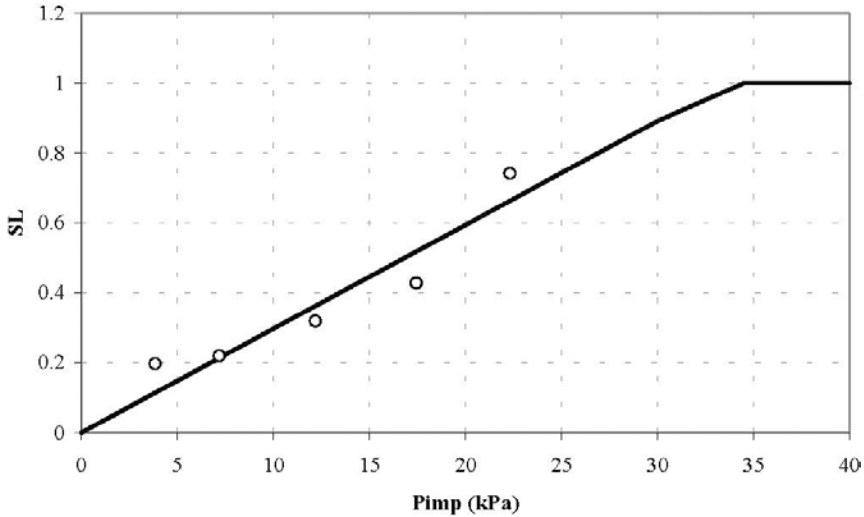


Abbildung 03: Empirische Vulnerabilitätsfunktion für Staublawinen. Freundlicherweise zur Verfügung gestellt von WIT Press aus den WIT Transactions on Ecology and the Environment, Band 77, 2004, Seite 538.

Figure 03: Empirical vulnerability function for powder avalanches. Courtesy of WIT Press from WIT Transactions on Ecology and the Environment, Volume 77, 2004, Page 538.

Quelle: Barbolini et al., 2004, S. 538

27.3.14 Gletschergefahren

Bei Redaktionsschluss sind den Autoren keine Studien zur Vulnerabilität bekannt.

27.3.15 Schutzwald

Bei Redaktionsschluss sind den Autoren keine Studien zur Vulnerabilität bekannt.

27.3.16 Waldbrand

Bei Redaktionsschluss sind den Autoren keine Studien zur Vulnerabilität bekannt.

27.3.17 Erdbeben

Huttenlau und Stötter (2012) beschreiben in ihrer Studie die Herausforderung einer regionalen Analyse der Vulnerabilität gegenüber Erdbeben im Bundesland Tirol. Sie verwendeten hierzu verfügbare Schadenfunktionen aus der Rückversicherungswirtschaft, sowie zusätzlich den EMS-98 Ansatz, der sowohl auf beobachteten Schadensmustern als auch einer Einschätzung durch Experten beruht (Grünthal, 1998).

Achs und Adam (2012) berichten über einen Indikatorenansatz zum effizienten und zeitsparenden visuellen Screening größerer Gebäudemengen in Bezug auf deren physische Vulnerabilität gegenüber Erdbeben. Dies beinhaltet eine Bewertung struktureller Bauwerksparameter, wie Steifheit und Fundamentierung, aber ebenfalls einen Faktor für die Schadensrelevanz, der auf Exposition, Bedeutung des Gebäudes für die Öffentlichkeit und die lokale Wirtschaft, Ausstattung sowie Beeinflussung der Umwelt aufbaut. Die Autoren kommen zu dem Schluss, dass die vorgeschlagene Methode für das verwendete Testgebiet im 20. Wiener Gemeindebezirk die zu erwartenden Schäden bei einem Erdbeben definierter Magnitude gut abbildet (vgl. auch Achs et al., 2011).

27.3.18 Kaskadeneffekte

Bei Redaktionsschluss sind den Autoren keine Studien zur Vulnerabilität bekannt.

27.4 Herausforderungen

Um das naturgefahrenbedingte Risiko zu bewältigen, ist ein breiteres Verständnis des Konzepts der Vulnerabilität erforderlich, um materielle Schäden und immaterielle Verluste aufgrund von gefährlichen Ereignissen zu reduzieren. Vulnerabilität wird unterschiedlich thematisiert, und aufgrund verschiedener disziplinärer Herangehensweisen existieren unterschiedliche Methoden zur Erfassung physischer, sozialer, institutioneller und ökonomischer Vulnerabilität. In den vorangegangenen Kapiteln wurde gezeigt, dass disziplinäre Ansätze in der Vulnerabilitätsbewertung sich gegenseitig überschneiden, was zu der Schlussfolgerung führt, dass physische, soziale, institutionelle und ökonomische Vulnerabilität voneinander abhängen und interagieren.

Eine Integration der Ansätze aus den Sozial- und Naturwissenschaften sowie aus Politik und Wirtschaft würde (im gegenwärtigen Stadium) keinesfalls zu einer allgemeingültigen Methode zur Quantifizierung von Vulnerabilität führen,

sondern zu einem Konzept, das komplementäre Einsichten bietet, die für eine tieferes Verständnis von Gefahr und Risiko notwendig sind. Nach der Definition von Vulnerabilität in den Naturwissenschaften ist ein funktionaler Zusammenhang zwischen dem Gefährdungsereignis (Magnitude) und den Schadensbildern exponierter Werte die Voraussetzung für eine Quantifizierung der Vulnerabilität. Die Exposition definiert die Anfälligkeit der gefährdeten Werte durch die Gefährdung aufgrund ihrer Lage im Einflussbereich des Prozesses und der fehlenden Resistenz (physische Vulnerabilität). Auf der anderen Seite wird das Konzept des Risikos in den Sozialwissenschaften durch die Überschneidung zwischen Gefahrenbereich und der Gesellschaft erklärt; gefährdete Werte werden als Teil der Gesellschaft verstanden. Soziale Vulnerabilität ist daher eine Prädisposition für Schäden aufgrund ungünstiger Bedingungen, vordefinierter Merkmale und relativer Schwächen von Teilen der Gesellschaft im Zusammenhang mit sozialen Faktoren. Diese beiden Ansätze zur Bestimmung von Vulnerabilität sind verbunden durch (1) die ökonomische Vulnerabilität, die von physischer und sozialer Vulnerabilität abhängt, da Individuen oder Gesellschaften nicht gefährdet sein können, wenn sie nicht bedroht sind, und (2) der institutionellen Vulnerabilität, die sich aufgrund der Rahmenbedingungen für eine Gesellschaft und ihre Individuen ergibt. Physische Vulnerabilität führt zu Verlusten, die wiederum wirtschaftliche Anfälligkeit für Individuen oder die Gesellschaft verursachen. Umgekehrt bedingen institutionelle Rahmenbedingungen in einer Gesellschaft die Höhe der physischen Vulnerabilität, wenn Bewältigungsstrategien entwickelt und umgesetzt werden. Beide Konzepte, das Konzept der Vulnerabilität aus sozialwissenschaftlicher Perspektive und aus naturwissenschaftlicher Perspektive, ergänzen sich in einem Kreislauf.

Es hat sich gezeigt, dass in Bezug auf die unterschiedlichen Vulnerabilitäten in Österreich erst wenig bekannt ist, vor allem in Hinblick auf Extremereignisse (definiert als jene Ereignisse, die jenseits öfter wiederkehrender »normaler« Ereignisse liegen, und entsprechend höhere Auswirkungen haben).

27.5 Empfehlungen

Naturgefahrenmanagement erfordert Strategien zur Verhinderung bzw. Reduktion von Schäden aus Elementarereignissen, dies erfordert unter anderem die konsequente Anwendung von strategischen Instrumenten wie Raumplanung, Risikokommunikation und Risikotransfer. Auf der anderen Seite – und dies hat die Recherche zur Vulnerabilität gegenüber Extremereignissen in Österreich deutlich gezeigt – ist bislang für viele Prozessstypen wenig bekannt in Hinblick auf eine Ursache-Wirkungs-Beziehung zwischen Prozessverhalten und zu erwartendem Schadensausmaß. Das Gros der Arbeiten aus dem Bereich der

sogenannten grauen Literatur befasst sich lediglich mit einer Beschreibung der Schadenshöhe aufgrund bestimmter Ereignisse, setzt diese aber nicht in Bezug zur Exposition von Wertobjekten. Insofern lautet eine klare Empfehlung, neben der klassischen Ereignisdokumentation (Dokumentation der Naturgefahr) eine Analyse der Schäden vorzunehmen, um in Verbindung mit dem Wissen um exponierte Objekte Schadensfunktionen abzuleiten oder zu verbessern. Diese Analyse sollte ebenso standardisiert werden wie die Ereignisdokumentation, und nicht nur für die sogenannten Extremereignisse durchgeführt werden, sondern grundsätzlich für alle naturgefahrenbedingten Schäden.

Darüber hinaus wäre es ein Schritt in Richtung einer Reduktion von ökonomischer und sozialer Vulnerabilität, wenn das derzeit praktizierte System der Risikoüberwälzung an den Katastrophenfonds und sonstige Förderungen von öffentlicher und privater Hand in ein System übergeführt werden könnte, dass auf einer obligatorischen Gebäudeversicherung auch für Privathaushalte basiert. Hier sind zuvorderst die Institutionen gefordert, für die nötigen Rahmenbedingungen zu sorgen. Ein derartiges Obligatorium könnte vor allem zur Eliminierung der adversen Selektion (auch Standorte mit geringer Schadenserwartung bilden dabei die Basis für die notwendige Breite der Risikogemeinschaft) beitragen. Darüber hinaus wären die Probleme einer zu geringen Nachfrage, der Administrierung und »gerechten« Ausschüttung bislang unvermeidlicher staatlicher Hilfsprogramme sowie des Wohltätigkeitsrisikos (*Charity Hazard*) künftig hintan gehalten. Der Versicherungsnehmer würde in den Genuss aller Vorteile eines privatwirtschaftlichen Versicherungsvertrages kommen, insbesondere des Anspruchs auf Entschädigung, während die Nachteile der bisher meist unzureichenden finanziellen Unterstützungsmöglichkeiten des Staates beseitigt werden könnten.

Zusammenfassend wäre die Rolle der Versicherer in der privatwirtschaftlichen Abwicklung von Versicherungsverträgen zu sehen und zwar unter Berücksichtigung des teilweise neu zu schaffenden gesetzlichen Rahmens, der Gewährung von Versicherungsschutz gegen sozial verträgliche bzw. leistbare Prämien sowie der Leistung im Versicherungsfall.

Die Rolle des Staates bestünde darin, dass der bestehende Katastrophenfonds innerhalb dieses Reformvorschlages als Systemobergrenze dienen soll, wobei er nur nach vorheriger Leistung der Versicherungswirtschaft für Schadenskompensationen herangezogen werden kann und daher die Haftung durch den Katastrophenfonds an den privatwirtschaftlichen Versicherungsvertrag geknüpft ist (d. h. keine Leistung aus dem Fonds ohne Versicherung).

Zusammenfassend werden folgende Empfehlungen gegeben:

- 1) Vertiefende Betrachtung von Vulnerabilität im Zuge von (Extrem-)Ereignissen;

- 2) Berücksichtigung unterschiedlicher (disziplinärer) Dimensionen der Vulnerabilität und der multiplen Interaktionen zwischen unterschiedlichen Vulnerabilitäten;
- 3) Berücksichtigung der Dynamik von physischer, sozialer, institutioneller und ökonomischer Vulnerabilität aufgrund des sozio-ökonomischen Wandels der Gesellschaft und aufgrund der Auswirkungen des Klimawandels;
- 4) Berücksichtigung der Skaleneffekte bei der Analyse der Vulnerabilität;
- 5) Bereitstellung von Plattformen bzw. Datenbanken, über die Informationen zur Schadensanfälligkeit, aber auch Studienergebnisse und weitere Daten einer breiten Nutzergruppe zur Verfügung gestellt werden können.

27.6 Fazit

Vulnerabilität ist skalenabhängig. Extremereignisse ändern streng genommen nicht die Vulnerabilität, sondern auf einer lokalen und regionalen Ebene die Exposition gefährdeter Objekte, da deren Schadensanfälligkeit gleich bleibt (und nur der Grad bzw. die Höhe der Exposition sich ändert aufgrund einer geänderten Prozessmagnitude oder -frequenz). Auf einer überregionalen oder nationalen Ebene kann durch Maßnahmen im Bereich der institutionellen und ökonomischen Vulnerabilität die Schadensanfälligkeit aus gesamtgesellschaftlicher Sicht verringert werden, wenngleich die Frequenz und Magnitude (nicht nur) von Extremereignissen ebenso einer Dynamik unterliegt wie die Exposition.

In Bezug auf die Dokumentation der Schadensanfälligkeit und allfälliger Analysen in Bezug auf die Schadengenese bestehen große Forschungslücken. Mit Ausnahme von Überflutungs- und Wildbachschäden (wobei auch hier eine größere Datengrundgesamtheit anzustreben ist) existieren für das österreichische Staatsgebiet kaum Informationen über Schadensmuster und physische, ökonomische, soziale und damit auch institutionelle Vulnerabilität.

Danksagung

Die diesem Bericht zugrunde liegenden Studien wurden durch den Fonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung unterstützt (FWF; P27400-NBL, V-519-N29 und L535-N10).

Literatur

- Achs, G., Adam, C., 2012. Rapid seismic evaluation of historic brick-masonry buildings in Vienna (Austria) based on visual screening. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 10(6), S. 1833–1856.
- Achs, G., Adam, C., Bekő, A., Brusatti, W., Fritz, M., Furtmüller, T., Kopf, F., Pietsch, M., Schäfer, D., Strauss, A., Theilen-Willige, B., Wenzel, H., Zimmermann, T., 2011. Erdbeben im Wiener Becken. Vienna Consulting Engineers, Wien, 512 S.
- Adger, N., 2006. Vulnerability. *Global Environmental Change*, 16(3), S. 268–281.
- Alexander, D., 2013. Resilience and disaster risk reduction: an etymological journey. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), S. 2707–2716.
- Alexandrov, V., Eitzinger, J., Cajic, V., Oberforster, M., 2002. Potential impact of climate change on selected agricultural crops in north-eastern Austria. *Global Change Biology*, 8(4), S. 372–389.
- Andres, P., Hagen, K., Lang, E., Sary, U., Gartner, K., Herzberger, E., Riedel, F., Haiden, T., 2007. Dokumentation und Analyse der Schadensereignisse 2005 in den Gemeinden Gasen und Haslau (Steiermark). BFW-Dokumentation 6. Schriftenreihe des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien, 75 S.
- Arnell, N., 2000. Flood insurance. In: D. Parker (Hrsg.), *Floods*. Routledge, London, S. 412–424.
- Atkisson, A., Petak, W., Alesch, J., 1984. Natural hazards exposures, losses and mitigation costs in the United States 1970–2000. *Transactions of the Wisconsin Academy of Sciences, Arts and Letters*, 72, S. 106–112.
- Barbolini, M., Cappabianca, F., Sailer, R., 2004. Empirical estimate of vulnerability relations for use in snow avalanche risk assessment. In: C. Brebbia (Hrsg.), *Risk Analysis IV*. WIT Press, Southampton, S. 533–542.
- Bayer, H., Gsell, A., Hammer, H., Sauer Moser, S., Scheiber, M., 2000. Planning of mitigation measures regarding the aggravated risk imposed by rockfall. *Felsbau*, 18, S. 30–35.
- Birkmann, J., 2006. Indicators and criteria for measuring vulnerability: Theoretical bases and requirements. In: J. Birkmann (Hrsg.), *Measuring vulnerability to natural hazards*. United Nations University Press, Tokyo, S. 55–77.
- Birkmann, J., Cardona, O.M., Carreño, M.L., Barbat, A.H., Pelling, M., Schneiderbauer, S., Kienberger, S., Keiler, M., Alexander, D., Zeil, P., Welle, T., 2013. Framing vulnerability, risk and societal responses: the MOVE framework. *Natural Hazards*, 67(2), S. 193–211.
- BMLFUW, 2005. Richtlinien für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung und Priorisierung von Maßnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung gemäß § 3 Abs. 2 Z 3 Wasserbautenförderungsgesetz. Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 53 S.
- BMLFUW, 2006. Hochwasser 2005 – Ereignisdokumentation. Teilbericht der Wildbach- und Lawinenverbauung. Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 126 S.

- BMLFUW, 2009. Kosten-Nutzen-Untersuchungen im Schutzwasserbau. Richtlinie, Bundesministerium für Land und Forstwirtschaft Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien, 27 S.
- Bohle, H.G., 2001. Vulnerability and criticality: Perspectives from social geography. *IHDP Update*, 2, S. 3–5.
- Borner, P., 1999. Risikoanalyse bei gravitativen Naturgefahren. Umwelt-Materialien 107/I, II. Bundesamt für Umwelt, Wald und Landschaft. Bern, 115 S.
- Burton, I., Kates, R., White, G., 1978. *The environment as hazard*. Oxford University Press, 290 S.
- Cammerer, H., Thieken, A., Lammel, J., 2013. Adaptability and transferability of flood loss functions in residential areas. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(11), S. 3063–3081.
- Chambers, R., 1989. Vulnerability, coping and policy. *IDS Bulletin*, 20(2), S. 1–7.
- Commission of the European Communities (Hrsg.), 2007. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks. *Official Journal of the European Union*, L288, S. 27–34.
- Commission of the European Communities (Hrsg.), 2013. *Green Paper on the insurance of natural and man-made disasters*. Europäische Kommission, 21 S.
- Crozier, M., 2004. Magnitude-frequency concept. In: A. Goudie (Hrsg.), *Encyclopedia of geomorphology*. Routledge, London, S. 635–638.
- Cutter, S.L., 1996. Vulnerability to environmental hazards. *Progress in Human Geography*, 20(4), S. 529–539.
- Cutter, S.L., 2016. Resilience to what? Resilience for whom? *The Geographical Journal*, 182(2), S. 110–113.
- Cutter, S.L., 2018. Linkages between vulnerability and resilience. In: S. Fuchs, T. Thaler (Hrsg.), *Vulnerability and resilience to natural hazards*. Cambridge University Press, Cambridge, S. 257–270.
- Cutter, S.L., Boruff, B., Shirley, W., 2003. Social vulnerability to environmental hazards. *Social Science Quarterly*, 84(2), S. 242–261.
- Cutter, S.L., Finch, C., 2008. Temporal and spatial changes in social vulnerability to natural hazards. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 105(7), S. 2301–2306.
- Downing, T., Aerts, J., Soussan, J., Barthelemy, O., Bharwani, S., Hinkel, J., Ionescu, C., Klein, R., Mata, L., Matin, N., Moss, S., Purkey, D., Ziervogel, G., 2005. Integrating social vulnerability into water management. *SEI Working Paper and Newater Working Paper*, 4, S. 1–32.
- Dutta, D., Herath, S., Musiak, K., 2003. A mathematical model for flood loss estimation. *Journal of Hydrology*, 277(1/2), S. 24–49.
- Eakin, H., Luers, A., 2006. Assessing the vulnerability of social-environmental systems. *Annual Review of Environment and Resources*, 31, S. 365–394.
- Falloon, P., Betts, R., 2010. Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation – The importance of an integrated approach. *Science of the Total Environment*, 408(23), S. 5667–5687.
- Fekete, A., Montz, B., 2018. Vulnerability – an introduction. In: S. Fuchs, T. Thaler (Hrsg.), *Vulnerability and resilience to natural hazards*. Cambridge University Press, Cambridge, S. 14–31.

- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W., 2008a. Commentary on Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, 102(3/4), S. 99–111.
- Fell, R., Corominas, J., Bonnard, C., Cascini, L., Leroi, E., Savage, W., 2008b. Guidelines for landslide susceptibility, hazard and risk zoning for land-use planning. *Engineering Geology*, 102(3/4), S. 85–98.
- Fleischhauer, M., Greiving, S., Flex, F., Scheibel, M., Stickler, T., Sereinig, N., Kobolt-schnig, G., Malvati, P., Vitale, V., Grifoni, P., Firus, K., 2012. Improving the active involvement of stakeholders and the public in flood risk management – tools of an involvement strategy and case study results from Austria, Germany and Italy. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 12(9), S. 2785–2798.
- Fleischhauer, M., Greiving, S., Wanczura, S. (Hrsg.), 2006. *Natural hazards and spatial planning in Europe*. Dortmunder Vertrieb für Bau- und Planungsliteratur, 203 S.
- Frey, B., 1990. *Ökonomie ist Sozialwissenschaft*. Vahlen, 233 S.
- Fuchs, S., 2009. Susceptibility versus resilience to mountain hazards in Austria – Paradigms of vulnerability revisited. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), S. 337–352.
- Fuchs, S., Frazier, T.G., Siebeneck, L., 2018. *Physical vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, S. 32–52.
- Fuchs, S., Heiser, M., Schlögl, M., Zischg, A., Papatoma-Köhle, M., Keiler, M. 2019. Short communication: A model to predict flood loss in mountain areas. *Environmental Modelling and Software*, 117, S. 176–180.
- Fuchs, S., Heiss, K., Hübl, J., 2007. Towards an empirical vulnerability function for use in debris flow risk assessment. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 7(5), S. 495–506.
- Fuchs, S., McAlpin, M.C., 2005. The net benefit of public expenditures on avalanche defence structures in the municipality of Davos, Switzerland. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 5(3), S. 319–330.
- Fuchs, S., Thaler, T., 2018. Synthesis and conclusion. In: S. Fuchs, T. Thaler (Hrsg.), *Vulnerability and resilience to natural hazards*. Cambridge University Press, Cambridge, S. 271–280.
- Fuchs, S., Zischg, A., 2013. *Vulnerabilitätslandkarte Österreich*. IAN-Report 152. Universität für Bodenkultur, Institut für alpine Naturgefahren, Wien, 103 S.
- Füssel, H.-M., 2007. Vulnerability: A generally applicable conceptual framework for climate change research. *Global Environmental Change*, 17(2), S. 155–167.
- Garrett, T., Sobel, R., 2003. The political economy of FEMA disaster payments. *Economic Inquiry*, 41(3), S. 496–509.
- Gruber, M., 2008. Alternative solutions for public and private catastrophe funding in Austria. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(4), S. 603–616.
- Grünthal, G. (Hrsg.), 1998. *European macroseismic scale 1998*. Cahiers du Centre Européen de Géodynamique et de Séismologie. European Center for Geodynamics and Seismology, 15, 99 S.
- Habersack, H., Moser, A. (Hrsg.), 2003. *Ereignisdokumentation Hochwasser August 2002*. Universität für Bodenkultur, Plattform Hochwasser, 2, 184 S.

- Hattenberger, D., 2006. Naturgefahren und öffentliches Recht. In: S. Fuchs, L. Khakzadeh, K. Weber (Hrsg.), *Recht im Naturgefahrenmanagement*. StudienVerlag, Innsbruck, S. 67–91.
- Heumader, J., 2000. Die Katastrophenlawinen von Galtür und Valzur am 23. und 24. Februar 1999 im Paznauntal/Tirol. In: F. Zollinger, G. Fiebiger (Hrsg.), *Internationales Symposium Interpraevent Villach*, S. 397–410.
- Hewitt, K. (Hrsg.), 1983. *Interpretations of calamity: From the viewpoint of human ecology*. Allen & Unwin, 304 S.
- Hinshaw, R., 2006. *Living with nature's extremes: The life of Gilbert Fowler White*. Johnson Books, 339 S.
- Hohmann, C., Kirchengast, G., Birk, S., 2018. Alpine foreland running drier? Sensitivity of a drought vulnerable catchment to changes in climate, land use, and water management. *Climatic Change*, 147(1/2), S. 179–193.
- Holling, C., 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4, S. 1–23.
- Holling, C., Gunderson, L., 2002. Resilience and adaptive cycles. In: L. Gunderson, C. Holling (Hrsg.), *Panarchy. Understanding transformations in human and natural systems*. Island Press, Washington, S. 25–63.
- Holub, M., Fuchs, S., 2008. Benefits of local structural protection to mitigate torrent-related hazards. In: C. Brebbia, E. Beriatos (Hrsg.), *Risk Analysis VI. WIT Transactions on Information and Communication Technologies*, 39, S. 401–411.
- Holub, M., Fuchs, S., 2009. Mitigating mountain hazards in Austria – Legislation, risk transfer, and awareness building. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), S. 523–537.
- Holub, M., Hübl, J., 2008. Local protection against mountain hazards – State of the art and future needs. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(1), S. 81–99.
- Holub, M., Suda, J., Fuchs, S., 2012. Mountain hazards: reducing vulnerability by adapted building design. *Environmental Earth Sciences*, 66(7), S. 1853–1870.
- Hübl, J., Ganahl, E., Bacher, M., Chiari, M., Holub, M., Kaitna, R., Prokop, A., Dunwoody, G., Forster, A., Schneiderbauer, S., 2006. *Dokumentation der Wildbachereignisse vom 22./23. August 2005 in Tirol – Detaillierte Aufnahme*. IAN-Report 109. Universität für Bodenkultur, Institut für alpine Naturgefahren, 73 S.
- Hübl, J., Kraus, D., 2003. *Wirtschaftlichkeit und Priorisierung von Schutzmaßnahmen vor Wildbächen, Lawinen und Erosion: Trendanalyse zur Kosten-Nutzen-Untersuchung des Forsttechnischen Dienstes für Wildbach- und Lawinenverbauung*. IAN-Report 94. Universität für Bodenkultur, Institut für alpine Naturgefahren, 30 S.
- Hübl, J., Neckel, N., Fuchs, S., 2009. *Gschlieflgraben – Gemeinde Gmunden. Aufbereitung historischer Datenquellen als Planungsgrundlage für künftige Maßnahmen*. IAN-Report 124. Universität für Bodenkultur, Institut für alpine Naturgefahren, 34 S.
- Hübl, J., Tschärner, S., 2015. *Wegweiser Naturgefahren: Eine Anleitung zur Berücksichtigung von Naturgefahren im Gebäudeschutz*. IAN-Report 170. Universität für Bodenkultur, Institut für alpine Naturgefahren, 144 S.
- Huttenlau, M., Stötter, J., 2011. The structural vulnerability in the framework of natural hazard risk analyses and the exemplary application for storm loss modelling in Tyrol (Austria). *Natural Hazards*, 58(2), S. 705–729.

- Huttenlau, M., Stötter, J., 2012. Risk-based damage potential and loss estimation of earthquake scenarios in the moderate endangered Austrian Federal Province of Tyrol. *Georisk*, 6(2), S. 105–127.
- Jaffee, D., Russell, T., 2003. Markets under stress: The case of extreme event insurance. In: R. Arnott, B. Greenwald, R. Kanbur, B. Nalebuff (Hrsg.), *Economics for an imperfect world*. MIT Press, Cambridge, S. 35–52.
- Kanonier, A., 2006. Raumplanungsrechtliche Regelungen als Teil des Naturgefahrenmanagements. In: S. Fuchs, L. Khakzadeh, K. Weber (Hrsg.), *Recht im Naturgefahrenmanagement*. StudienVerlag, Innsbruck, S. 123–153.
- Kates, R., 1962. Hazard and choice perception in flood plain management. University of Chicago, Chicago, 157 S.
- Keiler, M., 2004. Development of the damage potential resulting from avalanche risk in the period 1950–2000, case study Galtür. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4(2), S. 249–256.
- Kerschner, F. (Hrsg.), 2008. *Handbuch Naturkatastrophenrecht: Vorsorge – Abwehr – Haftung – Versicherung*. Verlag Manz, Wien, 448 S.
- Kienholz, H., 1994. Naturgefahren – Naturrisiken im Gebirge. *Schweizerische Zeitschrift für Forstwesen*, 145(1), S. 1–25.
- Mazzorana, B., Simoni, S., Scherer, C., Gems, B., Fuchs, S., Keiler, M., 2014. A physical approach on flood risk vulnerability of buildings. *Hydrology and Earth System Sciences*, 18(9), S. 3817–3836.
- McLaughlin, P., Diez, T., 2008. Structure, agency and environment: Toward an integrated perspective on vulnerability. *Global Environmental Change*, 18(1), S. 99–111.
- Meissl, G., Keiler, M., Fuchs, S., Geist, T., Stötter, J., Zischg, A., 2002. Alpen: Naturgefahrenprozesse. *Petermanns Geographische Mitteilungen*, 147(1), S. 42–47.
- Milanesi, L., Pilotti, M., Bacchi, B., 2016. Using web-based observations to identify thresholds of a person's stability in a flow. *Water Resources Research*, 52, S. 7793–7805.
- Mileti, D., 1999. *Disasters by design: a reassessment of natural hazards in the United State*. Joseph Henry Press, Washington D.C., 351 S.
- Muthers, S., Matzarakis, A., Koch, E., 2010. Climate change and mortality in Vienna – a human biometeorological analysis based on regional climate modeling. *International Journal for Environmental Research and Public Health*, 7(7), S. 2965–2977.
- North, D., 1990. *Institutions, institutional change and economic performance*. Cambridge University Press, 152 S.
- Nöthiger, C., Bürki, R., Elsasser, H., 2005. Naturgefahren und Schäden für den Tourismus in den Alpen. *Geographica Helvetica*, 60(1), S. 26–34.
- Oberndorfer, S., Fuchs, S., Rickenmann, D., Andrecs, P., 2007. Vulnerabilitätsanalyse und monetäre Schadensbewertung von Wildbachereignissen in Österreich. *BfW Bericht 139*. Bundesforschungs- und Ausbildungszentrum für Wald, Naturgefahren und Landschaft (BfW), 55 S.
- Papathoma-Köhle, M., 2016. Vulnerability curves vs. vulnerability indicators: application of an indicator-based methodology for debris-flow hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 16(8), S. 1771–1790.
- Papathoma-Köhle, M., Gems, B., Sturm, M., Fuchs, S., 2017. Matrices, curves and indicators: a review of approaches to assess physical vulnerability to debris flows. *Earth-Science Reviews*, 171, S. 272–288.

- Papathoma-Köhle, M., Thaler, T., 2018. Institutional vulnerability. In: S. Fuchs, T. Thaler (Hrsg.), *Vulnerability and resilience to natural hazards*. Cambridge University Press, Cambridge, S. 98–123.
- Papathoma-Köhle, M., Zischg, A., Fuchs, S., Glade, T., Keiler, M., 2015. Loss estimation for landslides in mountain areas – An integrated toolbox for vulnerability assessment and damage documentation. *Environmental Modelling and Software*, 63, S. 156–169.
- Pelling, M., 2003. The vulnerability of cities: natural disasters and social resilience. *Earthscan*, 212 S.
- Pfurtscheller, C., Thieken, A.H., 2013. The price of safety: public costs for protecting Alpine communities against natural hazards. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 13(10), S. 2619–2637.
- Prettenthaler, F., Albrecher, H. (Hrsg.), 2009. *Hochwasser und dessen Versicherung in Österreich*. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 163 S.
- Prettenthaler, F., Albrecher, H., Asadi, P., Köberl, J., 2017. On flood risk pooling in Europe. *Natural Hazards*, 88(1), S. 1–20.
- Prettenthaler, F., Albrecher, H., Köberl, J., Kortschak, D., 2012. Risk and insurability of storm damages to residential buildings in Austria. *Geneva Papers on Risk and Insurance: Issues and Practice*, 37(2), S. 340–346.
- Prettenthaler, F., Vettters, N., 2005. *Finanzielle Bewältigung von Naturgefahren: Vorschläge zur Reform des österreichischen Modells*. Intereg Working Paper Series, 21, S. 13.
- Priest, S., Clark, M., Treby, E., 2005. Flood insurance: the challenge of the uninsured. *Area*, 37(3), S. 295–302.
- Punge, H.J., Kunz, M., 2016. Hail observations and hailstorm characteristics in Europe: A review. *Atmospheric Research*, 176/177, S. 159–184.
- Raschky, P., 2008. Institutions and the losses from natural disasters. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8(4), S. 627–634.
- Raschky, P., Weck-Hannemann, H., 2007. Charity hazard – A real hazard to natural disaster insurance? *Environmental Hazards*, 7(4), S. 321–329.
- Renn, O., 2008a. Concepts of risk: An interdisciplinary review – part 1: Disciplinary risk concepts. *Gaia*, 17(1), S. 50–66.
- Renn, O., 2008b. Concepts of risk: An interdisciplinary review – part 2: Integrative approaches. *Gaia*, 17(2), S. 196–204.
- Republik Österreich, 1966. Bundesgesetz vom 9. September 1966 über den Katastrophenfonds. BGBl. Nr. 207/1966.
- Republik Österreich, 1996. Katastrophenfondsgesetz. BGBl. 201/1996.
- Republik Österreich, 2005. Hochwasseropferentschädigungs- und Wiederaufbau-Gesetz 2005. BGBl. I Nr. 112/2005 i. d. F. BGBl. I Nr. 13/2007.
- Rudolf-Miklau, F., 2005. *Alpine Naturgefahren: Sicherheit, Schutz und Risiko. Wo liegen die Grenzen? Wildbach- und Lawinerverbau*, 153, S. 31–39.
- Rudolf-Miklau, F., Rainer-Wenger, K., Anker, F., 2015. Solidarische Finanzierung und Erhaltung von Schutzmaßnahmen. *Recht und Finanzen für Gemeinden*, 2(6), S. 79–83.
- Russell, C., 1970. Losses from natural hazards. *Land Economics*, 43, S. 383–393.
- Schieferer, W., 2006. *Abwicklungsfragen im versicherungsrechtlichen Umfeld von Naturgefahren – Zukunftsperspektive der privaten Naturkatastrophen-Vorsorge nach dem Hochwasserereignis vom 23. August 2005*. In: S. Fuchs, L. Khakzadeh, K. Weber (Hrsg.), *Recht im Naturgefahrenmanagement*. StudienVerlag, Innsbruck, S. 115–122.

- Starr, C., 1969. Social benefit versus technological risk. *Science*, 165, S. 1232–1238.
- Statistik Austria (Hrsg.), 2013. Mittlere Bruttojahreseinkommen (Median) der unselbständig Erwerbstätigen. Statistik Austria.
- Sturm, M., Gems, B., Keller, F., Mazzorana, B., Fuchs, S., Papathoma-Köhle, M., Aufleger, M., 2018a. Experimental analyses of impact forces on buildings exposed to fluvial hazards. *Journal of Hydrology*, 565, S. 1–13.
- Sturm, M., Gems, B., Keller, F., Mazzorana, B., Fuchs, S., Papathoma-Köhle, M., Aufleger, M., 2018b. Understanding the dynamics of impacts at buildings caused by fluvial sediment transport processes. *Geomorphology*, 321, S. 45–59.
- Thaler, T., Attems, M.-S., Fuchs, S., 2018a. Neue gesellschaftliche Herausforderungen im Naturgefahrenmanagement: Welche Entwicklungen kommen auf uns zu? *Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft*, 70(3/4), S. 230–235.
- Thaler, T., Hartmann, T., 2016. Justice and flood risk management: reflecting on different approaches to distribute and allocate flood risk management in Europe. *Natural Hazards*, 83(1), S. 129–147.
- Thaler, T., Zischg, A., Keiler, M., Fuchs, S., 2018b. Allocation of risk and benefits – distributional justices in mountain hazard management. *Regional Environmental Change*, 18(2), S. 353–365.
- Thielen, A.H., Cammerer, H., Dobler, C., Lammel, J., Schöberl, F., 2016. Estimating changes in flood risks and benefits of non-structural adaptation strategies – a case study from Tyrol, Austria. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 21(3), S. 343–376.
- Thielen, A.H., Olschewski, A., Kreibich, H., Kobsch, S., Merz, B., 2008. Development and evaluation of Flemops – A new flood loss estimation model for the private sector. In: D. Proverbs, C. Brebbia, E. Penning-Rowsell (Hrsg.), *Flood recovery, innovation and response*. WIT Transactions on Ecology and the Environment, 118, S. 315–324.
- Totschnig, R., Fuchs, S., 2012. Vergleich von Vulnerabilitätskurven für Wildbachprozesse. In: G. Koboltschng, J. Hübl, J. Braun (Hrsg.), *Internationales Symposium Interpraevent*. Internationale Forschungsgesellschaft Interpraevent, Genoble, S. 1103–1114.
- Totschnig, R., Fuchs, S., 2013. Mountain torrents: quantifying vulnerability and assessing uncertainties. *Engineering Geology*, 155, S. 31–44.
- Totschnig, R., Sedlacek, W., Fuchs, S., 2011. A quantitative vulnerability function for fluvial sediment transport. *Natural Hazards*, 58(2), S. 681–703.
- Ungern-Sternberg, Th., 2004. *Efficient monopolies – The limits of competition in the European property insurance market*. Oxford University Press, 160 S.
- Unterrader, S., Almond, P., Fuchs, S., 2018. Rockfall in the Port Hills of Christchurch: Seismic and non-seismic fatality risk on roads. *New Zealand Geographer*, 74(1), S. 3–14.
- Varnes, D., 1984. *Landslide hazard zonation: A review of principles and practice*. UNESCO, 60 S.
- Vetters, N., Prettenthaler, F., 2004. *Extreme Wetterereignisse: Nationale Risikotransfersysteme im Vergleich*. Universität Graz, Institut für Volkswirtschaftslehre, Graz, 28 S.
- Wanka, A., Arnberger, A., Alex, B., Eder, R., Hutter, H.-P., Wallner, P., 2014. The challenges posed by climate change to successful ageing. *Zeitschrift für Gerontologie und Geriatrie*, 47(6), S. 468–474.

- Weidinger, J., 2003. Massenbewegungen und Gebirgsgefahren am Fuße der Traunstein-Nord- und Westwände, Gmunden, Oberösterreich. In: J. Weidinger, H. Lobitzer, I. Spitzbart (Hrsg.), Beiträge zur Geologie des Salzkammerguts. Gmundner Geo-Studien, 2. Erkudok/Stadtmuseum Gmunden, Gmunden, S. 375–394.
- Weidinger, J., Niesner, E., Millahn, K., 2011. Chronicle of an earth-flow foretold – The 2008 Gschlifegraben event, Austria. *Zeitschrift für Geomorphologie/Supplement*, 55(3), S. 373–405.
- White, G., 1945. Human adjustment to floods: A geographical approach to the flood problem in the United States. University of Chicago, Chicago, 225 S.
- White, G., Calef, W., Hudson, J., Mayer, H., Sheaffer, J., Volk, D., 1958. Changes in urban occupancy of flood plains in the United States. University of Chicago, Chicago, 235 S.
- Wisner, B., Blaikie, P., Cannon, T., Davis, I., 2004. At risk. Natural hazards, people's vulnerability and disasters. Routledge, 471 S.

28 Ökonomische Dimensionen alpiner Naturgefahren

Franz Sinabell*

Zusammenfassung

Dieser Beitrag betrachtet aus einem ökonomischen Blickwinkel Naturgefahren, die speziell in alpinen Räumen auftreten. Nach der grundlegenden Klärung wichtiger Begriffe wird ein Überblick zu den Gefahren präsentiert und ihre ökonomische Dimension werden aufgezeigt. Daten aus Österreich veranschaulichen die Zusammenhänge zwischen spezifisch alpinen Naturgefahren und deren ökonomischen Auswirkungen. Dazu werden vorliegende Befunde aus der Literatur aktualisiert. Der Schluss gibt einen Ausblick auf spezifische Herausforderungen im Kontext des Managements von Naturgefahren.

Abstract

This article looks at natural hazards that occur especially in alpine regions from an economic point of view. After clarification of important terms, an overview of the hazards is presented and their economic dimension is shown. Data from Austria serve to illustrate alpine hazards and their economic consequences. For this purpose, findings from the literature are updated. The chapter on conclusions gives an outlook on specific challenges in the context of the management of natural hazards.

Kernaussagen

- Im Alpenraum gibt es spezifische Gefahren, deren Schadenpotential beträchtlich ist.
- Die meisten sind räumlich begrenzt und treffen nur wenige Menschen gleichzeitig.
- Daher ist das Schadenausmaß von einzelnen Ereignissen meist überschaubar.
- Da aber viele Ereignisse auftreten können, ist deren Summe beachtlich und rechtfertigt gezielte Maßnahmen zur Schadenbegrenzung.

Key Points

- In Alpine regions there are specific hazards whose potential for damage is considerable.
- Most are spatially limited and affect only a few people at the same time.
- Therefore, the extent of damage caused by individual events is usually manageable.
- However, since many events can occur, their sum is considerable and justifies targeted measures to control damages.

* Franz Sinabell, Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, franz.sinabell@wifo.ac.at.

28.1 Einleitung und Problemstellung

Im vorliegenden Kapitel werden Naturgefahren im alpinen Bereich aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet, die jeweils eine ökonomische Dimension beleuchten. Zur Veranschaulichung dienen dazu Befunde aus Österreich. Die Abgrenzung der alpinen Räume von anderen Gebieten folgt der Definition der Alpenkonvention, nach der einzelne Gemeinden dem Alpenraum zugeordnet werden (RIS, 2018). Ein besonderes Augenmerk gilt dabei extremen Gefahren und extremen Ereignissen.

Ökonomie ist eine stark ausdifferenzierte Wissenschaft, die sich u. a. mit Fragen zur Nutzung von Ressourcen und zum menschlichen Verhalten – vor allem in Entscheidungssituationen – beschäftigt. Die Ebene der Betrachtung spannt den Bogen von einzelnen Personen in bestimmten Situationen über das kollektive Verhalten von Gruppen bis zur Beschreibung komplexer Abhängigkeiten im globalen Maßstab. Eine Besonderheit der Ökonomie ist, dass Vorgänge und Phänomene nicht nur beschrieben werden – etwa warum Preise steigen oder fallen, sondern auch Handlungsanleitungen für rationale Entscheidungen entwickelt werden. Dazu zählen z. B. Antworten auf die Frage, wie viel Geld zum Bau von Dämmen eingesetzt werden soll. Eine eigene Teildisziplin beschäftigt sich mit der Frage, wie diese Mittel bestmöglich aufgebracht und bereitgestellt werden.

Im Zusammenhang mit Naturgefahren werden häufig zwei ökonomische Fragestellungen betrachtet: a) Welche Schäden verursachen Naturgefahren und wie können die Auswirkungen bestmöglich verringert werden? und b) Welche institutionellen Arrangements ermöglichen eine angemessene und dauerhafte Bewältigung von Naturgefahren für die Gesellschaft?

In der Ökonomie wird meist ein anthropozentrischer Standpunkt vertreten, also die menschliche Sphäre einer Umwelt gegenübergestellt, die teils förderlich teils abträglich die Geschicke der Menschen beeinflusst. Natürliche Ressourcen werden als Mittel zur Befriedigung der Bedürfnisse und Quellen des Wohlstands gesehen. Aus diesem Blickwinkel werden Wechselwirkungen menschlichen Verhaltens mit der Umwelt, z. B. die Emission von Treibhausgasen und die daraus resultierende Erwärmung im Hinblick auf erwartete Einschränkungen menschlicher Entwicklungsmöglichkeiten betrachtet. Daraus folgt ein spezifisches Verständnis des Begriffs »Schaden«. Ein Schaden in diesem Sinne liegt dann vor, wenn der Nutzen zumindest einer Person negativ beeinflusst wird. Da der Schaden einer Person einer anderen Person zum Vorteil gereichen kann, ist auch die Wirkung auf die Gesellschaft insgesamt von Bedeutung. Eine solche Situation liegt vor, wenn eine Familie ihr Haus durch einen Lawinenabgang verliert und ein Bauunternehmen den Auftrag zur Wiedererrichtung an anderer Stelle erhält. Die Abwägung der Vor- und Nachteile für die Gesellschaft erfordert

spezifische Zugänge. Die Kosten-Nutzen-Analyse (siehe Pearce et al., 2006) ist eine Methode der angewandten Wohlfahrtsökonomie. Sie wird häufig eingesetzt, um öffentliche Entscheidungen im Risiko-Management von Naturgefahren zu unterstützen. Bei der Schadenbewertung ist zusätzlich noch zwischen direkten (z. B. Zerstörung von Stromleitungen) und indirekten Schäden (z. B. Produktionsausfälle aufgrund der Unterbrechung der Stromversorgung) zu unterscheiden (vgl. dazu Hallegatte und Przulski, 2010).

Der schlimmste Schaden ist der Verlust des Lebens, da eine Person aller Möglichkeiten beraubt wird, Nutzen zu erzielen. Aus individueller Sicht ist auch Invalidität, der Verlust des Arbeitsplatzes oder des Vermögens ein Extremereignis. Da im Mittelpunkt der ökonomischen Betrachtung der einzelne Mensch steht, ist ein Extremereignis bereits aus der individuellen Perspektive heraus zu betrachten.

Es gibt folglich keine einheitliche Definition dessen, was ein Extremereignis aus ökonomischer Sicht ist, sondern es hängt von der Betrachtungsebene ab. Eine Phase der Arbeitslosigkeit, der Konkurs eines Unternehmens sind massive Einschnitte für einzelne Akteure. Solche Ereignisse können entweder von außen oder durch eigenes Handeln ausgelöst werden und oft spielen beide Ursachen zusammen. Ebenso treffen Naturgefahren Menschen teils völlig unverschuldet – z. B. ein Meteoriteneinschlag – teils als Folge risiko-freudigen Verhaltens – z. B. eine Lawine beim Tourenschieffahren. Dem ersten Fall ist eine Rezession vergleichbar, die ohne Zutun einer einzelnen Person diese trifft, der zweite Fall ist mit einer spekulativen Veranlagung vergleichbar in der das Risiko bekannt ist und der Verlust, also der Schaden, in Kauf genommen wird.

Naturgefahren sind daher aus einem ökonomischen Blickwinkel vergleichbar mit Rezessionen, einem unerwarteten Preisanstieg von Rohstoffen, einem Störfall im Elektrizitätsnetz oder einem Streik aufgrund gescheiterter Lohnverhandlungen. Die zuerst genannten Ereignisse treffen oft ganze Volkswirtschaften, die zuletzt genannten Ereignisse sind räumlich begrenzt. Alpine Naturgefahren sind ebenso räumlich begrenzt, da meist nur eine kleine Zahl von Haushalten und Firmen betroffen ist. Viele Lawinen, Hang-Rutschungen und Felsstürze finden statt, ohne dass überhaupt irgendjemand Notiz davon nimmt. In einem solchen Fall findet zwar ein Ereignis statt, es entsteht aber kein Schaden.

Mehrere ökonomische Studien haben sich mit Naturgefahren in Österreich auseinandergesetzt und dabei in erster Linie Hochwasser betrachtet. Das Themenspektrum deckt dabei Aspekte wie die generelle ökonomische Bedeutung (vgl. Prettenhaler, 2018), Fragen der Versicherungswirtschaft und des Risiko-transfers (Prettenhaler et al., 2004; Sinabell und Url, 2007; Holub und Fuchs, 2009), die Auswirkungen von Schäden auf Gemeindebudgets (Unterberger, 2017) ab.

In einem solchen Kontext sind Schäden durch alpine Naturgefahren etwa folgendermaßen einzuordnen: Die große wirtschaftliche Rezession im Jahr 2008 führte in Österreich zu einer Reduktion des Brutto-Inlandsprodukts von fast 6 Mrd. Euro und zu einem Anstieg der Arbeitslosigkeit, die heute noch nicht überwunden ist (2008: 5,6 % der unselbständigen Erwerbspersonen und Nov. 2018: 7,6 % (Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, 2018)). Das als »Jahrhunderthochwasser« bezeichnete Ereignis im August 2002 verursachte in ganz Österreich wirtschaftliche Schäden (Verluste am Vermögen und Produktionsausfall) von nicht ganz 3 Mrd. Euro (Sattler et al., 2003; Habersack et al., 2004). Nur ein geringer Teil davon trat im Alpenraum auf. Da räumlich differenzierte Auswertungen fehlen, kann der genaue Umfang im alpinen Bereich nicht beziffert werden.

In den folgenden Kapiteln werden Unterlagen und Statistiken vorgestellt, die herangezogen werden können, um die Schadenentwicklung aufgrund von Naturgefahren und Extremereignissen im Alpenraum zu beschreiben und die öffentlichen Ausgaben zur Schadenregulierung und zur Schadenprävention werden präsentiert. Die wichtigsten Treiber der Schadenentwicklung werden beschrieben und einige Defizite des Naturgefahrenmanagements in Österreich und Ansätze zu deren Beseitigung werden abschließend diskutiert.

28.2 Schadereignisse, Schäden, Schadenregulierung und Schadenprävention

28.2.1 Schadereignisse im alpinen Raum und Ansätze zum Management

Alpine Naturgefahrenquellen sind sehr häufig Auslöser von Schäden. Das Zusammentreffen von Ereignissen, individuellem Verhalten und sozialen Arrangements ist jedoch nur selten auf eine Ursache zurückzuführen. Die etwa seit einem Jahrzehnt betriebene systematische Analyse der Wirkung von Präventionsmaßnahmen und Kompensationsleistungen hat dazu beigetragen, dass die damit einhergehenden Anreizeffekte besser verstanden werden (vgl. dazu Gruber, 2008; Url und Sinabell, 2008; Holub und Fuchs, 2009; Schwarze et al., 2015; Hanger et al., 2018; und Unterberger et al., 2019).

Schäden sind die Konsequenzen von Naturereignissen und ihr Ausmaß hängt vor allem von der Intensität des Ereignisses, der Schadenempfindlichkeit und der Exposition des potentiell geschädigten Objektes bzw. Subjektes ab. Die wichtigste Quelle über die Häufigkeit von Naturereignissen im Alpenraum ist neben den meteorologischen Aufzeichnungen das Verzeichnis der Ereignisse, die von der Wildbach- und Lawinenverbauung seit Jahrzehnten systematisch

erfasst werden. Eine Übersicht zur Häufigkeit der Ereignisse ist in Abbildung 01 dargestellt. Die zugrunde liegenden Daten sind sehr detailliert und unterscheiden neben der Art des Prozesses auch den Grad der Schwere. Eine alternative Darstellung liefert Fuchs et al. (2015). Die durch Ereignisse ausgelösten ökonomisch bewerteten Schäden werden in dieser Ereignisdatenbank nicht systematisch erfasst. Erfahrungen aus anderen Ländern zeigen, dass die konsequente Erhebung der ökonomischen Schäden genutzt werden kann, die naturbedingten Gefahren besser einzuschätzen (Merz et al., 2004).

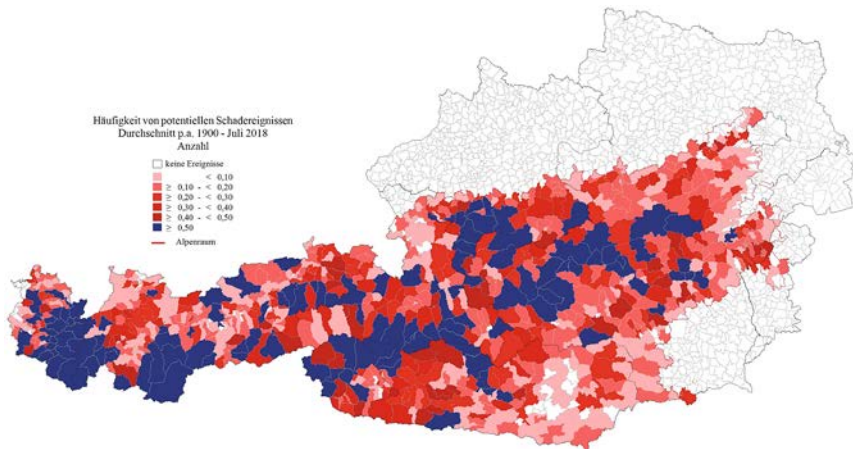


Abbildung 01: Durchschnittliche Häufigkeit von potentiellen Schadereignissen im Alpenraum.
Figure 01: Average frequency of potential damaging events in the Alpine region.

Datenquelle: Eigene Darstellung basierend auf Wildbach- und Lawinenkataster (WLK)/Ereigniskataster Stand Juli, 2018 (BMNT, 2018). *Hinweis:* Dargestellt ist die durchschnittliche Häufigkeit folgender Ereignisse: 20.926 Wildbachereignisse, 7.561 Lawinen, 1.495 Rutschungen, 416 Steinschläge. In der hier präsentierten Darstellung wird die Intensität nicht unterschieden. Alpenraum gemäß Alpenkonvention (RIS, 2018).

28.2.2 Schäden

Studien, in denen die volkswirtschaftlichen Kosten von Naturkatastrophen behandelt werden, analysieren die Konsequenzen von Ereignissen, in denen ein vielfach größerer Personenkreis betroffen ist verglichen mit typischen Schadereignissen im Alpenraum (vgl. Hochrainer-Stigler, 2009; Noy, 2009; Cavallo und Noy, 2010; Hallegatte, 2015). Studien, die entweder spezielle Risikobewertungszugänge präsentieren oder die Auswirkungen des Klimawandels thematisieren und Lösungszugänge skizzieren, die auch für den Alpenraum relevant sind, haben Fuchs et al. (2015), Pretenthaler et al. (2015), Steininger et al.

(2015), und Schinko et al. (2017) vorgelegt. Diese Untersuchungen haben Relevanz für alpine Naturgefahren und extreme Ereignisse, befassen sich aber nicht ausschließlich mit ihnen. Eine Studie, die den gesamten alpinen Raum betrachtet, wurde von Gobiet et al. (2014) vorgelegt.

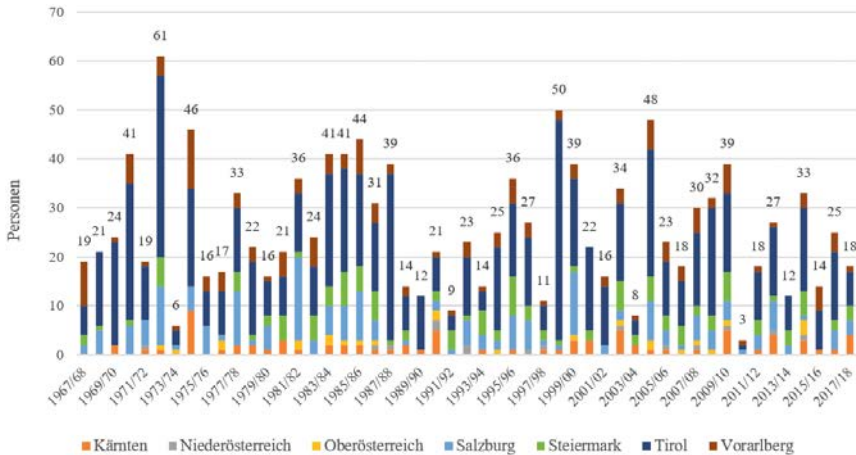


Abbildung 02: Anzahl der durch Lawinen getöteten Personen in den Bundesländern.

Figure 02: Number of persons killed by avalanches in the Federal Provinces.

Datenquelle: Bis 2004/05: BFW-Lawinen-Dokumentation (BFW, o. J.). Ab 2005/06: Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Lawinenwarndienste (o. J.), Winterbericht der österreichischen Lawinenwarndienste, erster bis achter (2016/17) gemeinsamer Jahresbericht. Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit, Alpinunfallstatistik (2018).

Die schwersten Schäden durch Gefahren in alpinen Gebieten sind Todesfälle und Personenschäden. Die Österreichische Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG) hat dazu 2014 Empfehlungen zu Schutzziele definiert und die Todesfallwahrscheinlichkeiten bezogen auf Personen in gelben und roten Gefahrenzonen und bezogen auf die Gesamtbevölkerung bezüglich der Gefahren durch Lawinen, Wildbäche und Rutschungen/Steinschlag ermittelt. Die Spannweite beträgt $2,36 \times 10^{-7}$ für die Gesamtbevölkerung bei Steinschlag/Rutschung bis $1,9 \times 10^{-4}$ für Personen in Lawinengefahrenzonen. Freizeitunfälle durch Lawinen wurden dabei ausgeklammert. Die Gefahr durch Wildbachprozesse ums Leben zu kommen ($3,8 \times 10^{-6}$) ist zwei Zehnerpotenzen niedriger als jene durch Lawinen den Tod zu erleiden ($1,9 \times 10^{-4}$).

Eine nach Bundesländern gegliederte Übersicht von Todesfällen durch Lawinen – einschließlich Freizeitunfällen – ist in Abbildung 02 dargestellt.

Hier wird nicht der Versuch unternommen, die ökonomischen Konsequenzen auszuleuchten. Ökonomische Aspekte völlig auszublenden wäre gleichwohl falsch. Ansätze zu einer ökonomischen Bewertung liefern Kosten für die Be-

reitstellung von Rettungseinheiten, Such- und Bergungskosten, Kosten der Invalidität und Angaben zum Value of a Statistical Life (vgl. Bründl, 2013; Leiter-Scheiring, 2013). Derartige Bewertungen von Personenschäden im Alpenraum liegen derzeit nicht vor, folglich gibt es derzeit auch kaum Anhaltspunkte zu den wirtschaftlichen Folgen.

Aus der Übersicht der Todesopfer von Lawinen (siehe Abbildung 02) über fünf Jahrzehnte ist nicht abzulesen, dass sich der Kontext der Gefährdung im Lauf der Zeit grundlegend geändert hat. Früher waren Lawinenabgänge im Siedlungsraum oder an Arbeitsstätten die häufigste Ursache für naturbedingte Todesfälle (in den 1970er Jahren kamen im Durchschnitt 4,2 Personen pro Jahr im Siedlungsraum, der Arbeitsstätte oder Straßen zu Tode). Durch systematische Präventionsmaßnahmen (siehe nächstes Kapitel) ist die Zahl der darauf zurückzuführenden Opfer in den letzten Jahren praktisch auf Null gesunken. Der Lawinenabgang in Galtür im Februar 1999 mit 38 Opfern war ein Ausnahmeereignis, da ansonsten nur wenige Personen von einzelnen Ereignissen betroffen sind.

Seit dem Ende des vorigen Jahrhunderts trifft es praktisch ausschließlich Personen, die im gefährdeten Gelände ihre Freizeit verbringen. Deutlich sichtbar ist dies unter anderem daran, dass im letzten Jahrzehnt jährlich annähernd 300 Personen von Lawinen erfasst wurden (Abbildung 03). In den 1970er Jahren waren es im Durchschnitt nicht mehr als 150 Personen.

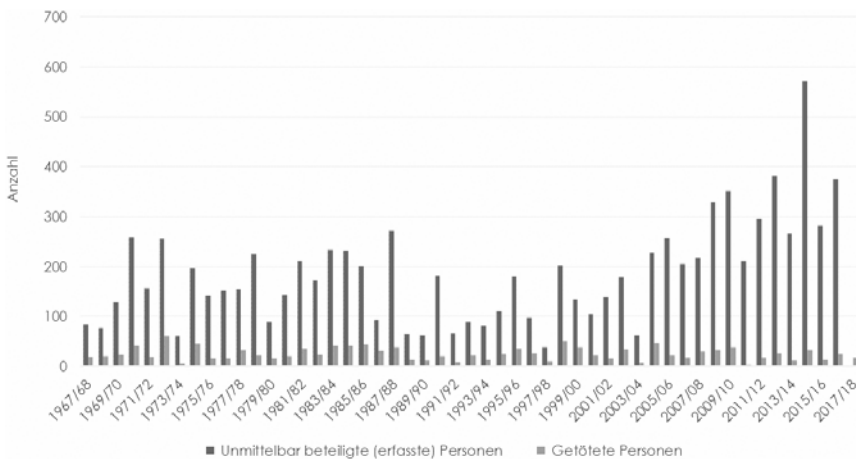


Abbildung 03: Von Lawinen erfasste und getötete Personen in Österreich.

Figure 03: Persons killed or affected by avalanches in Austria.

Datenquelle: Bis 2004/05: BFW-Lawinen-Dokumentation (BFW, o. J.) und Perzl (2008). Ab 2005/06: Arbeitsgemeinschaft der österreichischen Lawinenwarndienste (o. J.) und Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit (2018).

Die unmittelbaren ökonomischen Auswirkungen von Schäden durch Naturgefahren im Alpenraum werden nicht systematisch gemessen. Regelmäßige Berichte über besondere Ereignisse geben fallweise Aufschluss über ökonomisch relevante Aspekte, das Hauptaugenmerk richtet sich aber auf die Dokumentation der Prozesse und Ereignisketten (Hübl et al., 2002, 2005, 2007, 2009, 2010, 2013a,b, 2014, 2015, 2016, 2017; Hübl und Janu, 2003; Hübl und Pürstinger, 2003; Rudolf-Miklau, 2006). Für die Jahre 1972 bis 2004 liegen immerhin Angaben zu den monetären Objektschäden durch Wildbachereignisse vor (Oberndorfer et al., 2007).

Pretenthaler et al. (2018) sichten die aktuelle Informationslage über ökonomische Schäden durch Naturgefahren und beschreiben anhand von Fallstudien welche öffentlichen und privaten Stellen Daten sammeln. Was fehlt ist eine Standardisierung, Zusammenführung und Veröffentlichung der Daten. Im Zuge eines Projektes soll dieser Mangel in den kommenden Jahren beseitigt werden, und zwar durch den Aufbau einer an der Zentralanstalt für Meteorologie und Geodynamik zu etablierenden Datenbank (Schubert, 2018).

Auch wenn es nicht möglich ist, die ökonomischen Schäden anzugeben, bieten mehrere Quellen Anhaltspunkte über das Ausmaß von Schäden durch Naturgefahren. Um Aufschluss über das Schadenausmaß zu erhalten, ist es daher nötig, das Problem von mehreren Seiten aus einzugrenzen.

Eine von der Wildbach- und Lawinenverbauung primär für interne Zwecke geführte Statistik über »Sofortmaßnahmen« gibt zuverlässige Anhaltspunkte über die Kosten der Beseitigung von Schäden am Gewässerlauf oder zur Stabilisierung von Hängen. Es ist nicht möglich, daraus auf das Ausmaß weiterer Schäden (z. B. an Straßen oder Gebäuden) zu schließen. Diese Angaben können aber als eine Untergrenze der ökonomischen Schäden gelten. Im Durchschnitt der Jahre 2009 bis 2017 wurden im Alpenraum pro Jahr annähernd 13,4 Mio. Euro für diese Zwecke ausgegeben (im gesamten Bundesgebiet 14 Mio. Euro). Die regionale Verteilung dieser Ausgaben zur Schadenbeseitigung zeigt Abbildung 04.

Eine weitere Quelle, die Hinweise zur Höhe der Schäden durch Naturgefahren liefert, ist der jährliche Bericht des Bundesministeriums für Finanzen (BMF) zur Gebarung des Katastrophenfonds. In diesen Berichten werden die Zuschüsse an Privatpersonen, Gemeinden und Ländern angeführt, die aus dem Katastrophenfonds geleistet werden (siehe Pretenthaler, 2018 für eine aktuelle Bestandsaufnahme). Das genaue Schadenausmaß kann daraus nicht abgeleitet werden, da der Katastrophenfonds nur einen Teil der entstandenen Schäden abdeckt. Personen, deren Schäden durch private Versicherungen gedeckt werden, erhalten beispielsweise keine Leistungen aus dem Katastrophenfonds. Das tatsächliche Schadenausmaß von *Privatpersonen* dürfte abhängig vom Bundesland etwa zwei bis drei Mal höher sein (Köberl, 2018). Zur Beseitigung von

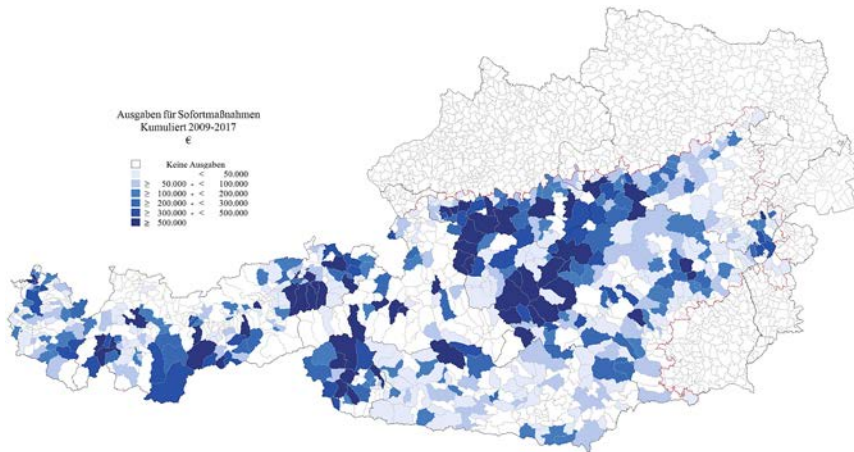


Abbildung 04: Regionale Verteilung der kumulierten Ausgaben für Sofortmaßnahmen (kumuliert 2009 bis 2017).

Figure 04: Regional distribution of cumulative expenditure for emergency measures (cumulated 2009 to 2017).

Datenquelle: Wildbach- und Lawinenkataster (BMNT, 2018), eigene Berechnungen und Darstellung. Hinweis: Die in der Datenquelle einzelnen Einzugsgebieten zugeordneten Zahlungen wurden anteilmäßig auf Gemeinden aufgeteilt.

außergewöhnlichen Schäden, die durch Hochwasser, Erdbeben, Vermurung, Lawinen, Erdbeben, Schneedruck, Orkan, Bergsturz und Hagel im Vermögen der *Gemeinden* anfallen, trägt der Katastrophenfonds des Bundes 50 % bei. Der Rechnungshof (2008, 2014, 2017) hat sich in mehreren Berichten mit diesem Themenkomplex teilweise kritisch auseinandergesetzt.

Die Angaben des BMF zu Leistungen des Katastrophenfonds sind nach Jahren und *Bundesländern* gegliedert. Es ist daher nicht möglich, die Ausgaben zur Schadenregulierung im Alpenraum exakt daraus abzuleiten. In Tabelle 01 wird daher eine *Schätzung* für die Periode 2000 bis 2017 vorgelegt. Zur Gewichtung wurde der Bevölkerungsanteil in alpinen Gemeinden herangezogen. Gemäß dieser Schätzung sind im Durchschnitt seit dem Jahr 2000 etwas mehr als 30 % aller Schäden gemäß den Kriterien des Katastrophenfonds im Alpengebiet entstanden.

28.2.3 Schadenprävention

Obwohl das genaue Ausmaß der ökonomischen Schäden nicht bekannt ist, herrscht kein Zweifel darüber, dass erhebliche Mittel gerechtfertigt sind, die Häufigkeit des Schadeneintritts zu verringern oder das Schadensausmaß von Ereignissen zu begrenzen.

Tabelle 01: Geschätzte Ausgaben des Katastrophenfonds zur Abdeckung von Schäden im Vermögen von Privatpersonen, der Länder und der Gemeinden im Alpenraum.

Table 01: Estimated expenditure of the Disaster Fund (Katastrophenfonds) to cover damage to the assets of private individuals, the Länder and the municipalities in the Alpine region.

Quelle: BMIF, diverse Jahrgänge. Hinweis: Gewichtung der Ausgaben nach dem Anteil der Bevölkerung im Alpenraum. Einschließlich der Ausgaben nach dem Hochwasserferentenschädigungs- und Wiederaufbau-Gesetz 2002 und 2005 (RIS 2003, 2006).

	Burgen- land	Kärnten	Nieder- österreich	Ober- österreich	Salzburg	Steiermark	Tirol	Vorarlberg	Österreich
	Mio. €								
2000	0,1	3,4	2,7	0,9	1,6	4,7	14,1	8,1	35,7
2001	0,1	3,6	0,1	1,3	2,4	4,5	8,8	6,6	27,4
2002	0,1	3,9	23,0	12,3	9,6	7,2	8,6	2,9	67,5
2003	0,0	5,6	25,2	17,7	11,3	5,9	8,8	2,4	77,1
2004	0,0	4,6	1,7	1,7	4,2	4,6	4,9	2,9	24,5
2005	0,1	1,9	0,4	0,3	11,6	14,8	19,2	11,9	60,1
2006	0,1	2,4	4,5	1,6	4,0	10,6	43,8	19,1	86,1
2007	0,1	2,0	7,9	1,5	5,9	4,2	8,3	12,7	42,5
2008	0,1	8,1	2,6	1,0	6,4	10,4	6,5	1,1	36,0
2009	0,1	2,3	2,9	1,2	3,6	5,1	6,8	2,0	24,2
2010	0,3	3,7	6,9	1,8	6,8	13,5	4,3	2,3	39,5
2011	0,1	1,6	2,1	0,7	4,0	6,0	5,4	3,4	23,3
2012	0,0	1,4	0,3	0,5	4,4	4,7	5,1	1,8	18,3
2013	0,0	2,7	4,1	5,2	10,6	9,2	15,7	1,7	49,3
2014	0,0	1,5	2,9	1,8	-3,1	10,1	21,4	3,1	37,8
2015	0,1	3,0	2,1	0,8	3,5	4,9	13,1	0,8	28,4
2016	0,0	3,1	0,3	0,8	6,3	4,5	16,0	0,7	31,7
2017	0,0	2,1	1,5	0,8	2,7	6,1	11,4	1,4	26,1

((Fortsetzung))

	Burgen- land	Kärnten	Nieder- österreich	Ober- österreich	Salzburg	Steiermark	Tirol	Vorarlberg	Österreich
2000–2017									
Alpenraum	1,3	57,0	91,1	51,9	95,8	131,1	222,2	85,1	735,4
Privatpersonen	0,3	21,6	61,7	28,4	67,3	39,3	85,6	38,7	343,0
Länder	0,3	4,5	4,8	10,8	10,6	38,2	48,6	22,2	140,0
Gemeinden	0,7	30,9	24,6	12,7	17,9	53,6	88,0	24,2	252,5

Der Prävention kommt dabei eine besondere Bedeutung zu und die wichtigsten Maßnahmen dazu sind:

- 1) Pläne mit Zonen unterschiedlicher Gefährdung, Warnsysteme, Aufklärung und Informationssysteme.
- 2) Flächenwirtschaftliche Maßnahmen wie das Anlegen und die Pflege von Schutzwäldern.
- 3) Verbauungsmaßnahmen.

Solche Maßnahmen haben in Österreich eine lange Tradition (Länger, 2003) und der Aufwand dafür ist beträchtlich (Sinabell et al., 2016). Wegen der hohen Kosten von Verbauungsmaßnahmen gibt es klare Vorgaben zu Bewertung einzelner Vorhaben (BMLFUW, 2006; siehe auch Hübl und Kraus, 2004). Solche werden nur dann finanziert, wenn die erwarteten Schäden an Objekten die Projektkosten überschreiten. Ein Überblick der Ausgaben seit dem Jahr 2000 wird in Abbildung 05 bezogen auf die Bevölkerungszahl gegeben.

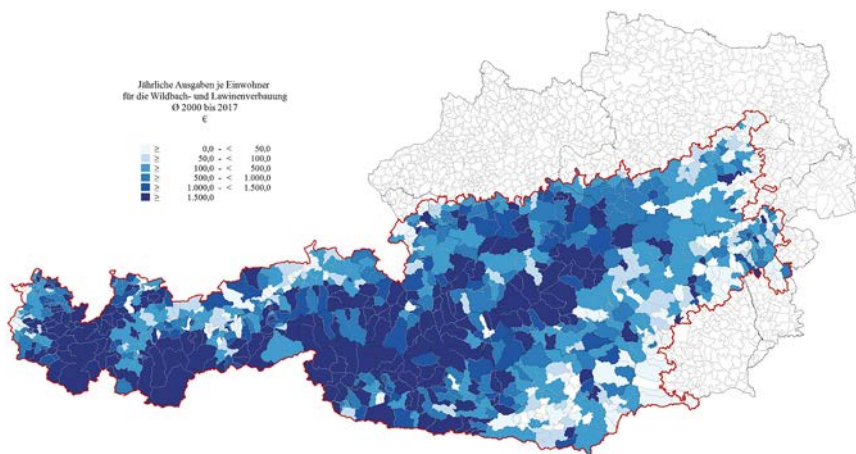


Abbildung 05: Kumulierte Investitionen je Bewohner/in für Maßnahmen der Wildbach- und Lawinerverbauung im Alpenraum im Zeitraum 2000–2017.

Figure 05: Cumulated investment per inhabitant on torrent and avalanche control in Alpine region during 2000 to 2017.

Datenquelle: Gemeindedatenbank zum Jahr 2018 (BMNT, o. J.); eigene Berechnungen: Gesamte Investitionen (Bund, Länder, Interessenten) für Maßnahmen der Wildbach- und Lawinerverbauung. Rote Linie markiert die Grenze des Alpenraums, hellgraue Linien sind Gemeindegrenzen; Bevölkerung: Statistik Austria (2018) zum Jahresende 2017.

Tabelle 02 gibt einen Überblick der Investitionen der Wildbach- und Lawinerverbauung je Bundesland und weist den Anteil der Mittel aus, die auf den Alpenraum – gemäß der Zuordnung von Gemeinden – entfallen. Die Tabelle gibt

Tabelle 02: Investitionen der Wildbach- und Lawinenverbauung, kumuliert 2000–2017.

Table 02: Investments on torrent and avalanche control, cumulated 2000–2017.

Quelle: Gemeindedatenbank zum Jahr 2018 (BMNT, o. J.); eigene Berechnungen: Gesamte Ausgaben für Maßnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung (einschließlich Steinschlag und Erosion). »Alpenraum« gemäß Definition der Alpenkonvention (RIS, 2018).

	Burgen- land	Kärnten	Nieder- österreich	Ober- österreich	Salzburg	Steiermark	Tirol	Vorarlberg	Wien	Österreich
2000–2017										
	Mio. €									
Insgesamt	13,785	240,605	138,093	200,605	413,053	302,437	652,374	297,057	4,073	2.262,083
Bund	8,454	142,114	81,145	117,150	245,762	174,260	344,443	169,353	2,030	1.284,711
Länder	4,073	46,525	25,576	37,848	65,812	60,876	139,627	56,377	0,885	437,599
Interessenten	1,257	51,965	31,372	45,607	101,479	67,301	168,305	71,328	1,158	539,773
davon im Alpenraum	4,743	240,605	92,968	151,413	407,490	297,025	652,374	297,057	0,000	2.143,676
	Anteil Alpenraum in %									
Alpenraum	34,4	100,0	67,3	75,5	98,7	98,2	100,0	100,0	0,0	94,8

auch einen Überblick zu den Finanzierungsströmen. Die »Interessenten« sind in den meisten Fällen die Gemeinden und nur in Ausnahmefällen die direkt von Maßnahmen begünstigten Personengruppen. Die in Tabelle 02 angeführten Beträge entsprechen etwa einem Drittel der Gesamtausgaben für Präventivmaßnahmen zu Naturgefahren (vgl. Sinabell, 2018).

Die Ausgaben von Privatpersonen und von Unternehmen zur Schadenprävention oder Schadenminderung sind in der Übersicht nicht enthalten. Es gibt dazu auch keine Statistiken. Auch die Ausgaben von Infrastrukturbetreibern (z. B. Straßenbau, Seilbahnbetreiber) zur Schadenvermeidung werden weder systematisch erfasst noch berichtet.

28.3 Schadenursachen und Risiko-Steuerung

28.3.1 Bevölkerungsentwicklung

Das Ausmaß der Schäden und die Ausgaben zur Schadenprävention stehen in unmittelbarem Zusammenhang mit der Bevölkerung. Die Entwicklung der Bevölkerung im Alpenanteil der einzelnen Bundesländer ist in Tabelle 03 zusammengestellt. Die Übersicht zeigt, dass der *Anteil* der in Österreich im Alpenraum lebenden Personen seit dem Jahr 2000 leicht abgenommen hat. Trotz des anteiligen Rückgangs hat die *Anzahl* der Personen, die im Alpenraum Österreichs leben, signifikant zugenommen (siehe mittlerer Teil Tabelle 03).

Die regionale Bevölkerungsentwicklung ist jedoch sehr heterogen. Dies zeigt Abbildung 06, in der Zuwachs bzw. Abnahme der Bevölkerung zwischen 2002 und 2017 je Gemeinde dargestellt ist. Noch detailliertere Auswertungen auf der Grundlage von Rasterdaten (250 x 250 m) zeigen, dass die Personen bei der Wahl, wo sie wohnen, dem Gefahrenpotential Rechnung tragen. Wie Sinabell et al. (2016) herausfanden, sind die Bevölkerungszuwächse von Personen am Hauptwohnsitz in Zonen mit hohem Gefährdungsgrad geringer als in nicht gefährdeten Zonen. Auswertung von Arbeitsstätten zeigen, dass auch Unternehmen gefährdete Zonen meiden. Es wurde der Stand der Bevölkerung und Arbeitsstätten 2001 und 2011 verglichen und es wurde eine Gleichverteilung der Bevölkerung bzw. Arbeitsstätten in den Rasterzellen unterstellt. Die Ergebnisse von Fuchs et al. (2015, 2017) stehen dazu nicht notwendigerweise im Widerspruch, da unterschiedliche Gebiete untersucht wurden und unterschiedliche Gruppen verglichen wurden. Das von Löschner et al. (2017) konstatierte »exposure paradoxon« (die Bevölkerung in gefährdeten Zonen von Abwanderungsgemeinden nimmt zu) wurde von Sinabell et al. (2016) nicht untersucht.

Vorliegende Prognosen deuten darauf hin, dass sich die heterogene räumliche Entwicklung der Bevölkerung weiter fortsetzen wird. Die Bevölkerung einer

Tabelle 03: Bevölkerung insgesamt und im Alpenraum (gemäß Alpenkonvention, RIS, 2018) an der Bevölkerung insgesamt.

Table 03: Population in total and in the Alpine region (according to the Alpine Convention RIS, 2018) in the total population.

Quelle: Statistik Austria (2018), Bevölkerung zu Jahresbeginn 2002–2018 nach Gemeinden (Gebietsstand zum Stichtag 01.01.2018); eigene Berechnungen.

	Burgenland	Kärnten	Niederösterreich	Oberösterreich	Salzburg	Steiermark	Tirol	Vorarlberg	Österreich
	Bevölkerung insgesamt, Mio. Einwohner								
2002	0,277	0,560	1,545	1,378	0,517	1,188	0,676	0,353	8,064
2010	0,284	0,558	1,606	1,409	0,527	1,205	0,705	0,368	8,352
2017	0,292	0,561	1,666	1,465	0,549	1,237	0,746	0,389	8,773
	Bevölkerung im Alpenraum, Mio. Einwohner								
2002	0,032	0,560	0,447	0,171	0,456	0,595	0,676	0,353	3,289
2010	0,032	0,558	0,459	0,172	0,463	0,578	0,705	0,368	3,336
2017	0,032	0,561	0,471	0,175	0,482	0,568	0,746	0,389	3,424
	Bevölkerung im Alpenraum, Anteil in %								
2002	11,4	100,0	28,9	12,4	88,3	50,1	100,0	100,0	40,8
2010	11,2	100,0	28,6	12,2	88,0	48,0	100,0	100,0	39,9
2017	10,9	100,0	28,3	11,9	87,8	45,9	100,0	100,0	39,0

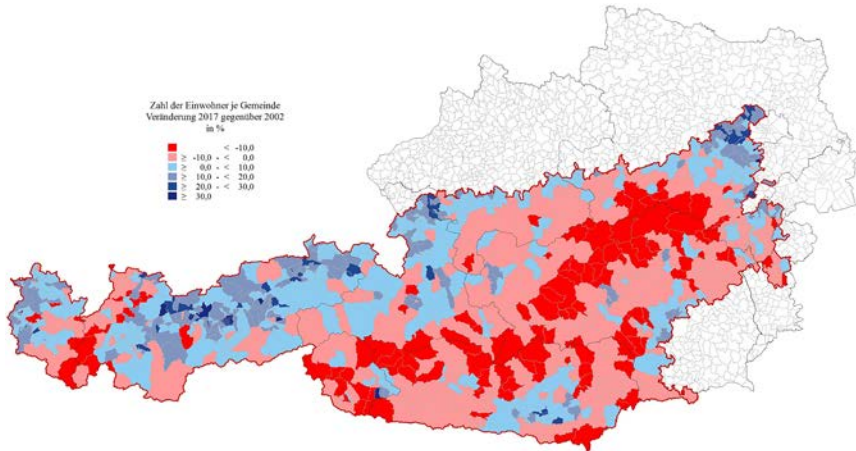


Abbildung 06: Entwicklung der Bevölkerung im Alpenraum (Veränderung 2017 gegenüber 2002 in %).

Figure 06: Population development in the Alpine region, % change 2017 compared to 2002. *Quelle:* Statistik Austria (2018), Bevölkerung zu Jahresbeginn 2002–2017 nach Gemeinden (Gebietsstand zum Stichtag 01.01.2017); WIFO-Berechnungen.

großen Zahl von Gemeinden, vor allem in solchen mit schlechter Verkehrsanbindung und großer räumlicher Distanz zu urbanen Zentren, wird weiter schrumpfen, während der Druck auf den Siedlungsraum in bereits jetzt sehr dicht besiedelten Gebieten weiter zunehmen wird (ÖROK, 2015a,b).

28.3.2 Gebäudebestand

Schäden an Gebäuden und an Infrastruktureinrichtungen treten ebenfalls in erheblichem Umfang auf. Dabei zeigt sich, dass die Zahl der Gebäude deutlich stärker angestiegen ist als die Bevölkerungszahl. Es ist auch auffällig, dass sich der Anteil der Gebäude im Alpenraum am Gesamtbestand während der zurückliegenden Jahre kaum verändert hat. Dies hängt damit zusammen, dass aufgrund niedrigerer Kosten für Bauplätze im ländlichen Raum die Notwendigkeit für die Errichtung von Mehrparteienwohnhäusern geringer ist. Die Übersicht zur Entwicklung des Gebäudebestands in Tabelle 04 zeigt die dynamische Zunahme der Anzahl der Gebäude. Damit ist das potentielle Schadensausmaß gefährdeter Objekte in den zurückliegenden Jahrzehnten deutlich gestiegen (vgl. Fuchs et al., 2015, 2016), weil ja auch Infrastruktur nötig ist, die Gebäude an die öffentlichen Netze anzuschließen. So wie im Fall der Bevölkerungsentwicklung wurde auch im Hinblick auf die Zahl der Gebäude beobachtet, dass Gefahrenzonen weniger stark verbaut werden als nicht gefährdete Bereiche (Sinabell et al., 2016).

Tabelle 04: Entwicklung der Zahl der Wohngebäude im Alpenraum.
Table 04: Development of the number of residential buildings in the Alpine region.
Quelle: Gebäude- und Wohnungszählung 2011 (Statistik Austria, 2011), eigene Berechnungen. Alpenraum gemäß Alpenkonvention (RIS, 2018).

	Burgenland	Kärnten	Niederösterreich	Oberösterreich	Salzburg	Steiermark	Tirol	Vorarlberg	Österreich
	Wohngebäude insgesamt, Anzahl								
1991	95.780	129.277	451.426	279.379	92.683	262.814	124.476	70.023	1.640.603
2001	104.624	143.562	499.653	316.991	106.700	290.329	143.457	80.809	1.830.053
2011	113.488	153.854	541.385	346.004	112.649	315.841	153.200	88.432	1.973.979
	davon Wohngebäude im Alpenraum, Anzahl								
1991	11.172	129.277	129.587	43.512	79.889	139.711	124.476	70.023	727.647
2001	11.832	143.562	142.431	48.392	91.255	152.668	143.457	80.809	814.406
2011	12.709	153.854	152.637	51.986	95.447	164.393	153.200	88.432	872.658
	Anteil der Wohngebäude im Alpenraum an den Wohngebäuden insgesamt, %								
1991	11,7	100,0	28,7	15,6	86,2	53,2	100,0	100,0	44,4
2001	11,3	100,0	28,5	15,3	85,5	52,6	100,0	100,0	44,5
2011	11,2	100,0	28,2	15,0	84,7	52,0	100,0	100,0	44,2

28.4 Schlussfolgerungen und Ausblick

Im vorliegenden Beitrag wurde der Versuch unternommen, ökonomische Dimensionen alpiner Naturgefahren aus verschiedenen Blickwinkeln zu beleuchten. Eine solche Herangehensweise ist nötig, da derzeit keine zuverlässigen Statistiken vorliegen, aus denen wirtschaftliche Schäden im Alpenraum unmittelbar abgelesen werden können. Derzeit laufende Anstrengungen, um dieses Defizit zu beseitigen, sind vor allem auf zwei Motive zurückzuführen:

- 1) Das Wissen über schadenauslösende Ereignisse hat in den letzten Jahren stark zugenommen und daher wird das Fehlen von zuverlässigen Angaben zu den ökonomischen Schäden umso deutlicher wahrgenommen.
- 2) Einen Überblick zu innovativen Ansätzen in der Gestaltung der Zusammenarbeit öffentlicher und privater Akteure hat die OECD vorgelegt und dabei betont, dass zuverlässige Informationen über ökonomische Dimensionen eine notwendige Voraussetzung für effizientes Naturgefahrenmanagement sind (OECD, 2014).

Wie dieser Beitrag dokumentiert, wendet die öffentliche Hand beträchtliche Mittel auf, Schäden zu vermeiden und teilweise zu kompensieren. Diese Mittel bestmöglich einzusetzen ist ein volkswirtschaftliches Erfordernis und ein besseres Verständnis über die Zusammenhänge von Prozessen, Ereignissen und ökonomischen Konsequenzen ist dazu eine notwendige Voraussetzung.

Nicht nur aus einem rechtlichen (Weber, 2018), auch aus einem ökonomischen Blickwinkel ist eine zentrale Aufgabe des Staates, öffentliche Güter wie Katastrophenschutzmaßnahmen bereitzustellen. Staaten, die mit geeigneten Institutionen in der Lage sind, öffentliche Güter bereitzustellen, ermöglichen ein höheres Wohlbefinden der Bürger (Acemoglu et al., 2014). Staatliches Handeln ist angezeigt wegen der mangelhaften Anreize privater Akteure, diese ausreichend anzubieten. Dieses »Marktversagen« wird vielfach als Legitimation für den Staat und für kollektives Handeln gesehen (Nowotny und Zagler, 2009).

Unter öffentlichen Gütern versteht man in der Ökonomie Güter und Dienstleistungen, die zwei Eigenschaften aufweisen: Es ist nicht möglich oder unwirtschaftlich einzelne Personen von der Nutzung auszuschließen und die Inanspruchnahme durch eine Person beeinträchtigt die Nutzung durch andere Personen nicht (Samuelson, 1954). Diese Eigenschaften werden Nicht-Ausschließbarkeit und Nicht-Rivalität genannt und sind auch in der Umweltökonomie besonders bedeutend (Pearce und Turner, 1990). Die in der Vergangenheit getätigten hohen öffentlichen Aufwendungen zur Schadensabwehr gegen alpine Naturgefahren können damit teilweise erklärt werden. Eine Rechtfertigung für ähnliches Vorgehen in der Zukunft lässt sich daraus jedoch nicht unmittelbar ableiten.

In Bezug auf alpine Naturgefahren gibt es eine enge Beziehung zur Raumordnung, da es um die Abstimmung der öffentlichen und privaten Nutzung von Raumressourcen geht. Naturgefahren sind eine besondere Herausforderung in der Raumordnung und die Österreichische Raumkommission trägt diesem Umstand durch zahlreiche Initiativen und Publikationen seit Langem Rechnung (ÖROK, 1986, 2005, 2011, 2015c). Die Herausforderung besteht darin, eine Balance zu finden, die eine dynamische und wirtschaftliche Entwicklung von Regionen erlaubt und gleichzeitig die Risiken kontrolliert.

Integrierte räumliche und regionale Entwicklungsstrategien sind dazu ein geeigneter Ansatz (vgl. Greiving et al., 2006; Greiving, 2018). Der Beitrag, den die Ökonomie dazu liefern kann, liegt in der Bewertung von Handlungsoptionen und im Aufdecken und Sichtbarmachen von Strategien, die für die Gesellschaft vorteilhaft sind. Solche Handlungsempfehlungen können in einzelnen Fällen nahelegen, dass öffentliche Interventionen getätigt werden sollten, etwa Verbote zu erlassen oder Förderungen zu gewähren. In anderen Fällen wird ein Eingriff in die Marktentwicklung nicht erforderlich sein und es wird ausreichen, die Akteure über die Risiken ausreichend gut zu informieren. Um dieser Aufgabe gerecht zu werden, sind zuverlässige und systematische Erhebungen über das ökonomische Schadensausmaß unerlässlich. Wie die Ausführungen im vorliegenden Beitrag gezeigt haben, sollte diesem Aspekt eine deutlich höhere Priorität eingeräumt werden als bisher der Fall war.

Danksagung

Dieser Beitrag wäre ohne die tatkräftige Unterstützung zahlreicher Personen nicht möglich gewesen. Besonderer Dank gebührt Dietmar Weinberger (WIFO), Dipl.-Geogr. Susanne Mehlhorn und DI Thomas Fink (BMNT), Judith Köberl (Joanneum Research), Mag. Regina Sterr (Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit). Wertvolle Beiträge zur Verbesserung des Manuskripts und Hinweise zur Ergänzung der Quellen sind zwei anonymen Gutachten zu verdanken.

Literatur

- Acemoglu, D., Gallego, F., Robinson, J., 2014. Institutions, Human Capital, and Development. *Annual Review of Economics*, 6, S. 875–912.
- Arbeitsgemeinschaft Österreichische Lawinenwarndienste, o. J. Saisonberichte der österreichischen Lawinendienste. <http://www.lawine-steiermark.at/dienste/downloads/> [18.12.2018].

- BFW, o. J. BFW-Lawinen-Dokumentation. <https://bfw.ac.at/db/bfwcms.web?dok=4316> [18. 12. 2018].
- BMF, 2019. Katastrophenfondsberichte. <https://www.bmf.gv.at/budget/finanzbeziehung-zu-laendern-und-gemeinden/katastrophenfonds.html> [18. 12. 2018].
- BMLFUW, 2006. Richtlinien für die Wirtschaftlichkeitsuntersuchung und Priorisierung von Maßnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung gemäß §3 Abs. 2 Z. 3 Wasserbautenförderungsgesetz. Selbstverlag, Wien.
- BMNT, 2018. Wildbach- und Lawinenkataster (WLK)/Ereigniskataster und PVM Stand Juli, 2018. <https://www.bmnt.gv.at/forst/wildbach-lawinenverbauung.html> [18. 12. 2018].
- BMNT, o. J. Gemeindedatenbank (GEDABA). <https://www.agraroeconomik.at/> [18. 12. 2018].
- Bründl, M., 2013. Bewertungsansätze zu Personenschäden im Naturgefahrenbereich. Workshop Bewertungsansätze zu Personenschäden im Naturgefahrenbereich, BMLFUW, Wien.
- Cavallo, E., Noy, I., 2010. The economics of natural disasters: a survey. IDB Working Paper Series, 124, S. 49. DOI: 10.2139/ssrn.1817217.
- Fuchs, S., Keiler, M., Zischg, A., 2015. A spatiotemporal multi-hazard exposure assessment based on property data. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 15(9), S. 2127–2142. <http://dx.doi.org/10.5194/nhess-15-2127-2015>.
- Fuchs, S., Keiler, M., Zischg, A., 2016. A spatiotemporal multi-hazard exposure assessment based on property data. In: *European Geosciences Union (Hrsg.), Geophysical Research Abstracts*, 18, EGU2016-3.
- Fuchs, S., Röthlisberger, V., Thaler, T., Zischg, A., Keiler, M., 2017. Natural hazard management from a coevolutionary perspective: Exposure and policy response in the European Alps. *Annals of the American Association of Geographers*, 107(2), S. 382–392. <http://dx.doi.org/10.1080/24694452.2016.1235494>.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., Stoffel, M., 2014. 21st century climate change in the European Alps – a review. *Science of The Total Environment*, 493(9), S. 1138–1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>.
- Greiving, S., 2018. Strategien der regionalen raumplanerischen Risikovorsorge. In: A. Kanonier, F. Rudolf-Miklau (Hrsg.), *Regionale Risiko Governance: Recht, Politik und Praxis*. Verlag Österreich, Wien, S. 411–425.
- Greiving, S., Fleischhauer, M., Lückenköter, J., 2006. A Methodology for an integrated risk assessment of spatially relevant hazards. *Journal of Environmental Planning and Management*, 49(1), S. 1–19. <https://doi.org/10.1080/09640560500372800>.
- Gruber, M., 2008. Alternative solutions for public and private catastrophe funding in Austria. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 8, S. 603–616. <https://doi.org/10.5194/nhess-8-603-2008>.
- Habersack, H., Bürgel, J., Petraschek, A., 2004. Flood-Risk-Analyse der Hochwasserereignisse vom August 2002 – Synthesebericht. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Hallegatte, S., 2015. The indirect cost of natural disasters and an economic definition of macroeconomic resilience. *Policy Research Working Papers*, 7. DOI: 10.1596/1813-9450-7357.
- Hallegatte, S., Przulski, V., 2010. The economics of natural disasters: concepts and methods. World Bank, Eigenverlag, Washington. <https://doi.org/10.1596/1813-9450-5507>.

- Hanger, S., Linnerooth-Bayer, J., Surminski, S., Nenciu-Posner, C., Lorant, A., Ionescu, R., Patt, A., 2018. Insurance, Public Assistance, and Household Flood Risk Reduction: A Comparative Study of Austria, England, and Romania. *Risk Analysis* 38(4), S. 680–93. <https://doi.org/10.1111/risa.12881>.
- Hochrainer-Stigler, S., 2009. Assessing the macroeconomic impacts of natural disasters: are there any? *World Bank Policy Research Working Papers*, 6. DOI: 10.1596/1813-9450-4968.
- Holub, M., Fuchs, S., 2009. Mitigating mountain hazards in Austria – Legislation, risk transfer, and awareness building. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 9(2), S. 523–537. <https://www.nat-hazards-earth-syst-sci.net/9/523/2009/nhess-9-523-2009.html>.
- Hübl, J., Beck, M., Kyriazis, G., Sauermoser, C., Frankl, D., 2017. Ereignisdokumentation 2016. IAN Report 185. Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Hübl, J., Beck, M., Moser, M., Riedl, C., 2015. Ereignisdokumentation 2014. IAN Report 167. Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Hübl, J., Beck, M., Zöchling, M., Moser, M., Kienberger, C., Jenner, A., Forstlechner, D., 2016. Ereignisdokumentation 2015. IAN Report 175(1). Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Hübl, J., Chiari, M., Kogelnig, C., Scheidl, A.E., 2009. Die Wildbachereignisse im Sommer 2009 Ereignisdokumentation (ERDOK09). IAN Report 133. Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Hübl, J., Chiari, M., Scheidl, C., Kogelnig, A., Procter, E., Eisl, J., Kundela, G., Schneider, A., Sitter, F., 2010. Ereignisdokumentation Mai 2010 (ERDOK 10-1). IAN Report 139. Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Hübl, J., Chiari, M., Scheidl, C., Wiesinger, T., Janu, S., 2014. Ereignisdokumentation 2013 – Bericht über die Wildbachereignisse im Juni 2013 in Österreich. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Sektion IV Forstwesen, Eigenverlag, Wien.
- Hübl, J., Eisl, J., Scheidl, C., Chiari, M., Wiesinger, T., Heiser, M., Schimmel, A., Trojer, M., Reischenböck, G., 2013a. Ereignisdokumentation 2013. IAN Report 155. Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Hübl, J., Eisl, J., Tadler, R., 2013b. Ereignisdokumentation 2012, Jahresrückblick der Ereignisse. IAN Report 150(3). Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Hübl, J., Ganahl, E., Bacher, M., Chiari, M., Holub, M., Kaitna, R., Prokop, A., Dunwoody, G., Forster, A., Schneiderbauer, S., 2005. Dokumentation der Wildbachereignisse vom 22./23. August 2005 in Tirol. IAN Report 109(1). Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Hübl, J., Ganahl, E., Gruber, H., Holzinger, G., Moser, M., Pichler, A., 2002. Dokumentation des Ereignisses vom 17. Juli 02, Fischbach. Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Hübl, J., Janu, S., 2003. Ereignisdokumentation des Hochwassers August 2002 im Nördlichen Niederösterreich. WLS REPORT 96. Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.

- Hübl, J., Kraus, D., 2004. Erweiterungsvorschläge zur Kosten-Nutzen-Untersuchung der Wildbach- und Lawinerverbauung. WLS-Report 94 (unveröffentlicht).
- Hübl, J., Pürstinger, C., 2003. Dokumentation und Grundlagenerhebung zur Aufarbeitung der Hochwasserereignisse vom August 2002 im Bereich der WLW-Gebietsbauleitung Salzkammergut. Endbericht. Institut für Alpine Naturgefahren und Forstliches Ingenieurwesen, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Hübl, J., Thaler, S., Holub, M., 2007. Dokumentation und Analyse des Ereignisses vom 19. Juni 2006 am Angerbach/Bad Hofgastein. IAN Report 114. Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Köberl, J., 2018. Persönliche Mitteilung, 16. Okt. 2018.
- Länger, E., 2003. Der forsttechnische Dienst für Wildbach- und Lawinerverbauung in Österreich und seine Tätigkeit seit der Gründung im Jahre 1884. Dissertation, Universität für Bodenkultur, Wien.
- Leiter-Scheiring, A., 2013. Bewertung von Personenschäden – Eine ökonomische Betrachtung. Workshop Bewertungsansätze zu Personenschäden im Naturgefahrenbereich, BMLFUW, Wien.
- Löschner, L., Herrnegger, M., Apperl, B., Senoner, T., Seher, W., Nachtnebel, H.P., 2017. Flood risk, climate change and settlement development: a micro-scale assessment of Austrian municipalities. *Regional Environmental Change*, 17(2), S. 311–322. <http://dx.doi.org/10.1007/s10113-016-1009-0>.
- Merz, B., Kreibich, H., Thieken, A., Schmidtke, R., 2004. Estimation uncertainty of direct monetary flood damage to buildings. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 4, S. 153–163.
- Nowotny, E., Zagler M., 2009. Der öffentliche Sektor. Einführung in die Finanzwissenschaft. Springer Verlag, S. 665.
- Noy, I., 2009. The macroeconomic consequences of disasters. *Journal of Development Economics*, 88(2), S. 221–231. DOI: 10.1016/j.
- Oberndorfer, S., Fuchs, S., Rickenmann, D., Andrecs, P., 2007. Vulnerabilitätsanalyse und monetäre Schadensbewertung von Wildbachereignissen in Österreich. BFW Bericht 139. Schriftenreihe des Bundesforschungs- und Ausbildungszentrums für Wald, Naturgefahren und Landschaft, Wien.
- OECD, 2014. Boosting Resilience through Innovative Risk Governance. Eigenverlag, Paris.
- ÖGG, 2014. Empfehlung für das Schutzziel bei gravitativen Naturgefahren in Österreich. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik. Eigenverlag, Salzburg.
- ÖROK, 1986. Raumordnung und Naturgefahren. Eigenverlag, Wien.
- ÖROK, 2005. Präventiver Umgang mit Naturgefahren in der Raumordnung. Materialienband. Eigenverlag, Wien.
- ÖROK, 2011. ÖREK – Österreichisches Raumentwicklungskonzept. <http://www.oerok.gv.at/raum-region/oesterreichisches-raumentwicklungskonzept/oerek-2011.html> [06.05.2014].
- ÖROK, 2015a. ÖROK-Regionalprognosen 2014–2030, Teil 1: Bevölkerung. Eigenverlag, Wien.
- ÖROK, 2015b. ÖROK-Regionalprognosen 2014–2030, Teil 2: Erwerbsprognose. Eigenverlag, Wien.
- ÖROK, 2015c. Risikomanagement für gravitative Naturgefahren in der Raumplanung. Materialienband. Eigenverlag, Wien.

- Österreichisches Institut für Wirtschaftsforschung, 2018. WDS-WIFO-Daten-System. https://www.wifo.ac.at/daten/wds__wifo-daten-system [18.12.2018].
- Österreichisches Kuratorium für Alpine Sicherheit, 2018. Europas größte alpine Unfalldatenbank. Alpinunfallstatistik. <https://www.alpinesicherheit.at/de/Unfallstatistik/> [18.12.2018].
- Pearce, D., Atkinson, G., Morato, S., 2006. Cost-Benefit Analysis and the Environment. Recent Developments. Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung, Paris.
- Pearce, D., Turner, K., 1990. Economics of Natural Resources and the Environment. Johns Hopkins University Press, 1990.
- Perzl, F., 2008. Datenbeschreibung der BFW-Lawinen-Dokumentation (BFW-LD). Bundesamt für Wald. Eigenverlag, Innsbruck.
- Pretenthaler, F., 2018. Ökonomische Bedeutung des Hochwassers in Österreich, In: A. Kanonier, F. Rudolf-Miklau (Hrsg.), Regionale Risiko Governance: Recht, Politik und Praxis. Verlag Österreich, Wien, S. 367–382.
- Pretenthaler, F., Hyll, W., Türk, A., Vettors, N., 2004. Internationale Erfahrungen mit nationalen Risikotransfersystemen im Zusammenhang mit Großschadensereignissen aus Naturkatastrophen. Analyse der Hochwasserereignisse von 2002. In: Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft (Hrsg.), Flood Risk Studie im Auftrag des Umweltbundesamts, Wien.
- Pretenthaler, F., Köberl, J., Schubert, C., 2018. Ermöglichung des Aufbaus einer österreichweiten Schadendatenbank zu Wetter und klimabedingten Infrastrukturschäden. Endbericht im Auftrag des Klima- und Energiefonds, Joanneum Research LIFE, Graz.
- Pretenthaler, F., Kortasch, D., Hochrainer-Stigler, S., Mechler, R., Urban, H., Steininger, K., 2015. Chapter 18: Catastrophe Management: Riverine Flooding, In: K.W. Loibl, M. Steinigner, B. Koenig, W. Bednar-Friedl (Hrsg.), Economic Evaluation of Climate Change Impacts. Springer International, Cham, S. 349–366. DOI: 10.1007/978-3-319-12457-5_18.
- Rechnungshof, 2008. Schutz vor Naturgefahren. Verwendung der Mittel aus dem Katastrophenfonds. Prüfbericht. Bund, 8, Wien.
- Rechnungshof, 2014. Gewährung von Landesbeiträgen zur Verhinderung und Beseitigung katastrophenbedingter Schäden. Bericht des Rechnungshofes. Reihe Bund, 2014/13. Eigenverlag, Wien.
- Rechnungshof, 2017. Katastrophenhilfe in Niederösterreich, Salzburg und Tirol. Reihe Bund, 2017/53. Eigenverlag, Wien.
- RIS, 2003. Hochwasseropferentschädigungs- und Wiederaufbau-Gesetz 2002 – HWG 2002, BGBl. Nr. 155/2002. <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002225&FassungVom=2003-10-28> [10.10.2018].
- RIS, 2006. Hochwasseropferentschädigungs- und Wiederaufbau-Gesetz 2005 – HWG 2005, BGBl. Nr. 112/2005. <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20004331&FassungVom=2006-12-31> [10.10.2018].
- RIS, 2018. Übereinkommen zum Schutz der Alpen (Alpenkonvention), BGBl. Nr. 477/1995. <https://www.ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=10010876> [10.10.2018].

- Rudolf-Miklau, F., 2006. Hochwasser 2005. Ereignisdokumentation – Bericht Österreich. Hydrographischer Dienst – Bundeswasserbauverwaltung – Wildbach- und Lawinerverbauung, Bregenz.
- Samuelson, P.A., 1954. The Pure Theory of Public Expenditure. *The Review of Economics and Statistics*, 36(4), S. 387–389.
- Sattler, St., Wind, H., Fuchs, H., Habersack, H., 2003. Hochwasser 2002. Datenbasis der Schadensbilanz 2002, StartClim.9, Flood Risk. Forschungsbericht im Rahmen des Projektes »Analyse der Hochwasserereignisse vom August 2002«. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Schinko, T., Mechler, R., Hochrainer-Stigler, S., 2017. A Methodological Framework to Operationalize Climate Risk Management: Managing Sovereign Climate-Related Extreme Event Risk in Austria. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, 22(7), S. 1063–1086. <https://doi.org/10.1007/s11027-016-9713-0>.
- Schubert, C., 2018. Persönliche Mitteilung, 16. Okt. 2018
- Schwarze, R., Holthausen, N., Locher, P., Quinto, C., Wagner, G.G., 2015. Sichern und Versichern im gesamtwirtschaftlichen Gleichgewicht. Präventionsstiftung der Kantonalen Gebäudeversicherung. Eigenverlag, Bern, 67 S.
- Sinabell, F., 2018. Regionalwirtschaftliche Effekte von öffentlichen Investitionen in Schutzinfrastruktur. In: A. Kanonier, F. Rudolf-Miklau (Hrsg.), *Regionale Risiko Governance: Recht, Politik und Praxis*. Verlag Österreich, Wien, S. 427–443.
- Sinabell, F., Pennerstorfer, D., Lackner, S., 2016. Eine volkswirtschaftliche Analyse der Wildbach- und Lawinerverbauung in Österreich. Die Bereitstellung von Schutzgütern bisher und der künftige Bedarf. Studie des Österreichischen Instituts für Wirtschaftsforschung im Auftrag des Bundesministeriums für Land- und Forstwirtschaft, Umwelt und Wasserwirtschaft, Wien.
- Sinabell, F., Url, T., 2007. Versicherungen als effizientes Mittel zur Risikotragung von Naturgefahren. Studie des österreichischen Instituts für Wirtschaftsforschung im Auftrag des Verbands der Versicherungsunternehmen Österreichs, Wien.
- Statistik Austria, 2011. Gebäude- und Wohnungszählung. https://www.statistik.at/web_de/fragebogen/registerzaehlung/gebaeude_wohnungszaehlung/index.html [18.12.2018].
- Statistik Austria, 2018. Bevölkerungsstand und Bevölkerungsveränderung. http://www.statistik.at/web_de/statistiken/menschen_und_gesellschaft/bevoelkerung/bevoelkerungsstand_und_veraenderung/index.html [18.12.2018].
- Steininger, K.W., König, M., Bednar-Friedl, B., Kranzl, L., Loibl, W., Prettenhaler, F., 2015. *Economic Evaluation of Climate Change Impacts: Development of a Cross Sectoral Framework and Results for Austria*. Springer Verlag, 468 S. <http://www.springer.com/de/book/9783319124568>.
- Unterberger, C., 2017. How Flood Damages to Public Infrastructure Affect Municipal Budget Indicators. *Economics of Disasters and Climate Change*, 2(1), S. 5–20. DOI: 10.1007/s41885-017-0015-0.
- Unterberger, C., Hudson, P., Botzen, W.J.W., Schroeer, K., Steininger K.W., 2019. Future Public Sector Flood Risk and Risk Sharing Arrangements: An Assessment for Austria. *Ecological Economics*, 156(2), S. 153–63. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2018.09.019>.

- Url, T., Sinabell, F., 2008. Flood risk exposure in Austria – options for bearing risk efficiently. *Schmollers Jahrbuch: Journal of Applied Social Science Studies/Zeitschrift für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften*, 128(4), S. 593–614.
- Weber, K., 2018. Risiko- und Katastrophenmanagement als Staatsaufgabe. In: A. Kanonier, F. Rudolf-Miklau (Hrsg.), *Regionale Risiko Governance: Recht, Politik und Praxis*. Verlag Österreich, Wien, S. 123–138.

Zusammenfassung

Extremereignisse durch Naturgefahren führen oft zu katastrophalen Schäden, weshalb man eine hohe Übereinstimmung zwischen Extremereignissen und Katastrophen annehmen könnte. In diesem Beitrag wird ausführlich erläutert, warum es sich dabei dennoch um zwei unterschiedliche Phänomene bzw. Begriffe handelt, warum diese verschiedenen Betrachtungsweisen und Bewertungsmaßstäben folgen und wie sie somit voneinander zu unterscheiden sind.

Natürliche Extremereignisse fernab der menschlichen Zivilisation führen zu keinen Schäden an Schutzgütern und entsprechen somit nicht der Definition einer Katastrophe, wie immer man »Katastrophen« auch definiert. Andererseits muss nicht jede Katastrophe durch ein Extremereignis ausgelöst sein bzw. wird nicht jedes Schadensereignis, das nach bestimmten Kriterien als Katastrophe eingestuft wird, durch ein Extremereignis hervorgerufen.

Es wird sodann gezeigt, dass die Bewältigung von Katastrophen durch staatliche Akteure bestimmten Regeln, Verfahren und Prozeduren folgt, die a priori nicht für Extremereignisse, sondern »nur« für »außergewöhnliche« Schadensereignissen dimensioniert sind. Da Bewältigungsmechanismen aber auch für die Folgen von Extremereignissen tauglich sein müssen, sollten sie entsprechend flexibel und skalierbar sein. Mit steigendem Schadensmaß eines Ereignisses steigen auch die Anforderungen an die beteiligten Akteure und Systeme, etwa in Hinblick auf die Angemessenheit der Maßnahmen der Behörden, in Hinblick auf den erhöhten Koordinations- und Mittelbedarf und, daraus resultierend, auch in Hinblick auf eine mögliche Überforderung der handelnden Organisationen, insbesondere wenn vorhandene Ressourcen knapp werden sollten. Es wird daher im Weiteren die Frage beantwortet, wie die in der Vorsorge zwangsweise vorhandenen Einschränkungen im Anlassfall durch zusätzliche Maßnahmen kompensiert werden können, um auch extreme Ereignisse zu bewältigen. Damit außergewöhnliche bzw. sogar extreme Schadensereignisse bewältigt werden können, stehen im System des staatlichen Katastrophenmanagements verschiedene Instrumente zur Verfügung, die in diesem Fall subsidiär zur Anwendung kommen.

Zur Bewältigung der Folgen von Extremereignissen, die die Kapazitäten einzelner Staaten übersteigen, wurden in den letzten Jahrzehnten auch grenzüberschreitende Hilfsmecha-

* Siegfried Jachs, Bundesministerium für Inneres, Referat II/13/a:Staatliches Krisen- und Katastrophenmanagement sowie Zivil- und Bevölkerungsschutz, siegfried.jachs@bmi.gv.at.

nismen entwickelt, an denen sich Österreich aktiv beteiligt. In der Vergangenheit wurden in Österreich Extremereignisse meist mit nationalen Kapazitäten gut bewältigt. In Hinblick auf die Zukunft werden dennoch Überlegungen angestellt, wie die Vorbereitung auf Extremereignisse aufgrund von Naturgefahren noch weiter verbessert werden kann.

Abstract

Extreme events which are caused by natural hazards often lead to catastrophic damages. Therefore it might be assumed that there is a close correlation between extreme events and disasters. On the contrary, these are two different phenomena that follow different views and assessment criteria and therefore need to be distinguished. Natural extreme events far away from human civilization do not lead to economic or human losses and therefore are, by definition, no disasters. On the other hand, not every damage event classified as a disaster according to certain criteria is caused by an extreme event.

The management of disasters by state and non-state actors follows certain rules, procedures and principles that are not basically designed for extreme events but mainly for emergencies beyond daily routine. However, intervention mechanisms must also be suitable for the consequences of extreme events and thus be flexible and scalable. As the extent of damage increases, there are also increasing challenges for the actors involved, such as the appropriateness of interventions by authorities, an increased need for coordination and resources and consequently the potential overwhelming of organizations, especially with regard to limited resources. This raises the question how gaps in preparedness can be compensated in case of need. In order to be able to cope with even large scale events, various instruments are available in the state disaster management system that can be used on a subsidiary basis. In order to cope with the consequences of extreme events that exceed the capacities of individual states, cross-border aid mechanisms have been developed in recent decades, in which Austria is also actively involved. On the whole, however, extreme events were handled well with national capacities in Austria in the past. Nevertheless, as we look ahead, it is worth considering how preparations for extreme events due to natural hazards can be further improved.

Kernaussagen

- Extremereignisse und Katastrophen sind nicht in jedem Fall gleichzusetzen.
- Katastrophen im rechtlichen Sinn können auch aus Ereignissen entstehen, die keine Extremereignisse sind.
- Das System des staatlichen bzw. des internationalen Katastrophenmanagements orientiert sich nicht grundsätzlich an Extremereignissen, verfügt aber dennoch über Instrumente, um auch Extremereignisse bewältigen zu können.

Key Points

- Extreme events and disasters are not the same in any case.
- Disasters in the legal sense can also arise from events that are no extreme events.
- The system of state or international disaster management is not basically oriented towards extreme events, but has instruments to cope even with events that cause extreme damage.

29.1 Begriffsklärungen im Kontext: »Katastrophe« versus »Extremereignis«

Im Zusammenhang mit der Bewältigung schädigender Ereignisse durch staatliche Akteure (das sind Behörden und Einsatzorganisationen) nimmt der juristische Begriff der »Katastrophe« eine zentrale Bedeutung ein. Der Eintritt einer Katastrophe im rechtlichen Sinn ist der Ausgangspunkt für behördlich gelenkte Maßnahmen der Gefahrenabwehr und Schadensbekämpfung mit dem Ziel, Struktur, Ordnung und die notwendige koordinierte Zusammenarbeit aller Handelnden herzustellen.

Im alltäglichen Sprachgebrauch wäre es zunächst naheliegend, »Katastrophen« mit »Extremereignissen« annähernd gleichzusetzen. Was sonst wäre eine Katastrophe, wenn nicht ein Extremereignis wie etwa das Tōhoku-Erdbeben in Japan im Jahr 2011 und der darauf folgende Tsunami, der Hurricane Katrina oder die Hochwässer in Mitteleuropa in den Jahren 2002 und 2013, um nur ein paar Beispiele zu nennen. Oder vielleicht sollte man gleich von Anfang an etwas genauer formulieren: Was sonst wären Katastrophen, wenn nicht derart extreme »Schadensereignisse«? Was also wären Katastrophen, wenn nicht äußerst seltene, außerordentliche oder »maximale« Schadensereignisse, der jeweilige »worst case« an schädigender Wirkung sozusagen, der bei einem Ereignis überhaupt eintreten kann?

Andererseits muss nicht immer erst ein Extremereignis eintreten, um von einer Katastrophe sprechen zu können; es gibt auch »kleinere« Katastrophen, sogar die sprichwörtliche »Alltagskatastrophe«, jedenfalls Katastrophen, die von einem wesentlich geringeren Anlass her rühren können als von einem Extremereignis. Dennoch sollte aber ein alltägliches Schadensereignis, außer vielleicht im rein umgangssprachlichen Sinn, keine Katastrophe sein. Eine genauere begriffliche Abgrenzung zwischen Extremereignis und Katastrophe ist somit für die weitere Betrachtung geboten.

Um bereits a priori klarzumachen, dass es sich dabei nicht bloß um einen akademischen Diskurs oder gar eine semantische Spielerei handelt, sei Folgendes vorweg genommen: Katastrophen können nach unterschiedlichen Gesichtspunkten, etwa nach ökonomischen, ökologischen, sozialen oder politischen Gesichtspunkten, definiert werden. Dies mag jeweils unterschiedliche Schlussfolgerungen zulassen. Die Frage, ob auch im rechtlichen Sinne ein Sachverhalt durch eine Behörde als Katastrophe einzustufen ist bzw. zur Katastrophe erklärt wird, hat jedenfalls bedeutende Auswirkungen auf die weitere Bewältigung des Ereignisses durch alle beteiligten Akteure, was nicht in gleicher Weise für jedes Extremereignis gilt. Dies wird im Weiteren noch ausführlich zu diskutieren sein. An die Katastrophe als Rechtsbegriff bzw. als rechtlichen Tat-

bestand knüpfen sich jedenfalls mehrere Rechtsfolgen, die erheblich sein können. Im Katastrophenfall ergeben sich vor allem erweiterte Handlungsmöglichkeiten und Befugnisse für Behörden, um gerade außerordentliche oder auch extreme Schäden, wie sie durch Extremereignisse hervorgerufen werden, bekämpfen zu können (siehe dazu Kapitel 29.4.2).

29.1.1 Definition von Extremereignissen

Die wissenschaftliche Literatur, aber auch technische Regelwerke haben sich mit dem Begriff des »Extremereignisses« im Zusammenhang mit dem Management von Naturgefahren, insbesondere mit Wetter- und Klimaextremen, umfassend auseinandergesetzt und dabei unterschiedliche Konzepte entwickelt (IPCC, 2012). Als Definition eines »Ereignisses« im Sinne von Naturereignis findet man z. B. die »*Summe von Vorgängen und Wirkungen von einem oder mehreren Naturgefahrenprozessen, die in räumlichem, zeitlichem und kausalem Zusammenhang stehen*« (Austrian Standards, 2009). Als Extremereignis wird generell ein Ereignis mit sehr niedriger Eintrittswahrscheinlichkeit, geringer Vorhersehbarkeit und hoher Schadenswirkung bezeichnet.

Es existieren unterschiedliche statistische und physikalische Ansätze, um Extremereignisse in Hinblick auf die Wiederkehrwahrscheinlichkeit bzw. Intensität näher zu beschreiben. Die Palette statistischer Möglichkeiten reicht von der Ausrichtung an festgestellten historischen Maximalwerten (Grenzwerten) in Beobachtungsreihen (vgl. IPCC, 2012: »Climate Extreme [...]: The occurrence of a value of a weather or climate variable above (or below) a threshold value near the upper (or lower) ends of the range of observed values of the variable«), über größere Abweichungen von statistischen Mittelwerten bis zur Einordnung in oberen oder unteren Grenzbereichen einer statistischen Häufigkeitsverteilung. Das IPCC Glossary (IPCC, 2014) definiert z. B. »extreme weather event« mit: [...] »*an event that is rare within its statistical reference distribution at a particular place*«. Und weiter: »*Definitions of rare vary, but an extreme weather event would normally be as rare as or rarer than the 10th or 90th percentile*«. Auch die Überschreitung der Wiederkehrwahrscheinlichkeit von definierten Bemessungsereignissen kann zu einer Einstufung eines Ereignisses als Extremereignis führen. Andere Möglichkeiten der Einordnung sind Intensitätsskalen mit entsprechenden Kategorien und Schwellwerten, wobei das Ende der Skala ein Extremereignis markiert.

Erdbebenintensitätsskalen wie die 12-stufige Europäische Makroseismische Skala 1998 beschreiben z. B. die Wirkung von Erdbeben auf Infrastrukturen. Intensität 12 ist »vollständig verwüstend«, nahezu alle Konstruktionen werden dabei zerstört. Im Unterschied dazu bezieht sich die Magnitude auf die Energie

des Erdbebens und sagt vorerst noch nichts über die Schäden an der Erdoberfläche aus. Die Beaufort-Skala ist eine Skala für Windgeschwindigkeiten und damit verbundene Schadenswirkungen. Ab 9 Beaufort (75–88 km/h) spricht man von Sturm, 12 Beaufort (über 117 km/h) wäre ein Orkan.

Wesentliches Merkmal von Extremwertansätzen ist jedenfalls, dass es dabei auch immer sehr stark auf den geographischen Bezugsrahmen ankommt. In der Karibik würden tatsächlich schon einige wenige Schneeflocken genügen, um so als extrem eingestuft zu werden (Binder und Steinreiber, 2005).

29.1.2 Definition von Katastrophen

Solange in der Beschreibung von Extremereignissen einerseits nur von den dabei wirkenden Naturkräften wie Bodenbeschleunigung, Windgeschwindigkeit, Abfluss, Schneedruck etc. und andererseits nur von statistischen Wiederkehrintervallen die Rede ist, wird über die Schadenswirkung (menschliche Verluste, wirtschaftliche Schäden, Umweltschäden, indirekte Schäden,...) und sonstige Folgen des Ereignisses noch wenig ausgesagt. Diese für das Katastrophenmanagement maßgeblichen Kriterien hängen eng mit der Vulnerabilität von Schutzgütern und der zugrunde liegenden Exposition zusammen (IPCC, 2012) und korrelieren hinsichtlich des Ausmaßes nicht linear mit dem physikalischen Ereignis und dessen Eintrittswahrscheinlichkeit. Vor allem da die Schadensdimension auch nicht-monetarisierbare Komponenten enthält, kann hinsichtlich des Schadenspotenzials keine analoge Abgrenzung getroffen werden, wie es hinsichtlich der zeitlichen Wiederkehrwahrscheinlichkeit möglich ist (Binder und Steinreiber, 2005).

Ursachen und Wiederkehrwahrscheinlichkeiten sind für die Katastrophenbewältigung zwar von Bedeutung, maßgeblich sind aber das Schadensausmaß eines Ereignisses, die Schadenskategorien, betroffene Schutzgüter, der Ort und die Zeit des Auftretens (z. B. lokal oder großflächig) sowie sonstige Rahmenbedingungen für die Bewältigung, wie die Verfügbarkeit von Einsatzmitteln, finanzielle Ressourcen oder die mediale und politische Wahrnehmung des Ereignisses.

Für das Katastrophenmanagement ist somit die Frage, ob ein Ereignis ein Extremereignis ist, zwar nicht unbedeutend, diese Frage steht jedoch nicht im Vordergrund. In rechtlicher und organisatorischer Hinsicht sind vielmehr Fragen wie Betroffenheit und Schadenswirkung interessant, verbunden vor allem mit dem Grad der Abweichung vom alltäglichen Schadensereignis (Notfall) und den damit verbundenen organisatorischen Anforderungen an die Ereignisbewältigung.

29.1.2.1 Katastrophe als Rechtsbegriff

Es gibt unterschiedliche Gesichtspunkte (z. B. ökonomische, ökologische, soziale, politische etc.) oder Bezugssysteme, nach denen ein Ereignis als Katastrophe beschrieben werden kann. Aus rechtlicher Sicht ist es vor allem die »Außerordentlichkeit« des eingetretenen oder drohenden Schadensausmaßes, das ein Ereignis zur Katastrophe macht.

Die hoheitliche Katastrophenbewältigung fällt in Österreich hinsichtlich Gesetzgebung und Vollziehung überwiegend in den Zuständigkeitsbereich der Bundesländer. Dies betrifft die meisten Naturkatastrophen, wofür die Landesgesetzgebung in den Katastrophenhilfegesetzen fast durchwegs Legaldefinitionen des Katastrophenzustandes vorsieht. Ausgenommen hiervon sind einzelne Bundeskompetenzen wie die Bekämpfung übertragbarer Krankheiten (Humanepidemien, Tierseuchen) bzw. radiologischer Notstandsituationen. Im Unterschied zur Landesgesetzgebung sind in den einschlägigen Bundesgesetzen die jeweiligen außerordentlichen Situationen nicht als »Katastrophe« bezeichnet. Ähnliche Sondersituationen, deren Bewältigung dem Bund obliegen, wären Mangellagen infolge von Versorgungsstörungen wie Energieengpässe, Störungen der Lebensmittelversorgung oder der Versorgung mit sonstigen wichtigen Gütern, die nicht mit Marktmitteln beherrschbar sind. Hierfür sehen das Energielenkungsgesetz, das Lebensmittelbewirtschaftungsgesetz und das Versorgungssicherungsgesetz besondere Befugnisse vor, um einer Mangellage entgegenzuwirken. Solche Mangellagen könnten auch als Folge von extremen Naturereignissen auftreten.

Bezogen auf das österreichische Recht wird eine Katastrophe im Kern damit umschrieben, dass es sich um ein nichtalltägliches, außerordentliches, bereits eingetretenes oder auch erst drohendes Schadensereignis handelt, das eine »Vielzahl« an Schutzgütern (Mensch, Sachen, Umwelt) schädigt oder gefährdet. Daran schließt sich noch das weitere Kriterium des erhöhten Koordinationsbedarfes für die umfangreichen Kräfte und Mittel an, die in der Bewältigung eingesetzt werden (Austrian Standards, 2018). Das Vorliegen einer Katastrophe ist somit nicht an ein Extremereignis, das bestimmte statistische Kriterien erfüllt, gebunden. Maßgeblich ist vielmehr die Außergewöhnlichkeit des Schadensausmaßes, die auch bei nicht-extremen Ereignissen gegeben sein kann. Das Ereignis muss bei einer Katastrophe im Rechtssinn auch noch gar nicht eingetreten sein. Neben dem Kriterium der Betroffenheit ist zudem noch das Kriterium, wieviele Ressourcen in der Bewältigung eingesetzt werden, relevant.

Weitere Abstufungen sind im österreichischen Rechtssystem nicht vorgesehen, unterschiedliche Katastrophenstufen wie eine »extreme« Katastrophe im Vergleich zu einer »normalen« Katastrophe, eine »Staatskrise« oder ein »Ausnahmestand« existieren nicht. Legaldefinitionen von Katastrophen knüpfen

hinsichtlich Eintrittswahrscheinlichkeit und Auswirkung somit nicht an quantitative Parameter (wie eine bestimmte Mindestintensität eines Ereignisses, ein quantitatives Schadensausmaß, das überschritten werden muss, etc.) oder spezifische Gefahrenquellen als Ursachen an. Auch ein bestimmtes Maß an Zerstörung bzw. die Nichtverfügbarkeit von Lebensgrundlagen oder lebenswichtigen Einrichtungen sind keine zwingende Voraussetzung für das Vorliegen einer Katastrophe im Sinne der österreichischen Rechtsordnung. Extremereignisse, wie immer sie auch statistisch oder physikalisch definiert sind, sind somit nicht Voraussetzung für das rechtliche Vorliegen einer Katastrophe, gleichermaßen sind Katastrophen auch nicht zwingend Extremereignisse.

29.1.2.2 Sonstige Katastrophendefinitionen

Im internationalen bzw. im nicht-rechtlichen Kontext existieren noch andere Definitionen des Begriffs »Katastrophe«. Weit verbreitet ist die Unterscheidung zwischen Schadensereignissen, die noch mit vordefinierten bzw. standardisierten Abläufen und Prozessen bewältigt werden können (»Notfälle«, »emergencies«), während Katastrophen (»disasters«) eine davon abweichende, besondere Aufbau- und Ablauforganisation zu deren Bewältigung, ein Herausreten aus der Routine sozusagen, erfordern.

Quarantelli (2006) machte anhand von Hurricane Katrina deutlich, was Notfälle (»emergencies«) von »typischen« Katastrophen (»disasters«) und »catastrophes« unterscheidet, wobei er unter »catastrophe« ein »disaster beyond typical disasters« versteht. Als wesentliches Merkmal von »catastrophes« im Gegensatz zu »typischen« Katastrophen nennt er vor allem den hohen Zerstörungsgrad der Infrastruktur, die damit verbundene Unfähigkeit zur Hilfe in lokalen Strukturen aufgrund der eigenen Betroffenheit der zur Hilfe berufenen Einrichtungen, die fehlende Möglichkeit, Hilfe aus der näheren Umgebung zu organisieren, die besondere Rolle, die Massenmedien in solchen Fällen spielen und die politische Bedeutung, die »Katastrophen« letztlich erlangen. »Catastrophes« sind demnach nicht bloß größere Ereignisse im Sinne von mehr vom Selben, sie unterscheiden sich maßgeblich in der Bewältigung hinsichtlich der genannten Aspekte. Was eine Katastrophe letztlich ausmacht, wird demnach nicht durch das Ereignis selbst bestimmt, es kommt darüber hinaus noch auf eine ganze Reihe von sozialen und auch politischen Faktoren an.

29.1.2.3 Überforderung als Katastrophenkriterium

Ein oft genanntes Kriterium für das Vorliegen einer Katastrophe liegt in der Überforderung einer Gemeinschaft oder eines System, ein Ereignis selbst bewältigen zu können (vgl. die Definition von UNISDR: »The effect may test or

exceed the capacity of a community or society to cope using its own resources, and therefore may require assistance from external sources....«. Ähnlich die Definition, die EMDAT verwendet: »situation or event, which overwhelms local capacity, necessitating a request to national or international level for external assistance.«). Der Katastrophenzustand hat demnach zur Folge, dass Hilfe von außen kommen muss, sei es von einer höheren Verwaltungsebene (Bundesebene) oder einer internationalen Ebene (Int. Organisation). Dieses etwa für die USA aber auch für internationale Hilfsmechanismen typische Kriterium ist in der österreichischen Rechtsordnung nicht manifestiert (Lediglich das Wiener Katastrophenhilfe- und Krisenmanagementgesetz definiert als Katastrophe »jedes [...] Ereignis [...], das [...] geeignet ist, in ungewöhnlichem Ausmaß Personen- oder Sachschäden zu bewirken und das mit örtlichen Einsatzkräften nicht bewältigt werden kann«; W-KKG, § 2) Es gibt auch nicht so etwas wie eine »nationale Katastrophe« oder einen »nationalen Notstand«, den ein oberstes Bundesorgan für ein bestimmtes Gebiet ausrufen könnte. Die Feststellung einer Katastrophe erfolgt in Österreich bereits auf lokaler (Gemeinde) oder regionaler Ebene (Bezirk). Es kann auch sein, dass die Katastrophenfeststellung in mehreren Gemeinden oder Bezirken gleichzeitig erfolgt und dann eine Landeseinsatzleitung gebildet wird.

Aber auch im Zusammenhang mit der Überforderung oder dem Fehlen ausreichender Ressourcen ist es nicht maßgeblich, ob ein Extremereignis vorliegt. Wenngleich wohl eine Korrelation mit Extremereignissen feststellbar sein wird, könnte aber eine Überforderung schon eintreten, wenn noch kein Extremereignis vorliegt. Extreme Auswirkungen können auch die Folge einer hohen Vulnerabilität und Exposition sein (IPCC, 2012) und müssen nicht auf einem Extremereignis beruhen.

Zusammenfassend ergibt sich somit, dass in der Terminologie und Begrifflichkeit des Katastrophenmanagements die Begriffe Extremereignis oder auch Bemessungsereignis nicht aufscheinen. Für die Perspektive des Katastrophenmanagements ist es letztlich von sekundärer Bedeutung, wie Extremereignisse begrifflich erfasst und kategorisiert werden. Die für das Katastrophenmanagement primär maßgebliche Frage ist die Höhe des Schadensausmaßes bzw. die Abgrenzung vom Alltagsereignis und der erforderliche Koordinationsbedarf durch eine einsatzleitende Behörde.

29.2 Katastrophenbewältigung: historische Entwicklung

Die Entwicklung gegenwärtiger staatlicher Systeme des Katastrophenmanagements und internationaler Kooperationsmechanismen wurde dennoch stark von Extremereignissen getrieben.

Wo die Anfänge des Katastrophenmanagements durch staatliche Akteure wirklich liegen, ist nicht eindeutig zu beantworten und ist jeweils im geographischen Kontext zu sehen. Für Europa wird mitunter das Erdbeben von Lissabon 1755, ein Extremereignis in der europäischen Katastrophengeschichte, als Geburtsstunde des staatlichen Katastrophenmanagements genannt, zumal bei diesem Ereignis erstmals staatlich gelenkte und geordnete Maßnahmen zur Bewältigung des Ereignisses zur Anwendung kamen, die auch in einen geordneten Wiederaufbau übergingen, in dem zudem Maßnahmen zur Senkung des künftigen Erdbebenrisikos getroffen wurden. Die Beschreibung des Erdbebens von Lissabon zeigt, dass außerordentliche Ereignisse auch außerordentliche Methoden und Maßnahmen in der Bewältigung erfordern, was bis zum Bruch von religiösen Konventionen reichen kann.

Interessanterweise waren es in den letzten Jahrzehnten aber eher die technischen Katastrophen, wie die Chemiekatastrophen von Seveso im Jahr 1976 und Bhopal im Jahr 1984 oder das Flugunglück von Rammstein im Jahr 1988, um nur drei zu nennen, die zu wichtigen Weiterentwicklungen im Katastrophenmanagement geführt haben.

Im jüngeren österreichischen Kontext markieren die Erlassung der Katastrophenhilfegesetze der Bundesländer den Beginn der staatlichen Katastrophenhilfe. Dies fällt in die 70er und 80er Jahre des vorigen Jahrhunderts. Natürlich gab es auch eine weiter zurückreichende Vorgeschichte, wobei aber die Ereignisbewältigung vor der Erlassung entsprechender Gesetze mit anderen rechtlichen Instrumentarien, etwa im Rahmen des Rettungswesens oder des Feuerwehrwesens erfolgte.

Eine neue Phase in der staatlichen Bewältigung von Extremereignissen beginnt mit der Entwicklung von grenzüberschreitenden Hilfeleistungssystemen, wobei hier die Vereinten Nationen und die Europäische Union sowie mit gewissen Abstrichen aus österreichischer Sicht die »NATO-Partnerschaft für den Frieden« zu nennen sind.

Auch hierfür wirkten Extremereignisse als Motor. Die zivile Notstandsplanung in der NATO entstand beispielsweise als Folge der Sturmflut von Hamburg im Jahr 1962, bei dem Deutschland um militärische Hilfe der NATO ersuchte. Für die Entwicklung des Hilfeleistungssystems der Vereinten Nationen war das Erdbeben von Armenien im Jahr 1988 maßgeblich. Die nach dem Ereignis gegründete International Search and Rescue Advisory Group (Insarag) entwickelte basierend auf Erkenntnissen aus der Bewältigung des Ereignisses und den internationalen Hilfsmaßnahmen Regeln für die internationale Katastrophenhilfe, die in den »Insarag Guidelines« kodifiziert wurden und die bis heute eine maßgebliche Grundlage für die internationale Katastrophenhilfe darstellen. Auch das Unionsverfahren für den Katastrophenschutz, das im Jahr 2001 infolge der Terroranschläge in den USA entstanden war, wurde aus der Erfahrung nach

dem Tsunami in Südostasien erstmals reformiert und weiterentwickelt. Für Österreich ist als Mitglied der Europäischen Union primär das Unionsverfahren relevant, das in den letzten Jahren immer wieder aktiviert worden ist. Österreich hat zwar das Unionsverfahren selbst noch nie in Anspruch genommen, leistete aber in den letzten Jahren mehrfach aktive Beiträge zur Bewältigung von Katastrophen innerhalb und außerhalb der EU.

29.3 Fallbeispiele »extremer« Katastrophen

Die größten Katastrophen der jüngeren Geschichte haben sich außerhalb von Europa ereignet. Als »teuerste« Katastrophe weltweit gilt bislang das Erdbeben von Fukushima im Jahr 2011, gefolgt vom Hurricane Katrina im Jahr 2005 (Höppe, 2015). Zuletzt führte die »Hurricane Season« in den USA im Jahr 2017 wieder zu extremen Schadenszahlen.

In der jüngeren Chronologie der Katastrophen in Österreich ragen einige Ereignisse besonders heraus. Unter den Lawinenkatastrophen wären die Jahre 1951 und 1954 zu nennen. Zuletzt forderten die Lawinen von Galtür und Valzur im Jahr 1999 38 Tote und waren auch einer der wenigen Anlassfälle, die grenzüberschreitende Hilfe in Österreich erforderten. Die Jahre 1958 und 1959 waren durch schwere Wildbachkatastrophen gekennzeichnet. In den Jahren 1965 und 1966 führten sie so genannten »Herbst-Katastrophen« in Kärnten und Osttirol zu schweren Zerstörungen und vielen Todesfällen. Auch in die 70er und 80er Jahre vielen einige bedeutende Ereignisse (Interpraevent, 2009).

Herausragend aus Sicht des Katastrophenmanagements sind jedenfalls die »Jahrhundertflut« des Jahres 2002, deren Schadensfolgen auf rund 2,9 Mrd. € geschätzt wurden, während die Zahl der Todesfälle angesichts der Dimension des Ereignisses mit 9 Opfern vergleichsweise gering blieb (BMLFUW, 2004). Nach dem Ereignis wurde durch Österreich auch erstmals finanzielle Hilfe nach einer Katastrophe größeren Ausmaßes aus dem unmittelbar danach geschaffenen Solidaritätsfonds der Europäischen Union in Anspruch genommen. Schwere Hochwässer ereigneten sich dann noch in den Jahren 2005 und 2013. Auch diese hatten jeweils Interventionen des Solidaritätsfonds der EU in Österreich zur Folge (BMI, 2015). Nicht nur in Österreich, sondern europaweit führten Hochwässer seit 1980 zu den höchsten wirtschaftlichen Katastrophenschäden (EEA, 2017). Winterstürme verursachten die zweithöchsten Schäden in Österreich (Pretenthaler und Albrechter, 2012). Nach Hutter et al. (2007) kam es durch den Hitzsommer in Österreich zu einem Anstieg der Mortalität und rund 130 zusätzlichen Hitzetoten in Wien. Auch europaweit führten Hitzewellen in den letzten 25 Jahren zu den meisten Toten (EEA, 2017).

Obwohl die Notwendigkeit klar erkannt wurde (BMLFUW, 2015), besteht für Österreich aber noch keine umfassend systematische Dokumentation von Katastrophen und ihren gesamten Schadenswirkungen, weshalb die Darstellung von historischen Extremereignissen und ihrer Gesamtauswirkungen für Österreich nach wie vor exemplarisch bleiben muss.

Während verschiedenste Aspekte des Hochwasserrisikomanagements anlässlich der jüngsten Hochwasserereignisse umfangreich aufgearbeitet wurden, blieb die Ereignisbewältigung selbst, also der Katastropheneinsatz von Behörden und Einsatzorganisationen bislang weitgehend außerhalb der wissenschaftlichen Aufarbeitung und Betrachtung. Dies gilt auch für andere Ereignisse. Die Ereignisse selbst und die dabei gewonnenen Erkenntnisse werden zwar intern evaluiert, jedoch gibt es hierzu kaum publiziertes Material.

Eine der Kernfragen, die sich dabei unter dem Aspekt von Extremereignissen stellen würde, ist jene, ob vorhandene nationale Ressourcen ausreichend für die Bewältigung waren. Die Frage, was als »ausreichend« zu gelten hätte, ist mangels verbindlicher Vergleichsparameter nicht eindeutig zu beantworten, jedoch ist die Tatsache, dass Österreich bislang nur ganz vereinzelt internationale Katastrophenhilfe in Anspruch genommen hat, ein starker Indikator dafür, dass selten ressourcenmäßige Überforderung vorlag.

Das Hochwasser von 2002 stellt aber insofern eine Zäsur dar, als es der Ausgangspunkt für neue Planungen und Überlegungen im Katastrophenmanagement war. In Verbindung mit anderen Anlassfällen, wie den umfangreichen Vorbereitungen auf die Fußballeuropameisterschaft im Jahr 2008 und die EU-Präsidentschaft im Jahr 2006, war es ein Motor für die Entstehung und Entwicklung des Staatlichen Krisen- und Katastrophenmanagements (SKKM) in Österreich, das im Jahr 2004 neu im Bundesministerium für Inneres organisiert wurde. Auf europäischer Ebene führte das Hochwasser im Jahr 2002 nicht nur zur späteren Hochwasserrichtlinie, sondern auch zur Einführung des Solidaritätsfonds der Europäischen Union, einem Finanzinstrument zur Entlastung öffentlicher Haushalte der Mitgliedstaaten infolge von Wiederherstellungsmaßnahmen nach Katastrophen.

29.4 Management »extremer« Katastrophen

Katastrophenmanagement besteht auch im nationalen Verständnis (Austrian Standards, 2018) aus den Elementen Vermeidung, Vorsorge, Bewältigung und Wiederherstellung. In der weiteren Betrachtung soll der Fokus aber auf den Aspekten Vorsorge, Bewältigung und Wiederherstellung und weniger auf dem Aspekt der Vermeidung (Prävention) liegen.

29.4.1 Vorsorge für Extremereignisse

Katastrophenvorsorge umfasst alle Maßnahmen, die der Vorbereitung auf die Bewältigung eines Ereignisses dienen. Im Wesentlichen sind dies die Aufbringung von Einsatzkräften bzw. Katastrophenhilfsdiensten sowie deren Ausrüstung und Ausbildung, die Erstellung von Katastrophenplänen, die Abhaltung von Übungen, infrastrukturelle Vorkehrungen, wie Leitstellen und Krisenräume und die Risikokommunikation respektive die Aufklärung und Motivation der Bevölkerung zur Eigenvorsorge (Jachs, 2011). Im Rahmen der Katastrophenvorsorge sind bei Gemeinden, Bezirksverwaltungsbehörden und Landesregierungen Katastrophenpläne zu erstellen. Nach den landesrechtlichen Vorschriften haben diese auf Gefahren im jeweiligen Bezugsgebiet Bedacht zu nehmen.

Im Zusammenhang mit der Bewältigung von Extremereignissen stellt sich im Besonderen die Frage nach der personellen und materiellen Dimensionierung der Katastrophenvorsorge bzw. der Vorhaltungen. Es ergibt sich die Frage, welche quantitativen und qualitativen Vorgaben es für den Umfang der personellen und materiellen Katastrophenvorsorge gibt, ob und wie diese auf das jeweilige Risiko im Bezugsgebiet (Gemeinde, Bezirk, Bundesland) abgestimmt sind und ob dabei auch auf einen erhöhten Bedarf für die Bewältigung von Extremereignissen Bedacht genommen wird.

Einsatzmittel wie Fahrzeuge, persönliche Schutzausrüstung, Kommunikationsmittel, technische Gerätschaften etc. werden in Österreich von den Einsatzorganisationen vorgehalten, die auf kommunaler Ebene für die Besorgung der örtlichen Gefahrenabwehr im Wirkungsbereich der Gemeinden als behördliche Hilfsorgane eingerichtet sind. Darüber hinaus sind sie in Verbänden auf Bezirks- und Landesebene organisiert. Im Bereich der Feuerwehren, der wichtigsten Einsatzorganisation für die Katastrophenhilfe, ist hierfür das Instrument der Mindestausrüstungsverordnung oder -richtlinie vorhanden. Dies ist eine Vorschrift, die die Ausstattung der Feuerwehren auf kommunaler Ebene vorgibt. So regelt etwa in Oberösterreich die Feuerwehr-Ausrüstungs- und Planungsverordnung (LGBl. Nr. 75/2015), wie die Mindestausrüstung und -mannschaftsstärke der Feuerwehren im Pflichtbereich einer Feuerwehr zunächst nach Einwohnerzahl und Anzahl der ständig genutzten Gebäude festgelegt wird. Im Rahmen einer Gefahrenabwehr- und Entwicklungsplanung auf Gemeindeebene ist aber auch ein darüber hinausgehender Bedarf zu ermitteln, wobei alle für den Brand- und Katastrophenschutz relevanten Gegebenheiten, insbesondere die geographische Lage, besondere Naturgefahren und eine Reihe von weiteren Risikoparametern zu berücksichtigen sind. Auch andere Bundesländer kennen vergleichbare Richtlinien, nach denen Gemeinden unter Beachtung bestimmter Parameter (z. B. Bebauung, Einwohnerdichte, Sonderobjekte, Einsatzerschwerisse, Verkehrswegetz, Einsatzhäufigkeit,...) in Risikokate-

gorien einzuteilen sind, von denen sich dann die Mindestausrüstung der Feuerwehr ableitet.

Aus den Vorhaltungen der Feuerwehren auf kommunaler Ebene, die überwiegend auf die örtliche Gefahrenabwehr ausgelegt sind, rekrutieren sich im Katastrophenfall bzw. im Fall überörtlicher Einsätze größere Einheiten für die Katastrophenbekämpfung, wobei in der Regel eine solche Einheit pro Bezirk zur Vergütung steht. Aufgabe dieser Einheiten ist, im Katastrophenfall die örtlichen Einheiten zu unterstützen. Zum Teil verfügen auch die Feuerwehrverbände unmittelbar über größere Einheiten für den Katastrophenhilfsdienst. Darüber hinaus sind Feuerwehren an spezifischen Standorten (Stützpunktfeuerwehren) für besondere lokale Aufgaben speziell ausgerüstet. Weitere quantitative Vorgaben, was die Vorsorge für Extremereignisse betrifft, existieren hingegen nicht. Durch die Ansiedlung der Vorsorge bzw. auch der Gefahrenabwehr und Schadensbekämpfung auf kommunaler Ebene entsteht jedoch eine vollständige Flächendeckung, und somit können auch flächenhafte Großereignisse an mehreren Orten gleichzeitig bekämpft werden.

Die Katastrophenvorsorge im Rettungswesen unterscheidet sich hiervon dadurch, dass es im Rettungsdienst zwar vergleichbare Regelungen für die Mindestausrüstung gibt, während aber vergleichbare gesetzliche Vorgaben für die Katastrophenvorsorge fehlen.

29.4.2 Bewältigung »extremer« Katastrophen

Schädigende Ereignisse, deren Schadenswirkungen eine Dimension erreichen, die über das Normale bzw. Alltägliche hinausgehen, können durch Behörden (in den meisten Fällen durch die örtlich zuständige Bezirksverwaltungsbehörde) zur Katastrophe erklärt werden. In einigen Bundesländern muss dieser Sachverhalt auch öffentlich kundgemacht werden. Tritt auf diese Weise eine Katastrophe ein, so ändern sich in weiterer Folge die Grundlagen für die Bewältigung des Ereignisses und seiner Folgen. Die Feststellung einer Katastrophe hat Auswirkungen auf die Führungsstrukturen, auf Eingriffsmöglichkeiten der Behörden, auf Pflichten der Allgemeinheit und auch auf die Übernahme von Kosten für die Bewältigung der Katastrophe durch die öffentliche Hand.

In Katastrophensituationen ergeben sich für die zur Katastrophenbekämpfung zuständigen Behörden einige typische Problemlagen. Bereits angesprochen wurde das Ressourcenproblem, d. h. dass Einsatzmittel oder Einsatzkräfte, die für die Bewältigung benötigt werden, der Behörde nicht in ausreichendem Maß zur Verfügung stehen. Dies wird im Weiteren ausführlicher diskutiert. Damit verbunden ist natürlich auch das Problem, dass die erforderlichen Budgetmittel im Regelaushalt nicht zur Verfügung stehen, um Engpässe – etwa durch Be-

schaftungen im Anlassfall – zu kompensieren. Zu erwähnen sind aber auch noch andere Probleme, die eher im rechtlichen und organisatorischen Bereich liegen, etwa das Entscheidungsfähigkeitsproblem, verbunden mit dem Zeitproblem, sowie ein rechtliches Schrankenproblem. Dies bedeutet, dass Maßnahmen, die erforderlich wären, aufgrund von rechtlichen Schranken nicht zulässig sind (Reindl-Krauskopf et al., 2016). Auf die letzteren der aufgeworfenen Probleme wird im Teil »Ausblick« noch kurz eingegangen.

29.4.2.1 Frühwarnung

Gerade in Hinblick auf die Bewältigung von Extremereignissen kommt der Frühwarnung und der frühen Bekämpfung von Ereignissen eine besondere Bedeutung zu, damit sich schädigende Ereignisse nicht zu »Großkatastrophen« auswachsen bzw. damit rechtzeitig Gegenmaßnahmen eingeleitet werden können, wie etwa die frühzeitige Eindämmung eines Waldbrandes oder das Aufstellen des mobilen Hochwasserschutzes. Besonders in der Früherkennung und Prognose von Extremwetterereignissen wurden in den letzten Jahren große Fortschritte erzielt, wobei Vorwarnzeiten verlängert werden konnten, die Genauigkeit der Prognosen zunahm und Warnschwellen harmonisiert wurden. Bei der Festlegung von Warnschwellen wird stärker auf Wiederkehrwahrscheinlichkeiten als auf absolute Werte von Naturphänomenen Bedacht genommen.

29.4.2.2 Einsatzführung

Die Bewältigung von größeren Schadensereignissen bzw. Extremereignissen, die die Schwelle zur Katastrophe überschreiten, folgt etablierten Verfahren und Grundsätzen, die sich zum Teil auch aus landesrechtlichen Vorschriften ergeben. Je größer die Schadenswirkung eines Ereignisses ist, desto größer wird in der Regel auch die Anzahl der öffentlichen Akteure (Katastrophenhilfsdienste), die an der Bewältigung des Ereignisses beteiligt sind. Ein Wesensmerkmal von Katastrophen ist daher, dass die zusammenfassende Führung und Lenkung der Bewältigungsmaßnahmen durch eine Institution sowie das koordinierte und gemeinsame Vorgehen aller Beteiligten erforderlich wird. Im Unterschied zum »Notfall« oder »Großschadensereignis« unterstehen daher in einer Katastrophe, die an der Bewältigung des Ereignisses im Katastrophengebiet beteiligten Katastrophenhilfsdienste der einheitlichen Leitung durch eine Behörde, in den meisten Fällen der Bezirksverwaltungsbehörde. Diese koordinierte Führung und Leitung der Ereignisbewältigung wird über ein besonderes Führungsverfahren gewährleistet, in dem nach einer strukturierten Lagefeststellung und Lagebeurteilung sowie nach entsprechenden Abwägungen von Handlungsmöglichkeiten Entschlüsse gefasst werden und Einsatzaufträge an die Kata-

strophenhilfsdienste ergehen, die wiederum hinsichtlich ihrer Wirkung überwacht und gegebenenfalls angepasst werden. In der einsatzleitenden Behörde wird zu dem Zweck eine besondere Führungsorganisation, ein Stab, errichtet, um Leitungsaufgaben wahrnehmen und umsetzen zu können. Stäbe strukturieren sich nach bestimmten Grundsätzen in mehrere Stabsaufgaben oder Führungsgrundgebiete wie Personal, Lage, Einsatz, Versorgung, Öffentlichkeitsarbeit u. a. Ganz wesentlich ist dabei auch der Aufbau von Verbindungsstrukturen zu anderen Behörden und beteiligten Organisationen in Form von Verbindungspersonen (BMI, 2007).

Aufgrund der möglichen Überforderung in Hinblick auf Kapazitäten und Ressourcen, die insbesondere bei Extremereignissen eintreten kann, wurden Verfahren und rechtliche Möglichkeiten geschaffen, um Engpässe ausgleichen zu können. Durch die hohe Flächendeckung und die dichte Ausstattung mit ehrenamtlichen Einrichtungen im österreichischen Katastrophenschutz, die gesetzlich nicht nach oben limitiert ist, entstehen automatisch Überkapazitäten, die im Katastrophenfall mit entsprechender Vorlaufzeit aktiviert werden können.

Auch im gesamten Führungsverfahren der einsatzleitenden Behörden nehmen fundamentale Grundsätze auf mögliche Ressourcenengpässe und Überforderungen Bedacht (BMI, 2007). Zu den leitenden Grundsätzen zählt vor allem der Grundsatz der Schwergewichtsbildung, d. h. die Konzentration der verfügbaren Mittel auf jene Stellen oder Bereiche, von denen der größte Schaden ausgeht. Eng damit verbunden ist der Grundsatz der Reservenbildung für unvorhergesehene Entwicklungen. Weitere Grundsätze, die hier zu erwähnen sind, sind die Ökonomie der Kräfte und die Verhältnismäßigkeit des Ressourceneinsatzes. Die verfügbaren Einsatzmittel sollen in erster Linie für jene Zwecke verwendet werden, wo sie den größten Nutzen stiften. Zudem ist auch unter den besonderen Umständen eines Katastropheneinsatzes stets eine entsprechende Güterabwägung vorzunehmen, ob der erzielbare Erfolg zu den eingesetzten Ressourcen in einem vertretbaren Verhältnis steht.

29.4.2.3 Ressourcenengpässe

Reichen die vorhandenen Mittel, die den Behörden innerhalb ihres örtlichen Zuständigkeitsbereiches zur Verfügung stehen, nicht aus, so bestehen verschiedene weitere Möglichkeiten, Ressourcenengpässe auszugleichen bzw. zu überbrücken.

Die Katastrophenmedizin bzw. der Rettungsdienst kennt in der präklinischen Versorgung das Verfahren der Priorisierung von Patienten bzw. Katastrophenopfern. Reichen die vorhandenen personellen und materiellen Ressourcen nicht aus, um alle Betroffenen sofort individualmedizinisch auf gleichem Niveau zu

versorgen, so werden Patienten nach Dringlichkeit in verschiedene Kategorien gereiht bzw. triagiert. Patienten mit höherer Behandlungsdringlichkeit bzw. Transportdringlichkeit werden dementsprechend mit Priorität am Schadensplatz versorgt bzw. vom Schadensplatz in Krankenhäuser transportiert, wo dann nochmals eine weitere Spitalstriage in Hinblick auf die Priorität der klinischen Versorgung getroffen wird. Spitäler verfügen zudem über Katastrophenpläne, um zusätzliche Behandlungskapazitäten für den Fall der erforderlichen Aufnahme einer großen Anzahl von Patienten zu schaffen. In Zusammenhang mit extremen Naturereignissen ist in dem Zusammenhang aber darauf hinzuweisen, dass es in der Vergangenheit in Österreich auch bei Extremereignissen zu keinen hohen Verletzenzahlen gekommen ist, die entsprechende Herausforderungen an den Rettungsdienst bzw. die klinische Versorgung gestellt hätten. Zu größeren Zahlen von Betroffenen kam es eher hinsichtlich einer notwendigen psychosozialen Betreuung.

Innerhalb von Bundesländern können in der Regel die bereits beschriebenen besonderen Einheiten der Feuerwehren für den überörtlichen Einsatz herangezogen werden, um lokale Ressourcenengpässe auszugleichen.

Darüber hinaus ist ein Rückgriff auf Mittel, die am Markt verfügbar sind, möglich, indem private Anbieter beauftragt werden, Leistungen zur Bewältigung einer Katastrophe zu erbringen. Im Fall von Katastrophen besteht auch die Möglichkeit, Gerätschaften und auch persönliche Dienstleistungen gegen den Willen der Betroffenen in Anspruch zu nehmen (Aufgebot, Inpflichtnahme). Derartige Eingriffe in die Privatautonomie, sollten sie notwendig sein, haben sich aber immer auch an den Grundsätzen der Zumutbarkeit und Verhältnismäßigkeit sowie am Prinzip des gelindesten Mittels zu orientieren. Weiters müssen die auf diese Weise Verpflichteten angemessen entschädigt werden. Soweit sonstige Ressourcen nicht ausreichen, besteht die Möglichkeit des Rückgriffs auf militärische Assistenzleistungen. Die Inanspruchnahme eines Assistenzeinsatzes des Bundesheeres ist grundsätzlich allen Behörden möglich, sofern die zivilen Ressourcen nicht ausreichen.

Grundsätzlich nicht vorgesehen sind sonstige innerstaatliche Hilfsmechanismen in der Katastrophenhilfe über Grenzen der Bundesländer hinweg, etwa in Form einer allgemeinen Unterstützungspflicht zwischen den Ländern. Im subsidiären österreichischen System erfolgt die Bewältigung von Naturkatastrophen in der Regel innerhalb der Bundesländergrenzen und nicht bundesweit. Regeln für den Ressourcenaustausch über Bundesländergrenzen sind nicht generell vorhanden, entsprechende Absprachen und Verfahren existieren im Einzelfall bzw. werden entsprechende Regelungen erst im Anlassfall getroffen.

Im Fall der Überlastung einer Behörde käme grundsätzlich auch noch das Rechtsinstitut der Amtshilfe in Frage. Amtshilfe bedeutet, dass alle staatlichen Organe (Bund, Land, Gemeinde) zur gegenseitigen Hilfeleistung verpflichtet

sind. Eine überlastete Behörde kann also um materielle wie personelle Unterstützung von anderen Behörden ersuchen. Dies ist jedoch beschränkt dadurch, dass es sich um den gesetzmäßigen Wirkungsbereich der hilfeleistenden Behörde handeln muss. Eine im konkreten Bereich sachlich unzuständige Behörde kann einer anderen Behörde daher nicht mit der Vornahme einer Amtshandlung aushelfen, auch wenn sie faktisch dazu in der Lage wäre. Eine andere Möglichkeit, die Länder übergreifende Zusammenarbeit zu regeln, bestünde noch in Form von 15a-Vereinbarungen (Reindl-Krauskopf et al., 2016).

Eine zusätzliche Einsatzressource stellen in jüngster Zeit auch die spontanen Freiwilligen, die bei Großereignissen immer öfter zu beobachten sind. Unter der Voraussetzung, dass es gelingt, spontane Freiwillige in den geregelten Einsatz zu integrieren, können Einsatzorganisationen dadurch von einfacheren Aufgaben entlastet werden. Damit dies gelingt, ist jedenfalls eine entsprechende Vorkehrung innerhalb der Strukturen der Organisationen erforderlich, die spontane Freiwillige aufnehmen soll. In Österreich hat hier das Rote Kreuz mit dem Projekt »Team Österreich« einen Standard gesetzt, der auch international Anerkennung findet. Spontane Freiwillige können sich dabei schon vorab in einer Datenbank registrieren und so im Anlassfall nach Bedarf abgerufen werden. Die Weltstandardisierungsorganisation ISO hat im Jahr 2017 dazu erstmals einen Standard publiziert, wie die Einbeziehung spontaner Freiwilliger vorbereitet und geplant werden kann.

29.4.2.4 Grenzüberschreitende Hilfe

Für den Fall, dass extreme Katastrophenereignisse die nationalen Bewältigungskapazitäten überfordern, besteht die Möglichkeit, auf ein grenzüberschreitendes bzw. internationales Hilfeleistungssystem zurückzugreifen.

Möglichkeiten der grenzüberschreitenden Hilfe ergeben sich zunächst auf bilateraler Basis. Österreich hat mit allen Nachbarstaaten, bis auf Italien, Abkommen zur grenzüberschreitenden Hilfe bei Unglücksfällen und Katastrophen geschlossen, die regeln, wie auf Ersuchen eines der Staaten hin, grenzüberschreitend Hilfe geleistet werden kann, etwa durch die Entsendung einer Hilfseinheit in das betroffene Land. Grundsätzlich ist diese Hilfeleistung freiwillig und unentgeltlich, jedoch kann im Rahmen von gutnachbarlichen Beziehungen davon ausgegangen werden, dass grenzüberschreitende Hilfe geleistet wird. Hilfsanforderungen sind auf nationaler Ebene, aber auch auf Ebene der Bundesländer (z. B. Oberösterreich-Bayern), möglich.

Während es also innerstaatlich für die Bundesländergrenzen überschreitende Zusammenarbeit somit nur vereinzelt Abkommen bzw. Absprachen gibt, regeln bilaterale, europäische und internationale Rechtsvorschriften und Systeme die grenzüberschreitende Hilfe, etwa innerhalb der Europäischen Union, innerhalb

der NATO-Partnerschaft für den Frieden und global auch innerhalb der Vereinten Nationen.

Das Unionsverfahren für den Katastrophenschutz, das im Jahr erstmals 2001 entstanden und im Jahr 2013 zuletzt novelliert worden ist, sieht vor, dass jeder Staat innerhalb oder außerhalb der EU im Falle einer Katastrophe ein Hilfeeersuchen an die Europäische Union richten kann. Diese Hilfeeersuchen werden über das Emergency Response Coordination Centre (ERCC) bei der Europäischen Kommission an die am Verfahren teilnehmenden Staaten zirkuliert, die dann ihre Hilfsangebote über das ERCC einmelden, von wo sodann ein Gesamtpaket an Hilfs- und Unterstützungsleistungen angeboten werden kann. Die Auswahl der konkret in Anspruch genommenen Hilfe verbleibt beim hilfeeersuchenden Staat, der auch für die Leitung des Einsatzes im eigenen Land verantwortlich bleibt. Leistungen können in Form von Experten, Sachgütern und Einheiten (Modulen) zur Verfügung gestellt werden. Den hilfeeersuchenden Staat trifft die Pflicht, die hereinkommende Hilfe in den nationalen Einsatz zu integrieren. Als Schnittstelle zwischen der lokal verantwortlichen Behörde und den internationalen Hilfseinheiten hat sich das Konzept des On-Site Operations Coordination Centre (OSOCC) etabliert.

Der internationalen Katastrophenhilfe sind aber auch gewisse Grenzen gesetzt. Tätigkeiten, die einer nationalen Regelung unterliegen, wie etwa in Österreich die Ausübung von notfallmedizinischen Eingriffen bzw. sanitätsdienstlichen Leistungen, bleiben ausländischen Hilfskräften grundsätzlich untersagt.

29.4.2.5 Wiederherstellungshilfe nach Extremereignissen

Extremereignisse sind in der Regel mit massiven Zerstörungen der öffentlichen und privaten Infrastruktur verbunden. Bei Naturereignissen trägt, sofern es keinen Verantwortlichen gibt, was meist nicht der Fall sein wird, der Geschädigte den Schaden selbst. Der Staat hat aber Instrumente geschaffen, die Katastrophenschäden teilweise solidarisieren. Das in Österreich etablierte System der Schadensregulierung sieht vor, dass Geschädigte Beihilfen von den Ländern bekommen, die unterschiedliches Ausmaß je nach Schadenskategorie und sozialer Lage des Geschädigten haben und in den meisten Fällen zwischen 30 und 50 Prozent (in Ausnahmefällen bis 80 %) des nicht versicherten Schadens liegen. Die Länder erhalten diese Zuschüsse zu Schäden aus dem Katastrophenfonds des Bundes zu 60 % refundiert. Neben dieser hauptsächlichlichen Unterstützung durch direkte Beihilfen hat die öffentliche Hand aber auch noch eine Anzahl weiterer kleinerer Hilfsmöglichkeiten zur Verfügung, die etwas in der Befreiung von Gebühren für Wiederherstellungsmaßnahmen (z. B. bei Ersatzbeschaffungen von Dokumenten), Steuererleichterungen bzw. Steuerstundungen und

sonstigen Geldaushilfen liegen können. Neben der Unterstützung durch die öffentliche Hand hat sich in Österreich auch eine hohe private Spendenkultur entwickelt. Versicherungen spielen in Österreich für private Haushalte nur eine unbedeutende Rolle, da die meisten Haushaltsversicherungen nur eine sehr geringe Deckung für Katastrophenschäden aufweisen. Eine gute Versicherungsdeckung gibt es hingegen im Bereich der Wirtschaft, insbesondere für große Unternehmungen.

Die öffentlichen Haushalte der Mitgliedstaaten der EU können bei Katastrophen größeren Ausmaßes zudem durch eine Beihilfe des Solidaritätsfonds der Europäischen Union entlastet werden.

29.5 Mögliche zukünftige Entwicklungen und resultierende Herausforderungen

Unter dem Gesichtspunkt von Extremereignissen stellt sich bei einem Blick in die Zukunft und den möglichen Umfeldveränderungen naheliegenderweise die Frage, ob die etablierten Systeme und Ressourcen auch für die Bewältigung von künftigen Extremereignissen ausreichend sein werden. Zieht man den Österreichischen Sachstandsbericht Klimawandel (APCC, 2014) als Quelle für mögliche Zukunftsprognosen heran, so zeigt er nicht nur, dass die ökonomischen Auswirkungen extremer Wetterereignisse in Österreich in den letzten drei Jahrzehnten zugenommen haben. Er weist auch mehrfach darauf hin, wie Extremereignisse in Österreich infolge des Klimawandels weiter zunehmen können. Problematisch sind vor allem längere und intensivere Hitzeperioden, die als sehr wahrscheinlich gelten, möglicherweise intensivere Niederschläge und daraus resultierende Hangrutschungen und Überschwemmungen (wahrscheinlich), Stürme (möglich) und erhöhte Nass-Schneelasten (möglich). Extremereignisse können neben der menschlichen Gesundheit vor allem auch Energie- und Verkehrsinfrastrukturen beeinträchtigen. Aussagen zu bisherigen Änderungen der Häufigkeit schadensverursachender Extremereignisse sind jedoch wegen unzureichender Datenlage mit erheblichen Unsicherheiten behaftet (APCC, 2014).

Herausforderungen, die sich dabei in der Zukunft stellen können, finden sich in den zuvor diskutierten Handlungsfeldern und ergeben sich vor allem im Zusammenhang mit der Ressourcen- und Finanzausstattung von Gebietskörperschaften, aber auch kritischer Infrastrukturen; gleichermaßen ergeben sich Anforderungen auch in rechtlicher und organisatorischer Hinsicht.

Eine Schlüsselfrage liegt für Österreich in dem Zusammenhang im Erhalt der Flächendeckung im Ehrenamt, da gerade bei extremen Naturereignissen, die oft

flächenhaft auftreten können, eine Vielzahl an Helfern benötigt wird. In der hohen Zahl der ehrenamtlichen Einsatzkräfte lag gerade in der jüngeren Vergangenheit eine der Stärken bei der Bewältigung von großen Katastrophenlagen wie bei den Hochwässern 2002 und 2013. Die SKKM-Strategie 2020 des Bundesministeriums für Inneres (BMI, 2009) schreibt daher dieser Frage einen strategischen Stellenwert zu.

Nach Seebauer (2013) gibt es jedoch entgegen der öffentlichen Diskussion über eine abnehmende Bereitschaft zu freiwilligem Engagement im Katastrophenschutz keinen empirischen Beleg für diese Einschätzung, zumindest soweit, wie österreichweite Mitglieder- und Einsatzzahlen als grobe Indikatoren die breite Palette an regionalen und individuellen Teilnehmungsformen und -intensitäten abdecken können. Dies wird auch dadurch unterlegt, dass das Österreichische Rote Kreuz jüngst einen historischen Höchststand an freiwilligen Mitgliedern vermeldete.

29.6 Perspektiven für Handlungsoptionen

Eine Stärkung der Widerstandsfähigkeit des öffentlichen und privaten Sektors gegen natürliche Katastrophen, die insbesondere durch Extremereignisse hervorgerufen werden kann, wird auch in der Österreichischen Sicherheitsstrategie (BKA, 2013) und im aktuellen Regierungsprogramm als Ziel formuliert. Hierbei sind verschiedene Maßnahmen möglich, um auch Wiederherstellung der Funktionsfähigkeit von Staat und Gesellschaft nach Krisen rasch zu gewährleisten.

Mit Blick auf extreme Naturereignisse gilt vor allem dem Erhalt der ehrenamtlichen Strukturen eine hohe Priorität. Weiteres Potenzial liegt aber auch in der grenzüberschreitenden Zusammenarbeit sowohl zwischen Gebietskörperschaften im Inland wie auf europäischer und internationaler Ebene.

Das Unionsverfahren für den Katastrophenschutz ist derzeit gerade in Novellierung begriffen und soll nach dem Vorschlag der Europäischen Kommission dahin gehend weiterentwickelt werden, das die daran teilnehmenden Staaten stärkere Verpflichtungen eingehen, eigene Ressourcen im Bedarfsfall für die grenzüberschreitende europäische Hilfe zur Verfügung zu stellen. Alle Mitgliedstaaten der EU sind auch gefordert, ihre nationalen Risiken zu analysieren, eine Risikomanagementplanung zu betreiben und ihre Fähigkeiten in der Beherrschung nationaler und grenzüberschreitender Risiken zu beurteilen.

Antworten auf potenzielle künftige Herausforderungen finden sich in nationalen und internationalen Strategien. Der Sendai-Rahmenplan betont etwa die Notwendigkeit, Risiken besser zu verstehen und in Risk Governance und

Risikoreduktion zu investieren. Auch die OECD empfiehlt ihren Mitgliedstaaten Maßnahmen im Umgang mit kritischen Risiken.

In Österreich hat die im Jahr 2009 beschlossene SKKM-Strategie 2020 (BMI, 2009) hierzu einige wesentliche Ziele formuliert, etwa die Entwicklung von Fähigkeiten zur Risikoanalyse, den Erhalt der flächendeckenden Versorgung mit ehrenamtlichen Einrichtungen oder das Ziel ein Konzept für strategisch wichtige Ressourcen zu erstellen, aber auch die Nutzung von Möglichkeiten, die sich aus der internationalen Kooperation ergeben.

Auch die Weiterentwicklung der Rechtsordnung ist in dem Zusammenhang ein wichtiges Thema. In einer breit angelegten Studie zur »Resilienz des Rechts in Krisenzeiten« haben Reindl-Krauskopf et al. (2016) im Auftrag des BMI dargelegt, wie die österreichische Rechtsordnung weiterentwickelt werden könnte, um erweiterte Instrumentarien für die Bewältigung von Krisen- und Katastrophen zu schaffen. Die Autoren attestieren zwar dem bestehenden Katastrophenschutzrecht, dass es seiner Aufgabe, was die Prävention sowie die Bekämpfung von Ereignissen betrifft, relativ gut gerecht wird. Problematisch erscheint ihnen jedoch die in vielen Fällen diffizile Zuständigkeitsabgrenzung, welche zu einer Verzögerung der gebotenen Handlungen führen kann. In einer vergleichenden Studie diskutieren sie daher Möglichkeiten und Grenzen einer erweiterten »Notstandsverfassung«, die es erlauben würde, im Notstandsfall über ein modifiziertes Gesetzgebungsverfahren Rechtsakte im Krisenfall zu schaffen, die zur effektiven Bewältigung der Krisensituationen geeignet wären. Eine Möglichkeit wäre die Schaffung eines eigenen Krisenkabinetts, das ermächtigt wäre, mittels Verordnungen generell-abstrakte Normen zu schaffen, die allgemein verbindlich sind und gesetzesergänzenden wie gesetzesändernden Charakter haben (Reindl-Krauskopf et al., 2016).

Literatur

- APCC, 2014. Österreichischer Sachstandsbericht Klimawandel. Verlag der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, 1096 S.
- Austrian Standards, 2009. ONR 24800, Schutzbauwerke der Wildbachverbauung – Begriffe und ihre Definitionen sowie Klassifizierung, 75 S.
- Austrian Standards, 2018. ÖNORM S2304, Integriertes Katastrophenmanagement – Benennungen und Definitionen, 19 S.
- Beschluss Nr. 1313/2013/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 17. Dezember 2013 über ein Katastrophenschutzverfahren der Union, Amtsblatt L 347/924.
- Binder, C., Steinreiber, C., 2005. Charakterisierung von extremen Wetterereignissen. In: K.W. Steininger, C. Steinreiber, C. Ritz (Hrsg.), Extreme Wetterereignisse und ihre wirtschaftlichen Folgen. Anpassung, Auswege und politische Forderungen betroffener Wirtschaftsbranchen. Springer, Berlin, S. 11–24.

- BKA, 2013. Österreichische Sicherheitsstrategie: Sicherheit in einer neuen Dekade – Sicherheit gestalten. Bundeskanzleramt Österreich, Wien, 26 S.
- BMI, 2007. Richtlinie für das Führen im Katastropheneinsatz, 61 S.
- BMI, 2009. SKKM-Strategie, 21 S. https://www.bmi.gv.at/204/Download/files/002_SKKM_Strategie_2020.pdf [04. 12. 2018].
- BMI, 2015. Solidaritätsfonds der Europäischen Union. Bericht der Republik Österreich über die Verwendung der Finanzhilfe nach dem Hochwasser im Juni 2013, 26 S. https://www.bmi.gv.at/204/Download/files/Bericht_Solidaritätsfonds_sterreich_2013_final_publik.pdf [04. 12. 2018].
- BMLFUW, 2004. Floodrisk I. Analyse der Hochwasserereignisse vom August 2002. FloodRisk. Synthesebericht.
- BMLFUW, 2015. FloodRisk-E (valuierung). Analyse der Empfehlungen aus FRI und II und deren Umsetzungsfortschritt im Lichte der Umsetzung der Hochwasserrichtlinie. Synthesebericht, 103 S.
- EEA, 2017. Climate change adaptation and disaster risk reduction in Europe Enhancing coherence of the knowledge base, policies and practices. EEA Report 15. <https://www.eea.europa.eu/publications/climate-change-adaptation-and-disaster> [10. 12. 2018].
- Höppe, P., 2015. Naturkatastrophen – immer häufiger, heftiger, tödlicher, teurer? Münchener Rück Stiftung, Dialogforen, 11 S. http://www.munichre-foundation.org/dms/MRS/Documents/20150303_DF2015_Hoeppe_Disasters/DF2015_March_Handout_Hoeppe.pdf [04. 12. 2018].
- Interpraevent, 2009. Alpine Naturkatastrophen-Lawinen, Muren, Felsstürze, Hochwasser. Stocker, 120 S.
- IPCC, 2012. Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation. A Special Report of Working Groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, 582 S.
- IPCC, 2014. Annex II: Glossary. In: Climate Change 2014. Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, S. 117–130. https://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/syr/AR5_SYR_FINAL_Glossary.pdf [04. 12. 2018].
- ISO 22319, 2017. Security and resilience. Community resilience. Guidelines for planning the involvement of spontaneous volunteers.
- Jachs, S., 2011. Einführung in das Katastrophenmanagement. Tredition, 332 S.
- Pretenthaler, F., Albrecher, H., 2012. Sturmschäden: Modellierung der versicherten Schäden in Österreich (Studien Zum Klimawandel In Österreich). Verlag Akademie der Wissenschaften, 132 S.
- Quarantelli, E.L., 2006. Catastrophes are Different from Disasters: Some Implications for Crisis Planning and Managing Drawn from Katrina. <http://understandingkatrina.ssrc.org/Quarantelli/> [04. 12. 2018].
- Reindl-Krauskopf, S., Salimi, F., Kraml, B., Schulev-Steindl, E., Scharler, M., Pekler, J., 2016. Resilienz des Rechts in Krisenzeiten. Im Auftrag des Bundesministerium für Inneres, 326 S. http://bmi.gv.at/bmi_documents/2025.pdf [04. 12. 2018].
- Seebauer, S., 2013. Bereitschaft und Motive für Freiwilligenarbeit. Wegener Center für Klima und Globalen Wandel. VOICE Working Paper 1. Karl-Franzens-Universität, Graz., 21 S.

W-KKG, 2018. Gesetz über Maßnahmen zur Bewältigung von Katastrophen, Großschadensereignissen und komplexen Schadensereignissen sowie die Einrichtung eines Krisenmanagements (Wiener Katastrophenhilfe- und Krisenmanagementgesetz). CELEX-Nr.:396L0082.

Anschriften der Herausgeber*innen

Thomas Glade

Institut für Geographie und Regionalforschung
Geomorphologische Systeme und Risikoforschung
Universitätsstraße 7
A-1010 Wien
E-Mail: thomas.glade@univie.ac.at

Martin Mergili

Institut für Geographie und Regionalforschung
Geomorphologische Systeme und Risikoforschung
Universitätsstraße 7
A-1010 Wien
E-Mail: martin.mergili@univie.ac.at

Katrin Sattler

Institut für Geographie und Regionalforschung
Geomorphologische Systeme und Risikoforschung
Universitätsstraße 7
A-1010 Wien
E-Mail: katrin.sattler@univie.ac.at

Open-Access-Publikation im Sinne der CC-Lizenz BY-NC-ND 4.0

© 2020, Vandenhoeck & Ruprecht GmbH & Co. KG, Göttingen
ISBN Print: 9783847110927 – ISBN E-Lib: 9783737010924

Anschriften der Autor*innen

Stefan Achleitner

Universität Innsbruck
Institut für Infrastruktur
Arbeitsbereich für Wasserbau
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: stefan.achleitner@uibk.ac.at

Konrad Andre

Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Abteilung Klimasystem und Klimafolgen
Hohe Warte 38
1190 Wien, Österreich
E-Mail: konrad.andre@zamg.ac.at

Markus Aufleger

Universität Innsbruck
Institut für Infrastruktur
Arbeitsbereich für Wasserbau
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: markus.aufleger@uibk.ac.at

Hannah Berger

Bayerisches Landesamt für Umwelt
Referat 61: Hochwasserschutz und
alpine Naturgefahren
Bürgermeister-Ulrich-Straße 160
86177 Augsburg, Deutschland
E-Mail: hafebe@gmx.de

Günter Blöschl

Technische Universität Wien
Institut für Wasserbau und Ingenieur-
hydrologie
Karlsplatz 13/222
1040 Wien, Österreich
E-Mail: bloeschl@hydro.tuwien.ac.at

Thomas Cech

Bundesforschungszentrum für Wald
Institut für Waldschutz
Seckendorff-Gudent-Weg 8
1131 Wien, Österreich
E-Mail: thomas.cech@bfw.gv.at

Barbara Chimani

Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Abteilung Klimamonitoring und
Kryosphäre
Hohe Warte 38
1190 Wien, Österreich
E-Mail: barbara.chimani@zamg.ac.at

Maria de Puy Papi-Isaba

Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Abteilung Geophysik
Hohe Warte 38
1190 Wien, Österreich
E-Mail: maria.Papi-Isaba@zamg.ac.at

Jörg Degenhart

Landes-Feuerwehrverband Tirol
Sachgebiet Waldbrandbekämpfung und
Flugdienst
Florianistraße 1
6410 Telfs, Österreich
E-Mail: j.degenhart@feuerwehr.tirol

Katharina Enigl

Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Abteilung Klimasystem und Klimafolgen
Hohe Warte 38
1190 Wien
E-Mail: katharina.enigl@zamg.ac.at

Willi Ertl

Amt der Kärntner Landesregierung
Kompetenzzentrum Umwelt, Wasser und
Naturschutz
Lawinenwarndienst Kärnten
Flatschacherstraße 70
9020 Klagenfurt, Österreich
E-Mail: wilfried.ertl@ktn.gv.at

Frauke Feser

Helmholtz-Zentrum Geesthacht
Institut für Küstenforschung
Max-Planck-Strasse 1
21502 Geesthacht, Deutschland
E-Mail: frauke.feser@hzg.de

Andrea Fischer

Österreichische Akademie der Wissen-
schaften
Institut für Interdisziplinäre Gebirgs-
forschung der ÖAW
Technikerstraße 21a
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: andrea.fischer@oeaw.ac.at

Jan-Thomas Fischer

Bundesforschungs- und Ausbildungs-
zentrum für Wald, Naturgefahren und
Landschaft
Institut für Naturgefahren
Rennweg 1
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: jt.fischer@bfw.gv.at

Herbert Formayer

Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Meteorologie
Gregor-Mendel-Straße 33
1180 Wien, Österreich
E-Mail: herbert.formayer@boku.ac.at

Sven Fuchs

Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Alpine Naturgefahren
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien, Österreich
E-Mail: sven.fuchs@boku.ac.at

Walter Fürst

Bundesforschungszentrum für Wald
Institut für Waldwachstum und Waldbau
Seckendorff-Gudent-Weg 8
1131 Wien, Österreich
E-Mail: walter.fuerst@bfw.gv.at

Bernhard Gems

Universität Innsbruck
Institut für Infrastruktur
Arbeitsbereich für Wasserbau
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: bernhard.gems@uibk.ac.at

Thomas Glade

Universität Wien
Institut für Geographie und Regional-
forschung
Universitätsstraße 7
1010 Wien, Österreich
E-Mail: thomas.glade@univie.ac.at

Kurt Hager

Bundesministerium für Inneres
Abteilung I/11
Sicherheitspolitik
Herrengasse 7
1010 Wien, Österreich
E-Mail: kurt.hager@bmi.gv.at

Christa Hammerl

Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Abteilung Geophysik
Hohe Warte 38
1190 Wien, Österreich
E-Mail: christa.hammerl@zamg.ac.at

Sönke Hartmann

Stadt Plön
Stabstelle Klimaschutz
Schloßberg 3–4
24306 Plön, Deutschland
E-Mail: soenke.hartmann@ploen.de

Klaus Haslinger

Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Abteilung Klimasystem und Klimafolgen
Hohe Warte 38
1190 Wien, Österreich
E-Mail: klaus.haslinger@zamg.ac.at

Gernot Hoch

Bundesforschungszentrum für Wald
Institut für Waldschutz
Seckendorff-Gudent-Weg 8
1131 Wien, Österreich
E-Mail: gernot.hoch@bfw.gv.at

Michael Hofstätter

Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Abteilung Klimasystem und Klimafolgen
Hohe Warte 38
1190 Wien, Österreich
E-Mail: michael.hofstaetter@zamg.ac.at

Andreas Huber

Universität Innsbruck
Institut für Infrastruktur
Arbeitsbereich für Wasserbau
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: a.huber@uibk.ac.at

Johannes Hübl

Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Alpine Naturgefahren
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien, Österreich
E-Mail: johannes.huebl@boku.ac.at

Mariella Illeditsch

Technische Universität Wien
Institut für Geotechnik
Karlsplatz 13/220–1
1040 Wien, Österreich
E-Mail: mariella.illeditsch@tuwien.ac.at

Siegfried Jachs

Bundesministerium für Inneres
Referat I/13/a
Staatliches Krisen- und Katastrophen-
management sowie Zivil- und Bevölke-
rungsschutz
Herrengasse 7
1010 Wien, Österreich
E-Mail: siegfried.jachs@bmi.gv.at

Roland Kaitna

Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Alpine Naturgefahren
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien, Österreich
E-Mail: roland.kaitna@boku.ac.at

Johannes Kammerlander

Bundesministerium für Landwirtschaft
Regionen und Tourismus
Forsttechnischer Dienst für Wildbach-
und Lawinenverbauung
Buchenort 2A
6600 Lechaschau, Österreich
E-Mail: johannes.kammerlander@die-
wildbach.at

Hildegard Kaufmann

Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Abteilung Klima
Hohe Warte 38
1190 Wien, Österreich
E-Mail: hildegard.kaufmann@zamg.ac.at

Karl Kleemayr

Bundesforschungszentrum für Wald
Institut für Naturgefahren
Rennweg 1
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: karl.kleemayr@bfw.gv.at

Arben Kocıu

Geologische Bundesanstalt
Abteilung Ingenieurgeologie
Neulinggasse 38
1030 Wien, Österreich
E-Mail: arben.kociu@geologie.ac.at

Bernhard Kohl

Bundesforschungs- und Ausbildungs-
zentrum für Wald, Naturgefahren und
Landschaft
Institut für Naturgefahren
Rennweg 1
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: bernhard.kohl@bfw.gv.at

Michael Krautblatter

Technische Universität München
Fachgebiet Hangbewegungen
Arcisstrasse 21
80333 München, Deutschland
E-Mail: m.krautblatter@tum.de

Michael Kuhn

Universität Innsbruck
Institut für Atmosphären- und Kryo-
sphärenwissenschaften
Innrain 52f
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: michael.kuhn@uibk.ac.at

Gregor Laaha

Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Statistik
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien, Österreich
E-Mail: gregor.laaha@boku.ac.at

Thomas Ledermann

Bundesforschungszentrum für Wald
Institut für Waldwachstum und Waldbau
Seckendorff-Gudent-Weg 8
1131 Wien, Österreich
E-Mail: thomas.ledermann@bfw.gv.at

Wolfgang Lenhardt

Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Abteilung Geophysik
Hohe Warte 38
1190 Wien, Österreich
E-Mail: wolfgang.lenhardt@zamg.ac.at

Annemarie Lexer

Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Abteilung für Klimaforschung
Hohe Warte 38
1190 Wien, Österreich
E-Mail: annemarie.lexer@zamg.ac.at

Simon Lumassegger

Universität Innsbruck
Institut für Infrastruktur
Arbeitsbereich für Wasserbau
Technikerstraße 13
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: simon.lumassegger@uibk.ac.at

Rudi Mair

Amt der Tiroler Landesregierung
Abteilung Zivil- und Katastrophenschutz
Lawinenwarndienst Tirol
Eduard-Wallnöfer-Platz 3
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: rudi.mair@tirol.gv.at

Gerhard Markart

Bundesforschungszentrum für Wald
Institut für Naturgefahren
Seckendorff-Gudent-Weg 8
1131 Wien, Österreich
E-Mail: gerhard.markart@bfw.gv.at

Christoph Matulla

Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Abteilung Klimasystem und Klimafolgen
Hohe Warte 38
1190 Wien, Österreich
E-Mail: christoph.matulla@zamg.ac.at

Susanne Mehlhorn

Bundesministerium für Landwirtschaft,
Regionen und Tourismus
Forsttechnischer Dienst für Wildbach-
und Lawinenverbauung
Marxergasse 2
1010 Wien, Österreich
E-Mail: susanne.mehlhorn@die-wild-
bach.at

Martin Mergili

Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Angewandte Geologie
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien, Österreich
E-Mail: martin.mergili@boku.ac.at
und

Universität Wien
Institut für Geographie und Regional-
forschung
Universitätsstraße 7
1010 Wien, Österreich
E-Mail: martin.mergili@univie.ac.at

Christoph Mitterer

Amt der Tiroler Landesregierung
Abteilung Zivil- und Katastrophenschutz
Eduard-Wallnöfer-Platz 3
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: chris.mitterer@tirol.gv.at

Michael Mölk

Bundesministerium für Landwirtschaft,
Regionen und Tourismus
Wildbach- und Lawinenverbauung
Stabstelle Geologie
Wilhelm-Greil-Straße 9
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: michael.moelk@die-wildbach.at

Markus Moser

Bundesministerium für Landwirtschaft,
Regionen und Tourismus
Forsttechnischer Dienst für Wildbach-
und Lawinenverbauung
Johann-Löcker-Straße 3
5580 Tamsweg, Österreich
E-Mail: markus.moser@die-wildbach.at

Mortimer M. Müller

Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Waldbau
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien, Österreich
E-Mail: mortimer.mueller@boku.ac.at

Patrick Nairz

Amt der Tiroler Landesregierung
Abteilung Zivil- und Katastrophenschutz
Lawinenwarndienst Tirol
Eduard-Wallnöfer-Platz 3
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: patrick.nairz@tirol.gv.at

Jan-Christoph Otto

Universität Salzburg
Fachbereich Geographie und Geologie
Hellbrunnerstrasse 34
5020 Salzburg, Österreich
E-Mail: jan-christoph.otto@sbg.ac.at

Maria Papatoma-Köhle

Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Alpine Naturgefahren
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien, Österreich
E-Mail: maria.papatoma-koehle@boku.ac.at

Frank Perzl

Bundesforschungszentrum für Wald
Institut für Naturgefahren
Rennweg 1
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: frank.perzl@bfgw.at

Georg Pistotnik

Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Abteilung für Klimaforschung
Hohe Warte 38
1190 Wien, Österreich
E-Mail: georg.pistotnik@zamg.ac.at

Alexander Podesser

Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Kundenservice Steiermark
Lawinenwarndienst Steiermark
Klusemannstraße 21
8053 Graz, Österreich
E-Mail: alexander.podesser@zamg.ac.at

Ronald E. Pöpl

Universität Wien
Institut für Geographie und Regional-
forschung
Universitätsstraße 7
1010 Wien, Österreich
E-Mail: ronald.poepl@univie.ac.at

Christoph Prager

ILF Consulting Engineers Austria GmbH
Feldkreuzstrasse 3
6063 Rum bei Innsbruck, Österreich
E-Mail: christoph.prager@ilf.com

Alexander Preh

Technische Universität Wien
Institut für Geotechnik
Karlsplatz 13/220-1
1040 Wien, Österreich
E-Mail: alexander.preh@tuwien.ac.at

David Prenner

Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Alpine Naturgefahren
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien, Österreich
E-Mail: david.prenner@boku.ac.at

Andreas Rimböck

Wasserwirtschaftsamt Donauwörth
Förgstraße 23
86609 Donauwörth, Deutschland
E-Mail: andreas.rimboeck@wwa-don.
bayern.de

Florian Rudolf-Miklau

Bundesministerium für Landwirtschaft,
Regionen und Tourismus
Abteilung III/4, Wildbach- und
Lawinenverbauung, Schutzwaldpolitik
Marxergasse 2, 1030 Wien
E-Mail: florian.rudolf-miklau@bmlrt.gv.at

Oliver Sass

Universität Bayreuth
Fakultät für Biologie, Chemie und
Geowissenschaften
Universitätsstraße 30
5447 Bayreuth, Deutschland
E-Mail: oliver.sass@uni-bayreuth.de

Katrin Sattler

Universität Wien
Institut für Geographie und Regional-
forschung
Universitätsstraße 7
1010 Wien, Österreich
E-Mail: katrin.sattler@univie.ac.at

Johann-Thomas Sausgruber

Bundesministerium für Landwirtschaft,
Regionen und Tourismus
Wildbach und Lawinenverbauung
Forsttechnischer Dienst, Fachzentrum
Geologie
Wilhelm-Greil-Straße 9
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: thomas.sausgruber@die-
wildbach.at

Matthias Schlögl

Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Alpine Naturgefahren
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien, Österreich
E-Mail: matthias.schloegl@boku.ac.at

Elmar M. Schmaltz

Bundesamt für Wasserwirtschaft
Institut für Kulturtechnik und Boden-
wasserhaushalt
Pollnbergstraße 1
3252 Petzenkirchen, Österreich
E-Mail: elmar.schmaltz@baw.at

Stefan Schneiderbauer

Eurac Research
Institut für Erdbeobachtung
Drususallee 1
39100 Bozen, Italien
E-Mail: stefan.schneiderbauer@eurac.edu

Wolfgang Schöner

Karl-Franzens-Universität Graz
Institut für Geographie und Raum-
forschung
Heinrichstraße 36
8010 Graz, Österreich
E-Mail: wolfgang.schoener@uni-graz.at

Silvio Schüler

Bundesforschungszentrum für Wald
Institut für Waldwachstum und Waldbau
Seckendorff-Gudent-Weg 8
1131 Wien, Österreich
E-Mail: silvio.schueler@bfw.gv.at

Franz Sinabell

Österreichisches Institut für Wirtschafts-
forschung
Arsenal Objekt 20
1030 Wien, Österreich
E-Mail: franz.sinabell@wifo.ac.at

Holger Starke

Österreichische Hagelversicherung
Meteorologie und Geoinformation
Lerchengasse 3–5
1080 Wien, Österreich
E-Mail: starke@hagel.at

Peter Strauss

Bundesamt für Wasserwirtschaft
Institut für Kulturtechnik und Boden-
wasserhaushalt
Pollnbergstraße 1
3252 Petzenkirchen, Österreich
E-Mail: peter.strauss@baw.at

Arnold Studeregger-Renner
Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Kundenservice Steiermark
Lawinenwarndienst Steiermark
Klusemannstraße 21
8053 Graz, Österreich
E-Mail: arnold.studeregger@zamg.ac.at

Michaela Teich
Bundesforschungszentrum für Wald
Institut für Naturgefahren
Seckendorff-Gudent-Weg 8
1131 Wien, Österreich
E-Mail: michaela.teich@bfw.gv.at

Nils Tilch
Geologische Bundesanstalt
Abteilung Ingenieurgeologie
Neulinggasse 39
1031 Wien, Österreich
E-Mail: nils.tilch@geologie.ac.at

János Tordai
Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Abteilung Klimasystem und Klimafolgen
Hohe Warte 38
1190 Wien, Österreich
E-Mail: janos.tordai@zamg.ac.at

Harald Vacik
Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Waldbau
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien, Österreich
E-Mail: harald.vacik@boku.ac.at

Stefan Weginger
Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Abteilung Geophysik
Hohe Warte 38
1190 Wien, Österreich
E-Mail: stefan.weginger@zamg.ac.at

Johannes T. Weidinger
Kammerhof Museen Gmunden
Instituts für Erd- und Kulturgeschichtliche
Dokumentation (Erkudok)
Kammerhofgasse 8
4810 Gmunden, Österreich
E-Mail: johannes.weidinger@gmunden.
ooe.gv.at

Felix Weingraber
Amt der Oberösterreichischen Landes-
regierung
Direktion Umwelt und Wasserwirtschaft
Kärntnerstraße 10–12
4021 Linz, Österreich
E-Mail: felix.weingraber@ooe.gv.at

Peter Wiltsche
Universität für Bodenkultur Wien
Universitätsbibliothek
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien, Österreich
E-Mail: peter.wiltsche@boku.ac.at

Michael Winkler
Zentralanstalt für Meteorologie und
Geodynamik
Kundenservice Tirol und Vorarlberg
Fürstenweg 180
6020 Innsbruck, Österreich
E-Mail: michael.winkler@zamg.ac.at

Christian Zangerl
Universität für Bodenkultur Wien
Institut für Angewandte Geologie
Peter-Jordan-Straße 82
1190 Wien, Österreich
E-Mail: christian.j.zangerl@boku.ac.at