

Simon P. Seibert
Karl Auerswald

Hochwasserminderung im ländlichen Raum

Ein Handbuch zur quantitativen Planung

OPEN ACCESS



Springer Spektrum

Hochwasserminderung im ländlichen Raum

Simon P. Seibert
Karl Auerswald

Hochwasser- minderung im ländlichen Raum

Ein Handbuch zur quantitativen Planung



Springer Spektrum

Simon P. Seibert
TU München
Jetzt: Bayerisches Landesamt für Umwelt
Augsburg, Deutschland

Karl Auerswald
Wissenschaftszentrum Weihenstephan
TU München
Freising, Deutschland



ISBN 978-3-662-61032-9 ISBN 978-3-662-61033-6 (eBook)
<https://doi.org/10.1007/978-3-662-61033-6>

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über ► <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

© Der/die Herausgeber bzw. der/die Autor(en) 2020. Dieses Buch ist eine Open-Access-Publikation.

Open Access Dieses Buch wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Buch enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.

Die Wiedergabe von allgemein beschreibenden Bezeichnungen, Marken, Unternehmensnamen etc. in diesem Werk bedeutet nicht, dass diese frei durch jedermann benutzt werden dürfen. Die Berechtigung zur Benutzung unterliegt, auch ohne gesonderten Hinweis hierzu, den Regeln des Markenrechts. Die Rechte des jeweiligen Zeicheninhabers sind zu beachten.

Der Verlag, die Autoren und die Herausgeber gehen davon aus, dass die Angaben und Informationen in diesem Werk zum Zeitpunkt der Veröffentlichung vollständig und korrekt sind. Weder der Verlag, noch die Autoren oder die Herausgeber übernehmen, ausdrücklich oder implizit, Gewähr für den Inhalt des Werkes, etwaige Fehler oder Äußerungen. Der Verlag bleibt im Hinblick auf geografische Zuordnungen und Gebietsbezeichnungen in veröffentlichten Karten und Institutionsadressen neutral.

Planung/Lektorat: Sebastian Müller

Springer Spektrum ist ein Imprint der eingetragenen Gesellschaft Springer-Verlag GmbH, DE und ist ein Teil von Springer Nature.

Die Anschrift der Gesellschaft ist: Heidelberger Platz 3, 14197 Berlin, Germany

Danksagung

Die Erstellung dieses Buches wurde in weiten Teilen durch die Bayerische Verwaltung für Ländliche Entwicklung im Rahmen der Initiative boden:ständig (► www.bodenstaendig.eu) finanziell gefördert. Eine Reihe von Behördenvertreten, insbesondere aus dem Bereich Zentrale Aufgaben (BZA), und von Landschaftsplanungsbüros, die an dieser Initiative langjährig mitwirken, haben die Entstehung des Buchs kritisch begleitet und gefördert. Hervorzuheben und stellvertretend für alle zu nennen sind Norbert Bäuml (BZA), Anton Lenz (Ingenieurbüro Lenz, Ringelai), Felix Schmitt (H&S Ingenieure, Freising), Robert Brandhuber (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft), Wolfgang Rieger (Bayerisches Landesamt für Umwelt) sowie Wolfgang Bauer (Agroluftbild). Austausch bestand weiterhin mit Jürgen Ihringer (Karlsruher Institut für Technologie), Peter Fiener (Universität Augsburg), Thomas Machl (Technische Universität München), Wolfgang Ewald (Bayerisches Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten), Tanja Winterrath (Deutscher Wetterdienst) und Franziska Fischer (Bayerisches Landesamt für Umwelt). Dem Springer Verlag gilt unser herzlicher Dank für die Gestaltung, den Vertrieb und die technische Aufbereitung des Manuskriptes. Stellvertretend seien hier Sebastian Müller und Janina Krieger genannt. Die Publikation wurde von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) und der Technischen Universität München (TUM) im Rahmen des Programms Open-Access-Publizieren finanziell unterstützt. Ihnen allen sei an dieser Stelle herzlich gedankt.

Verzeichnis wichtiger Abbildungen und Tabellen mit Faustzahlen und Formeln

Abbildungsinhalt	Abbildungsnummer	Seite
Begriffe und Symbole:		
Darstellung von Anstiegszeit, Ablaufzeit, Scheitelhöhe und Wellenvolumen bei Abflusswellen	Abb. 3.1	34
Konzeptionelle Darstellung des Dreiecksganglinienverfahrens	Abb. 3.5	38
Schematische Darstellung des Fließpfadmusters aus Schichtabfluss, Abfluss in Rillen und Rinnen, Hangmuldenabfluss und Abfluss in Gräben	Abb. 3.6	43
Darstellung von dimensionsloser Einheitsganglinie und Dreiecksganglinie	Abb. 3.8	47
Regeneigenschaften:		
Karten der Starkniederschlagshöhen einer Jährlichkeit von 30 Jahren für die Dauerstufen 1 und 4 h in Deutschland	Abb. 4.7	78
	und Abb. 8.8	196
Abflussmenge:		
Anpassung des für mittlere Feuchteverhältnisse gültigen CN_{II} -Wertes an abweichende Feuchteverhältnisse	Abb. 4.1	66
Einfluss der Bodenbedeckung auf die CN-Werte unterschiedlicher Ackerkulturen	Abb. 4.2	66
Jahresgang der CN-Werte von konventionell und in Mulchdirektsaat angebautem Mais	Abb. 4.6	72
Abflussgeschwindigkeit:		
Typische Formen des Abflusses in aufeinanderfolgenden Fließabschnitten und zugehörige hydraulische Radien	Abb. 5.7	106
Typische Längen des schichtförmigen Fließens bei unterschiedlichen Oberflächen	Abb. 8.1	179
Hydraulische Radien von rechteckigen Rinnen und Rillen und von Hangmulden in Abhängigkeit von Fließtiefe und Wasserspiegelbreite	Abb. 8.3	181
Formeln zur Bestimmung von durchflossener Querschnittsfläche, benetztem Umfang und hydraulischem Radius	Abb. 8.4	182
Dimensionierung von Schutzmaßnahmen:		
Schematischer Querschnitt durch ein Kleinstrückhaltebecken	Abb. 6.11	131
Regelquerschnitt eines Wegs mit Wegseitengraben mit einer auf 1 m verbreiterten Sohle	Abb. 6.21	148

Abbildungsinhalt	Abbildungsnummer	Seite
Schematische Darstellung des Wasserdurchlasses unter Wegen von der Berg- auf die Talseite durch Rohre oder Planumsickerschichten in eine talseitige Abflussmulde	Abb. 8.18	214

Tabellensinhalt	Tabellennummer	Seite
Begriffe und Symbole:		
Wortverbindungen zur Beschreibung von Wasserhaushaltsgrößen und deren Bedeutung	Tab. 2.1	14
Verwendete Fachbegriffe, Formelzeichen und übliche Einheiten	Tab. 2.2	16
Regeneigenschaften:		
Starkniederschlagshöhen für unterschiedliche Wiederkehrintervalle und Niederschlagsdauerstufen	Tab. 3.1	41
Maximalniederschlag in Abhängigkeit von Dauerstufe und Wiederkehrintervall	Tab. 4.3	75
Jahresgang typischer Niederschlagsmengen (in mm)	Tab. 4.4	79
Kritische Regenintensitäten in Abhängigkeit von Dauerstufe und Wiederkehrintervall	Tab. 8.6	186
Zeitliche Niederschlagsverteilung von Bemessungsniederschlägen	Tab. 8.8	193
Abflussmenge:		
CN-Werte (Curve Number) bei mittlere Entleerung des Bodenspeichers (CN_{II}) für verschiedene Bodennutzungen und hydrologische Bodengruppen	Tab. 4.1	65
Monatliche CN-Werte von Ackerkulturen, Grünland, Wald, Siedlungs- und Verkehrsflächen für die hydrologische Bodengruppe C	Tab. 4.2	68
Hydrologische Bodengruppe in Abhängigkeit vom Tongehalt im obersten Meter und dem medianen Korndurchmesser im Oberboden	Tab. 8.16	210
Hydrologische Bodengruppen für die Ackerbeschriebe der Bodenschätzung	Tab. 8.17	211
Hydrologische Bodengruppen für die Grünlandbeschriebe der Bodenschätzung	Tab. 8.18	211
Mittlere Abflussbeiwerte für unterschiedliche Wegoberflächen	Tab. 6.10	152
Maximale Abflussbeiwerte des Lutz-Verfahrens für unterschiedliche hydrologische Bodengruppen und Landnutzungen	Tab. 8.12	204
Anfangsverluste des Lutz-Verfahrens für unterschiedliche hydrologische Bodengruppen und Landnutzungen	Tab. 8.13	206
Wochen zahlen des Lutz-Verfahrens für die Monate des Jahres	Tab. 8.14	207

Tabelleninhalt	Tabellenummer	Seite
Abflussgeschwindigkeit:		
Rauheitsbeiwerte für linearen oder flächenhaften Abfluss mit Fließtiefen > 5 cm	Tab. 5.1	108
Rauheitsbeiwerte für Schichtabfluss und konzentrierten Abfluss mit Fließtiefen ≤ 3 cm	Tab. 8.2	178
Formeln zur überschlägigen Bestimmung der Fließgeschwindigkeit in Rinnen und Rillen für verschiedene Oberflächen	Tab. 8.3	180
Formfaktor F zur Bestimmung der Ablaufzeit einer Dreiecksganglinie	Tab. 3.2	42
Verhältniszahlen zur überschlägigen Bestimmung des Scheitelabflusses	Tab. 8.5	185
Zeit- und Abflusswerte der dimensionslosen Einheitsganglinie	Tab. 3.6	50
Dimensionierung von Schutzmaßnahmen:		
Kritische Hanglängen bei höhenlinienparalleler Bewirtschaftung für unterschiedliche Hangneigungen	Tab. 6.1	119
Faustzahlen zur Breite von begrünter Abflussmulden	Tab. 6.4	127

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Anlass und Problemstellung	2
1.2	Zielgruppe und Bestimmungszweck	5
	Literatur	7
2	Grundlagen der Abflusentstehung, Sturzfluten und dezentralen Hochwasserschutzmaßnahmen	11
2.1	Begriffe und Definitionen des Landschaftswasserhaushalts	12
2.1.1	Komponenten und Bilanzgleichung des Wasserhaushalts	12
2.1.2	Wichtige Prozesse des Niederschlag-Abfluss-Vorgangs und ihre Terminologie	13
2.1.3	Einzugsgebiete und ihre Abgrenzung	14
2.1.4	Begriffe, Definitionen, Synonyme und ihre Einheiten und Formelzeichen	15
2.2	Starkregen – Auslöser für unterschiedliche Hochwasserarten	22
2.3	Ansätze und Wirkung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen	26
	Literatur	29
3	Wellenablauf – wie sich Abflusswellen aufbauen und wie der Scheitel gemindert werden kann	33
3.1	Grundprinzipien und wesentliche Einflussgrößen	34
3.1.1	Eigenschaften von Abflusswellen	34
3.1.2	Einflüsse von Abflussbildung und Abflusskonzentration auf Wellenablauf und Abflussminderung	35
3.2	Methoden zur Abschätzung von Abflussscheitel und -volumen	37
3.2.1	Das Dreiecksganglinienverfahren	38
3.2.2	Das Einheitsganglinienverfahren	46
	Literatur	58
4	Abflusentstehung – wie aus Niederschlag Abfluss wird	61
4.1	Grundprinzipien und wesentliche Einflussgrößen	62
4.2	Bestimmung der abflusswirksamen Niederschlagshöhe	62
4.3	Das Runoff-Curve-Number-Verfahren	63
4.4	Modellregen für den ländlichen Hochwasserschutz	73
4.4.1	Bemessungsziele in der Wasserwirtschaft und Ableitung von Bemessungszielen für die Flur	74
4.4.2	Niederschlagshöhen typischer Starkregenereignisse nach KOSTRA	76
4.5	Ansatzpunkte zur Reduktion des Abflussvolumens	79
4.5.1	Landnutzungsänderung	79
4.5.2	Flächenparzellierung	82
4.5.3	Landwirtschaftliche Bewirtschaftungspraxis	86
	Literatur	90

5	Abflusskonzentration – wie Abfluss in der Fläche gebündelt und beschleunigt wird	95
5.1	Grundprinzipien und wesentliche Einflussgrößen	96
5.2	Abflusstypen und Fließpfade in kleinen, ländlichen Einzugsgebieten	97
5.3	Methoden zur Abschätzung von Fließgeschwindigkeit und Fließzeit	102
5.3.1	Fließwege im Einzugsgebiet	103
5.3.2	Hydraulische Grundlagen	104
5.3.3	Die Geschwindigkeitsmethode zur Bestimmung der Konzentrationszeit	105
5.3.4	Fließgeschwindigkeitsbestimmung mithilfe der Gaukler-Manning-Strickler-Gleichung	105
	Literatur	110
6	Abflussverzögerung – wie Abfluss gebremst werden kann	113
6.1	Flächige, schlaginterne Maßnahmen zur Erhöhung der Oberflächenrauheit	115
6.2	Grünstreifen	121
6.3	Begrünte Abflussmulden (Grassed Waterways)	124
6.4	Kleinstrückhaltebecken in der landwirtschaftlichen Flur	129
6.5	Flurgliederung und Flächenarrangement	137
6.5.1	Konzentrationszeit und Flächenbedarf abflussmindernder Fließpfade	137
6.5.2	Vergleich aktueller und historischer Flurgliederungen	141
6.5.3	Flurneueordnung unter Berücksichtigung abflussverzögernder Strukturen und Maßnahmen	143
6.6	Abflussgeschwindigkeit in Gräben und Rohren	146
6.7	Wege- und Wasserführung	150
	Literatur	153
7	Anwendungsbeispiel zur quantitativen Abschätzung von Abflusssituation und Abflussminderung	159
7.1	Einführung	160
7.2	Methoden	160
7.2.1	Bemessungsniederschlag und abflusswirksame Niederschlagshöhe	160
7.2.2	Ermittlung der Konzentrationszeit	162
7.2.3	Abschätzung der Scheitelhöhe	163
7.3	Ergebnisse	163
7.3.1	Abflusssentstehung	163
7.3.2	Konzentrationszeit	163
7.3.3	Scheitelabflussrate bei Starkregen	167
7.3.4	Einfluss der Grabengestaltung auf Abflusskonzentration und Scheitelabflussrate	167
7.3.5	Wirkung einer flächendeckenden Mulchdirektsaat	168
7.4	Zusammenfassung	170
	Literatur	171
8	Anhang	173
8.1	Wirksamkeit dezentraler Maßnahmen zur Abflussminderung	174
8.2	Hydraulische Eigenschaften unterschiedlicher Abflusstypen und Fließpfade	174
8.2.1	Schichtabfluss	174

8.2.2	Flacher konzentrierter Abfluss (Rillenabfluss)	178
8.2.3	Abfluss in Hangmulden	180
8.2.4	Abfluss in Gräben, teilgefüllten Rohren und anderen offenen Gerinnen	181
8.2.5	Fließzeit durch Wasserkörper und Feuchtgebiete	183
8.2.6	Bestimmung des hydraulischen Radius	183
8.3	Das Verhältnisverfahren zur Bestimmung des Scheitelabflusses	184
8.3.1	Anwendungsbeispiel	185
8.3.2	Das erweiterte Verhältnisverfahren	187
8.4	Ableitung von Gebiets- und Bemessungsniederschlägen	188
8.4.1	Grundlagen, Kenngrößen und Definitionen	188
8.4.2	Bestimmung von Gebietsniederschlägen aus Messdaten	189
8.4.3	Radardaten	189
8.4.4	Stationsdaten	190
8.4.5	Synthetische Gebietsniederschläge	192
8.4.6	Veränderungen durch den Klimawandel	195
8.4.7	Anwendungsbeispiele zur Festlegung von Bemessungsniederschlägen	197
8.5	Bestimmung der Abflusshöhe nach Lutz	202
8.5.1	Bestimmung des Proportionalitätsfaktors a	206
8.5.2	Bestimmung der Gebietskonstanten C_1, C_2 und C_3	207
8.6	Hydrologische Bodengruppe	208
8.6.1	Bestimmung der hydrologischen Bodengruppe aus einer Korngrößenanalyse	210
8.6.2	Bestimmung der hydrologischen Bodengruppe aus der Bodenschätzung	211
8.7	Wegebau und Wasserführung	211
8.8	Kartierung von Fließwegen im Gelände	215
8.9	Geodaten und Geodatenanalyse	216
8.10	Einfluss der Bodenbedeckung auf CN-Werte bei kleinen Regen, bei Vorverschlämmung, bei natürlichen Regen und bei aufeinanderfolgenden Regen	217
	Literatur	224
	Serviceteil	
	Stichwortverzeichnis	233



Einleitung

- 1.1 Anlass und Problemstellung – 2
- 1.2 Zielgruppe und Bestimmungszweck – 5
- Literatur – 7

1.1 Anlass und Problemstellung

Die gesamtwirtschaftlichen Schäden durch Naturkatastrophen steigen weltweit. Insbesondere Hochwasser und Sturzfluten nehmen eine immer größere Bedeutung ein. Allein im Jahr 2016 verursachte eine Starkregenserie innerhalb von zwei Wochen in Deutschland einen Versicherungsschaden von etwa 2,6 Mrd. € [1]. Obwohl im Jahr 2017 die Schäden geringer als im Vorjahr waren, überstiegen sie aber noch immer die Summe von 1 Mrd. € [2]. 2018 wurden bereits in der ersten Jahreshälfte Schäden in Höhe von 1,3 Mrd. € registriert [3]. Neben materiellen Schäden an Gebäuden und Infrastruktur verursachen Starkregen und Sturzfluten durch Bodenabtrag, Verminderung der Bodenfruchtbarkeit und Gewässerbelastung vor allem aber auch schwere und kaum quantifizierbare ökologische Schäden. Dies belegen Luftbildaufnahmen von landwirtschaftlichen Flächen nach Starkregenereignissen eindrucksvoll [4, 5]. Aktuelle Auswertungen zeigen, dass der Trend hin zu stärkeren Extremen zunimmt und sich beispielsweise die Regenerosivität seit 1960 verdoppelt hat [6]. Wissenschaftler und Fachverbände sind sich daher einig: Hochwasser- und Starkregenvorsorge werden Daueraufgabe bleiben [7].

Zahlreiche Reaktionen folgten auf diese Entwicklungen. Dazu zählen beispielsweise die Europäische Hochwasserrisiko-management-Richtlinie [8], die 2010 durch die Novellierung der Wassergesetze von Bund und Ländern in national geltendes Recht übersetzt wurde. Dies führte zur Ausweisung und Festsetzung von Überschwemmungsgebieten. Wichtige Konsequenzen wurden auf Bundesebene gezogen durch das Nationale Hochwasserschutzprogramm im Jahr 2014, das Hochwasserschutzgesetz II von 2017 und durch die Anpassung der Strategien und Leitlinien der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser [9–11]. Auf Ebene der Bundesländer unterscheiden sich die Reaktionen stark. In Bayern wurde im Nachgang an das „Jahrhunderthochwasser“ von 2013

beispielsweise das bestehende Schutzkonzept zu einem ganzheitlicheren Hochwasserrisiko-management erweitert (Aktionsprogramm 2020+) [12]. Dort wird gegenwärtig auch eine „Hinweiskarte Oberflächenabfluss und Sturzfluten“ (HiOS) für alle Kommunen erarbeitet [13]. Baden-Württemberg hat 2016 als erstes Bundesland einen Leitfaden zum kommunalen Starkregenerisikomanagement als praxisorientierte Hilfestellung für kommunale Fachplaner und Entscheidungsträger veröffentlicht [14].

Die genannten Reaktionen sind ein wichtiger Schritt hin zu einer besseren Vorsorge vor meteorologischen Extremen. Der Fokus liegt aber bisher noch auf besiedelten Räumen. Da rund 80 % Deutschlands land- und forstwirtschaftlich genutzt sind, ergeben sich jedoch vor allem Herausforderungen im ländlichen Raum, um die natürlichen Ressourcen dieser Regionen langfristig zu erhalten – die Landschaft muss wetterfester werden. Daher hat sich in der Bayerischen Verwaltung für Ländliche Entwicklung die Initiative boden:ständig formiert (► www.boden-staendig.eu), um einen nachhaltigen Beitrag zum Boden- und Gewässerschutz zu leisten. Durch die Vernetzung und Unterstützung engagierter Akteure werden dabei insbesondere Landwirte und Gemeinden bei der Planung und Umsetzung von Maßnahmen unterstützt, die den negativen Auswirkungen der intensiven Flächennutzung entgegenwirken. Ziel ist, vor der „eigenen Haustür“ zum Erhalt lebendiger Böden beizutragen und die Flur abflussmindernd zu gestalten. Weitere Ansätze sind beispielsweise Entwicklungskonzepte für Gewässer III. Ordnung oder Bachpaten- und Gewässernachbarschaften, die Kommunen und örtlich zuständige Wasserwirtschaftsämter unterstützen [15–17]. Im Freistaat Sachsen wurden flächendeckend aus Gelände- und Bodendaten reliefbedingte Abflussbahnen ermittelt und in digitalen Karten dargestellt worden. Dort wird unter anderem die Begrünung erosionsgefährdeter Abflusswege forciert und gefördert [18, 19].

In Anbetracht der durch Klima- und Landnutzungsänderungen steigenden Hochwasserschäden muss der Wasser- und Stoffrückhalt in der Landschaft verbessert werden. Dazu müssen die Wasserflüsse in der Flur mehr Beachtung finden, z. B. bei der Anlage oder dem Ausbau von Straßen und Wegen, der Ausweisung von Baugebieten, der Umgestaltung der Landschaft im Rahmen von Flur- oder Bodenneuordnungen, aber auch bei der land- und forstwirtschaftlichen Bewirtschaftung. Dies erfordert zunächst, sich der Wasserflüsse in der Landschaft und der vielfältigen Einflussnahme durch den Menschen bewusst zu werden und die Wasserflüsse quantitativ zu beschreiben. Benötigt werden (standardisierte) Methoden, um abzuschätzen, wo mit wieviel Regen bzw. Abfluss in welcher Zeit zu rechnen ist, wo dieses Wasser fließt und ob daraus eine Gefahr für Feld, Flur und Infrastruktur oder gar für Leib und Leben erwachsen kann. Diese Kenntnisse bilden die Basis, um Maßnahmen zur Abflussminderung in der Flur abzuleiten und zu gestalten.

Methoden zur quantitativen Beschreibung von Wasserflüssen werden z. B. zum Gewässerausbau oder der Dimensionierung von Rückhalteräumen in der wasserwirtschaftlichen Bemessungspraxis seit Ende des 19. Jahrhunderts eingesetzt [20], wobei die ersten hydrologischen Planungswerkzeuge vor allem zwischen 1930 und 1950 in den USA entwickelt wurden [21, 22]. Hierzulande fand diese Entwicklung vor allem in den 1960er- bis 1980er-Jahren statt, als Hochschulen sich dem Thema intensiver widmeten [23–29] und sich die ersten größeren Vereine und Fachverbände formierten [30, 31]. Der Großteil der noch heute eingesetzten Planungs- und Bemessungsmethoden, insbesondere für kleine Gewässer und Gebiete, in denen keine Messdaten über Wasserhaushaltsgrößen und -flüsse vorliegen, wurde zu dieser Zeit, d. h. vor 40 bis 60 Jahren entwickelt. Sie bieten bis heute die einzige Möglichkeit, Bemessungsgrößen für die Flur relativ einfach abzuschätzen. (Extremwert-)statistische

Ansätze und andere Schätzverfahren, sogenannte Regionalisierungsmethoden, sind aufgrund fehlender Messdaten oder der oft großen Heterogenität von Landschaftselementen in kleinen Gebieten (ca. 10–500 ha) bis heute dagegen nicht zuverlässig anwendbar.

Die bedeutendste neuere Entwicklung ist die zunehmende Verbreitung hydrodynamischer Modelle, die nicht nur den Wellenablauf in Gewässern, sondern durch Lösen der Flachwassergleichungen auch eine detaillierte Simulation des Oberflächenabflusses bei Starkregen in der Fläche ermöglichen. Sie erlauben eine deutlich differenziertere Betrachtung und Analyse der Fließpfade in der Flur als die klassischen Ansätze zur Abschätzung von Welleneigenschaften. Ihre Bedeutung wird daher weiter zunehmen. Bis heute ist ihre Anwendung jedoch aufwendig, da sie entsprechende Kenntnisse und Programme, hochaufgelöste Daten und zumindest für größere Gebiete auch noch immer enorme Rechenleistungen voraussetzen. Ihr Einsatz ist daher bis jetzt meist auf wasserwirtschaftliche Belange, größere Gewässer und besiedelte Räume begrenzt. Für kleine, einige Hektar bis wenige Quadratmeter große Einzugsgebiete besteht somit ein Mangel an einfachen Planungsmethoden.

Entsprechend sind (standardisierte) Verfahren zur Quantifizierung von Wasserflüssen in der Flur bis heute in Deutschland nicht etabliert, variieren von Bundesland zu Bundesland und werden häufig mit Ansätzen der Bodenabtrags- und Erosionsmodellierung vermengt. Letzteres ist fachlich nicht haltbar, da Erosion ein Prozess der Fläche ist und Bodenabtrag wesentlich vom Vorhandensein von transportierbarem Material abhängt (z. B. bei fehlender Bedeckung) und häufig nicht durch die Transportkapazität des Abflusses limitiert wird. Ein weiterer wesentlicher, für die flächenhafte Erosion irrelevanter Aspekt sind die Fließwege des Abflusses zwischen Feldrand und Gewässer. Sie bestimmen die Geschwindigkeit der Gebietsentwässerung

und damit die Höhe einer Abflusswelle maßgeblich [21].

Dieses Handbuch bereitet daher Methoden zur quantitativen Erfassung und Beschreibung von Wasserflüssen zusammenfassend und für Fragen der ländlichen Entwicklung und Flur- und Landschaftsgestaltung auf. Entsprechend liegt der räumliche Fokus im Bereich oberhalb der Gewässer III. Ordnung, also auf kleinen (<5 km²), vor allem landwirtschaftlich geprägten Einzugsgebieten. Folgende Kernfragen werden beantwortet: Welcher Teil des Niederschlags fließt ab? Auf welchen Wegen fließt er ab, und wie können Abflussgeschwindigkeit oder Scheitelhöhe an einem bestimmten Punkt des Fließweges ermittelt werden? Da in der Praxis häufig unterschiedliche Ansätze oder identische Ansätze mit unterschiedlichen Parameterwerten verwendet werden, werden hier Empfehlungen zur Bestimmung hydrologischer Größen gegeben und ein Beitrag zu einer Vereinheitlichung der Methodenstandards geleistet. Dazu erfolgte eine umfangreiche Recherche relevanter Methoden und Fachveröffentlichungen [30, 32–39], Lehrbüchern [40–43] und den an Wasser- und Umweltbehörden der Länder verfügbaren Publikationen und Bemessungsverfahren [z. B. 14, 44–50]. Letzteren kommt eine hohe Bedeutung zu, um möglichst in der Wasserwirtschaft etablierte Methoden zu verwenden. Eine weitere, wesentliche Quelle stellten die Veröffentlichungen und Werkzeuge des US Natural Resources Conservation Service (NRCS) dar. Der NRCS hat seit den 1960er-Jahren umfangreiche und zwischenzeitlich weltweit verbreitete Methodenstandards und Praxishandbücher publiziert. Am wichtigsten sind hier das seit den 1950er-Jahren kontinuierlich fortgeschriebene hydrologische National Engineering Handbook [51], der Conservation Practices Training Guide [52] und die zahlreichen, online verfügbaren Planungswerkzeuge und Modelle [53]. Diesen Quellen wurden viele Auszüge entnommen und an die hiesigen Bedingungen angepasst. Ergänzt wurden sie durch Erkenntnisse, die bei Pilotprojekten zum Wasserrückhalt in der

Fläche und bei historischen Sturzflutereignissen gewonnen wurden [54–57], durch Empfehlungen bestehender Leitfäden und Veröffentlichungen der Fachverbände [7, 58–62] sowie durch Erfahrungen aus den Nachbarländern Österreich und Schweiz [63–65].

Der zweite Fokus des Handbuchs liegt auf der Beschreibung und Quantifizierung der Wirkung von abflussmindernden Maßnahmen. Klassische Fragen sind beispielsweise: Wie kann ein Wegseitengraben gestaltet werden, damit Wasser darin nicht beschleunigt, sondern verzögert abgeführt wird? Wie breit muss eine begrünte Abflussmulde sein, um Wasser schadlos aus der Fläche abzuleiten? Wie kann die Gebietsentwässerung durch Wege und die Parzellierung der Flur positiv beeinflusst werden und welche Wirkung ist zu erwarten? Welchen Effekt haben landwirtschaftliche Maßnahmen auf den Wasserrückhalt? Wie sind kleine Rückhaltebecken in der Fläche zu dimensionieren? Neben einer Beschreibung der Maßnahmen werden Gleichungen und Richtzahlen zur Planung und Beurteilung der Wirkung bereitgestellt. Das vorliegende Handbuch ist kein Leitfaden, der Schritt für Schritt beschreibt, wie eine bestimmte Maßnahme umzusetzen ist, sondern eine Zusammenstellung von Maßnahmen und Methoden, mit denen Wasserflüsse in der Landschaft gestaltet und beschrieben werden können. Idealerweise können die vorgestellten Ansätze als Blaupause für die Modellierung bzw. Dimensionierung konkreter Maßnahmen in der Flur herangezogen werden.

Das vorliegende Handbuch versucht, die Lücke zu schließen, die entsteht, weil klassische wasserwirtschaftliche Bemessungsansätze auf dauerhaft wasserführende Gewässer und kommunale Räume beschränkt sind. Zum anderen werden Maßnahmen zum dezentralen Wasserrückhalt in den bestehenden Handreichungen fast ausschließlich qualitativ beschrieben und erscheinen damit in der Wirkung ungewiss. Dies erschwert eine Kosten-Nutzen-Analyse und ein Abwägen verschiedener Optionen.

Gleichzeitig wurden nur gut beschriebene Methoden berücksichtigt, die mit üblichen Tabellenkalkulationsprogrammen gelöst werden können. Dies beruht auf der Überlegung, dass damit vielfach schon hinreichend genau Lösungen abgeleitet werden können. Die Komplexität der (instationären) Abflussprozesse bei konkreten Hochwasser- und Sturmflutereignissen wird damit zwar nur stark vereinfacht abgebildet, für Planungen, die viele Jahre Bestand haben, sind aber konkrete Ereignisse ohnehin nicht bekannt. Die Auswahl der Methoden begründete sich auch dadurch, dass auf Spezialwissen z. B. über flächendifferenzierte (hydrodynamische) Modellierungen und auf hohe technische Anforderungen, die sich oft aus der Anwendung flächendifferenzierter Niederschlag-Abfluss-Modelle ergeben, verzichtet wurde, um auch „Quereinsteigern“ und Spezialisten mit anderer Ausrichtung die Nutzung zu ermöglichen. Die Verfahren sollen so einem breiteren Nutzerkreis zugänglich werden.

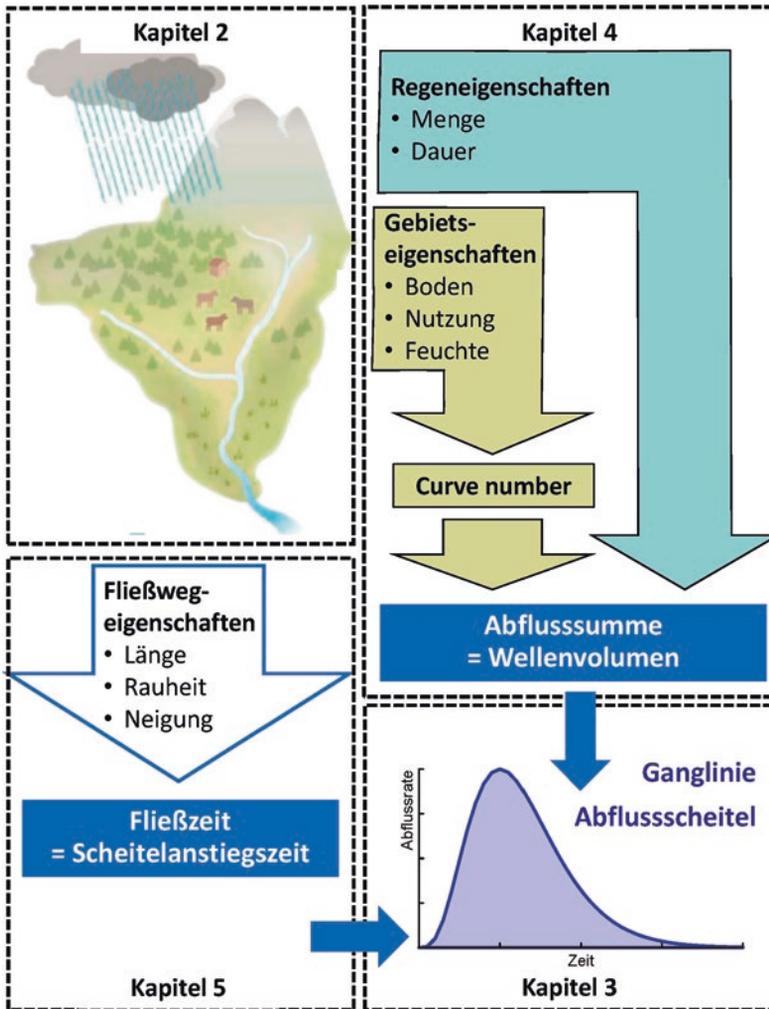
Die beschriebenen Methoden versuchen, einen fairen Ausgleich zwischen dem notwendigen Aufwand und der erforderlichen Genauigkeit zu erreichen. Hinsichtlich der Genauigkeit sind zwei Dinge wesentlich: Erstens weiß eine Planung im Gegensatz zur retrospektiven Betrachtung nie, wann welches Ereignis wo auftritt und wie der Zustand der Flächen genau zu diesem Zeitpunkt ist. Diese Unsicherheit stellt alle anderen Unsicherheiten bei Weitem in den Schatten. Zweitens bedeutet dezentraler Hochwasserschutz immer, dass viele Maßnahmen zusammenwirken müssen, weil die einzelne Maßnahme schwach wirkt oder nur einen kleinen Teil der Flur schützt. Eine Fehleinschätzung einer einzelnen Maßnahme in einer speziellen Situation hat daher kaum Auswirkungen. Es kommt auf das Gesamtpaket an. Eine generelle Fehleinschätzung einer Maßnahme, z. B. eine Unterbewertung der Mulchsaat oder eine Überbewertung einer Querbearbeitung, wirkt sich dagegen stark aus. Hier ersetzt dieses Handbuch die gefühlte Wirkung

durch Zahlen und Kennwerte, die auf einem großen Fundus an Messungen, Erfahrungen und publizierten Werten aus der Literatur beruhen.

1.2 Zielgruppe und Bestimmungszweck

Wasser kennt keine Grenzen. Es bahnt sich unweigerlich seinen Weg, vernetzt unterschiedliche Landschaftsteile und wird dabei auf vielfältige Weise durch menschliches Wirken beeinflusst. Um die Auswirkungen von Starkregen zu mindern, gibt es daher viele Ansatzpunkte in der Fläche und entlang des kompletten Fließweges von der Wasserscheide bis in die größeren Gewässer. Konsequenter Wasserrückhalt betrifft daher immer viele unterschiedliche Akteure. Das gilt insbesondere, wenn Abflussminderung mit kleinen, dezentralen Maßnahmen erfolgen soll. Solche dezentralen Einzelmaßnahmen haben oft nur eine geringe Wirkung und beschränkte Reichweite. In Konsequenz sind mehrere aufeinander abgestimmte Maßnahmen an unterschiedlichen Stellen des Einzugsgebietes erforderlich, um einen deutlichen Effekt zu erreichen. Starkregenvorsorge in der Flur muss daher zwangsläufig als gesamtgesellschaftliche Gemeinschaftsaufgabe verstanden werden. Die wesentlichen Vorteile vieler dezentraler Maßnahmen sind, dass sie preiswert und vergleichsweise einfach zu verwirklichen sind und nicht nur punktuell wirken, sondern das gesamte Einzugsgebiet schützen.

Das vorliegende Handbuch soll dies unterstützen. Es richtet sich in erster Linie an Planer und Ingenieure, die den Landschaftswasserhaushalt beeinflussen, aber auch an alle weiteren, in der Flur tätigen Akteure wie Wasserberater, Pflege- und Zweckverbände, Hochschulangehörige, Fachinstitute und Entscheidungsträger in Behörden. Für sie wurden etablierte und praxisorientierte Ansätze zur Erfassung und Quantifizierung der Wasserflüsse in der Landschaft zusammengefasst



▣ **Abb. 1.1** Schematische Gliederung des Buchs und Zusammenwirken der Kapitel in der Abflussprognose

und beschrieben. Vereinzelt werden auch konstruktive Aspekte z. B. für den Wegebau, die Anlage von begrünten Abflussmulden oder kleine Rückhaltebecken genannt; diese haben jedoch in der Regel schematischen Charakter. Rechtliche Aspekte wurden, ebenso wie Strategien für die Umsetzung von Maßnahmen in die Praxis, ausgeklammert.

Der thematische Aufbau des Buchs und die für eine quantitative Prognose notwendigen Berechnungsschritte sind in [▣ Abb. 1.1](#) illustriert. Durch den Themenumfang, die Komplexität des Abflussvorgangs und die

Vielfalt an Verfahren und Maßnahmen sind den Möglichkeiten eines Buches gleichzeitig deutliche Grenzen gesetzt. Daher wird auch eine große Zahl weiterführender Literaturstellen genannt. Das Handbuch soll vor allem einen Zugang zu den unterschiedlichen Verfahren sowie deren Möglichkeiten und Grenzen bieten, einen Beitrag zur Standardisierung der Ansätze leisten und die Diskussion zwischen Wasserwirtschaft, Landwirtschaft und Ländlicher Entwicklung befruchten. Zusammen sind sie die wesentlichen Akteure, die den Wasserrückhalt in der Fläche verbessern können.

Literatur

1. Munich Re (2017) Naturkatastrophen 2016. Analysen, Bewertungen, Positionen. Topics Geo. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, München
2. Munich Re (2018) Naturkatastrophen 2017. Analysen, Bewertungen, Positionen. Topics Geo. Münchener Rückversicherungs-Gesellschaft, München
3. Gesamtverband der Deutschen Versicherungswirtschaft (2018) Naturgefahrenreport 2018. Die Schaden-Chronik der deutschen Versicherer. Berlin
4. Kistler M, Brandhuber R, Maier H (2013) Wirksamkeit von Erosionsschutzmaßnahmen, Ergebnisse einer Feldstudie. Schriftenr Bayer Landesanst Landwirtsch 8: Freising
5. Brandhuber R, Treisch M, Fischer F et al (2017) Starkregen, Bodenerosion, Sturzfluten. Schriftenr Bayer Landesanst Landwirtsch 2: Freising
6. Auerswald K, Fischer FK, Winterrath T, Brandhuber R (2019) Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data. Hydrol Earth Syst Sci 23:1819–1832. ▶ <https://doi.org/10.5194/hess-23-1819-2019>
7. DWA (2018) Hochwasser- und Starkregenvorsorge bleibt Daueraufgabe. DWA-Position zu Hochwasser und Sturzfluten. Korresp Wasserwirtsch 11:378–381
8. HWRM-RL (2007) Richtlinie 2007/60/EG des Europäischen Parlamentes und des Rates vom 23. Oktober 2007 über die Bewertung und das Management von Hochwasserrisiken. Amtsbl Europ Union L 288/28
9. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2018) LAWA-Strategie für ein effektives Starkregenerisikomanagement. Erfurt
10. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2013) Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwasserrisikomanagementplänen. Tangermünde
11. Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (2018) Empfehlungen zur Aufstellung von Hochwassergefahrenkarten und Hochwasserrisikokarten. Tangermünde
12. Bayerisches Staatsministerium für Umwelt und Verbraucherschutz (2014) Hochwasserschutz Aktionsprogramm 2020plus. München
13. Kaiser M, Broich K, Pflugbeil T et al (2018) Sturzflutforschung in Bayern – Ziele und Ansätze des Projekts HiOS. Korrespondenz Wasserwirtsch 11:685–690. ▶ <https://doi.org/10.3243/kwe2018.11.005>
14. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2016) Leitfaden Kommunales Starkregenerisikomanagement in Baden-Württemberg. Karlsruhe
15. Henschel T, Schnippering E, Kolbinger A et al (2018) So schön und wertvoll können Gewässer sein. Unterhaltung von Gewässern III. Ordnung. Bayer Gemeindetag 1:7–12
16. Schnippering E (2018) Weniger ist mehr. der bauhofLeiter 8:42–44
17. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2008) Kooperation bei der Unterhaltung kleiner Gewässer. Beispiele aus Bayern. Gewässernachbarschaften. Umwelt Spezial. München
18. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2015) Begrünung von erosionsgefährdeten Abflussbahnen. Dresden
19. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2010) Erosionsschutz in reliefbedingten Abflussbahnen. Schriftenr 13: Dresden
20. Kuichling E (1889) The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts. Trans Am Soc Civ Eng 20:1–56
21. Sherman LK (1932) Streamflow from rainfall by the unit-graph method. Eng News-Record 108:501–505
22. Williams JR, Kannan N, Wang X, Santhi C (2012) Evolution of the SCS runoff curve number method and its application to continuous runoff simulation. J Hydrol Eng 17:1221–1229
23. Anderl B (1975) Vorhersage von Hochwasserganglinien aus radargemessenem Regen. Dissertation, Universität Karlsruhe
24. Koehler G (1976) Niederschlag-Abfluß-Modelle für kleine Einzugsgebiete. Schriftenr Kuratoriums Kulturbauwesen 25: Parey, Hamburg
25. Lutz W (1984) Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen. Mitt Inst Hydrol Wasserwirtsch 24: Universität Karlsruhe
26. Plate EJ, Ihringer J, Lutz W (1988) Operational models for flood calculations. J Hydrol 100:489–506. ▶ [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90198-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90198-9)
27. Kleeberg R-B, Overland H (1989) Zur Berechnung des effektiven oder abflusswirksamen Niederschlags. Mitt Inst Wasserwesen 32: Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
28. Neufang L, Auerswald K, Flacke W (1989) Automatisierte Erosionsprognose- und Gewässerverschmutzungskarten mit Hilfe der dABAG – ein Beitrag zur standortgerechten Bodennutzung. Bayer Landwirtsch Jahrb 66:1–19
29. Merz R (2006) Regionalisierung von Ereignisgrößen. Wiener Mitt 197:179–194 Technische Universität, Wien
30. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1982) Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil I: Analyse. Regeln zur Wasserwirtschaft 112: Paul Parey, Hamburg

31. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1984) Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluss-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil II: Synthese. Regeln zur Wasserwirtschaft 113: Paul Parey, Hamburg
32. Bronstert A, Seiert S, Oberholzer G (1993) Maßnahmen der Flurbereinigung und ihre Wirkung auf das Abflussverhalten ländlicher Gebiete. Schriften Landesamt Flurneuordnung Land Baden-Württemberg 3: Kornwestheim
33. Ott M (1999) Einbeziehung von Bodeninformationen bei der großräumigen Anwendung eines einfachen Niederschlag-Abfluss-Modells. In: Koehler G (Hrsg) Bemessungsabflüsse für kleine Einzugsgebiete. Ber Fachgeb Wasserbau Wasserwirt 9:179–192, Universität, Kaiserslautern
34. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft u. Kulturbau (1999) Hochwasserabflüsse. DVWK-Schriften 124: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, Bonn
35. Koehler G (1999) Regionalisierung von Hochwasserabflüssen für kleine Einzugsgebiete im südlichen Donauebiet. In: Koehler G (Hrsg) Bemessungsabflüsse für kleine Einzugsgebiete. Ber Fachgeb Wasserbau Wasserwirt 9:165–178, Universität, Kaiserslautern
36. Peschke G, Etzenberg C, Müller G et al (1999) Das wissenschaftliche System FLAB – ein Instrument zur rechnergestützten Bestimmung von Landschaftseinheiten mit gleicher Abflussbildung. Internationales Hochschulinstitut, Zittau
37. Sieker F, Wilcke D, Reich M, et al (2007) Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wasserrückhalt in der Fläche unter besonderer Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte – am Beispiel des Flusseinzugsgebietes der Mulde in Sachsen. Abschlussbericht, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Leibniz Universität Hannover. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Projekt AZ 214679), Hannover
38. Maetens W, Poesen J, Vanmaercke M (2012) How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? Earth-Science Rev 115:21–36. [▶ https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.08.003](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.08.003)
39. Rieger W (2012) Prozessorientierte Modellierung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen. Mitt Inst Wasserwesen Wasserwirt Ressourcenschutz 116: Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
40. Chow VT (2009) Open Channel Hydraulics. Blackburn Press, Caldwell, New Jersey, USA
41. Dyck S, Peschke G (1995) Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen, Berlin
42. Seybert TA (2006) Stormwater management for land development. Methods and calculations for quantity control. Wiley, Hoboken
43. Patt H, Jüpner R (2013) Hochwasser-Handbuch Auswirkungen und Schutz. Springer, Berlin
44. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2003) Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Teil 1. Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren. Karlsruhe
45. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2005) Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes. Karlsruhe
46. Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft (2006) Dezentraler Hochwasserschutz. Möglichkeiten der ländlichen Entwicklung zur Unterstützung eines dezentralen Hochwasserschutzes. Schriften 11: Dresden
47. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2016) Loseblattsammlung Hydrologische Planungsgrundlagen. Augsburg
48. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2016) Dezentraler Hochwasserschutz im ländlichen Raum. Dresden
49. Thüringer Landesverwaltungsamt (2017) Kommunales Risikomanagement bei Starkregen. Ilmenau
50. Thüringer Landesanstalt für Umwelt und Geologie (2018) Leitfaden zur Erstellung von integralen Hochwasserschutzkonzepten in Thüringen. Jena
51. Natural Resources Conservation Service (2015) National engineering handbook. Part 630 hydrology. Natural Resources Conservation Service (NRCS), United States Department of Agriculture. [▶ http://t1p.de/NRCS-NEH](http://t1p.de/NRCS-NEH)
52. Natural Resources Conservation Service (1999) CORE4 Conservation Practices Training Guide. US Department of Agriculture, Washington
53. Natural Resources Conservation Service (2018) Hydrologic and hydraulic tools and models. US Department of Agriculture (USDA), Washington. [▶ http://go.usa.gov/rXYw](http://go.usa.gov/rXYw)
54. Lenz A, Karlstetter M, Knogler F (2010) Sanierung des landschaftlichen Stoffhaushalts durch Ländliche Entwicklung. Strategien für eine integrierte und effiziente Umsetzungsarbeit aufgezeigt am Einzugsgebiet des Schwimmbachs, Niederbayern. Ingenieurbüro Lenz, Ringelai. [▶ https://www.boden-staendig.eu/_Resources/Persistent/2e6f7e7a920efec3d3f408f620bf2b3c7d0ab423/schwimmbach-bericht-phase1-2010.pdf](https://www.boden-staendig.eu/_Resources/Persistent/2e6f7e7a920efec3d3f408f620bf2b3c7d0ab423/schwimmbach-bericht-phase1-2010.pdf)
55. Bronstert A, Agarwal A, Boessenkool B et al (2017) Die Sturzflut von Braunsbach am 29. Mai 2016 – Entstehung, Ablauf und Schäden eines „Jahrhundertereignisses“. Teil 1: Meteorologische und hydrologische Analyse. Hydrol Wasserbewirt 61:150–162. [▶ https://doi.org/10.5675/HyWa](https://doi.org/10.5675/HyWa)

56. Hübl J, Heiser M, Braito S, et al (2017) Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse Rottal-Inn 2016, Ereignisanalyse Simbach. IAN-Report 180(2): Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien
57. Hübl J, Heiser M, Braito S, et al (2017) Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse Rottal-Inn 2016, Ereignisdokumentation. IAN-Report 180(1): Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien
58. Reichert E, Achtziger R, Seidler C et al (2007) Maßnahmensteckbriefe zur Broschüre Wasser + Landschaft. Arbeitsgrundlage zur Optimierung einer nachhaltigen Landnutzung aus Sicht des Hochwasserschutzes und des Natur- und Landschaftsschutzes. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum, Technische Universität Bergakademie, Freiberg
59. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2013) Starkregen und urbane Sturzfluten. Praxisleitfaden zur Überflutungsvorsorge DWA-Themen T1: Hennef
60. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2015) Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung. Merkbl DWA-M 550: Hennef
61. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2015) Wasserrückhalt in der Fläche durch Maßnahmen in der Landwirtschaft – Bewertung und Folgerungen für die Praxis. DWA-Themen T5: Hennef
62. Ingenieurbüro Lenz (2017) Planungshandbuch. Initiative boden:ständig. Ringelai. ► https://www.boden-staendig.eu/_Resources/Persistent/8e414f5335c25a92c760d80cd91699c2dcba11dc/Planungshandbuch-bodenstaendig-Stand-2017-11.pdf
63. Heumund C, Markart G, Kohl B, et al (2011) Abschätzung von Oberflächenabflussbeiwerten bei konvektiven Starkregen. Evaluation der Geländeanleitung von Markart et al. (2004) für Schweizerische Einzugsgebiete. BFW-Dokumentation 12: Bundesamt und Forschungszentrum Wald, Wien
64. Schweizer Bundesamt für Umwelt (2018) Gefährdungskarte Oberflächenabfluss Schweiz. Bern
65. Markart G, Kohl B, Sotier B, et al (2004) Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen. BFW-Dokumentation 4: Bundesamt und Forschungszentrum Wald, Wien

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/ die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Grundlagen der Abflussentstehung, Sturzfluten und dezentralen Hochwasser- schutzmaßnahmen

- 2.1 **Begriffe und Definitionen des
Landschaftswasserhaushalts – 12**
 - 2.2 **Starkregen – Auslöser für unterschiedliche
Hochwasserarten – 15**
 - 2.3 **Ansätze und Wirkung dezentraler Hochwasser-
schutzmaßnahmen – 24**
- Literatur – 29**

2.1 Begriffe und Definitionen des Landschaftswasserhaushalts

Dieses Kapitel beschreibt den Landschaftswasserhaushalt und wesentliche Begriffe, Komponenten und Prozesse, die beim Niederschlag-Abfluss-Prozess von Bedeutung sind. Darüber hinaus werden Einzugsgebiete charakterisiert, da sie die wesentliche räumliche Bezugsgröße zur Bilanzierung von Wasserflüssen darstellen. Eine Übersicht wichtiger, in diesem Handbuch verwendeter Begriffe und Definitionen ist glossarartig in ► Abschn. 2.1.4 zusammengestellt. Die Inhalte stützen sich auf etablierte Grundlagenwerke [1–4].

2.1.1 Komponenten und Bilanzgleichung des Wasserhaushalts

Für Hochwasserereignisse hat der Niederschlag eine zentrale Bedeutung. Seine Eigenschaften bestimmen in erheblichem Maße die Eigenschaften einer Überflutung. Die Begriffe Überschwemmung, Überflutung und Hochwasser werden hier synonym als Überbegriff für Überschwemmungen aller Art verwendet. Eine Abgrenzung unterschiedlicher Überschwemmungstypen erfolgt in ► Abschn. 2.2; dort wird auch auf unterschiedliche Starkregenarten eingegangen. Der Niederschlag (N) teilt sich auf in die Komponenten abfließender oder abflusswirksamer oder effektiver Niederschlag (N_{eff}), Evapotranspiration (ET) und Änderung des Gebietsrückhalts bzw. Gebietspeichers (ΔS). Zusammen bilden sie eine geschlossene Bilanzgleichung (2.1), die besagt, dass alles Wasser, das sich als Abfluss in einem Gewässer wiederfindet, seinen Ursprung im Niederschlag hat:

$$N_{\text{eff}} = N - ET - \Delta S \quad (2.1)$$

Die Bezeichnungen abfließender oder abflusswirksamer oder effektiver Niederschlag haben sich im deutschen Sprachraum eingebürgert,

da häufig nicht zwischen Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss unterschieden werden kann oder die Unterscheidung nicht zweckmäßig ist. Gleiches gilt für den Begriff Direktabfluss, der ebenfalls den Teil des Niederschlags bezeichnet, der unmittelbar oder nur mit kurzer zeitlicher Verzögerung nach einem Regen einem Gewässer zufließt. Er ist ebenfalls synonym zum effektiven Niederschlag und wird oft verwendet, wenn N_{eff} einem Gewässer zugeflossen ist. Trotz des ähnlichen Namens, darf aber N_{eff} keinesfalls mit dem Niederschlag N gleichgesetzt werden, da der Gebietsrückhalt ΔS bei den meisten (kleineren und mittleren) Regen wesentlich größer als N_{eff} ist und dann N_{eff} nur einen kleinen Anteil des Niederschlags ausmacht.

Verglichen mit N und N_{eff} ist ET bei Hochwasserereignissen üblicherweise sehr klein, weshalb ET in der quantitativen Betrachtung großer Niederschlag-Abfluss-Ereignisse vernachlässigt werden kann. Die Speicheränderung, d. h. der Teil des Niederschlags, der bei einem Regen im Gebiet zurückgehalten wird, ergibt sich aus der Wassermenge, die infiltriert, und dem Wasser, das an der Oberfläche, z. B. auf Pflanzen oder in Mulden, zurückgehalten wird. N_{eff} entspricht also bei kurzzeitiger Betrachtung der Differenz von N und ΔS :

$$N_{\text{eff}} = N - \Delta S \quad (2.2)$$

Die wesentliche Herausforderung bei der Bestimmung von N_{eff} liegt daher in der Schätzung des Gebietsrückhalts ΔS , der von unterschiedlichen Aspekten abhängt und sich über die Zeit verändert. Sind N und N_{eff} bekannt, lässt sich aus ihrem Quotienten der volumetrische Abflussbeiwert (Ψ) bestimmen. Er ist eine dimensionslose Verhältniszahl und variiert zwischen Null und Eins. Ein Wert von $\Psi = 0,6$ bedeutet, dass 60 % des Niederschlags abfließen.

$$\Psi = \frac{N_{\text{eff}}}{N} \quad (2.3)$$

In der ingenieurhydrologischen Praxis spielen Abflussbeiwerte (und Ansätze, sie zu bestimmen) eine wichtige Rolle, um das zu erwartende Abflussvolumen abzuschätzen. Abflussbeiwerte sind hoch bei flachgründigen Standorten mit geringem Porenvolumen, bei Böden mit hohen Tongehalten, bei hohem Anteil überbauter und versiegelter Flächen im Einzugsgebiet und bei intensivem Ackerbau mit hohem Reihenkulturanteil und wendender Bodenbearbeitung. Umgekehrt treten niedrige Abflussbeiwerte häufig bei geringem Versiegelungsgrad, hohem Waldanteil und auf tiefgründigen, durchlässigen Standorten auf. Auf landwirtschaftlichen Nutzflächen können konservierende Maßnahmen (z. B. Mulchbedeckung $\geq 30\%$ oder nicht-wendende Bodenbearbeitung) die Abflussbeiwerte deutlich reduzieren (vgl. ► Abschn. 4.5.3).

Wenn hier von Niederschlag gesprochen wird, ist üblicherweise der Gebietsniederschlag gemeint, also die mittlere (abflusswirksame) Niederschlagshöhe eines Einzugsgebietes. Sie ist für den Hochwasserabfluss von grundlegender Bedeutung, da sie multipliziert mit der Einzugsgebietsfläche (A_{EZG}) das Abflussvolumen (Q) ergibt:

$$Q = N_{eff} \cdot A_{EZG} \quad (2.4)$$

2.1.2 Wichtige Prozesse des Niederschlag-Abfluss-Vorgangs und ihre Terminologie

Der Abflussprozess gliedert sich in drei wesentliche Vorgänge: i) die Bildung von Effektivniederschlag (Abflussbildung) auf der Fläche, ii) die Bündelung des Effektivniederschlags in der Fläche (Abflusskonzentration) und iii) den Fließprozess in Gerinnen und Gewässern (Wellenablauf). Die Vorgänge laufen gleichzeitig ab und können in zahlreiche Unterprozesse aufgegliedert werden. Da der Fokus des Handbuchs auf kleinen Einzugsgebieten und damit vor allem auf den Bereichen oberhalb der Gewässer III. Ordnung

liegt, wird der Wellenablauf in dauerhaften Gewässern weitgehend ausgeblendet. Praxis-taugliche Verfahren zu seiner Beschreibung können beispielsweise den Veröffentlichungen der Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg entnommen werden [5–7].

Die Abflussbildung (► Kap. 4) hängt von der Zwischenspeicherung des Niederschlags auf der Vegetation (Interzeption), der Wasserspeicherung auf der Bodenoberfläche und der Infiltration ab. Besonders bedeutsam ist die Infiltration, die ihrerseits von Eigenschaften der Oberfläche und des Bodens bestimmt wird.

Die Abflusskonzentration (vgl. ► Kap. 5) erfolgt, während der abflusswirksame Niederschlag über ober- und unterirdische Fließpfade, die an der Wasserscheide beginnen und bis in die Gewässer reichen, lateral abfließt. Wesentliche Kenn- und Einflussgrößen der Abflusskonzentration sind die Länge und Dichte der Fließpfade sowie deren hydraulische Eigenschaften. Sie beeinflussen die Geschwindigkeit, mit der Wasser aus der Fläche abgeleitet wird, und damit auch die Scheitelhöhe einer Abfluss- oder Hochwasserwelle. Grundsätzlich gilt: Je länger und hydraulisch rauer der Fließweg, desto langsamer der Abfluss und desto geringer der Scheitel einer Abflusswelle. Die Anzahl landschaftsgliedernder Elemente und Strukturen und deren Beziehung zueinander hat daher einen hohen Einfluss auf den Wasser- und Stoffhaushalt eines Einzugsgebietes [8].

Häufig wird Abfluss anhand seiner Fließpfade in (Land-)Oberflächenabfluss und Zwischenabfluss unterschieden. Oberflächenabfluss im engeren Sinn ist Wasser, das gar nicht in den Boden infiltriert, z. B. weil die Oberfläche versiegelt, verschlammte oder der Bodenporenraum gesättigt ist. Häufig infiltriert Oberflächenabfluss auch entlang des Fließpfades und wird dann zu Zwischenabfluss, häufig auch Interflow genannt, um lateral (oberflächennah) im Boden, z. B. entlang von Horizontgrenzen abzufließen.

Umgekehrt exfiltriert Zwischenabfluss entlang des Fließweges auch häufig z. B. am Hangfuß, weswegen sich beide Abflusskomponenten oft schlecht trennen lassen. Wesentlich ist, dass beide Komponenten im Vergleich zum Grundwasserabfluss hohe Fließgeschwindigkeiten aufweisen. Dadurch sind sie meist gemeinsam für den Abfluss bei starken Niederschlägen verantwortlich. Zusammen werden sie auch als Direktabfluss bezeichnet, da sie zeitlich unmittelbar nach einem Niederschlagsereignis einem Gewässer zufließen. In diesem Handbuch erfolgt keine strenge Trennung zwischen beiden Komponenten. Oberflächenabfluss wird als Synonym für alle Abflussarten verwendet, die mit nur kurzer Verzögerung nach einem Regen an oder nahe der Oberfläche auftreten und in ein Gewässer gelangen bzw. diesem zufließen.

Zur quantitativen Beschreibung der verschiedenen Wasserhaushaltskomponenten hat sich eine bestimmte Terminologie etabliert. Dabei werden Wortverbindungen verwendet, die die jeweiligen Komponenten benennen und diese mit einem Substantiv verbinden, das die Dimension der Komponente oder deren Bezugsgröße beschreibt. Beispielsweise wird häufig von der Niederschlagshöhe oder -intensität und von Abfluss bzw. Abfluss-

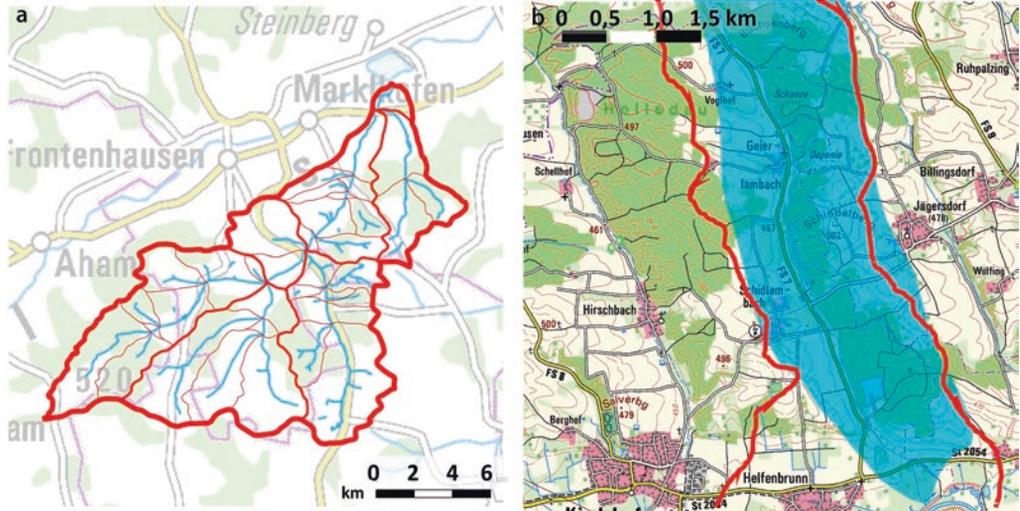
summe oder -spende gesprochen. ■ Tab. 2.1 enthält eine Zusammenfassung dieser Substantive, die die Dimension ausdrücken.

2.1.3 Einzugsgebiete und ihre Abgrenzung

Einzugsgebiete sind die zentrale Flächeneinheit zur Beschreibung von Wasserflüssen. Sie werden durch Wasserscheiden begrenzt und umfassen das Gebiet, von dem ein konkreter Bezugspunkt seinen Abfluss bezieht. Solche Bezugspunkte können der Hangfuß eines Ackers, in den die darüber liegende Nutzfläche entwässert, die Mündung eines Baches in ein anderes Gewässer oder eine Ortschaft sein, durch die ein Bach fließt. Einzugsgebiete lassen sich daher beliebig fein in Teil-einzugsgebiete untergliedern, solange bis eine Wasserscheide erreicht ist (■ Abb. 2.1, links). Sie können, abhängig von der Lage des Bezugspunktes, wenige Quadratmeter bis viele tausend Quadratkilometer groß sein. Bei kleinräumiger Betrachtung von Wasserflüssen in der Landschaft müssen neben den natürlichen Wasserscheiden, die sich aus der Topographie bzw. den geologischen Eigenschaften des Untergrunds ergeben, auch alle die Landschaft zerschneidenden Elemente

■ Tab. 2.1 Übliche Wortverbindungen zur Beschreibung von Wasserhaushaltsgrößen und deren Bedeutung

Wortverbindung mit	Einheit	Erklärung
...summe	Menge, z. B. m ³ , l	„...fluss“ summiert über eine bestimmte Zeitspanne; wird oft synonym zu „...volumen“ verwendet
...fluss	Menge pro Zeit, z. B. l s ⁻¹ , m ³ s ⁻¹	Volumen je Zeiteinheit (Volumenstrom); Quotient aus „...summe“ und einer Zeit
...höhe	Längeneinheit, z. B. mm, cm	Quotient aus „...summe“ und einer Bezugsfläche (oft 1 m ²)
...spende	Menge pro Zeiteinheit und Fläche, z. B. l s ⁻¹ km ⁻²	Quotient aus „...fluss“ und der Fläche des betrachteten Gebiets
...stärke, ...intensität, ...rate	Höhe pro Zeit, z. B. mm min ⁻¹ , mm h ⁻¹ , cm d ⁻¹	Quotient aus „...höhe“ und der betrachteten Zeitspanne



■ **Abb. 2.1** Untergliederung des 46 km² großen Schwimmbacheinzugsgebietes bei Marklkofen in Niederbayern (links) anhand der topographischen Wasserscheiden in unterschiedliche feine Teileinzugsgebiete (verschieden starke rote Linien). Die blauen Linien kennzeichnen das Gewässernetz. Die rechte Tafel zeigt einen Landschaftsausschnitt bei Kirchdorf an der Amper mit unterschiedlicher topographischer (rote Linien) Wasserscheide und hydrogeologischem Einzugsgebiet (hellblaue Fläche) (Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung)

der Infrastruktur wie Wege und Straßen, Wälle oder Bahndämme berücksichtigt werden. Sie können zusätzliche, künstliche Wasserscheiden schaffen sowie die natürliche Einzugsgebietsabgrenzung und das Fließpfadmuster ändern.

Darüber hinaus wird zwischen dem oberirdischen bzw. topographischen Einzugsgebiet und dem unterirdischen bzw. hydrogeologischen Einzugsgebiet unterschieden. Beide stimmen in ihrer Größe und Lage nur selten überein (■ Abb. 2.1, rechts). Bei Starkregenereignissen ändert sich der Grundwasserabfluss meist nur langsam. Es kommt vor allem auf den Oberflächenabfluss an, der durch das topographische Einzugsgebiet bestimmt wird. Dies erleichtert die Festlegung des Einzugsgebietes stark, auch wenn es im Bereich der Mikrowasserscheiden, d. h. auf Feld- oder Hangskala, immer noch schwierig sein kann, weil bereits die durch die Bodenbearbeitung verursachte

Rauheit den Wasserfluss leiten kann. Wenn hier Unsicherheiten bestehen und die genaue Abgrenzung wichtig ist, muss eine Kartierung der Fließpfade erfolgen (vgl. ► Anhang 8.8). Auch der meist langandauernde Abfluss bei der Schneeschmelze bietet eine gute Gelegenheit, die Fließpfade zu beobachten. Allerdings können sich die Fließpfade und damit die Einzugsgebietsgrenzen auch während eines Abflussereignisses ändern, z. B. wenn ein zuvor abflussableitender Rain plötzlich bricht oder überflutet wird.

2.1.4 Begriffe, Definitionen, Synonyme und ihre Einheiten und Formelzeichen

Das Handbuch bedient sich vieler Fachbegriffe. Zur einfacheren Handhabung wurden die wichtigsten in ■ Tab. 2.2 glossarartig zusammengefasst.

Tab. 2.2 Beschreibung verwendeter Fachbegriffe, Formelzeichen und übliche Einheiten

Begriff	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung/Synonyme
Abflussbeiwert	ψ	–	Volumetrischer, meist ereignisspezifischer Quotient aus Direktabfluss- und Niederschlagssumme
Abflussganglinie	–	–	Siehe Ganglinie
Abflusskonzentration	–	–	Gesamtheit der Prozesse, die Abfluss bündeln und über laterale Fließpfade auf und unter der Landoberfläche aus der Fläche in die Gewässer ableiten
Abflusskurve	–	–	Siehe Ganglinie
Abflussminderung	–	–	Überbegriff für Maßnahmen, die zu einer Minderung des Abflusses eingesetzt werden können; Abflussminderung kann sowohl über den Rückhalt von Abflussvolumen als auch durch Verzögerung des Abflusses erreicht werden
Abflussrate	q	$l\ s^{-1}$, $m^3\ s^{-1}$	Wasservolumen eines Einzugsgebietes, das pro Zeiteinheit einen definierten Querschnitt passiert (Volumenstrom); Abfluss ist kaum direkt messbar und wird in der Regel indirekt über das Produkt aus Fließgeschwindigkeit und Querschnittsfläche ermittelt
Abflussscheitel	q_p	$l\ s^{-1}$, $m^3\ s^{-1}$	Höchster Abfluss einer Abflussschwell
Abflussspende	q_s	$l\ s^{-1}\ km^{-2}$, $mm\ h^{-1}$	Die Abflussspende ergibt sich, wenn die Abflussrate durch die Fläche des dazugehörigen Einzugsgebietes geteilt wird. Die Abflussspende quantifiziert den mittleren Abflussbeitrag einer Einheitsfläche (meist $1\ km^2$ oder bei gekürzten Einheiten $1\ m^2$). Je nach Einheitsfläche sind verschiedene Maßeinheiten gebräuchlich
Abflussverzögerung	–	–	Oberbegriff für die Wirkung von Maßnahmen, die den Abfluss entlang des Entwässerungsweges bremsen, z. B. durch Bewuchs in Wegseitengraben, der die hydraulische Rauheit erhöht
Abflussvolumen	Q	m^3	Wasservolumen eines Einzugsgebietes summiert über einen definierten Zeitraum
Abflusswirksamer Niederschlag	N_{eff}	mm	Anteil des Niederschlags, der nicht im Einzugsgebiet zurückgehalten wird und abfließt; Synonym zu Effektivniederschlag
Anfangsverlust	A_v	mm	Niederschlagsmenge, bis der erste (Oberflächen-)Abfluss einsetzt

(Fortsetzung)

Tab. 2.2 (Fortsetzung)			
Begriff	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung/Synonyme
Bemessung	–	–	Im Ingenieurwesen etablierter Begriff für das Festlegen von Größen, z. B. für den Ausbau eines Gewässers, für den Durchmesser eines Rohrs, für die Dimensionierung eines Rückhaltebeckens usw.
Dezentrale Hochwasserschutzmaßnahme	–	–	Oft kleine, unscheinbare Maßnahme zur Abflussminderung, die an vielzähligen Stellen im Einzugsgebiet und entlang des kompletten Entwässerungsweges umgesetzt werden kann; siehe auch Abflussminderung
Direktabfluss	q_b	$m^3 s^{-1}$	Summe aus Oberflächenabfluss und schnellem Zwischenabfluss; siehe Oberflächenabfluss
Drosselabfluss	q_o	$m^3 s^{-1}$	Durch ein Auslassorgan z. B. eine Lochblende oder einen Schieber an einem technischen Bauwerk begrenzte Abgabe.
Durchfluss	q	$m^3 s^{-1}$, $l s^{-1}$	Analog zum Abfluss, wenn die genaue Zuordnung des Einzugsgebietes unklar ist
Durchflusskoeffizient	C_o	–	Durchflusskoeffizient durch ein Drosselorgan, abhängig von der Geometrie der Drosselöffnung
Durchflussvolumen	Q	m^3	Siehe Abflussvolumen
Eintrittswahrscheinlichkeit	P_E	%	Wahrscheinlichkeit, mit der ein Ereignis definierter Größe erreicht oder überschritten wird. Die Eintrittswahrscheinlichkeit wird i. d. R. durch das mittlere Wiederkehrintervall quantifiziert und mit „einmal pro n Jahre“ oder als „n-jährliches“ Ereignis angegeben; siehe auch Wiederholungszeitspanne
Effektivniederschlag	N_{eff}	mm	Siehe abflusswirksamer Niederschlag
Einheitsganglinie	EGL	–	Standardisierte, dimensionslose Form der Abflusswelle, die durch einen Niederschlagsimpuls erzeugt wird; durch Dimensionierung, die die Einzugsgebiets- und Niederschlagsseigenschaften berücksichtigt, kann die zu erwartende, reale Abflussganglinie erzeugt werden
Einzugsgebiet	EZG	–	Durch (oberirdische und unterirdische) Wasserscheiden begrenzte Fläche, aus der ein Gewässer- oder Entwässerungssystem seinen Abfluss bezieht
Einzugsgebietsgröße	A_{EZG}	ha, km^2	Größe des oberirdischen Einzugsgebietes
Erdbeschleunigung	g	$m s^{-2}$	Naturkonstante $g = 9,81 m s^{-2}$
Filterstreifen	–	–	Siehe Grünstreifen

(Fortsetzung)

Tab. 2.2 (Fortsetzung)				
Begriff	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung/Synonyme	
Fließgeschwindigkeit	v	m s ⁻¹	(Durchschnittliche) Fließ- oder Strömungsgeschwindigkeit, mit der sich Abfluss entlang eines Fließpfades oder Gewässerabschnitts fortbewegt	
Fließgewässerlandschaft	–	–	Zusammenfassung von Fließgewässern mit vergleichbaren naturräumlichen und morphologischen Merkmalen (Geologie, Klima, Vegetation) zu Gewässerlandschaften [vgl. 9]	
Fließpfad	–	–	Abschnitt eines Entwässerungsweges, über den Oberflächenabfluss bei Starkregen von der Wasserscheide bis in ein Gewässer gelangt; Fließpfade können vielfältige Gestalt einnehmen und entsprechend des Abflusstyps z. B. in Schichtabflusstpfade, Rinnen und Rillen, Hangmulden, Gräben oder Gewässerteilstrecken unterschieden werden	
Flood-Routing	–	–	Siehe Routing	
Flusshochwasser	–	–	Siehe Flussüberschwemmung	
Flussüberschwemmung	–	–	Ereignis, bei dem vom Gewässer ausgehend das angrenzende Gebiet (Aue) durch große Abflüsse (hohes Flusswasser) überschwemmt wird	
Ganglinie	–	–	Zeitlich sortierte, meist graphisch dargestellte Werte einer Variablen wie Niederschlag oder Abfluss (z. B. Hochwasserwelle)	
Gebietsniederschlag	N	mm	Über eine definierte Fläche (meist ein Einzugsgebiet) gemittelte Niederschlagshöhe (im Gegensatz zum punktuellen Niederschlag an einem Regenmesser) eines festgelegten, oft variablen Zeitraums (z. B. ein Ereignis)	
GIS	–	–	Geographisches Informationssystem	
Grünstreifen	–	–	Meist Grasstreifen von geringer Breite (wenige Meter), die quer durchflossen werden und dazu dienen, die Sedimentkonzentration im Oberflächenabfluss unmittelbar vor einem schutzwürdigen Objekt zu senken; die Begriffe Gras-, Filter- oder Pufferstreifen werden hier synonym verwendet, obwohl sie in der Literatur teilweise unterschiedlich definiert werden	
Hochwasser	–	–	Überbegriff, der für Überschwemmungen aller Art und damit sowohl für Flussüberschwemmungen als auch für Sturzfluten verwendet wird; oberer Teil einer Abflussganglinie im Gegensatz zum mittleren Teil (Mittelwasser) und zum unteren Teil (Niedrigwasser) oder Basisabfluss	

(Fortsetzung)

■ Tab. 2.2 (Fortsetzung)

Begriff	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung/Synonyme
Hydrologische Boden- gruppe	HBG	–	Klassifikationsschema für Böden zur Abschätzung ihrer Abflussreaktion bei Regenereignissen. Die Einteilung der Böden erfolgt nach ihrer Korngrößenzusammensetzung und Gründigkeit in vier Klassen (A bis D), wobei Böden der Gruppe A bei Regen am wenigsten und Böden der Gruppe D am meisten Abfluss erwarten lassen
Jährlichkeit	T_n	1 a^{-1}	Siehe Wiederholungszeitspanne
Konzentrationszeit	t_c	min	Zeit, die Oberflächenabfluss benötigt, um von der Wasserscheide bis zu einem definierten Bezugspunkt, z. B. einem Hangfuß, einem Grabenabschnitt oder einer Ortschaft zu fließen
Landnutzung	–	–	Landnutzung wird synonym zu Flächennutzung verwendet und beschreibt die Art der Inanspruchnahme von Böden und Landflächen durch den Menschen; häufig verwendete Landnutzungsklassen sind Grünland, Wald, Acker, Wasser, Siedlungs- und Infrastrukturfleichen
Mulchsaat	–	–	Eine Zwischenfrucht steht über den Winter auf dem Feld (meist abgestorben) und die folgende Reihenkultur wird mit einer leichten Bodenbearbeitung (je nach Reihenkultur meist Ende März bis Ende April) gesät. Da das Pflügen Ende Oktober/Anfang November entfällt, verkürzt Mulchsaat die Periode, in der der Boden unbedeckt bleibt. Eine durchgehende Bodenruhe wird aber nicht erreicht. Hierfür ist eine Mulchdirektsaat erforderlich. Eine hydrologisch wirksame Mulchschicht sollte die Oberfläche wenigstens zu 30 % bedecken
Mulchdirektsaat	–	–	Einsaat der Hauptfrucht in eine über den Winter abgestorbene Zwischenfrucht oder Untersaat ohne eine vorherige Bodenbearbeitung; wenn die Pflanzenreste von der Vorfrucht stammen, entfällt auch die Bearbeitung unmittelbar nach der Vorfrucht. Dann spricht man von Minimalbodenbearbeitung oder no-till-Verfahren. Die Mulchschicht einer Mulchdirektsaat bedeckt die Oberfläche üblicherweise immer > 30 %
Niederschlag	–	–	Niederschlag wird hier synonym für Regen verwendet (umfasst aber eigentlich alle Arten von flüssigem oder eisförmigem Wasser, das sich auf dem Boden oder der Vegetation absetzt)
Niederschlagsganglinie	–	–	Siehe Ganglinie
Niederschlagshöhe	N	mm	Niederschlagsmenge in $l \text{ m}^2$ für einen definierten, aber meist variablen Zeitraum (z. B. ein Ereignis); durch Kürzen der Einheiten ergibt sich aus $l \text{ m}^{-2}$ eine Höhe in mm
Niederschlagsintensität		mm h^{-1}	Niederschlagshöhe pro Zeit, meist mm d^{-1} , mm h^{-1} oder mm min^{-1}

(Fortsetzung)

Tab. 2.2 (Fortsetzung)

Begriff	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung/Synonyme
Oberflächenabfluss	q_D	$m^3 s^{-1}$	Überbegriff für Wasser, das zeitweise auf der Landoberfläche oder außerhalb dauerhaft wasserführender Gewässer z. B. als Schichtabfluss oder als Abfluss in Rinnen, Rillen, Mulden oder Gräben auftritt. Oberflächenabfluss ergibt sich beispielsweise aus der Schneeschmelze oder dem Anteil des Niederschlags, der mit nur kurzer zeitlicher Verzögerung nach einem Regen abfließt. Oberflächenabfluss wird hier synonym zu Effektivniederschlag und Direktabfluss verwendet und enthält üblicherweise auch (exfiltrierenden) Zwischenabfluss Außerhalb bebauter oder befestigter Flächen bezeichnet das Wasserhaushaltsgesetz Oberflächenabfluss aktuell als wild abfließendes Wasser (§ 3 und 37 WHG). Innerhalb bebauter oder befestigter Flächen wird Oberflächenabfluss rechtlich als Niederschlagswasser bzw. Abwasser betrachtet (vgl. § 54 WHG). In diesem Handbuch wird einheitlich der Begriff Oberflächenabfluss verwendet
Oberflächenrouting	–	–	Siehe Routing
Pufferstreifen	–	–	Siehe Grünstreifen
Rauigkeit	k	$m^{1/3} s^{-1}$	Siehe Rauheit
Rauheit	k	$m^{1/3} s^{-1}$	Rauheit beeinflusst den Abflusswiderstand und wird hier synonym für den Beiwert der Gauckler-Manning-Strickler-Gleichung verwendet; dieser entspricht dem in der englischsprachigen Literatur verwendeten Kehwert des Manning-Beiwerts n
Routing	–	–	Überbegriff für Verfahren, die die Verlagerung (Translation) und/oder den Rückhalt (Retention) von Abfluss entlang der Fließstrecke berechnen (beispielsweise Auseinander- und Zusammenfließen von Oberflächenabfluss auf der Landoberfläche oder der Ablauf einer Hochwasserwelle in einem Gewässer und der angrenzenden Aue)
Starkregen	–	–	Regen mit großer Niederschlagsmenge pro Zeiteinheit; der Deutsche Wetterdienst unterscheidet beispielsweise Starkregen, heftigen Starkregen und extrem heftigen Starkregen durch Niederschlagsmengen von 15–25, 25–40 und >40 mm h^{-1} bzw. 20–35, 35–60 und >60 mm in 6 h. Diese Kategorien erlauben allerdings keine Rückschlüsse auf die regionale Häufigkeit eines solchen Regens, weshalb zahlreiche weitere (oft länderspezifische) Definitionen für Starkregen existieren
Sturzflut	–	–	Plötzlich und meist mit großer Wucht auftretender Abfluss, der sich zu Sturzbächen sammelt, die „von oben, aus der Fläche kommend“ in Richtung tiefer gelegener Bereiche und Gewässer strömen; Folge von meist kurzen, besonders heftigen und lokal begrenzten

(Fortsetzung)

Tab. 2.2 (Fortsetzung)

Begriff	Formelzeichen	Einheit	Beschreibung/Synonyme
Teileinzugsgebiet	TEZG	–	Durch Wasserscheiden abgegrenztes Teilgebiet eines größeren Einzugsgebietes
Untersaat	–	–	(Meist temporäre) Einsaat niedrigwüchsiger Pflanzenarten unter eine Hauptfrucht, die mit dieser nicht in Konkurrenz stehen. Untersaaten können zum Schutz des Bodens bei weitem Reihenabstand dienen und nach der Ernte der Hauptfrucht umgebrochen werden (z. B. Wintergetreideuntersaat nach der Saat von Mais), sie können aber auch zu Etablierung der Folgekultur ohne zeitliche Lücke dienen und beginnen dann nach der Ernte der Hauptfrucht stark zu wachsen (z. B. Untersaat von Klee bei Getreide; besonders im organischen Landbau häufig praktiziert)
Wasserrückhalt	–	mm	Summe des Niederschlags, der nicht unmittelbar (als Direktabfluss) abfließt; Differenz aus Gesamtniederschlag und Effektivniederschlag; Wasserrückhalt kann durch Maßnahmen des dezentralen Hochwasserschutzes gefördert werden
Wassersäulenhöhe	h_o	m	Höhe der Wassersäule über der Drosselblende eines Rückhaltebeckens
Weillenscheitel	q_p	$l s^{-1}$	Siehe Abflussscheitel
Wiederholungszeitspanne	T_n	a	Durchschnittliche Zeitspanne in Jahren, in dem ein Starkniederschlag oder Hochwasserereignis, dessen Jährlichkeit der Wiederkehrzeit entspricht, statistisch genau einmal auftritt; siehe auch Eintrittswahrscheinlichkeit
Wild abfließendes Wasser	–	–	Siehe Oberflächenabfluss
Wiederkehrintervall	–	–	Siehe Wiederholungszeitspanne
Zwischenfrucht	–	–	Nach der Ernte einer Hauptfrucht zur Bodenbegrünung angebaute, schnell keimende Kultur, die normalerweise nicht genutzt wird und die nur die Lücke zwischen den Kulturen bis zum Anbau der nächsten Hauptfrucht verkleinern soll

2.2 Starkregen – Auslöser für unterschiedliche Hochwasserarten

2

Hochwasser heißt zunächst nur, dass die Wasserführung in einem Gewässer – vom zeitweise wasserführenden Graben bis zum Strom – gegenüber dem mittleren Abfluss, der auch null sein kann, erhöht ist. Hier werden speziell die Hochwässer behandelt, die so groß sind, dass sie zu Überflutungen führen, weil die Kapazität der Hauptabflussrinne überschritten wird. Auch dann ist Hochwasser nicht gleich Hochwasser. Sturzfluten und Flusshochwasser laufen unterschiedlich ab und lassen sich dadurch auch auf verschiedene Art und Weise beeinflussen. Um das Ausmaß einer Überflutung zu mindern, ist es daher wichtig zu wissen, wie ein Ereignis ausgelöst wird, wie Abfluss entsteht und wie er sich sammelt, überlagert und abfließt.

Auslöser einer Überflutung ist immer eine große Niederschlagsmenge. Dabei muss im Wesentlichen zwischen wolkenbruchartigen Schauern hoher Intensität und langanhaltenden, großflächigen Niederschlägen, sogenannten Landregen (bzw. einer Schneeschmelze), relativ geringer Intensität unterschieden werden (■ Tab. 2.3). Auch wenn dies keine eindeutige Trennung ist, sondern Übergänge ebenso auftreten können, ist die Unterscheidung der beiden Niederschlags-

typen wichtig, weil der Niederschlagstyp bestimmt, wie Abfluss entsteht und ob eine Sturzflut oder eine (Fluss-) Überschwemmung folgt. Ebenso unterscheiden sich auch die Maßnahmen zur Abflussminderung.

Ein gemeinsames Merkmal großer Niederschlagsereignisse ist, dass sie selten, aber natürlich sind. In der wissenschaftlichen Literatur herrscht weitgehend Einigkeit darüber, dass im Zuge des Klimawandels von einer weiteren Zunahme und Verschärfung extremer Wetterlagen auszugehen ist [10–13]. Bis 2050 ist mit etwa einer Verdopplung extremer Niederschläge gegenüber 2015 zu rechnen. Starkregen und in Folge Überflutungen sind daher nirgendwo vermeidbar. Es gilt: Nach der (Sturz-)Flut ist vor der (Sturz-)Flut oder anders gesagt, das Auftreten einer Überschwemmung ist immer nur eine Frage der Zeit. Dies gilt grundsätzlich auch dann, wenn Schutzmaßnahmen (Dämme, Retentionsbecken) ergriffen wurden. Schutzmaßnahmen vergrößern nur das Wiederkehrintervall von Überschwemmungen, können sie aber nicht vollständig verhindern [14]. Schutzmaßnahmen können daher auch grundsätzlich nicht versagen, sondern nur die in sie gestellten Erwartungen können falsch sein.

Ein wesentlicher Unterschied zwischen Starkregen, die Sturzfluten bzw. Flussüberschwemmungen verursachen, ist deren räum-

■ Tab. 2.3 Übersicht über Niederschlagshöhe, Ereignisdauer und mittlere Ereignisintensität von Sturzfluten (S) und Bach- bzw. Flussüberschwemmungen (F) in Bayern [15–18]

Hochwasser-typ	Datum	Ort/Gebietsgröße	Niederschlagshöhe (mm)	Ereignisdauer (h)	Mittlere Intensität (mm h ⁻¹)
F	Mai 1999	Südbayern	40–280	72	0.5–4.2
F	August 2005	Südbayern	60–216	84	0.8–2.6
F	August 2002	Südostbayern	140	72	2
S/F	01.06.2016	Simbach/Inn	167	40	4.2–22
S	25./26.06.2016	Bayerischer Wald	65	3	22
S	29./30.05.2016	Oberzenn	91	1	91

liche Ausdehnung. Flussüberschwemmungen sind die Folge großer Tiefdruckkomplexe oder langsam vordringender Fronten, die große Einzugsgebiete (wenige bis viele tausend km²) überregnen und meist an das Auftreten typischer Großwetterlagen gekoppelt sind (z. B. Vb oder Tief Mitteleuropa) [19–21]. Daher treten solche Regen selten überraschend auf. Typische Vorwarnzeiten liegen in der Größenordnung von vielen Stunden bis hin zu wenigen Tagen. Neben ihrer großen Ausdehnung verfügen sie auch über ein typisches räumliches Muster, da Niederschlagsschwerpunkte üblicherweise an die Orographie gekoppelt sind. Demgegenüber entstehen Wolkenbrüche, die Sturzfluten auslösen, durch die rasche Hebung feucht-warmer Luftmassen (Konvektion). Einzelne Gewitterzellen sind immer klein, mit einem Radius von typischerweise unter 5 km [22–24]. Erst durch ihre Zugbahn und die Überlagerung mehrerer Zellen zu Multi- oder Superzellen können größere Gebiete betroffen sein. Durch die geringe Ausdehnung setzt der Niederschlag oft unerwartet und plötzlich ein. Typische Vorwarnzeiten vor Wolkenbrüchen liegen in der Größenordnung von mehreren Minuten bis hin zu wenigen Stunden. Ein weiteres Kennzeichen von wolkenbruchartigen Starkregen ist, dass sie kein typisches räumliches Muster aufweisen. Solche Starkregen und in Folge Sturzfluten können also nicht nur plötzlich, sondern auch überall und unabhängig von der Topographie auftreten. Das wird anhand der Extremwertauswertung radarbasierter Niederschlagsmessungen aus dem Zeitraum von 2001 bis 2018 in [Abb. 2.2](#) deutlich [25, 26]. Die räumliche Vorhersagegenauigkeit beschränkt sich daher bisher auf die Angabe einer Region oder die Ebene von Landkreisen.

Starke, lang andauernde Landregen werden meist als ausgesprochen nasse, aber nur selten als bedrohliche Ereignisse wahrgenommen. Sie können dazu führen, dass Gräben und kleine Gewässer deutlich erhöhte

Abflüsse führen. Auch das Auftreten von Oberflächenabfluss ist möglich. Kritische Abflüsse und größere Überschwemmungen durch Ausuferungen von Gewässern treten aber in der Regel im überwiegenden Teil eines Einzugsgebietes nicht auf. Erst in tief gelegenen Bereichen des Einzugsgebietes werden die Kapazitäten der bestehenden Abflussbahnen überschritten Bach- oder, denn Flussüberschwemmung entstehen durch die Bündelung und Überlagerung von Abfluss aus dem gesamten Einzugsgebiet. Die Aue wird vom Gewässer ausgehend überschwemmt ([Abb. 2.3](#)). Sind Auen vom Gewässer entkoppelt, besteht die Gefahr, dass Dämme oder Deiche brechen. Das gilt vor allem für große Flusssysteme, wo sich der Wellenablauf über viele Tage erstrecken kann, da das Risiko einer Durchweichung des Dammkörpers mit der Dauer des Einstaus steigt.

Sturzfluten (Englisch: flash floods=blitzartige Überflutung) entstehen dagegen durch einen heftigen und wegen der hohen Intensität oft auch als bedrohlich empfundenen Starkregen. Wesentlich ist, dass die Intensität solcher Regen zeitweise größer als die Infiltrationsrate des Bodens ist. Dadurch bildet sich im Bereich der Starkregenzelle schnell und flächig Oberflächenabfluss. Das gilt insbesondere bei hohem Versiegelungsgrad oder wenn die Bodenoberfläche nicht oder nur spärlich bedeckt ist, wie im Mai und Juni, wenn die Pflanzendecke nach einer Frühjahrssaat noch wenig ausgebildet ist. Dann verschlämmt die Bodenoberfläche und wird nahezu wasserundurchlässig ([Abb. 2.4](#)). Entsteht Oberflächenabfluss, folgt er noch in der Fläche dem größten Gefälle und fließt auf dem Landweg über Rinnen und Rillen, Hangmulden und Gräben bis in Vorfluter, Bäche und größere Gewässer. Bei entsprechend hoher Niederschlagsrate und insbesondere bei steilem Relief „stürzt“ das Wasser dabei regelrecht aus der Fläche. Der Abfluss in Tiefenlinien, Sammelgerinnen und Vor-

**Extremwert-Auswertung Statistischer Niederschlag in Deutschland
D=1h T=20a (RADARKLIMATOLOGIE, 2001-2018)
V2017.002**

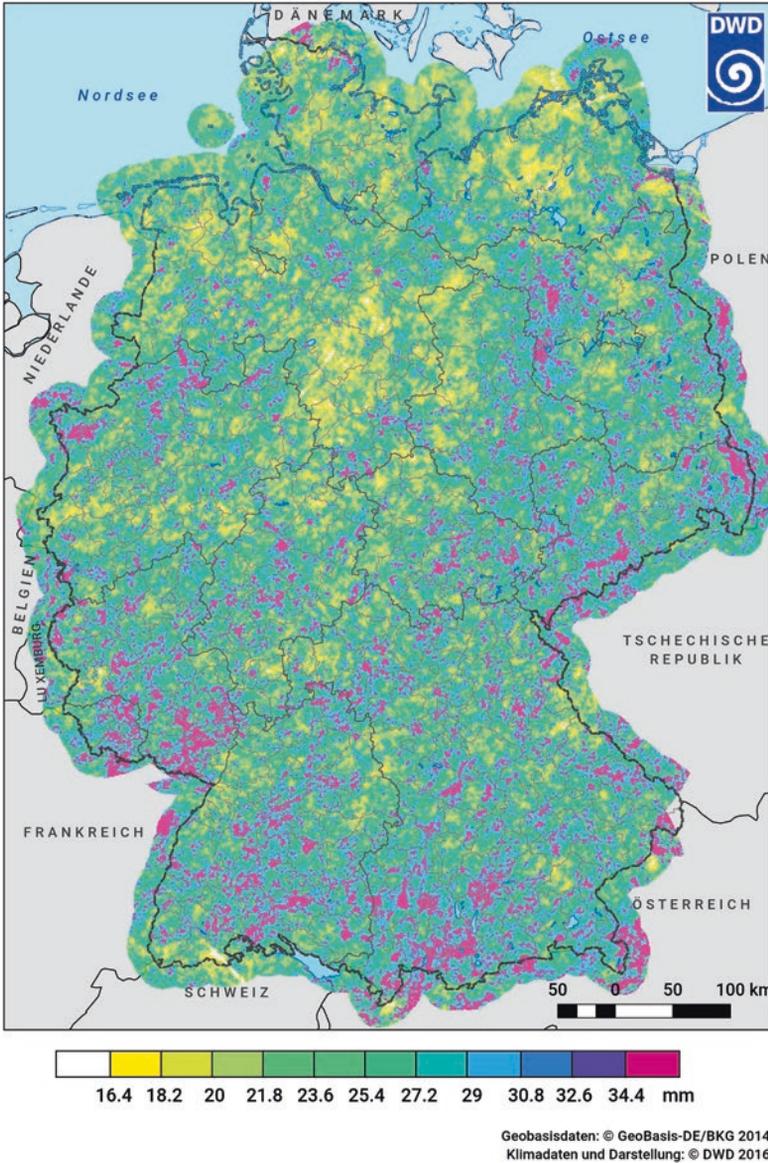
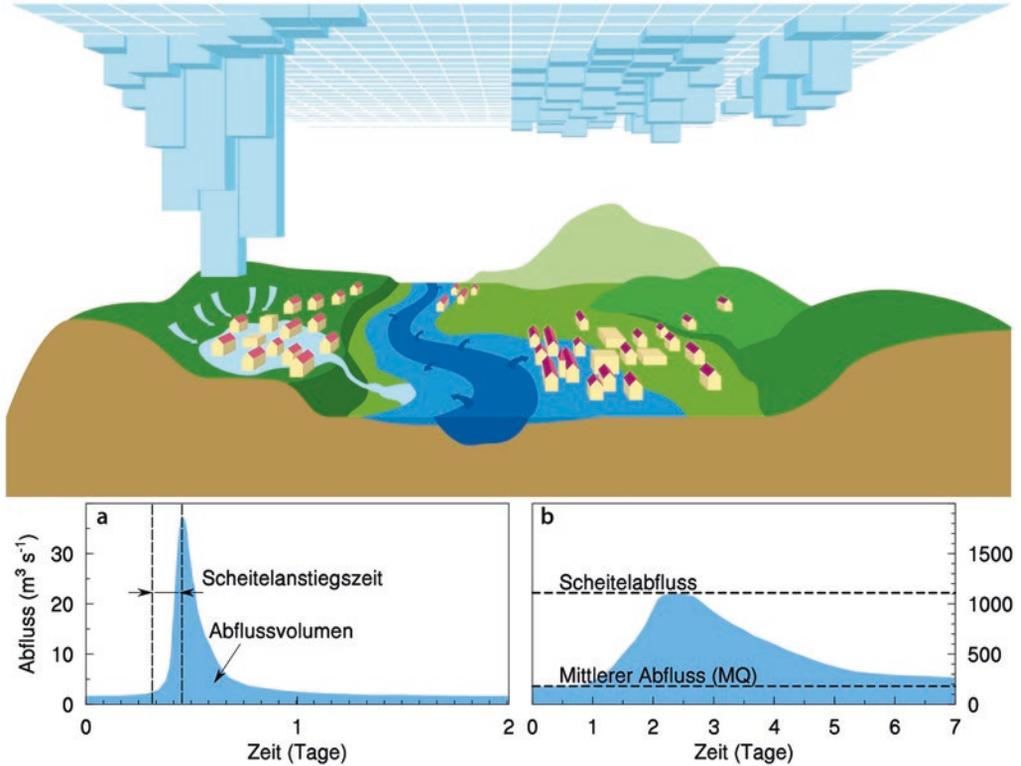


Abb. 2.2 Niederschlagsmenge 20-jährlicher, einstündiger Niederschläge in Deutschland basierend auf Daten der Radarklimatologie. (Quelle: Deutscher Wetterdienst, 2019)

flutern kann binnen kurzer Zeit stark ansteigen (Abb. 2.3, linke untere Tafel). Im Gegensatz zu Fluss- oder Bachüberschwemmungen erwächst das große Schadenspotenzial bei diesen Ereignissen wegen ihrer kleinen räum-

lichen Ausdehnung nicht durch den Einstau gewässernaher Bereiche, sondern vor allem aus der Zerstörung von Infrastruktur und Siedlungsbereichen, die sich in oder entlang von Abflusspfaden befinden. Ein erheb-



■ **Abb. 2.3** Schematische Gegenüberstellung der unterschiedlichen Gefährdungslagen durch Überflutungen infolge von Starkregen (a) und durch Ausuferung von Gewässern (b) [obere Grafik: 27]



■ **Abb. 2.4** Zunehmende Verschlammung einer ungeschützten Bodenoberfläche nach 1 mm, 30 mm, 40 mm und 70 mm Niederschlag (von links nach rechts). (Foto: K. Auerswald)

liches Risiko geht dabei vor allem von der hohen Fließgeschwindigkeit des Wassers aus. Letztere verleiht dem Abfluss zum einen Überraschungspotenzial und zum andern eine

enorme Schleppekraft. Bereits ab wenigen Dezimetern Wasserstand vermag der Abfluss nicht nur beachtliche Schlammfrachten, sondern auch schweres Geröll, Bäume, Strohballen und (ab etwa 50 cm) auch schwere und voluminöse Gegenstände wie größere Geländewagen mitzureißen. Engstellen wie Brücken, Stege, Zäune, Verrohrungen oder Rechen können sich dann zu besonderen Gefahrenpunkten entwickeln, wenn dort Verklausungen auftreten und der Fließquerschnitt durch angeschwemmtes Treibgut verengt wird. Sturzfluten verursachen daher häufig katastrophale Schäden. Ihre Kraft und ihr, im Vergleich zu Flussüberschwemmungen blitzartiges Auftreten, birgt oft nicht nur große Gefahren für Hab und Gut, sondern auch für Leib und Leben.

2.3 Ansätze und Wirkung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen

Dezentrale Maßnahmen zum Hochwasserschutz sind oft kleine, unscheinbare Maßnahmen, die an einer Vielzahl von Stellen im Einzugsgebiet, oft abseits von Gewässern in der Fläche oder entlang der kompletten Entwässerungswege umgesetzt werden können. Ihre wesentliche Stärke liegt darin, Abfluss am oder nahe des Ortes der Abflusststehung zurückzuhalten oder zu bremsen. Sie schützen bei lokalen Ereignissen ganzheitlich und vermindern, bei konsequenter Umsetzung, hohe Abflüsse und die Verlagerung von Nährstoffen, Pflanzenschutzmitteln und Bodenmaterial. Größere, zentrale Hochwasserschutzmaßnahmen sind in dieser Hinsicht wirkungslos, da sie üblicherweise erst in den Mittel- und Unterläufen von Gewässern vorhanden sind und sich ihre Wirkung zwangsläufig auf den Bereich unterhalb der Maßnahme beschränkt.

Dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen sind Gegenstand vieler Publikationen [z. B. 28–34] und umfassen ein weites Spektrum. Zu ihnen gehören die Förderung der Versickerung auf landwirtschaftlichen Flächen (z. B. durch hohe und kontinuierliche Bodenbedeckung, nicht-wendende Bodenbearbeitung oder die Umwandlung von Acker in Grünland), der Rückhalt von Abfluss in kleinen Speichern und Rückhalteräumen (z. B. Muldenspeicher und Kleinstrückhaltebecken) sowie zahlreiche strukturelle Maßnahmen (z. B. kleinteilige und höhenlinienparallele Flurgliederung, wasserlenkende Strukturen, abflussbremsende Entwässerungswege wie begrünte Abflussmulden und verkrautete, flach gemuldete Wegseitengräben, Vermeidung von Verrohrungen, Versickerungen, z. B. zur Entwässerung von Wegen). Darüber hinaus tragen auch Maßnahmen der Gewässerentwicklung (Verbreiterung des Abflussquerschnitts, Laufverlängerung, Förderung von Ausuferungsmöglichkeiten und Wiederherstellung

natürlicher Retentionsflächen) zur Abflussminderung bei, ebenso wie, die Erhöhung der hochwasserschützenden Wirkung von Wäldern (z. B. durch standortgerechte, stufig aufgebaute und gut strukturierte Mischwälder, kleinflächige Verjüngungsmaßnahmen, die Förderung und Sicherung von Auwäldern) sowie als wichtigste Maßnahme die Beschränkung des Wegebbaus und der Verzicht auf Wege und Gräben, die tiefe Hangeinschnitte erfordern. Für den dezentralen Hochwasserschutz ergeben sich daher nicht nur zahlreiche Ansatzpunkte, die an sehr unterschiedlichen Stellen im Einzugsgebiet und entlang der Entwässerungswege umgesetzt werden können, sie betreffen auch zahlreiche unterschiedliche Akteure (■ Abb. 2.5).

Die bei Weitem wichtigste Maßnahme des dezentralen Hochwasserschutzes ist es aber, auf Maßnahmen zu verzichten, die den Abfluss erhöhen und beschleunigen. Dazu zählen vor allem;

- Versiegelungen (Überbauung, Pflasterung),
- Verrohrungen und Gräben wie Wegseitengräben oder Drainagegräben,
- Hangeinschnitte, besonders im steilen Gelände (Waldbau),
- Verlust an landschaftlicher Vielfalt (Flächengliederung, Strukturelemente, Landnutzungen).

Im Grunde sollte jede dieser abflussfördernden Maßnahmen, wenn sie nicht vermieden werden kann, durch zusätzliche abflussmindernde Maßnahmen aus der oben genannten Liste ausgeglichen werden. Diese Zusammenhänge und die Vielzahl potenzieller Ansatzpunkte verdeutlichen, dass dezentrale Maßnahmen zur Abflussminderung nicht einer einzigen Akteursgruppe zugeordnet werden können, sondern dass vorbeugender Schutz vor Hochwasser als gesamtgesellschaftliche Aufgabe verstanden werden muss. Dies ergibt sich zwangsläufig daraus, dass beispielsweise die Landwirtschaft nicht Aufgaben aus dem Zuständigkeitsbereich der Kommunen



■ **Abb. 2.5** Übersicht typischer Ansätze zum Wasserrückhalt und zum Bremsen des Abflusses in der Flur (weiße Beschriftung) und Akteure (schwarze Beschriftung), deren Beitrag für eine Umsetzung der Maßnahmen unerlässlich ist (Bildquellen von A: W. Bauer (Agroluftbild), B: ► www.boden-staendig.eu, C: [35], D: Illertaler (Wikipedia), E: K. Schneider (USDA Natural Resources Conservation Service), F: [36])

und die Wasserwirtschaft nicht die Aufgaben der Ländlichen Entwicklung übernehmen kann oder umgekehrt.

Dezentrale Maßnahmen unterscheiden sich wesentlich von den klassischen (zentralen) Hochwasserschutzmaßnahmen, die vor allem punktuell auf eine rasche Ableitung oder eine Eindämmung des Gewässers (z. B. durch Deiche) abzielen. Rasche Ableitung und Eindämmung verbessern zwar die Abflusssituation am beabsichtigten Punkt, auf dem weiteren Fließweg steigt dadurch jedoch grundsätzlich die Hochwassergefahr. Zudem kann keine dieser Maßnahmen, nicht einmal Rückhaltespeicher, die aufgrund der hohen Kosten zudem selten gebaut werden, einen Beitrag zum Wasser- und Stoffrückhalt in dem oberhalb der Anlage liegenden Einzugsgebiet leisten. Dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen gehen den entgegengesetzten Weg und versuchen, das Abfließen von Überschusswasser zu verzögern und im Verbund eine große Fläche unterhalb zu schützen. Durch den Klimawandel ist zu erwarten, dass Starkregen zunehmen

und dass ebenfalls lange Wassermangelperioden dazwischen auftreten. Dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen sind auch unter dem Aspekt des Wassermangels die richtige Antwort, weil sie die negativen Wirkungen der Trockenphasen mindern können. Das rasche Ableiten von Überschusswasser verstärkt die Trockenheit dagegen noch weiter.

Zur Wirkung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen liegen inzwischen viele Erfahrungen vor (siehe ■ Tab. 8.1 im Anhang). Sie bestätigen, dass dezentrale Maßnahmen einen deutlichen und positiven Effekt zur Hochwasser- und Sturzflutvorsorge in kleinen Einzugsgebieten (<50 km²) leisten können. Insbesondere in Gebieten <10 km² kann oft ein Schutz vor 20- bis 30-jährlichen Abflussereignissen erreicht werden. In einzelnen Fällen vermochten dezentrale Maßnahmen sogar, den Scheitel eines HQ100-Ereignisses um bis zu 50 % zu reduzieren. Allgemein gilt, dass dezentrale Maßnahmen eher klein sind und ihre Wirkung auf die Abflüsse direkt unterhalb der Maßnahme beschränkt

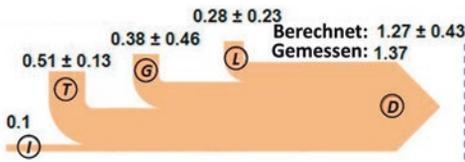
ist. Fließt im weiteren Verlauf weiteres Wasser zu, können sie auf das zusätzliche Wasser keine große Wirkung mehr haben, auch wenn die ursprüngliche Wirkung trotzdem erhalten bleibt. Dies bedeutet, dass viele Maßnahmen im kompletten Einzugsgebiet umgesetzt und kombiniert werden müssen. Durch die Verbundwirkung werden dann aber selbst die Abflüsse größerer Einzugsgebiete beeinflusst.

Die in [Tab. 8.1](#) aufgeführten Studien und Projekte zielen überwiegend auf den dezentralen Rückhalt von Abflussvolumen. Entsprechend werden Rückhaltebecken als effektivste Maßnahme zur Abflussminderung beschrieben [28]. Untersuchungen zur Wirkung abflussverzögernder Maßnahmen erfolgten in der Praxis dagegen bisher nur exemplarisch für wenige Einzelmaßnahmen, z. B. begrünte Abflussmulden [37]. Das liegt daran, dass solche Versuche aufwendig sind, insbesondere, wenn viele dieser Maßnahmen auf Landschaftsebene umgesetzt werden sollen, wodurch Messdaten per se rar sind. Hinzu kommt, dass auch die Abbildung des Oberflächenabflusses bei Starkregen in der Fläche mit hydrodynamischen Modellen in der Vergangenheit nur sehr selten untersucht wurde und hydrologische Modelle das Fließen entlang der Oberfläche (Oberflächenrouting) nicht adäquat abbilden können. Infolge können sowohl viele Einzelansätze als auch deren Verbundwirkung auf Landschaftsebene bislang häufig nicht angemessen beurteilt werden. Aus diesen Gründen wird ihre Bedeutung vermutlich stark unterschätzt. Zu diesem Ergebnis kommt auch eine Metastudie, die die Effektivität von Maßnahmen zum Wasser- und Stoffrückhalt von 101 Studien aus Europa verglichen hat [38]. Dort wird gezeigt, dass der Fokus vielfach auf landwirtschaftlichen Maßnahmen der Bodenbearbeitung liegt, z. B. nichtwendende oder höhenlinienparallele Bodenbearbeitung, obwohl diese wenig effektiv sind. Effektiver wären Maßnahmen zur Boden- und Vegetationsbedeckung und zur Veränderung der Gebietsstruktur, wie die

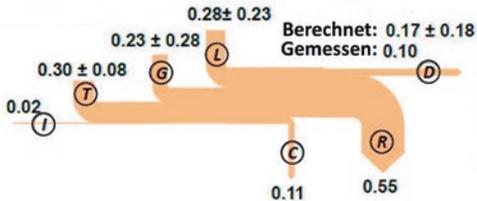
Anlage von Terrassen, die gleichermaßen auf Volumenrückhalt und Abflussverzögerung wirken. Solche Versuche sind aber wesentlich schwieriger umzusetzen als beispielsweise ein Beregnungs- oder Bodenbearbeitungsversuch. Daher mangelt es gerade bei den vermutlich effektivsten Maßnahmen in unseren Breiten gravierend an Erfahrung.

Obwohl bis heute in Deutschland in keinem größeren Gebiet (50–100 km²) flächendeckend dezentrale Hochwasserschutzmaßnahmen konsequent umgesetzt wurden, wird häufig angenommen, dass ihre Wirkung zur Abflussminderung mit zunehmender Gebietsgröße abnimmt [28]. Diese Annahme entbehrt einer fachlichen Grundlage, da Feldstudien, bei denen in größeren Gebieten konsequent Maßnahmen zur Abflussminderung in der Fläche umgesetzt wurden, fehlen und die Effekte vieler Maßnahmen in Simulationsstudien nicht explizit berücksichtigt werden [8]. Tatsächlich zeigen Erfahrungen aus China das Gegenteil. Dort werden dezentrale Maßnahmen zum Wasser- und Stoffrückhalt seit den 1950er-Jahren auf politische Anordnung hin großflächig im Lössplateau umgesetzt [39]. In der bisher besten und umfassendsten Studie dazu belegen Messwerte, dass die Sedimentfracht im zweitgrößten Fluss Chinas, dem Gelben Fluss (Huang He), gegenüber früher durch dezentrale Maßnahmen stark reduziert werden konnte. Dazu wurden großflächig Terrassen angelegt und viele kleine (durchströmbare) Querbauwerke (engl. „check dams“) entlang von Entwässerungswegen und kleinen seitlichen Bächen und Zuflüssen geschaffen. Dadurch hat die Sedimentmobilisation deutlich (um 30 %) abgenommen und eine Wiederablagerung (um 10 %) innerhalb der Teileinzugsgebiete konnte erreicht werden ([Abb. 2.6](#)) [40]. Die Sedimentation konnte dadurch in den zur Wassernutzung angelegten großen Staudämmen wesentlich vermindert und deren Wert erhalten werden. Das ist aus zwei Gründen besonders beachtlich: Zum einen wurden bislang nur 39 %

Sedimentflüsse um 1950 (Gt a^{-1})



Sedimentflüsse 2005 (Gt a^{-1})



- (I) Sedimentzufluss im Gelben Fluss am Pegel Lanzhou
- (T) Oberbodenabtrag und Einfluss von Terrassen
- (G) Grabenerosion und Einfluss kleiner Querbauwerke
- (L) Muren und Hangrutschungen
- (C) Ablagerung an kleinen Querbauwerken (check dams)
- (R) Ablagerung in Staudämmen
- (D) Sedimentexport im Gelben Fluss am Pegel Huayuankou
- (S) Sedimenteintrag in den Golf von Bohai

Abb. 2.6 Sedimentbilanzen für das chinesische Lössplateau mit einer Fläche von ca. 500.000 km^2 am Gelben Fluss in China zwischen den Pegeln Lanzhou und Huayuankou für 1950 (oben) und 2005 (unten) nach Anlage von Terrassen auf 39 % der Fläche, der Anlage von Querbauwerken in Rinnen („check dams“) und der Anlage von zwei großen Stauseen [Daten aus 40]

der Fläche terrassiert und auch die Querbauwerke wurden bei Weitem nicht an allen Stellen angelegt, wo dies möglich wäre. Zum zweiten umfasst das chinesische Lössplateau eine Fläche von rund 500.000 km^2 und ist damit wesentlich größer als Deutschland. Dezentrale Maßnahmen sind daher selbst auf größter Skala ebenso effizient wie auf kleiner, sofern sie denn flächendeckend und konsequent etabliert werden. Auch wenn die Wirkung der Maßnahmen auf den Abfluss nicht 1:1 übernommen werden kann, so lässt sich doch die Größenordnung der potenziellen Wirkung kleiner Maßnahmen erahnen. Aus Parzellenversuchen ist beispielsweise bekannt, dass Maßnahmen zum Wasser- und Stoffrückhalt den Bodenabtrag um rund 70 % und den Abflussbeiwert um etwa 50 % reduzieren können [41]. Da zusätzlich zur Senkung des Abflussbeiwertes auch noch die Abflussverzögerung hinzukommt, dürfte die Wirkung auf die Hochwasserwelle mindestens so hoch sein wie auf den Stoffrückhalt. Es liegt daher die Vermutung nahe, dass es nur an der fehlenden Umsetzung und nicht an der

fehlenden Effizienz liegt, warum verbreitet davon ausgegangen wird, dass dezentrale Maßnahmen in größeren Einzugsgebieten keine Wirkung haben.

Literatur

1. Wohlrab B, Ernstberger H, Meuser A (1992) Landschaftswasserhaushalt. Paul Parey, Hamburg
2. Dyck S, Peschke G (1995) Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin
3. Patt H, Jüpner R (2013) Hochwasser-Handbuch Auswirkungen und Schutz. Springer, Berlin
4. Maniak U (2016) Hydrologie und Wasserwirtschaft. Springer, Berlin
5. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2003a) Hydraulik naturnaher Fließgewässer. 1: Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren. Karlsruhe
6. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2003b) Hydraulik naturnaher Fließgewässer. 2: Neue Berechnungsverfahren für naturnahe Gewässerstrukturen. Karlsruhe
7. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2003c) Hydraulik naturnaher Fließgewässer. 3: Rauheits- und Widerstandsbeiwerte für Fließgewässer in Baden-Württemberg. Karlsruhe

8. Fiener P, Auerswald K, Van Oost K (2011) Spatio-temporal patterns in land use and management affecting surface runoff response of agricultural catchments – a review. *Earth-Science Rev* 106:92–104. ► <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.004>
9. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2002) Fließgewässerlandschaften in Bayern. München
10. Willner SN, Levermann A, Zhao F, Frieler K (2018) Adaptation required to preserve future high-end river flood risk at present levels. *Sci Adv* 4:1–9. ► <https://doi.org/10.1126/sciadv.aao1914>
11. Kunz M, Sander J, Kottmeier C (2009) Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. *Int J Climatol* 29:2283–2297. ► <https://doi.org/10.1002/joc.1865>
12. Feldmann H, Schädler G, Panitz HJ, Kottmeier C (2013) Near future changes of extreme precipitation over complex terrain in Central Europe derived from high resolution RCM ensemble simulations. *Int J Climatol* 33:1964–1977. ► <https://doi.org/10.1002/joc.3564>
13. Auerswald K, Fischer FK, Winterrath T, Brandhuber R (2019) Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data. *Hydrol Earth Syst Sci* 23:1819–1832. ► <https://doi.org/10.5194/hess-23-1819-2019>
14. Di Baldassarre G, Kreibich H, Vorogushyn S et al (2018) Hess Opinions: An interdisciplinary research agenda to explore the unintended consequences of structural flood protection. *Hydrol Earth Syst Sci* 22:5629–5637. ► <https://doi.org/10.5194/hess-22-5629-2018>
15. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2002) Hochwasser im August 2002. München
16. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2003) Hochwasser Mai 1999 – Gewässerkundliche Beschreibung. München
17. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft (2007) Gewässerkundlicher Bericht Hochwasser August 2005. München
18. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2017) Sturzfluten- und Hochwasserereignisse Mai/Juni 2016 – Wasserwirtschaftlicher Bericht. *UmweltSpezial*. Augsburg
19. Stahl N, Hofstätter M (2018) Vb-Zugbahnen und deren Auftreten als Serie mit Bezug zu den resultierenden Hochwassern in Bayern mit Auswirkungen auf Rückhalteräume im Isareinzugsgebiet. *Hydrol Wasserbewirt* 62:77–97. ► <https://doi.org/10.5675/HyWa>
20. Hofstätter M, Chimani B (2012) Van Bebber's cyclone tracks at 700 hPa in the Eastern Alps for 1961–2002 and their comparison to circulation type classifications. *Meteorol Z* 21:459–473
21. Hofstätter M, Lexer A, Homann M, Blöschl G (2018) Large-scale heavy precipitation over central Europe and the role of atmospheric cyclone track types. *Int J Climatol* 38:e497–e517. ► <https://doi.org/10.1002/joc.5386>
22. Lochbihler K, Lenderink G, Siebesma AP (2017) The spatial extent of rainfall events and its relation to precipitation scaling. *Geophys Res Lett* 44:8629–8636. ► <https://doi.org/10.1002/2017GL074857>
23. Fischer FK, Winterrath T, Auerswald K (2018) Temporal- and spatial-scale and positional effects on rain erosivity derived from point-scale and contiguous rain data. *Hydrol Earth Syst Sci* 22:6505–6518. ► <https://doi.org/10.5194/hess-22-6505-2018>
24. Mahlke H (2017) Mechanismen der Auslösung hochreichender Konvektion im südwestdeutschen Mittelgebirgsraum. Dissertation, Wiss Ber Inst Meteor Klimaforsch 65: Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
25. Winterrath T, Brendel C, Hafer M et al (2018) RADKLIM Version 2017.002: Reprocessed quasi gauge-adjusted radar data, 5-minute precipitation sums (YW). Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, ► https://doi.org/10.5676/dwd/radklim_yw_v2017.002
26. Winterrath T, Brendel C, Hafer M et al (2018) RADKLIM Version 2017.002: Reprocessed gauge-adjusted radar-data, one-hour precipitation sums (RW). Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main, ► https://doi.org/10.5676/dwd/radklim_rw_v2017.002
27. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2016) Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Karlsruhe
28. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2015) Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung. Merkbl DWA-M 550: Hennef
29. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2016) Dezentraler Hochwasserschutz im ländlichen Raum. Dresden
30. Sieker F, Wilcke D, Reich M et al (2007) Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wasser-rückhalt in der Fläche unter besonderer Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte – am Beispiel des Flusseinzugsgebietes der Mulde in Sachsen. Abschlussbericht, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Leibniz Universität Hannover. Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Projekt AZ 214679), Hannover
31. Assmann A (1999) Die Planung dezentraler, integrierter Hochwasserschutzmaßnahmen – mit dem Schwerpunkt der Standortausweisung

- von Retentionsarealen an der Oberen Elsenz, Kraichgau. LFLBW-Schriftenr 11: Landesamt für Flurneuordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg, Kornwestheim
32. Rieger W (2012) Prozessorientierte Modellierung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen. Mitt Inst Wasserwesen, Wasserwirt Ressourcenschutz 116: Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
 33. Bronstert A, Seiert S, Oberholzer G (1993) Maßnahmen der Flurbereinigung und ihre Wirkung auf das Abflussverhalten ländlicher Gebiete. Schriftenr Landesamt Flurneuord Landent Baden-Württemberg 3: Kornwestheim
 34. Bayerische Landesanstalt für Wald und Forstwirtschaft (2017) Hochwasserangepasste Waldbewirtschaftung. LWF-Merkbl 36: Freising
 35. Seidler M (2018) Verringerung von Sturzfluten nach Starkregenereignissen – Möglichkeiten und Potentiale der Flurneuordnung durch abflussbremsende Flurgestaltung. Masterarbeit, Lehrstuhl Bodenordnung Landentwicklung, Technische Universität München
 36. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2008) Kooperation bei der Unterhaltung kleiner Gewässer. Beispiele aus Bayern. Gewässernachbarschaften. Umwelt Spezial. Augsburg
 37. Fiener P, Auerswald K (2005) Measurement and modeling of concentrated runoff in grassed waterways. *J Hydrol* 301:198–215. ► <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.030>
 38. Maetens W, Poesen J, Vanmaercke M (2012) How effective are soil conservation techniques in reducing plot runoff and soil loss in Europe and the Mediterranean? *Earth-Science Rev* 115:21–36. ► <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2012.08.003>
 39. Tsunekawa A, Liu G, Yamanaka N, DU S (2014) Restoration and development of the degraded loess plateau, China. Springer, Japan
 40. Zhao J, Van Oost K, Chen L, Govers G (2016) Moderate topsoil erosion rates constrain the magnitude of the erosion-induced carbon sink and agricultural productivity losses on the Chinese Loess Plateau. *Biogeosciences* 13:4735–4750. ► <https://doi.org/10.5194/bg-13-4735-2016>
 41. Zhao J, Yang Z, Govers G (2019) Soil and water conservation measures reduce soil and water losses in China but not down to background levels: evidence from erosion plot data. *Geoderma* 337:729–741. ► <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.10.023>

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





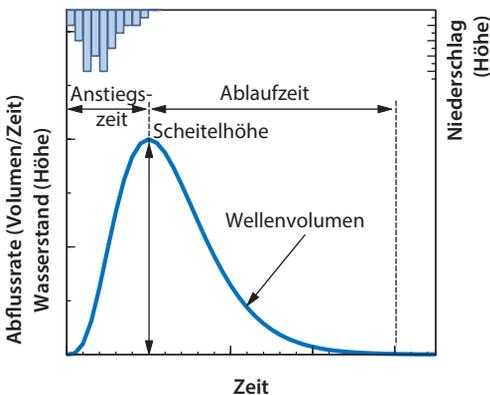
Wellenablauf – wie sich Abflusswellen aufbauen und wie der Scheitel gemindert werden kann

- 3.1 Grundprinzipien und wesentliche Einflussgrößen – 34
- 3.2 Methoden zur Abschätzung von Abflussscheitel und -volumen – 37
- Literatur – 58

3.1 Grundprinzipien und wesentliche Einflussgrößen

3.1.1 Eigenschaften von Abflusswellen

Abfluss läuft immer in Form einer Welle ab, unabhängig davon, ob es sich um Oberflächenabfluss infolge eines Starkniederschlags in der Fläche (im Wasserhaushaltsgesetz als „wild abfließendes Wasser“ bezeichnet; kann Sturzfluten auslösen) oder um den Abfluss eines ausgedehnten Frontensystems in einem Flusssystem (Flusshochwasser) handelt. Wesentliche Eigenschaften einer Abflusswelle sind Scheitelhöhe, Anstiegs- und Ablaufzeit sowie Wellenvolumen (■ Abb. 3.1). Das Wellenvolumen ergibt sich aus dem Teil des Niederschlags, der nicht im Einzugsgebiet zurückgehalten wird und abfließt – dem effektiven oder abflusswirksamen Niederschlag (N_{eff}). Ein Verfahren zur Ermittlung von N_{eff} ist in ► Kap. 4 beschrieben.



■ **Abb. 3.1** Wesentliche Eigenschaften von Abflusswellen sind Anstiegszeit, Ablaufzeit, Scheitelhöhe und Wellenvolumen. Auf die Darstellung eines Basisabflusses wurde verzichtet, da dieser bei Hochwasserabflüssen meist vernachlässigbar klein ist und Oberflächenabfluss weitgehend über Gerinne ohne dauerhafte Wasserführung abgeleitet wird. Die vertikalen Balken stellen den abflusswirksamen Niederschlag dar

Die (Scheitel-)Anstiegszeit ist die Zeitspanne zwischen dem Abflussbeginn in der Fläche und dem Erreichen des Scheitelabflusses an einem definierten Punkt des Fließpfades. Sie hat eine hohe Bedeutung, da sie direkt gekoppelt ist mit dem Hochwasserscheitel und umgekehrt. Je kürzer die Scheitelanstiegszeit, umso höher der Hochwasserscheitel. Da der tatsächliche Abflussbeginn meist unbekannt ist, existieren zur Beschreibung und Abschätzung der Anstiegszeit unterschiedliche Definitionen und eine Vielzahl meist empirischer Methoden [1]. Letztere sind einfach anwendbar und vor allem in der Ingenieurhydrologie weit verbreitet. Sie können hydraulische Eigenschaften des Einzugsgebietes und damit auch Veränderungen der Fließpfadgeometrie oder Rauheit jedoch nicht explizit abbilden. Die Bestimmung der Anstiegszeit sollte daher die Dauer erfassen, die der Oberflächenabfluss benötigt, um von der Wasserscheide bis zu einem definierten Bezugspunkt zu fließen. Ein entsprechender Ansatz – die Geschwindigkeitsmethode – wird bei der Abflusskonzentration in ► Abschn. 5.3.3 beschrieben.

Wellenvolumen und Anstiegszeit sind die wichtigsten Kenngrößen einer Abflusswelle. Sie erlauben es, die Scheitelhöhe zu ermitteln. Am Scheitel sind Abfluss, Wasserstand, Fließgeschwindigkeit und (kurz zuvor) die Transportkapazität des Wassers am größten. Die Zeit vom Scheitel bis zum Abklingen der Welle wird als Ablaufzeit bezeichnet. Zusammen mit der Anstiegszeit und dem Scheitelabfluss definiert sie die Wellenform, weshalb sie in vielen Methoden zur Abschätzung von Welleneigenschaften berücksichtigt wird.

Die Ablaufzeit hängt von den Retentionseigenschaften des Einzugsgebietes ab und ist durch die Schwierigkeit, den Zeitpunkt des Abklingens genau zu bestimmen, ebenfalls nicht einheitlich definiert. Zur Bestimmung der Ablaufzeit aus Messdaten existieren zahlreiche Methoden [2]. In ingenieurhydro-

logischen Verfahren wird die Ablaufzeit oft anhand von Annahmen über die Form der Abflusswelle bzw. die Verteilung des Wellenvolumens vor und nach dem Scheitel geschätzt, wodurch die Ablaufzeit als Vielfaches der Anstiegszeit ausgedrückt werden kann [3]. Wellenvolumen und Scheitelhöhe können nicht nur als Volumen bzw. Volumen pro Zeit, sondern auch als Wiederkehrintervall ausgedrückt werden (z. B. als Wellenvolumen oder Scheitelabfluss, die an einem bestimmten Ort nur alle 30 Jahre oder seltener zu erwarten sind).

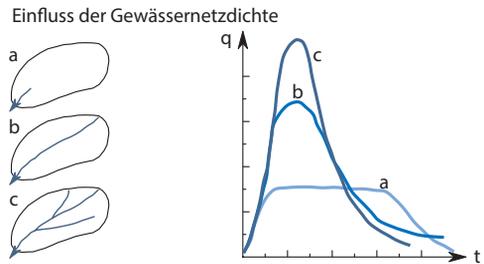
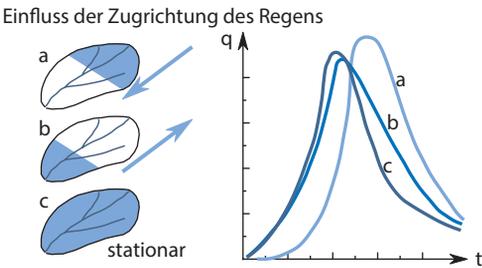
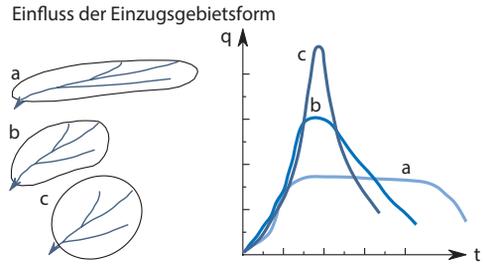
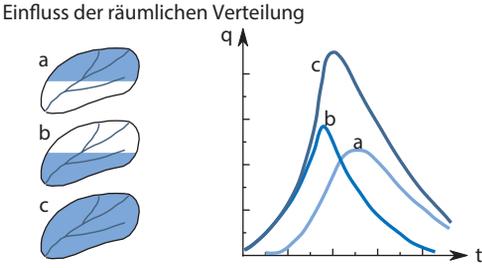
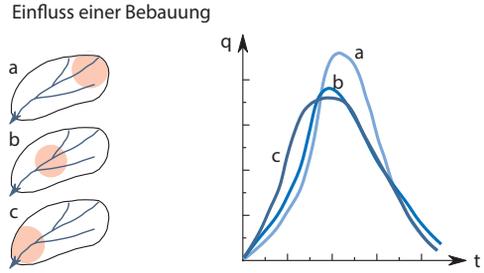
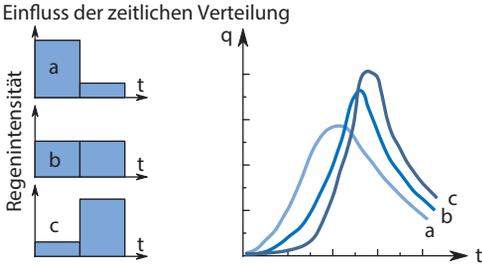
Kenntnisse über Eigenschaften einer Hochwasserwelle sind aus vielen Gründen hilfreich. Beispielsweise können aus dem Scheitelabfluss definierter Starkregenereignisse Wasserstände ermittelt werden und darüber Deich- oder Dammhöhen entlang von Gewässern und Brücken, aber auch Durchlässe oder die Leistung von Entlastungsanlagen oder Schöpfwerken bestimmt werden. Gilt es Polder oder Rückhaltebecken anzulegen, wird das Volumen der Abflusswelle benötigt. Für Standsicherheitsfragen hat die Dauer einer Schwellenwertüberschreitung Bedeutung, z. B. wie lange sind Wasserstände über einem definierten Wert zu erwarten. Je nach Fragestellung sind also unterschiedliche Eigenschaften einer Welle von Interesse. Ähnliches gilt für die Sturzflutvorsorge in der Fläche: Anhand des Scheitelabflusses unterhalb von Ackerflächen kann beispielsweise der erforderliche Querschnitt eines Grabens oder Rohres ermittelt werden. Anhand von Welleneigenschaften können aber auch Kleinstrückhaltebecken oder begrünte Abflussmulden so dimensioniert werden, dass sie einerseits nicht überlaufen und andererseits nicht mehr Fläche als nötig einnehmen. Durch Verfahren zur Bestimmung von Welleneigenschaften kann umgekehrt aber auch der Einfluss bestimmter Maßnahmen auf die Scheitelminderung quantifiziert werden. Oder es kann abgeschätzt werden, wie eine Maßnahme gestaltet sein muss, damit sie eine bestimmte Wirkung erreicht. Methoden

zur Abschätzung von Scheitelabfluss und Wellenvolumen haben daher grundlegende Bedeutung für Bemessungsfragen und die Gestaltung von Maßnahmen zur Abflussminderung, auch wenn in der ländlichen Starkregen- und Sturzflutvorsorge bisher nur selten in Scheitelhöhen und Abflussvolumina gedacht oder damit argumentiert wird.

3.1.2 Einflüsse von Abflussbildung und Abflusskonzentration auf Wellenablauf und Abflussminderung

Die Entstehung und der Ablauf einer Hochwasserwelle ist ein komplexer (instationärer) Prozess, da sich Abflussrate und Fließgeschwindigkeit in Abhängigkeit von Zeit und Ort ändern. Hinzu kommt, dass die Gestalt einer Abflusswelle von vielen Parametern und Eigenschaften beeinflusst wird. Eine variable, innerhalb eines einzelnen aber auch zwischen unterschiedlichen Regen variierende Größe ist beispielsweise die zeitliche Niederschlagsverteilung. Sie bewirkt, dass sich aus einem Regen mit konstanter Intensität eine andere Abflusswelle ergibt als aus einem Regen mit gleicher Niederschlagshöhe, aber anderem zeitlichen Intensitätsverlauf. Ähnliches gilt beispielsweise für den Anteil der überregneten Einzugsgebietsfläche oder die Zugrichtung des Niederschlagfeldes, deren Auswirkungen auf die Abflusswelle in **Abb. 3.2** schematisch dargestellt sind.

Zusätzlich zu den variablen Regeneigenschaften prägen gebietspezifische Kenngrößen wie die Lage bebauter Flächen, die Form des Einzugsgebietes oder die Dichte des Entwässerungsnetzes die Gestalt einer Abflusswelle (**Abb. 3.3**). Die Dichte des Entwässerungsnetzes ist dabei von besonderer Bedeutung für die Geschwindigkeit und damit für die Höhe, die eine Hochwasserwelle erreicht. Diese Dichte ergibt sich nicht nur aus der Dichte der permanenten Fließgewässer. Bei Stark-



■ **Abb. 3.2** Schematische Darstellung zum Einfluss von Regeneigenschaften auf die Form der Abflusswelle. (Nach [4], verändert)

■ **Abb. 3.3** Schematische Darstellung zum Einfluss von Einzugsgebieteigenschaften auf die Form der Abflusswelle. (Nach [4], verändert)

regenergebnissen wird durch den Oberflächenabfluss zusätzlich auch das Netz der (Wegseiten-)Gräben aktiviert, das vielfach länger ist als die permanenten Fließgewässer. Insbesondere dieses periodische Entwässerungsnetz wurde durch den Menschen engmaschig geknüpft (s. ► Kap. 7) und dadurch die Hochwasserscheitel in der ländlichen Flur verschärft.

Durch diese Einflüsse können Berechnungsergebnisse nicht ohne Weiteres von einem Gebiet auf ein anderes oder von einem Regen auf einen anderen übertragen werden. Auch folgen daraus bereits (inhärente) Unsicherheiten jeder quantitativen Schätzung von Welleneigen-

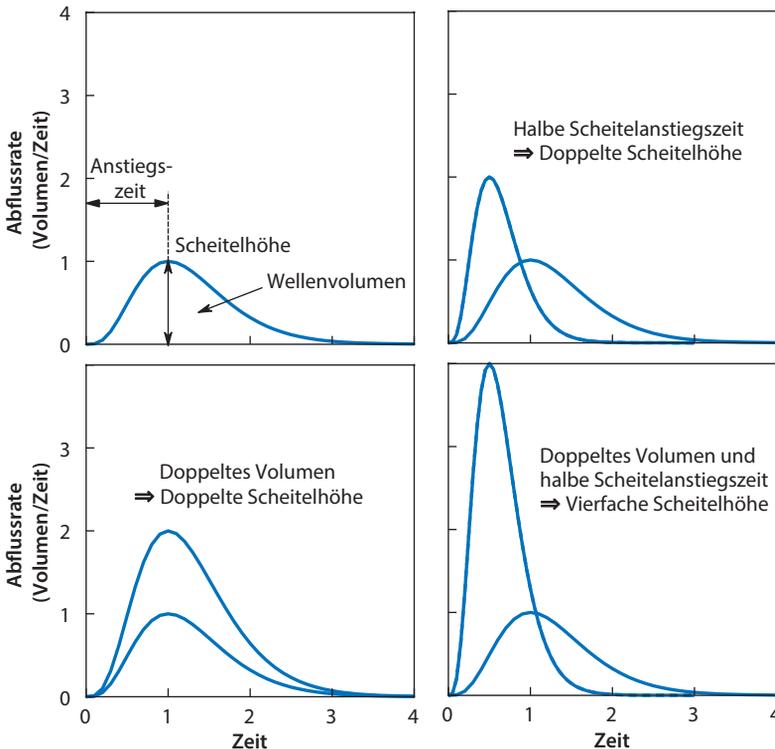
schaften. Die im Folgenden dargestellten Methoden bilden diese verschiedenen Einflüsse hinreichend nach, sofern die Berechnungen räumlich und zeitlich hoch genug aufgelöst werden. Gerade für Planungen sind dem aber Grenzen gesetzt, da z. B. Regeneigenschaften nur retrospektiv bekannt sind und da der Aufwand für eine räumlich hochauflösende Berechnung in normalen Planungsverfahren den zeitlichen und finanziellen Rahmen sprengt. Einfache Annahmen zur Abschätzung von Welleneigenschaften sind daher notwendig, auch wenn dies der Genauigkeit klare Grenzen setzt und nur wesentliche, planungsrelevante Prozesse berücksichtigt werden können. Zur

Bestimmung von Welleneigenschaften kleiner, homogener Gebiete ($<1 \text{ km}^2$) haben sich daher in der Praxis Annahmen wie eine einheitliche Überregnung und ein klar definierter Intensitätsverlauf etabliert. Gleichermäßen vereinfachen viele Bemessungsansätze den Abflussvorgang auf eine reine zeitliche Verschiebung (Translation), bei der Rückhalteeffekte entlang des Fließweges (Retention) entweder vernachlässigt oder stark vereinfacht abgebildet werden (Translationsmodelle). Dazu wird meist eine einheitliche Form der Abflusswelle angenommen und die Scheitelhöhe anhand von Wellenvolumen und Anstiegszeit bestimmt. Der Wellenscheitel wird umso höher, je größer das Wellenvolumen und je kürzer die Anstiegszeit sind. Umgekehrt bedeutet dies, dass der Hochwasserscheitel sowohl durch den Rückhalt von Volumen als auch durch

die Verzögerung des Abflusses vermindert werden kann (■ Abb. 3.4).

3.2 Methoden zur Abschätzung von Abflussscheitel und -volumen

In der ingenieurwissenschaftlichen Literatur sind zahlreiche Ansätze zur Abschätzung von Abflusswelleneigenschaften beschrieben. Eine der einfachsten, etablierten Methoden zur Bestimmung der Scheitelhöhe ist das Verhältnisverfahren, das im angelsächsischen Sprachraum als „rational method“ Ende des 19. Jahrhunderts bekannt geworden ist [6, 7]. Varianten der Methode sind weltweit verbreitet und werden aufgrund ihrer einfachen Handhabung noch heute angewendet, z. B. bei der Ermittlung von Scheitelabflüssen



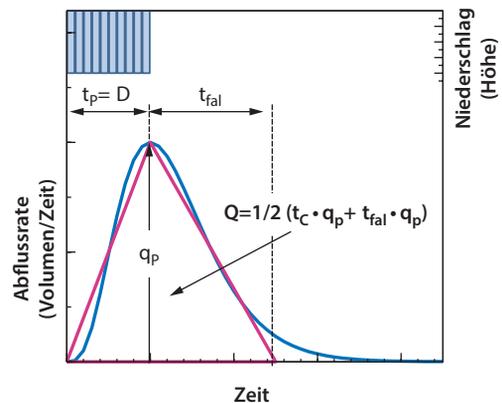
■ **Abb. 3.4** Grundlegende Zusammenhänge zwischen Wellenvolumen, Anstiegszeit und Scheitelhöhe nach dem Einheitsganglinienverfahren, wenn keine weiteren Prozesse hinzukommen [3, 5]

für die Dimensionierung von Kanalnetzen oder bei Entwässerungsmaßnahmen an technischen Bauwerken [8], aber auch bei der Modellierung von Sturzfluten [9]. In Deutschland sind Varianten der Methode unter anderem als Abflussbeiwert- oder Flutplanverfahren bekannt [4, 10]. Das Grundprinzip besteht darin, dass der Scheitelabfluss aus dem Produkt einer kritischen Niederschlagsintensität, der Einzugsgebietsfläche und einer Verhältniszahl ermittelt wird. Der Ansatz fasst damit alle Gebiets- und Standorteigenschaften in einem einzigen Parameter – der Verhältniszahl – zusammen und berücksichtigt weder die Abflussbildung noch die Abflusskonzentration explizit. Entsprechend handelt es sich um ein sehr grobes, überschlägiges Verfahren. Es sollte nur in kleinen (<100 ha), einheitlich strukturierten Gebieten mit kurzer Konzentrationszeit angewendet werden. Gilt es lediglich, den Abflussscheitel von sehr kleinen, einheitlichen Flächen (z. B. Parkplätze, Gewerbegebiete, ...) abzuschätzen, reicht der Verhältnisansatz oft aus. Das Verfahren wird in ► Anhang 8.3 beschrieben, da es die Grundlage von Isochronenansatz, Laufzeit-Flächen-Diagrammen [4, 10, 11] und dem Dreiecksganglinienverfahren bildet. Letzteres wird, ebenso wie das Einheitsganglinienverfahren, im Folgenden ausführlicher beschrieben. Beide berücksichtigen sowohl die Abflussbildung als auch die Abflusskonzentration explizit, wodurch sie dem einfachen Verhältnisansatz überlegen sind. Sie zählen heute zu den Standardbemessungsverfahren in kleinen Einzugsgebieten [12]. Grundsätzlich richtet sich die Auswahl des Verfahrens nach den Anforderungen: Genügt Kenntnis über die zu erwartende Scheitelhöhe, ist das Dreieckungsverfahren hinreichend. Ist eine komplette Ganglinie erforderlich, beispielsweise zur Dimensionierung einer Drossel oder eines Rückhaltebeckens, ist ein aufwendigerer Ansatz wie das Einheitsganglinienverfahren erforderlich. In beiden Fällen besteht die wesentliche Herausforderung darin, Abflusshöhe und Anstiegszeit möglichst genau zu bestimmen.

3.2.1 Das Dreiecksganglinienverfahren

Dreiecksganglinien bilden Hochwasserwellen vereinfacht als (schiefe) Dreiecke ab (► Abb. 3.5). Sie zählen zu den ältesten Verfahren, die Scheitelhöhe einer Abflusswelle zu prognostizieren, und werden auch heute noch für die Ermittlung von Scheitelabflüssen in kleinen Einzugsgebieten verwendet, da dort bislang keine robusten Alternativen verfügbar sind [12].

Beim Dreiecksganglinienverfahren bestimmen Abflussvolumen, Anstiegs- und Ablaufzeit die Scheitelhöhe. Das Abflussvolumen kann aus der Höhe des effektiven Niederschlags und der Einzugsgebietsfläche abgeschätzt werden, wobei der effektive Niederschlag beispielsweise mit dem CN-Verfahren ermittelt werden kann (vgl. ► Kap. 4). Die Summe von Anstiegs- und Ablaufzeit ergibt die Dreiecksbasis (► Abb. 3.5). Die Anstiegszeit (t_p = time to peak) wird



► **Abb. 3.5** Konzeptionelle Darstellung, wie eine Ganglinie (blau) vereinfacht als Dreieck (lila) abgebildet werden kann. In dem gezeigten Fall entspricht die Scheitelanstiegszeit (t_p) der Dauer (D) des Regens (vertikale Balken) und die Zeit des fallenden Wellenastes (auch Ablaufzeit; t_{fal}) dem 1,5-Fachen von t_p . Das Wellenvolumen (Q) des Dreiecks lässt sich trigonometrisch über den Flächeninhalt des anlaufenden und ablaufenden Dreiecks ermitteln. Sind Q , t_p und t_{fal} bekannt, lässt sich durch Umstellung der Gleichung die Scheitelhöhe (q_p) ermitteln

beim Dreiecksganglinienverfahren der Konzentrationszeit ($t_C = \text{time to concentration}$) des Gebietes gleichgesetzt ($t_p = t_C$). Die Konzentrationszeit entspricht der Dauer, die Oberflächenabfluss benötigt, um von der Wasserscheide bis zu einem definierten Punkt zu fließen. Die Ablaufzeit t_{fal} hängt vom Retentionsverhalten des Gebietes ab. Sie ist fast immer unbekannt und wird üblicherweise anhand der Landnutzung geschätzt (typische Wertebereiche $t_p < t_{\text{fal}} < 2 t_p$). Analog zum Verhältnisverfahren ist der Ansatz dafür konzipiert, den für ein bestimmtes Wiederkehrintervall höchstmöglichen Scheitelabfluss zu ermitteln. Dieser ergibt sich, wenn ein Bemessungsregen (Erklärung s. unten) von einer Dauer der Konzentrationszeit des Gebietes angesetzt wird, da die Niederschlagsintensität mit zunehmender Regendauer abnimmt.

Für die Anwendung sind im Allgemeinen folgende Schritte notwendig, die im Anschluss detaillierter beschrieben werden:

1. Festlegen von Bezugspunkt, topographischer Wasserscheide und Bestimmung der Einzugsgebietsgröße (A_{EZG})
2. Abschätzen der Konzentrationszeit (t_C)
3. Bestimmung der Bemessungsniederschlagshöhe (N_B)
4. Ermittlung des Wellenvolumens (Q) durch Multiplikation der Einzugsgebietsfläche (A_{EZG}) mit der abflusswirksamen Niederschlagshöhe (N_{eff}).
5. Abschätzen der Ablaufzeit (t_{fal})
6. Berechnung der Scheitelabflusshöhe (q_p) und Plausibilisieren der Ergebnisse

■ Schritt 1: Festlegen von Bezugspunkt, topographischer Wasserscheide und Bestimmung der Einzugsgebietsgröße

Die an einem Punkt des Fließpfades zu erwartende Scheitelhöhe gilt immer nur für den definierten Punkt. Wenige hundert Meter vorher oder nachher gelten durch die veränderte Größe des Einzugsgebietes und

die abweichende Fließzeit andere Werte. Der erste wesentliche Schritt besteht daher darin, den Bezugspunkt für den Abfluss zu definieren. Als Bezugspunkte sind prinzipiell alle Punkte entlang des Fließpfades wie Hangfüße, Grabenabschnitte, Durch- oder Rohreinlässe, Zusammenflüsse oder Pegel (in größeren Gewässern) geeignet, insofern sich das Einzugsgebiet des gewählten Punktes gut abgrenzen lässt. Dazu ist, ausgehend vom Bezugspunkt, die topographische Wasserscheide und damit die Größe des oberirdischen Einzugsgebietes zu bestimmen. Bei Gebietsgrößen von wenigen Hektar kann die Abgrenzung oft einfach von Hand durchgeführt werden. Übersteigt die Fläche mehrere Hektar, bietet sich eine Abgrenzung mithilfe eines Geländemodells (Auflösung ≤ 5 m) in einem Geographischen Informationssystem an. In den meisten GIS-Anwendungen ist eine Abgrenzung der Wasserscheide mit wenigen Mausklicks möglich.

■ Schritt 2: Abschätzung der Scheitelanstiegszeit

Für die Bestimmung der Scheitelanstiegszeit bei Starkregen in kleinen Gebieten wird die Scheitelanstiegszeit (t_p) der Konzentrationszeit des Gebietes gleichgesetzt (bei anderen Verfahren oder Fragestellungen gelten oft andere Konventionen). Die Konzentrationszeit beschreibt die Zeit, die Oberflächenabfluss benötigt, um von der Wasserscheide bis zu einem definierten Bezugspunkt, z. B. einem Hangfuß, Grabenabschnitt oder einer Ortschaft, zu fließen. Das Mittel der Wahl zur Bestimmung von t_C in kleinen Einzugsgebieten ist die Geschwindigkeitsmethode [13]. Dabei wird zunächst der (hydraulisch) längste Fließpfad zwischen Bezugspunkt und Wasserscheide bestimmt und hinsichtlich der Form des Fließens und den hydraulischen Eigenschaften des Fließpfades in ähnliche Abschnitte untergliedert. Anschließend wird für jeden Abschnitt des Fließpfades die Fließzeit bestimmt. Die Konzentrationszeit

ergibt sich dann aus der Summe der Fließzeiten in den einzelnen Abschnitten (► Abschn. 5.3.3). Die wesentliche Stärke der Geschwindigkeitsmethode besteht darin, dass der Fließweg und seine hydraulischen Eigenschaften explizit abgebildet werden. Daher lassen sich auch Änderungen dieser Eigenschaften durch Eingriffe quantifizieren. Stärker empirische Ansätze sind dazu nicht in der Lage. Daher wird die Geschwindigkeitsmethode zur Bestimmung von t_C empfohlen.

Wenn die Geschwindigkeitsmethode nicht angewendet werden kann oder für eine erste überschlägige Bestimmung der Konzentrationszeit eignet sich die empirische, modifizierte Kirpich-Gleichung [12]. Sie verwendet nur die Fließweglänge und die dazugehörige Höhendifferenz und wurde an Gebieten von 25–150 km² kalibriert. Gerinneigenschaften wie Querschnittsgeometrie oder Rauheit können hier nicht berücksichtigt werden:

$$t_C = 277 \cdot \left(\frac{L^3}{\Delta h} \right)^{0,385} \quad (3.1)$$

wobei

t_C - Konzentrationszeit (min)

L - Länge des Fließweges zwischen dem Bezugspunkt, für den der Scheitelabfluss zu ermitteln ist, und dem entferntesten Punkt auf der Wasserscheide, der über einen durchgehenden Pfad zum Bezugspunkt entwässert (km)

Δh - Höhendifferenz des Fließweges zwischen Bezugspunkt und dem entferntesten Punkt auf der Wasserscheide, der über einen durchgehenden Pfad bis zu diesem Punkt hin entwässert (m)

■ Schritt 3: Bemessungsniederschlag

Die Wahl der maßgebenden Niederschlagshöhe richtet sich nach der Problemstellung: Bei der Nachrechnung historischer Ereignisse ist die Niederschlagshöhe vorgegeben. Bei Bemessungsaufgaben müssen die Eigenschaften des Regens entsprechend des angestrebten (oder realisierbaren) Ausbaus oder Schutzgrades definiert werden. Wesentliche Eigenschaften solcher Modellregen

sind das statistische Wiederkehrintervall (je seltener, desto größer die Regenmenge) und die Regendauer. Zusammen bestimmen sie, mit welcher Niederschlagshöhe in einer definierten Zeitspanne, in einem definierten Wiederkehrintervall und an einem bestimmten Ort zu rechnen ist (vgl. auch ► Abschn. 4.4 und ► Anhang 8.4).

Klassische Bemessungsaufgaben orientieren sich an den ungünstigsten Bedingungen. Maßgebend sind dann beispielsweise das größte zu erwartende Abflussvolumen oder der höchste zu erwartende Wellenscheitel. Der höchste Wellenscheitel wird für den größten Regen erwartet, dessen effektive, d. h. abflussliefernde Dauer der Konzentrationszeit des Einzugsgebietes entspricht. Dies liegt daran, dass die durchschnittliche Intensität eines Regens sinkt, je länger er dauert, auch wenn lange Regen im Schnitt eine höhere Regenmenge haben als kurze. Ist ein Regen daher kürzer als die Konzentrationszeit, liefert nie das gesamte Gebiet gleichzeitig und der Wellenscheitel bleibt gering. Ist ein Regen länger als die Konzentrationszeit, liefert zwar das gesamte Gebiet gleichzeitig, aber der Wellenscheitel wird durch die geringere Regenintensität gemindert. Beispiel: Wurde die Konzentrationszeit eines Gebietes mit $t_C=44$ min bestimmt, sollte ein Bemessungsregen herangezogen werden, dessen Dauerstufe (D) die nächsthöhere von t_C ist, z. B. $D=60$ min. Die nächsthöhere Dauerstufe wird deshalb gewählt, weil es bei jedem Regen zu Anfangsverlusten kommt, die Konzentrationszeit aber erst einsetzt, wenn Abfluss auftritt. Dies lässt sich pragmatisch berücksichtigen, indem die nächsthöhere Dauerstufe gewählt wird, während die korrekte Bestimmung der Summe aus Anfangsverlustzeit und Konzentrationszeit ein aufwendiges, iteratives Verfahren notwendig machen würde, das in Anbetracht der großen Klassenabstände der Dauerstufen nicht gerechtfertigt ist. Wird von diesem Vorgehen abgewichen und bei einer Konzentrationszeit von 44 min beispielsweise ein Modellregen mit einer Dauer von 2 h gewählt, resultiert daraus zwar ein höheres

Abflussvolumen, aber wegen der geringeren durchschnittlichen Regenintensität dennoch ein geringerer Wellenscheitel.

Die Wahl des statistischen Wiederkehrintervalls richtet sich nach dem angestrebten Ausbau- oder Schutzgrad. Als Orientierung werden für ländliche Räume mit fehlender oder geringer Bebauung Jährlichkeiten zwischen 10 und 30 Jahren empfohlen. Ereignisse dieser Größenordnung lassen sich mit dezentralen Maßnahmen zum Wasserrückhalt wirksam beeinflussen, und diese sind meist mit überschaubarem Aufwand realisierbar. Bei der Wahl seltener Ereignisse (z. B. Wiederkehrintervalle von 50 oder 100 Jahren, wie sie üblicherweise für Bemessungsaufgaben in besiedelten Räumen gewählt werden) ergeben sich oft enorme Abflussvolumina und Scheitelhöhen, deren Minderung meist aufwendige, flächenintensive und genehmigungspflichtige Ingenieurmaßnahmen erfordert. Um die Spannweite möglicher Ereignisse einzuschätzen, empfiehlt es sich unterschiedliche (häufigere wie seltenere) Extreme zu betrachten. Als Übersicht typischer Werte sind in [Tab. 3.1](#) KOSTRA-Starkniederschlagssummen für unterschiedliche Konzentrationszeiten bzw. Niederschlagsdauern und Wiederkehrintervalle zusammengefasst. Praktische Ansätze zur Ermittlung der konkreten, in einem

Gebiet maßgebenden Niederschlagshöhe stehen in [Abschn. 4.4](#).

■ Schritt 4: Ermittlung des Wellenvolumens

Aus der Bemessungsniederschlagshöhe kann die zu erwartende abflusswirksame Niederschlagshöhe (N_{eff} , beides in mm) mit dem CN-Verfahren bestimmt werden. Dazu müssen die Landnutzung und die hydrologische Bodengruppe im Einzugsgebiet festgelegt werden. Das Verfahren und seine Anwendung sind in [Abschn. 4.3](#) beschrieben. Das Wellenvolumen ergibt sich dann durch Multiplikation der abflusswirksamen Niederschlagshöhe mit der Einzugsgebietsfläche.

■ Schritt 5: Abschätzen der Ablaufzeit (t_{fal})

Die Ablaufzeit hängt von den Retentionseigenschaften des Einzugsgebietes ab und kann über einen Formfaktor F ([Tab. 3.2](#)) und die Konzentrationszeit des Gebietes abgeschätzt werden ([Gl. 3.2](#)). Je höher der Formfaktor und damit die Retention, desto länger die Ablaufzeit und desto geringer der Wellenscheitel.

$$t_{\text{fal}} = F \cdot t_c \quad (3.2)$$

wobei

t_{fal} - Wellenablaufzeit (min)

F - Empirischer Formfaktor (-)

t_c - Konzentrationszeit (min)

■ **Tab. 3.1** Starkniederschlagshöhen in mm für unterschiedliche Wiederkehrintervalle und Niederschlagsdauerstufen D nach KOSTRA [14] für kurze, in kleinen Einzugsgebieten typische Konzentrationszeiten. Die dargestellten Werte können näherungsweise für weite Teile Mittel- und Süddeutschlands verwendet werden. Davon ausgenommen sind Mittelgebirgslagen und Alpenraum, wo im Durchschnitt etwa 10 % bzw. 20 % größere Werte anzusetzen sind. In der Norddeutschen Tiefebene gelten verbreitet 10–20 % geringere Werte

Niederschlagsdauerstufe D (min)	Wiederkehrintervall (a)			
	10	20	30	50
20	23	27	29	31
30	27	31	34	37
60	34	40	43	47
120	38	44	48	52

Tab. 3.2 Formfaktor F zur Bestimmung der Ablaufzeit einer Dreiecksganglinie in Abhängigkeit von der Landnutzung im Einzugsgebiet [12]

Landnutzung	Wasserableitende Wirkung	Formfaktor F
Siedlungsgebiete mit hohem Anteil versiegelter Oberflächen	Sehr schnelle Ableitung durch hohen Versiegelungsgrad, ausgedehntes, künstliches Entwässerungsnetz und hydraulisch glatte Oberflächen	1
Aufgelockerte Bebauung, Wechsel aus versiegelten und unversiegelten Flächen, z. B. Wohngebiete oder Ortsrandlagen (Versiegelungsgrad 10–40 %)	Schnelle Ableitung durch mittleren Versiegelungsgrad, künstliches Entwässerungsnetz und zum Teil hydraulisch glatte Oberflächen	1,25
Ländliche Räume, Dominanz von Wald-, Acker- und Grünlandflächen (Versiegelungsgrad < 10 %)	Mäßige Ableitungsgeschwindigkeit durch Ackerbau und Infrastruktur. Künstliche Fließpfade (z. B. Gräben) sind vorhanden	1,5
Naturnahe Wald- und Feuchtgebiete, intakte Moore, keine oder sehr geringe Versiegelung	Langsame Ableitung und hohe Retention durch raue Verhältnisse und geringen Anteil künstlicher Entwässerungswege	2

Schritt 6: Berechnung der Scheitelabflusshöhe und Plausibilisieren der Ergebnisse

Sind alle erforderlichen Parameter und Größen bekannt, lässt sich die Scheitelabflusshöhe (q_p) mithilfe von ► Gl. 3.3 ermitteln. Sie ergibt sich trigonometrisch aus dem Abflussvolumen und der Zeit des ansteigenden und ablaufenden Dreieckswellenteils:

$$q_p = \frac{N_{eff}}{0,5 \cdot (t_c + t_{fal}) \cdot 0,06} \cdot A_{EZG} \quad (3.3)$$

wobei

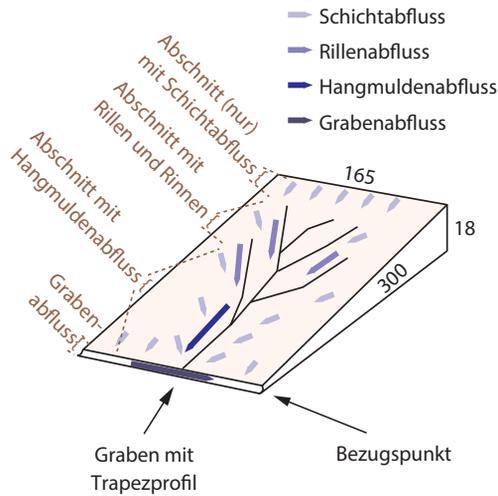
- q_p - Scheitelabflusswert ($m^3 s^{-1}$)
- N_{eff} - Abflusswirksame Niederschlagshöhe (mm)
- A_{EZG} - Einzugsgebietsfläche (km^2)
- t_c - Konzentrationszeit (min)
- t_{fal} - Wellenablaufzeit (min)

Da es sich bei dem Dreiecksganglinienverfahren um ein relativ grobes Schätzverfahren handelt, sollten die Ergebnisse nach Möglichkeit plausibilisiert werden. Dazu

dienen beispielsweise Resultate aus anderen, vergleichbaren Gebieten oder Schätzungen mit anderen Verfahren (z. B. Einheitsganglinienverfahren). In größeren Gebieten können Pegeldaten (oder Extrapolationen daraus), Abflussspendendiagramme oder Schätzungen aus Regionalisierungsverfahren genutzt werden.

Anwendungsbeispiel

Aufgabenstellung: Zur Dimensionierung eines Durchlasses (Bezugspunkt) ist die zu erwartende Scheitelabflusshöhe in einem Graben unterhalb einer 5 ha großen Ackerfläche mit einer mittleren Neigung von 6 % bei einem Starkregen mit einem Wiederkehrintervall von 30 Jahren zu ermitteln (► Abb. 3.6). Die Bewirtschaftungsrichtung erfolgt entlang der längeren Seite in Gefälgerichtung; der obere Feldrand deckt sich mit der Wasserscheide, es erfolgt kein Zu- oder Abfluss aus benachbarten Flächen. Zusätzlich soll der Effekt unterschiedlicher Bewirtschaftungspraktiken auf die Scheitelhöhe



■ **Abb. 3.6** Schematische Darstellung des 5 ha großen Feldes. Die Zahlen an den Rändern beziffern Länge, Breite und Höhenunterschied in Meter, die Neigung entspricht 6 %. Die Linien kennzeichnen das zu erwartende Fließpfadmuster aus Schichtabfluss, Abfluss in Rillen und Rinnen, Hangmuldenabfluss und Abfluss im Graben unterhalb des Feldes entlang der Feldkante. In dem Beispiel soll exemplarisch ein Durchlass am Ende des Grabens bemessen werden, der den Bezugspunkt darstellt. Die Abschnitte, für die getrennt gerechnet wird, richten sich nach dem dort dominierenden Abflusstyp

abgeschätzt werden. Dazu sollen die Oberflächen eines konventionellen Reihenkultursaatbeetes (Bodenbedeckung $\leq 5\%$) mit einem konsequent umgesetzten, nichtwendenden Mulchdirektsaatverfahren (Bodenbedeckung = 30 %) verglichen werden.

Die Lösung erfolgt mit dem Dreiecksganglinienverfahren nach dem skizzierten Vorgehen:

1. Bestimmung der Gebietsmerkmale: Einzugsgebietsgröße, Verlauf der Wasserscheide und Bezugspunkt am Hangfuß sind durch ■ **Abb. 3.6** gegeben.
2. Abschätzung der Konzentrationszeit: Es wird davon ausgegangen, dass sich bei einem Starkregen die typischen, in ■ **Abb. 3.6** skizzierten Fließpfadmuster aus Schichtabfluss, Abfluss in Rinnen und Rillen und Hangmuldenabfluss

ausbilden (vgl. ► **Abschn. 5.2**), wobei die Streckenanteile der einzelnen Fließpfade in Abhängigkeit von der Bedeckung variieren (vgl. ► **Gleichungen 8.1** und **8.2**). Um die Fließzeit für die beiden Fälle (konventionelles Saatbett vs. Mulchdirektsaat) zu bestimmen, wird die Geschwindigkeitsmethode angewendet (s. ► **Abschn. 5.3.3**). Um nur den Einfluss des Fließvorgangs auf die Konzentrationszeit zu illustrieren, wird in beiden Fällen von einem abflusswirksamen Niederschlag mit 15 mm in 30 min ausgegangen, auch wenn eigentlich bei gleichem Niederschlag der abflusswirksame Niederschlag bei Mulchdirektsaat wesentlich geringer ist als bei konventionellem Saatbett. Als Rauheitswerte werden für das Saatbett 17 und für Mulchdirektsaat $5 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ entsprechend ■ **Tab. 8.2** verwendet. Die Eigenschaften des Grabens sind ohne Bedeutung, da für beide Fälle gleiche Bedingungen angesetzt wurden (zur Berechnung wurde ein Trapez mit einer Sohlbreite von 0,3 m, einer Böschungsneigung von $m = 1,5$, ein geräumter Graben mit einer Rauheit von $k = 35 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ und eine Neigung von 1 % angenommen). Die Auswertung (■ **Tab. 3.3**) ergibt einen bemerkenswerten Unterschied (Faktor 3) in den Konzentrationszeiten für konventionelle Saatbettbedingungen (Index KSB) bzw. Mulchdirektsaat (Index MDS) mit $t_{\text{C,KSB}} = 21$ bzw. $t_{\text{C,MDS}} = 68$ min. Die Berechnung verdeutlicht den Einfluss der Oberflächenrauheit und die Größenordnung der Einflussmöglichkeiten. Als Vergleich wurde die Konzentrationszeit zusätzlich anhand der modifizierten Kirpich-Formel (► **Gl. 3.1**) berechnet. Sie ergibt, da sie der Rauheit der Oberfläche und die sich ändernden Bedingungen entlang des Fließpfades unberücksichtigt lässt, einen einheitlichen Wert von 30 min.

Tab. 3.3 Anhand der Geschwindigkeitsmethode geschätzte Fließzeit in Minuten für einen abflusswirksamen Niederschlag von 15 mm in 30 min auf einem 5 ha großen Feld in den unterschiedlichen Fließabschnitten (s. **Abb. 3.6**). Die Konzentrationszeit ergibt sich aus der Summe der einzelnen Abschnitte

Fließabschnitt	Konventionelles Saatbett (KSB) (Bedeckung < 5 %)	Mulchdirektsaat (MDS) (Bedeckung = 30 %)	Anmerkung
Schichtabfluss	11,8	44,7	MDS rauer und daher langsamer und längere Wegstrecke
Rinnen und Rillen	4,5	19,5	MDS rauer und daher langsamer und längere Wegstrecke
Hangmulde	3,3	1,9	MDS kürzer, da Gesamtfeldlänge identisch
Graben	1,6	1,9	MDS langsamer, da langsamere Anlieferung von oben
Konzentrationszeit	21	68	

3. Bestimmung der maßgebenden Bemessungsniederschlagshöhe: Entsprechend der ermittelten Konzentrationszeiten werden KOSTRA-Werte der Dauerstufe 30 und 120 min jeweils für ein Wiederkehrintervall von 30 Jahren als Bemessungsniederschlagshöhen verwendet. Es ergeben sich $N_{B,KSB} = 34$ bzw. $N_{B,MDS} = 48$ mm. Der Regen, bei dem das konventionelle Saatbett den höchsten Abflussscheitel produziert, ist also ein anderer, als der, der bei Mulchdirektsaat den höchsten Abflussscheitel produziert. Es werden also nicht beide Verfahren beim gleichen Regen verglichen, sondern beide Verfahren bei dem für sie jeweils ungünstigsten Regen. Aus der großen Diskrepanz im Bemessungsniederschlag folgt unmittelbar, dass vielfältige Nutzung in einem Einzugsgebiet zu niedrigem Scheitelabfluss führt, weil ein Regen dann nicht für alle Flächen gleichermaßen ungünstig sein kann. Anmerkung: Würde man genauer rechnen und die Zeit des Anfangsverlustes auch noch mitberücksichtigen, kämen beim

konventionellen Saatbett noch knapp 10 min zur Konzentrationszeit hinzu, sodass die Gesamtdauer des Regens, der den größten Abflussscheitel erzeugt, 30 min beträgt, was genau der gewählten Dauerstufe entspricht. Im Fall der Mulchdirektsaat kämen noch ca. 40 min für die Anfangsverluste hinzu, sodass der größte Abflussscheitel bei einem Regen von ca. 108 min Dauer zu erwarten wäre. Auch in dem Fall wäre also die gewählte Dauerstufe von 120 min am nächsten dem rechnerisch optimalen Wert, der aber in KOSTRA nicht enthalten ist. Die pragmatische Regel, die nächsthöhere Dauerstufe zu wählen, führt also in beiden Fällen zum optimalen Ergebnis. Die Regel gilt allerdings nur für kleine Gebiete, in denen die Konzentrationszeit nicht durch die Fließzeit in Gerinnen und Gewässern dominiert wird. In diesen Fällen, bei denen dann auch die Konzentrationszeit größer als zwei Stunden wird, ist die Dauer der Anfangsverluste meist zu vernachlässigen.

4. Die Abflusshöhe wird mit dem CN-Verfahren ermittelt. Als

Modelleingangsgrößen dienen die unter (3) genannten Niederschlagshöhen, der CN-Wert für konventionellen Mais, wie er Ende Mai bei der hydrologischen Bodengruppe C zu erwarten ist (82; ■ Tab. 4.2). Bei Mulchdirektsaat könnte die Bedeckung Ende Mai schon von > 30 % auf < 30 % gesunken sein. Für eine Bodenbedeckung von 28 % beträgt der CN-Wert 72 (■ Abb. 4.3). Damit ergeben sich Abflusshöhen von $N_{\text{eff,KSB}} = 6,6$ bzw. $N_{\text{eff,MDS}} = 6,3$ mm, was Abflussbeiwerten von $\Psi_{\text{KSB}} = 0,19$ bzw. $\Psi_{\text{MDS}} = 0,13$ entspricht.

5. Die Abschätzung der Ablaufzeit erfolgt nach ■ Tab. 3.2. Für beide Fälle wird einheitlich der Formfaktor $F = 1,5$ gewählt, wodurch sich $t_{\text{fal,KSB}} = 32$ bzw. $t_{\text{fal,MDS}} = 102$ min ergeben.
6. Einsetzen der ermittelten Werte beider Varianten in ► Gl. 3.3 ergibt Scheitel-

abflusshöhen von $q_{\text{p,KSB}} = 201 \text{ l s}^{-1}$ und $q_{\text{p,MDS}} = 77 \text{ l s}^{-1}$, was einer Minderung durch Mulchdirektsaat von rund 60 % entspricht. Zur besseren Übersicht sind Zwischenwerte und Ergebnisse in ■ Tab. 3.4 zusammengestellt. Aus der Gegenüberstellung der beiden Varianten (sehr geringe vs. hohe Bedeckung) wird auch der Einfluss deutlich, der mit der Bewirtschaftung genommen werden kann. Um die Unsicherheit und die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber den Modellannahmen einschätzen zu können, sollten immer einige Varianten gerechnet und verglichen werden, z. B. durch die Wahl anderer Starkregenwiederkehrintervalle, Formfaktoren zur Bestimmung der Ablaufzeit oder Modellparameter bei der Bestimmung der Konzentrationszeit und Abflusshöhe.

■ **Tab. 3.4** Zusammenfassung der Parameter und Berechnungsschritte zur Ermittlung der Scheitelabflusshöhe mithilfe des Dreiecksganglinienverfahrens unterhalb einer 5 ha großen Ackerfläche bei einem Starkregen, der nur alle 30 Jahre zu erwarten ist. Dargestellt sind die Berechnungen für Mais unter Bedingungen, wie sie Ende Mai zu erwarten sind, bei zwei Anbauvarianten, nämlich konventioneller Saattbettbereitung (Bedeckung < 5 %) und Mulchdirektsaat (angenommene Bodenbedeckung: 28 %)

Arbeitsschritt	Parameter	Symbol	Einheit	Konventionelles Saattbett	Mulchdirektsaat
(1)	Gebietsgröße	A_{EZG}	ha	5	5
(2)	Konzentrationszeit (Geschwindigkeitsmethode)	t_{C}	min	21	68
(3)	Gewähltes KOSTRA Starkregenwiederkehrintervall	T_{n}	1 a^{-1}	30	30
	Maßgebende Niederschlagsdauerstufe	D	min	30	120
	Maßgebende Niederschlagshöhe	N_{B}	mm	34	48
(4)	Gesamtabflussbeiwert (CN-Verfahren)	Ψ	–	0,19	0,13
	Abflusshöhe	N_{eff}	mm	6,6	6,3
(5)	Ablauffaktor	F	–	1,5	1,5
	Ablaufzeit	t_{fal}	min	32	102
(6)	Scheitelabflusshöhe	q_{p}	l s^{-1}	201	77

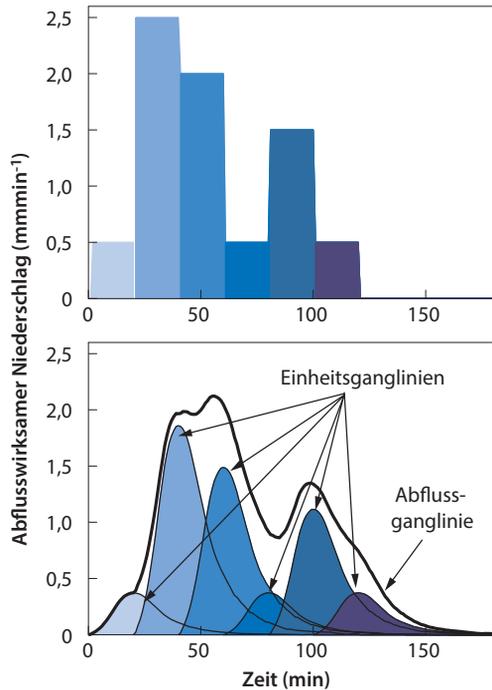
3.2.2 Das Einheitsganglinienverfahren

Im Gegensatz zum Dreiecksganglinienverfahren, mit dem nur die Scheitelhöhe bestimmt werden kann, erlaubt das Einheitsganglinienverfahren die Konstruktion einer kompletten Abflussganglinie, die das hydrologische Verhalten von Einzugsgebieten widerspiegelt. Im Prinzip können damit selbst komplexe Regen und komplexe Einzugsgebiete nachgebildet werden. Gleichzeitig ist das Verfahren einfach genug, um für Planungen eingesetzt zu werden. Mit ihm lässt sich der Einfluss von Landnutzung, Klimawandel oder Infrastrukturmaßnahmen auf das Abflussverhalten abschätzen, und es ermöglicht die Planung und Dimensionierung von Hochwasserschutzmaßnahmen.

Das Konzept der Einheitsganglinie basiert auf Sherman [5] und ist seit vielen Jahrzehnten weltweit verbreitet. Mathematisch kann es über unterschiedliche Ansätze dargestellt werden [15]. In Deutschland haben vor allem analytische Formen, sogenannte lineare Speicherkaskaden, Eingang in die wasserwirtschaftliche Praxis gefunden [17, 18]. In Süddeutschland ist heute vor allem die Adaption von Lutz verbreitet [12, 16, 19], in (vor-)alpinen Gebieten wird oft die analytische Lösung der SCS-Einheitsganglinie [20] verwendet. International ist das Verfahren des amerikanischen NRCS bedeutsam [3, 21], das hier beschrieben wird.

3.2.2.1 Grundlagen und Definitionen

Die Modellvorstellung des Einheitsganglinienverfahrens (EGL-Verfahren) beruht darauf, dass aus einem abfließenden Niederschlagsteil von 1 mm und Dauer ΔD immer die gleiche, für einen Bezugspunkt typische, über die Zeit verteilte Abflussreaktion entsteht. Eine Einheitsganglinie beschreibt daher, wie innerhalb eines Gebietes ein Niederschlagseingangsimpuls in eine Abflussantwort



■ **Abb. 3.7** Beispielhafte Darstellung, wie aus einem 2-stündigen Regen mit variabler Intensität (Balken unterschiedlicher Höhe) (oben) mithilfe einzelner, entsprechend der Höhe des abflusswirksamen Niederschlags skaliertes Einheitsganglinien (dünne schwarze Linien) eine Abflussganglinie (dicke schwarze Linie) konstruiert wird (unten). Die Niederschlagseingangsimpulse und die daraus resultierende Abflussantwort wurden jeweils im gleichen Blauton gezeichnet, um die zeitliche Zugehörigkeit zwischen Eingangs-(Niederschlag) und Ausgangssignal (Abfluss) zu veranschaulichen

übersetzt wird. Bei dem Verfahren wird davon ausgegangen, dass die Abflussantwort linear von der Höhe des Niederschlagsimpulses abhängt. Bei einer abflusswirksamen Niederschlagshöhe von 2 mm ist die Abflussantwort daher doppelt so hoch, bei 3 mm dreimal so hoch, wie bei 1 mm. Aus den einzelnen, zeitlich versetzten Einheitsganglinien kann durch Überlagerung und Addition (Superposition) schließlich die Abflussganglinie des Gebietes bzw. des Gesamtregens konstruiert werden (mathematisch handelt es sich um ein Faltungsintegral) (■ Abb. 3.7).

3.2.2.2 Ableitung gebietsspezifischer Abflussganglinien aus dimensionslosen Einheitsganglinien

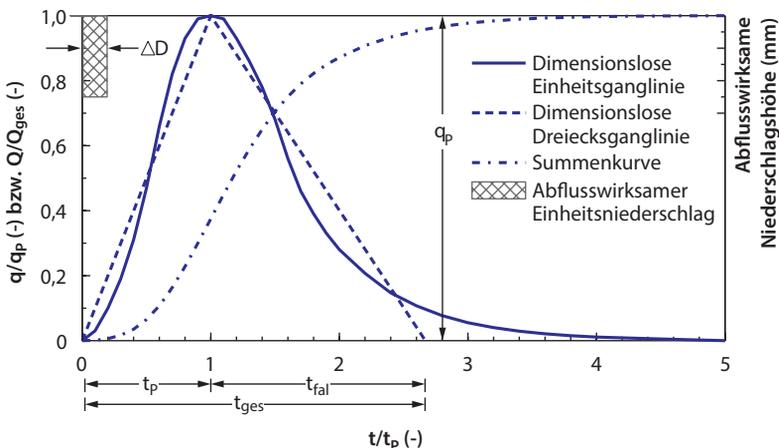
Dieses Kapitel stellt das vom amerikanischen NRCS verwendete Verfahren vor [3, 21]. Dabei wird die gebietsspezifische Einheitsganglinie (EGL) aus einer dimensionslosen Einheitsganglinie (DEGL) abgeleitet. Das Vorgehen hat sich in kleinen landwirtschaftlichen Einzugsgebieten und in Kombination mit der Geschwindigkeitsmethode zur Abschätzung der Konzentrationszeit über viele Jahrzehnte bewährt.

Das Verfahren des NRCS fußt auf einer DEGL, die experimentell aus einer Fülle unterschiedlicher Einzugsgebiete und Einheitsganglinien abgeleitet wurde und die als „Konstruktionsgrundlage“ zur Ableitung beliebiger, gebietsspezifischer EGLs verwendet werden kann. Die DEGL wurde dimensionslos formuliert, indem alle Abflusswerte durch den Scheitelabfluss (q_p) und alle Zeitinkremente durch die Scheitelanstiegszeit (t_p) dividiert wurden. Dadurch liegt der Scheitelabfluss bei $q_p = t_p = 1$ (■ Abb. 3.8). Die Form der DEGL ist so festgelegt, dass 37,5 % ihres

Volumens auf der steigenden und 62,5 % auf der fallenden Seite liegen. Dadurch verfügt die DEGL über eindeutig definierte Eigenschaften und sie kann vereinfacht als Dreieck mit äquivalenten Einheiten bzw. Volumen und Volumenanteilen dargestellt werden. Letzteres birgt den Vorteil, dass sich die Basislänge des Dreiecks und die Scheitelhöhe geometrisch bestimmen lassen. Umgekehrt können diese Zusammenhänge genutzt werden, wenn q_p und t_p bekannt sind, um aus der DEGL eine spezifische EGL für beliebige Gebiete abzuleiten, indem q/q_p mit q_p und t/t_p mit t_p multipliziert werden.

Damit unter dem Dreieck der Gesamtabfluss $Q=1$ wird, muss das Ende der Dreiecksganglinie aus geometrischen Gründen beim 2,67-Fachen der Scheitelanstiegszeit liegen. Aus der Dreiecksform lässt sich weiterhin eine Gleichung zur Bestimmung der Scheitelhöhe ableiten. Für die Berechnung der Dreiecksfläche, die der Abflusssumme (Q) entspricht, gilt:

$$Q = \frac{1}{2}q_p t_p + \frac{1}{2}q_p t_{fal} = \frac{1}{2}q_p (t_p + t_{fal}) \quad (3.4)$$



■ **Abb. 3.8** Dimensionslose Einheitsganglinie, Dreiecksganglinie und Summenkurve. Die Abflusswerte (q) wurden durch die Scheitelhöhe (q_p), die Abflusssummen (Q) durch den Gesamtabfluss (Q_{ges}) und die Zeitinkremente t durch die Scheitelanstiegszeit (t_p) dividiert, wodurch $q_p = t_p = Q_{ges} = 1$. Zusätzlich gekennzeichnet sind die Zeit des fallenden Wellenastes (t_{fal}), die Breite der Dreiecksganglinie (t_{ges}) und die Dauer des abflusswirksamen Einheitsniederschlags (ΔD) (verändert nach NRCS 2007)

Aufgelöst nach dem Scheitelabfluss resultiert:

$$q_p = \frac{2Q}{t_p + t_{fal}} = \frac{2}{1 + \frac{t_{fal}}{t_p}} \cdot \frac{Q}{t_p} \quad (3.5)$$

Der linke Term dieser Gleichung lässt sich nun als dimensionsloser Formparameter K (-) formulieren:

$$K = \frac{2}{1 + \frac{t_{fal}}{t_p}} \quad (3.6)$$

und ► Gl. 3.5 kann vereinfacht werden zu

$$q_p = \frac{K \cdot Q}{t_p} \quad (3.7)$$

Bei einer DEGL, die 37,5 % ihres Volumens auf der steigenden und 62,5 % auf der fallenden Seite hat, ergibt sich der Formparameter K zu 0,75. Solange sich die Volumenanteile auf der steigenden bzw. fallenden Seite nicht ändern, ist K konstant. Mit K und ► Gl. 3.7 kann nun der Scheitelabfluss q_p (in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$) eines Gebietes in Abhängigkeit von der Scheitelanstiegszeit t_p (in h) ermittelt werden. Der Gesamtabfluss Q wird dabei aus dem Produkt von Einzugsgebietsfläche A (in km^2) und abflusswirksamer Niederschlagshöhe N_{eff} (in mm) bestimmt:

$$q_p = \frac{0,208 \cdot A_{\text{EZG}} \cdot N_{\text{eff}}}{t_p} \quad (3.8)$$

wobei

q_p - Scheitelabfluss ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

0,208 - Umrechnungsfaktor

$$\left(\frac{\frac{\text{m}^3}{\text{s}} \cdot \text{h}}{\text{km}^2 \cdot \text{mm}} = \frac{\text{m}^3 \cdot \text{h}}{\text{km}^2 \cdot \text{mm} \cdot \text{s}} = \frac{\text{m} \cdot \text{h}}{\text{km} \cdot \text{s}} \right)$$

A_{EZG} - Einzugsgebietsfläche (km^2)

N_{eff} - Abfließender Teil des Niederschlags bzw. abflusswirksame Niederschlagshöhe (mm)

t_p - Scheitelanstiegszeit (h)

Im Umrechnungsfaktor stecken sowohl die Umrechnung der Einheiten als auch der Formparameter K . Veränderungen in der Form der DEGL, durch Veränderung der Volumenanteile auf der steigenden bzw. fallenden Seite der Dreiecksganglinie

resultieren unweigerlich in einer Veränderung des Umrechnungsfaktors. Aus amerikanischen Einzugsgebieten ist bekannt, dass K in flachen Einzugsgebieten mit hoher Gebietsfeuchte (z. B. Moore) deutlich niedriger und in steilen, alpinen Gebieten höher sein kann [3]. Die Verwendung einer vom Standard abweichend definierten dimensionslosen Einheitsganglinie, z. B. zur Abbildung spezieller Verhältnisse, ist daher möglich, setzt aber eine begründete Wahl der Parameter voraus.

Zur Bestimmung der abflusswirksamen Niederschlagshöhe (N_{eff}) können das CN- (vgl. ► Kap. 4) oder das Lutz-Verfahren (s. ► Anhang 8.5) genutzt werden. Diese berücksichtigen den Niederschlag und standort- sowie ereignisspezifische Eigenschaften des Bodens und der Landnutzung. Die Scheitelanstiegszeit t_p wird üblicherweise aus der Konzentrationszeit t_C des Einzugsgebietes abgeleitet. Letztere ist nicht einheitlich definiert und in der Literatur sind zahlreiche Verfahren zur Bestimmung von t_C dokumentiert [1]. In Folge variiert die Definition von t_C (und damit von t_p) zwischen einzelnen Einheitsganglinienverfahren.

Das hier vorgestellte Verfahren definiert die Scheitelanstiegszeit als Zeit vom Abflussbeginn bis zum Wellenscheitel (vgl. ► Abb. 3.5). Abflussbeginn ist, wenn die Rückhaltungsmöglichkeiten auf Pflanzen und Boden erschöpft sind oder wenn die Niederschlagsintensität größer als die Infiltrationsrate in den Boden ist. Beim CN-Verfahren (► Abschn. 4.3) wird davon ausgegangen, dass der Abfluss einsetzt, wenn der Regen 20 % der Maximalretention erreicht hat. Unter abflussfördernden Bedingungen (z. B. wenig Bodenbedeckung) beginnt der Abfluss meist nach 10 bis 20 mm Regen (bei einem Niederschlag von 50 mm in 1 h ist dies nach 10, spätestens 20 min der Fall). Weiter wird davon ausgegangen, dass der höchste Abfluss an einem Bezugspunkt erreicht wird, wenn ihm aus dem kompletten Einzugsgebiet Abfluss zufließt. Unter diesen Bedingungen folgt, dass die Scheitelanstiegszeit der Konzentrationszeit entspricht. Letztere wird als die Zeit definiert, die Oberflächenabfluss

benötigt, um von der Wasserscheide bis zu einem definierten Bezugspunkt zu fließen. Das Mittel der Wahl zur Bestimmung von t_C in kleinen Einzugsgebieten ist die Geschwindigkeitsmethode [13] (vgl. ▶ Abschn. 5.3.3). Sie kann, im Gegensatz zu empirischen Ansätzen, Einflüsse des Fließpfades (z. B. Querschnitt oder Rauheit) und mögliche Veränderungen des Fließpfades bei anderen Szenarien abbilden.

Das DEGL-Verfahren erlaubt es, im Gegensatz zum Verhältnisansatz (s. ▶ Anhang 8.3), den Einfluss komplexer Regen auf die Abflusskurve abzuschätzen. Dazu muss der Regen in mehrere Abschnitte ΔD eingeteilt werden, für die getrennt der Abfluss vorhergesagt wird. Anschließend werden diese Vorhersagen zur Gesamtabflusskurve überlagert (■ Abb. 3.7). Für die praktische Anwendung muss das Zeitintervall ΔD (auch Einheitsniederschlagsdauer genannt) definiert werden. Die Empfehlung ist, $\Delta D \leq 0,2 t_p$ zu wählen bzw. die Werte in ■ Tab. 3.5 zu verwenden. Kleine Überschreitungen dieser Empfehlung sind zulässig. ΔD sollte aber nicht größer als $0,25 t_p$ sein, da andernfalls die Form der DEGL und insbesondere der meist kurze, ansteigende Ast der Abflusswelle nicht mehr adäquat abgebildet wird (die zeitliche Auflösung der DEGL ist mit $0,1 t_p$ definiert, s. ■ Tab. 3.6). Beispiel: Bei $\Delta D = 0,3 t_p$ würde nur noch jeder dritte Punkt der DEGL zur Ableitung der EGL herangezogen und in Folge eine ungleichmäßige Ganglinie mit schlecht definiertem Scheitel entstehen.

Die Werte der dimensionslosen Einheitsganglinie können ■ Tab. 3.6 entnommen oder über eine Gammafunktion angenähert werden (▶ Gl. 3.9), die eine sehr hohe Ähnlichkeit mit dem Verlauf der DEGL aufweist.

$$\frac{Q}{Q_P} = e^m \cdot \left(\frac{t}{t_P}\right)^m \cdot \left(e^{-m \frac{t}{t_P}}\right) \quad (3.9)$$

wobei

Q/Q_P - Dimensionsloser Abfluss (-)

t/t_P - Dimensionslose Zeit (-)

e - Eulersche Zahl (2,718)

m - Dimensionsloser Formfaktor der Gammafunktion, wobei sich für $m = 3,9$ eine Kurve ähnlich der dimensionslosen Einheitsganglinie ergibt

Die wesentliche Stärke des Verfahrens liegt darin, dass es prinzipiell für beliebige Gebiete angewendet werden kann, sobald t_p und q_p bestimmt wurden. Durch die Abhängigkeit des Verfahrens von diesen Variablen beruht es außerdem auf physikalisch gut interpretierbaren Größen, wodurch Änderungen in der abflusswirksamen Niederschlagshöhe und Änderungen in der Abflusskonzentration gleichermaßen und unmittelbar abgebildet werden können.

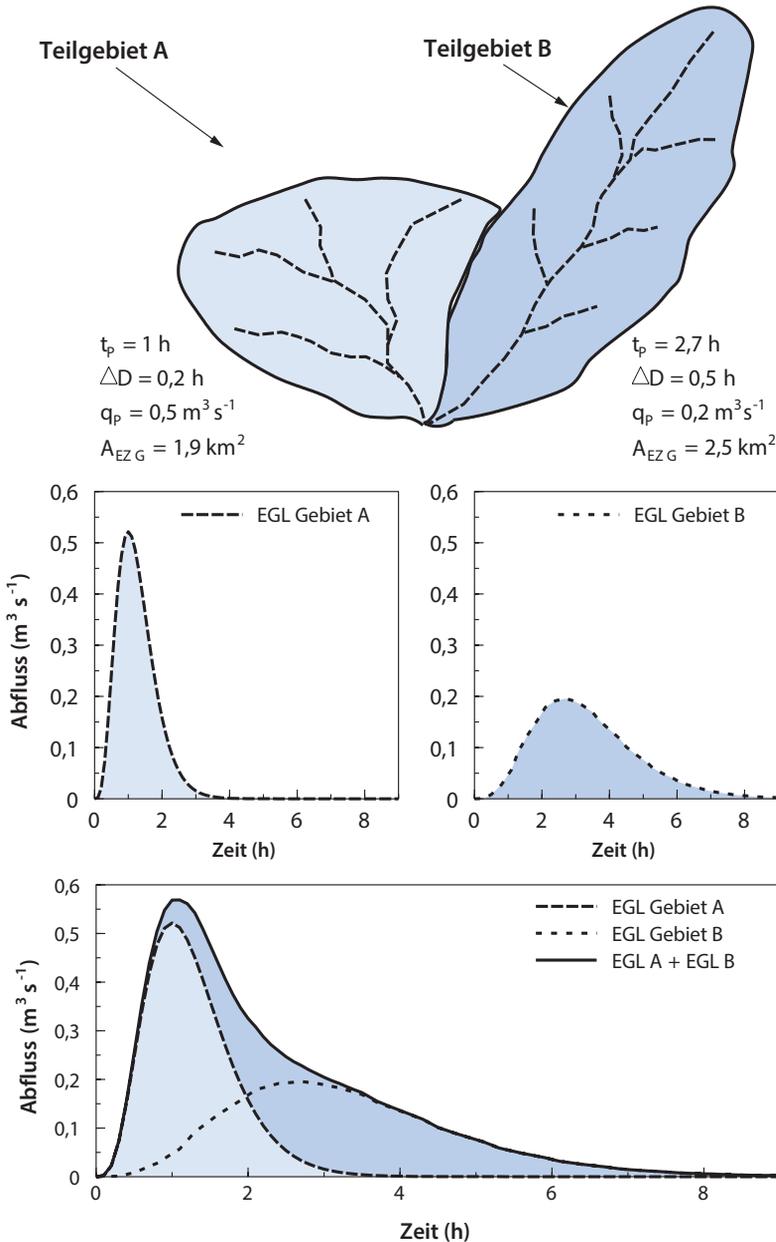
Eine wichtige Voraussetzung für die Ableitung von Abflussganglinien mit dem EGL-Verfahren ist ein relativ homogenes Einzugsgebiet. Falls das Einzugsgebiet aus unterschiedlichen Teileinzugsgebieten besteht, die hinsichtlich Größe, Form und Scheitelanstiegszeit stark voneinander abweichen, sollten die Teileinzugsgebiete zunächst getrennt betrachtet und individuelle Einheitsganglinien ermittelt werden. Diese können dann in einem zweiten Schritt kombiniert werden, um eine Einheitsganglinie für das Gesamtgebiet abzuleiten (■ Abb. 3.9). Die Aufteilung eines großen in mehrere kleine Gebiete ist allerdings sorgfältig abzuwägen. Da die Konzentrationszeit kleinerer Teileinzugsgebiete geringer ist als die des Gesamtgebietes, entstehen mehrere, stärker gestauchte

■ Tab. 3.5 Empfohlene Dauer des Einheitsniederschlags (ΔD) in Abhängigkeit von der Konzentrationszeit des Oberflächenabflusses (t_C) im Einzugsgebiet

Konzentrationszeit (t_C)	min	< 60	60–120	120–180	> 180
Empfohlene Dauer (ΔD)	min	5	10	20	30

Tab. 3.6 Zeit- und Abflusswerte der dimensionslosen Einheitsgangline (DEGL). Die Werte wurden dimensionslos definiert, indem die Zeit t durch die Konzentrationszeit (t_c) des Gebietes und der Abfluss (q) durch den Scheitelabfluss (q_p) dividiert wurden. Die Form der DEGL entspricht näherungsweise einer Gammafunktion mit Formfaktor $m=3,9$ (► Gl. 3.9), deren Werte, zur Veranschaulichung der Ähnlichkeit, in der 3. Spalte dargestellt sind

Dimensionslose Zeit ($t t_c^{-1}$)	Dimensionsloser Abfluss ($q q_p^{-1}$)	Gammafunktionswert (bei $m=3,9$)	Dimensionslose Abflusssumme ($Q_a Q^{-1}$)
0	0	0,00	0
0,1	0,03	0,00	0,001
0,2	0,10	0,04	0,006
0,3	0,19	0,14	0,017
0,4	0,31	0,29	0,035
0,5	0,47	0,47	0,065
0,6	0,66	0,65	0,107
0,7	0,82	0,80	0,163
0,8	0,93	0,91	0,228
0,9	0,99	0,98	0,300
1	1	1	0,375
1,1	0,99	0,98	0,450
1,2	0,93	0,93	0,522
1,3	0,86	0,86	0,589
1,4	0,78	0,78	0,650
1,5	0,68	0,69	0,705
1,6	0,56	0,60	0,751
1,7	0,46	0,52	0,790
1,8	0,39	0,44	0,822
1,9	0,33	0,37	0,849
2,0	0,280	0,30	0,871
2,2	0,207	0,20	0,908
2,4	0,147	0,13	0,934
2,6	0,107	0,08	0,953
2,8	0,077	0,05	0,967
3,0	0,055	0,03	0,977
3,2	0,040	0,02	0,984
3,4	0,029	0,01	0,989
3,6	0,021	0,01	0,993
3,8	0,015	0,00	0,995
4,0	0,011	0,00	0,997
4,5	0,005	0,00	0,999
5,0	0	0	1



■ **Abb. 3.9** Schematische Darstellung eines Einzugsgebietes, das aus zwei ungleichförmigen Teileinzugsgebieten mit voneinander abweichenden Scheitelanstiegszeiten besteht (oben). Entsprechend den Gebiets-eigenschaften resultieren unterschiedliche Einheitganglinien (EGL A bzw. EGL B) (Mitte), die überlagert und zu einer Einheitganglinie für das Gesamtgebiet (EGL A + EGL B) kombiniert wurden (unten). (verändert nach [3])

Einheits- und in Folge Abflussganglinien mit höherem Scheitel. Die Abflussreaktion der Teileinzugsgebiete wird durch dieses Vorgehen

zwar korrekt beschrieben, die Reaktion des Gesamtgebietes kann allerdings nicht mehr ohne Weiteres aus den Abflussganglinien

der Teileinzugsgebiete (z. B. durch Addition) gebildet werden. Sowohl die Abflachung der Welle entlang der Fließstrecke, die Retention in der Fläche als auch die Verbreiterung der Welle im Hauptgerinne durch einen seitlichen Zufluss können erheblich sein. Konzeptionell wird die Verwendung von Einheitsganglinienverfahren für räumlich differenzierte Modellierungen daher schnell anspruchsvoll.

Aus der praktischen Anwendungen von Einheitsganglinienverfahren ist bekannt, dass die Unsicherheit einer solchen einfachen Niederschlag-Abfluss-Modellierung selten kleiner als 25 % ist [12]. Ursache sind die konzeptionellen Annahmen, die dem EGL-Verfahren und der Geschwindigkeitsmethode zugrunde liegen, als auch Unsicherheiten in der praktischen Bestimmung von t_p und q_p .

3.2.2.3 Anwendungsbeispiel

Zur Illustration wird die Abflussganglinie eines 2,5 km² großen Einzugsgebietes für einen Regen mit 70 mm in 4 h konstruiert. Diese Niederschlagshöhe entspricht in vielen Regionen einem etwa 100-jährlichen Starkregenereignis. Das Einzugsgebiet ist landwirtschaftlich geprägt, weshalb von einem Gesamtabflussbeiwert von $\Psi = 0,4$ (-) ausgegangen wird. Eine gebietsspezifische Bestimmung von Ψ wäre mit dem CN-Verfahren (vgl. ▶ Abschn. 4.3) oder dem Ansatz von Lutz (▶ Anhang 8.5) möglich, wird hier aber aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht im Detail durchgeführt. Gleiches gilt für die

Ermittlung der Konzentrationszeit, die hier mit $t_C = 2$ h gegeben ist, aber mithilfe der Geschwindigkeitsmethode (s. ▶ Abschn. 5.3.3) ermittelt werden könnte. ■ Tab. 3.7 fasst die erforderlichen Kenngrößen zusammen.

Zur Ableitung der Abflussganglinie wird zunächst die Einheitsganglinie (EGL) des Gebietes durch Skalierung der dimensionslosen Einheitsganglinie (DEGL) mit dem gebietsspezifischen Scheitelabfluss (q_p) und der gebietsspezifischen Scheitelanstiegszeit (t_p) ermittelt. Im Anschluss wird eine Ganglinie des abflusswirksamen Niederschlags abgeleitet und auf die EGL angewendet. Durch Überlagerung der Einzelwellen wird schließlich die Abflusswelle ermittelt. Das Vorgehen gliedert sich in fünf Teilschritte:

■ Teilschritt 1: Ableitung der Einheitsganglinie aus der dimensionslosen Einheitsganglinie

Zunächst müssen t_p und q_p bestimmt werden, um die dimensionslose Einheitsganglinie zu skalieren. Für kurze, schauerartige Starkregen kann die Scheitelanstiegszeit der Konzentrationszeit gleichgesetzt werden. Dadurch ist t_p bekannt und die Dauer des Einheitsniederschlags, ΔD , kann bestimmt werden. ΔD legt den Rechenzeitschritt und die zeitliche Auflösung der Niederschlags- und Abflussganglinie fest. Nach ■ Tab. 3.5 wird für $t_p = t_C = 2$ h, ein ΔD von 10 bis maximal 20 min empfohlen. 20 min entsprechen also der größtmöglichen zeitlichen Auflösung, bei

■ Tab. 3.7 Kenngrößen des Einzugsgebietes und des Bemessungsniederschlags

Parameter	Einheit	Wert
Gebietsgröße A_{EZG}	km ²	2,5
Gesamtabflussbeiwert Ψ	-	0,4
Konzentrationszeit t_C	h	2
Bemessungsniederschlagshöhe N_B	mm	70
Bemessungsniederschlagsdauer D	h	4
Zeitliche Niederschlagsverteilung	-	Mittenbetont (s. ▶ Anhang 8.4.5)

der eine Skalierung der DEGL gerade noch akzeptabel ist. Zu genaueren Ergebnissen führt $\Delta D = 10$ min (entspricht 0,167 h).

Mit der Scheitelanstiegszeit t_p , der Gebietsgröße A und ► Gl. 3.8 kann der Scheitelabfluss der Einheitsganglinie für eine Effektivniederschlagshöhe von $N_{\text{eff}} = 1$ mm ermittelt werden:

$$q_p = \frac{0,208 \cdot A \cdot N_{\text{eff}}}{t_p} = \frac{0,208 \cdot 2,5 \cdot 1}{2} = 0,26 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$$

Damit lässt sich nun eine gebietspezifische Einheitsganglinie ableiten, indem die dimensionslose Zeit und der dimensionslose Abfluss der DEGL mit t_p bzw. q_p multipliziert werden (■ Tab. 3.8).

■ Teilschritt 2: Erstellung der Effektivniederschlagsganglinie

Anhand des Gesamtabflussbeiwertes von $\Psi = 0,4$ und der Bemessungsniederschlagshöhe von $N_B = 70$ mm in 4 h wird nun mit der Auflösung ΔD eine abflusswirksame Niederschlagsganglinie erstellt. Dazu wird zunächst die abflusswirksame Niederschlagshöhe (N_{eff}) ermittelt.

$$N_{\text{eff}} = N_B \cdot \Psi = 70 \cdot 0,4 = 28 \text{ mm}$$

Zur Ableitung der N_{eff} -Ganglinie wird von einem mittenbetonten Verlauf des Effektivniederschlags ausgegangen. Das heißt, in den ersten 30 % der Niederschlagsdauer fallen 20 % der Niederschlagssumme, in

■ **Tab. 3.8** Ableitung der gebietspezifischen Einheitsganglinie (EGL) aus der dimensionslosen Einheitsganglinie (DEGL) durch Multiplikation der dimensionslosen Zeiten mit t_p und der dimensionslosen Abflusswerte mit q_p

$t \cdot t_p^{-1}$ (-)	$q \cdot q_p^{-1}$ (-)	Zeit (h)	EGL ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)	$t \cdot t_p^{-1}$ (-)	$q \cdot q_p^{-1}$ (-)	Zeit (h)	EGL ($\text{m}^3 \text{ s}^{-1}$)
(1)	(2)	(3)	(4)	Fortsetzung			
0	0,00	0	0,00	1,7	0,52	2,2	0,13
0,1	0,00	0,1	0,00	1,8	0,44	2,3	0,11
0,2	0,04	0,3	0,01	1,9	0,37	2,4	0,10
0,3	0,14	0,4	0,04	2	0,30	2,6	0,08
0,4	0,29	0,5	0,08	2,1	0,25	2,7	0,06
0,5	0,47	0,6	0,12	2,2	0,20	2,8	0,05
0,6	0,65	0,8	0,17	2,3	0,16	3	0,04
0,7	0,80	0,9	0,21	2,4	0,13	3,1	0,03
0,8	0,91	1	0,24	2,5	0,10	3,2	0,03
0,9	0,98	1,2	0,25	2,6	0,08	3,3	0,02
1	1,00	1,3	0,26	2,7	0,06	3,5	0,02
1,1	0,98	1,4	0,26	2,8	0,05	3,6	0,01
1,2	0,93	1,5	0,24	2,9	0,04	3,7	0,01
1,3	0,86	1,7	0,22	3	0,03	3,9	0,01
1,4	0,78	1,8	0,20	3,1	0,02	4	0,01
1,5	0,69	1,9	0,18	3,2	0,02	4,1	0,00
1,6	0,60	2,1	0,16				

Tab. 3.9 Aufteilung des Effektivniederschlags von $N = 28 \text{ mm}$ in $D = 4 \text{ h}$ in einen mittenbetonten Verlauf (s. auch ► Anhang 8.4). Als Kontrolle wurden in der untersten Zeile die Spaltensummen ergänzt

Relative Intervalldauer (%)	Relativer Niederschlagsanteil (%)	Absolute Intervalldauer (h)	Absoluter Niederschlagsanteil (mm)
0,3	0,2	1,2	5,6
0,2	0,5	0,8	14
0,25	0,15	1	4,2
0,25	0,15	1	4,2
1	1	4	28

den nächsten 20 % der Niederschlagsdauer 50 % und im dritten und vierten Viertel der Niederschlagsdauer je 15 % der Niederschlagssumme (vgl. auch ► Anhang 8.4.5). Angewendet auf den konkreten Fall ergibt sich für das erste Bemessungsintervall von $4 \text{ h} \cdot 0,3 = 1,2 \text{ h}$ Dauer eine Menge von $28 \text{ mm} \cdot 0,2 = 5,6 \text{ mm}$. Für das zweite Bemessungsintervall von $4 \text{ h} \cdot 0,2 = 0,8 \text{ h}$ Dauer resultiert eine Menge von $28 \text{ mm} \cdot 0,5 = 14 \text{ mm}$, usw. (► Tab. 3.9).

Um eine N_{eff} -Ganglinie in der gewünschten zeitlichen Auflösung zu erzeugen, wird die abflusswirksame Niederschlagssumme im Bemessungsintervall durch die Anzahl der ΔD -Intervalle geteilt. Beispiel: Das erste Bemessungsintervall besteht aus $1,2 \text{ h} / 0,167 \text{ h} = 7,2$ Intervallen mit einer Dauer von $\Delta D = 10 \text{ min}$ ($\approx 0,167 \text{ h}$). Innerhalb dieser Zeitschritte fließen jeweils $5,6 \text{ mm} / 7,2 = 0,78 \text{ mm}$ Niederschlag ab. Die Ermittlung der abflusswirksamen Niederschlagshöhen für die anderen Zeitschritte erfolgt analog. Spalte 2 in ► Tab. 3.10 zeigt die ermittelten Werte in einem tabellarischen Rechenschema mit Intervallen von $\Delta D = 10 \text{ min}$.

■ Teilschritt 3: Übertragung der Einheitsganglinienwerte

Für die vorgegebenen Zeitintervalle werden nun die entsprechenden EGL-Werte ermittelt. Dazu werden die Werte aus ► Tab. 3.8 (Spalte 4) nach ► Tab. 3.10

übertragen. Bei Bedarf wird zwischen einzelnen Zeitschritten interpoliert.

■ Teilschritt 4: Plausibilitätskontrolle

Zur Kontrolle kann an dieser Stelle das Volumen unter der Einheitsganglinie (Spalte 3 in ► Tab. 3.10) ermittelt und mit ΔD multipliziert werden:

$$4,03 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \cdot 0,167 \text{ h} = 0,67 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ h}$$

Für einen Niederschlag von 1 mm muss der resultierende Wert mit dem Produkt aus dem Umrechnungsfaktor aus ► Gl. 3.8 und der Gebietsgröße, dividiert durch den dimensionslosen Formparameter K aus ► Gl. 3.6 übereinstimmen:

$$0,208 \frac{\text{m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ h}}{\text{km}^2 \text{ mm}} \cdot \frac{2,5 \text{ km}^2}{0,75} \cdot 1 \text{ mm} = 0,69 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ h}$$

Der Unterschied der beiden Werte beträgt knapp 3 %. Differenzen von bis zu 5 % können toleriert werden. Bei größeren Abweichungen sollte die zeitliche Auflösung angepasst werden, bis die Volumina hinreichend genau übereinstimmen.

■ Teilschritt 5: Berechnung der Ganglinie

Nun wird für jeden Zeitschritt der Ganglinie von N_{eff} eine Abflussreaktion berechnet. Dazu wird N_{eff} eines Zeitschritts durch Multiplikation mit den Werten der Einheitsganglinie auf die folgenden Zeitschritte

■ **Tab. 3.10** Erstellung eines Rechenschemas mit einer einheitlichen zeitlichen Auflösung von $\Delta D = 10 \text{ min}$ ($= 0,167 \text{ h}$). Die Spalten zeigen die Zeit (1), die abflusswirksame Niederschlagshöhe (N_{eff}) (2) sowie den entsprechenden Einheitsganglinienwert (3)

Zeit (h)	N_{eff} (mm)	EGL ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)	Zeit (h)	N_{eff} (mm)	EGL ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
(1)	(2)	(3)	(1)	(2)	(3)
0,00	0,00	0,00	3,33	0,70	0,14
0,17	0,78	0,00	3,50	0,70	0,12
0,33	0,78	0,01	3,67	0,70	0,11
0,50	0,78	0,02	3,83	0,70	0,09
0,67	0,78	0,05	4,00	0,70	0,08
0,83	0,78	0,08	4,17	0,0	0,07
1,00	0,78	0,12	4,33	0,0	0,06
1,17	0,78	0,16	4,50	0,0	0,05
1,33	2,49	0,20	4,67	0,0	0,04
1,50	2,92	0,22	4,83	0,0	0,03
1,67	2,92	0,24	5,00	0,0	0,03
1,83	2,92	0,26	5,17	0,0	0,02
2,00	2,92	0,26	5,33	0,0	0,02
2,17	0,70	0,26	5,50	0,0	0,01
2,33	0,70	0,25	5,67	0,0	0,01
2,50	0,70	0,23	5,83	0,0	0,01
2,67	0,70	0,22	6,00	0,0	0,01
2,83	0,70	0,20	6,17	0,0	0,01
3,00	0,70	0,18	6,33	0,0	0,01
3,17	0,70	0,16	6,50	0,0	0,00

verteilt (Spalte 3 in ■ Tab. 3.10). Dies wird für alle Zeitschritte des Niederschlags wiederholt (Spalten 3 bis 13 in ■ Tab. 3.11). Und schließlich werden alle so erhaltenen Abflüsse der verschiedenen Niederschlagszeitschritte, die zum gleichen Zeitpunkt fließen (d. h. in einer gemeinsamen Zeile in ■ Tab. 3.11 stehen), aufsummiert und bilden

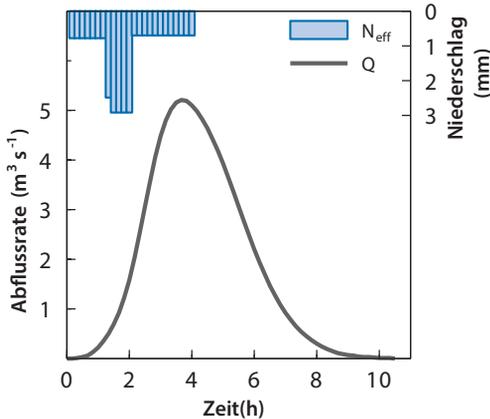
über die Zeit die Abflussganglinie (Spalte 14 in ■ Tab. 3.11), die in ■ Abb. 3.10 zusammen mit Verlauf des Effektivniederschlags dargestellt ist.

Das Gesamtvolumen des Abflusses ergibt sich aus der Summe von Q multipliziert mit ΔD .

3 **Tab. 3.11** Illustration des Rechenschemas zur Ermittlung der Abflussganglinie (Q) aus der Zeitreihe des abflusswirksamen Niederschlags (N_{eff}) und der Einheitsganglinie (nicht dargestellt) für die ersten neun Zeitintervalle. Zur besseren Lesbarkeit wird auf eingeklammerte Zeilen- (Z) und Spaltennummern (S) verwiesen. Die N_{eff} -Ganglinie aus **Tab. 3.10** ist im Kopfbereich dargestellt (Zeile 1–3, Spalte 3–13). Aus ihr entsteht durch Multiplikation mit den Werten der Einheitsganglinie (vgl. **Tab. 3.8** Spalte 4) in jedem Zeitintervall eine Abflussreaktion (Zeile 5–40, Spalte 3–13). Die einfach umrahmten Zellen markieren die Abflussreaktion im ersten Intervall, umgerechnet in $\text{m}^3 \text{s}^{-1}$. Die doppelt umrahmten Zellen sind der Abfluss, der im dritten Zeitschritt entsteht. Die dreifach umrahmten Zellen sind der Abfluss des fünften Zeitschritts. Die Abflussreaktionen der einzelnen Zeitintervalle (Zeile 5–40) ergeben zusammen (Spaltensummen) die Abflussganglinie am Ende des Fließpfades (Spalte 14). Für die technische Umsetzung dieser Rechenoperation bieten sich Tabellenkalkulationsprogramme an. Dort kann die Umsetzung eleganter und ohne die vielen „Hilfsspalten“, z. B. über Summenproduktformeln, erfolgen oder über analytische Näherungen [z. B. **19, 20**]

Z/S	(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	(13)	(14)
(1)	I		1	2	3	4	5	6	7	8	9	...	25	
(2)	Zeit (h)	0,17	0,33	0,5	0,67	0,83	1,0	1,17	1,33	1,5				
(3)	N_{eff} (mm)	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	0,78	2,49	2,92	...	0,7	
(4)	I	Zeit (h)	Abflussreaktionen in den einzelnen Intervallen											Q ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)
(5)	0	0,00	0,00											0,00
(6)	1	0,17	0,00	0,00										0,00
(7)	2	0,33	0,01	0,00	0,00									0,01
(8)	3	0,50	0,02	0,01	0,00	0,00								0,03
(9)	4	0,67	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00							0,06
(10)	5	0,83	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00						0,13
(11)	6	1,00	0,10	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00					0,22
(12)	7	1,17	0,13	0,10	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00				0,35
(13)	8	1,33	0,15	0,13	0,10	0,06	0,04	0,02	0,01	0,00	0,00			0,50
(14)	9	1,50	0,17	0,15	0,13	0,10	0,06	0,04	0,02	0,02	0,00			...
(15)	10	1,67	0,19	0,17	0,15	0,13	0,10	0,06	0,04	0,06	0,02			
(16)	11	1,83	0,20	0,19	0,17	0,15	0,13	0,10	0,06	0,12	0,07			
(17)	12	2,00	0,20	0,20	0,19	0,17	0,15	0,13	0,10	0,21	0,14			
(18)	13	2,17	0,20	0,20	0,20	0,19	0,17	0,15	0,13	0,30	0,24			
(19)	14	2,33	0,19	0,20	0,20	0,20	0,19	0,17	0,15	0,40	0,36			
(20)	15	2,50	0,18	0,19	0,20	0,20	0,20	0,19	0,17	0,49	0,47			

(Fortsetzung)



▣ **Abb. 3.10** Ganglinie des Abflusses (Q) für den mittenbetonten Effektivniederschlag (N_{eff}) aus **Tab. 3.9**. Der infiltrierende Teil des Bemessungsniederschlags wurde ebenso wie der Basisabfluss ausgeblendet. Anmerkung: Jeder Zeitschritt des Niederschlags (0,167 h) ist als schmaler Balken dargestellt. Der achte schmale Balken, der einen Zwischenwert einnimmt, kommt daher, dass dieser Zeitschritt einen Teil des ersten Intervalls eines mittenbetonten Niederschlags (erste Zeile in **Tab. 3.9**) und einen Teil des zweiten Intervalls (zweite Zeile in **Tab. 3.9**) enthält

Literatur

1. Gericke OJ, Smithers JC (2014) Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation. *Hydrol Sci J* 59:1935–1971. ► <https://doi.org/10.1080/02626667.2013.866712>
2. Blume T, Zehe E, Bronstert A (2007) Rainfall-runoff response, event-based runoff coefficients and hydrograph separation. *Hydrol Sci J* 52:843–862. ► <https://doi.org/10.1623/hysj.52.5.843>
3. Natural Resources Conservation Service (2007) Hydrographs. In: *National engineering handbook*. Part 630 hydrology, chapter 16. US Department of Agriculture, Washington
4. Dyck S, Peschke G (1995) *Grundlagen der Hydrologie*. Verlag für Bauwesen, Berlin
5. Sherman LK (1932) Streamflow from rainfall by the unit-graph method. *Eng News-Record* 108:501–505
6. Kuichling E (1889) The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts. *Trans Am Soc Civ Eng* 20:1–56
7. Cleveland G, Thompson DB, Fang X (2011) Use of the rational and modified rational methods for hydraulic design. Res Rep 0-6070-1: Texas Tech Center for Multidisciplinary Research in Transportation, Lubbock
8. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft Abwasser und Abfall (2006) *Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen*. Arbeitsbl DWA-A 118: Hennef
9. Bronstert A, Agarwal A, Boessenkool B et al (2018) Forensic hydro-meteorological analysis of an extreme flash flood: The 2016-05-29 event in Braunsbach, SW Germany. *Sci Total Environ* 630:977–991. ► <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.241>
10. Maniak U (2016) *Hydrologie und Wasserwirtschaft*. Springer, Berlin
11. Patt H, Jüpner R (2013) *Hochwasser-Handbuch Auswirkungen und Schutz*. Springer, Berlin
12. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2016) *Loseblattsammlung Hydrologische Planungsgrundlagen*. Augsburg
13. Natural Resources Conservation Service (2010) Time of concentration. In: *National engineering handbook*. Part 630 hydrology, chapter 15. US Department of Agriculture, Washington
14. Deutscher Wetterdienst (2017) *Raster der Wiederkehrintervalle für Starkregen (Bemessungsniederschläge) in Deutschland (KOSTRA-DWD)*, Version 2010R. Climate Data Center, Offenbach am Main
15. Maidment D (1993) *Handbook of hydrology*. McGraw-Hill Education, New York
16. Lutz W (1984) *Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen*. Mitt Inst Hydrol Wasserwirt 24: Universität Karlsruhe
17. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1982) *Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil I: Analyse. Regeln zur Wasserwirtschaft 112*: Paul Parey, Hamburg
18. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1999) *Hochwasserabflüsse*. Schriften 124: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, Bonn
19. Caspary HJ (1987) Näherungslösung für regionalisierte Einheitsganglinien mit Hilfe linearer Speicherkaskaden. *Wasserwirtschaft* 77:19–23
20. Caspary HJ (1987) Analytische Lösung für die regionalisierte Einheitsganglinie des U.S. Soil Conservation Service. *Wasser & Boden* 39:623–626
21. Mockus V (1957) Use of storm and watershed characteristics in synthetic hydrograph analysis and application. American Geophysical Union, Sacramento

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/ die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Abflusststehung – wie aus Niederschlag Abfluss wird

- 4.1 Grundprinzipien und wesentliche Einflussgrößen – 62
 - 4.2 Bestimmung der abflusswirksamen Niederschlagshöhe – 62
 - 4.3 Das Runoff-Curve-Number-Verfahren – 63
 - 4.4 Modellregen für den ländlichen Hochwasserschutz – 74
 - 4.5 Ansatzpunkte zur Reduktion des Abflussvolumens – 78
- Literatur – 90

4.1 Grundprinzipien und wesentliche Einflussgrößen

Oberflächenabfluss entsteht durch Regen, wenn die Rückhaltungsmöglichkeiten auf Pflanzen und Bodenoberfläche erschöpft sind und die Infiltrationsrate kleiner als die Regenintensität wird. Oberflächenabfluss durch Schneeschmelze wird hier nicht behandelt. Die Rückhaltungsmöglichkeiten von Pflanzen und Bodenoberfläche einschließlich Mulch sind begrenzt (wenige Millimeter). Daher kommt der Infiltrationsrate besondere Bedeutung zu. Sie sinkt grundsätzlich während eines Regens, da das Wasser einen immer größeren Weg im Boden zurücklegen muss und da die Bodenoberfläche zunehmend verschlämmt. Wichtige, ereignisspezifische Einflussgrößen der Infiltration sind die Menge und Intensität des Regens, der verfügbare Speicherraum des Bodens und die Widerstandsfähigkeit der Bodenoberfläche gegenüber Verschlämmung. Die Regenintensität kann nicht beeinflusst werden. Der Speicherraum im Boden hängt von der Korngrößen- und Porenverteilung und der Bodenfeuchte ab. Im Sommerhalbjahr ist er durch die Transpiration der Pflanzen meist größer als außerhalb der Vegetationsperiode. Die Verschlämmung kann durch Bodenbedeckung und stabile Bodenaggregate verzögert werden. Die Einflussmöglichkeiten auf die Abflussbildung sind daher in erster Linie auf die Landnutzung und (insbesondere auf landwirtschaftlichen Flächen) die „Gestaltung“ der Bodenoberfläche, d. h. die Bedeckung und die Bodenbearbeitung, beschränkt.

4.2 Bestimmung der abflusswirksamen Niederschlagshöhe

Angesichts der zahlreichen Einflussgrößen ist eine genaue Prognose des abfließenden Teils des Niederschlags selbst mit den besten Modellen nicht möglich. Um für planerische

Fragen mit überschaubarem Aufwand die Abflussreaktion abzuschätzen, haben sich daher stark vereinfachte Verfahren etabliert. Sie beschränken sich auf wesentliche Mechanismen und klammern die Dynamik vieler Prozesse aus.

Zu den wichtigsten etablierten Ansätzen zählen Korrelationsmethoden wie Koaxialdiagramme [1, 2], das Abflussbeiwertverfahren, die Horton-Gleichung [3], der Ansatz von Lutz [4] sowie das international weit verbreitete Curve-Number-Verfahren des amerikanischen Soil Conservation Service (SCS) [5, 6], aus denen zahlreiche Adaptionen abgeleitet wurden [7–9]. Sie erlauben es, anhand historischer Regenmessungen oder mittels synthetischer Modell- und Bemessungsregen den abfließenden Teil des Niederschlags (abfluss-effektiver Niederschlag N_{eff}) eines Gebietes abzuschätzen, der wesentlich für die Planung von Wasserrückhaltmaßnahmen ist. Aus ihm lässt sich durch Multiplikation mit der Einzugsgebietsfläche (A_{EZG}) das Abflussvolumen (Q) und unter Berücksichtigung der Fließzeit die Scheitelhöhe (q_p) einer Abflusswelle abschätzen. Praxisleitfäden zur Anwendung der genannten Methoden existieren in Deutschland seit den 1980er-Jahren [10, 11]. Vor- und Nachteile der verschiedenen Ansätze werden unter anderem von [12–14] diskutiert. Empfohlen und genauer vorgestellt wird hier das Curve-Number-Verfahren, da es einfach, etabliert und hinreichend genau ist [15]. Curve Number werden im Folgenden als CN-Werte und das Verfahren mit CN-Verfahren bezeichnet. Als Alternative ist im ► Anhang 8.5 das Verfahren von Lutz beschrieben, das in einigen Bundesländern in Deutschland verwendet wird.

Der Fokus dieses Buches liegt auf der Berechnung des höchsten Abflussscheitels, da hier gleichzeitig die höchsten Wasserstände auftreten und Maßnahmen zur Hochwasserminderung üblicherweise an Ihrem Potential zur Reduktion des Wasserstands gemessen werden. Da die höchsten Abflussraten in kleinen Gebieten in der Regel bei

kurzen Regen mit hohen Intensitäten auftreten, wird hier das Verfahren vor allem für solche Fälle beschrieben. Das Verfahren lässt sich aber ebenso für andere Fragen anwenden; dann sind aber andere Regen zu betrachten. Viele Fragen beziehen sich eher auf das Abflussvolumen als auf die Abflussrate, z. B. wenn es um die Belastung von Gewässern mit gelöstem Phosphat geht oder um die Frage, wie viel Wasser der landwirtschaftlichen Fläche verloren geht und damit für die Ertragsbildung fehlt. Im Gegensatz zur maximalen Abflussrate wird das Abflussvolumen umso größer, je mehr Niederschlag fällt. Daher sind für diese Fälle mehr die langandauernden Niederschläge von Bedeutung und nicht mehr die kurzen, hochintensiven. Auch auf diese Anwendungen des CN-Modells wird im Folgenden eingegangen, wenn auch wesentlich kürzer.

4.3 Das Runoff-Curve-Number-Verfahren

Das CN-Verfahren zur Abflussprognose für Einzelereignisse wurde vom amerikanischen Soil Conservation Service (SCS) in der ersten Hälfte des 20. Jahrhunderts in kleinen, landwirtschaftlichen Einzugsgebieten in den USA abgeleitet. Hier werden nach einer Beschreibung des Verfahrens ein Anwendungsbeispiel gezeigt und verbesserte Modellparameter vorgestellt, die die Abflussprognose unter deutschen klimatischen und landwirtschaftlichen Bedingungen verbessern. Das Verfahren erlaubt es, eine Vielzahl von Einflüssen zu berücksichtigen. Für den normalen Planungsfall wird es häufig ausreichen, ► Gl. 4.1 und 4.2 und die Werte aus ■ Tab. 4.2 zu verwenden. Es werden aber zusätzliche Gleichungen angegeben, wenn Besonderheiten berücksichtigt werden sollen. Nähere Details zu dem Verfahren sind zu finden in [5, 6].

Die Spannweite möglicher Abflussanteile reicht vom vollständigen Abfluss bis zum völligen Fehlen eines Abflusses. Dem ersten Fall wird ein CN-Wert von 100 zugewiesen. Dieser Fall ist bei versiegelten Flächen nahezu, aber auch bei offenen Gewässern gegeben. Im zweiten Fall, wenn selbst bei einem unendlich langen Regen kein Abfluss auftritt, die Gebietsretention also unendlich groß ist, wird $CN=0$ (dies ist nur bei Meeren gegeben). Zwischen den beiden Extremfällen, $CN=0$ und $CN=100$, liegen alle Möglichkeiten.

Die maximal mögliche Retention S (in $L\ m^{-2}=mm$), die erst bei einem unendlich langen Regen ausgeschöpft wird, berechnet sich aus dem CN-Wert nach:

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) \quad (4.1)$$

Bei Regen, die nicht unendlich lange dauern, wird nur ein Teil dieser Maximalretention ausgenutzt. Der übrige Teil des Regens ist der abflusswirksame Niederschlag N_{eff} (ebenfalls in mm):

$$N_{eff} = \frac{(N - 0,2 \cdot S)^2}{N + 0,8 \cdot S} \quad \text{für } N > 0,2 \cdot S$$

$$N_{eff} = 0 \quad \text{für } N \leq 0,2 \cdot S \quad (4.2)$$

Anmerkung: In den meisten Publikationen wird das Ergebnis dieser Gleichung mit Q und nicht mit N_{eff} bezeichnet. Hier wird aus Gründen der Konsistenz N_{eff} verwendet. So bleibt Q der Abflusssumme eines Einzugsgebietes (Wellenvolumen) vorbehalten, das sich aus der Multiplikation von N_{eff} mit der Einzugsgebietsfläche A_{EZG} ergibt (► Gl. 2.4), und so wird im Lutz-Verfahren wie im CN-Verfahren die gleiche Abkürzung für den gleichen Parameter verwendet.

Abfluss tritt demnach erst dann auf, wenn der Niederschlag mehr als 20 % der maximal möglichen Retention beträgt (in einigen Varianten des Verfahrens wird anstelle von 20 % auch 5 % verwendet, z. B. [16]). Mit zunehmendem Niederschlag wird ein immer

kleinerer Anteil der noch nicht aufgefüllten Retention ausgeschöpft, sodass die Maximalretention S dann im Unendlichen erreicht wird.

Für verschiedene Böden und Flächennutzungen liegen tabellierte Werte vor (■ Tab. 4.1), die weltweit verwendet werden. Demnach steigt der CN-Wert mit zunehmender Abflussneigung der Böden von der hydrologischen Bodengruppe A bis zur hydrologischen Bodengruppe D (zur Bestimmung der Bodengruppe s. ► Anhang 8.6) und bei den Nutzungen von „Kleegras über Wald, Wiese,“ Weide, Getreide, Reihenkulturen, Brachephassen zu Feldwegen und versiegelten Flächen hin an. Zur Ermittlung der Abflusshöhe eines Einzugsgebietes müssen die Flächennutzungen mit den örtlichen hydrologischen Bodengruppen verschnitten werden. Für die resultierenden homogenen Teilflächen sind die CN-Werte und deren Abfluss zu ermitteln [6]. Eine gewichtete Mittelung von CN-Werten würde dagegen aufgrund des nicht-linearen Zusammenhangs zwischen S und CN vor allem bei moderaten Regen < 50 mm zu Fehlern im Abflussbeiwert von bis zu 50 % führen [7].

■ Tab. 4.1 suggeriert, dass der CN-Wert einer Landnutzung im Wesentlichen konstant ist bzw. auf landwirtschaftlichen Flächen zwischen zwei Werten variiert (einer für die Brachezeiten, bei wenig Bodenbedeckung und damit hoher Abflussneigung und einer für weitgehend voll entwickelte Bestände und damit geringer Abflussneigung). Dies ist stark vereinfachend und lässt die jahreszeitliche Dynamik vieler Kulturen außer Acht. Ein großer Teil des Jahresgangs in der Abflussneigung entsteht auf Ackerflächen durch den regelmäßigen Wechsel zwischen den Kulturen und den dazwischenliegenden Brachezeiten. Die Brache macht häufig ein Drittel, in ungünstigen Fällen sogar zwei Drittel des Jahres aus. Ein besonders ungünstiger Fall ist gegeben, wenn zwischen der Getreideernte im Juli und einem darauffolgenden Mais, bei dem wesentliches Wachstum erst im Mai auftritt, eine zehn Monate dauernde Brachephase

liegt. Selbst bei Dauerkulturen können lange Brachephassen auftreten. Extremfall wäre hier der Spargel, bei dem die Ernte wesentliches Wachstum erst im Juli zulässt. Ein weiterer Einfluss, der einen Jahresgang der Abflussneigung bewirkt, ist der variierende Porenfüllungsgrad des Bodenwasserspeichers. Die Werte in ■ Tab. 4.1 gelten daher nur für eine mittlere Bodenfeuchte (in der englischsprachigen Literatur wird dieser Zustand häufig mit „antecedent moisture condition II“ bezeichnet und der zugehörige CN-Wert mit CN_{II} symbolisiert).

Zusätzlich bestimmen zwei weitere Faktoren den Jahresgang der Abflussneigung einer Kultur: Erstens sinkt die Verschlammungsneigung, je besser bedeckt ein Boden ist. Daher nimmt der CN-Wert im Laufe der Vegetationsentwicklung ab. Zweitens kann ein Boden umso mehr Wasser aufnehmen, je stärker ausgetrocknet er ist. Da sowohl die Verschlammung als auch die Entleerung des Bodenspeichers an einen wüchsigen Pflanzenbestand gekoppelt sind, wird der Jahresgang meist über eine Anpassung anhand des Bodenwasservorrats erreicht (■ Abb. 4.1), der aber beide Einflüsse zusammenfasst. Weicht die Bodenfeuchte stark von mittleren Bedingungen ab (CN_{II}), sind daher die Werte in ■ Tab. 4.1 mithilfe der folgenden Gleichung [19] anzupassen:

$$CN = \frac{CN_{II} \cdot 3,0646 \cdot e^{0,0235 \cdot M}}{10 + CN_{II} \cdot (0,030646 \cdot e^{0,0235 \cdot M} - 0,1)} \quad (4.3)$$

Der Parameter M steht dabei für den prozentualen Porenfüllungsgrad des Bodens mit $M=0$ für einen völlig trockenen Boden und $M=100$ für einen völlig gesättigten Boden. Beide Fälle kommen in der Natur praktisch nicht vor. Im Normalfall können Böden nur zwischen dem permanenten Welkepunkt (M kann dann mit 15 angenommen werden) und der Feldkapazität (M ist dann etwa 85) variieren.

Eine Austrocknung unterhalb der Bodenoberfläche ist nur möglich, wenn ein wüchsiger Pflanzenbestand vorhanden ist,

Tab. 4.1 CN-Werte (Curve Number) bei mittlerer Entleerung des Bodenwasserspeichers (CN_{II}) für verschiedene Bodennutzungen und hydrologische Bodengruppen (nach [17], verändert). Die Tabelle wird nur für Flächennutzungen mit geringem Jahresgang empfohlen (offene Wasserflächen, Wald, Grünland, Siedlungsgebiete unterschiedlicher Dichte), während für Ackerkulturen die Gleichung in **Abb. 4.3** verwendet werden sollte. Auch bei Flächennutzungen mit geringem Jahresgang muss die hohe Bodenfeuchte im Winter berücksichtigt werden. Hinweise zur hydrologischen Bodengruppe können **Anhang 8.6** entnommen werden

Landnutzung	Abfluss- neigung	Hydrologische Bodengruppe			
		A	B	C	D
Offene Wasserflächen		100	100	100	100
Unbewachsener Boden ^a		77	86	91	94
Reihenfrüchte ^b	Hoch	72	81	88	91
	Niedrig	67	78	85	89
Getreide ^c	Hoch	65	76	84	88
	Niedrig	63	75	83	87
Klee gras/Luzerne ^d	Hoch	25	47	64	72
	Niedrig	24	43	61	70
Weide		39	61	74	80
Wiese		30	58	71	78
Wald	Hoch ^e	45	66	77	83
	Mittelf ^f	36	60	73	79
	Niedrig ^g	25	55	70	77
Wein (terrassiert)		64	73	79	82
Dörf l. Siedlung, Außensiedlung		59	74	82	86
Städtische Siedlung		61	75	83	87
Sport-/Golfplätze		39	61	74	80
Industrie/Gewerbegebiete/Straßen		89	92	94	95
Wege, befestigt		74	84	90	92
Wege, wassergebunden		72	82	87	89
Abbauland ^h		77	86	91	94

^aZum Beispiel gepflügte Flächen oder Saatbett, bevor mindestens 10 % Bedeckung erreicht ist

^bMais, Zuckerrüben, Kartoffeln, Sonnenblumen und Ackerbohnen; Hopfen und Spargel werden in ihrer hydrologischen Wirkung ebenfalls wie Reihenfrüchte behandelt; hohe Abflussneigung entsteht insbesondere bei weitem Reihenabstand (Extremfall Spargel mit 1,2 m, aber auch bei konventionell angebautem Mais), spätem Wachstum (Extremfall wiederum Spargel, aber auch konventioneller Mais) und Bodenverdichtung durch schwere Erntemaschinen (besonders bei Silomais, Zuckerrüben, Kartoffeln) und Güllewagen. Weiter ist eine hohe Abflussneigung besonders in der Etablierungsphase (weniger als 50 % Bodenbedeckung) gegeben

^cWeizen, Gerste, Hafer, Roggen, Dinkel, Triticale, aber auch Raps und Buchweizen; hohe Abflussneigung liegt bei Getreide besonders in Jahren nach Reihenkulturen mit hohen Erntegewichten (besonders bei Silomais, Zuckerrüben, Kartoffeln) vor. Eine mittlere Abflussneigung ist im zweiten Getreidejahr zu erwarten. Weiter ist eine hohe Abflussneigung besonders in der Etablierungsphase (weniger als 50 % Bodenbedeckung) gegeben. Besonders niedrige Abflussneigung tritt in Jahren nach mehrjährigem Ackerfutter (z. B. Klee gras) auf. Diesen Fall findet man besonders im organischen Landbau

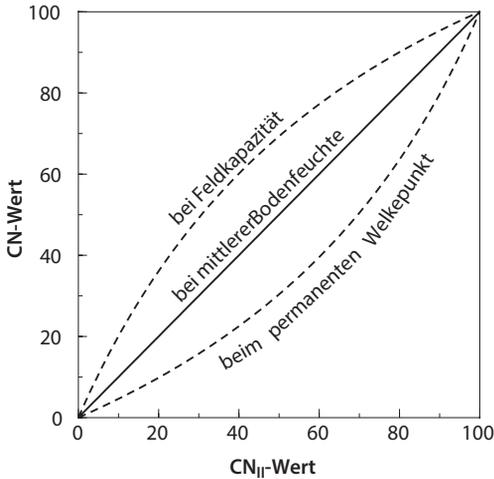
^dDie Werte weichen von den üblichen Tabellen ab. Sie folgen [18]. Die höheren Zahlen gelten im Etablierungsphase, die niedrigeren Zahlen gelten im Folgejahr. Erfolgt die Etablierung nicht mit Saatbettbereitung, sondern mit Untersaat, sind für das erste Jahr Zwischenwerte zu verwenden

^eWälder und Forsten mit serpentinenartig ausgebauten, Lkw-befahrbaren Forststraßen

^fWälder und Forsten mit traditionellen Forstwegen

^gUrwaldähnliche, gestuft aufgebaute Wälder mit geringer (Forst-)Straßendichte

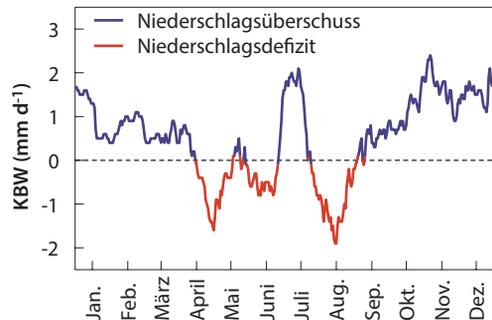
^hSand-, Kies- Steinabbau, aber auch Bauplätze



■ **Abb. 4.1** Anpassung des für mittlere Feuchteverhältnisse gültigen CN-Wertes CN_{II} an abweichende Feuchteverhältnisse (Nach [19])

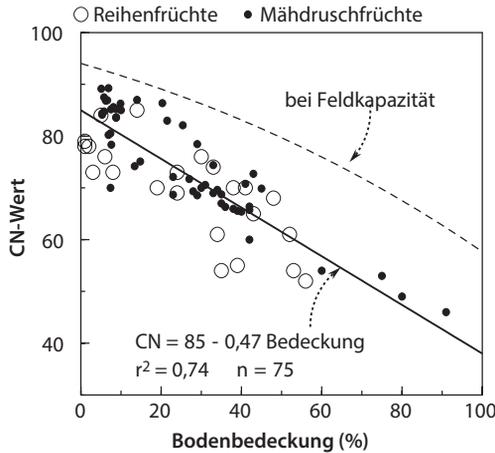
dessen Wurzeln aus dem Boden Wasser entnehmen, und wenn die klimatische Wasserbilanz (also die Differenz aus Niederschlag und potenzieller Evapotranspiration) über längere Zeit negativ ist. Eine negative klimatische Wasserbilanz tritt an einem mittleren Standort in Deutschland (mittlerer Jahresniederschlag 850 mm a^{-1}) im Mittel nur im Mai und im August auf, während in allen anderen Monaten die klimatische Wasserbilanz nahe null oder deutlich positiv (Oktober bis April) ist (■ **Abb. 4.2**). Daraus folgt, dass in der meisten Zeit des Jahres die CN-Werte einer bestimmten Flächennutzung nur zwischen der mittleren Linie in ■ **Abb. 4.1** (50 % nutzbare Feldkapazität) und der oberen Linie (100 % Feldkapazität) liegen können, wenn nur die Bodenfeuchte einen Einfluss hätte. Da sich besonders der Niederschlag in einzelnen Jahren nicht ans langjährige Mittel hält, kann allerdings ein deutliches Wasserbilanzdefizit auch in anderen Monaten auftreten; und ebenso ist in allen Monaten möglich, dass der Bodenwasservorrat aufgefüllt ist, also sehr feuchte Bedingungen vorliegen. Daher tritt eine erhebliche Streuung um einen mittleren Jahresgang auf.

Da beide Einflüsse – Verringerung der Verschlammungsneigung und Entleerung des Bodenwasserspeichers – an einen wüchsigen Pflanzenbestand gekoppelt sind, lassen sie sich im Normalfall kaum trennen. In Gebieten, in denen mehrere aride Monate mit negativer Wasserbilanz hintereinander auftreten, ist der Einfluss der Entleerung des Bodenwasserspeichers größer, und daher wird dort die Beziehung in ■ **Abb. 4.1** zur Erzeugung des Jahresgangs empfohlen. In Deutschland spielt dagegen der Jahresgang der Bodenfeuchte in den meisten Jahren nur eine untergeordnete Rolle (■ **Abb. 4.2**). Vor allem auf ackerbaulich genutzten Flächen, die über 40 % der Landesfläche ausmachen, wird der Jahresgang der Verschlammbarkeit gesteuert. Da der mittlere Jahresgang der Bodenfeuchte wegen der nahezu durchgehend humiden Bedingungen die Unterschiede in der Verschlammbarkeit nicht nachzeichnen kann, liegt es nahe, die CN-Werte direkt aus der Bedeckung zu schätzen, um zu einem Jahresgang zu kommen. In ■ **Abb. 4.3** sind dazu 75 Berechnungsversuche bei unterschiedlichen



■ **Abb. 4.2** Langjährig mittlere klimatische Wasserbilanz (KBW) für einen Standort in Süddeutschland (mittlerer Jahresniederschlag 850 mm a^{-1} ; mittlere potenzielle Verdunstung 630 mm a^{-1}); nur im Mai und im August werden etwa 40 mm aus der nutzbaren Feldkapazität entnommen. Für einen mittleren Boden mit 80 mm nutzbarer Feldkapazität ist dann der Zustand erreicht, für den die in ■ **Tab. 4.1** aufgelisteten Werte gelten. Besonders für November bis April ist dagegen ein Zuschlag bei den CN-Werten wegen hoher Bodenfeuchte vorzusehen

4.3 · Das Runoff-Curve-Number-Verfahren



■ **Abb. 4.3** Einfluss der Bodenbedeckung auf die bei 75 Berechnungsversuchen mit etwa 65 mm Niederschlag auf unterschiedlichen Standorten und bei unterschiedlichen Kulturen gemessenen CN-Werte (jeweils umgerechnet auf die hydrologische Bodengruppe C; Reihenfrüchte waren Zuckerrüben und Mais; Mähdruschfrüchte waren verschiedene Getreidearten und Raps). Die berechnete Veränderung der Beziehung bei hoher Bodenfeuchte (nahe der Feldkapazität in den Wintermonaten) ist gestrichelt eingezeichnet. Die Daten stammen von [20–23]

Kulturen (Getreide, Raps, Zuckerrüben, Mais) auf unterschiedlichen Standorten zusammengestellt (Daten aus [8, 20, 21]). Unabhängig von der Kultur folgen die gemessenen CN-Werte einer gemeinsamen Beziehung, die zur Schätzung des Jahresgangs verwendet werden kann:

$$CN_{II} = 85 - 0,47 \cdot \text{Bedeckung} \quad (4.4)$$

Die Gleichung gilt für die hydrologische Bodengruppe C. Zur Übertragung in die Bodengruppen A, B und D dienen ► Gl. 4.5 bis ► Gl. 4.7. Die ► Gl. 4.4 ist einfacher zu handhaben als ■ Tab. 4.1, da nicht zwischen Zeiten (und Kulturen) mit hoher und niedriger Abflussneigung unterschieden werden muss. Ein weiter Reihenabstand oder ein frühes Stadium der Vegetationsentwicklung, die beide für eine hohe Abflussneigung verantwortlich sein können, werden durch die Bedeckung gleichermaßen und hinreichend gut erfasst. Eine Validierung dieser

Beziehung bei kleinen Regnen, bei Regnen mit Regnenpausen, bei Regnen auf verschlammter Bodenoberfläche durch vorangegangene Starkregen und bei natürlichen Regnen findet sich im ► Anhang 8.10.

Die in ■ Abb. 4.3 gezeigten Berechnungen wurden nur während der Vegetationsperiode durchgeführt. Die Messwerte gelten daher nur für Bedingungen, in denen der Bodenwasserspeicher teilweise entleert ist. Für die Wintermonate (November bis März; je nach Vegetationsperioden der Kulturen etwas unterschiedlich) ist eine Anpassung nach ■ Abb. 4.1 bzw. ► Gl. 4.3 notwendig, um die dann überdurchschnittliche Bodenfeuchte zu berücksichtigen. Zur einfacheren Handhabung sind in ■ Tab. 4.2 die monatlichen CN-Werte wichtiger Landnutzungen zusammengestellt, die die Einflüsse von Brachep perioden, variierender Bedeckung und Bodenfeuchte auf den Jahresgang berücksichtigen. Sie wird als zentrale Tabelle zur Anwendung des CN-Verfahrens in Deutschland empfohlen.

Mittelt man die monatlichen CN-Werte entsprechend des Anteils der verschiedenen Flächennutzungen (was, wie oben dargestellt, nicht ganz korrekt ist) und vergleicht dies mit CN-Werten, die aus gemessenen Ereignisabflüssen ermittelt wurden, so zeigt sich eine bemerkenswert gute Übereinstimmung des Jahresgangs (■ Abb. 4.4).

In der Literatur findet man nur wenige Fälle, in denen die CN-Werte nach der Bedeckung differenziert werden. Dagegen wird die Feuchtekorrektur häufig angewendet, obwohl sie in humiden Gebieten eigentlich nur in der Winterperiode oder unter Bedingungen, bei denen die Bodenfeuchte auf Werte nahe der Feldkapazität ansteigt, notwendig wäre. Die häufige Verwendung der Feuchtekorrektur liegt zum einen daran, dass zur Landnutzung oft keine hinreichenden Daten vorliegen und sie daher nur sehr pauschal berücksichtigt wird. Dagegen kann die Bodenfeuchte, wenn auch stark vereinfacht, allein durch meteorologische Daten abgeschätzt werden, selbst

Tab. 4.2 Monatliche CN-Werte unterschiedlicher Ackerkulturen unter deutschen Anbaubedingungen und von Grünland, Wald, Siedlungs- und Verkehrsflächen für die hydrologische Bodengruppe C. Die Tabelle berücksichtigt den Jahresgang in der Vegetationsentwicklung und gegebenenfalls Brachephasen. Für die Monate Mai bis September (je nach Vegetationsverlauf für die verschiedenen Kulturen etwas unterschiedlich) wurden mittlere Feuchteverhältnisse angenommen und ► Gl. 4.4 verwendet. Für die Monate November bis März wurde angenommen, dass die Bodenfeuchte nahe der nutzbaren Feldkapazität liegt, und die CN-Werte wurden nach ► Abb. 4.1 korrigiert. Für die dazwischenliegenden Monate April und Oktober wurden Zwischenwerte verwendet. Der Jahresgang der Bodenbedeckung bei Ackerkulturen wurde aus [24] bzw. [25] entnommen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurden mehrere Kulturen (z. B. verschiedene Wintergetreidearten) und Flächennutzungen (z. B. verschiedene Formen des Grünlandes, der Wälder, der Siedlungs- und Verkehrsflächen) zusammengefasst und müssten gegebenenfalls differenziert werden.

	J	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Sommergetreide ^a	95	95	95	80	46	44	44	44	87	91	95	95
Wintergetreide ^b	95	88	66	54	44	44	70	80	87	91	95	95
Mais ^c	94	94	94	90	88	73	50	43	62	85	90	94
Zuckerrüben ^c	95	94	94	88	86	62	50	43	41	70	91	95
Kartoffeln	95	94	94	88	86	62	50	45	43	70	91	95
Kleegras ^d	82	82	73	62	62	62	62	62	62	62	62	71
Grünland	87	87	87	79	72	72	72	72	72	79	87	87
Wald	88	88	88	80	73	73	73	73	73	80	88	88
Siedlung	93	93	93	87	82	82	82	82	82	87	93	93
Verkehr	98	98	98	96	94	94	94	94	94	96	98	98

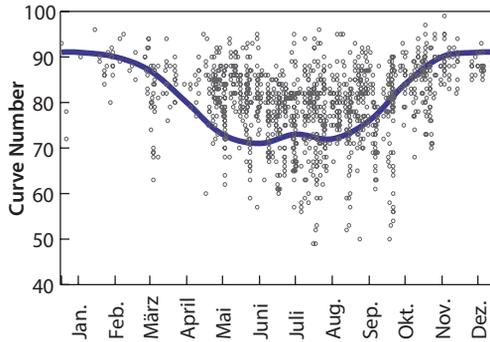
^aVor allem Sommerweizen, Sommergerste und Hafer
^bVor allem Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen, Triticale, aber auch Raps
^cKonventioneller Anbau; bei Mulchsaat und besonders bei Mulchdirektsaat deutliche Abschläge (s. ► Abb. 4.3)

wenn keine genauen Informationen über die Porengrößenzusammensetzung des Bodens und den prozentualen Porenfüllungsgrad zur Verfügung stehen. Dies erscheint daher als die einfachere Option, als Landnutzungsdaten zeitdifferenziert zu erheben. Noch wichtiger für die weite Verbreitung der Feuchtekorrektur ist aber ein zweiter Grund. Die Feuchtekorrektur erlaubt scheinbar relativ einfach und plausibel, einen Datenfehler zu beseitigen, der oft vorliegt. Dies soll an einem kleinen Beispiel illustriert werden:

Das CN-Modell ist ein Ereignismodell und erfordert daher Ereignisniederschläge. Meteorologische Quellen weisen aber häufig

nur Tagesniederschläge aus, die zu falschen Aussagen führen. Angenommen ein 60-mm-Niederschlag fällt gleichmäßig über zwei Tage verteilt (je 30 mm). Wenn der CN-Wert 80 beträgt, dann ergibt sich für das 60-mm-Ereignis ein Abfluss von 20,2 mm. Rechnet man dagegen mit zwei Tagesniederschlägen von 30 mm, so ergibt sich an beiden Tagen ein Abfluss von jeweils 3,7 mm, in der Summe also nur 7,4 mm. Die Differenz kommt daher, weil bei ereignisweiser Berechnung am ersten Tag zwar auch nur 3,7 mm abfließen, am zweiten Tag aber (20,2–3,7) 16,5 mm. Damit ist die Berechnung mit Tagesniederschlägen in so einem Fall grob falsch. Hier

4.3 · Das Runoff-Curve-Number-Verfahren



■ **Abb. 4.4** Mittlerer Jahrgang der CN-Werte, wenn man die Landnutzungsverteilung von Bayern zugrunde legt (Linie). Zum Vergleich sind 1174 CN-Werte eingezeichnet (Symbole), die aus Ereignisabflüssen von 22 Einzugsgebieten in Bayern mit Flächengrößen von 12 bis 170 km² berechnet wurden (Daten aus [26])

kommt nun die Feuchtekorrektur ins Spiel. Da am ersten Tag 30 mm fallen, muss die Bodenfeuchte stark ansteigen. Wird beispielsweise angenommen, dass der Porenfüllungsgrad von 50 % auf 80 % steigt, ist der CN-Wert am zweiten Tag nach ▶ Gl. 4.3 nicht mehr 80 sondern 89. Der Abfluss des zweiten Tages ist daher nicht mehr 3,7 mm, wie am ersten Tag, sondern am zweiten Tag wird dann ein Abfluss von 10,1 mm erwartet, obwohl an dem Tag auch nur 30 mm Niederschlag fallen. Die Diskrepanz zur korrekten Berechnung ist daher wesentlich vermindert, auch wenn immer noch eine Diskrepanz bleibt. Vergleicht man nun die Berechnung mit Feuchtekorrektur mit gemessenen Abflüssen in Gewässern, zeigt sich eine wesentlich bessere Übereinstimmung als ohne Feuchtekorrektur. Daraus wird häufig gefolgert, dass eine Feuchtekorrektur unbedingt notwendig ist. Dabei hat sie nur den Fehler, der durch die Verwendung von Tagesniederschlägen entstand, etwas vermindert. Ohne diesen Fehler wäre sie nicht notwendig gewesen. Oder umgekehrt: Liegen nur Tagesniederschläge vor, sollten Regentage nach Regentage als ein zusammenhängendes Ereignis betrachtet werden. Für zwei aufeinander-

folgende Regentage ergäbe sich daher folgender Rechenweg: Der Abfluss des ersten Regentages ergibt sich durch die übliche Berechnung. Der Abfluss des zweiten Regentages wird dagegen berechnet, indem man den Regen beider Tage addiert, den Abfluss für diese Regensumme berechnet und von diesem Abfluss den Abfluss des ersten Regentages abzieht. Die Eignung dieses Verfahrens wird im ■ Abb. 8.25 anhand experimenteller Daten gezeigt. Es gilt auch für feiner aufgelöste Daten mit kurzen Regenspauzen. Letztere dürfen beim CN-Verfahren nicht als Kriterium für die Trennung von Ereignissen verwendet werden.

■ Tab. 4.2 differenziert scheinbar stark bei Ackerkulturen und wenig bei anderen Landnutzungen. Dies ist aber nur scheinbar so, da die Jahrgänge der verschiedenen Ackerkulturen sich sehr viel stärker unterscheiden als beispielsweise die Jahrgänge der verschiedenen Grünland- oder Waldtypen. Für Grünland und Wald wurden nur mittlere Verhältnisse berücksichtigt, aber zusammen mit ■ Tab. 4.1 kann auch leicht ein Jahrgang für andere Verhältnisse erzeugt werden. Zur weiteren Differenzierung von Wäldern und alpinen Boden/Vegetationseinheiten sei auf [27] verwiesen, die allerdings keine CN-Werte ausweisen und vor allem nach dem Boden und damit indirekt nach der Hydrologischen Bodengruppe differenzieren.

Für Ackerkulturen wäre dagegen viel eher eine weitere Differenzierung notwendig, da sich beispielsweise die Wintergetreidearten Wintergerste und Winterweizen besonders von Spätherbst bis Frühjahr stark in ihrem Wachstum unterscheiden. Auch wird nicht zwischen den verschiedenen Anbauformen unterschieden. Darauf wird weiter unten noch etwas näher eingegangen. In einzelnen Fällen kann es daher notwendig sein, ■ Tab. 4.2 zu erweitern. In den meisten Fällen, in denen viele Nutzungen und Nutzungsvarianten in einem Einzugsgebiet auftreten und die genauen Bedingungen häufig nicht bekannt sind, dürfte ■ Tab. 4.2 ausreichend differenziert sein.

In **Tab. 4.2** fällt weiter auf, dass besonders in den Sommermonaten die CN-Werte von Wald z. T. über den von Ackerkulturen liegen, was zunächst verwundert. Auch wenn CN-Werte für Wald unter deutschen Klimabedingungen einer Überprüfung bedürfen, dürfte diese Diskrepanz vor allem auf zwei Fehleinschätzungen beruhen. Erstens stocken viele Wälder auf relativ steinigen, grobkörnigen Substraten, die eher den hydrologischen Bodengruppen A oder B angehören, aber nicht der Boden­gruppe C, die in **Tab. 4.2** ausgewiesen ist. Wie aus **Tab. 4.1** ersichtlich ist, nimmt der CN-Wert bei diesen Bodengruppen deutlich ab, was auch mit der Einstufung des Oberflächenabflussbeiwertes nach [27] übereinstimmt, der Wälder im Wesentlichen nach den Böden differenziert. Niedrige Abflüsse unter Wald sind daher vor allem auf Bodeneigenschaften zurückzuführen, die in **Tab. 4.2** ausgeklammert sind, aber mit **Gl. 4.5, 4.6** und **4.7** einfach berücksichtigt werden können. **Abb. 8.24** im Anhang zeigt den damit berechneten Jahresgang der CN-Werte unter Wald für die hydrologischen Bodengruppen A, B und C. Nicht in diesen Gleichungen berücksichtigt ist, dass auf steinigen, grobkörnigen Substraten die Feuchtefluktuation wesentlich stärker ist als auf den überwiegend lehmigen, von Ackerbau dominierten Böden der hydrologischen Boden­gruppe C, die ein deutlich höheres Wasserspeichervermögen aufweisen. Dies zeigen auch Messungen und Modellierungen kleiner, forstlich genutzter Bacheinzugsgebiete im Hunsrück, die eine enorme Variabilität der Gebietsabflüsse bis hin zu vollständigem Trockenfallen aufzeigten, wobei jedoch die Menge an Oberflächenabfluss gleichzeitig sehr hoch war [28]. Eine zusätzliche Berücksichtigung der Bodenfeuchtefluktuation während der Vegetationsperiode nach **Gl. 4.3** kann also besonders bei Wäldern angebracht sein.

Zweitens beruht diese Diskrepanz z. T. darauf, dass bei Wäldern der Abfluss stark verzögert und damit mit geringem Scheitel

fließt. Dies wird aber bei der Abflusskonzentration berücksichtigt und bedeutet nicht, dass die Abflussmenge gering ist. Auch dies zeigen die detaillierten Untersuchungen von [28]: Eine tatsächliche Versickerung und Grundwasserneubildung unter Wald trat fast nur in Kamm- und Oberhanglagen auf, während auf Mittelhängen langsam fließender Zwischenabfluss dominierte. Auf den feuchten Unterhängen dominierte Sättigungsflächenabfluss. Die Unterhänge waren daher hauptverantwortlich für den (schnellen) Hochwasserabfluss. In der Summe aus langsam fließenden Zwischenabfluss und schnellem Sättigungsflächenabfluss verließen pro Jahr bis zu 53 % der eingehenden Niederschläge den Modellhang von [28] als Abfluss, was ein hohes Abflusspotenzial auch bei Wäldern belegt. In **Anhang 8.10** im Anhang findet sich eine genauere Analyse der Daten aus [28] und der Vergleich mit den in **Tab. 4.2** empfohlenen Werten.

Gl. 4.3 und **Tab. 4.2** gelten für mittlere hydrologische Verhältnisse (hydrologische Boden­gruppe C). Für abweichende hydrologische Bodengruppen müssen die Werte angepasst werden. Dies ist mit folgenden Regressionen möglich, die sich aus den Werten der **Tab. 4.1** ergeben. Die CN-Werte für die hydrologische Boden­gruppe A (CN_A) berechnet sich aus den CN-Werten der hydrologischen Boden­gruppe C (CN_C):

$$CN_A = 2,38 \cdot CN_C - 136,6 \quad (4.5)$$

Für die CN-Werte der hydrologische Boden­gruppe B (CN_B) gilt:

$$CN_B = 1,46 \cdot CN_C - 46,4 \quad (4.6)$$

Und für die CN-Werte der hydrologische Boden­gruppe D (CN_D) gilt:

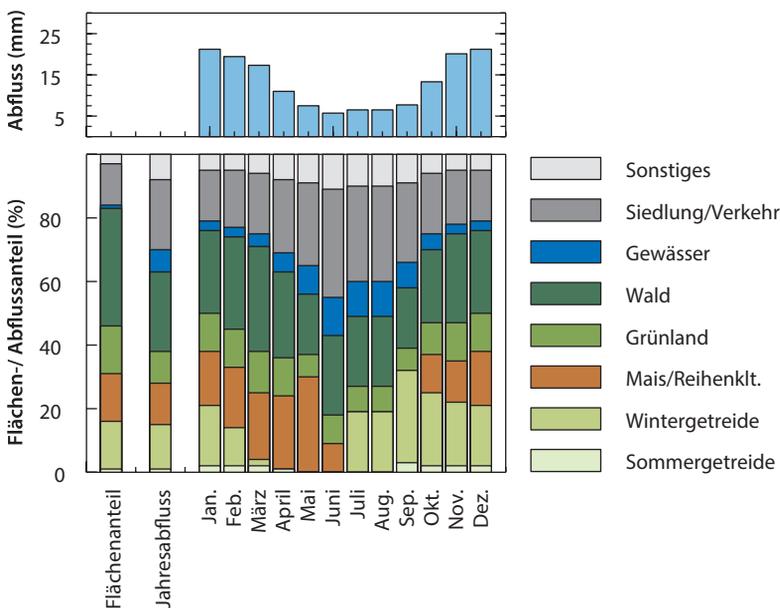
$$CN_D = 0,78 \cdot CN_C + 22,5 \quad (4.7)$$

Welchen Einfluss der Jahresgang der CN-Werte auf die Menge an Oberflächenabfluss hat, lässt sich aus den CN-Werten nicht direkt ablesen. Dazu müssen **Gl. 4.1** und **4.2** auf die CN-Werte der verschiedenen

Kulturen und Flächennutzungen angewendet werden. Zur Illustration wurde in allen Monaten ein einheitlicher Bemessungsniederschlag von 40 mm zugrunde gelegt, um den Vergleich der Monate zu erleichtern. Dabei zeigt sich, dass sich durch den Jahresgang in der Vegetationsentwicklung und der Entleerung des Bodenspeichers auch ein sehr ausgeprägter Jahresgang in der Abflussbildung ergibt (Abb. 4.5). Während in den Wintermonaten etwa 50 % eines 40-mm-Regens abfließen, sind es in den Sommermonaten nur etwa 15 % (angenommen wurde einheitlich die hydrologische Bodengruppe C und die Landnutzungsverteilung in Deutschland).

Noch deutlicher wird der ausgeprägte Jahresgang, wenn man sich den Beitrag der verschiedenen Flächennutzungen zum Gesamtabfluss anschaut. Die Siedlungs- und Verkehrsflächen und auch die offenen Gewässer tragen weit mehr, als ihrem Flächenanteil entspricht, zum Gesamtabfluss bei. Dies ist besonders ausgeprägt in

den Sommermonaten, während der Hauptwachstumsphase der Ackerkulturen. Wald und Grünland tragen weniger bei, als ihrem Flächenanteil entspricht, aber ihr Anteil am Gesamtabfluss ist wegen ihres großen Flächenanteils nicht unerheblich. Insbesondere ist der Beitrag des Waldes durch die starke Zerschneidung und den Eingriff in den Bodenwasserhaushalt durch den Forststraßenbau nicht unbedeutend. Die ackerbaulichen Flächennutzungen Sommergetreide, Wintergetreide und Mais tragen im Mittel genauso viel zum Gesamtabfluss bei, wie ihrem Flächenanteil entspricht. Allerdings sind die jahreszeitlichen Unterschiede enorm. Wintergetreide einschließlich Raps dominieren den Abfluss von Ackerflächen von Juli, wenn die Ernte beginnt, bis zum Februar. Mit Einsetzen der Hauptwachstumsphase im März wird der Anteil des Wintergetreides verschwindend gering. Ab dann bis in den Frühsommer dominiert der Abfluss von Flächen



■ **Abb. 4.5** Mittlerer erwarteter Abfluss (oben) bei einem Regeneignis mit 40 mm und der Landnutzungsverteilung in Deutschland auf einem Standort der hydrologischen Bodengruppe C. Die untere Tafel zeigt den Anteil der verschiedenen Kulturen und Landnutzungen an der Gesamtfläche (zu Gruppen zusammengefasst, um die Lesbarkeit zu erhöhen) und ihren Beitrag zum oben dargestellten Gesamtabfluss

mit Mais und anderen Hackfrüchten. Löst man feiner auf, z. B. zwischen verschiedenen Wintergetreidearten und zwischen verschiedenen Hackfrüchten, treten wegen des versetzten Wachstums weitere Unterschiede zutage.

4

Wirkung einer heterogenen Landnutzung

Je heterogener die Landnutzung ist, umso geringer wird die Gefahr, dass bei einem Regen alle Flächen gleichzeitig liefern. Eine heterogene Landnutzung ist die effizienteste Form, eine hohe Abflussminderung in der Fläche zu erreichen.

Bei kleineren Regen als dem angenommenen Bemessungsniederschlag von 40 mm werden die Unterschiede noch größer, da dann manche Landnutzungen zu manchen Jahreszeiten überhaupt keinen Abfluss liefern, sondern bei ihnen der Regen vollständig infiltriert.

Dies Lücke des Mais und anderer Hackfrüchte im Winter, Frühjahr und Frühsommer wird idealerweise durch den Anbau einer abfrierenden Zwischenfrucht direkt nach der Getreideernte geschlossen (z. B. Senf, Ölrettich oder Phazelia). Die Zwischenfrucht kann ohne wendende Bodenbearbeitung gesät werden, sodass das Getreidestroh den Boden bedeckt, bis diese Aufgabe die im Sommer rasch keimende Zwischenfrucht übernimmt. In die abgefrorene Zwischenfruchtdecke wird dann die folgende Hauptfrucht, also z. B. Mais, am besten in Mulchdirektsaat angebaut, um keine Lücke im Frühsommer entstehen zu lassen (Direktsaat bedeutet, dass gesät wird, ohne die Mulchdecke durch eine Bearbeitung zu beeinträchtigen). Mulchsaat mit einer Bodenbearbeitung bei der Aussaat der Hauptfrucht mindert die Abflussneigung im Frühsommer nicht mehr, weil durch die Bearbeitung nach der Aussaat nur wenig

Mulchbedeckung übrigbleibt. In beiden Fällen – Mulchsaat oder Mulchdirektsaat – sinkt durch die im Herbst angebauten und bis zum Winter wachsenden Zwischenfrüchte aber die Abflussneigung in den Wintermonaten deutlich, wenn die Abflussneigung generell am höchsten ist (Abb. 4.6). Dieser Zusammenhang ist auch durch Messdaten belegt [22]. Ähnlich günstige Werte wurden für nicht

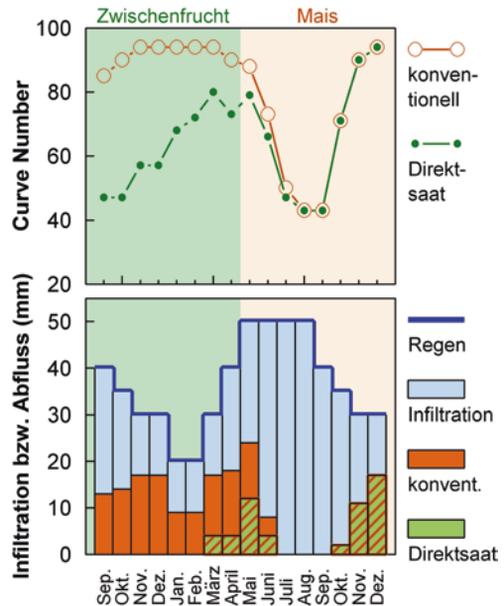


Abb. 4.6 oben: Jahresgang der CN-Werte von konventionell angebautem Mais und von Mais in Mulchdirektsaat, beginnend im September des Vorjahres (nach einer Getreidevorfrucht). Wird statt Mulchdirektsaat die Saat von Mais mit einer Bodenbearbeitung kombiniert (Mulchsaat), sind ab einschließlich Mai die Werte für konventionellen Mais zu verwenden, während davor die Werte gleich sind wie bei Mulchdirektsaat. Die Werte gelten für die hydrologische Bodengruppe C. Unten: Zur Illustration der Wirkung wurde der Abfluss berechnet. Dabei wurde ein Regen von 50 mm im Sommer, ein Regen von 20 mm in den Wintermonaten und Zwischenwerte in den übrigen Monaten angenommen. Grün ist der zu erwartende Abfluss bei Mulchdirektsaat-Mais, braun ist der bei konventionell angebautem Mais zusätzlich zu erwartende Abfluss und blau ist der infiltrierende Anteil des Regens. Die Summe der drei Balken entspricht daher der Regenhöhe

bearbeiteten („no-till“) Mais, gemessen, der aber in Deutschland nicht verbreitet ist. Langzeitversuche ergaben dafür mittlere CN-Werte von 66, wohingegen die mittleren CN-Werte bei konventioneller (wendender) Bearbeitung bei rund 90 lagen [18].

Der Einfluss der Hangneigung auf die Abflussbildung wird in der Literatur kontrovers diskutiert. Physikalisch betrachtet lässt die Hangneigung zunächst keinen eindeutigen Einfluss auf die Infiltration erwarten, im Gegensatz zur Fließgeschwindigkeit von Oberflächenabfluss, die stark von der Hangneigung abhängt (s. GMS-Gl. 5.5). Trotzdem finden sich Einflüsse der Hangneigung auf den Abfluss; Messungen haben sowohl die Zunahme als auch die Abnahme der Infiltrationsrate mit zunehmender Hangneigung gezeigt [29]. Eine Zunahme der Infiltration und damit die Abnahme des Oberflächenabflusses auf wenig bedeckten, relativ glatten Oberflächen wird dadurch erklärt, dass mit zunehmender Hangneigung die Erosion durch die erhöhte Fließgeschwindigkeit zunimmt [30, 31]. In Folge geht die Verschlämmung der Bodenoberfläche zurück, wodurch ihre Infiltrationsfähigkeit erhalten bleibt. Im Landschaftsmaßstab wirkt zusätzlich ein weiterer Prozess. Rauigkeitselemente wie Feldraine oder Pflugfurchen sind in diesem Maßstab nicht mehr zu vernachlässigen. Es wird häufig davon ausgegangen, dass die Zwischenspeicherung und vermehrte Infiltration von Oberflächenabfluss hinter solchen Rauigkeitselementen zunimmt, je geringer die Hangneigung ist. In dem Fall nimmt der Abfluss ab, der ein Einzugsgebiet verlässt. Auch wenn die experimentelle Basis für diesen Zusammenhang gering ist und nicht bekannt ist, wie viele und welcher Art solche Rauigkeitselemente vorhanden sein müssen, wurden auf Einzugsgebietsebene (nicht auf Ebene eines einzelnen Feldes) unterschiedliche Gleichung zur Berücksichtigung der Hangneigung vorgeschlagen (z. B. in [6]). Da die Hangneigung in

manchen dieser Gleichungen einen großen Einfluss auf den CN-Wert hat, die Skala, auf der die Hangneigung zu bestimmen ist, nicht immer eindeutig definiert ist, wird eine pauschale Anwendung dieser Korrekturgleichungen aber nicht empfohlen.

Bewusst und zusätzlich zum „Normalfall“, dem Anbau in Gefällerrichtung, werden abflussspeichernde Rauigkeitselemente geschaffen, wenn konturparallel angebaut wird (dies bedeutet, dass auf ein Vorgewende verzichtet werden muss, das in Gefällerrichtung laufen würde; vgl. ■ Abb. 6.6). Bei konturparalleler Bewirtschaftung sinken die CN-Werte (CN_{Kontur}) gegenüber den oben dargestellten, für Bewirtschaftung mehr oder weniger in Gefällerrichtung geltenden CN-Werten nach [5]:

$$CN_{\text{Kontour}} = -0,2 + 0,97 \cdot CN \quad (4.8)$$

Noch stärker sinken die CN-Werte bei konturparalleler Terrassierung des Geländes, weil dann auch die Neigung der Flächen geringer wird und die Terrassenkanten zusätzlich als Barrieren wirken (abgeleitet aus [5]):

$$CN_{\text{Terrassiert}} = 0,7 + 0,92 \cdot CN \quad (4.9)$$

4.4 Modellregen für den ländlichen Hochwasserschutz

Zur Dimensionierung von Bauwerken wie Durchlässen, Rückhaltebecken, Kanalnetzen oder Entlastungsbauwerken werden in der wasserwirtschaftlichen Praxis Bemessungsniederschläge und Bemessungsabflüsse verwendet. Sie werden über die Wahrscheinlichkeit, mit der sie auftreten, bzw. über die Zeiträume, in denen sie einmal zu erwarten sind (z. B. jährlich oder alle 10, 50, 100, ... Jahre) definiert. Diese Überlegung lässt sich auch auf die ländliche Flur übertragen, um beispielsweise die Breite von begrünten Abflussmulden, die Wirkung von Gräben oder den Einfluss von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den Abfluss abzuschätzen oder um das erforderliche Volumen kleiner Rückhaltebecken zu ermitteln.

Bemessungsabflüsse werden unter anderem mit statistischen Methoden, mit Übertragungs- und Schätzverfahren (Regionalisierung) oder durch Niederschlag-Abfluss-Modellierung bestimmt [12, 32–34]. Zur Ableitung von Maßnahmen sind insbesondere Niederschlag-Abfluss-Modellierungen gut geeignet, da empirische oder statistische Verfahren Veränderungen in der Abflussbildung (z. B. Änderung der Landnutzung) und -konzentration (z. B. Erhöhung der Rauigkeit entlang der Entwässerungswege) in der Regel nicht abbilden können. Hinzu kommt, dass in kleinen Gebieten üblicherweise keine (quantitativen) Informationen über historische Niederschlag-Abfluss-Ereignisse vorliegen und statistische Verfahren dadurch vielfach nicht anwendbar sind.

Bei Niederschlag-Abfluss-Modellierungen wird – meist für synthetische Modell- und Bemessungsregen – zunächst die Höhe des abflusswirksamen Niederschlagsanteils (z. B. mit dem CN- oder dem Lutz-Verfahren) ermittelt. Aus ihm ergibt sich durch Multiplikation mit der Einzugsgebietsfläche (A_{EZG}) das Volumen des abfließenden Niederschlags bzw. des Abflusses des Einzugsgebietes. Unter Berücksichtigung der Fließzeit ergibt sich die Scheitelhöhe einer Abflusswelle an einem definierten Punkt. Die Basis dieses Ansatzes ist daher immer ein definierter Modell- oder Bemessungsniederschlag. Bemessungsniederschläge lassen sich aus unterschiedlichen Datengrundlagen ableiten, wobei sich in der Praxis vor allem die durch Extremwertstatistik ermittelten, koordinierten Starkniederschlagshöhen (KOSTRA) des Deutschen Wetterdienstes (DWD) etabliert haben [35]. Letztere sind Regenereignisse mit definierten Eigenschaften wie Niederschlagshöhe (N) und -dauer (D). Zusätzlich verfügen sie über eine aus Messzeitreihen der Vergangenheit abgeleitete Wiederkehrwahrscheinlichkeit (T_n) (auch als Jährlichkeit oder Annuität bezeichnet).

Die Wahl des Bemessungsniederschlags hat einen großen Einfluss auf das Ergebnis der Abflussmodellierung. Mit der Wahl wird

das angestrebte Dimensionierungsziel bzw. der Schutzgrad berücksichtigt. Dies hängt von der Aufgabenstellung ab. Im folgenden Kapitel werden zunächst übliche, in der Wasserwirtschaft verbreitete Bemessungsziele beschrieben. Daraus werden Empfehlungen für den ländlichen Hochwasserschutz abgeleitet. Im Anschluss werden wesentliche Aspekte des KOSTRA-Datensatzes beschrieben, da dieser für viele praktische Fragestellungen geeignet ist. Weitere Aspekte zur Ableitung von Modell- und Bemessungsregen sind in ► Anhang 8.4 zusammengestellt. Diese umfassen die Berücksichtigung von Schnee und Methoden zur Ableitung von Ganglinien für Gebiets- und Bemessungsniederschläge aus Stations- oder Radardaten.

4.4.1 Bemessungsziele in der Wasserwirtschaft und Ableitung von Bemessungszielen für die Flur

Unter einem Bemessungsziel versteht man einen Regen oder einen Abfluss, der durch eine zu planende Maßnahme (eine Verrohrung, eine Brücke etc.) gerade noch beherrscht werden soll. Dabei orientiert man sich an ungünstigen Bedingungen, also einem selten zu erwartenden Abflussvolumen oder einem selten zu erwartenden Abflussscheitel. Wie selten, wird durch das Wiederkehrintervall ausgedrückt (z. B. der 30-jährliche Regen oder Abfluss). Dabei wird üblicherweise angenommen, dass ein 100-jährlicher Regen einen 100-jährlichen Abfluss erzeugt (analog bei anderen Wiederkehrzeiten), und weiter, dass extreme Regen der Vergangenheit geeignete Schätzgrößen für extreme Regen in der Zukunft sind (dies wird als Stationarität bezeichnet). Dadurch lassen sich mithilfe langer Messreihen und Verfahren der Extremwertstatistik Regen und Abflüsse mit statistisch definierten Eigenschaften (Jährlichkeit, Menge und Dauer) ermitteln. Ob

diese Annahmen und Methoden im Zeitalter des Klimawandels noch gelten, wird in der wissenschaftlichen Literatur gegenwärtig kontrovers diskutiert [36, 37].

Regenmenge und damit Abflussvolumen und Abflussscheitel hängen aber nicht nur vom Wiederkehrintervall des Regens, sondern auch von der betrachteten Regendauer und der zeitlichen Verteilung des (Bemessungs-) Regens ab. Innerhalb eines Tages fällt bei gleichem Wiederkehrintervall mehr Regen als innerhalb einer Stunde; allerdings sinkt gleichzeitig die mittlere Intensität. Daher muss auch die Regendauer je nach Fragestellung festgelegt werden.

Da die Regenmenge, die möglich ist, mit zunehmender Regendauer zunimmt (■ Tab. 4.3), ist für Fälle, in denen es auf die maximal mögliche Abflussmenge ankommt, aber nicht auf die Abflussrate, ein langdauernder Regen zu wählen. Regenperioden, die viel Regen bringen, ohne dass mehrtägige Unterbrechungen auftreten, in denen der Boden wieder abtrocknet, dauern unter deutschen klimatischen Bedingungen selten länger als drei Tage. Soll der Gesamtabfluss des größten Regens einer bestimmten Jährlichkeit bestimmt werden, kann beispielsweise der KOSTRA-Niederschlag für die Dauerstufe 72 h verwendet werden.

Während mit zunehmender Regendauer die Regenmenge zunimmt, nimmt gleichzeitig die Regenintensität ab. Ist man also

an der höchsten Abflussrate interessiert, wählt man eine möglichst kurze Regendauer. Sie richtet sich nach der Konzentrationszeit des Einzugsgebietes. Wird die mittlere Konzentrationszeit eines Gebietes beispielsweise auf 110 min geschätzt, sollte die Dauerstufe (D) des Bemessungsregens möglichst dieser Konzentrationszeit entsprechen, z. B. D=120 min bei KOSTRA [35]. Wird von diesem Vorgehen abgewichen und bei einer Konzentrationszeit von 110 min beispielsweise ein Modellregen mit einer Dauerstufe von 4 h gewählt, resultiert ein höheres Abflussvolumen, aber ein geringerer Wellenscheitel, da einerseits zwar die Regenmenge zunimmt, andererseits die mittlere Regenintensität mit zunehmender Regendauer aber abnimmt. Der Regen, der zum höchsten Abflussscheitel führt, muss jedoch nicht notwendigerweise ein anderer Regen sein, als der der zum größten Abflussvolumen führt. Die hochintensiven Regen kurzer Dauer sind im Normalfall keine eigenständigen Regen, sondern Intensitätsspitzen, die eingebettet sind in einen länger andauernden Regen mit mehr Niederschlag.

Bei technischen Bauwerken richtet sich die Wahl des Bemessungsregens nach der Aufgabenstellung und variiert zwischen den Bundesländern. Kanalnetze werden beispielsweise oft für einen 5-jährlichen 5-minütigen Starkregen ausgelegt. In München entspricht das z. B. 15 mm in 5 min und bedeutet, dass alle Regen mit geringerer Intensität schadlos

■ **Tab. 4.3** Maximale Niederschlagsmengen (in mm) je Dauerstufe (D), die statistisch einmal in 1, 10, 30, 50 und 100 Jahren (Wiederkehrintervall T_n) im Tertiärhügelland nördlich von Freising erwartet werden können (KOSTRA-DWD, Version 2010R)

	Dauerstufe D							
	5 min	20 min	30 min	1 h	3 h	6 h	24 h	72 h
$T_n = 1$	6	12	14	17	23	28	39	58
$T_n = 10$	14	25	29	34	40	45	70	101
$T_n = 30$	18	31	35	42	51	56	85	123
$T_n = 50$	20	34	38	46	55	62	92	132
$T_n = 100$	23	38	43	52	57	61	95	143

über das Kanalnetz abgeführt werden können müssen. Erst bei selteneren Ereignissen mit höheren Intensitäten werden eine Überlastung und das Überlaufen des Kanalnetzes in Kauf genommen. Beim Hochwasserschutz ist das 100-jährliche Abflussereignis (HQ_{100}) ein weitverbreitetes Dimensionierungsziel. Für die Festsetzung von Überschwemmungsgebieten ist es sogar im § 76 des Wasserhaushaltsgesetzes festgelegt, wodurch es bundesweit gilt. Weitere, beispielsweise in Bayern etablierte Bemessungsziele sind häufige Hochwasser ($HQ_{\text{häufig}}$), die statistisch betrachtet im Mittel alle 5 bis 20 Jahre auftreten, und Extremhochwasser (HQ_{extrem}), das zu deutlich höheren Wasserständen als ein HQ_{100} führt und seltener auftritt. Als HQ_{extrem} wird in Bayern die 1,5-fache Abflussmenge des HQ_{100} angenommen [38]. Für die Bemessung kritischer Infrastrukturbauwerke wie die Notentlastung von Talsperren oder die Standsicherheit der Dämme großer Hochwasserrückhaltespeicher werden Bemessungsziele wie HQ_{1000} oder HQ_{10000} herangezogen. In Baden-Württemberg basieren Bemessungsziele weitgehend auf dem Regen und nicht auf dem Abfluss, was deutlich einfacher ist, weil die Niederschlags-Abfluss-Beziehung nicht bekannt sein muss. Der Leitfaden zum kommunalen Starkregenrisikomanagement [39] definiert Regen als selten, wenn sie eine Jährlichkeit von mehr als 30 Jahren haben. Als außergewöhnlich und als Auslöser von Sturzfluten gelten dort Regen, die eine Jährlichkeit von mindestens 100 Jahren haben.

Für ländliche Räume sind die im technischen Hochwasserschutz verbreiteten Bemessungsniveaus wie 100-jährliche Abflüsse oder Regen unangemessen, da sich aus der dünnen oder fehlenden Besiedelung und der Abwesenheit höherer Vermögenswerte in den Außenbereichen grundsätzlich geringe Schutzbedürfnisse ergeben als in besiedelten, kommunalen Räumen. Hinzu kommt, dass bei der Wahl sehr seltener Extreme (Wiederkehrintervalle > 50 Jahre) schnell enorme Abflussmengen und Scheitelhöhen erreicht werden, deren Minderung oft aufwendige,

teure und flächenintensive Maßnahmen erfordert. Gleichzeitig verursachen kleinere, aber häufiger auftretende Extreme in Summe ebenfalls etwa die Hälfte aller Schäden, die sich mit dezentralen Ansätzen zum Wasserrückhalt dagegen wirksam beeinflussen ließen. Daher werden für die Dimensionierung von Maßnahmen für den ländlichen Hochwasserschutz Bemessungsziele in der Größenordnung von 20 bis 30-jährlichen Ereignissen empfohlen.

Anhand des KOSTRA-Datensatzes lassen sich für beliebige Orte in Deutschland Bemessungsniederschlagshöhen ermitteln. Die Wahl der Niederschlagsdauerstufe richtet sich dabei nach der Zielstellung. Zur Ermittlung des größtmöglichen Abflussscheitels sollten verschiedene Regendauerstufen untersucht und verglichen werden. Üblicherweise ergibt sich der höchste Abflussscheitel für Regen, deren Dauer der Konzentrationszeit des Gebietes entspricht, da die Niederschlagsintensität mit zunehmender Regendauer abnimmt. Da überschlägige Abschätzungen für Maßnahmen in der Flur häufig hinreichend sind, kann vereinfachend auch von einem kurzen, wolkenbruchartigen Schauer mit einer Dauer von 1 bis 4 h ausgegangen werden, ähnlich dem Leitfaden zum kommunalen Starkregenrisikomanagement aus Baden-Württemberg [39]. Müssen Ganmlinien erzeugt werden, wird am besten ein mittenbetonter Regenverlauf unterstellt. Details zur Ableitung von Modellregen sind in ► Anhang 8.4 beschrieben.

4.4.2 Niederschlagshöhen typischer Starkregenereignisse nach KOSTRA

Der KOSTRA-Datensatz [35] ist eine amtliche Bemessungsgrundlage zu erwartender Extremregen des Deutschen Wetterdienstes (DWD). Bei KOSTRA wurden durch statistische Auswertung langjähriger historischer Zeitreihen von 100 (teilweise 150) Regenmessstationen

(Punktmessungen) aus ganz Deutschland Niederschlagshöhen (in mm) und -spenden (in $l\ s^{-1}\ ha^{-1}$) in Abhängigkeit verschiedener Jährlichkeiten (T_n) (1 a bis 100 a) und Regendauerstufen (D) (5 min bis 72 h) bestimmt. Von Regendauerstufen spricht man, weil Niederschläge nicht für eine beliebige Regendauer angegeben sind, sondern die Regendauer in Stufen eingeteilt worden ist, die für praktische Belange hinreichend differenziert sind. Die Daten liegen in einem Rasternetz (Maschenweite ca. $67\ km^2$) deutschlandweit als Planungsgrundlage für den (ländlichen) Hochwasserschutz vor. Der KOSTRA-Datensatz (Version 2010R) kann über das Climate Data Center des DWD [40] kostenfrei bezogen werden. Ab 2020 wird voraussichtlich auch eine Abschätzung von Extremwerten auf Basis der Radarklimatologie verfügbar sein. Aus ersten Vergleichen zeichnet sich ab, dass die Radardaten sowohl die Intensitäten als auch die räumliche Verteilung kurzer konvektiver Starkregenereignisse anders einstufen als die auf dem Bodenmessnetz basierenden KOSTRA-Daten [41, 42]. Dies liegt an der unterschiedlichen räumlichen Auflösung der Messung [43], wobei die Auflösung des Wetterradars ($1\ km^2$) besser für die Skala von Einzugsgebieten geeignet ist als die Auflösung von Regenmessern ($200\ cm^2$). Daher werden Daten von Regenmessern oft mit sogenannten Flächenreduktionsfaktoren auf die Größe des Einzugsgebietes skaliert [44–46].

Die KOSTRA-Daten decken nur den Zeitraum von Mai bis September ab. Dies ist sowohl für die Wahl der größten Niederschlagsintensität wie auch für die größte Niederschlagsmenge ausreichend, da in den Wintermonaten kaum mehr Intensität oder Menge auftritt. In den Wintermonaten kann es vor allem dann zu hohen Abflussintensitäten oder Abflussvolumina kommen, wenn warmer Regen auf eine Schneedecke fällt und dadurch Schmelzwasser hinzukommt. Zur Einschätzung dieser kombinierten Effekte ist KOSTRA aber ungeeignet. Stattdessen kann der REWANUS Datensatz (siehe ► Anhang 8.4.5) verwendet werden.

Beispiel der KOSTRA-Daten

Zur Illustration wurden die KOSTRA-Werte für unterschiedliche Dauerstufen und Jährlichkeiten für das landwirtschaftlich intensiv genutzte Tertiärhügelland nördlich von Freising in Bayern in ► Tab. 4.3 zusammengestellt. Die Werte zeigen, dass im Mittel alle 30 Jahre mit einem Niederschlag von rund 50 mm innerhalb von drei Stunden zu rechnen ist. Eine Planung, die auf diese Niederschlagshöhe abzielt, lässt alle Niederschlagshöhen beherrschen, die häufiger als einmal in 30 Jahren auftreten, also die meisten Niederschläge. Sie nimmt allerdings auch in Kauf, dass ein Niederschlag, der im Mittel nur einmal alle 50 oder 100 Jahre auftritt, nicht mehr beherrscht wird.

Die in ► Tab. 4.3 zusammengestellten Daten sind für weite Teile Deutschlands repräsentativ (zum Vergleich; der deutsche Mittelwert für $D=1\ h$ und $T_n=30$ a beträgt 41 mm, der für das Tertiärhügelland 42 mm; s. auch ► Abb. 4.7). Die Größenordnung von 50 mm kann also als Faustwert für viele planerische Maßnahmen zur Starkregenvorsorge angesetzt werden. Innerhalb Deutschlands variieren die vom Bodenmessnetz erfassten Starkniederschlagshöhen bei kurzen Dauerstufen etwa um den Faktor zwei, wobei ein Gradient vom Norddeutschen Tiefland hin zu höheren Lagen (Alpenraum, Mittelgebirgslagen) vorhanden ist. Mit zunehmender Dauerstufe werden regionale Unterschiede kleiner und nur noch Höhenlagen über 1000 m erzeugen ein Muster. Die räumlichen Muster für 1- und 4-stündige Regen zeigt ► Abb. 4.7 am Beispiel einer Jährlichkeit von 30 Jahren.

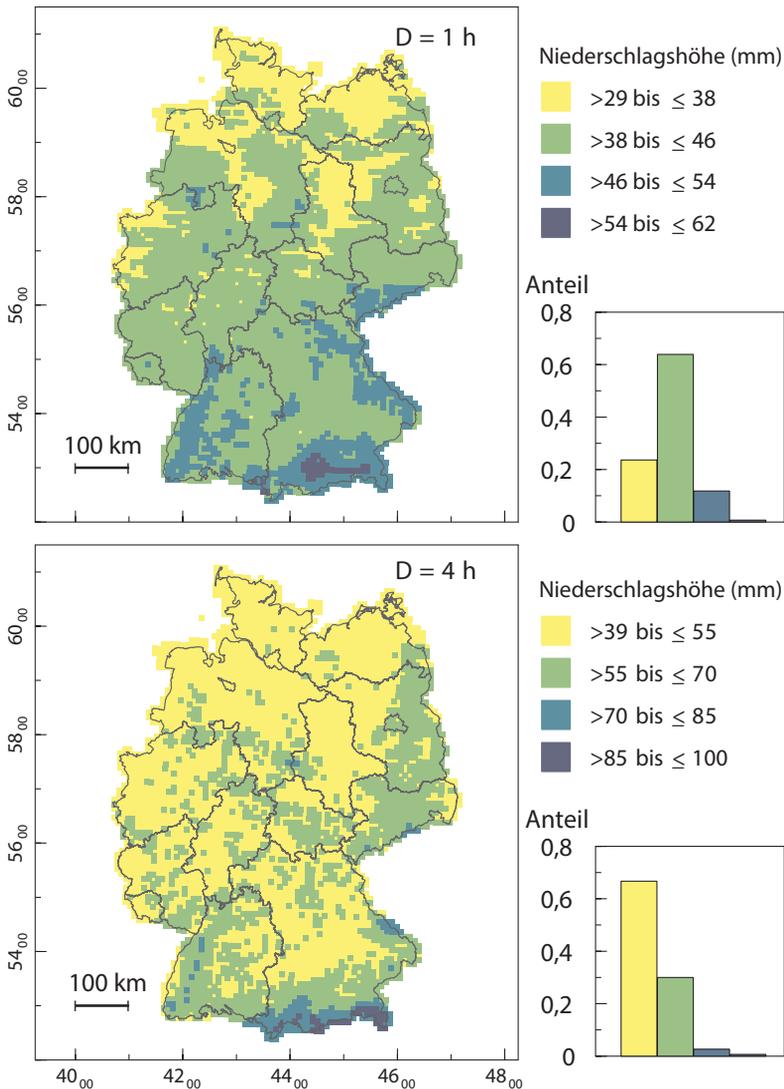
Die KOSTRA-Daten erlauben keine Beurteilung des Jahresgangs. Die höchsten Intensitäten und größten Mengen treten üblicherweise im Juli oder August auf, aber dies ist aus den Daten nicht ersichtlich. Soll ein Jahresgang ermittelt werden oder sollen

nicht Extremwerte sondern typische Werte oder Monatssummen und Ähnliches ermittelt werden, eignen sich die KOSTRA-Daten nicht mehr. In diesen Fällen sollte auf Niederschlagszeitreihen zurückgegriffen werden. Dabei ist allerdings zu beachten, dass das CN-Modell kein Tagesmodell sondern ein Ereignismodell ist. Daher sollten mehrere aufeinanderfolgende Regentage als ein Ereignis

betrachtet werden. Dies wird im ► Anhang 8.10 exemplarisch belegt.

Kommt es darauf an, die Abflussdisposition bei typischen, im Jahresverlauf variierenden Ereignisstärken zu vergleichen, z. B. um verschiedene Bewirtschaftsoptionen zu bewerten, ist eine Differenzierung nach Monaten notwendig. Will man dafür nicht langjährige Niederschlagszeitreihen

4



▣ **Abb. 4.7** Starkniederschlagshöhen in mm mit einer Jährlichkeit T_n von 30 Jahren für die Dauerstufen D von 1 und 4 h. Die jeweilige Spannweite wurde in vier gleich große Intervalle geteilt

Tab. 4.4 Jahresgang typischer mittlerer Ereignisniederschlagsmengen (in mm). Der Augustniederschlag entspricht etwa dem 1-jährlichen 72-h-Regen oder dem 30-jährlichen 6-h-Regen der KOSTRA-Daten

Monat	Jan	Feb	Mär	Apr	Mai	Jun	Jul	Aug	Sep	Okt	Nov	Dez
Nieder-schlag	35	30	35	40	45	50	55	60	55	50	45	40

durchrechnen, eignen sich für diesen Zweck die Ereignisniederschläge, die auch hier z. B. in [Abb. 4.14](#) bis [4.17](#) unterstellt wurden. Sie sind in [Tab. 4.4](#) zusammengestellt.

4.5 Ansatzpunkte zur Reduktion des Abflussvolumens

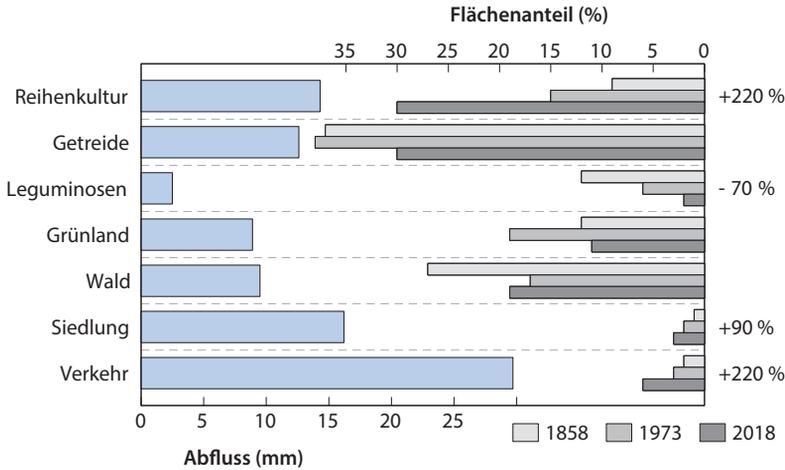
4.5.1 Landnutzungsänderung

Für einen Regen mit einer Niederschlags-höhe von 40 mm variiert die Abflusshöhe stark je nach Landnutzungstyp, aber auch nach Jahreszeit ([Abb. 4.5](#)). Dies macht die Beurteilung schwierig, welche Landnutzung um wie viel besser oder schlechter ist als eine andere Landnutzung. Mittelt man alle Monate des Jahres, dann zeigt sich, dass leguminosen-basiertes mehrjähriges Ackerfutter ganz besonders stark den Abfluss mindern kann ([Abb. 4.8](#), linke Balken), wenn man die sehr niedrigen CN-Werte von [18] zugrunde legt, die experimentell gut abgesichert sind. Würde man die älteren, in vielen CN-Tabellen enthaltenen Werte verwenden, wäre der Abfluss immer noch niedrig, aber eher wie der von Grünland. Besonders hohe Abflüsse sind dagegen von Verkehrsflächen, aber auch von Siedlungsgebieten zu erwarten. Gegenüber dem Bereich, der von mehrjährigem Ackerfutter und Verkehrsflächen aufgespannt wird, sind die Unterschiede der übrigen Landnutzungen vergleichsweise moderat. Reihenkulturen weisen einen etwas höheren Abflussanteil auf, während der Abflussanteil von Getreide etwas niedriger, der von Wald und Grünland deutlich niedriger ist. Eine

Änderung der Kulturartenzusammensetzung innerhalb der Ackerflächen hat also einen vergleichsweise geringen Effekt. Eine Änderung der Bewirtschaftungsweise wirkt wesentlich stärker (vgl. [Abb. 4.6](#)). Eine Ausweitung des Grünlandes oder des Waldes zu Lasten der Ackerflächen verringert den Abfluss noch etwas stärker. Dieser Effekt ist durch unterschiedliche Studien belegt, z. B. [47].

Es ist wichtig, darauf hinzuweisen, dass diese Verhältnisse nur im Mittel des Jahres und nur für den angenommenen 40-mm-Regen gelten. In den einzelnen Monaten können die Verhältnisse deutlich anders sein. Im Frühsommer, wenn die Reihenkulturen ihre kritische Phase haben, tragen sie wesentlich mehr zum Gesamtabfluss bei, während das Getreide seine kritische Phase eher im Spätsommer bis in den Winter hat ([Abb. 4.5](#)). Bei kleineren Regen wäre der Anteil der Verkehrs- und Siedlungsflächen sogar noch wesentlich höher als bei dem 40-mm-Regen, weil dann andere Landnutzungen kaum noch Abfluss erzeugen, während der Anteil der Verkehrs- und Siedlungsflächen bei noch größeren Regen etwas sinkt, auch wenn ihr Gesamtabfluss natürlich steigt.

Zusätzlich zu der innerhalb eines Jahres auftretenden Variabilität unterliegt die Landschaft dem Wandel der Zeit. Zur Veranschaulichung und Quantifizierung dieser Veränderungen wurde die aktuelle Flächennutzung eines 2,6 km² großen Landschaftsausschnitts nördlich von Freising in Bayern bei Zolling im Tertiärhügelland erfasst und der Flächennutzung von 1858 und 1973, die aus historischen Karten rekonstruiert wurde, gegenübergestellt ([Abb. 4.9](#)). Der

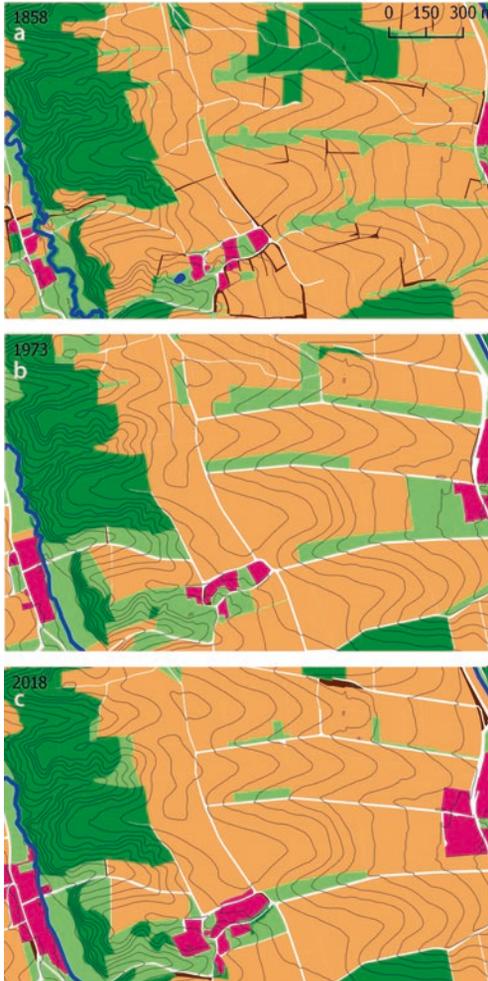


▣ **Abb. 4.8** linke Balken: Mittlerer Abfluss verschiedener Landnutzungen bei einem 40-mm-Regen (Mittelwerte des Jahresgangs aus ▣ Abb. 4.5). Rechte Balken: Änderung der Flächenanteile verschiedener Landnutzungen zwischen 1858 und 2018 für das Modellgebiet Zolling; die Prozentangaben neben der rechten Achse geben die Veränderung der Flächenanteile bezogen auf 1858 für Nutzungen wieder, bei denen ein besonders starker Trend vorliegt

Vergleich der Jahre 1858 und 2018 zeigt eine geringfügige Zunahme der Ackerfläche von 58 auf 62 ha (6 %), während der Anteil der Grünlandflächen um den gleichen Prozentsatz abgenommen hat. Deutlicher als die Veränderung des Ackeranteils ist die Veränderung der Kulturartenverteilung innerhalb der Ackerflächen. Dabei konnten die aktuellen Zahlen aus den Statistiken für dieses Gebiet entnommen werden, während die Kulturartenverteilung für 1858, wie von [48] allgemein für diese Zeit angegeben, angenommen wurde. Demnach ist vor allem der Anteil des mehrjährigen, leguminosenbasierten Ackerfutters (Klee gras, Luzerne u. Ä.) von 20 % auf etwa 4 % der Ackerfläche zurückgegangen, weil Leguminosen durch die Einführung der Mineraldüngung ihre Bedeutung als Stickstoffquelle verloren haben. Dagegen hat der Anteil der Reihenkulturen sehr stark von 16 % auf nahezu die Hälfte der Ackerfläche zugenommen (rechte Balken in ▣ Abb. 4.8; dort allerdings in Prozent der Gesamtfläche), da nun nicht mehr das mehr-

jährige Ackerfutter über die Rinderfütterung verwertet und der Stickstoff als Wirtschaftsdünger nutzbar gemacht werden muss, sondern Mais zum wesentlichen Futtermittel avancierte.

Ebenfalls deutlicher als die Veränderung der Flächenanteile von Acker und Grünland ist die Veränderung ihrer räumlichen Verteilung. Wie ▣ Abb. 4.9 zeigt, werden heute einige Steilflächen im Südwesten (Gefälle 9–20 %) als Grünland genutzt, die in der Karte von 1858 noch als Ackerflächen ausgewiesen waren. Dafür sind fast alle Grünlandflächen in den nach Osten gerichteten Tiefenlinien verschwunden und Ackerflächen gewichen. Diese Veränderung ist nicht nur für das Tertiärhügelland in Bayern, sondern für große Teile fruchtbarer, heute landwirtschaftlich intensiv genutzter Gebiete Deutschlands typisch, wie Publikationen aus Sachsen [49] und Bayern [50] zeigen. Ebenfalls sehr deutliche Änderungen in den Flächenanteilen gab es im Modellgebiet bei Wald- und Heckenflächen, die abgenommen

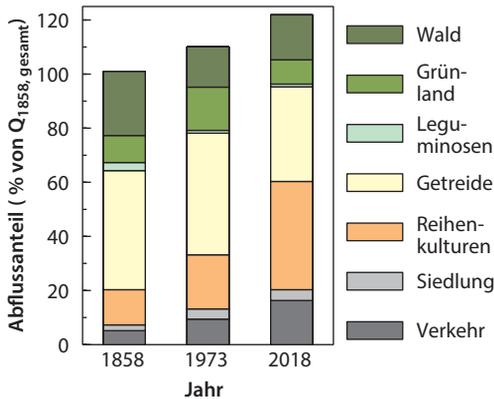


■ **Abb. 4.9** Veränderung der Flächennutzung in einem 258 ha großen Landschaftsausschnitt ($2 \times 1,3$ km) bei Zolling, nördlich von Freising im Tertiärhügelland seit 1858. Dargestellt sind Wald- und Forstflächen (dunkelgrün), Grünland (hellgrün), Acker (orange) und Siedlungsflächen (magenta). Der Verlauf von Heckenzügen (dunkelbraun) ist in der Uraufnahme von 1858 **a** vermerkt, der aktuelle Zustand **b** waren keine Daten verfügbar. Die Topographie ist durch 5-m-Höhenlinien (graue Linien) dargestellt **c** wurde durch Kartierung im Gelände und Luftbilddauswertung erfasst 1973 (Datenquelle: Geobasisdaten der Bayerischen Vermessungsverwaltung, teilweise durch Kartierungen ergänzt)

haben, sowie bei Siedlungs- und Verkehrsflächen die um 90 % bzw. 220 % zugenommen haben (■ **Abb. 4.8**, rechte Balken). Die Länge

des Wegenetzes stieg im betrachteten Zeitraum von rund 11 km auf 14 km, wobei die früher vorhandenen Pfade und Grünwege (teilweise als weiße Flächen in ■ **Abb. 4.9** zu erkennen) im Rahmen der Flurbereinigung in den 1960er- bis 1980er-Jahren überwiegend in ihrem Verlauf verändert und durch asphaltierte Feldwege ersetzt wurden. Die durch Straßen versiegelte Fläche beträgt heute etwa 2,6 ha, alle Ost-West-orientierten Wege verlaufen in oder nahe von Tiefenlinien.

In der Summe hat es also eine Vielzahl von Veränderungen in der Landnutzung gegeben. Insbesondere ist problematisch, dass der stärkste Rückgang im Flächenanteil beim mehrjährigen Ackerfutter zu verzeichnen ist, das von allen Landnutzungen weitaus am wenigsten Abfluss erzeugt. Gleichzeitig haben die Landnutzungen, die besonders viel Abfluss erzeugen, vor allem Verkehrs- und Siedlungsflächen, aber auch Reihenkulturen, stark zugenommen (■ **Abb. 4.8**). Von daher ist eine starke Änderung im Abflussvolumen zu erwarten. Die Berechnung, wenn die linken und die rechten Balken in ■ **Abb. 4.8** verknüpft und das Ergebnis addiert wird, zeigt aber nur eine recht moderate Zunahme des Abflussvolumens von etwa 20 % (■ **Abb. 4.10**). Dies liegt daran, dass sich die Effekte teilweise kompensieren. Die Ausweitung der Reihenkulturen erhöht zwar ihren Anteil am Gesamtabfluss stark, da gleichzeitig auch der Anteil des Getreides sinkt, erhöht sich die Summe aus den Abflussanteilen von Reihenkulturen und Getreide nur moderat. Nur der Einfluss der Ausweitung der Verkehrs- und Siedlungsflächen auf den Gesamtabfluss ist deutlich. Dagegen kann selbst bei einer radikalen Änderung der Nutzung land- und forstwirtschaftlicher Flächen, z. B. durch deutliche Verringerung des Ackeranteils oder des Anteils von Reihenkulturen zugunsten von Getreide, das Abflussvolumen nur relativ wenig verändert werden. Wesentlich stärker lässt sich das Abflussvolumen einer Landschaft durch die landwirtschaftliche Bewirtschaftungspraxis vermindern, da dabei diese kompensatorischen Effekte nicht auftreten.



▣ **Abb. 4.10** Veränderung der Abflussanteile in einem 2,6 km² großen Einzugsgebiet im Tertiärhügelland nördlich von Zolling für drei unterschiedliche Zeitpunkte. Die Abflussanteile sind relativ zum Gesamtabfluss von 1858 angegeben und über das Jahr gemittelt. Leguminosen steht für mehrjähriges, leguminosenbasiertes Ackerfutter

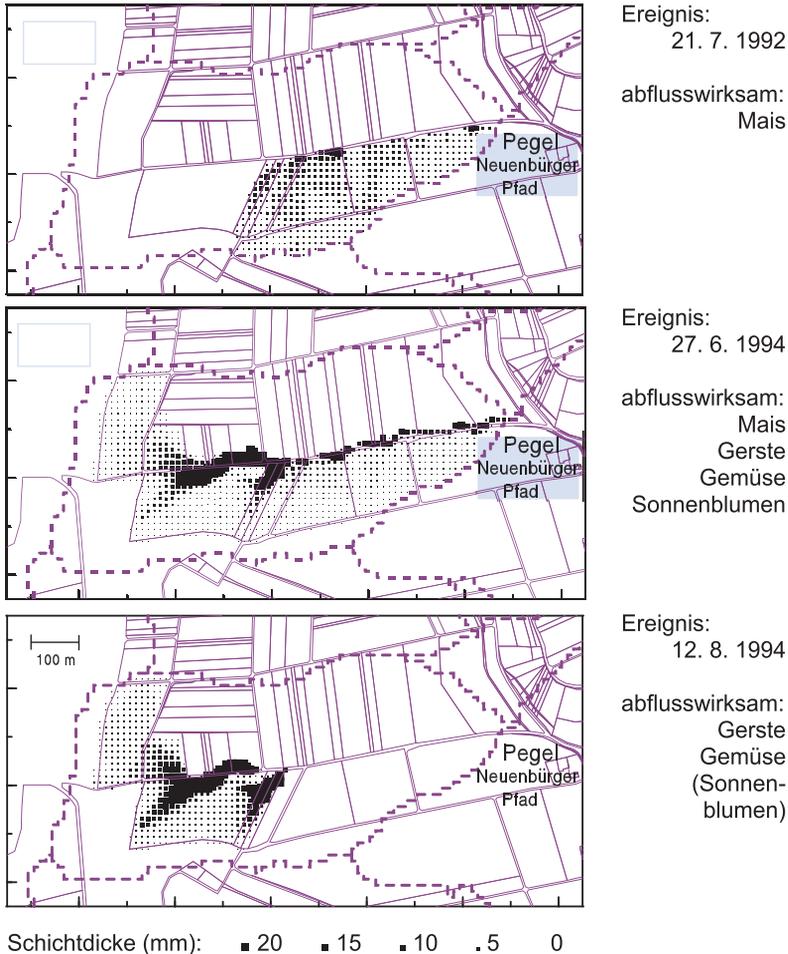
Werden die Reihenkulturen beispielsweise in Mulchdirektsaat angebaut (► Abschn. 4.5.3), wirkt sich die Abflussminderung voll aus, weil diese Änderung in der Bewirtschaftung nicht mit Änderungen bei anderen Landnutzungen einhergeht. Vor allem aber folgt aus dieser Auswertung die Notwendigkeit, Maßnahmen zum Bremsen des Abflusses entlang des Fließpfades zwischen Wasserscheide und Gewässernetz zu ergreifen (s. ► Kap. 6), um den Abflussscheitel zu dämpfen, da die Möglichkeiten der Verminderung der Abflussmenge begrenzt sind.

4.5.2 Flächenparzellierung

Aus der im Jahresverlauf stark wechselnden Abflussdisposition verschiedener Kulturarten (▣ Abb. 4.5) folgt, dass eine vielfältige Landnutzung in einem Einzugsgebiet extreme Abflüsse zu bestimmten Zeitpunkten vermeidet, zu denen eine bestimmte Kultur gerade ihre besonders abflussanfällige Phase

hat. Eine vielfältige Landnutzung ist aber nur dadurch zu erreichen, wenn die einzelnen Landnutzungsparzellen nicht zu groß werden. Kleinteilige Schlagstrukturen verursachen fast immer eine heterogene Nutzung der Fläche (insbesondere bei heterogenen Eigentumsverhältnissen). Damit geht eine hohe räumliche (und zeitliche) Variabilität der Oberflächenabfluss liefernden Flächen einher [51]. Ist dies gegeben, kann ein weiterer Effekt hinzukommen, die sogenannte Runon-Infiltration [52, 53]. Diese tritt auf, wenn der Oberflächenabfluss einer Fläche über eine unterhalb liegende Fläche fließt, die selbst keinen Abfluss produziert, deren Infiltrationsvermögen also noch nicht ausgeschöpft ist. Die Runon-Infiltration kann besonders bei kleineren und mittleren abflusswirksamen Regen den Gesamtabfluss vermindern, weil bei solchen Regen das Infiltrationsvermögen noch nicht auf allen Flächen ausgeschöpft ist. Bei sehr großen Regen, bei denen alle Flächen liefern, kommt der Effekt dagegen zum Erliegen und es bleibt nur der Effekt, dass die Heterogenität der Landnutzung Extreme vermeidet.

Der Effekt der Runon-Infiltration wurde u. a. in Modellstudien im Weiherbachgebiet in Baden-Württemberg nachgewiesen [54]. Dort trugen jeweils lediglich diejenigen Ackererschläge zum Abfluss bei, die wegen geringer Bedeckung zum Zeitpunkt des Regens leicht verschlammten. Bei einem Regen im Frühsommer waren dies Maisanbauflächen, bei einem Regen im Sommer waren es Mais, Sonnenblumen und Gemüse zu etwa gleichen Teilen und bei einem Regen im Spätsommer waren nur noch Gersten- und Gemüseschläge betroffen (▣ Abb. 4.11). Die übrigen Flächen nahmen dagegen je nach Lage und Überströmung einen Teil des von den genannten Kulturen stammenden Abflusses wieder auf, sodass Mais, der im Frühsommer als wesentlicher Abflusslieferant wirkte, im Spätsommer Abfluss von Nachbarflächen infiltrierte.



■ **Abb. 4.11** Intensität und jahreszeitliche Varianz der zum Oberflächenabfluss beitragenden Flächen, ausgedrückt durch die berechnete Schichtdicke des Abflusses für drei Ereignisse im Einzugsgebiet Neuenbürger Pfad, Weiherbach [54]

Runon-Infiltration durch Streifenanbau

Der Effekt der Runon-Infiltration wird im Streifenanbau gezielt genutzt, der aber in Mitteleuropa im Gegensatz zu den USA nicht verbreitet ist (sogenanntes Strip-cropping oder Strip-farming, das nicht mit Streifenbearbeitung, englisch „strip-tillage“ zu verwechseln ist), das aber von der Europäischen Kommission wegen der vielfältigen günstigen Wirkungen empfohlen wird [55]. Durch die sehr starke Zusammenlegung von Flächen könnte Streifenanbau inzwischen auch in Europa

praktiziert werden. Dabei wird eine sehr große Fläche mit zwei Kulturen bebaut, die sich in regelmäßigen Streifen quer zur Hauptgefällerrichtung abwechseln. Dies ist arbeitswirtschaftlich vorteilhaft, da weiterhin große Einheiten bleiben, wenn die Streifen ein Mehrfaches der Maschinenarbeitsbreite betragen, da dann alle mit einer Kultur bestandenen Streifen gleichzeitig und ohne Mehraufwand bewirtschaftet werden können. Die Streifen dürfen aber nicht breiter als eine kritische Hanglänge sein, die vom

Gefälle abhängt. Sie gilt gleichermaßen für die Erosionsvorsorge und kann nach ► Gl. 6.1 in ► Abschn. 6.1 ermittelt werden. Für übliche Gefälleneigungen von 4 bzw. 8 % ergeben sich kritische Hanglängen von rund 100 bzw. 60 m (vier Maschinenbreiten bei Düngestreuern entsprechen häufig 60 m). Damit wird erreicht, dass der Abfluss von einem Streifen breitflächig in den nächsten Streifen fließt und dort möglichst vollständig versickert.

Der Streifenanbau vermindert nicht nur den Oberflächenabfluss, sondern ist auch ein effizientes Mittel zur Erosionsminderung [56]. Die Wirkung eines Fruchtartenwechsels am Hang ist anhand von Luftbildaufnahmen nach Starkregenereignissen gut zu erkennen [57]. Im Vergleich zu einem einheitlichen, nicht untergegliederten Maisfeld zeigen sich dort deutlich geringe Erosionsrinnen und

Stoffaustragsspuren (► Abb. 4.12), auch wenn die Nutzung in dem Fall die Bedingungen eines echten Streifenanbaus noch nicht erfüllt hatte.

Als Alternative zum Streifenanbau, der große Gewinne voraussetzt, lässt sich die Runon-Infiltration nutzen, wenn die Tiefenlinien begrünt sind, in denen der Abfluss sich sammelt und über eine lange Strecke weiterfließt. Bei langjährigen Versuchen im Kloostergut Scheyern wurde gemessen, dass in einem 15–20 m breiten und mehrere 100 m langen Grasstreifengerinne für einzelne Ereignisse bis zu 45 % des in den angrenzenden Äckern entstehenden und in den Grasstreifen entwässernden Oberflächenabflusses wieder infiltrierte [58]. In einer flächenhaften Modellierung eines großen Einzugsgebietes zeigte sich, dass in ackerbaudominierten Gebieten bereits 2,4 % Grünland in Form von schmalen Streifen entlang der Hangmulden genügen, um im Sommer die Abflusshöhe um etwa 30 % und den Scheitelabfluss um etwa 40 % zu reduzieren. Die Werte sind etwas



► **Abb. 4.12** Luftbildaufnahme einer Hanglage nach einem Stundenniederschlag von 18 mm am 10.06.2011. Trotz Querbearbeitung kam es in dem langgestreckten Maisfeld (rechte Bildhälfte) zu Hangmuldenabfluss und starkem Bodenabtrag (Schwämmfächer unten rechts). In der linken Bildhälfte wurde eine stärkere Bodenerosion und die Ausbildung eines konzentrierten Hangmuldenabflusses durch den Fruchtartenwechsel und die dort auftretende, höhere Infiltration sowie die reduzierte, kritische Hanglänge verhindert (Quelle: W. Bauer, Agroluftbild)

höher für häufig auftretende Abflussereignisse und geringer für seltene Abflussereignisse und auch geringer im Winter [9]. Das Modellgebiet Zolling zeigt, dass dies bis weit ins 20. Jahrhundert die typische Anordnung des Grünlandes war, das als schmale Bänder in den Tiefenlinien lag (■ Abb. 4.9).

Aus diesen Überlegungen ergibt sich auch, dass vor allem hoch infiltrationsfähige Flächen in Gewässernähe, die bei Starkregen überflutet werden und einen Teil des Wassers durch Infiltration aufnehmen, vorteilhaft wären. Die tatsächliche Entwicklung verlief aber konträr zu diesen Überlegungen. Nach der Bodennutzungsstatistik betrug der Grünlandverlust zum Beispiel in Bayern zwischen 1960 und 2014 rund 651.000 ha [59]. Wird davon ausgegangen, dass überwiegend das Feuchtgrünland in Muldenzügen und Tal-lagen von der Umwidmung betroffen ist [60], entspricht dies rechnerisch dem Verlust eines 65 m breiten Grünlandstreifens entlang des gesamten, rund 100.000 km langen bayerischen Fließgewässernetzes. Gleichzeitig wurde durch die Gräben und Verrohrungen ein sekundäres Entwässerungsnetz geschaffen, das bei Oberflächenabfluss anspringt, sodass der Oberflächenabfluss am noch vorhandenen Grünland vorbeigeleitet wird.

Wirkung von Terrassen

Terrassen mindern Erosion und Oberflächenabfluss gleichermaßen (■ Abb. 4.13). Ihr Potenzial ist insbesondere bei langen Hängen groß, weniger wegen ihres Einflusses auf die Infiltration (■ Abb. 4.16), als vielmehr, weil sie den Abfluss verlangsamen. Aus gleichem Grund vermindern sie auch den Bodenabtrag, da die Transportkapazität des Abflusses stark von der Fließgeschwindigkeit abhängt. Terrassen werden seit der Antike für landwirtschaftliche Zwecke angelegt und genutzt, wobei sie sowohl in den USA als auch in China in der Mitte des 20. Jahrhunderts eine Renaissance

erlebten. So gilt eine Terrassierung des Geländes auf erosionsanfälligen Standorten mit einem Gefälle $\geq 7\%$ in den USA heute als *best-management practice* zum Wasser- und Stoffrückhalt [61]. Im Chinesischen Lössplateau wurden in den letzten Jahrzehnten etwa 50 % der ackerbaulichen Nutzflächen mit einem Gefälle $\geq 5\%$ terrassiert [62]. Der wesentliche Mechanismus von Terrassen besteht darin, dass die Hanglänge verkürzt und Schicht- und Rinnenerosion durch die geringere Neigung und die Verlängerung der Fließweglänge weitgehend verhindert werden kann. Neben dieser den Abfluss bremsenden Wirkung können Terrassen auch deutlich Abflussvolumen zurückhalten, wenn sie als kaskadenförmige Rückhalte- und Absetzflächen konstruiert werden. Dies wirkt gleichzeitig Trockenheit entgegen, die immer der zweite Schadmechanismus ist, wenn Niederschlag als Oberflächenabfluss abfließt. Terrassen sind daher ein sehr effektives und ganzheitliches Mittel, den Wasser- und Stoffhaushalt einer Landschaft positiv zu beeinflussen. In Deutschland sind Terrassen bis heute nur selten und vor allem auf Steilhängen, z. B. im Weinanbau, anzutreffen. Studien aus rebterrassierten Einzugsgebieten im Ostkaiserstuhl zeigen, dass der Hauptanteil des Oberflächenabflusses dort durch befestigte Wege entsteht, wobei sich der Oberflächenabfluss proportional zur Vergrößerung des versiegelten Flächenanteils erhöht [63, 64]. Eine Modellierungsstudie aus Tschechien schätzt, dass Terrassen den Scheitelabfluss 100-jährlicher Niederschläge um über 40 % reduzieren können [65]. Zur Anlage von Terrassen und zur Abschätzung ihrer Wirkung auf Wasser und Erosion existieren vor allem in den USA umfangreiche Untersuchungen [61].



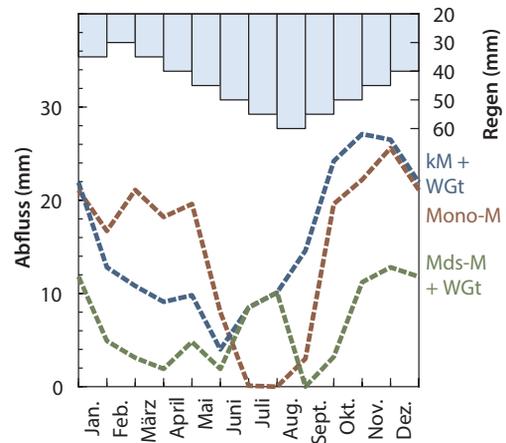
▣ **Abb. 4.13** Wasser- und Stoffrückhalt in der Flur durch hanggliedernde Terrassenstufen mit einem zum Hang hin gerichteten Gefälle in den USA (Quelle: NRCS Gallery)

4.5.3 Landwirtschaftliche Bewirtschaftungspraxis

Die Möglichkeiten, innerhalb der ackerbaulichen Nutzung durch Bewirtschaftungsmaßnahmen die Abflusshöhe zu verringern, sind groß und lassen sich mithilfe des CN-Verfahrens gut quantifizieren und planen. Dies soll hier an einem Beispiel gezeigt werden. Dabei wird von der hydrologischen Bodengruppe C und unterschiedlichen Feldfrüchten und Anbauverfahren ausgegangen. Der Bemessungsniederschlag soll im Februar 30 mm betragen und bis August linear auf 60 mm ansteigen, um dann wieder linear bis zum Februar auf 30 mm abzufallen (▣ Abb. 4.14, Balkendiagramm). Als ungünstigster Fall wird von einer Maismonokultur ausgegangen, also dem wiederkehrenden Anbau von Mais ohne zwischengeschalteten Fruchtartenwechsel. Bei konventionell angebaute Maismonokultur ist die Abflussbildung von Winter bis Frühlommer hoch. Die Abflusshöhe beträgt 20 bis 24 mm (▣ Abb. 4.14, rote Linie). Sobald der Reihenschluss bei Mais im Sommer erreicht ist, infiltrieren dagegen selbst die hohen hier angenommenen Bemessungsniederschläge vollständig.

Ersetzt man die Hälfte des Maises und baut jedes zweite Jahr Wintergetreide an,

wird der Jahresgang deutlich ausgeglichener (▣ Abb. 4.14, blaue Linie). Die Abflussneigung im Frühjahr und Frühlommer geht stark zurück, dafür steigt allerdings die Abflussneigung im Sommer und Herbst. In der Jahressumme ergibt sich kein Unterschied zwischen einer Maismonokultur und dieser Fruchtfolge. Bei ergiebigen Regenereignissen im Dezember kann die Fruchtfolge sogar etwas ungünstiger sein, da insbesondere der Winterweizen in dieser Zeit kaum den Boden bedeckt, der Bodenwasservorrat bereits wieder zu einem großen Teil aufgefüllt ist und der Saatbettzustand abflussanfälliger ist als ein gepflügeltes Feld nach der Maisernte, bei dem der Bodenwasservorrat noch zu einem großen Teil entleert ist. Dennoch hat die Fruchtfolge gegenüber der Monokultur Vorteile, da sich dadurch eine Strukturierung der Landschaft ergibt (s. ► Abschn. 4.5.2). Auch treten im Winterhalbjahr die hohen Intensitätsspitzen normalerweise nicht auf, so dass in dieser Zeit zwar viel Abfluss möglich ist, die maximalen Abflussraten aber geringer bleiben als in den Sommermonaten.



▣ **Abb. 4.14** Jahresgang des Oberflächenabflusses von Monokultur-Mais (Mono-M), konventionell angebaute Mais und Wintergetreide im jährlichen Wechsel (km + Wgt) und eine Fruchtfolge aus Mulchdirektsaat-Mais und Wintergetreide (Mds-M + Wgt). Die Werte gelten für die hydrologische Bodengruppe C. Der angenommene Jahresgang des Bemessungsregens ist als Balkendiagramm oben dargestellt

Der Hauptvorteil der Fruchtfolge Mais-Wintergetreide liegt darin, dass nun Mulchdirektsaat des Mais möglich wird. Dabei wird nach dem Getreide eine abfrierende Winterzwischenfrucht (z. B. Senf) angebaut und der Mais im nächsten Jahr ohne Bodenbearbeitung in den abgefrorenen Senfbestand eingesät. Dies schließt insbesondere die Lücke der Bodenbedeckung im Winter, da ein dichter, wüchsiger Zwischenfruchtbestand bis in den Dezember hinein vorhanden ist. Durch die Direktsaat sind auch unmittelbar nach der Saat noch mindestens 30 % Bodenbedeckung gegeben. Die Abflussmengen in den Wintermonaten halbieren sich und gleiches gilt für das Jahresmittel (▣ Abb. 4.14, grüne Linie).

Warum die Mulchdirektsaat so außerordentlich effizient ist, wird durch ▣ Abb. 4.15 illustriert. Sie zeigt den Senf, der nach Wintergetreide Ende Juli/Anfang August angebaut worden war und der sich zu dem Zeitpunkt im September bereits stark entwickelt hat und blüht, während der Mais im Hintergrund mindestens noch einen Monat bis zur Ernte benötigt. Dies bedeutet, dass es keine Lücke in der Bodenbedeckung gibt. Im Gegensatz zu allen überwinterten Ackerkulturen und selbst im Gegensatz zu



▣ **Abb. 4.15** Illustration der Mulchsaat, die das zeitliche Hintereinander von Senf und Mais als räumliches Nebeneinander zeigt (Erläuterung s. Text); der Unterschied zwischen Mulchsaat und Mulchdirektsaat ist zu diesem Zeitpunkt (September) noch nicht zu sehen (Quelle: K. Auerswald)

Grünland und Wald liefert die abfrierende Zwischenkultur bis in den Dezember eine üppige, lebende Pflanzendecke. Erfolgt die Maissaat ohne Bodenbearbeitung („direkt“), bedeutet dies, dass der Boden mindestens 15 Monate von der Aussaat des Senfs bis zur Ernte des Mais nicht bearbeitet wird. Beim konventionellen Anbau bedecken dagegen alle Ackerkulturen – egal ob Getreide oder Reihenfrüchte – den Boden höchstens neun, manchmal sogar nur sechs Monate.

Wirkungen der langen Bodenruhe bei Mulchdirektsaat

Die lange Zeit der Bodenruhe von deutlich über einem Jahr, bei der der Boden immer zu mehr als 30 % bedeckt bleibt, löst eine Vielzahl von hydrologisch und hydraulisch bedeutsamen Veränderungen aus [22, 66]:

1. Die Regenwurmzahl steigt um 50 %.
Die Zahl der Regenwurmröhren in den obersten 5 cm des Bodens vervielfacht sich sogar, da sie nicht durch eine Bodenbearbeitung zerstört werden; sie bleiben hydraulisch wirksam.
2. Ohne Saatbettbereitung bleibt die Bodenbedeckung hoch. Dadurch kann die Bodenoberfläche nicht verschlämmen und behält ihre Infiltrationsfähigkeit; die Pfahlwurzel und der starke Stängel des (abgestorbenen) Senfs verhindern ein Aufschwimmen und Abschwemmen der Mulchdecke und schaffen biogene Grobporen.
3. Die Aggregatstabilität steigt; die sogenannte Perkolationsstabilität, die die Stabilität gegenüber plötzlicher Befeuchtung testet, verzehnfacht sich sogar. Auch dies schützt die Bodenoberfläche vor Verschlämzung und verhindert, dass an der Bodenoberfläche endende Regenwurmröhren durch Einschwemmen von Bodenteilchen verstopfen.

4. Die Fließstrecke des Abflusses auf der Oberfläche erhöht sich, da Stängel und abgestorbene Pflanzenteile als Hindernis wirken. Gleichzeitig sinkt die Geschwindigkeit des Abflusses durch die höhere Rauheit der Mulchdecke. Dadurch steigt die Schichtdicke des Wassers auf der Bodenoberfläche. Wenn die Schichtdicke zwei Tropfendurchmesser erreicht (ca. 5 mm), wirkt das Oberflächenwasser selbst als Mulch („Wassermulch“; [67, 68]), der die kinetische Energie der Regentropfen von der Bodenoberfläche abhält.

Mulchsaat, bei der die Reihenkultur nicht direkt, sondern mit einer leichten Bodenbearbeitung gesät wird, hat dagegen diese Vorteile nicht. Sie verkürzt nur die Periode, in der der Boden unbedeckt bleibt, um etwa fünf Monate, da das Pflügen Ende Oktober/Anfang November entfällt und die Bodenbearbeitung erst zur Saat (je nach Reihenkultur Ende März bis Ende April) erfolgt. Eine durchgehende Bodenruhe wird dadurch aber nicht erreicht.

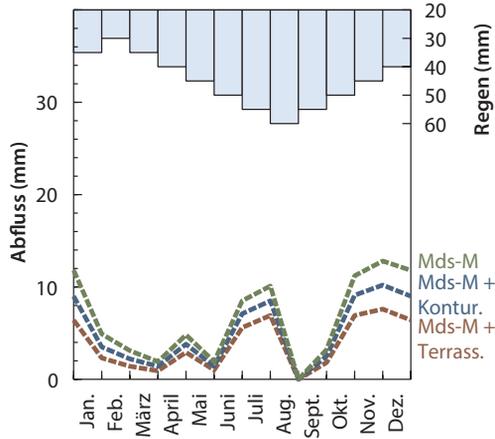
Wegen der vorzüglichen Wirkung der Mulchdirektsaat würde die Abflussneigung nicht weiter sinken, sondern sogar steigen, wenn der Maisanteil in der Fruchtfolge auf unter 50 % gesenkt würde. Dann wäre Mulchdirektsaat nicht mehr jedes zweite Jahr möglich. Gleiches gilt auch für den Bodenabtrag, der bei einer Fruchtfolge aus 50 % Reihenkulturen und 50 % Wintergetreide innerhalb der ackerbaulichen Möglichkeiten am geringsten ist, sofern die Reihenkulturen in Mulchdirektsaat mit einer Bodenbedeckung > 30 % angebaut werden. Diese vorzügliche Wirkung der Mulchdirektsaat bei 50 %-igem Reihenkulturanteil hinsichtlich Abfluss- und Abtragsreduktion hat sich in langjährigen Abfluss- und Abtragsmessungen in kleinen Einzugsgebieten in

Scheyern bestätigt [69]. Trotz dieses enormen Potenzials für den Wasser- und Stoffrückhalt hat sich die Direktsaatvariante der Mulchsaat in der landwirtschaftlichen Praxis bislang wenig verbreitet [70].

Der Abfluss ließe sich noch weiter reduzieren, wenn der Anbau konturparallel erfolgen würde (Abb. 4.16, blaue Linie). Gerade große Flächen böten dazu die Möglichkeit. Allerdings sind die in Deutschland überwiegend verwendeten Landmaschinen, insbesondere der Wendepflug, für eine konturparallele Bewirtschaftung nicht geeignet, da sie den Kurven der Kontur nur schwer folgen können.

Bei konturparalleler Bewirtschaftung ließe sich auch noch eine Terrassierung etablieren, was den Abfluss weiter senken würde (Abb. 4.16, braune Linie). Alle Maßnahmen (Mulchdirektsaat, Konturnutzung und Terrassierung) zusammen genommen senken den Abfluss in den kritischen Monaten auf etwa ein Drittel und die Jahressumme sogar auf ein Viertel ab. Die Wirkung auf den Abflussscheitel ist noch weit höher, da alle drei Maßnahmen gleichzeitig auch die Fließgeschwindigkeit herabsetzen (s. Abschn. 7.3.5). Aus dem könnte gefolgert werden, dass eine Kontrolle von Sturzfluten einfach und allein mit Bewirtschaftungsmaßnahmen möglich wäre. Dies ist jedoch aus mehreren Gründen ein Trugschluss. Die Mulchdirektsaat erfordert hohes landwirtschaftliches Können, für den konturparallelen Anbau ist in Deutschland die Maschinenausstattung überwiegend nicht vorhanden und die Terrassierung ist eine Ingenieuraufgabe, die nur in umfangreichen Flur- und Bodenneuordnungsverfahren zu lösen wäre. Vor allem aber wurde in Abb. 4.5 gezeigt, dass Ackerflächen in den Sommermonaten nur etwa 20 % bis 30 % zum Gesamtabfluss beitragen. Zusätzliche Maßnahmen außerhalb der Ackerflächen sind daher unerlässlich.

4.5 · Ansatzpunkte zur Reduktion des Abflussvolumens



■ **Abb. 4.16** Simulierter Jahresgang des Oberflächenabflusses von abwechselnd Mulchdirektsaat-Mais und Wintergetreide in Gefällerrichtung (Mds-M), bei Konturnutzung (Mds-M + Kontur.) und bei Konturnutzung mit Terrassierung (Mds-M + Terrass.). Die Werte gelten für die hydrologische Bodengruppe C. Der angenommene Jahresgang des Bemessungsregens ist als Balkendiagramm oben dargestellt

Wirkungen des organischen Landbaus

Für den organischen (ökologischen) Landbau ist Mulchdirektsaat keine Option, da im organischen Landbau chemische Unkrautbekämpfungsmittel nicht angewendet werden können und eine Unkrautkontrolle vor der Saat der Reihenkultur dort nur durch eine mechanische Bodenbearbeitung möglich ist. Der organische Landbau zeichnet sich dadurch aus, dass die Fruchtfolgen i. d. R. mehrjähriges Klee gras enthalten, da die Stickstofffixierung des Klees den Wegfall von Mineraldünger kompensieren muss. Klee gras ist wegen der durchgehenden Bedeckung günstiger als die anderen Ackerkulturen (vgl. CN-Werte in ■ Tab. 4.2). Vergleicht man die vorher verwendete konventionelle Mais-Wintergetreide-Fruchtfolge mit einer typischen Fruchtfolge des organischen Landbaus aus zwei Jahren Klee gras, einem Jahr einer Reihenkultur und zwei Jahren Wintergetreide, so zeigt sich in der Modellierung, dass durch die

vielfältigere Fruchtfolge der Jahrgang der Abflussbildung noch ausgeglichener wird (■ Abb. 4.17, braune Linie).

Insbesondere die hohe Abflussneigung von Winter bis Fröhsommer wird durch das Klee gras gemildert. Dies stimmt auch mit Erfahrungen aus der Literatur überein:

Eine umfassende Literaturlauswertung [71] ergab, dass in etwa 40 % der Fälle der organische Landbau zu weniger Abfluss führte als der konventionelle, in weiteren 40 % trat kein Unterschied auf und in ca. 20 % der Fälle war der Abfluss im organischen Landbau höher.

Es muss allerdings angeführt werden, dass sich der organische Landbau mit dem CN-Verfahren nur eingeschränkt abbilden lässt. Insbesondere werden mögliche Nachwirkungen des Klee grasses in den folgenden Jahren, z. B. eine erhöhte Aggregatstabilität (s. [71, 72]), in ■ Tab. 4.2 nicht berücksichtigt, da sie nicht beim Klee gras selbst auftreten, sondern bei den Folgekulturen. Die Ergebnisse von [18] deuten darauf hin, dass die CN-Werte in den Kulturen, die auf mehrjähriges Klee gras folgen, niedriger sind als bei anderen Vorfröchten. Allerdings hatten die Autoren mineralisch gedüngte Systeme untersucht [18]. Auch ist unklar, ob sich das geringere Ertragsniveau der Kulturen auswirkt und zu höheren CN-Werten führt. Diese Einschränkung ist allerdings kein Mangel des CN-Verfahrens selbst, sondern liegt nur daran, dass die für die Parametrisierung notwendigen Daten für den organischen Landbau nicht erhoben wurden. Auch wurde der organische Landbau hinsichtlich seiner Umweltwirkungen wie der Bildung von Oberflächenabfluss kaum optimiert, sondern es wird nur allgemein davon ausgegangen, dass er besser ist als der konventionelle Anbau. Daher ist auch nicht verwunderlich, wenn er gegenüber einem in dieser Hinsicht optimierten Verfahren wie der Mulchdirektsaat zurückfällt.

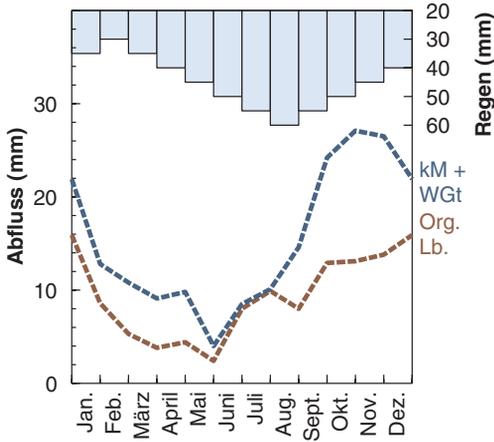


Abb. 4.17 Vergleich des Jahresgangs des Oberflächenabflusses bei konventionellem Anbau einer Fruchtfolge mit 50 % Mais und 50 % Wintergetreide (kM + Wgt), mit einer typischen fünfjährigigen Fruchtfolge des organischen Landbaus, mit zwei Kleeergrasjahren (Org. Lb.). Die Werte gelten für die hydrologische Bodengruppe C. Der angenommene Jahresgang des Bemessungsregens ist als Balkendiagramm oben dargestellt. Mögliche Effekte durch Runon-Infiltration sind nicht berücksichtigt

Literatur

- Linsley RK, Kohler MA, Paulhus JLH (1949) Applied Hydrology. McGraw-Hill, New York
- Becker, A. (1964) Starkregen-Abfluß-Beziehung in Form einer koaxialen graphischen Darstellung zur Vorherbestimmung des Starkregenabflusses aus einem kleinen Einzugsgebiet der DDR. Wasserwirt Wassertechnik 14(4):120–125
- Horton RE (1939) Analysis of runoff-plot experiments with varying infiltration-capacity. Trans Am Geophys Union 20:693. <https://doi.org/10.1029/TR020i004p00693>
- Lutz W (1984) Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen. Mitt Inst Hydrol Wasserwirt 24: Universität Karlsruhe
- Natural Resources Conservation Service (2004) Estimation of direct runoff from storm rainfall. In: National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology, chapter 10. US Department of Agriculture, Washington
- Williams JR, Kannan N, Wang X, Santhi C (2012) Evolution of the SCS runoff curve number method and its application to continuous runoff simulation. J Hydrol Eng 17:1221–1229
- Kleeberg R-B, Overland H (1989) Zur Berechnung des effektiven oder abflusswirksamen Niederschlags. Mitt Inst Wasserwesen 32: Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
- Auerswald K, Haider J (1996) Runoff curve numbers for small grain under German cropping conditions. J Environ Manag 47:223–228
- Fiener P, Auerswald K (2006) Influence of scale and land use pattern on the efficacy of grassed waterways to control runoff. Ecol Eng 27:208–218. <https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.02.005>
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1982) Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil I: Analyse. Regeln zur Wasserwirtschaft 112: Paul Parey, Hamburg
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1984) Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil II: Synthese. Regeln zur Wasserwirtschaft 113: Paul Parey, Hamburg
- Merz R (2006) Regionalisierung von Ereignisgrößen. In: Blöschl G, Godina R, Merz R (Hrsg) Methoden der hydrologischen Regionalisierung. Wiener Mitt 197:179–194 Technische Universität, Wien
- Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1999) Hochwasserabflüsse. Schriften 124: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser, Bonn
- Patt H, Jüpner R (2013) Hochwasser-Handbuch, Auswirkungen und Schutz. Springer, Berlin
- Ponce VM, Hawkins RH (1996) Runoff curve number: has it reached maturity? J Hydrol Eng 1:11–19
- Merz R, Blöschl G (2009) A regional analysis of event runoff coefficients with respect to climate and catchment characteristics in Austria. Water Resour Res 45:1–19. <https://doi.org/10.1029/2008WR007163>
- Arnold JG, Williams JR, Nicks AD, Sammons DB (1990) SWRRB – a basin scale simulation model for soil and water resources management. Texas A & M University Press, College Station
- Bonta JV, Shpitalo MJ (2013) Curve numbers for long-term no-till corn and agricultural practices with high watershed infiltration. J Soil Water Conserv 68:487–500. <https://doi.org/10.2489/jswc.68.6.487>
- Elhakeem M, Papanicolaou AN (2009) Estimation of the runoff curve number via direct rainfall simulator measurements in the state of Iowa, USA. Water Resour Manag 23:2455–2473. <https://doi.org/10.1007/s11269-008-9390-1>

20. Auerswald K (1985) Erosionsgefährdung unter Zuckerrüben und Sommergerste. *J Agron Crop Sci* 155:34–42
21. Auerswald K (1985) Beurteilung der Erosionsanfälligkeit von Mais bei unterschiedlichen Anbauverfahren. *J Agron Crop Sci* 154:45–55
22. Kainz M (1989) Runoff, erosion and sugar beet yields in conventional and mulched cultivation. *Soil Technol Ser* 1:103–114
23. Haider J (1994) Herbizide in Oberflächenabfluß und Bodenabtrag – Feldversuche mit simulierten Regen. Dissertation, Technische Universität, München
24. Schwertmann U, Vogl W, Kainz M (1987) Boden-erosion durch Wasser – Vorhersage des Bodenabtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Ulmer, Stuttgart
25. Deutsches Institut für Normung (2017) Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. DIN 19708:2017-08; Beuth Verlag, Berlin
26. Seibert SP, Jackisch C, Pfister L, et al (2016) Exploring the interplay between state, structure and runoff behavior of lower mesoscale catchments. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 1–51. [▶ https://doi.org/10.5194/hess-2016-109](https://doi.org/10.5194/hess-2016-109)
27. Markart G, Kohl B, Sotier B, et al (2004) Provisorische Geländeanleitung zur Abschätzung des Oberflächenabflussbeiwertes auf alpinen Boden-/Vegetationseinheiten bei konvektiven Starkregen. BFW-Dokumentation 4: Bundesamt und Forschungszentrum Wald. Wien
28. Tempel M (2006) Abflussverhalten kleiner, forstlich genutzter Bacheinzugsgebiete am Beispiel des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches im Soonwald/Hunsrück. Dissertation, Johannes Gutenberg-Universität, Mainz
29. Fox DM, Bryan RB, Price AG (1997) The influence of slope angle on final infiltration rate for interrill conditions. *Geoderma* 80:181–194. [▶ https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(97\)00075-X](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(97)00075-X)
30. Poesen J (1984) The influence of slope angle on infiltration rate and Hortonian overland flow volume. *Z Geomorph Suppl* 49:117–131
31. Poesen J (1986) Surface sealing as influenced by slope angle and position of simulated stones in the top layer of loose sediments. *Earth Surf Process Landforms* 11:1–10. [▶ https://doi.org/10.1002/esp.3290110103](https://doi.org/10.1002/esp.3290110103)
32. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2016) Loseblattsammlung Hydrologische Planungsgrundlagen. Augsburg
33. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2005) Festlegung des Bemessungshochwassers für Anlagen des technischen Hochwasserschutzes. Karlsruhe
34. Maniak U (2016) Hydrologie und Wasserwirtschaft. Springer, Berlin
35. Junghänel T, Ertel H, Deutschländer T (2017) KOSTRA-DWD-2010R. Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
36. Milly PCD, Wetherald RT, Dunne KA, Delworth TL (2002) Increasing risk of great floods in a changing climate. *Nature* 415:514–517. [▶ https://doi.org/10.1038/415514a](https://doi.org/10.1038/415514a)
37. Milly PCD, Betancourt J, Falkenmark M et al (2008) Stationarity is dead: whither water management? *Science* 319:573–574. [▶ https://doi.org/10.1126/science.1151915](https://doi.org/10.1126/science.1151915)
38. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2013) Amtliche Festsetzung von Überschwemmungsgebieten in Bayern. Informationsdienst Überschwemmungsgefährdete Gebiete. [▶ https://www.lfu.bayern.de/wasser/hw_ue_gebiete/informationsdienst/index.htm](https://www.lfu.bayern.de/wasser/hw_ue_gebiete/informationsdienst/index.htm)
39. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2016) Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Karlsruhe
40. Deutscher Wetterdienst (2017) Raster der Wiederkehrintervalle für Starkregen (Bemessungsniederschläge) in Deutschland (KOSTRA-DWD), Version 2010R. Climate Data Center, Offenbach am Main
41. Deutscher Wetterdienst (2018) RADKLIM. Erstellung einer radargestützten hochaufgelösten Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderungen des Extremverhaltens von Niederschlag. Beschreibung des Kompositformats und der verschiedenen Reprozessierungsläufe. Offenbach am Main
42. Winterrath T, Brendel C, Hafer M, et al. (2018) RADKLIM Version 2017.002: Reprocessed quasi gauge-adjusted radar data, 5-minute precipitation sums (YW). [▶ https://doi.org/10.5676/dwd/radklim_yw_v2017.002](https://doi.org/10.5676/dwd/radklim_yw_v2017.002), Offenbach am Main
43. Fischer FK, Winterrath T, Auerswald K (2018) Temporal- and spatial-scale and positional effects on rain erosivity derived from point-scale and contiguous rain data. *Hydrol Earth Syst Sci* 22:6505–6518. [▶ https://doi.org/10.5194/hess-22-6505-2018](https://doi.org/10.5194/hess-22-6505-2018)
44. Allen RJ, DeGaetano AT (2005) Areal reduction factors for two eastern United States regions with high rain-gauge density. *J Hydrol Eng* 10:327–335. [▶ https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2005\)10:4\(327\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)10:4(327))
45. Asquith W, Famiglietti J (2000) Precipitation areal-reduction factor estimation using an annual-maxima centered approach. *J Hydrol* 230:55–69. [▶ https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00170-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00170-0)

46. De Michele C, Rosso R (2002) A multi-level approach to flood frequency regionalisation. *Hydrol Earth Syst Sci* 6:185–194
47. Rieger W (2012) Prozessorientierte Modellierung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen. Mitt Inst Wasserwesen Wasserwirt Ressourcenschutz 116: Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
48. Achilles W (1993) Deutsche Agrargeschichte im Zeitalter der Reformen und der Industrialisierung. Eugen Ulmer, Stuttgart
49. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2015) Begrünung von erosionsgefährdeten Abflussbahnen. Dresden
50. Auerswald K (2019) Grünlandverlust – Ursachen und Wirkungen. Schriften Bayer Landesanst Landwirtsch 6:17–20, Freising
51. Fiener P, Auerswald K, Van Oost K (2011) Spatio-temporal patterns in land use and management affecting surface runoff response of agricultural catchments – a review. *Earth-Science Rev* 106:92–104. ▶ <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.004>
52. Woolhiser DA, Smith RE, Giraldez JV (1996) Effects of spatial variability of saturated hydraulic conductivity on Hortonian overland flow. *Water Resour Res* 32:671–678
53. Corradini C, Morbidelli R, Melone F (1998) On the interaction between infiltration and Hortonian runoff. *J Hydrol* 204:52–67. ▶ [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(97\)00100-5](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(97)00100-5)
54. Auerswald K, Schröder R (2001) Simulation von verschlammungsgesteuertem Abfluss heterogen genutzter Einzugsgebiete. *Wasser Boden* 53:17–20
55. European Commission (2015) Strip cropping along contours. Natural waters retention measures. ▶ www.nwrm.eu
56. Wischmeier WH, Smith DD (1978) Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. *Agricult Handb* 537: US Department of Agriculture. Washington
57. Kistler M, Brandhuber R, Maier H (2013) Wirksamkeit von Erosionsschutzmaßnahmen, Ergebnisse einer Feldstudie. Schriften Bayer Landesanst Landwirtsch 8: Freising
58. Fiener P, Auerswald K (2005) Measurement and modeling of concentrated runoff in grassed waterways. *J Hydrol* 301:198–215. ▶ <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.030>
59. Bayerisches Landesamt für Statistik (2015) Landwirtschaftlich genutzte Fläche seit 1960 nach Nutzungsarten. Fürth
60. van der Ploeg RR, Ehlers W, Sieker F (1999) Floods and other possible adverse environmental effects of meadowland area decline in former West Germany. *Naturwissenschaften* 86:313–319. ▶ <https://doi.org/10.1007/s001140050623>
61. Natural Resources Conservation Service (2011) Terraces. In: *Engineering Field Handbook*. Part 650, chapter 8. US Department of Agriculture, Washington
62. Zhao J, Van Oost K, Chen L, Govers G (2016) Moderate topsoil erosion rates constrain the magnitude of the erosion-induced carbon sink and agricultural productivity losses on the Chinese Loess Plateau. *Biogeosciences* 13:4735–4750. ▶ <https://doi.org/10.5194/bg-13-4735-2016>
63. Luft G, Vogelbacher A (1985) Modellrechnungen zum Einfluß von Großterrassierungen auf den Abflußprozeß. *Z Kulturtechnik Flurberein* 26:1–12
64. Vogelbacher A (1985) Simulation der Wasserbilanz in terrassierten Lößgebieten. Beiträge zur Hydrologie, Kirchzarten
65. Kovář P, Bačínová H, Loula J, Fedorova D (2016) Use of terraces to mitigate the impacts of overland flow and erosion on a catchment. *Plant, Soil Environ* 62:171–177. ▶ <https://doi.org/10.17221/786/2015-PSE>
66. Schneider A-K, Hohenbrink TL, Reck A et al (2018) Variability of earthworm-induced biopores and their hydrological effectiveness in space and time. *Pedobiologia* 71:8–19. ▶ <https://doi.org/10.1016/J.PEDOB.2018.09.001>
67. Palmer RS (1964) The influence of a thin water layer on waterdrop impact forces. *IAHS Publ* 65:141–148
68. Mutchler CK, Hansen LM (1970) Waterdrop at terminal velocity. *Science* 169:1311–1312
69. Auerswald K, Albrecht H, Kainz M, Pfadenhauer J (2000) Principles of sustainable land-use systems developed and evaluated by the Munich research alliance on agro-ecosystems (FAM). *Petermanns Geogr Mitt* 144:16–25
70. Auerswald K, Fischer FK, Kistler M et al (2018) Behavior of farmers in regard to erosion by water as reflected by their farming practices. *Sci Total Environ* 613–614:1–9. ▶ <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.003>
71. Thünen-Institut (2019) Leistungen des ökologischen Landbaus für Umwelt und Gesellschaft. Thünen-Report 65: Braunschweig
72. Auerswald K, Kainz M, Fiener P (2003) Soil erosion potential of organic versus conventional farming evaluated by USLE modelling of cropping statistics for agricultural districts in Bavaria. *Soil Use Manag* 19:305–311. ▶ <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2003.tb00320.x>

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/ die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Abflusskonzentration – wie Abfluss in der Fläche gebündelt und beschleunigt wird

- 5.1 Grundprinzipien und wesentliche Einflussgrößen – 96
 - 5.2 Abflusstypen und Fließpfade in kleinen, ländlichen Einzugsgebieten – 97
 - 5.3 Methoden zur Abschätzung von Fließgeschwindigkeit und Fließzeit – 102
- Literatur – 110

Dieses Kapitel befasst sich mit der zunehmenden Bündelung und der damit einhergehenden Beschleunigung des Abflusses. Zunächst werden allgemeine Grundprinzipien und Einflussgrößen vorgestellt (► Abschn. 5.1). Dann folgt eine kurze Beschreibung typischer Abflusstypen und Fließpfade in kleinen, ländlichen Einzugsgebieten (► Abschn. 5.2). Darauf aufbauend werden hydraulische Grundlagen und Methoden zur Bestimmung von Fließgeschwindigkeit und Fließzeit beschrieben (► Abschn. 5.3). Insbesondere die Konzentrationszeit ist wichtig. Sie ist die Zeit, die Oberflächenabfluss benötigt, um von der Wasserscheide bis zu einem definierten Bezugspunkt, z. B. einer Ortschaft, zu fließen. Der Bezugspunkt richtet sich nach den örtlichen Gegebenheiten und wird je nach Fragestellung festgelegt. Die Konzentrationszeit lässt sich über die sogenannte Geschwindigkeitsmethode aus der Summe der Fließzeiten des Abflusses in verschiedenen Abflussabschnitten abschätzen. Die vorgestellten Ansätze bilden die Grundlage zur Ableitung von Maßnahmen zur Abflussverzögerung bzw. zur Abschätzung ihrer Wirkung (► Kap. 6). ► Anhang 8.2 ist eine Ergänzung dieses Kapitels und fasst hydraulische Eigenschaften ausgewählter Fließpfade zusammen. Zur Veranschaulichung der Methoden enthält ► Kap. 7 ein Anwendungsbeispiel, bei dem die Einflüsse von Wegseitengräben und der Bewirtschaftung auf Fließzeit und Scheitelabfluss in einem kleinen Einzugsgebiet abgeschätzt wird.

5.1 Grundprinzipien und wesentliche Einflussgrößen

Abfließender Regen wird entlang seiner Fließstrecke an der Wasserscheide beginnend und bis in die Gewässer zunehmend gebündelt. Die Länge und Dichte der Fließpfade sowie deren hydraulische Eigenschaften bestimmen die Geschwindigkeit, mit der Wasser aus der Fläche abgeleitet wird, und damit die Fließ- bzw. Konzentrationszeit

und das Niveau des Scheitels einer Abfluss- oder Hochwasserwelle.

Die Fließpfade und ihre hydraulischen Eigenschaften sind vielfältig. Einflussgrößen von übergeordneter Bedeutung sind das Gefälle, die Rauheit des Untergrunds und die Querschnittsgeometrie des Fließpfades, die den hydraulischen Radius bestimmt. Das Gefälle ergibt sich primär aus der Topographie der Oberfläche. Die Rauheit hängt stark von der Landnutzung ab, wobei versiegelte Flächen besonders glatt und dicht bewachsene Flächen mit unregelmäßigem Untergrund (z. B. Auwälder) hydraulisch sehr rau sind. Glatte Flächen beschleunigen, raue bremsen den Abfluss. Für den Einfluss der Querschnittsgeometrie gilt, dass die Reibung hoch und damit der Abfluss langsam ist, wenn die Fließtiefe im Vergleich zur Fließbreite sehr gering ist. Durch die zunehmende Bündelung des Abflusses von der Wasserscheide bis in die Gewässer nehmen die Fließtiefe und damit die Fließgeschwindigkeit daher im Allgemeinen zu, obwohl das Gefälle geringer wird. Weitere Einflüsse auf die Abflusskonzentration in der Fläche ergeben sich aus Strukturen, die Wasserflüsse lenken oder eigene Fließwege erzeugen. Dazu können beispielsweise Gräben, Feldraine und Schlaggrenzen, Wege, Verrohrungen oder Drainagen, aber auch Hecken und Mulden gehören [1]. Steht die Abflusskonzentration auf einzelnen, landwirtschaftlichen Schlägen im Fokus, sind Richtung und Art der Bewirtschaftung wichtig für die Fließrichtung.

Entsprechend vielseitig sind auch die Ansatzpunkte zum Bremsen des Abflusses: Sie erstrecken sich über den kompletten Fließpfad von der Wasserscheide bis in die Gewässer, und sie umfassen ein breites Repertoire an Maßnahmen, wie Saat- und Bodenbearbeitungstechniken, die Erschließung und Gliederung der Flur, den Wegebau, die Gestaltung von Gräben zur Wasserführung oder den Einsatz von Rohren und Drainagen. Dadurch wirken auch zahlreiche Akteure mit.

5.2 Abflusstypen und Fließpfade in kleinen, ländlichen Einzugsgebieten

Übersteigt die Niederschlagsintensität die Infiltrationsrate (s. ► Kap. 4), entsteht in der Fläche Schichtabfluss. Dies ist ein meist wenige Millimeter starker, flächenhaft auftretender und nicht zusammenfließender Abfluss auf der Bodenoberfläche. Er ist insbesondere auf landwirtschaftlichen Flächen auch für Erosion und Stofftransport bedeutsam. Der Schichtabfluss dominiert an der Wasserscheide oder unterhalb einer wasserableitenden Struktur, bündelt sich dann aber üblicherweise rasch, d. h. häufig nach 50 m spätestens meist nach 100 m, in fein-verästelten Rillen und Rinnen. Die Fließstrecke, nach der dies erfolgt, hängt stark von der Stabilität und Beschaffenheit der Oberflächenstruktur ab. Durch die Art der angebauten Früchte und die Bewirtschaftungsweise variiert dies jahreszeitlich. Dennoch bilden sich auf Ackerschlägen oft typische Abflussmuster aus. Diese Rillen und Rinnen entwässern dann über geomorphologisch bedingte Hangmulden weiter. In Hangmulden können an Schlaggrenzen und Hangfüßen bei Starkregen bereits Abflussraten von mehreren hundert Litern pro Sekunde auftreten. Die Fließpfade in der Fläche lassen sich daher in drei Abschnitte untergliedern (► Abb. 5.1):

1. das flächenhafte Fließen (Schichtabfluss),
2. der Abfluss in verästelten Rillen und Rillen (flacher konzentrierter Abfluss) und
3. der Hangmuldenabfluss in Tiefenlinien (flacher, stärker konzentrierter Abfluss).

Grundsätzlich gilt: Je rauer die Oberfläche, desto langsamer die Fließgeschwindigkeit und desto schwächer auch die Abflusskonzentration, weil das Einschneiden der Rillen und Rinnen später erfolgt. In Wäldern und auf Grünland ist die Bedeckung durch Streu und auf dem Boden aufliegende



► **Abb. 5.1** Abfolge und zunehmende Konzentration des Oberflächenabflusses auf einem querbearbeiteten Ackerschlag vom Schichtabfluss (1), zum Fließen in verästelten Rillen und Rinnen (2) und dem Abfluss in Hangmulden (3) nach einem Starkregenereignis von 54 mm h^{-1} am 21.08.2012. (Quelle: W. Bauer, Agroluftbild)

Pflanzenteile meist hoch und ändert sich im Jahresverlauf kaum. Dadurch ist die mittlere Abflussgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses gering und die Strecke ist lang, die Oberflächenabfluss als flacher (und langsamer) Schichtabfluss zurücklegt. Da der Abfluss sich nicht einschneiden kann, entfällt das Fließen in Rillen und Rillen bei Wald und Grünland oft ganz. Dadurch wird die Strecke des Schichtabflusses besonders bei Grünland viel länger als auf Ackerflächen, da der Schichtabfluss hier direkt in den Hangmuldenabfluss übergeht. Entsprechend vermindern Wald und Grünland Abflussbildung, Abflussgeschwindigkeit und Abflusskonzentration.

Besonders problematisch für die Entstehung von Oberflächenabfluss und Erosion sind dagegen einheitlich mit Reihenkulturen (z. B. Kartoffel, Soja, Mais, Zuckerrübe oder Sonnenblumen) bestellte, langgezogene Hänge. Bei Starkregenereignissen, vor allem im Mai und Juni, verschlammten diese durch den späten Reihenschluss oft rasch und bieten dadurch keinen wirksamen Schutz vor einer effektiven Abflusskonzentration. Es bilden



Abb. 5.2 Massive Bodenabschwemmungen aus Maisfeldern und Abfluss in Tiefenlinien nach Starkregenereignissen vom 06.06.2016 (a) und 04.06.2016 (b) im Gebiet zwischen Hemau und Laaber (Bayern). In der linken Hälfte des rechten Luftbildes wurden Abflusskonzentration (kein baumartig verzweigtes Netz aus Fließpfäden) und Erosion weitgehend durch die Grünlandparzelle verhindert. (Quelle: W. Bauer, Agroluftbild Obertraubling in [3])

sich deutliche Fließmuster, wie sie Luftbildaufnahmen von Maisfeldern (Abb. 5.2), die etwa 10-jährlichen Starkregenereignissen ausgesetzt waren, anschaulich zeigen [2].

Sind lineare Landschaftselemente vorhanden, die den Abfluss ableiten, bevor er sich in Hangmulden sammelt, können die Fließwege zwischen einzelnen Feldern und dem Gewässernetz vielfältig sein. Üblicherweise erfolgt der Abfluss entweder über Schlaggrenzen hinweg der Topographie folgend in Hangmulden durch angrenzende Felder oder er wird durch Ranken, Hecken und Wege oder in Wegseitengräben und Verrohrungen umgeleitet und auf konstruierten Entwässerungspfaden zum nächsten Vorfluter geleitet (Abb. 5.3). Die Bedeutung dieser linearen, den Oberflächenabfluss leitenden Strukturen ist den handelnden Akteuren oft nicht bekannt und ihre Effekte werden in den meisten Studien nicht berücksichtigt [1]. Detaillierte Analysen kleiner Einzugsgebiete, z. B. aus dem Schwimmbachgebiet [4] oder aus Österreich [5], belegen jedoch, dass oft 40 % der Fläche kleiner Einzugsgebiete nicht über topographisch bedingte Fließpfade entwässern, sondern über konstruierte Fließwege. Diese bestätigen auch eigene Erhebungen im Tertiärhügelland, wo fast 60 % der Entwässerungswege in künstlichen Gräben und

Rohren verlaufen. Solche Strukturen könnten prinzipiell, verglichen mit natürlichen Fließpfaden, den Abflussweg verlängern. Heute sind künstlich angelegte Strukturen allerdings meist kürzer und auch glatter, wodurch konstruierte Fließpfade in der Regel den Abfluss beschleunigen [6]. Ein weiterer negativer Effekt der beschleunigten Ableitung von Oberflächenwasser besteht darin, dass das Puffer- und Retentionspotenzial in der Fläche und im Boden nicht oder nur in reduzierter Form genutzt wird, wodurch lineare Entwässerungsstrukturen auch erheblich zur stofflichen Gewässerbelastung beitragen [5].

Das Netz von Fließpfaden und Entwässerungswegen in kleinen Einzugsgebieten wird also nicht nur von der Topographie, sondern auch stark von der Gliederung der Flur und ihrer Erschließung durch Wegenetz und Gräben, aber auch von Drainagen und Verrohrungen geprägt. Lineare Strukturen lenken die auftretenden Wasserflüsse erheblich und beeinflussen damit, wie viel Oberflächenabfluss infiltrieren und zurückgehalten werden kann und wie schnell der Abfluss in die Gewässer gelangt. Dadurch können lineare Strukturelemente einen wichtigen Beitrag zum Erosionsschutz und zur Sicherung der stofflichen Wasserqualität leisten oder das Gegenteil bewirken. Die Förderung des Wasserrückhalts in der Fläche und die

5.2 · Abflusstypen und Fließpfade in kleinen, ländlichen Einzugsgebieten



Abb. 5.3 Fließpfade des Abflusses zwischen Feld und Gewässernetz können vielfältig sein und beispielsweise an Schlaggrenzen (a), in Tiefenlinien (b) oder entlang von Bewirtschaftungsstrukturen wie Ackerrandfurchen oder in Wegseitengräben verlaufen (c). Insbesondere Wegseitengräben können topographisch bedingte Entwässerungswege unterbrechen und durch effiziente Fließwege ersetzen (d). (Bildquellen: boden:ständig (a und c), S. Seibert (b und d))

Minimierung der stofflichen Gewässerbelastung setzen daher neben einem Verständnis für die Prozesse der Abflussbildung auch Kenntnisse über die Fließwege zwischen Wasserscheide und Gewässer voraus. Da viele Strukturen, insbesondere die Verläufe von Gräben, kleinen Wällen oder Verrohrungen selbst aus hochauflösenden Geländemodellen kaum zuverlässig extrahiert werden können, sind Gebietsbegehungen häufig unerlässlich, um den Verlauf der Fließwege zu erfassen.

Unter den linearen Strukturen sind Wege und Wegseitengräben von besonderer Bedeutung. Sie beeinflussen die Abflusskonzentration kleiner Einzugsgebiete stark und nachhaltig, indem sie den Anteil der versiegelten Fläche erhöhen, die Landschaft zerschneiden und dadurch natürliche Entwässerungswege und Einzugsgebietsgrenzen verändern sowie zusätzliche Fließpfade schaffen [7]. Aus der

amtlichen Statistik ist bekannt, dass beispielsweise in Bayern rund 210.000 km Feld- und rund 100.000 km Waldwege vorhanden sind, wovon rund 60 % erst seit den 1960er-Jahren gebaut wurden [8]. Dies entspricht etwa der dreifachen Länge des in Bayern vorhandenen Fließgewässernetzes. Damit wird schon allein aufgrund der Länge des Wegenetzes und der dadurch versiegelten oder stark verdichteten Fläche der Wasserhaushalt verändert. Gleichzeitig gehen mit einer Veränderung des Wegenetzes fast immer Veränderungen der Landnutzung und -struktur einher. Beides kann kaum unabhängig untersucht werden. Die wenigen vorhandenen quantitativen Einschätzungen beruhen auf Modellierungsstudien, Messkampagnen aus sehr kleinen Einzugsgebieten und dem Vergleich flurbereinigter und nicht flurbereinigter Einzugsgebiete. Für Letztere ist aus Südwestdeutschland

bekannt, dass in flurbereinigten Gebieten der Gesamtabfluss im Jahr etwa 30 % höher und die Scheitelabflüsse bis zu 4-fach größer sein können als in nicht flurbereinigten Gebieten [9, 10]. Dies deckt sich mit Untersuchungen aus der Schweiz, wo der Einfluss der Flurbereinigung, vor allem der Bau von Wegen, Wegseitengräben und Dränen, auf das Abflussverhalten von drei kleinen (130, 180 und 380 ha) landwirtschaftlichen Einzugsgebieten untersucht wurde [11]. In Modellierungsstudien konnte für das Wahnbacheinzugsgebiet gezeigt werden, dass der Abfluss bei Berücksichtigung des Wegenetzes um 20 % ansteigt [12]. Für kleine, terrassierte Weinbaugebiete im Kaiserstuhl wird beschrieben, dass der Hauptanteil des Oberflächenabflusses durch befestigte Wege entsteht und dass der Anteil des Oberflächenabflusses proportional zur Vergrößerung der versiegelten Flächen zunimmt [13].

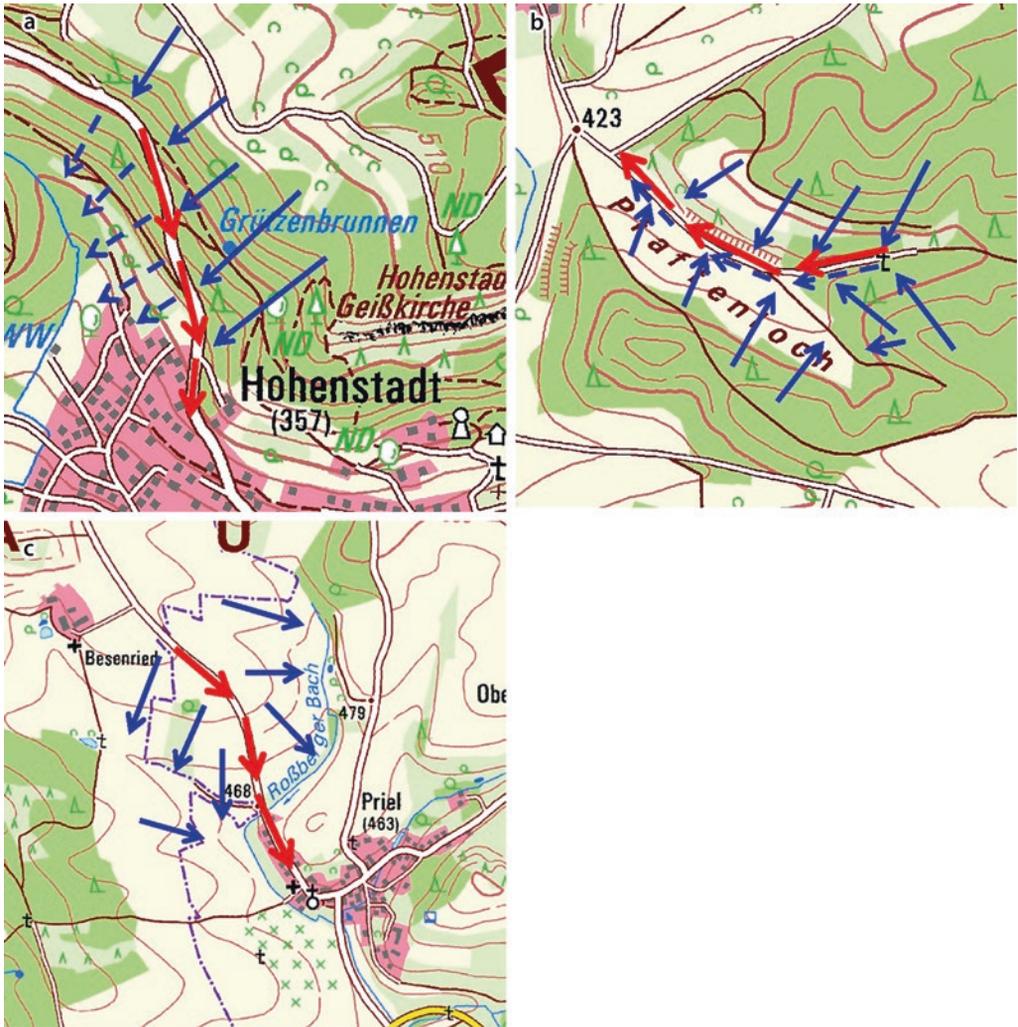
Eine wesentliche Eigenschaft von Wegen besteht also darin, dass sie, durch die Bereitstellung versiegelter Flächen, immer und unabhängig von der Niederschlagshöhe zum Abflussgeschehen beitragen [7]. Bei kleinen Niederschlagsereignissen ist ihr Beitrag überproportional groß, weil da die übrige Fläche noch keinen Abfluss liefert. Bei großen Ereignissen beruht dagegen die Hauptwirkung von Straßen und Wegen darauf, dass sie zusammen mit den Seitengräben die Abflussgeschwindigkeit erhöhen, und der Scheitelabfluss steigt. Da Straßen und Wege fast immer mit Wegseitengräben ausgeführt werden, teilweise auch beidseitig (s. ► Kap. 7), hat der Wegebau ein sekundäres Gewässernetz geschaffen. Wenn Feld- und Waldwege dreifach länger sind als das primäre Gewässernetz, bedeutet dies, dass das sekundäre Gewässernetz drei- bis sechsfach länger sein muss als das primäre. Dieses sekundäre Gewässernetz ist die überwiegende Zeit des Jahres inaktiv und wird daher häufig nicht als solches wahrgenommen. Auch ist dieses sekundäre Gewässernetz in der Regel nicht systematisch erfasst und nicht in Karten dargestellt. Daher wird seine Bedeutung stark unterschätzt [14].



■ **Abb. 5.4** Netzwerk aus Gräben (74 km) zusätzlich zum Netz der Bäche (54 km) im 47 km² großen Einzugsgebiet des Schwimmbachs bei Marklkofen an der Vils [15]

Detaillierte Erfassungen von Wegseitengräben in Beispielgebieten verdeutlichen jedoch, dass Gräben die Landschaft vielerorts sehr feingliedrig erschließen und parallel zu den Gewässern III. Ordnung ein sekundäres Entwässerungsnetz entstand (■ Abb. 5.4; s. a. ► Kap. 7). Beim Auftreten von Oberflächenabfluss wird es aktiviert und ist dann entsprechend seiner Länge bedeutsamer als das Netz dauerhaft wasserführender Gewässer. Für den erosionsbedingten Sedimenttransport ist außerdem bedeutsam, dass Abfluss, der von einem Wegseitengraben abgefangen und dem Gewässer zugeleitet wird, keinen Gewässerrandstreifen durchfließt. Damit stellen Wegseitengräben einen sehr effektiven Bypass dar, der die meisten Gewässerrandstreifen außer Funktion setzt.

Besonders anschaulich lassen sich die Effekte auf Abflussbildung und -konzentration bei Wegen, die schräg zum Hang verlaufen, illustrieren (■ Abb. 5.5 oben links). In diesem Fall können Wege eine Vielzahl natürlicher, in Gefällerrichtung verlaufender Fließpfade unterbrechen und das Wasser großer Einzugsgebietsflächen sammeln und konzentriert zum Tiefpunkt ableiten. Dies ist insbesondere



■ **Abb. 5.5** Verlauf natürlicher (blaue Pfeile), unterbrochener (blau gestrichelte Pfeile) und durch den Wegebau künstliche geschaffener Entwässerungswege (rote Pfeile). Dargestellt sind schräg zum Gefälle verlaufende Wege (a), die den Abfluss großer Einzugsgebiete sammeln und zu einem einzigen Tiefpunkt hin ableiten können. Wege in der Tiefenlinie (b) sind sehr weit verbreitet und können den Abfluss auf der Straße oder in wegbegleitenden Gräben stark beschleunigen. Wege auf der Wasserscheide bzw. mit einem Verlauf auf dem Hangrücken (c) beeinflussen die natürliche Entwässerung kaum. Lediglich auf dem Weg selbst kommt es durch das Gefälle zu einer starken Beschleunigung des mengenmäßig aber geringen Abflusses (Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung)

bei Waldwegen problematisch, da im Wald ein großer Teil des Abflusses bei Starkregen oder Schneeschmelze als Zwischenabfluss langsam im Boden fließt. Durch den Einschnitt der schräg verlaufenden Wege tritt dieser Zwischenabfluss aus und wird zu Oberflächenabfluss, der im Wegseitengraben um

ein Vielfaches schneller abgeleitet wird [16] (vgl. auch ► Anhang 8.7).

Problematisch können auch Wege in der Tiefenlinie sein, wenn der Weg selbst oder ein hydraulisch effektiv gestalteter Seitengraben das Wasser sammelt und ableitet (■ Abb. 5.5 oben rechts). Unter solchen

Bedingungen wird der Abfluss fast immer (deutlich) beschleunigt, da der konstruierte Entwässerungsweg in nahezu allen Fällen hydraulisch effektiver gestaltet ist als ein Fließpfad, der der natürlichen Topographie folgend durch einen bewachsenen Taleinschnitt führen würde.

Günstig sind dagegen Wege entlang der Wasserscheide und auf Hangrücken (Abb. 5.5 unten links). Diese verfügen zwar im unteren Bereich über ein hohes Gefälle, was zu einer Beschleunigung des Abflusses führt, dafür ist ihr Einzugsgebiet aber sehr klein, wodurch ihre Bedeutung für die Gebietsentwässerung gering bleibt. Bemerkenswert ist, dass früher vermutlich viele Wege so geführt wurden (s. ▶ Anhang 8.7), wohl auch, um die damals unbefestigten Wege vor Erosion durch Wasser zu schützen. Durch das kleine Einzugsgebiet bei dieser Wegführung war kein Wegseitengraben erforderlich. Vor allem in den 1970er-Jahren wurden dann die Wege in die vorher begrünte Tiefenlinie gelegt, und damit musste der Wegseitengraben als integraler Bestandteil des Wegebaus eingeführt werden. Die abflussbremsendste Art, Wasser abzuleiten, nämlich entlang einer flachen Grünlandmulde, wurde ersetzt durch die schnellste und damit auch hochwasserförderndste Art, nämlich einen effizienten Graben.

5.3 Methoden zur Abschätzung von Fließgeschwindigkeit und Fließzeit

Dem Charakter eines Handbuchs über Planungsmethoden folgend, werden hier einfache, etablierte Berechnungsansätze wie die Gauckler-Manning-Strickler-Gleichung (GMS-Gleichung) vorgestellt. Dabei müssen teils stark vereinfachende Annahmen getroffen werden. Dazu zählt, dass der Abfluss als konstant und gleichförmig betrachtet wird (stationäre Bedingungen). Dies ist aber grundsätzlich nicht der Fall, da jede Welle sich zumindest aufbaut und dann wieder

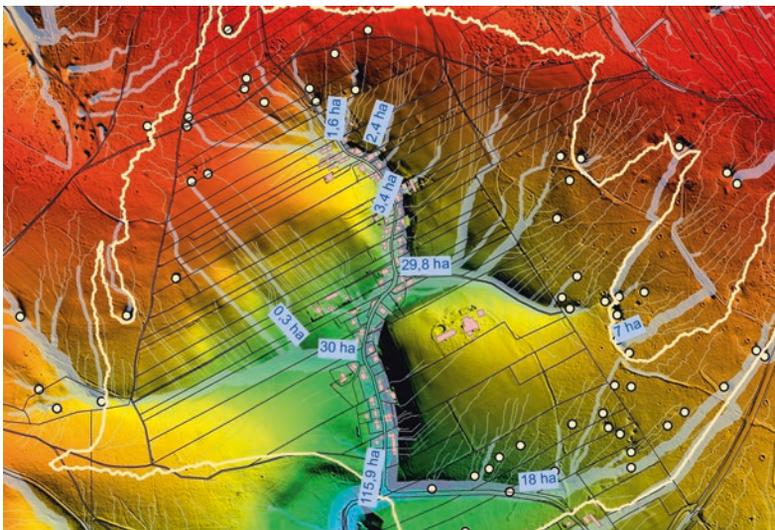
abflacht. Um diese instationären Bedingungen korrekt abzubilden, wären Flachwassergleichungen (Saint Venant) erforderlich, wie sie üblicherweise in hydrodynamischen Modellen implementiert sind. Aufgrund ihrer Komplexität erfordern diese Modelle jedoch entsprechendes Wissen, Software und hinreichend hochaufgelöste und genaue Daten. Trotz dieser Einschränkung können mit stationären Betrachtungen für viele praktische Fragestellungen hinreichend genaue Lösungen ermittelt werden. Das gilt zum Beispiel für die Bestimmung der Konzentrationszeit bei kurzen schauerartigen Starkregen. Da die Annahme konstanter Abflussverhältnisse das Aufbauen der Welle zu Beginn eines Ereignisses vernachlässigt, wird die tatsächliche Konzentrationszeit unterschätzt. Aus gleichem Grund werden die Unterschiede zwischen Flächen unterschätzt, die sich in ihrer Fließgeschwindigkeit unterscheiden. Da das Aufbauen einer Welle bei langsamer Fließgeschwindigkeit deutlich länger dauert als bei hoher Fließgeschwindigkeit, ist auch die Unterschätzung größer. Die auf der GMS-Gleichung beruhenden Berechnungen stellen daher eine konservative Annahme hinsichtlich der Unterschiede zwischen verschiedenen Varianten dar. Der Vorteil der GMS-Gleichung ist, dass schnell und mit relativ geringem Aufwand die Abflussgeschwindigkeit abgeschätzt und der Einfluss eines Fließpfades auf den Abfluss beschrieben werden kann. Auch kann so ermittelt werden, wie Fließpfade gestaltet werden müssen, um möglichst abflussbremsend zu wirken. Für die Anwendung der GMS-Gleichung müssen die Fließpfade in einigermaßen einheitliche Abschnitte unterteilt werden. Dies sind meist – von der Wasserscheide ausgehend – der Schichtabfluss, der flache konzentrierte Abfluss, der Abfluss in Hangmulden und schließlich der Abfluss in Gerinnen und Gewässern. Für diese Abschnitte werden dann die hydraulischen Kenngrößen ermittelt (s. ▶ Abschn. 5.2), wodurch sich Fließzeit und -geschwindigkeit in den einzelnen Abschnitten und aus deren Summe die Konzentrationszeit abschätzen

lässt. Das Verfahren wird als Geschwindigkeitsmethode bezeichnet. In ► Kap. 7 befindet sich ein Rechenbeispiel.

5.3.1 Fließwege im Einzugsgebiet

Ausgangspunkt zur Beschreibung der Abflusskonzentration und zur Planung von Maßnahmen ist die Erfassung der dominanten Fließprozesse im Einzugsgebiet. Dies erfordert eine Erfassung der wichtigsten oberirdischen Fließwege von der Wasserscheide bis ins Gewässernetz. Dazu bieten sich eine Feldkartierung oder die Auswertung digitaler Geländemodelle an (idealerweise wird beides kombiniert). Fließpfadalgorithmen sind heute in allen gängigen Geographischen Informationssystemen (GIS) implementiert und erlauben es, Fließpfadmuster in der Fläche schnell und effizient aus Geländemodellen abzuleiten (► Abb. 5.6). Voraussetzung dafür sind hochauflösende (Rasterweite ≤ 5 m) und von Artefakten bereinigte Geländemodelle.

Artefakte sind häufig problematisch und Strukturen wie Wegseitengräben, verrohrte Abschnitte, kleine Brücken und Wälle, Drainagen oder andere den Abfluss lenkende Strukturen, wie Bordsteinkanten oder Feldraine, werden nicht oder nicht korrekt dargestellt. Auch können sich Fließwege im Jahresverlauf oder in Abhängigkeit von Bodenbewirtschaftung und Regenintensität ändern [17], was ggf. berücksichtigt werden muss, wenn konkrete Ereignisse rekonstruiert werden sollen. Eine Gebietsbegehung zur Verifizierung der Ergebnisse digitaler Ableitungen ist daher im Allgemeinen unerlässlich. Eine Begehung bietet darüber hinaus die Möglichkeit, Spuren von Stofftransport wie Erosionsrinnen, verfüllte oder erodierte Gräben, überspülte Wege oder Feldraine und dergleichen zu erfassen. Dies liefert oft wertvolle Informationen zum Verständnis der lokalen Abflussverhältnisse und Hinweise für Maßnahmen zur Abflussminderung. Praktische Empfehlungen zur Kartierung von Fließwegen sind in ► Anhang 8.8 zusammengestellt. Sind quantitative



► **Abb. 5.6** Ermittlung oberflächlicher Abflusspfade (hellgraue Linien) durch Auswertung hochaufgelöster Geländemodelle (Rasterweite 1 m) am Beispiel eines 116 ha großen Einzugsgebietes (weiße Linie) im Malm (weißer Jura) (Höhenunterschied ca. 50 m, mittleres Gefälle 8 %). Die Breite der hellgrauen Linien wurde relativ zur Größe des angeschlossenen Einzugsgebietes skaliert. Die weißen Punkte markieren die Lage von Dolinen. Schwarze Linien markieren die Flurstücksgrenzen, die Färbung die Höhe über NN. (Quelle: H&S Ingenieure Freising)

Aussagen und hydraulische Berechnungen erforderlich, z. B. zur Ermittlung von Scheitelwerten oder Abflussvolumina, müssen der Verlauf der Fließpfade und ihre (hydraulischen) Kenngrößen (Länge, Querschnittsgeometrie, Rauheit und Gefälle) erfasst werden.

5.3.2 Hydraulische Grundlagen

5

Wesentlich ist die Abflussrate (q). Sie ergibt sich durch Multiplikation der mittleren Fließgeschwindigkeit (v) mit der durchflossenen Querschnittsfläche (A):

$$q = v \cdot A \quad (5.1)$$

Wobei

q - Abflussrate ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

v - Mittlere Fließgeschwindigkeit (m s^{-1})

A - Durchflossene Querschnittsfläche (m^2)

Wird die Abflussrate durch die Fläche des dazugehörigen Einzugsgebietes A_{EZG} (m^2) geteilt, resultiert nach Kürzen der Einheiten die mittlere Abflussspende (z. B. mm h^{-1}) des Einzugsgebietes.

$$q_s = 3,6 \cdot q / A_{\text{EZG}} \quad (5.2)$$

Wobei

q - Abflussrate ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

A_{EZG} - Einzugsgebietsgröße (km^2)

Abflussspenden lassen sich gut mit der Niederschlagsintensität vergleichen, da beide Größen über die gleiche Einheit verfügen. Die Verwendung von Abflusssraten oder -spenden ist daher günstiger als die Verwendung von Wasserständen, die immer abhängig von der durchflossenen Querschnittsfläche und somit ortsabhängig sind.

Aus ► Gl. 5.1 folgt, dass sich die Fließgeschwindigkeit erhöht, wenn die durchflossene Querschnittsfläche abnimmt, und umgekehrt. Sind die Fließwege bekannt, lässt sich diese Gleichung auf alle Abschnitte des

Fließpfades mit relativ einheitlicher Geometrie, Gefälle und Rauheit von der Wasserscheide bis zum Bezugspunkt anwenden (vgl. ► Abb. 3.6). Dabei müssen nicht alle (ähnlichen) Fließeinheiten innerhalb eines Abschnitts erfasst werden, sondern es genügt eine repräsentative Einheit. Im Folgenden wird unter Fließpfad der gesamte Fließweg von der Wasserscheide bis zum Bezugspunkt an einer repräsentativen Stelle verstanden; unter Abschnitt (oder Zone) wird ein Teil des Fließpfades mit charakteristischem Fließverhalten verstanden, z. B. der Abschnitt mit schichtförmigem Abfluss oder der Abschnitt mit Rillenabfluss (vgl. ► Abb. 3.6); unter repräsentativer Einheit wird z. B. eine typische Rille innerhalb des Abschnitts mit rillenförmigem Abfluss verstanden oder ein Grabenabschnitt mit relativ einheitlichem Gefälle, Querschnitt und Oberfläche.

Durch Division der Fließstrecke (l) mit der mittleren Strömungsgeschwindigkeit ergibt sich die durchschnittliche Fließzeit.

$$t = \frac{l}{60 v} \quad (5.3)$$

mit

t - Fließzeit (min)

l - Fließstrecke (m)

60 - Umrechnungskonstante von s in min

Aus der Gleichung folgt, dass jede Verlängerung der Fließstrecke die Hochwasserwelle mindert und zwar in zweifacher Art und Weise. Einerseits, weil der Weg länger wird, und andererseits, weil sich bei längerem Weg (und gleichbleibender Höhendifferenz) das Gefälle und damit die Abflussgeschwindigkeit reduziert.

Die Verlängerung der Fließstrecke ist daher das erste wesentliche Prinzip einer hochwassermindernden Fließweggestaltung. Zwei weitere werden folgen.

5.3.3 Die Geschwindigkeitsmethode zur Bestimmung der Konzentrationszeit

Die hier dargestellten hydraulischen Grundlagen bilden das Fundament zur Bestimmung der Konzentrationszeit ($t_c = \text{time to concentration}$). Wesentliche Einflussgrößen sind Gefälle, Ausmaß der Abflussbündelung, sowie Rauheit und Art des Fließpfades. Zusammen mit einer Schätzung des Abflussvolumens erlaubt die Konzentrationszeit, Scheitelabflüsse und Abflussganglinien abzuschätzen bzw. zu konstruieren. Ihr kommt dadurch für viele Bemessungsaufgaben eine hohe Bedeutung zu.

Für Planungszwecke hinreichend wird die Konzentrationszeit für einen definierten Punkt vereinfachend als Konstante angenommen, obwohl sie von Regen zu Regen variiert [18, 19]. Ist die Spannweite der Konzentrationszeit von Bedeutung, kann sie ermittelt werden, indem verschiedene Verfahren verwendet oder die Parameter einzelner Methoden innerhalb sinnvoller Wertebereiche verändert werden. Zur Bestimmung der Konzentrationszeit existieren zahlreiche hydraulische und empirische Methoden [20]. Am wichtigsten für kleine Einzugsgebiete ist die Geschwindigkeitsmethode [21]. Sie basiert auf physikalischen Gesetzmäßigkeiten und berücksichtigt, dass der Fließpfad aus unterschiedlichen Abschnitten besteht. Die hydraulischen Eigenschaften entlang des kompletten Fließpfades werden abgebildet. Dadurch ist sie empirischen Ansätzen überlegen und Mittel der Wahl für kleine Einzugsgebiete und für Planungsaufgaben, bei denen es nicht darauf ankommt, jeden einzelnen Regen bestmöglich zu schätzen, sondern das Zusammenspiel verschiedener Landschaftselemente möglichst optimal zu gestalten. Weniger oder nicht geeignet ist die Geschwindigkeitsmethode, wenn Prozesse wie Wellenüberlagerungen, Rückstau, Ausuferungen oder die Ausbreitung von Sättigungsflächen stark die Fließzeit beeinflussen. Diese Prozesse werden nicht erfasst. Für größere Einzugsgebiete und hydraulisch

komplexe Fließstrecken mit flachen, ausgedehnten Überschwemmungsbereichen ist der Ansatz daher weniger geeignet.

Die Geschwindigkeitsmethode setzt voraus, dass zunächst der Bezugspunkt bestimmt und ausgehend davon der (hydraulisch) längste, hinsichtlich der Nutzung typische Fließpfad bis zur Wasserscheide bestimmt wird (als Beispiel siehe [Abb. 6.2](#)). Ist der längste Fließpfad bekannt, muss er in näherungsweise einheitliche Abschnitte untergliedert werden. In kleinen Einzugsgebieten oberhalb der Gewässer III. Ordnung sind das typischerweise Schichtabfluss, Abfluss in Rinnen und Rillen, Hangmuldenabfluss und das Fließen in Gräben und kleinen Bächen ([Abb. 3.6](#)). Ist diese Untergliederung erfolgt, wird für jeden Abschnitt die mittlere Fließgeschwindigkeit und aus der Länge des Abschnitts die jeweilige Fließzeit abgeschätzt. Die hydraulischen Eigenschaften und die Bestimmung der Fließgeschwindigkeit in unterschiedlichen Abschnitten des Fließpfades sind im Folgekapitel und im [Anhang 8.2](#) beschrieben. Die Konzentrationszeit ergibt sich dann aus der Summe der Fließzeiten der einzelnen Abschnitte ([Gl. 5.4](#)):

$$t_c = t_{t1} + t_{t2} + \dots + t_{tm} \quad (5.4)$$

mit

t_c - Konzentrationszeit (h)

t_{tn} - Fließzeit im Abschnitt n (h)

5.3.4 Fließgeschwindigkeitsbestimmung mithilfe der Gauckler-Manning-Strickler-Gleichung

Die mittlere Fließgeschwindigkeit ergibt sich nach [Gl. 5.1](#) aus dem Quotienten von Abflussrate und durchflossener Querschnittsfläche. Selbst in dauerhaft wasserführenden Gerinnen ist die Bestimmung der beiden Parameter aufwendig. Für Planungsaufgaben und insbesondere für Gerinneabschnitte, die nicht dauerhaft Wasser führen, ist es daher einfacher, die Fließgeschwindigkeit mit der empirischen Fließgleichung zu berechnen, die Gauckler,

Manning und Strickler unabhängig voneinander Ende des 19. und Anfang des 20. Jahrhunderts abgeleitet haben (GMS-Gleichung). Die GMS-Gleichung berücksichtigt Neigung, Fließwiderstände und Geometrie des Abflusspfades – und damit alle hydraulischen Faktoren, die den Abflussprozess wesentlich beeinflussen.

$$v = R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \cdot k \tag{5.5}$$

mit

R - Hydraulischer Radius (m)

J - Gefälle (-)

k - Rauheitsbeiwert ($m^{1/3} s^{-1}$)

Die GMS-Gleichung ist für viele praktische Fragen hinreichend genau und deshalb heute ein international gültiges Standardverfahren. Sie wird hier für alle Abflusstypen verwendet (einschließlich Schichtabfluss und flachen konzentrierten Abfluss), obwohl die Gleichung im engeren Sinne nur für gleichförmigen turbulenten Abfluss in offenen Gerinnen gilt. Die GMS-Gleichung ist gleichermaßen geeignet, die Fließzeit einzelner Gewässerteilstrecken, die Konzentrationszeit eines Gebietes oder auch den Einfluss einer Maßnahme zum Bremsen des Abflusses entlang des Fließpfades abzuschätzen.

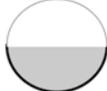
Der hydraulische Radius berücksichtigt die Strömungswiderstände, die sich aus der Geometrie des Fließpfades ergeben. Er ergibt sich aus dem Verhältnis von durchflossener Querschnittsfläche *A* und benetztem Umfang *U*. Letzterer entspricht dem Umfang des Gerinnes bzw. Fließpfadquerschnittes, der in Kontakt zum Abfluss steht. Je größer der benetzte Umfang im Verhältnis zur Querschnittsfläche, desto kleiner *R* bzw. desto höher die, aus der Fließpfadgeometrie resultierende, Reibung und damit desto langsamer der Abfluss.

$$R = \frac{A}{U} \tag{5.6}$$

mit

U - Benetzter Umfang (m)

A - Durchflossene Querschnittsfläche (m²)

Fließabschnitt	Typische Form	Typischer hydraulischer Radius (cm)
Schichtabfluss		0,2
Rillen- und Rinnenabfluss		4
Hangmuldenabfluss		10
Rohre		25
Gräben		25
Bäche und kleine Gewässer		350

■ **Abb. 5.7** Typische Formen des Abflusses in aufeinanderfolgenden Fließabschnitten und zugehörige hydraulische Radien (fette Linie = benetzter Umfang, schattierte Fläche = durchflossene Querschnittsfläche)

Typische Beispiele für den hydraulischen Radius in den verschiedenen Abschnitten des Fließweges zeigt ■ **Abb. 5.7**. Um den hydraulischen Radius für unterschiedliche Querschnittsflächen zu bestimmen, können die in ► **Anhang 8.2.4** zusammengestellten Formeln verwendet werden. Entlang des Fließweges nehmen *R* und damit auch die Fließgeschwindigkeit um mehrere Zehnerpotenzen zu. Umso mehr, je stärker der Abfluss eingengt wird.

Daher erhöhen alle Maßnahmen die Fließgeschwindigkeit, die den Abfluss konzentrieren. Alle Ansätze, die zu einem breitflächigen Abfluss führen, wirken dagegen bremsend. Dies ist das zweite wesentliche Prinzip einer hochwassermindernden Fließweggestaltung.

Das Gefälle des Fließpfades (J) (eigentlich müsste das Energiegefälle, also das Gefälle des Wasserspiegels verwendet werden) ist ein Maß für die beschleunigende Kraft. Je steiler das Gefälle, desto schneller der Abfluss und umgekehrt. Das Gefälle kann im Gelände leicht erfasst oder aus topographischen Karten oder digitalen Geländemodellen abgeleitet werden, indem die Höhendifferenz des Fließpfades durch die dazugehörige Länge des Fließpfades dividiert wird. Entsprechend wird das Gefälle in der GMS-Gleichung dimensionslos bzw. in (m/m) angegeben. Das Gefälle kann in der Praxis (nur) indirekt über die Länge des Fließweges beeinflusst werden, da die Höhendifferenz zwischen Wasserscheide und Bezugspunkt üblicherweise nicht verändert werden kann.

Der Rauheitsbeiwert (k) berücksichtigt den Einfluss der Oberflächenbeschaffenheit des Fließweges. Je rauer der Fließweg, z. B. durch Bewuchs, desto kleiner der k -Wert und desto geringer die Fließgeschwindigkeit. Umgekehrt steigt k , je glatter und gleichmäßiger Sohle und Wandungen des Fließpfades sind. Die höchsten k -Werte haben glattverputzte Betonkanäle, die niedrigsten treten bei heterogen strukturierten oder stark verkrauteten Fließpfaden auf, z. B. verzweigte Fließpfade in Auwäldern oder alpine Wildbäche mit grobem Geröll und Geschiebetrieb. Wichtig ist, dass der Rauheitsbeiwert linear in der GMS-Gleichung eingeht. Dadurch ist die Strömungsgeschwindigkeit direkt proportional zu k und entsprechende Sorgfalt bei der Wahl von k geboten. Auch hat die Rauheit dadurch nach dem hydraulischen Radius den größten Einfluss auf die Abflussgeschwindigkeit.

Das dritte (und vielleicht wichtigste) Grundprinzip einer hochwassermindernden Fließweggestaltung besteht daher darin, den Fließweg so hydraulisch rau wie möglich zu gestalten.

Die mittlere Fließzeit (in min) entlang eines Abflusspfades ergibt sich, wenn die GMS-Gleichung in Gl. (5.3) eingesetzt wird.

$$t = \frac{l}{60R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \cdot k} \quad (5.7)$$

Rauheitsbeiwerte in einem Gewässer sind bestimmbar, wenn Abflussrate oder Fließgeschwindigkeit und Querschnittsfläche bekannt sind. Im Normalfall muss auf Literaturwerte zurückgegriffen werden, die in [Tab. 5.1](#) für unterschiedliche Beschaffenheit von Sohle und Böschung zusammengetragen sind (Achtung: für Schichtabfluss gelten andere Rauheitsbeiwerte, die in [Tab. 8.2](#) zu finden sind; die Unterschiede ergeben sich daher, weil beim Schichtabfluss nicht alle Rauheitselemente überflossen werden und weil die durch auftreffende Regentropfen erzeugten Turbulenzen ebenfalls wesentlich zur Rauheit beitragen). Demnach können je nach Oberflächenbeschaffenheit von Gerinnen die k -Werte zwischen 15 und knapp 80 variieren, wenn man die Gebirgswildbäche außen vor lässt. Dies bedeutet, dass man allein mit der Oberflächenbeschaffenheit den Abfluss schon um den Faktor vier beschleunigen oder abbremsen kann, was den Scheitel einer Abflusswasserwelle um den gleichen Faktor erhöht bzw. senkt. [Tab. 5.1](#) gibt Spannweiten an. Eher niedrige Werte sind dann anzusetzen, wenn die Rauheit untypisch hoch ist (z. B. starke Verbuschung), eher hohe Werte, wenn das Gerinne untypisch glatt ist (z. B. nach einer Grabenräumung mit einem schälenden Werkzeug). Gleichzeitig erlaubt dies auch eine Abschätzung der Unsicherheit. Da die Rauheitswerte linear die Fließgeschwindigkeit beeinflussen, bedeutet eine Spanne von 40...50, dass die Fließgeschwindigkeit gegenüber einem mittleren Rauheitsbeiwert von 45 um 10 % höher oder niedriger ausfallen könnte. Für gegliederte Gewässerbetten oder zur Berücksichtigung von Unregelmäßigkeiten, Änderungen des Querschnitts, Hindernissen

■ **Tab. 5.1** Rauheitsbeiwerte für konzentrierten Abfluss in linearen Strukturen oder flächenhaftem Abfluss mit Fließtiefen >5 cm bei unterschiedlicher Beschaffenheit der Oberfläche. Zur Darstellung typischer Spannweiten ist die Rauheit in Bereichen „von“ ... „bis“ angegeben. Analog wird die Oberflächenbeschaffenheit (Spalte 1) vielfach für unterschiedliche Zustände angegeben. Die niedrigere „von“-Rauheitswert bezieht sich dann auf den rauen, der höhere „bis“-Rauheitswert auf den glatteren Zustand. Rauheitsbeiwerte für Schicht- und Rillenabfluss (Fließtiefen ≤ 3 cm) können ■ Tab. 8.2 im Anhang entnommen werden

Oberflächenbeschaffenheit	k-Wert ($m^{1/3} s^{-1}$)	Quelle
Natürliche und naturnahe Gerinne		
Wildbach mit sehr grobem Fels und Geröll, Geschiebe in Bewegung, rascher Wechsel von Becken, Abstürzen und Schussrinnen	9 ... 22	[24–28]
Wildbach mit grobem Geröll und Steinen, Geschiebe überwiegend ruhend	25 ... 28	[25, 27–29]
Gewässer mit unregelmäßiger Sohle und Böschung, je nach Verkrautung, Wurzeln und Geschiebetrieb	25 ... 35	[25, 27–30]
Bäche und Gräben mit gleichförmiger Böschung und Gewässersohle (mit Bewuchs ... ohne oder kurzer Bewuchs)	30 ... 35	[30]
Gewässersohle aus Schotter, Grobkies oder Natursteinen	30 ... 45	[30]
Flussbett mit Gewässersohle aus Mittel- und Feinkies, wenig Unregelmäßigkeiten	35 ... 55	[25, 27, 28, 30, 31]
Einheitliches Gewässerbett aus Sand oder Feinkies mit wenig Unregelmäßigkeiten	50 ... 55	[30]
Kanäle, Gräben und künstliche Gerinne		
Raue Sohlrampe/-gleiten	10 ... 20	[32]
Böschungsbefestigung aus grober Steinschüttung und toleriertem Bewuchs	20 ... 27	[30]
Erdkanal mit sehr starker Verkrautung	18 ... 24	[26]
Grobe Steinschüttung ohne Bewuchs	20 ... 30	[30]
Gerinneprofile mit Sohlen aus Sand und Kies. Ufer ggf. mit Gras bewachsen, vereinzelt Schilf oder Röhricht (typisch für korrigierte Gerinne mit flachem Gefälle, steiler Böschung und teilweise toleriertem Bewuchs)	28 ... 32	[23, 24]
Einheitliches Profil mit Sohle aus feineren Substraten (Lehm) und mit kurzem Gras bewachsener, steiler Böschung (z. B. Kanäle und Gräben mit mäßigem Bewuchs ... frisch geräumt)	26 ... 40	[23, 30]
Erdkanal mit Sohle aus Sand und Kies, gepflasterte Böschung	40 ... 50	[25, 27–29]

(Fortsetzung)

Tab. 5.1 (Fortsetzung)

Oberflächenbeschaffenheit	k-Wert ($m^{1/3} s^{-1}$)	Quelle
Erdkanal aus festem Material, glatt	50 ... 60	[25, 26, 29]
Gemauerter Kanal (unverfugt ... verputzt)	60 ... 70	[26, 28]
Werkkanal aus Asphaltbeton, glattgestrichen	72 ... 77	[28]
Rohre		
Betonrohr, zusammengesetzt mit geschlossenen Fugen	85 ... 95	► bauformeln.de ^a
Asbest-Zementrohr (je nach Alter)	85 ... 100	► bauformeln.de ^a
Stahlrohr (alt/verrostet ... neu/glatt)	60 ... 100	► bauformeln.de ^a
Tonrohr	70 ... 85	Expertenschätzung
PVC-Rohr	90 ... 100	Expertenschätzung
Breitflächiges Fließen auf Flächen und Wegen mit unbefestigter, verdichteter oder versiegelter Oberfläche (Fließtiefe >5 cm)		
Asphalt und grober Beton, z. B. befestigte Fahr- und Wirtschaftswege, Parkplätze	50 ... 70	Expertenschätzung
Feines, festes ggf. verdichtetes Material, z. B. Grünwege	40 ... 45	Expertenschätzung
Wassergebundene Decke, z. B. geschotterte Fahr- und Wirtschaftswege	45 ... 50	Expertenschätzung
Grobkies, Gittersteine, Pflaster	35 ... 50	Expertenschätzung
Breitflächiges Fließen in Gewässervorländern, bestehend aus landwirtschaftlichen Flächen, Auen und Wäldern (Fließtiefe >5 cm)		
Bruchwälder	3 ... 6	Expertenschätzung
Weich- und Hartholzauen je nach Unterwuchs	6 ... 15	► bauformeln.de ^a
Wälder (Dickung ... Hochwald)	12 ... 30	Expertenschätzung
Hochstaudenfluren und Sukzessionsflächen je nach Dichte des Bewuchses und Jahreszeit	9 ... 29	► bauformeln.de ^a
Begrünte Tiefenlinien (Grassed Waterway) je nach Vegetationsmanagement: – Ähnlich wie Sukzessionsflächen (Hochstaudenflur) – Wiesenähnlich, z. B. jährliches Mulchen	9 ... 29 12 ... 30	Expertenschätzung
Acker (Bedeckung >30 % ... Bedeckung <10 %)	16 ... 25	Expertenschätzung
Wiese (hohe, dichte Bedeckung z. B. Sommer ... frisch gemäht oder geringe Bedeckung im Winter)	25 ... 45	[30]

^a ► <https://www.bauformeln.de/wasserbau/gerinnehydraulik/rauheitsbeiwerte-nach-strickler/>

im Gewässer stehen weitere Verfahren zur Verfügung, mit denen Zu- oder Abschläge für die Rauheitsbeiwerte ermittelt werden können [23]. Anhaltspunkte zur Bestimmung von Rauheitsbeiwerten ergeben sich durch visuellen Vergleich mit beschriebenen Gewässerquerschnitten und -eigenschaften [23, 24].

Literatur

5

- Fiener P, Auerswald K, Van Oost K (2011) Spatio-temporal patterns in land use and management affecting surface runoff response of agricultural catchments – a review. *Earth-Sci Rev* 106:92–104. [▶ https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.004](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.004)
- Kistler M, Brandhuber R, Maier H (2013) Wirksamkeit von Erosionsschutzmaßnahmen, Ergebnisse einer Feldstudie. *Schriftenr Bayer Landesanst Landwirtsch* 8: Freising
- Brandhuber R, Treisch M, Fischer F, et al (2017) Starkregen, Bodenerosion, Sturzfluten. *Schriftenr Bayer Landesanst Landwirtsch* 2: Freising
- Lenz A, Karlstetter M, Knogler F (2006) Sanierung des landschaftlichen Stoffhaushalts durch Ländliche Entwicklung. Teil A: Planungs- und Umsetzungshilfen. Ingenieurbüro Lenz, Ringelai. [▶ https://www.boden-staendig.eu/_Resources/Persistent/0d8440a6cacc094919d10d19c3ea863e40ae3513/SanierungdLandschaftlStoffhaushdurdhLE-AllgTeil.pdf](https://www.boden-staendig.eu/_Resources/Persistent/0d8440a6cacc094919d10d19c3ea863e40ae3513/SanierungdLandschaftlStoffhaushdurdhLE-AllgTeil.pdf)
- Hösl R, Strauss P (2011) Einfluss von linearen Abflusswegen auf die Effektivität von Gewässerstrandstreifen. *Mitt Österr Bodenkundlichen Ges* 78:23–28
- Moussa R, Voltz M, Andrieux P (2002) Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrol Process* 16:393–412. [▶ https://doi.org/10.1002/hyp.333](https://doi.org/10.1002/hyp.333)
- Bronstert A, Vollmer S, Ihringer J (1995) Die Bedeutung von Flurbereinigungsmaßnahmen für das Abflussverhalten von Starkniederschlägen in ländlichen Gebieten. *Wasser Boden* 47:29–46
- Machl T, Ewald W, Donaubauber A, Kolbe TH (2016) Entwicklung eines Werkzeugs zur landesweit flächendeckenden Analyse landwirtschaftlicher Transportbeziehungen in Bayern. *Z Geodäsie Geoinf Landmanagement* 3:197–205
- Bucher B, Demuth S (1986) Vergleichende Wasserbilanz eines flurbereinigten und eines nicht flurbereinigten Einzugsgebietes im Ostkaiserstuhl für den Zeitraum 1977–1980. *Deutsche Gewässerkdl Mitt* 29:1–4, Koblenz
- Luft G, Morgenschweis G (1984) Zur Problematik großterrassierter Flurbereinigung im Weinbaugebiet des Kaiserstuhls. *Z Kulturtechnik Flurberein* 25:138–148
- Tessier D (1991) Influence de travaux d'ameliorations foncieres sur le regime hydrologique des petits cours d'eau. *Ecole Polytechnique Federale de Lausanne*
- Hölzel H, Diekkrüger B (2012) Predicting the impact of linear landscape elements on surface runoff, soil erosion, and sedimentation in the Wahnbach catchment, Germany. *Hydrol Process* 26:1642–1654. [▶ https://doi.org/10.1002/hyp.8282](https://doi.org/10.1002/hyp.8282)
- Luft G, Vogelbacher A (1985) Modellrechnungen zum Einfluß von Großterrassierungen auf den Abflußprozeß. *Z Kulturtechnik Flurberein* 26:1–12
- Hösl R, Strauss P, Glade T (2012) Man-made linear flow paths at catchment scale: identification, factors and consequences for the efficiency of vegetated filter strips. *Landsc Urban Plan* 104:245–252. [▶ https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.10.017](https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2011.10.017)
- Lenz A, Karlstetter M, Knogler F (2006) Sanierung des ländlichen Stoffhaushalts durch Ländliche Entwicklung. Teil B: Fallbeispiel Schwimmbach. Ingenieurbüro Lenz, Ringelai
- Tempel M (2006) Abflussverhalten kleiner, forstlich genutzter Bacheinzugsgebiete am Beispiel des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches im Soonwald / Hunsrück. Dissertation, Johannes Gutenberg-Universität, Mainz
- Berger C, Schulze M, Rieke-Zapp D, Schlunegger F (2010) Rill development and soil erosion: a laboratory study of slope and rainfall intensity. *Earth Surf Process Landforms* 35:1456–1467. [▶ https://doi.org/10.1002/esp.1989](https://doi.org/10.1002/esp.1989)
- McCuen RH (2009) Uncertainty analyses of watershed time parameters. *J Hydraul Eng* 14:490–498. [▶ https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HE.1943-5584.0000011](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000011)
- Grimaldi S, Petroselli A, Tauro F, Porfiri M (2012) Time of concentration: a paradox in modern hydrology. *Hydrol Sci J* 57:217–228. [▶ https://doi.org/10.1080/02626667.2011.644244](https://doi.org/10.1080/02626667.2011.644244)
- Gericke OJ, Smithers JC (2014) Review of methods used to estimate catchment response time for the purpose of peak discharge estimation. *Hydrol Sci J* 59:1935–1971. [▶ https://doi.org/10.1080/02626667.2013.866712](https://doi.org/10.1080/02626667.2013.866712)
- Natural Resources Conservation Service (2010) Time of concentration. In: *National Engineering Handbook*. Part 630 Hydrology, chapter 15. US Department of Agriculture, Washington
- Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2003) *Hydraulik naturnaher Fließgewässer*. Teil 1. Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren. Karlsruhe

23. Hicks DM, Mason PD (1998) Roughness characteristics of New Zealand rivers. National institute of water and atmospheric research. Christchurch, New Zealand
24. Spreafico M, Hodel HP, Kaspar H (2001) Rauheiten in ausgesuchten schweizerischen Fließgewässern. Serie Wasser. Bundesamt für Wasser und Geologie, Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation, Bern
25. Rössert R (1994) Hydraulik im Wasserbau. Oldenbourg Wissenschaftsverlag, München
26. Bollrich G, Peißler G (1996) Technische Hydromechanik. Verlag für Bauwesen, Dresden
27. Naudascher E (1992) Hydraulik der Gerinne und Gerinnebauwerke. Springer, Wien
28. Schröder W, Euler G, Schneider F, Knauf D (1994) Grundlagen des Wasserbaus. Werner-Verlag, Düsseldorf
29. Lange G, Lecher K (1993) Gewässerregelung, Gewässerpflege. Paul Parey, Hamburg
30. Knauf D (2003) Zusammenhang zwischen Rauheitsbeiwerten nach Gauckler-Manning-Strickler und den äquivalenten Rauheitsbeiwerten nach Prandtl-Colebrook im hydraulisch rauen Bereich. Wasser Abfall 4–5:28–30
31. Strickler A (1924) Beiträge zur Frage der Geschwindigkeitsformel und der Rauheitszahlen für Ströme, Kanäle und geschlossene Leitungen. Schweiz Bauztg 83:265–269
32. Schröder J (2000) Sohlgleiten im Einzugsgebiet der Leine. Leineverband, Göttingen

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz ([► http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de)) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Abflussverzögerung – wie Abfluss gebremst werden kann

- 6.1 Flächige, schlaginterne Maßnahmen zur Erhöhung der Oberflächenrauheit – 115
- 6.2 Grünstreifen – 121
- 6.3 Begrünte Abflussmulden (Grassed Waterways) – 124
- 6.4 Kleinstrückhaltebecken in der landwirtschaftlichen Flur – 129
- 6.5 Flurgliederung und Flächenarrangement – 137
- 6.6 Abflussgeschwindigkeit in Gräben und Röhren – 146
- 6.7 Wege- und Wasserführung – 150
- Literatur – 153

In diesem Kapitel werden Maßnahmen zur Minderung der Abflusskonzentration und zum Bremsen des Abflusses zwischen Wasserscheide und Gewässern III. Ordnung beschrieben. Ansatzpunkte dafür sind in allen Abschnitten des Fließpfades vorhanden. Vorweg sei dabei betont, dass Maßnahmen zum Schutz vor Erosion nicht mit Maßnahmen zur Abflussminderung verwechselt werden dürfen. Dafür gibt es drei wesentliche Gründe:

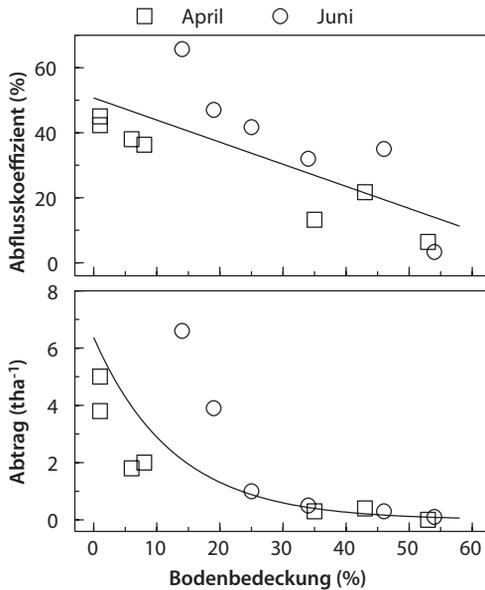
Der erste Grund ist, dass die Mechanismen verschieden sind. Das fängt bereits beim Regen an: Niederschläge, die Abfluss fördern, müssen nicht zwingend im gleichen Maß Abtrag fördern. Beispielsweise hatte der Regen, der die katastrophale Sturzflut von Simbach auslöste, zwar eine hohe, aber keinesfalls außergewöhnliche Erosivität [1]. Ebenso muss eine Maßnahme, die Erosion verringert, nicht zwangsläufig den Abfluss verringern oder umgekehrt. Deutlich wird das zum Beispiel an Filterstreifen, die transportierte Feststoffe aus dem Oberflächenabfluss herausfiltern, dabei aber nur einen vernachlässigbar kleinen Einfluss auf die Abflusssumme oder die Fließgeschwindigkeit im Mittel des Gesamthanges haben.

Der zweite Grund liegt darin, dass Abtragssumme (Erosion) und Abflussscheitel von verschiedenen Komponenten bestimmt werden. Erosion ergibt sich aus dem Produkt (Abflusssumme \cdot Sedimentkonzentration). Da sich beides, und dabei vor allem die Sedimentkonzentration, vermindern lässt, wird häufig angenommen, Erosion sei leichter beeinflussbar als der Abfluss, wobei unter dem unspezifischen Wort Abfluss meist die Abflusssumme verstanden wird. Der Hochwasserscheitel resultiert aber aus dem Produkt (Abflusssumme \cdot Scheitelanstiegszeit). Auch die Scheitelanstiegszeit lässt sich, und zwar stark, über die Fließgeschwindigkeit beeinflussen. Damit ist Hochwasser in der ländlichen Flur ebenso stark beeinflussbar wie Erosion. Die begrenzte Beeinflussbarkeit von Erosion und Hochwasser allein über die Abflusssumme zeigt sich schon darin, dass bei sehr langanhaltenden Regen (z. B. wie bei dem

Ereignis von Simbach) selbst die Infiltrationsleistungen von Grünland oder Wald natürlicherweise an ihre Grenzen kommen. Der Feststoffaustrag bleibt dort aber trotzdem gering, weil die Sedimentkonzentration im Abfluss unter Grünland oder Wald gering bleibt. Der Hochwasserscheitel kann auch gering bleiben, wenn die Fließgeschwindigkeit gering bleibt. Dazu muss der Abfluss in der Fläche z. B. durch eine dauerhafte Bodenbedeckung $>30\%$ und entlang der kompletten Fließwege durch breite und hydraulisch raue Gerinne gebremst werden.

Ein analoges Beispiel im Ackerbau ist die Mulchdirektsaat, die den Bodenabtrag stark senken kann, die Abflusssumme aber weit weniger. Betrachtet man nur die Abflusssumme, erscheint diese Maßnahme zunächst weniger effektiv als hinsichtlich der Abtragssumme (Abb. 6.1). Der Effekt auf den Abtrag ist so stark, weil zusätzlich zu Abflusssumme auch die Sedimentkonzentration zurückgeht. Da Abflusssumme und Sedimentkonzentration multipliziert werden, um den Abtrag zu errechnen, senkt Bedeckung die Abtragssumme quadratisch ab. Die Abflusssumme sinkt dagegen nur linear ab. Allerdings führt Mulchdirektsaat wegen der erhöhten Bodenrauheit und der längeren Strecke, über die schichtförmiges Fließen erfolgt, auch zu einer ausgeprägten Verminderung der Fließgeschwindigkeit. Da sowohl Fließgeschwindigkeit als auch Abflussvolumen im Mittel proportional zum Abflussscheitel sind, ist durch Mulchdirektsaat ebenfalls mit einer quadratischen Verminderung des Abflussscheitels am unteren Feldrand zu rechnen. Der Einfluss von Mulchdirektsaat auf Abflussscheitel und Bodenabtrag dürfte daher ähnlich groß sein.

Bei der Beurteilung einer Maßnahme, insbesondere bei solchen, die hier nicht beschrieben sind, sind daher immer zwei Fragen zu stellen: Wie stark beeinflusst die Maßnahme die Abflussbildung? Wie stark beeinflusst die Maßnahme die Fließgeschwindigkeit? Um wie viel, kann mit den hier angebotenen Planungsansätzen



■ **Abb. 6.1** Mit zunehmender bodennaher Bedeckung geht der Abflusskoeffizient linear zurück (oben), der Bodenabtrag aber überproportional (quadratisch) (unten), sodass mit 20 % bis 30 % Bedeckung schon ein sehr guter Erosionsschutz erreicht werden kann. Die Daten stammen von Beregnungsversuchen mit 65 mm h^{-1} auf Zuckerrübenfeldern [2]. Die Unterschiede in der Bedeckung beruhen auf unterschiedlichen Anbauverfahren und darauf, dass im Juni auch Zuckerrüben und Unkräuter zur Bedeckung beigetragen haben. Diese ganz unterschiedlichen Bedingungen neben der Variation in der Bedeckung erklärt die Streuung. Dadurch ist aber auch die Übertragbarkeit auf einen weiten Bereich von Bedingungen gewährleistet

abgeschätzt werden. Exemplarische Beispiele zur Wirkung unterschiedlicher Maßnahmen werden im Folgenden dargestellt. Ein umfangreicheres Planungsbeispiel befindet sich in ▶ Kap. 7.

Der dritte und letzte wesentliche Unterschied zwischen Erosion und Hochwasser besteht darin, dass sich Erosion grundsätzlich nur auf der erodierenden Fläche, im Normalfall auf der Ackerfläche, verhindern lässt. Die Verantwortung liegt daher ausschließlich beim Landwirt. Im weiteren Verlauf des Fließweges kann man höchstens eine Wiederablagerung und damit einen Schutz unterhalb

liegender Systeme erreichen (Verringerung von sogenannten off-site Schäden), aber nicht den eigentlichen Erosionsschaden in der Fläche verhindern (on-site Schäden). Im Gegensatz dazu lässt sich beim Abfluss die Fließgeschwindigkeit entlang des gesamten Fließpfades beeinflussen. Verantwortung für den Hochwasserscheitel haben daher viele Akteure. Das fängt beim Landwirt in der Fläche an, setzt sich über die Gemeinde (und deren ausführende Organe), die beispielsweise für die Pflege und Unterhaltung von Straßen und Gräben oder die Gewässer III. Ordnung zuständig ist, fort und geht bis zur Wasserwirtschaftsverwaltung, die für die größeren Gewässer verantwortlich ist. In Wäldern stehen Forstwirte in der Verantwortung und bei größeren Projekten wie Flur- oder Bodenneuordnungsverfahren die Organe der Ländlichen Entwicklung, die über die Parzellierung der Flur und über das Wegenetz bestimmen. Im Folgenden sind verschiedene Maßnahmen aus unterschiedlichen Abschnitten des Fließweges beschrieben.

6.1 Flächige, schlaginterne Maßnahmen zur Erhöhung der Oberflächenrauheit

Zentraler Ansatzpunkt schlaginterner Maßnahmen ist die Erhöhung und Stabilisierung der Oberflächenrauheit. Die Rauheit wird von der Bedeckung bestimmt, die der Bodenoberfläche aufliegt, d. h. (niedriger) Bewuchs und Mulch, und von der Mikrotopographie des Bodens, die von der Bodenbearbeitung abhängt und im Laufe der Zeit durch die Witterung eingeebnet wird. Wie die Rauheit der Bodenoberfläche durch Bearbeitung verändert, durch Bodenbiomasse stabilisiert und durch nachfolgende Regen eingeebnet wird, kann mit den in der Revised Universal Soil Loss Equation 2 [3] angegebenen Gleichungen bei Bedarf taggenau modelliert werden.

Die Rauheit stellt für den Schichtabfluss das wesentliche Strömungshindernis dar. Sie

erhöht auch die Infiltration, weil die Wasserspeicherung hinter einzelnen Rauheitselementen relativ hoch sein kann, der Abfluss lange unterwegs ist und damit auch nach Regenende infiltrieren kann. Vor allem aber schützen hohe Bodenbedeckungsgrade die Bodenoberfläche vor Verschlammung, und sie schaffen eine stabile, heterogene Oberflächenstruktur, bei der sich das Wasser weniger leicht eigene Bahnen schaffen kann. Dadurch fließt der Abfluss über eine längere Strecke breitflächig und damit langsam, bevor sich der Abfluss einschneidet und der schnellere Rillen- und Rinnenabfluss beginnt. Durch eine Erhöhung der Bodenbedeckung kann daher eine überproportionale Abflussverzögerung in der Fläche erzielt werden. Weitere positive Nebeneffekte sind die Reduktion des Bodenabtrags und die Reduktion der Verdunstung. Hohe Bodenbedeckungsgrade wirken daher ausgleichend auf den Wasserhaushalt und mindern Hochwasser wie Trockenheit gleichermaßen. Aufgrund der zahlreichen und positiven Eigenschaften gelten durchgehend hohe Bedeckungsgrade als beste Maßnahme des Bodenschutzes [4]. Etablierte Möglichkeiten, eine hohe Bedeckung zu erreichen, sind:

- Mulch- oder Direktsaatverfahren (mit ≥ 30 % Mulchbedeckung)
- Konsequenter Anbau von Zwischenfrüchten oder Untersaaten
- Verzicht auf eine wendende Bodenbearbeitung
- Mehrjährige Kulturen (Klee gras).

Wirkung von Zwischenfrüchten und Untersaaten

Zwischenfrüchte werden meist im Herbst umgebrochen, was ihre Wirkung auf einen kurzen Zeitraum beschränkt (▣ Abb. 6.2, obere Tafel). Ihre Wirksamkeit steigt stark, wenn auf den Umbruch verzichtet wird, da dadurch die meiste Zeit des Jahres Bedeckungsgrade >50 % erreicht werden können (▣ Abb. 6.2, untere Tafel).

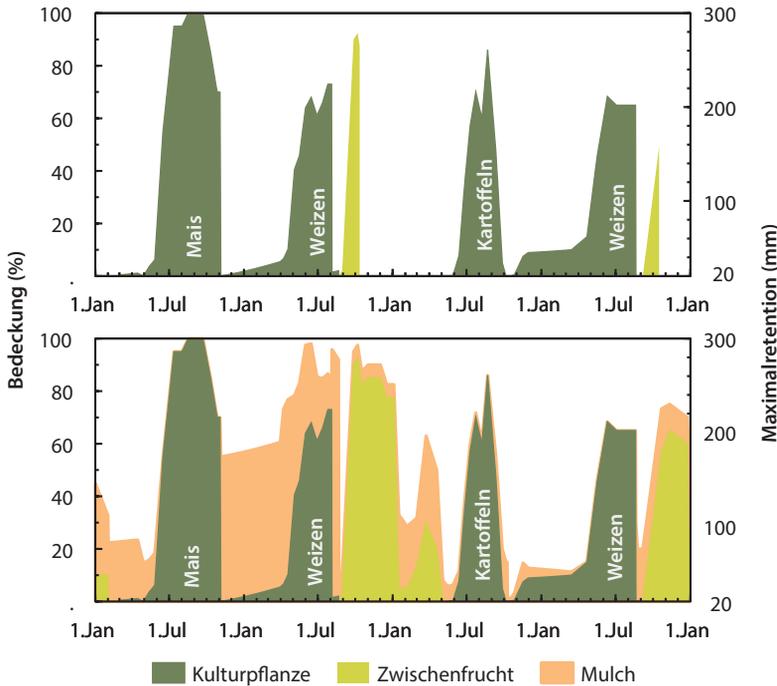
Auch Untersaaten ermöglichen, dass die Bodenoberfläche auch nach der Ernte der

Hauptfrucht noch effektiv durch eine hohe Bedeckung geschützt ist (▣ Abb. 6.3). Sie vermeiden die Lücke in der Bedeckung zwischen der Ernte der Hauptfrucht und der Bestandsbildung der Zwischenfrucht.

Eine hohe Rauheit der Bodenoberfläche kann auch durch ackerbauliche Maßnahmen gefördert werden. Dazu zählen:

- Höhenlinienparallele Bewirtschaftung
- Streifenbearbeitung (englisch „Strip Till“ oder „Strip Tillage“; im Gegensatz zum Streifenanbau, dem „Strip Cropping“)
- Anbau von Kulturen wie Mais in höhenlinienparalleler Dammbauweise (engl. „Ridge Tillage“).

Aufgrund ihrer Verbreitung wird auf die höhenlinienparallele Bewirtschaftung detaillierter eingegangen, obwohl sie im Hinblick auf den Abfluss (deutlich) weniger effektiv ist als z. B. die Streifenbearbeitung, die jedoch in Deutschland bisher noch kaum Verbreitung gefunden hat. Bei der Konturbearbeitung bzw. hang- oder höhenlinienparallelen Bewirtschaftung entstehen aus kleinen, quer zur Gefällerrichtung angeordneten Mulden- und Rillenstrukturen Widerstände für den Oberflächenabfluss. Dies erhöht die Infiltration und verlängert die Strecke flächenhaften Fließens. Damit dies der Fall ist, müssen aber mehrere Bedingungen gegeben sein [8–10]: Erstens darf der Niederschlag nicht zu extrem sein (Wiederkehrintervalle <15 Jahre). Zweitens muss die Oberfläche auch wirklich rau sein, also Höhenunterschiede von mindestens mehreren Zentimetern über die gesamte Vegetationsperiode aufweisen. Damit Letzteres erreicht wird, muss der Bedeckungsgrad zwangsläufig hoch sein, weil nur dann die (natürliche) Einebnung der Bodenoberfläche durch die Witterung gering ist [Gleichungen siehe 35]. Drittens sollte die Neigung unter 9 % (besser unter 5 %) sein, weil dann die Wasserspeicherung hinter einzelnen Rauheitselementen noch relativ groß und der Infiltrationszuwachs relevant wird. Viertens



■ **Abb. 6.2** Veränderung von Bodenbedeckung (linke Achse) und maximaler Retention (rechte Achse) bei einem unendlichen langen Regen auf Ackerschlägen im Verlauf mehrerer Jahre, wobei oben die Zwischenfrüchte im Herbst eingearbeitet wurden, während sie unten über den Winter standen, abfroren und eine dichte Mulchschicht für die folgenden Reihenkulturen (Mais bzw. Kartoffeln) lieferten [5]. Die Maximalretention wurde über das CN-Verfahren [6] und den Zusammenhang zwischen Bedeckung und CN-Wert geschätzt

darf die Fließlänge bzw. das oberirdische Einzugsgebiet nicht groß sein, weil sonst der Oberflächenabfluss die Querstrukturen durchbricht. Damit ist zu rechnen, wenn die Hanglänge in Richtung des Hauptgefälles länger als die kritische Hanglänge ist. Die kritische Hanglänge sinkt mit zunehmender Neigung, da das Wasserspeicherungspotenzial der Mikrotopographie und kleiner Rauheitselemente dann abnimmt. Die kritische Hanglänge kann nach ► Gl. 6.1 ermittelt [11] oder aus den Werten in ■ Tab. 6.1 abgeschätzt werden:

$$HL_{krit} = 170 \cdot e^{-0,13 \cdot HN} \quad (6.1)$$

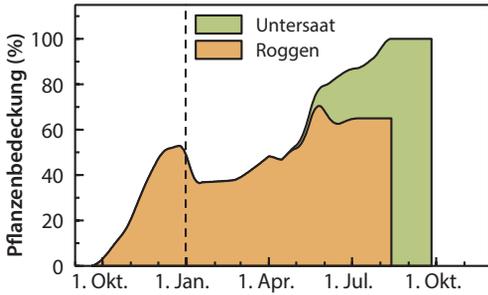
mit

HL_{krit} - Kritische Hanglänge (m)

HN - Hangneigung (%)

■ Beispiel

Um den Effekt der verschiedenen schlaginternen Maßnahmen auf die Abflussverzögerung im Feldmaßstab quantitativ abzuschätzen, können über die Rauheit, die Ausbildung des Entwässerungsnetzes und über die GMS-Gleichung Fließgeschwindigkeit und Fließzeit bestimmt werden. Das Vorgehen wird exemplarisch anhand eines 170 m langen und 135 m breiten Feldes (2,3 ha) mit einer einheitlichen Neigung von 4 % für verschiedene Bedeckungsgrade (0, 10, 30 %) und getrennt für eine Bearbeitung in Gefällerichtung bzw. höhenlinienparallelen Anbau illustriert. Dabei wird von einer abflusswirksamen Niederschlagshöhe von 15 mm in 30 min



▣ **Abb. 6.3** Untersaaten liefern nach der Ernte der Hauptfrucht durchgehend Rauheit durch Pflanzenbedeckung, ohne dass ein Saatbett notwendig ist und damit eine Lücke entsteht (Daten aus [7])

6

ausgegangen. Da die GMS-Gleichung lediglich die Fließwiderstände berücksichtigt und den Einfluss auf die Infiltration und den Abflussrückhalt hinter den Rauheitselementen nicht abbildet, ist davon auszugehen, dass die reale Abflussverzögerung bei den Varianten mit hohem Bedeckungsgrad noch deutlich größer sein dürfte.

Die Streckenlänge des Schichtabflusses kann anhand der Rauheit und über ▶ Gl. 8.1 abgeschätzt werden. Zur Bestimmung der Fließstrecke des Rillen- und Rinnenabflusses wird nach ▶ Gl. 8.2 vereinfachend angenommen, dass sie der doppelten Länge des Schichtabflusses entspricht (insofern der Abfluss nicht schon vorher den Feldrand erreicht). Weiter wird davon ausgegangen, dass sich Rillen und Rinnen bündeln und die verbleibende Strecke bis zum Erreichen des Feldrands auf den Hangmuldenabfluss entfällt (vgl. das Beispiel in ▣ Abb. 3.6). Rauheitsbeiwerte des Schichtabflusses wurden für die unterschiedlichen Bedeckungsgrade bzw. zur Berücksichtigung der Querbearbeitung aus ▣ Tab. 8.2 entnommen. Die Schichtdicke des Abflusses und damit der hydraulische Radius wurden iterativ so bestimmt, dass die Abflussraten in den einzelnen Abflusspfaden für die verschiedenen Varianten einheitlich waren. Die Zusammenfassung und

Gegenüberstellung der Berechnungsergebnisse in ▣ Tab. 6.2 zeigt, dass die Fließzeit gegenüber einer unbedeckten Oberfläche mit Bewirtschaftung in Hauptgefällerrichtung (19 min) durch eine hangparallele Bewirtschaftung und eine Bedeckung von 30 % fast vervierfacht werden kann (73 min). Bleibt die Bedeckung unter 30 %, ist die Wirkung deutlich geringer. Bei den Berechnungen wurden, um nur dem Effekt der Rauheit auf die Fließgeschwindigkeit zu quantifizieren, von gleichen Abflussraten bei allen sechs Varianten ausgegangen. Da ▣ Abb. 6.1 aber zeigt, dass mit 30 % Bedeckung der Abfluss bei Starkregen nur halb so groß ist wie bei 0 % Bedeckung, werden die Unterschiede noch wesentlich größer. Unterschiede um den Faktor 10 zwischen 0 und 30 % Bedeckung sind realistisch. Zusammengekommen ergibt sich auf der Feldskala ein enormes Potenzial zur Abflussverzögerung, das jedoch nur bei konsequenter Umsetzung der Maßnahmen genutzt werden kann. Zentraler Mechanismus ist die Förderung einer größtmöglichen Rauheit und ihres Schutzes durch hohe Bedeckungsgrade. Eine Rauheit stellt nicht nur das wesentliche Strömungshindernis dar, sie beeinflusst auch die Ausbildung der Entwässerungswege.

Wird davon ausgegangen, dass eine Veränderung der Bewirtschaftungsrichtung im Mittel die Fließzeit um 30 % verlängert, alle oben genannten Bedingungen für Querbearbeitung zutreffen (dies ist in dem Beispiel nicht der Fall, da die Hanglänge größer als die kritische Hanglänge und da die Niederschlagsrate hoch ist) und dass der Scheitel einer Abflusswelle näherungsweise proportional zu Fließzeit und Abflussvolumen ist, würde sich durch Querbearbeitung analog am unteren Feldrand eine Scheitelminderung von etwa 30 % einstellen (die zusätzlich erhöhte Infiltration ist dabei noch nicht berücksichtigt). Das Potenzial von Direktsaat, Oberflächenabfluss langsam und weitgehend ohne Erosion aus

■ **Tab. 6.1** Kritische Hanglängen für unterschiedliche Hangneigungen; die Werte wurden nach ► Gl. 6.1 ermittelt

Hangneigung (%)	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
Kritische Hanglänge (m)	131	101	78	60	46	36	28	21	16	13

■ **Tab. 6.2** Abschätzung der mittleren Fließzeit von Oberflächenabfluss auf einem 170 m langen, 135 m breiten (2,3 ha) und 4 % geneigten Feldes bei unterschiedlichen Bedeckungsgraden und Bewirtschaftungsrichtungen für eine abflusswirksame Niederschlagshöhe von 15 mm. Die Rauheitswerte für Schichtabfluss wurden entsprechend der Bedeckung aus ■ Tab. 8.2 entnommen. Für den Abfluss in Rinnen und Rillen wurde einheitlich ein Rauheitswert von $k = 20$, für den Abfluss in der Hangmulde in Anlehnung an ■ Tab. 5.1 ein Rauheitswert von $k = 30$ ($m^{1/3} s^{-1}$) angenommen. Die Fließtiefe und damit der hydraulische Radius wurden optimiert, sodass in allen Fällen die Abflussrate identisch war

Bewirtschaftungsrichtung	In Hauptgefällerrichtung			Höhenlinienparallel		
	0	10	30	0	10	30
Schichtabfluss						
Rauheit ($m^{1/3} s^{-1}$)	17	12	5	12	8	5
Hydraulischer Radius (cm)	0,23	0,30	0,48	0,30	0,38	0,52
Fließpfadlänge (m)	49	58	89	58	71	100
Fließgeschwindigkeit ($cm s^{-1}$)	6,0	4,9	2,8	4,9	3,9	2,4
Fließzeit (min)	13,5	19,5	52,6	19,5	30,4	69,1
Rinnen- und Rillenabfluss						
Anzahl (-)	30	20	10	15	10	5
Rauheit ($m^{1/3} s^{-1}$)	20	20	20	20	20	20
Hydraulischer Radius (cm)	2,1	2,2	1,7	3,1	2,8	2,3
Fließpfadlänge (m)	97	112	81	112	99	70
Fließgeschwindigkeit ($cm s^{-1}$)	31	31	27	39	37	32
Fließzeit (min)	5,2	6,0	5,1	4,7	4,4	3,7
Hangmuldenabfluss						
Anzahl (-)	1	0	0	0	0	0
Rauheit ($m^{1/3} s^{-1}$)	30	0	0	0	0	0
Hydraulischer Radius (cm)	6,9	0	0	0	0	0
Fließpfadlänge (m)	24	0	0	0	0	0
Fließgeschwindigkeit ($cm s^{-1}$)	101	0	0	0	0	0
Fließzeit (min)	0,4	0	0	0	0	0
Gesamtfließzeit (min)	19	26	58	24	35	73
Gesamtfließzeit (%)	100	133	301	126	182	380



Abb. 6.4 Luftbildaufnahme eines mit Mais-Direktsaat bestellten Feldes vom 06.06.2016, das nur geringere Spuren von Wasserabfluss und Bodenaustrag in den Schutzstreifen unten rechts zeigt, obwohl es einem Starkregen von ca. 50 mm in einer Stunde ausgesetzt war. (Quelle: W. Bauer, Agroluftbild in 3)



Abb. 6.5 Bodenbearbeitung in Streifen (Strip-Till) kann die Vorteile von intensiver Bodenbearbeitung und von Direktsaat verbinden. 50–70 % der Oberfläche werden nicht bearbeitet und verfügen über eine hohe Rauheit und hohe Infiltrationsfähigkeit, wodurch der Abfluss stark gebremst wird. (Quelle: H. Kirchmeier)

6

der Fläche abzuleiten, ist auch durch Luftbildaufnahmen nach Starkregenereignissen dokumentiert (▣ Abb. 6.4).

Die Bewirtschaftungsrichtung wird indirekt durch den Flächenzuschnitt und die Erschließung der Fläche durch das Wegenetz vorgeben, da die Bearbeitung in Richtung der längeren Seite arbeitswirtschaftlich vorteilhaft ist. Um hangparallele Bewirtschaftung zu fördern, sollte im Rahmen von Boden- und Flurneuerungsverfahren die Längsseite der Flurparzellen parallel zu den Höhenlinien verlaufen und die Erschließung über die Breitseite, idealerweise durch Wege auf dem Hangrücken erfolgen. Hinweise zur Flächenparzellierung und dem Wegebau sind in ► Abschn. 6.5, 6.7 und ► Anhang 8.7 beschrieben.

Wirkung von Streifenbearbeitung

Die streifenförmige Bearbeitung einzelner Schläge (▣ Abb. 6.5) („Strip Till“) ist eine Alternative zur Direktsaat als bodenschonendes, erosionsminderndes, wasser- und energiesparendes Bestellverfahren für Reihenfrüchte. Streifenbearbeitung ist in Deutschland noch kaum verbreitet, obwohl sie die

Vorteile von Bodenbearbeitung und Direktsaat verbindet. Dadurch, dass bei diesem Verfahren 50–70 % der Fläche unbearbeitet bleiben, ergeben sich ein deutlich geringeres Erosionsrisiko, eine gute Entwicklung der Bodenstruktur und ein 10–20 % höheres Infiltrationsvermögen für Niederschläge als auf konventionell bestellten Schlägen. Nach Studien der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft werden zumeist gleichwertige oder sogar höhere Erträge als bei Direktsaat erzielt [12]. Die Ergebnisse werden auch durch Versuche aus Sachsen bestätigt. Zusätzliche Infiltrationsversuche im Feld zeigen dort außerdem, dass die Infiltration bei Streifenbearbeitung und Direktsaat nahezu identisch und fast 5-mal so hoch wie bei konventioneller Bodenbearbeitung war [13].

Wirkung des Dammanbaus

Der (nahezu) höhenlinienparallele Anbau von Kulturen auf Dämmen (engl. „Ridge

Tillage“) ist eine weitere ackerbauliche Alternative. Mais kann beispielsweise auch auf dauerhaften und damit besonders stabilen Dämmen entweder in Monokultur oder im Wechsel mit einer anderen Reihenkultur wie Soja angebaut werden. Erfahrungen aus den USA zeigen, dass damit die Rauheit in Gefällerrichtung erhöht und der Oberflächenabfluss um 30 bis 40 % reduziert werden kann, wobei die Wirkung bei kleinen Ereignissen größer, bei großen Ereignissen geringer ist [14, 15]. Die Anlage dauerhafter Dämme setzt voraus, dass die Dämme eine geringe, einheitliche Neigung gegenüber den Höhenlinien haben, sodass der Oberflächenabfluss langsam zur Seite geleitet wird und sich nicht hinter dem Damm sammeln kann und dass geeignete wasserableitende Strukturen dort vorhanden sind, wo die Dämme das Wasser hinleiten. Das kann der Feldrand oder eine Hangmulde sein. Dort sind begrünte Abflussmulden allerdings fast zwingend notwendig, da durch die dort auftretende Bündelung des Abflusses ansonsten ein sehr hohes Risiko für das Entstehen von Gullys besteht.

Für alle Maßnahmen, die den Wasserfluss leiten oder verändern, wozu auch die Querbearbeitung oder der Dammanbau zählen, müssen die Übergangsbereiche von einem Fließabschnitt zum nächsten so gestaltet und gesichert werden, dass sie den Oberflächenabfluss schadlos aufnehmen und abführen können. Innerhalb landwirtschaftlicher Schläge kann dies vor allem durch Grünstreifen oder dauerhaft begrünte (erosions-sichere) Abflussmulden am Feldrand oder in Hangmulden, ggf. auch begrünte Vorgewende geschehen. Fehlen sie, wird der Abfluss durch die Querstrukturen zwar schadlos aus der Fläche abgeleitet, im daran anschließenden Abschnitt des Entwässerungsweges sind Erosionsprobleme allerdings oft

vorprogrammiert. Ein Beispiel dafür zeigt der Kartoffelacker in  Abb. 6.6. Die Kartoffeldämme sorgten bei einem Starkregen dafür, dass in der Fläche kein Wasser in Hauptgefällerrichtung abfloss. Im vegetationsfreien Vorgewende am linken Feldrand, das den Oberflächenabfluss aufnahm und ableitete, kam es dagegen zu starker Erosion.

6.2 Grünstreifen

Dauerhaft begrünte Flächen können Bereiche hoher Infiltrationskapazität schaffen, Sediment aus dem Wasser auskämmen oder als lineare Strukturen helfen, Oberflächenabfluss schadlos aus der Fläche ab- und entlang angelegter Fließwege in ein Gewässer zu leiten. Je nach Konzeption werden sie über eine relativ kurze Strecke durchflossen und sind dann Grünstreifen, die in diesem Kapitel behandelt werden, oder sie werden der Länge nach durchflossen, wie im Fall der begrünten Abflussmulden, die im folgenden Kapitel behandelt werden. Grünstreifen können zum einen die Abflusshöhe reduzieren – unter welchen Bedingungen welcher Effekt zu erwarten ist, wird im ersten Teil dieses Kapitels behandelt. Zum anderen können sie die Abflussgeschwindigkeit bremsen – dies wird am Ende des Kapitels quantifiziert. Für beide Effekte ist wichtig, dass der Abfluss möglichst langsam und breitflächig fließt. Das gilt grundsätzlich für alle Formen von Grün-, Filter- oder Pufferstreifen, die rasch an Wirkung verlieren, wenn sie schnell oder konzentriert durchströmt werden [16].

Abflussminderung: Grundsätzlich haben dauerhaft begrünte Flächen niedrigere CN-Werte als Ackerflächen. Damit können Grünstreifen, wie auch begrünte Abflussmulden, von den Ackerflächen kommenden Abfluss durch Infiltration vermindern. Der Unterschied ist besonders groß in Zeiten, in denen auf den Ackerflächen wenig Bedeckung vorhanden ist. Und der Unterschied ist besonders groß bei den hydrologischen Bodengruppen A und B, bei denen



▣ **Abb. 6.6** Kartoffelacker mit quer zum Gefälle (roter Pfeil) orientierter Bewirtschaftung. Bei einem Regen mit 18 mm konnten die Kartoffeldämme Erosion und Oberflächenabfluss innerhalb des Feldes in Hauptgefällerrichtung verhindern. Durch die Querstrukturen wurde der Abfluss entlang der Dämme in das Vorgewende am linken Feldrand und dort hangabwärts geleitet (hellblaue Pfeile). Aufgrund mangelnder Sicherung und fehlender Bedeckung wurde das Vorgewende durch starke Erosion weitgehend zerstört. Um dem vorzubeugen, hätte das Vorgewende schmaler ausfallen können und durch einen grassed waterway gesichert werden müssen. (Bildquelle: H&S Ingenieure)

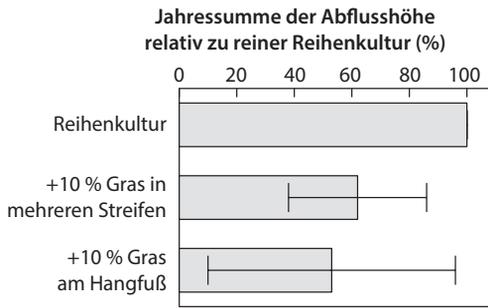
die CN-Werte von Grünland sich stärker von denen bei Ackernutzung unterscheiden als bei Bodengruppe C oder D (vgl. ▣ Tab. 4.1).

Die Minderung wird vor allem bei kleinen Abflussereignissen auftreten. Sobald die begrünte Fläche selbst Abfluss liefert, wenn also der Regen größer ist als der Anfangsverlust, kann die begrünte Fläche auch kein zufließendes Wasser mehr versickern. Geht man von einem CN-Wert von 72 bei Grünland und hydrologischer Bodengruppe C aus (▣ Tab. 4.1), ergeben sich eine Maximalretention von etwa 100 mm und damit ein Anfangsverlust von 20 mm. Für Regen, die mehr als 20 mm erbringen, wird die Wirkung eines Grünstreifens klein. Bei den hydrologischen Bodengruppen A beträgt der

CN-Wert einer Wiese nur 30. Die Anfangsretention beträgt dann 120 mm. Unter diesen Bodenverhältnissen wird die Infiltrationskapazität von Grünstreifen bis zu Regen von 120 mm noch nicht durch den Regen selbst ausgeschöpft. Wenn dann auch noch die darüberliegende Ackerfläche zur Bodengruppe A gehört und daher nur wenig Abfluss liefert, wird die Versickerungsleistung eines Grünstreifens in vielen Fällen ausreichen. Umgekehrt gilt natürlich, dass bei Vorliegen der hydrologischen Bodengruppe D eine noch geringere Wirkung auf die Abflussreduktion zu erwarten ist als bei Bodengruppe C.

Weiterhin gilt, dass die Wirkung bei kurzer Fließstrecke nicht groß sein kann, weil die Zeit, die der Oberflächenabfluss für das Durchfließen des Grünstreifens braucht, kurz ist und weil die Menge an Wasser, die angeliefert wird, hoch ist. Dennoch zeigen Versuche, dass die Wirkung von Grünstreifen auf die Abflussminderung in der Summe aller kleinen und großen Ereignisse nicht unerheblich ist. In den USA konnten Grünstreifen, die 10 % der gesamten Hanglänge einnahmen (bei Hanglängen von 300 m also 30 m breite Streifen), die Abflussmenge etwa um 40 % vermindern (▣ Abb. 6.7). Wurde die Gesamtbreite auf zwei (bis drei) Streifen aufgeteilt und an mehrere Stellen des Hanges platziert, wobei aber mindestens ein Streifen am Hangfuß lag, war die Wirkung etwas geringer. Eine Minderung von 40 % gilt im Mittel mehrerer Jahre, während der es auch viele kleine Ereignisse gibt, bei denen die Wirkung groß ist, auch wenn sie bei großen Ereignissen schwindet. Die Belastung von Gewässern mit gelösten Stoffen und noch mehr durch partikuläre Stoffe, wird dadurch wesentlich vermindert. Für einen Schutz vor Sturzfluten oder Hochwasser, die durch ganz große Regen ausgelöst werden, haben die Streifen dagegen eine geringere Bedeutung.

Geschwindigkeitsminderung: Um die Bremswirkung von Grünstreifen auf den Abfluss in Abhängigkeit von der Durchströmung (konzentriert vs. flächig) zu ver-



■ **Abb. 6.7** Wirkung von Grünstreifen kombiniert mit einer Reihenkultur relativ zur Abflussmenge einer reinen Reihenkultur. Der Grünstreifen nahm mindestens 10 % der gesamten Hanglänge ein und war am Hangfuß angeordnet. Eine Teilung der Grasfläche in mehrere Streifen, wobei immer noch einer am Hangfuß lag, vermindert die Wirkung etwas. Die Fehlerbalken zeigen den 95 %-Vertrauensbereich. Die Wirkung ist also gerade noch signifikant. Datengrundlage: 12 Parzellen, 4 Jahre, 70 Abflussereignisse, Hanglängen 110 bis 290 m [17]

anschaulichen, werden zwei Fallbeispiele verglichen. Dabei wird analog zum Beispiel in ■ Tab. 6.2 von einem 170 m langen, 135 m breiten (entspricht 2,3 ha) und 4 % geneigten Acker mit geradem Fließen (ohne konvergentem oder divergentem Fließen) ausgegangen. Der Grünstreifen ist jeweils auf den untersten 12 m des Feldes angelegt. Seine Größe ist mit 7 % der Feldfläche geringer als die oben geforderte Fläche von 10 %, dafür entspricht die Breite eher einem typischen Gewässerrandstreifen.

Im Fall 1 wird die Ackerfläche in Gefälle- richtung konventionell bewirtschaftet (d. h. wendende Bodenbearbeitung, geringe Bedeckung des Saatbetts). Für den Fall wurde in ► Abschn. 6.1 geschätzt, dass sich Schicht- und Rinnenabfluss nach knapp 150 m gebündelt haben (vgl. ■ Tab. 6.2) und der Abfluss folglich in konzentrierter Form als Hangmuldenabfluss am unteren Feldrand auf den Grünstreifen trifft. Durch die erhöhte Rauheit des Streifens (Annahme $k = 15 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$) ist zu erwarten, dass sich der Fließquerschnitt des

Abflusses beim Eintritt in den Streifen gegenüber der Breite auf der Ackerfläche ausdehnt, der Abfluss den Streifen aber trotzdem noch in konzentrierter Form durchquert. Dadurch ist bereits intuitiv eine geringe Bremswirkung des Grünstreifens zu erwarten. Für eine quantitative Abschätzung des Effektes mit der GMS-Gleichung wird angenommen, dass sich die Fließbreite des Hangmuldenabflusses durch die erhöhte Rauheit im Grünstreifen gegenüber der Situation in der Ackerfläche verdoppelt. Dadurch reduziert sich zwar die Fließgeschwindigkeit im Streifen um 40 %, durch seine geringe Breite von 12 m wird er aber trotzdem in weniger als einer halben Minute durchflossen. Der relative Anteil der Fließzeit von der oberen bis zur unteren Feldgrenze, die auf den Streifen entfällt, beträgt dabei gerade einmal 2 % (■ Tab. 6.3). Ein 5 m breiter Gewässerrandstreifen würde unter diesen Bedingungen den Abfluss sogar nur um 10 bis 20 s verzögern. Dies ist vernachlässigbar.

Im Fall 2 wird ebenfalls analog zu dem Beispiel in ■ Tab. 6.2 von einem höhenlinienparallelen Anbau und 10 % Bodenbedeckung ausgegangen. Durch die erhöhte Rauheit der Ackerfläche verläuft die Bündelung des Wassers langsamer und der Großteil des Oberflächenabflusses trifft in kleinen Rinnen und Rillen auf den Grünstreifen. Wie beim Fall 1 wird angenommen, dass durch die erhöhte Rauheit des Puffers die Fließbreite im Grünstreifens gegenüber der Breite der Rinnen und Rillen zunimmt (Annahme: um den Faktor 4, da die Konzentration in den Rinnen und Rillen geringer ist als in der Hangmulde wie bei Fall 1). Entsprechend nimmt die Fließzeit stärker zu. Allerdings wird der Filterstreifen trotzdem in weniger als einer Minute durchflossen. Der Streifen trägt wieder nur 2 % zur Gesamtfließzeit bei (■ Tab. 6.3). Selbst bei vergleichsweise günstigen Bedingungen bleibt daher die Wirkung schmaler Grünstreifen auf Abflussmenge und Abflussgeschwindigkeit vernachlässigbar.

Tab. 6.3 Abschätzung der Verzögerung des Oberflächenabflusses durch Grünstreifen am unteren Feldrand bei unterschiedlichen Bewirtschaftungsbedingungen oberhalb. Es wurde von einem 170 m langen, 135 m breiten und einheitlich 4 % geneigten Acker (2,3 ha) ausgegangen, bei dem sich am unteren Feldrand ein 12 m breiter Grünstreifen befindet. Die verwendeten Daten und Annahmen entsprechen denen in **Tab. 6.2**. Die Berechnung mit der GMS-Gleichung geht von stationären Bedingungen aus und berücksichtigt ausschließlich die Abflussverzögerung, nimmt also eine vernachlässigbare Infiltration im Grünstreifen an

Fließabschnitt	Blankes Saatbett, Bewirtschaftung in Gefällerrichtung, Grünstreifen am unteren Feldrand	10 % Bedeckung, höhenlinienparalleler Anbau, Grünstreifen am unteren Feldrand
Schichtabfluss	14,5 min (70 %)	30,4 min (88 %)
Rinnen und Rillen	5,2 min (27 %)	3,9 min (11 %)
Hangmulde	0,4 min (1 %)	–
Grünstreifen	0,4 min (2 %)	0,6 min (2 %)
Gesamtfließzeit	19,6 min (100 %)	35 min (100 %)

6.3 Begrünte Abflussmulden (Grassed Waterways)

Begrünte Abflussmulden (GWW in diesem Kapitel, von engl. „grassed waterway“) sind natürliche oder konstruierte, dauerhaft begrünte Fließwege, um Oberflächenabfluss schadlos, d. h. mit nicht-erosiver Geschwindigkeit entlang der natürlichen (topographischen) Entwässerungswege aus der Fläche abzuleiten. GWWs gelten vor allem in Regionen mit großflächiger landwirtschaftlicher Nutzung, darunter den USA, seit den 1970er- und 1980er-Jahren als bewährter und wirksamer Standard zur Förderung des Wasser- und Stoffrückhalt in der Fläche [18, 19]. Ihre wesentlichen Potenziale sind:

- Sie verhindern Erosionsrinnen bei Starkregen, da die Bodenoberfläche durch die Bedeckung und das Wurzelwerk der Grasnarbe gesichert wird [20].
- Sie reduzieren den Stoffaustag durch Sedimentation, Adhäsion und Sorption partikulärer Stoffe innerhalb der begrünten Mulde.

- Sie dämpfen Hochwasserscheitel durch Bremsen des Abflusses und (je nach Ausführung) Reduktion des Abflussvolumens durch erhöhte Infiltration [21].

Hinzu kommen zahlreiche weitere, vor allem ökologische aber auch landschaftsästhetische Effekte, wodurch GWWs eine sehr hohe, multifunktionale Wirkung haben (einen Überblick und eine Quantifizierung dieser Wirkungen geben [22, 23]). Trotz dieser Potenziale und obwohl die Grundzüge des Konzeptes auch in Deutschland bereits in den 1980er-Jahren beschrieben wurden [24], sind GWWs bis heute in weiten Teilen Mitteleuropas nur selten anzutreffen. Dabei ist auch in Mitteleuropa inzwischen die Größe der Ackerflächen stark angewachsen, und GWWs könnten zur kontrollierten Entwässerung einer Vielzahl von Flächen genutzt werden. Im Gegensatz zu Filter- und Gewässerrandstreifen werden GWWs kaum thematisiert, obwohl sie eine viel größere Wirkung auf den Wasser- und Stoffhaushalt haben, da sie bei Starkregen über eine lange Strecke durchströmt werden.

6.3 · Begrünte Abflussmulden (Grassed Waterways)

Lediglich im Freistaat Sachsen werden gegenwärtig Bemühungen unternommen, GWWs wieder verstärkt in der Fläche zu etablieren [25, 26].

GWWs sollten prinzipiell entlang aller topographisch bedingten, erosionsanfälligen Entwässerungswege in der Landschaft installiert werden. Form und Beschaffenheit können dabei entlang des Fließweges variieren (■ Abb. 6.8 a). Wesentlich für ihre Funktion ist, dass die Übergänge von den angrenzenden Flächen so beschaffen sind, dass Oberflächenabfluss dem GWW ungehindert zufließen kann (■ Abb. 6.8 b). Anderenfalls fließt der Abfluss entlang der Ackerrandfurche und der Erosionsschaden wird nicht verhindert. Die Positionen, an denen GWWs in der Landschaft installiert werden sollten, lassen sich leicht mit digitalen Geländemodellen identifizieren (■ Abb. 6.8 c). Fehlen sie, kann das Ausmaß möglicher Erosionsrinnen enorm sein (■ Abb. 6.8 d). Gegebenenfalls ist auch der Auslass der begrünten Mulde gegen Erosion zu sichern, z. B. durch eine Steinschüttung. Je nach Zielsetzung sind schmale, unterhalb der Geländeoberkante gelegene Abflussmulden zum schnellen, aber schadlosen Ableiten von Wasser, sehr breite und flache Mulden zum Ableiten und Bremsen hoher Abflussraten oder als multifunktionale Fließwege mit hohem ökologischen Wert möglich [23].

Wirkung von begrünten Abflussmulden

Die Wirksamkeit von GWW ergibt sich einerseits aus Rückhalt und Versickerung des Abflusses und andererseits aus dem Bremsen des Abflusses. Die Wirksamkeit ist umso besser,

- je breiter und flacher die begrünte Mulde angelegt ist,
- je länger die begrünte Mulde ist,

- je hydraulisch rauer die bodennahe Vegetation ist (Hochstauden mit dichter Streuauflage),
- je geringer die Hangneigung ist und
- je kürzer und je kleiner die Zuflussspitze ist, die abzupuffern ist.

Nicht alle diese Parameter lassen sich verändern (z. B. Zuflussspitze oder Hangneigung). In günstigen Fällen (hohe Rauheit, trockene Bedingungen, kurze schauerartige Niederschläge) kann eine Verzögerung von vielen Stunden erreicht werden, in ungünstigen Fällen (Extremereignisse, geringe Bedeckung, wassergesättigtes Porenvolumen im Boden, Hangneigung >9 %) ist im Mittel immer noch eine Verzögerung in der Größenordnung von 10 min möglich. Dies haben Feldmessungen eines 650 m langen und 10 m (oben) bis 50 m (unten) breiten GWWs ergeben, bei dem sich der Spitzenabfluss am Auslass der begrünten Mulde im Mittel um 40 %, bei häufigen Ereignissen sogar um deutlich mehr vermindern ließ [21, 22]. Modellierungsstudien legen darüber hinaus nahe, dass GWWs auch den Abfluss großer Gebiete (>1000 ha) mindern können. Selbst unter ungünstigen Bedingungen (kleine, schmale GWWs, seltene Winterereignisse) konnten Scheitelreduktionsraten von 15 % erreicht werden, wobei GWWs am Ende des Winters immer die geringste Effektivität aufwiesen [29, 30]. Auch eine umfangreiche Studie zum vorbeugenden Hochwasserschutz im Einzugsgebiet der Mulde in Sachsen [31] stuft GWWs als besonders effektive, fluruntergliedernde Maßnahme zum Wasser- und Stoffrückhalt in der Fläche ein.

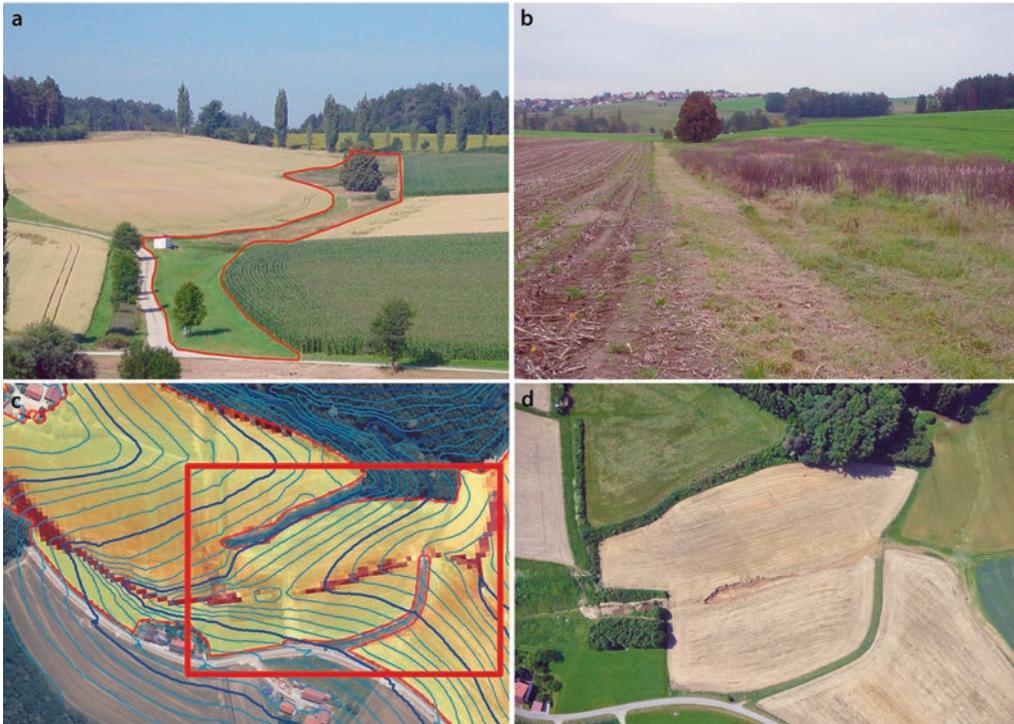


Abb. 6.8 (a) Eine begrünte Abflussmulde (GWW) kann entlang des Fließweges sowohl in der Breite wechseln, um den Flächenzuschnitt der angrenzenden Felder zu optimieren, als auch in der Vegetationsbeschaffenheit, um z. B. durch Mulchen die Vegetationsrauigkeit nicht im gleichen Jahr entlang der gesamten Fließstrecke zu beseitigen (unterer Teil des GWW im Aufnahmejahr gemulcht, um verholzende Pflanzen zu unterdrücken, oberer Teil mehrjährig nicht gemulcht). (b) Der Übergang vom Feld zum GWW muss ohne Randfurche erfolgen, damit der Oberflächenabfluss nicht am ungeschützten Feldrand kanalisiert wird. Abgestorbene Stängel von Hochstauden erzeugen auch im Winter eine stabile hydraulische Rauheit. (c) Die Gefahr von Grabenerosion und die optimale Lage von GWWs lassen sich gut aus der Topographie vorhersagen (Modellierung der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft mithilfe der differenzierenden Allgemeinen Bodenabtragungsgleichung dABAG [27, 28]; der Bildausschnitt von (D) ist durch einen roten Rahmen markiert; dunkelbraune Farben indizieren ein hohes Risiko für Grabenerosion; Abstand der Höhenlinien 2 m). (d) Die massive Auskolkung einer Erosionsrinne in der Tiefenlinie des kleinen Einzugsgebietes durch das Fehlen eines GWW bei einem einzelnen Starkregenereignis im Juni 2016 passt gut mit der Prognose links (c) zusammen. Breite der Auskolkung mehr als 8 m (vgl. Straßenbreite), Tiefe ca. 4 m. (Foto: R. Brandhuber)

GWWs sind inzwischen relativ gut untersucht. Informationen über Bauausführung, Anlage- und Unterhaltskosten, aber auch ausführliche Erläuterungen der Vor- und Nachteile von GWWs aus verschiedenen Perspektiven sind in der wissenschaftlichen Literatur [20, 23, 32] und in Praxisleitfäden [25, 26, 33, 34] dokumentiert. Für die praktische Umsetzung sind im Wesentlichen die Dimensionierung und die Festlegung des Verlaufs in der Fläche wichtig. Letzterer ergibt sich aus dem

natürlichen Verlauf des Oberflächenabflusses bei Starkregen, dem Talweg. Das Querprofil einer natürlichen Abflussbahn sollte eine flache Parabel sein. Meist genügt es, die vom Relief vorgegebene Abflussbahn dauerhaft zu begrünen. Die Breite der zu begrünenden Fläche hängt von der Größe der zu entwässernden Fläche, der Geometrie und dem Sohlgefälle der Abflussbahn ab. Je größer das Einzugsgebiet und je steiler das Sohlgefälle, desto breiter und flacher muss die

6.3 · Begrünte Abflussmulden (Grassed Waterways)

begrünte Mulde angelegt werden. Längere Abflussbahnen können auch in Abschnitte unterschiedlicher Begrünungsbreite eingeteilt werden, sodass die Breite zum Unterlauf hin, entsprechend der zunehmenden Einzugsgebietsgröße und dem dort oftmals geringeren Gefälle, steigt. Auf eine Begrünung mit speziellen Arten, sofern diese nicht als Untersaat etabliert werden können, sollte verzichtet werden, selbst wenn dies aus biotischen Gründen wünschenswert wäre. Der Grund liegt darin, dass GWWs immer in dem am stärksten durch Erosion gefährdeten Bereich angelegt werden. Arten mit langsamer Keimung, schwacher Jugendentwicklung und dem Bedarf für ein feines Saatbett lassen sich dort nicht durch Aussaat etablieren. Zum Standort und der Nutzung passende Arten werden sich mittelfristig auch ohne Ansaat efinden.

Faustzahlen für die Dimensionierung von GWWs können abhängig von der Einzugsgebietsgröße und dem Gefälle mithilfe der GMS-Gleichung abgeschätzt werden (■ Tab. 6.4). Die Breite der Parabel

sollte mit zunehmendem Gefälle zunehmen, um geringe Fließgeschwindigkeiten zu erreichen. Der Flächenbedarf von GWWs beträgt erfahrungsgemäß etwa 2 % der Einzugsgebietsgröße. Neben den hydrologischen Parametern sollte die Planung auch die durch die Landtechnik bedingten Bearbeitungsbreiten in den angrenzenden Ackerflächen berücksichtigen. Dies erleichtert nicht nur die Bearbeitung der angrenzenden Ackerflächen, sondern auch die Pflege der begrüneten Abflussmulde. Da ein GWW den Abfluss aus den angrenzenden Ackerflächen aufnehmen soll, dürfen die Ackerflächen keinesfalls hydraulisch vom GWW abgetrennt werden, z. B. durch eine Ackerrandfurche oder ein Vorgewende. Die Erfahrung zeigt, dass diese Bedingung Landwirten besonders schwer zu vermitteln ist, obwohl es eigentlich die Arbeit erleichtert, wenn auf das arbeitsaufwendige Vorgewende verzichtet werden kann.

Ein schematisches Arbeitsbeispiel zur Platzierung von GWWs in der Flur ist in ■ Abb. 6.9 dargestellt. Die Ausgangslage (linkes Bild) zeigt, dass sich die Flurstücke viel-

■ **Tab. 6.4** Faustzahlen zur Festlegung der Breite B in m von begrüneten Abflussmulden in Abhängigkeit von der zu entwässernden Fläche in ha, dem Sohlgefälle in % und der Fließtiefe t in m bei Spitzenabfluss. Die Werte wurden anhand der GMS-Gleichung für etwa 50-jährliche Niederschläge ermittelt, bei denen Ackerflächen Scheitelabflusspenden in Höhe von rund $50 \text{ l s}^{-1} \text{ ha}^{-1}$ liefern können. Dabei wurde einheitlich von einem Rauheitswert von $20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ ausgegangen. Die Breite der begrüneten Mulde wurde so festgelegt, dass der ermittelte Scheitelabfluss abgeführt werden kann, ohne Fließgeschwindigkeiten $> 1 \text{ m s}^{-1}$ zu erreichen. Um ein möglichst breitflächiges Fließen zu erreichen, wurde die mittlere Seitenneigung des Muldenquerschnitts zusätzlich auf 2 % beschränkt

Gefälle (%)	2,5 ha		5 ha		10 ha		15 ha		20 ha		30 ha		50 ha	
	B	t	B	t	B	t	B	t	B	t	B	t	B	t
1	4	0,13	6	0,20	8	0,22	8	0,25	10	0,31	10	0,36	12	0,45
2	4	0,11	6	0,16	8	0,18	8	0,18	10	0,25	10	0,29	16	0,31
3	4	0,09	6	0,14	10	0,14	10	0,14	12	0,20	14	0,21	20	0,24
4	4	0,09	6	0,13	10	0,13	10	0,13	14	0,17	18	0,17	24	0,19
5	4	0,08	6	0,12	10	0,12	10	0,12	16	0,14	20	0,15	28	0,17
6	4	0,08	8	0,10	10	0,11	12	0,10	18	0,13	24	0,12	32	0,14
7	4	0,07	8	0,09	10	0,11	12	0,10	18	0,12	26	0,11	36	0,13
8	4	0,07	8	0,09	10	0,10	12	0,09	20	0,11	28	0,10	38	0,12

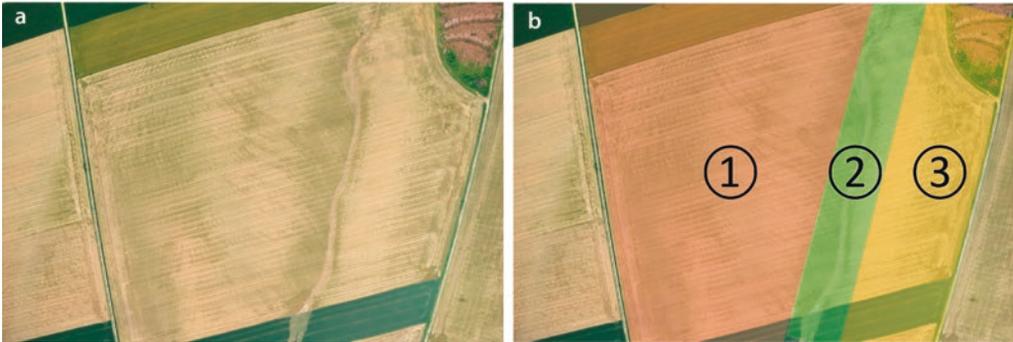


Abb. 6.9 Schematisches Planungsbeispiel, wie durch die Veränderung der Flächenparzellierung starke Rinnenerosion (a) verhindert werden kann, indem eine begrünte Mulde in der Tiefenlinie eines Maisfeldes angelegt wird, die daran angrenzenden Felder an der Topographie der Landschaft ausgerichtet und dadurch der ländliche Hochwasserschutz und die Flächenbewirtschaftung gleichermaßen verbessert werden (b). Nummer 1 und 3 in (b) kennzeichnen die beiden Felder; Nummer 2 ist die begrünten Abflussmulde. (Quelle: W. Bauer, Agroluftbild)

6

fach nicht an den Fließwegen der Landschaft orientieren, obwohl dies für den ländlichen Hochwasserschutz und für die Bewirtschaftung gleichermaßen günstig wäre. Eine Erosionsrinne läuft quer durch das Maisfeld mit wenig Bedeckung, und das dunkelgrüne Winterweizenfeld am unteren Bildrand konnte dem konzentrierten Zufluss nicht standhalten. In dem Beispiel wurde durch die Veränderung der Flächenparzellierung (rechtes Bild) Feld 1 nicht kleiner als das bisherige Maisfeld. Die Bearbeitung liegt aber nun parallel zur Straße. Ein Vorgewende entlang der begrünten Mulde ist nicht notwendig und darf nicht gemacht werden, sondern man wendet in der begrünten Mulde. Die Bewirtschaftung (gedacht in Richtung der längeren Seite) wird dadurch einfacher und Verdichtungsschäden werden durch den Wegfall des Vorgewendes vermieden. Zusätzlich liegt die Bearbeitung nun fast quer zum Hang mit einem leichten Gefälle zur begrünten Mulde. So ist die Erosionsschutzwirkung am größten. Das Feld 3 ist deutlich größer als das bisherige Winterweizenfeld und hat nun perfekt parallele Seiten, was die Bewirtschaftung erleichtert. Zusätzlich liegt auch hier die Bearbeitung jetzt quer zum Hang und nicht mehr in Gefälgerichtung und schützt zusätzlich. Das ist immer

so, wenn die Felder nach der Tiefenlinie ausgerichtet werden. Zwischen Feld 1 und Feld 3 wird eine begrünte Mulde angelegt. Dass sich die Abflusslinie schlängelt, bedeutet nicht, dass sich die begrünte Mulde auch schlängeln muss. Im Gegenteil, sie sollte breit ausgeführt werden, schon um dort Wendemanöver bei der Flächenbewirtschaftung praktizieren zu können.

Erwähnenswert ist, dass es sich bei GWWs eigentlich um sehr altes, sehr lange praktiziertes Wissen handelt. Erst im Zuge der Anpassung der Landschaft an die Technik ging es verloren (dabei hätte man von einer fortschrittlichen Technik eigentlich erwarten können, dass sich die Technik an die Landschaft anpasst). Dieses alte Wissen ist durch historische Karten, z. B. durch die Reichsbodenschätzung, anschaulich dokumentiert. Ausschnitte aus dem Tertiärhügelland in Bayern von 1958 belegen, dass damals noch nahezu alle Tiefenlinien als Dauergrünland genutzt wurden. Zu dieser Zeit verliefen zahlreiche, Ost-/West-orientierte, grüne Bänder entlang der Niederungen und Tiefenlinien der Landschaft (Abb. 6.10). Durch Meliorationsmaßnahmen sind heute die meisten dieser Grünlandstandorte verschwunden, die früher den Wasser- und Stoffrückhalt in der Landschaft gefördert hatten



■ **Abb. 6.10** Ausschnitt der Bodenschätzungsübersichtskarte nördlich von Zolling im Tertiärhügelland von 1958 (Blatt 7536, Freising Nord) mit Darstellung von Grünland (Grüntöne), Acker (Braun-, Rot- und Orangetöne) und Wald (weiße Flächen). Historische Bodenschätzungsübersichtskarten können vielfach kostenfrei bezogen werden

und gleichzeitig wichtige Korridore für Tier- und Pflanzenarten und damit für die biotische Diversität bedeutsam waren [35]. Diese Veränderung der Landschaftsstruktur und ihr Einfluss auf das Abflussgeschehen wird anhand eines Beispiels aus dem Tertiärhügelland in ► Abschn. 6.5.2 anschaulich illustriert. Ähnliches ist auch aus Sachsen beschrieben [25] und kann vielerorts leicht aus dem Vergleich historischer und aktueller Luftbilder, topographischer Karten und insbesondere aus der Gegenüberstellung historischer Bodenschätzungskarten mit der aktuellen Nutzung nachvollzogen werden. Diese Entwicklung ist auch insofern bemerkenswert, da die Bodenschätzungskarten aus einer Bewertung der Ertragsfähigkeit der landwirtschaftlichen Grundstücke hervorgehen.

Das bedeutet, dass eine ackerbauliche Nutzung feuchter Niederungen und Tiefenlinien als ökonomisch nicht sinnvoll erachtet wurde. Erst durch die Melioration dieser Standorte hat sich daran etwas geändert, ohne dass aber dadurch die Wertzahlen, die die Wirtschaftlichkeit quantifizieren, angestiegen wären.

6.4 Kleinstrückhaltebecken in der landwirtschaftlichen Flur

Da Hochwasserschäden vor allem durch den Hochwasserscheitel entstehen, die meiste Zeit die Abflussrate aber niedriger ist, liegt es nahe, den Scheitelabfluss zwischenzuspeichern und

■ **Tab. 6.5** Beispiele für einfache, mit landwirtschaftlichen Geräten in Hangmulden geschaffene Rückhaltebecken [49]. Der Jahresabfluss ist die im langjährigen Mittel durch das jeweilige Becken geflossene Wassermenge

Einzugsgebietseigenschaften				Eigenschaften der Rückhaltebecken			
Beckenbezeichnung	Größe	Mittlerer Jahresabfluss	Mittlere Hangneigung	Max. Wasserhöhe	Max. Volumen	Volumen pro Einzugsgebietsfläche	Durchmesser der Lochblende
	ha	mm a ⁻¹	%	m	m ³	mm	m
A	1,6	43	7	1,2	423	26	0,025
B	3,6	62	7	1,2	486	14	0,040
C	4,0	25	9	1,4	335	8	0,040
D	7,8	6	9	1,1	221	3	0,040

erst im abklingenden Ast der Welle wieder abzugeben. Dies ist mit Retentions- oder Rückhaltebecken möglich. Kleine Retentionsbecken (Volumina von einigen hundert bis tausend Kubikmetern) lassen sich oft mit einfachen Mitteln und geringen Kosten in die landwirtschaftlich genutzte Flur integrieren. Für größere Rückhaltebecken ist dagegen ein vergleichsweise hoher planerischer und konstruktiver Aufwand erforderlich [36]. Werden hinreichend viele dieser kleinen Becken installiert und über das Einzugsgebiet verteilt, können sie einen deutlichen Beitrag zum Wasser- und Stoffrückhalt leisten und Hochwasserschäden mindern – entlang der Entwässerungswege, aber auch im kompletten Einzugsgebiet.

Für die Funktion ist wichtig, dass sich Becken nicht schon im ansteigenden Ast der Hochwasserwelle vollständig füllen, weil sonst der Scheitelabfluss ungehindert durchfließen würde. Ungesteuerte Becken werden daher meist mit einem gedrosselten Auslauf versehen, sodass kleinere Abflüsse einfach durchlaufen und das Speicherbecken frei und funktionsfähig bleibt. Bei größeren Regen wird dagegen ein Teil zurückgehalten und verzögert durch die Drossel wieder abgegeben. Solche gedrosselten Ausläufe wurden bereits in den frühen Jahren des 20. Jahrhunderts in den USA eingesetzt [37]. Ist die Zwischenspeicherung kurz (wenige Tage) und das Ein-

zugsgebiet klein (einige Hektar), sodass nur kleine Volumina erforderlich sind, können Rückhaltebecken auch innerhalb von Acker- und Grünlandflächen angelegt werden, da landwirtschaftliche Kulturen, bei richtiger Dimensionierung der Drossel, einen kurzzeitigen Überstau tolerieren (einzig bei Kartoffeln ist nach mehr als zwei bis drei Tagen Überstau mit Schäden zu rechnen). Solche kleinen, in der landwirtschaftlichen Flur angelegten Becken bieten dadurch die Vorteile, dass sie kaum zusätzliche Fläche benötigen und meist mit einfachen Mitteln angelegt und unterhalten werden können. Für die in ■ Tab. 6.5 zusammengestellten Becken trat ein Einstau im Mittel fünfmal pro Jahr auf und dauerte im Schnitt 1,5 Tage. Der längste Überstau dauerte 5 Tage und trat im Mittel nur einmal in 12 Jahren auf. Am längsten dauert der Überstau auch nur im tiefsten Teil und betrifft daher immer nur eine kleine Fläche des Beckens, deren Gesamtfläche bei den in ■ Tab. 6.5 zusammengestellten Fällen nur 100 m² oder weniger betragen hatte.

Im Folgenden wird ein Überblick gegeben, wie solche Becken angelegt werden können, wie die Dimensionierung der Drossel sein sollte und welche Effekte zu erwarten sind. Hinsichtlich der Details der Ausgestaltung sei auf eine Vielzahl von technischen Anleitungen [38–40] und die hydraulische wie wasserbau-

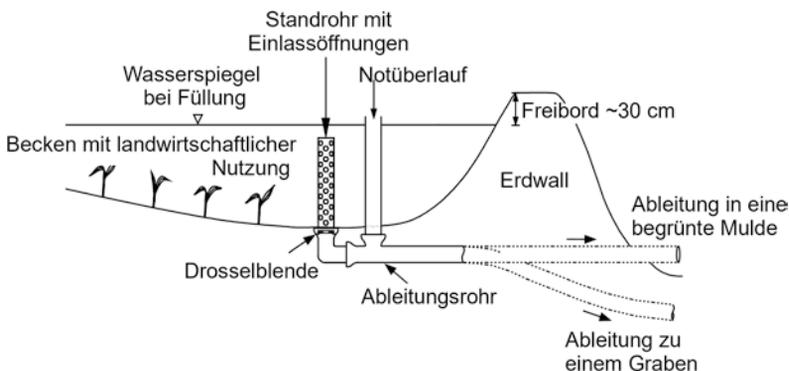
liche Grundlagenliteratur verwiesen [z. B. 42, 43, 44]. Die DIN 19700 [41], die für Planung, Bau, Betrieb und Überwachung von Stauanlagen gilt, betrachtet Retentionsräume, die infolge von Verkehrsdämmen oder ähnlichen Aufschüttungen oder Abgrabungen entstanden sind, ebenso wie Regenrückhaltebecken nicht als Hochwasserrückhaltebecken im engeren Sinne. Um solche kleinen Becken geht es aber hier. In der englischsprachigen Literatur werden diese nur kurzzeitig gefüllten Becken „detention ponds“ oder „dry ponds“ genannt, während „retention ponds“ oder „wet ponds“ dauerhaft Wasser enthalten und meist so konzipiert sind, dass sie auch dem Stoffrückhalt und -abbau dienen.

■ Anlage

Kleine Retentionsbecken bieten sich überall dort an, wo lineare Strukturen quer durch Hangmulden geführt werden. Im Folgenden wird von Feldwegen ausgegangen, aber es könnten genauso gut Felddraine oder Hecken sein. Durch Erhöhung des Weges an der tiefsten Stelle – dazu genügen oft schon die in der Landwirtschaft vorhandenen Geräte – wird oberhalb des Weges ein Becken geschaffen. Die Böschung sollte nicht steiler als 1:3 (vertikal:horizontal) sein, aber im unteren Teil auch nicht wesentlich flacher,

damit der Teil, der regelmäßig überstaut wird, keine zu große Fläche und kein zu großes Volumen einnimmt. Die Erhöhung des Weges hat für dessen Benutzung gleichzeitig den Vorteil, dass der Weg über den feuchtesten Teil der Mulde hinausragt, trocken bleibt und dass die Steigungen des Weges geringer werden. Den schematischen Aufbau zeigt ■ Abb. 6.11, ein reales Becken ist in ■ Abb. 6.12(c) dargestellt. Wie groß das Becken wird, richtet sich nach den lokalen Gegebenheiten. Billiger, besser beherrschbar und effizienter ist es meist, kleine, aber viele statt wenige große Becken zu schaffen. Insbesondere kaskadenförmig hintereinander geschaltete kleine Becken können vorteilhaft sein, weil dann der Abfluss mehrfach gedämpft wird. Auch werden dann die unteren Becken besser genutzt, da selten alle Flächen gleichzeitig liefern, aber bei mehreren Lieferflächen die Wahrscheinlichkeit steigt, dass eine liefert. Die oberhalb liegenden Becken stellen sicher, dass das unterste Becken nicht überlastet wird. Dadurch kann bei allen Becken die gleiche preisgünstige Bauweise verwendet werden.

Durch den Damm muss ein Ableitungsrohr geführt werden. Am Einlauf in dieses Rohr wird eine Drossel in Form



■ **Abb. 6.11** Schematischer Querschnitt (ca. 3-fach überhöht) durch ein Kleinrückhaltebecken. Ein perforiertes Standrohr stellt sicher, dass der Zufluss zum Ableitungsrohr nicht verstopfen kann. Eine tauschbare Drosselblende am Übergang vom Standrohr zum Ableitungsrohr erlaubt eine vollständige Entleerung des Beckens, führt aber bei hohen Zuflussraten zu einem Anstau im Becken; ein zweites, nicht gedrosseltes, nur oben offenes Überlaufrohr stellt sicher, dass der Damm nicht überflossen wird und ein ausreichender Freibord erhalten bleibt

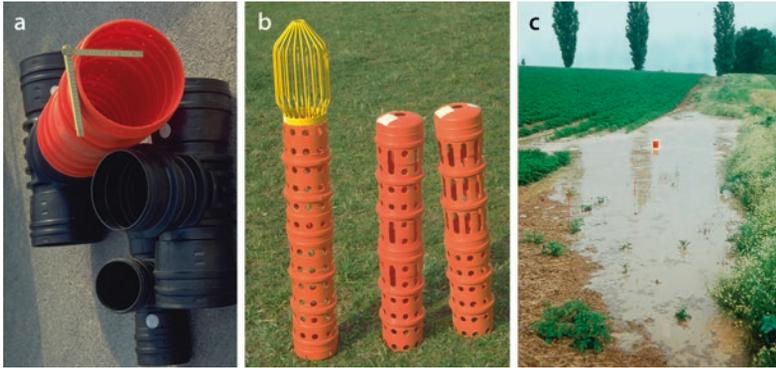


Abb. 6.12 (a) Ableitungsrohr (schwarz) und abnehmbares Einlassrohr (orange); am Übergang von Einlass- zum Ableitungsrohr sitzt die wechselbare Drossel. (b) Verschiedene Konfigurationen von verlängerbaren Einlassrohren. (c) Gefülltes Becken (Becken B in Tab. 6.5), bei dem in der Mitte das obere Ende des Einlassrohres gerade noch aus dem Wasser ragt. Das Becken wurde durch Erhöhung eines Felddrains geschaffen. Dieses spezielle Becken war bereits wenige Jahre nach Anlage stark verlandet. Das ursprüngliche Beckenvolumen musste im Herbst des Aufnahmejahrs durch Ausbaggern wiederhergestellt werden. (Fotos: Stephan Weigand)

6

einer Verengung eingebaut (im Normalfall eine Lochblende). Es ist zu verhindern, dass diese Drossel z. B. durch Stroh verstopft. Deshalb muss der Einlass Stroh zurückhalten, darf aber selbst nicht verstopfen. In den USA sind seit vielen Jahrzehnten entsprechende, senkrecht stehende, bei Bewirtschaftungsmaßnahmen (z. B. Pflanzenschutzmittelausbringung) einfach entfernbare Einlassrohre mit runden oder schlitzförmigen Öffnungen kommerziell verfügbar (Abb. 6.12) (z. B. www.hickenbottominc.com, www.agridrain.com).

Auch wenn Einlassrohr und Drossel nicht verstopfen, kann bei besonders großen Ereignissen der Fall eintreten, dass das Becken überzulaufen droht. Dies ist unbedingt zu verhindern, da es dann zu einer rückschreitenden Erosion des Dammes käme, der brechen und den gespeicherten Abfluss in einem Schwall entlassen könnte. Damit dies nicht geschieht, sollte ein Notüberlauf installiert werden und selbiger, ebenso wie das Rohr, das durch den Damm führt, so dimensioniert werden, dass darüber ein seltener Abfluss in jedem Fall abgeleitet werden kann. Der zu erwartende Scheitelabfluss einer Zuflusswelle kann mit den

Methoden in Kap. 3 ermittelt werden. Dann kann mit der GMS-Gleichung (Gl. 5.5) der Rohrquerschnitt ermittelt werden, bei dem das Rohr nicht vollständig gefüllt wird. Eine technisch einfache Lösung zur Konstruktion des Notüberlaufs ist die Installation eines zweiten, nicht gedrosselten Einlaufrohrs, dessen Einlauf ausreichend weit unter der Dammkrone liegt (ca. 30 cm; „Freibord“) (vgl. Abb. 6.11). Da das Auslassrohr viel mehr Wasser ableiten kann, als die Drossel durchlässt, wird in dem Fall der Abfluss ungebremst weitergeleitet. Sobald der Zufluss soweit zurückgegangen ist, dass der Wasserspiegel unter dem Noteinlass liegt, ist die normale Funktion des Beckens wiederhergestellt. Alternativ kann auch ein befestigter Überlauf über die Dammkrone konstruiert werden.

Der kritische Punkt solcher Retentionsbecken kommt nach dem Auslassrohr, da durch dieses der Abfluss konzentriert wird. In Folge kommt es leicht zu einem Einschneiden des Abflusses auf unterhalb gelegenen Ackerflächen. Um dies zu verhindern, bieten sich zwei Lösungen an:

1. Ideal ist, den Abfluss in einer begrünten Abflussmulde weiterzuführen, die in

einer Hangmulde sowieso vorhanden sein sollte (vgl. ► Abschn. 6.3). Durch die permanente Begrünung reicht normalerweise der Schutz aus, um den Abfluss gefahrlos abzuleiten (ggf. ist der Bereich am Auslaufrohr zusätzlich zu sichern, z. B. mit Gabionen). Innerhalb der begrüneten Mulde können meist noch an mehreren weiteren Stellen Dämme geschaffen und so eine Speicherkaskade angelegt werden. Diese Dämme verhindern dann auch, dass die begrünete Abflussmulde zu einem in Gefällerrichtung befahrenen Weg umfunktioniert wird und ihre eigentliche Funktion einbüßt.

2. Der Abfluss könnte auch durch ein unterhalb des Bearbeitungshorizontes verlegtes Rohr bis zum Vorfluter oder besser in eine große Sickerfläche geführt werden. Am gleichen Rohr können mehrere in der gleichen Hangmulde untereinander angeordnete Becken angeschlossen werden, um es effizient zu nutzen. Diese Lösung ist aber eindeutig nur zweite Wahl, da der Abfluss im Rohr sehr schnell erfolgt und dadurch der Abflussscheitel steigt. Der Abfluss erfolgt schnell, weil das Rohr ein großes Gefälle aufweist, da es parallel zur Bodenoberfläche mit derselben Neigung wie die unterhalb folgenden Felder verlegt wird, weil das Wasser darin in großer Schichtdicke fließt und weil der Rauheitsbeiwert konventioneller Rohre sehr hoch ist. Der Rauheitsbeiwert von Plastikrohren kann Werte von $90 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ und mehr erreichen und liegt damit weit über den Werten natürlicher Oberflächen (vgl. ► Abschn. 6.6). Innen geriffelte Rohre sind daher empfehlenswert. Sie senken den Rauheitsbeiwert aber auch nur auf ca. die Hälfte und beseitigen nicht das Problem der großen Schichtdicke. Die scheitelmindernde Wirkung des Beckens muss daher wesentlich größer sein als die beschleunigende Wirkung des Rohres. Dies ist eigentlich nur dann erreichbar,

wenn das Speichervolumen im Vergleich zur Lieferfläche groß ist. Wird der Abfluss in eine Sickerfläche geleitet, ist davon auszugehen, dass diese aufgrund der im Abfluss transportierten Feststoffe regelmäßig geräumt werden muss.

■ Dimensionierung

Die Dimensionierung kann sich prinzipiell nach der Befüllung oder nach der Entleerung des Speichers richten. Wenn die Befüllung maßgebend ist, wird das Beckenvolumen mithilfe von Modellregen so ermittelt, dass ein bestimmter Spitzenabfluss gerade noch gedämpft wird, ohne dass das Becken überläuft. Dies ist das übliche im technischen Hochwasserschutz bei größeren Becken praktizierte Vorgehen. Es soll sicherzustellen, dass ein festgelegter (Regel-)Abfluss unterhalb eines Rückhaltebeckens nicht überschritten wird. Für die Berechnung muss der Abflussgang des Modellregens erzeugt und dann der Verlauf der Speicherbefüllung bei gleichzeitigem Ausfluss, meist für verschiedene Drosselöffnungen, ermittelt werden. Schon die genaue Wahl des Modellregens ist relativ problematisch und oft müssen viele verschiedene Varianten verglichen werden [46]. Einfacher und für kleine Becken im ländlichen Raum in der Regel hinreichend ist es, die Entleerung des Speichers am verfügbaren Beckenvolumen auszurichten. Ist ein potenzieller Beckenstandort identifiziert, kann das Volumen eines Speicherbeckens durch Computerprogramme heutzutage leicht und hinreichend genau aus einem (hochauflösenden) digitalen Geländemodell und der geplanten Höhe der Dammkrone (abzüglich des Freibords) abgeleitet werden. Je flacher das Gelände oberhalb des Damms ist, umso mehr Wasser lässt sich mit moderaten Dammhöhen zwischen 1 und 1,5 m stauen. Geht man davon aus, dass die landwirtschaftliche Kultur im Bereich des Speicherbeckens nur zwei Tage überstaut werden soll, muss sich das volle Becken innerhalb von

zwei Tagen vollständig entleeren, sofern kein Zufluss mehr erfolgt. Um die Drosselöffnung entsprechend zu dimensionieren, genügt eine einfache Gleichung [47, 48], da der Abfluss im Ableitungsrohr frei abfließen kann und nicht zurückstaut. Der Index „o“ steht dabei für „orifice“ (Blende):

$$q_o = C_o \cdot A_o \cdot \sqrt{2 g h_o} \quad (6.2)$$

wobei

q_o - Durchfluss durch eine Lochblende ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

C_o - Durchflusskoeffizient; bei kreisförmigen Blenden mit einem Lochdurchmesser $< 5 \text{ mm}$ ist C_o 0,60, bei größerem Durchmesser 0,62

A_o - Fläche der Blendenöffnung (m^2)

g - Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m s}^{-2}$)

h_o - Höhe der Wassersäule über der Blendenöffnung (m); um eine mittlere Durchflussrate zu schätzen, kann als Höhe der Wassersäule ein Drittel der maximalen Stauhöhe angenommen werden

Wird eine kurze Entleerungszeit (z. B. ein Tag) angenommen, sinkt die Pufferwirkung des Beckens. Das Becken wird bei vielen (kleinen) Abflüssen nahezu funktionslos, weil die Blendenöffnung reicht, um den Zufluss durchzulassen. Allerdings werden von so einem Becken sehr hohe, selten auftretende Abflussspitzen noch abgemildert, weil es selten ganz gefüllt ist. Wird eine wesentlich längere Entleerungszeit angestrebt (z. B. vier Tage), puffert das Becken auch kleinere Abflüsse und wird daher sehr viel häufiger wirksam sein. Allerdings wird es bei seltenen, großen Abflussraten bereits weitgehend gefüllt sein, sodass gerade diese Raten ungepuffert über den Notüberlauf weitergeleitet werden. Wenn der Fokus mehr auf der Verbesserung der Gewässerqualität liegt, ist es meist besser, viele kleine Ereignisse zu puffern und wenige große über den Notüberlauf abzuleiten. Oft werden dann die Becken sogar so konzipiert, dass Sedimentation partikulärer Stoffe unterstützt wird und dass möglichst ganzjährig Wasser im Becken ist, weil dann der Rückhalt von Nährstoffen und der Abbau von

Pflanzenschutzmitteln besser wird [50]. Für die Hochwasserminderung steht dagegen das Beherrschen der großen Ereignisse im Vordergrund [51]. Welcher dieser Varianten der Vorzug zu geben ist, kann daher nur im Einzelfall unter Berücksichtigung der Gesamtsituation entschieden werden. Kommerziell verfügbare Systeme verfügen normalerweise über wechselbare Drosselblenden. Dadurch kann, wenn Erfahrung mit einem Becken gesammelt worden ist, einfach nachjustiert und die Drosselung verstärkt oder gemindert werden.

In der landwirtschaftlich genutzten Flur lässt sich oft ein Verhältnis von Beckenvolumen zu Einzugsgebietsfläche (spezifisches Rückhaltevolumen) von über 10 mm erzielen (Becken A und B in ■ Tab. 6.5), womit auch bei Flächen, die aufgrund der Bodenverhältnisse und der Nutzung stark zu Oberflächenabfluss neigen (Einzugsgebiete A und B), bereits eine deutliche Hochwasserminderung erreicht werden kann. Bei geringerer Neigung zu Oberflächenabfluss (Becken D in ■ Tab. 6.5) reicht auch ein geringeres spezifisches Rückhaltevolumen.

■ Wirkungen

Die Fläche eines Beckens ist normalerweise winzig im Vergleich zur Lieferfläche. Eine Verminderung des Abflussvolumens durch Versickerung kann man daher vernachlässigen. Auch die Verdunstung innerhalb der kurzen Einstauphase ist meist vernachlässigbar. Die hochwassermindernde Wirkung ergibt sich daher praktisch ausschließlich aus der Pufferung zwischen Zufluss und Abfluss. Ein Beispiel von Becken B in ■ Tab. 6.5 zeigt ■ Abb. 6.13 oben. Der Spitzenabfluss wurde durch das Becken um 70 % reduziert. Außerdem wurde der Spitzenabfluss um ca. sechs Stunden nach hinten verschoben. Die Verzögerung des Ausflussscheitels gegenüber dem Scheitel des Zuflusses wird dabei umso größer, je stärker die Dämpfung ist und je länger der Regen andauert [52]. Der Scheitel des Ausflusses tritt daher erst auf,

wenn auf anderen Flächen in ähnlicher Position, die nicht durch ein Becken gepuffert sind, längst kein Oberflächenabfluss mehr auftritt, was die Gebietsentwässerung entzerzt. Das weitere Entwässerungssystem unterhalb eines Beckens wird daher in zweifacher Weise entlastet. Da dort die Abflussrate geringer wird, verringert sich auch entlang der gesamten weiteren Fließstrecke des Wassers die Fließgeschwindigkeit, sodass die Beckenwirkung noch weiter verstärkt wird. Allerdings erfasst das in **Abb. 6.14** dargestellte Becken nur knapp 4 ha. Trotz seiner großen Wirkung am Beckenauslass ist der Effekt im nächsten Fließgewässer vermutlich kaum mehr nachweisbar. Modellierungen zeigen, dass die Gesamtwirkung in etwa linear mit dem Flächenanteil der geschützten Fläche

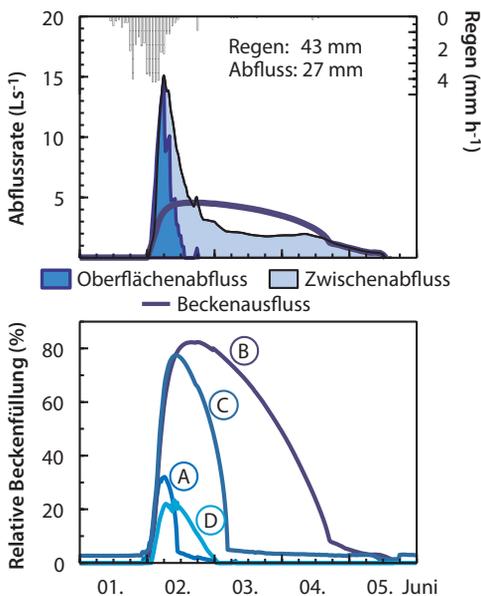


Abb. 6.13 Oben: Gemessene Zuflussraten in ein kleines Speicherbecken (Becken B in **Tab. 6.5**) und gemessene Ausflussraten aus dem Speicherbecken. In diesem Fall lieferte das Einzugsgebiet zusätzlich zum Oberflächenabfluss noch über mehrere Tage Zwischenabfluss. Dadurch dauerte es vier Tage, bis das Becken wieder vollständig entleert war. Unten: Relativer Füllungsgrad der vier in **Tab. 6.5** charakterisierten Becken beim gleichen Regen

zurückgeht. Für den in **Abb. 6.13** dargestellten Fall wäre also zu erwarten, dass der Scheitel statt um 70 nur um 7 % reduziert würde, wenn nur die 4 ha in einem insgesamt 40 ha großen gleichzeitig abflussliefernden Gesamtgebiet durch das Becken erfasst würden. Das spezifische Rückhaltevolumen für das Gesamtgebiet wären dann auch nur 1,4 mm, während das spezifische Rückhaltevolumen der geschützten 4-ha-Fläche 14 mm beträgt. Es benötigt daher viele solcher Becken, umso mehr, je größer das betrachtete Fließgewässer ist, um einen deutlichen Effekt zu erzeugen. Dadurch wird dann allerdings, im Gegensatz zu einzelnen großen Rückhaltebecken, nicht nur ein Ort am Fließgewässer, sondern das gesamte Einzugsgebiet geschützt. Dies bestätigen auch Untersuchungen aus 8 und 17 km² großen Einzugsgebieten, wo Rückhaltebecken eine erkennbare Wirkung auf große Hochwasserabflüsse hatten, sobald ihr spezifisches Rückhaltevolumen 3 mm überstieg [36].

Der Vergleich verschiedener Becken beim gleichen Regen (**Abb. 6.13** unten) zeigt, wie unterschiedlich die Reaktion der Einzugsgebiete ist, je nach Bedeckung der Flächen. Becken A und D wurden kaum gefüllt, weil deren Lieferflächen zum Zeitpunkt des Regens durch einen voll entwickelten Weizenbestand gut bedeckt waren. Becken B und C wurden dagegen wesentlich stärker in Anspruch genommen, weil der Mais in ihren Liefergebieten noch wenig entwickelt war. In allen Fällen stieg die Beckenfüllung aber nie über 80 % des Beckenvolumens. Auch deutlich größere Abflussspitzen hätten also noch beherrscht werden können, ohne dass der Notüberlauf angesprungen wäre.

Die praktische Umsetzung solcher Konzepte sind für Deutschlands nur sehr spärlich in der Literatur dokumentiert. Ein Fall ist aus der im Landkreis Pfaffenhofen a. d. Ilm durch eine Diplomarbeit bekannt [53]: Auf einer knapp 17 km² großen Fläche in der Hallertau, dem größten Hopfenanbaugbiet Deutschlands (Nutzflächenneigungen zwischen 7 und 14 %), wurden zum Rückhalt

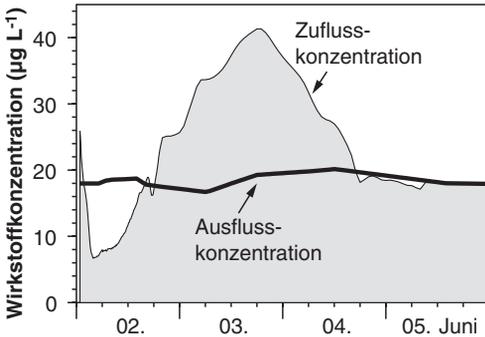


Abb. 6.14 Das leicht lösliche Herbizid Terbutylazin wurde durch den infiltrierenden Regen bereits am Anfang des Regenereignisses in den Boden eingewaschen. Daher wurde die Spitzenkonzentration im zufließenden Abfluss erst am zweiten Tag erreicht, als kein Oberflächenabfluss mehr den exfiltrierenden Zwischenabfluss verdünnte. Im Ausfluss aus dem Retentionsbecken war durch die Durchmischung die Konzentration immer im mittleren Bereich und die doppelt so hohen Spitzenkonzentrationen wurden vermieden. Die Daten und Ergebnisse stammen von dem gleichen Ereignis, das schon in [Abb. 6.13](#) dargestellt wurde

von Oberflächenabfluss aus einer Vielzahl von Geländemulden, Senken, Tallinien, aber auch durch Wege und Straßen insgesamt etwa 130 kleine Erdbecken mit einem mittleren Volumen von 250 m^3 angelegt (Gesamtvolumen $\approx 30.000 \text{ m}^3$). Dies entspricht einem Becken je 13 ha und zeigt das große Potenzial für die Anlage solcher Becken. Berechnungen ergaben, dass durch die Summe der Rückhaltebecken ein Schutz vor etwa 20-jährlichen Sommerhochwasserereignissen in den Unterliegergemeinden geschaffen werden konnte. Ein ähnlicher Fall ist bereits aus den 1980er-Jahren für das Flurbereinigungsgebiet Freinhausen dokumentiert, allerdings ohne die Wirkung durch Modellierung abzuschätzen [54].

Neben der Dämpfung des Abflussscheitels wird auch die Konzentration von Nährstoffen und Agrochemikalien, insbesondere von Pflanzenschutzmitteln, gedämpft. Deren Konzentration ist meist am Anfang des Abflussereignisses groß, lässt dann aber im

Laufe des Ereignisses rasch nach. Da im Becken früher Abfluss mit hoher Konzentration zurückgehalten und mit späterem Zufluss mit geringerer Konzentration vermischt wird, werden die Spitzenkonzentrationen vermieden, auch wenn sich die Gesamtmenge des Wirkstoffabtrags dadurch nicht ändert ([Abb. 6.14](#)).

Die Fließgeschwindigkeit des Oberflächenabflusses wird innerhalb des Beckens wegen der großen Einstauhöhe praktisch null. Dadurch sinkt die Transportkapazität und ein Großteil des Erosionsmaterials wird im Becken abgelagert [37, 49]. In der Gesamtwirkung beträgt der Sedimentrückhalt etwa 70 % (mit weiter Spanne), da nur bei Beckenfüllung ein Rückhalt zu erwarten ist. Bei kleinen Ereignissen und am Anfang großer Ereignisse ist dagegen der Rückhalt gering, weil in beiden Fällen kaum Einstau auftritt.

Durch den Sedimentrückhalt verringern sich das Speichervolumen und die Pufferwirkung. Die Pufferwirkung geht dabei noch wesentlich schneller zurück als das Speichervolumen, weil die Drossel an der ursprünglichen Stelle bleibt und damit unterhalb des durch Sedimentschichten angehobenen Beckenbodens liegt. Selbst wenn das Becken noch gar nicht gefüllt ist, entspricht die Höhe der Wassersäule über der Blendenöffnung bereits beim ersten Zulauf schon der Sedimenthöhe. Entsprechend [Gl. 6.2](#) ist damit der Wasserdurchfluss durch die Drossel von Anfang an hoch. Bei einem Bodenabtrag von $10 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, was als typischer Wert bei konventionellem Anbau angesehen werden kann, würden bei einem Einzugsgebiet von 2 ha und einem Rückhalt von 50 % ca. 10 m^3 Speichervolumen pro Jahr verloren gehen. Bei den in [Tab. 6.5](#) dargestellten Becken wäre also nach 10 Jahren ein Viertel bis die Hälfte des Speichervolumens mit Sediment belegt. Als Alternative zu einem flächigen Erosionsschutz kommen Retentionsbecken daher im Normalfall nicht in Frage. Der Bau von Retentionsbecken macht dagegen vor allem dann Sinn, wenn auf der Fläche

ein sehr guter Erosionsschutz praktiziert wird oder man Unterhaltskosten für das regelmäßige Ausbaggern des Sediments in Kauf nimmt. Auch mit gutem Erosionsschutz ist damit zu rechnen, dass Sediment von Zeit zu Zeit entfernt werden muss, um das volle Speichervolumen und die volle Pufferwirkung wiederherzustellen. Besonders vorteilhaft sind Retentionsbecken daher in Grünlandgebieten, in denen das Problem der Sedimentation kaum auftritt. Gerade in Grünlandgebieten können solche Becken wertvoll sein, da dort weniger Möglichkeiten als im Ackerbau bestehen, Infiltration und Gebietsrückhalt zu fördern und die Fließgeschwindigkeit zu senken.

6.5 Flurgliederung und Flächenarrangement

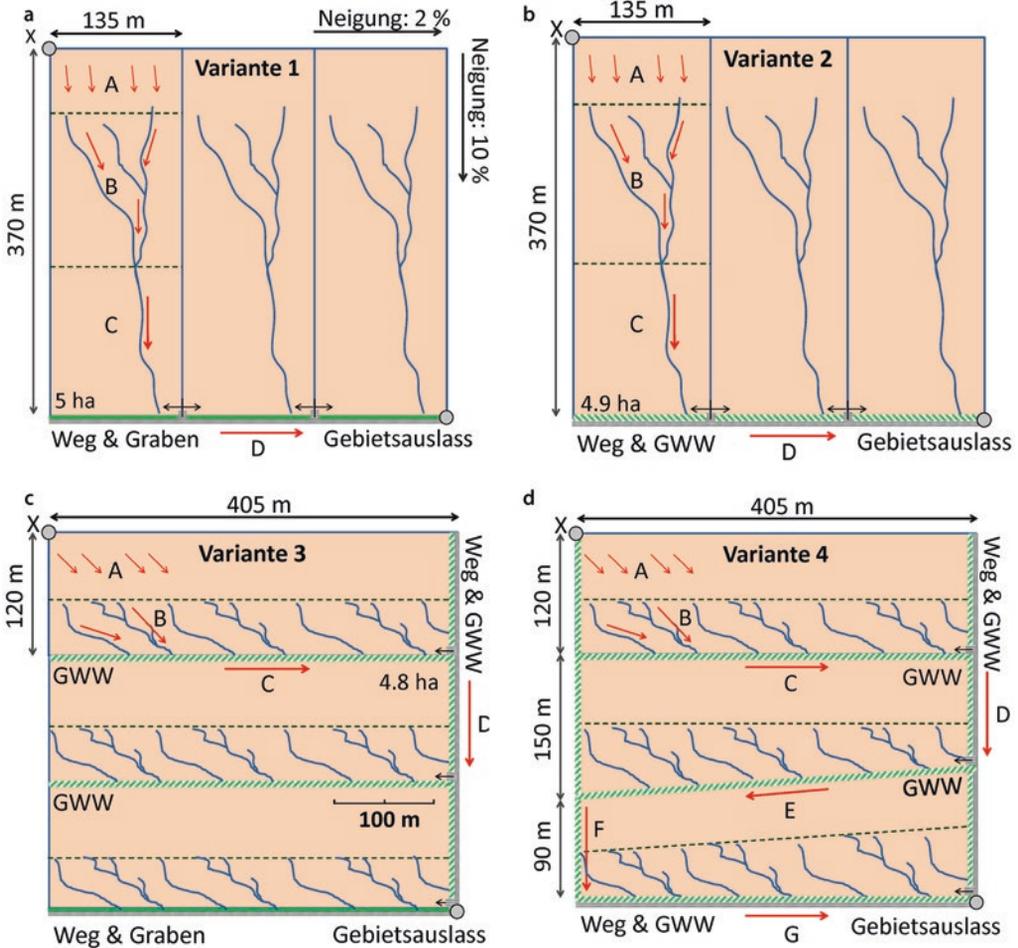
Strukturen und Hindernisse verlängern Fließpfade in der Fläche, vermindern ihr Gefälle und verzögern die Bündelung des Abflusses. Dies reduziert die Geschwindigkeit des Oberflächenabflusses. Gleichzeitig entscheidet die Flächenparzellierung oftmals über die Bewirtschaftungsrichtung und damit über den Verlauf und die hydraulischen Eigenschaften der Fließpfade zwischen Wasserscheide und Gewässer. Um den Einfluss der Flurgliederung auf die Abflusskonzentration zu quantifizieren, werden im Folgenden mehrere Beispiele betrachtet. Zunächst erfolgt eine theoretische Analyse, bei der die Fließzeiten unterschiedlicher Flächenparzellierungen, der erforderliche Bedarf für wasserableitende Strukturen und der resultierende Retentionspeicher der einzelnen Varianten verglichen werden. Im Anschluss folgen zwei Praxisbeispiele. Zunächst wird das aktuelle, in einem Untersuchungsgebiet vorhandene Netz aus Fließpfaden zwischen Wasserscheide und Gewässernetz mit einer historischen, deutlich feingliedrigeren Flächenparzellierung des Gebietes vor der Flurbereinigung verglichen.

Im zweiten Fall wird durch den Vergleich unterschiedlicher Flurneuordnungsvarianten gezeigt, dass auch bei einer zeitgemäßen Optimierung der Flächenparzellierung, die für den Wasser- und Stoffrückhalt wesentlichen Strukturen ohne Nachteile für die Bewirtschaftung berücksichtigt werden können.

6.5.1 Konzentrationszeit und Flächenbedarf abflussmindernder Fließpfade

Um den Effekt des Arrangements von Flurstücken auf den Wasser- und Stoffrückhalt bei Starkregen zu illustrieren, wurden schematisch für eine 15 ha große, landwirtschaftliche Fläche (einheitliche Längsneigung 10 % bzw. Querneigung 2 %) unterschiedliche Feldzuschnitte entworfen. Sie unterscheiden sich im Wesentlichen in der Bewirtschaftungsrichtung, in der Art und Weise, wie die Schläge voneinander abgetrennt sind, sowie in den konstruierten und den sich bei Regen natürlicherweise ausbildenden Fließpfaden (▣ Abb. 6.15). Das dargestellte Beispiel und seine Modifikationen sind sehr schematisch. Dies soll den Rechenweg nachvollziehbar machen, den Einfluss der verschiedenen Gestaltungsmöglichkeiten quantifizieren und das Potenzial einer möglichen Abflussverzögerung aufzeigen. Die nachfolgend dargestellten Prinzipien und Möglichkeiten sollen helfen, an die reale Landschaft angepasste Lösungen zu finden.

Die Fließzeiten entlang des längsten, hinsichtlich der Nutzung typischen Fließweges von der Wasserscheide (Punkt X oben links) bis zum Gebietsauslass (unten rechts) wurden mithilfe der GMS-Gleichung (s. ▶ Abschn. 5.3.4) für einen starken Niederschlag, bei dem 30 mm in 30 min abfließen, abgeschätzt und verglichen. Zur zusätzlichen Bewertung der verschiedenen Arrangements werden der Bodenabtrag durch



■ **Abb. 6.15** Vier Varianten der Gliederung einer 15 ha großen Fläche in drei Schläge. Die Breite der Felder wurde auf das Mehrfache einer typischen Maschinenarbeitsbreite von 15 m festgelegt (Ausnahme d). Die obere Flächengrenze entspricht der Wasserscheide. Die Bewirtschaftungsrichtung erfolgt entlang der längeren Seite. Das zu erwartende Fließpfadmuster ist durch blaue Linien schematisch dargestellt, der längste Fließweg vom Punkt X an der Wasserscheide bis zum Gebietsauslass ist mit roten Pfeilen markiert, wobei die einzelnen Abschnitte durch die Großbuchstaben A bis G bezeichnet wurden. Gräben, begrünte Abflussmulden und Wege sind als grüne, grün-schraffierte bzw. graue Linien dargestellt. Die Zufahrten in die Felder sind durch Pfeile gekennzeichnet. Schwarz gestrichelte Linien markieren den Bereich, wo sich der Abflusstyp ändert, also z. B. der Schichtabfluss sich in Rillen und Rinnen bündelt

Erosion nach der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung [55], sowie der mit der Struktur-anreicherung einhergehende Flächenverlust bestimmt. Darüber hinaus wird das Volumen des Wassers ermittelt, dass auf der Fläche, in den Rillen, Rinnen und den Gräben fließt. Dies ist näherungsweise der oberflächliche Retentionsspeicher und hängt ebenfalls vom

Feldlayout ab. Dieser Retentionsspeicher versickert zum Teil nach dem Regen („Nachregen-Infiltration“) und erhöht so die Infiltration; zum größeren Teil fließt dieser Retentionsspeicher nach Regenende langsam ab. Er verursacht den typischen und unproblematischen, lang abfallenden Ast einer Abflusswelle. Je größer die Retention,

6.5 · Flurgliederung und Flächenarrangement

umso langsamer fließt das Wasser, umso mehr infiltriert noch nach dem Regen und umso größer und länger ist auch der abfallende Ast der Abflusswelle, was bedeutet, dass dieses Wasser nicht zum Abflussscheitel beiträgt.

Es wird angenommen, dass die konstruierten Fließwege an beliebiger Stelle und in beliebiger Form angelegt werden können (also unabhängig von Eigentumsverhältnissen oder anderen Einflüssen sind) und nur physikalische Gesetzmäßigkeiten berücksichtigt werden müssen. Darüber hinaus wird davon ausgegangen, dass die entstehenden Fließpfade des Oberflächenabflusses von der Flurgliederung abhängen. Bei langen, in Hauptgefälle ausgerichteten Schlägen (Variante 1 (a) und 2 (b) in [Abb. 6.15](#)) ist zu erwarten, dass sich der Schichtabfluss (Fließabschnitt A) zunächst in Rinnen und Rillen (Fließabschnitt B) und dann in der Hangmulde (Fließabschnitt C) bündelt. Die beiden Feldlayouts unterschieden sich nur darin, dass bei Variante 1 der Hangfuß in einen typischen Wegseitengraben (trapezförmig, geräumt) entwässert (Fließabschnitt D), wohingegen dieser bei Variante 2 durch eine breite und hydraulisch raue begrünte Abflussmulde ersetzt wurde. So lässt sich der Einfluss dieses Entwässerungsabschnittes unabhängig vom restlichen Fließpfad beurteilen.

Bei quer zum Gefälle ausgerichteten und bewirtschafteten Schlägen (Variante 3 (c) und 4 (d) in [Abb. 6.15](#)) ist zu erwarten, dass sich die Fließstrecke des Schichtabflusses

wegen der quer zum Hauptgefälle liegenden Bearbeitungsrauheit etwas verlängert und das (verhältnismäßig schnelle) Fließen in der Hangmulde bei dieser Feldaufteilung entfällt, weil der Abfluss die Schlaggrenze erreicht, bevor er sich bündeln kann. Daraus erwächst ein großes Potenzial zum Bremsen des Abflusses. Ob dieser Effekt in der Praxis genutzt werden kann, hängt im Wesentlichen von der Feldbreite ab bzw. von den Distanzen, nach denen sich Schichtabfluss (Fließabschnitt A) in Rinnen und Rillen bzw. Letztere in Hangmulden bündeln, welche stark von der Rauheit der Oberfläche bestimmt werden (s. [► Anhang 8.2](#)). Zudem ist die konstruktive Gestaltung der Fließwege wichtig. Strukturen wie Ranken, Mulden, flache Wälle oder auch Hecken können als abflussableitende Strukturen gestaltet werden. Erfolgt dies nicht, werden sie bei Starkregen meist schnell überspült und haben keinen Effekt.

Die vier Arrangements unterscheiden sich in ihrem Verhalten erheblich ([► Tab. 6.6](#)). Variante 1 verursacht den höchsten Bodenabtrag und die kürzeste Fließzeit (16,5 min). Durch die Anlage einer begrünten Abflussmulden (Variante 2) kann die Fließzeit bis zum Auslass gegenüber Variante 1 um 19 % erhöht werden. Allerdings wird diese begrünte Abflussmulde wegen des hohen Abtrags in der Fläche und der Verringerung der Fließgeschwindigkeit schnell durch Sediment verfüllt werden.

Bei horizontaler Ausrichtung der Schläge und der Anlage einer konstruierten Wasser-

Tab. 6.6 Veränderungen von (mittlerer) Schlaggröße, Fließzeit, zwischengespeichertem Abflussvolumen und Bodenabtrag für Feldgliederungsvarianten, bei denen unterschiedliche Flächenanteile zur Lenkung des Abflusses vorgesehen und aus der Nutzung genommen wurden

Variante	Schlaggröße	Fließzeit	Fließzeitverlängerung	Speicher-volumen	Abtrags-reduktion	Flächen-bedarf
–	ha	min	%	mm	%	%
1	5,0	16,5	0	3,4	0	0
2	4,9	19,6	19	5,2	0	0,8
3	4,8	23,7	43	7,7	51	3,1
4	4,7	39,5	139	11,4	51	4,6

führung erhöht sich die Fließzeit gegenüber Variante 1 in Variante 3 und 4 um 43 % bzw. 139 % auf 24 min bzw. 40 min. Eine Verlängerung der Fließzeit um 100 % führt am Gebietsauslass zu einer Halbierung des Scheitels der Abflusswelle von kurzzeitigen Intensitätsspitzen. „Kurzzeitige Abflussspitzen“ bedeutet, dass sie kürzer sind als die Fließzeit von 40 min. Nur wenige Gewitterregen haben Intensitätsspitzen, die länger andauern. Zusätzlich wird in Variante 3 und 4 der Bodenabtrag gegenüber Variante 1 bzw. 2 um 50 % reduziert und die Menge an zwischengespeichertem Wasser erhöht sich um das Drei- bis Vierfache. Die Verminderung des Bodenabtrags ist nicht nur aus Gründen des Bodenschutzes wichtig, sondern auch, weil sie die Unterhaltskosten für die Gräben und begrüntem Abflussmulden senkt. Durch Streifenanbau (► Abschn. 4.5.2) ließe sich der Bodenabtrag sogar noch mal halbieren und damit auf 25 % senken.

Durch eine Optimierung der Flurgliederung ergeben sich also sowohl für den Wasser- als auch für den Stoffrückhalt enorme Potenziale. Der „Preis“ dieser Maßnahmen ist der Flächenbedarf für die Erschließung und das Anlegen der GWWs, der gegenüber der ersten Variante um ein bis fünf Prozent steigt. Bei Variante 4 wird die Bewirtschaftung durch schiefe Stöße in zwei der drei Schläge zusätzlich erschwert. Allerdings wird die Bewirtschaftung auch erleichtert, weil die Rinnen als Hindernisse wegfallen. Es ist zu erwarten, dass die Erträge um mindestens so viel steigen, dass sie den Flächenverlust ausgleichen. Das hat zwei Gründe: 1) Den Pflanzen steht durch die Nachregen-Infiltration mehr Wasser zur Verfügung. 2) Die Feldbewirtschaftung kann viel präziser auf die Kulturpflanzenentwicklung abgestimmt werden, weil die größten Bodenunterschiede entlang des Gefälles auftreten und nun nicht mehr in einem einzigen Feld anzutreffen sind.

Die Verlängerung der Fließzeit und die Reduktion des Bodenabtrags resultieren bei horizontaler Ausrichtung (Variante 3 (c) in ■ Abb. 6.15) im Wesentlichen daraus, dass der Fließweg des Schichtabflusses länger wird, weil

die Bearbeitungsspuren ein Bündeln verzögern, und weil der schnelle Hangmuldenabfluss durch die in Gefällerrichtung schmalen Felder weitgehend verhindert wird. Damit das Potenzial zur Abflussverzögerung voll genutzt werden kann, ist es erforderlich, dass der Oberflächenabfluss an den unteren Feldrändern gesammelt und über „bremsend“ gestaltete Fließpfade an den Feldrand und von dort weiter zum Gebietsauslass gelenkt wird. Dazu müssen die horizontalen Fließpfade an den unteren Feldrändern als begrünte, hydraulisch raue Mulde, idealerweise mit einem kleinen, talseitigen Wall angelegt werden. Dies stellt sicher, dass der Abfluss nicht unkontrolliert in das unterhalb liegende Feld gelangt. Der Fließweg sollte darüber hinaus durch eine in Bodennähe dichte Bepflanzung gesichert werden, um die Gefahr eines Durchbrechens zu minimieren. Ähnliches gilt für den Fließabschnitt D von Variante 3 am rechten Feldrand. Er verläuft in Gefällerrichtung und entwässert das komplette Einzugsgebiet. Bei Starkregen werden dort große Abflussmengen mit hoher Geschwindigkeit abgeführt, sodass ein flacher, breiter und hydraulisch rauher Grassed-Waterway zwingend erforderlich wird. Andernfalls kommt es hier zu Erosion. Das Potenzial zum Wasserrückhalt in Variante 4 (■ Abb. 6.15 (d)) wird gegenüber der vorherigen noch deutlich weiter erhöht, da das Wasser über „Umwege“ zum Auslass geleitet wird. Die Fließstrecke ist hier mehr als doppelt so lang wie bei den vorher skizzierten Varianten. Die Planung eines solchen Layouts wird aber durch die gegebenen Randbedingungen (Maschinenarbeitsbreite, Gefällesituation) schnell anspruchsvoll.

Die dargestellten Gliederungsvarianten illustrieren nur einen kleinen Teil der denkbaren Möglichkeiten. Eine weitere Option zur zusätzlichen Förderung des Wasserrückhalts in der Fläche besteht besonders bei Variante 3 und 4 darin, kleine Rückhaltebecken entlang der Fließwege zu platzieren (Skizze in ■ Abb. 6.16). Insbesondere wenn mehrere, in Reihe geschaltete Becken zum Einsatz kommen, ist neben der zeitlichen Verzögerung auch ein Stoff- und Volumenrück-



▣ **Abb. 6.17** Flächenparzellierung um 1960 vor der Flurbereinigung (a) und heute (b) in einem 258 ha großen Landschaftsausschnitt nördlich von Freising bei Zolling. Die Linien kennzeichnen Flurstücksgrenzen (schwarz), Höhenlinien (grau), Wegseitengräben (blau gestrichelt), Rohre (magenta gestrichelt), Gewässer (blau) sowie die Wasserscheide (rot) eines 28 ha großen Teileinzugsgebietes. (Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung)

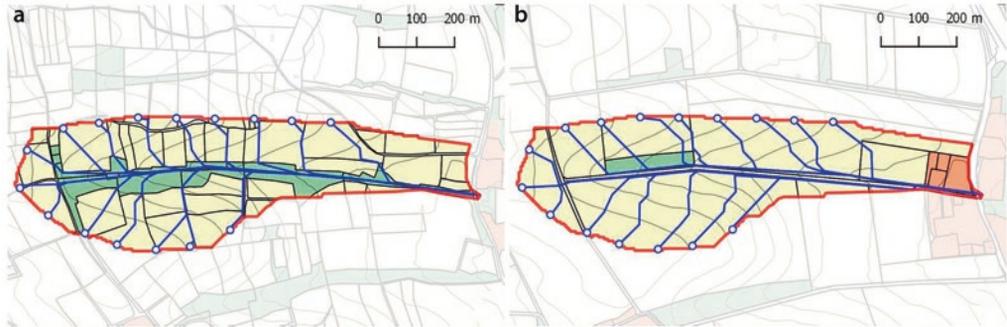
6

Um 1960 entwässerte das komplette Gebiet über Grünland entlang der Tiefenlinie, mit Ausnahme einer kleinen Teilfläche auf der Hangkuppe nahe der Wasserscheide im Westen des Gebietes (▣ Abb. 6.18, links). Die Erschließung der Flur erfolgte damals über Wege auf der Hangkuppe. Durch die Ranken änderten viele Fließpfade stufenartig ihre Richtung. Im Zuge der Flurbereinigung (▣ Abb. 6.18, rechts) wurden die Schläge vergrößert und Straßen und Gräben in die Tiefenlinie verlegt, wodurch die topographisch bedingten Fließpfade vielfach unterbrochen und verändert wurden. Oberflächenabfluss aus dem Teil südlich der mittig in Ost-West Richtung verlaufenden Straße erreicht die Tiefenlinie heute beispielsweise nicht mehr; er wird über einen Wegseitengraben südlich der Straße zum Gebietsauslass hin abgeleitet. Gleiches gilt für den Bereich ganz im Westen, der durch die Straße abgeschnitten ist. Dieser Teil wurde über einen Graben und eine Rohrleitung an den zuvor erwähnten Wegseitengraben angeschlossen. Durch diese Maßnahmen veränderten sich die Entwässerungswege von knapp 2/3 der Einzugsgebietsfläche. Nur Oberflächenabfluss aus dem nördlichen Teil entwässert auch heute noch über die Tiefenlinie bis zum Beginn der Ortschaft.

Im Gegensatz zu früher wird dort heute allerdings der komplette Abfluss über zwei Rohre (DN 600) gefasst und unter der neu entstandenen Siedlungsfläche hindurch auf die andere Seite der Straße geleitet, wo sich der Gebietsauslass befindet.

Der quantitative Vergleich der beiden Zustände zeigt folgende Entwicklungen: Die Fließpfade in den Ackerflächen verlaufen heute direkter als beim historischen Zustand, aber im Grunde nicht wesentlich anders als früher. Mittlere Länge und mittleres Gefälle blieben quasi unverändert. Dagegen nahm der im Grünland verlaufende Fließpfadanteil um rund 70 % ab (84 vs. 15 %). Gleichzeitig verlaufen heute 58 % der betrachteten Fließpfadstrecke in Wegseitengräben oder Rohren. Auf dem Verlauf zwischen Wasserscheide und Tiefenlinie kreuzte jeder Fließpfad früher im Mittel einen Ranken. Heute sind derartige Hindernisse seltene Ausnahmen (▣ Tab. 6.7). Eine Auswertung der Fließzeit von der Wasserscheide ganz im Westen bis zum Gebietsauslass im Osten (längster Fließpfad) mithilfe der Geschwindigkeitsmethode ergab eine mittlere Verkürzung der Fließzeit von 50 auf 35 min (Reduktion um 30 %).

Die Entwicklung hin zu größeren und einheitlicher gestalteten Nutzflächen fand und findet in zahlreichen Naturräumen,



■ **Abb. 6.18** Fließpfade (blaue Linien) zwischen Wasserscheide (rote Linie) und Gebietsauslass um 1960 (a) und heute (b). Die Landnutzung wurde entsprechend der aktuellen bzw. der in der historischen Karte ausgewiesenen Nutzung in Acker (gelb), Grünland (grün) und Siedlungsfläche (orange) unterschieden. Der Verlauf der Fließpfade in den Acker- und Grünlandflächen wurde mit einem Fließpfadalgorithmus aus einem Geländemodell (Rasterweite 5 m) extrahiert und durch Kartierungen im Feld angepasst bzw. validiert. Beim historischen Zustand wurden Feldgrenzen innerhalb der Ackerflächen als Abflussbarriere interpretiert. (Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung)

■ **Tab. 6.7** Quantitative Merkmale der in ■ Abb. 6.18 dargestellten Fließpfade. Die angegebenen Zahlen sind Mittelwerte der 32, in ■ Abb. 6.18 dargestellten Fließpfade

Zeitraum	Mittlere Fließpfadlänge (m)	Mittlere Fließpfad-neigung (%)	Im Grünland verlaufender Anteil (%)	Fließstrecke in Gräben und Rohren (%)	Kreuzende Ranken und Raine
Um 1960	960	3,8	84	0	1,1
Heute	945	3,9	15	58	0,3

national wie international statt [57, 58]. Die Konsequenzen werden bisher vornehmlich unter ökologischen, kulturellen und ästhetischen Gesichtspunkten diskutiert. Wie stark der Einfluss des Strukturverlustes der folgenden Nutzungsänderung und der Anlage künstlicher Entwässerungswege auf Abflussbeschleunigung und Veränderung des Landschaftswasserhaushaltes ist, wurde nur sehr selten quantifiziert. Eine Ausnahme ist aus Nordfrankreich bekannt: Für die dort typischen Wallheckenlandschaften wurde ermittelt, dass in strukturverarmten und vereinheitlichten Landschaften 1,5 bis 2-fach höhere Scheitelabflussraten auftreten als an Standorten mit hoher Dichte linearer und gliedernder Landschaftselemente [59].

6.5.3 Flurneuordnung unter Berücksichtigung abflussverzögernder Strukturen und Maßnahmen

Um zu untersuchen, wie abflussverzögernde Strukturen bei Flurneuordnungsverfahren berücksichtigt werden können, wurde in einem knapp 50 ha großen Gebiet im Tertiärhügelland bei Manholding (■ Abb. 6.19) eine virtuelle Flurneuordnung durchgeführt und mit einem bestehenden Neuordnungsentwurf ohne explizite Berücksichtigung entsprechender Strukturen und Maßnahmen verglichen [60]. Letztere wird im Folgenden als „konventionelle Planung“ bezeichnet.



Abb. 6.19 Flurstücke im Beispielgebiet Manholding vor Durchführung der Flurneuordnung. Die Farben kennzeichnen die Besitzverhältnisse. (Quelle: BBV-LS in [60])

6

Die virtuelle Flurneuordnung berücksichtigte dabei etablierte und standardisierte Verfahrensweisen [61]: Die Einlagefläche wurde analysiert und durch Überlagerung mit den Bodenwertzahlen wurden die Wertverhältnissummen aller Eigentümer ermittelt. Zusätzlich zum üblichen Vorgehen wurden im Vorfeld wichtige hydrologische Prozesse und Fließwege im Gelände erfasst (vgl. ▶ Abschn. 5.3 und ▶ Anhang 8.8). Darauf aufbauend wurden Maßnahmen zum Wasser- und Stoffrückhalt abgeleitet. Bei der Neuverteilung wurden zunächst die Flächen für die gemeinschaftlichen und öffentlichen Anlagen festgelegt. Dies berücksichtigte Wege und alle Flächen für abflussverzögernde Maßnahmen. In den verbleibenden Gewannen wurden dann die Flurstücke der Einlieger platziert, indem die aus den Wertverhältnissummen resultierenden Ansprüche mit möglichst wenig Flurstücken abgegolten wurden (der Gebietsabzug wurde prozentual zur Einlagewertverhältniszahl berücksichtigt). Alle üblichen Aspekte wie bestehende Flurzwänge, die Entfernung der Flächen von der Hofstelle oder dass Eigentümer mit wenig Fläche (nur ein Abfindungsflurstück) gut zugeschnittene Flächen erhalten, gingen in die Neuverteilung ein. Für den neuen, virtuellen Planungsentwurf und die konzeptionelle Planung wurden die Fließzeiten von der

Wasserscheide bis zum Gebietsauslass nach der Geschwindigkeitsmethode abgeschätzt und übliche Kenngrößen wie Flurstücksgröße und Zusammenlegungsverhältnis erhoben und gegenübergestellt.

Im Detail wurden im virtuellen Planungsentwurf unterschiedliche Maßnahmen zur Förderung des Wasser- und Stoffrückhalts berücksichtigt (Abb. 6.20 links): Beispielsweise wurde der von Manholding nach Süden führende Erschließungsweg von der Senke (konventionelle Planung) auf einen Höhenrücken gelegt. Dies sollte den Einfluss der Verkehrsfläche auf die Gebietsentwässerung minimieren. Weitere strukturelle Maßnahmen umfassten die Anlage einer begrünter Abflussmulde unmittelbar westlich der Straße in der südlichen Tiefenlinie des Gebietes, die Umwandlung von drei Fischweihern in kleine Rückhaltebecken sowie die Anlage von zwei Terrassenstufen. Zur Förderung der hangparallelen Bewirtschaftung wurden auf den südlichen Teilflächen ausschließlich längliche Flurstücksformen ausgewiesen. Lediglich im Bereich der begrünter Abflussmulde resultierten einige wenige, geometrisch ungünstig geformte Flurstücke. Auch die Entstehung von Ackerrandfurchen in Gefälgerichtung ließ sich bei diesem Planungsentwurf nicht vollständig verhindern. Im Wesentlichen sind die Flächen des resultierenden Entwurfes jedoch nicht ungünstiger geschnitten oder verortet als die der konventionellen Entwurfsplanung (Abb. 6.20, rechts). Die mittlere Flurstückfläche ist in der abflussverzögernden Variante sogar größer und die Zahl der Flurstücke geringer als bei der konventionellen Planung. Da die resultierenden Schlaglängen zwischen 400 und 550 m liegen, ist davon auszugehen, dass die Flächenzuschnitte der abflussverzögernden Planung auch unter arbeits- und betriebswirtschaftlichen Gesichtspunkten mit der konventionellen Planung konkurrieren können (betriebswirtschaftlich werden die größten Einsparungspotenziale bei Schlaglängen bis zu von 400 m und Schlaggrößen von 5 ha erreicht [62]).



■ **Abb. 6.20** Entwurfsplanungen zur Flächenparzellierungen eines Landschaftsausschnitts im Tertiärhügelland. Die Farben markieren die verschiedenen Besitzverhältnisse. Die linke Variante (a) berücksichtigt Aspekte und Maßnahmen zum Wasser- und Stoffrückhalt. Die rechte (b) zeigt die konventionelle Planung, ohne explizite Berücksichtigung dieser Aspekte. Im virtuellen Entwurf berücksichtigte Maßnahmen zum Wasserrückhalt sind die hangparallele Ausrichtung der Felder, drei Rückhaltebecken (grüne Ovale), eine begrünte Abflussmulde (dunkelgrüner, mittig von unten zum mittleren Rückhaltebecken verlaufender Linienzug), aufgeweitete Entwässerungsgräben (kurze, dunkelgrüne Linienzüge im Talweg) sowie zwei Terrassenstufen im Süden des Gebietes (dunkelrote Linien). Die blauen Linien in der rechten Tafel zeigen den Verlauf der Wasserscheide. (Verändert nach [60])

■ **Tab. 6.8** Kenngrößen der unterschiedlichen Flurbereinigungsplanungen in ■ Abb. 6.19 und 6.20

	Flurstücke	Mittlere Größe	Verkehrsfläche	Fläche für abflussverzögernde Maßnahmen	Gebietsabzug	Flächenzuschnitt
	–	ha	m ²	ha	%	–
Ausgangszustand	65	0,7	1918	0	–	–
Konventionelle Planung	25	1,8	8634	0	1,5	+
Abflussverzögernde Planung	22	2,0	5640	1,5	4,0	o

Die mittlere Fließzeit nahm dagegen gegenüber der konventionellen Planung bei etwa 10-jährlichen Starkregenereignissen um rund 80 % zu. Bei extremen, >100-jährlichen Ereignissen betrug die Zunahme immer noch etwa 66 % (■ Tab. 6.8). Der „Preis“ der Maßnahmen zum Wasser- und Stoffrückhalt ist ein gegenüber der konventionellen Planung um 2,5 % erhöhter Flächenbedarf, der sich im Gebietsabzug entsprechend widerspiegelt.

Die Fallstudie zeigt, dass durch wenige zusätzliche Flurelemente ein erheblicher Beitrag zum Wasser- und Stoffrückhalt geleistet

werden kann. Trotz zusätzlicher Randbedingungen konnten identische Flurstückzahlen, -größen und Zusammenlegungsverhältnisse erzielt werden wie bei einer konventionellen Planung. Davon ausgenommen war lediglich ein einziges, an die begrünte Mulde grenzendes Flurstück. Der Flurneueordnung kommt daher eine fundamentale Bedeutung im Hinblick auf die langfristige Etablierung hochwassermindernder Abflussnetze in der Landschaft zu. Ähnliche Fallstudien [z. B. 63, 64] sind jedoch rar und oft nur spärlich in der grauen Literatur dokumentiert und somit kaum auffindbar.

6.6 Abflussgeschwindigkeit in Gräben und Rohren

Gräben zur Wasserführung, Wegeentwässerung oder Drainage beschleunigen normalerweise den Abfluss und verschärfen damit die Gebietsentwässerung. Fallbeispiele dazu sind unter anderem aus einem 900 ha großen Einzugsgebiet in Frankreich bekannt, wo der Scheitelabfluss durch ein Grabensystem um bis zu 40 % zugenommen hat [65]. Noch stärker beschleunigend wirken hydraulisch glatte Rohre. Prinzipiell haben Gräben jedoch auch das Potenzial zum Bremsen, vor allem, wenn dadurch der Fließweg länger und die Sohlneigung geringer wird, wie zum Beispiel bei einer Terrassierung des Geländes. Gräben sind daher, trotz ihres geringen Flächenanteils, oft von hoher Bedeutung für den Wasserhaushalt und die Entwässerung einer Landschaft [66].

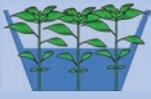
Wirkung verschiedener Gerinntypen

Die Abflussgeschwindigkeit verschiedener Gerinntypen für typische, in Einzugsgebieten <100 ha auftretende Bedingungen illustrieren Vergleichsrechnungen mit der GMS-Gleichung (► Gl. 5.5). In allen Fällen wurden einheitliche Bedingungen (Fließweglänge = 2000 m, Gefälle = 1,5 %, Abflussrate = $1 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$) angenommen. Nur Gerinneform, -querschnitt und -rauheit wurden verändert (► Tab. 6.9). Die Auswertung zeigt, dass eine moderate Grabenaufweitung in Kombination mit einer Verkräutung den Abfluss gegenüber einem geräumten Graben um 30 % verzögert. Eine flache, verkräutete Mulde verzögert um 62 %, während eine Verrohrung den Abfluss um 40 % beschleunigt. Diese Ergebnisse gelten nur für den stationären Fall (d. h. der Abfluss fließt lange Zeit mit gleicher Rate), da Benetzungs- und Retentionseffekte nicht berücksichtigt wurden. Die tatsächliche Wirkung

von Aufweitung und dem Tolerieren von Bewuchs auf die Abflussverzögerung ist sogar noch größer, da raue und breite Gräben mehr Wasser zurückhalten können. Dieser Effekt gilt insbesondere für kurze, schauerartige Starkregen, deren Dauer unter 1 h und damit in der Größenordnung der typischen Konzentrationszeit kleiner Einzugsgebiete liegt. Der Effekt wird durch trockene Vorbedingungen noch verstärkt. Dadurch lassen eine Grabenaufweitung und das Tolerieren von Bewuchs einen besonders hohen Effekt auf die Abflussminderung bei kurzen, schauerartigen Starkregen in kleinen Einzugsgebieten erwarten.

Der Vergleich verschiedener Gerinntypen legt nahe, dass sich die Fließgeschwindigkeiten auf etwa der Hälfte aller Fließpfade in der landwirtschaftlichen Flur um rund 60 % beschleunigt haben, weil die Entwässerung, die früher weitgehend über Grünlandzüge in Hangmulden (breite, begrünte Mulde) erfolgte, heute durch geräumte und dadurch effektive Wegseitengräben mit Regelprofil ersetzt wurde (vgl. auch ► Abschn. 6.5.2 und ► Kap. 7). Bei Wegseitengräben in steilem Gelände, insbesondere für hangseitige Gräben bei Forststraßen kommt noch ein weiterer Effekt hinzu: Dadurch, dass sich Gräben hier tief ins Bodenprofil einschneiden, erschließen sie auch den Bereich, in dem Zwischenabfluss fließt, und machen aus ihm Oberflächenabfluss [67]. Der Effekt ist in ► Abb. 8.17 illustriert und vor allem für Wälder auf steilen Standorten relevant. Die abflussdämpfende Wirkung beruht dort weniger auf hohen Versickerungsraten, sondern darauf, dass ein Großteil des nicht tief versickernden Wassers als Zwischenabfluss auf einem der im Wald zahlreichen Bodenhorizonte abgeleitet wird. Dieser Zwischenabfluss fließt immer langsamer als Oberflächenabfluss und führt zu der bekannten langen Verzögerung des Abflusses

Tab. 6.9 Gegenüberstellung von (stationärer) Fließgeschwindigkeit und Fließzeit verschiedener Gerinnegeometrien und Rauheiten bei einheitlicher Neigung von 1,5 %, Abflussrate von 1000 l s^{-1} und einer Fließstrecke von 2000 m. Die Werte wurden anhand der GMS-Gleichung (► Gl. 5.5), Rauheitswerten aus Tab. 5.1 und den unter 8.2.6 beschriebenen Zusammenhängen zur Ermittlung von hydraulischem Radius und Querschnittsfläche ermittelt

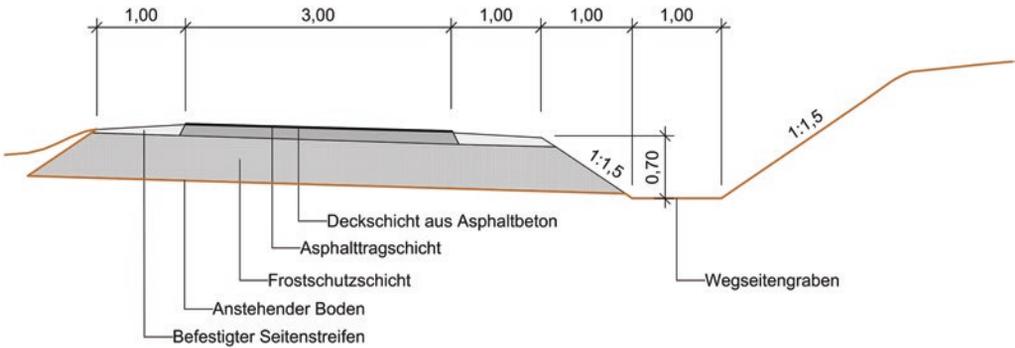
Gerinnetyp/Eigenschaften				
Rauheit $k \text{ (m}^{1/3} \text{ s}^{-1}\text{)}$	35	67	25	25
Sohlbreite (m)	0,3	–	1	–
Böschungsneigung (–)	1	–	1	~0,05
Wasserspiegelbreite (m)	1,5	0,69	2,0	4
Fließtiefe (cm)	60,9	52,7	48,6	33,6
Sohlbreite/Rohrdurchmesser (m)	0,3	0,75	1	–
Lichte Grabenöffnungsweite bei einer Gerinnetiefe von 0,7 m (m)	1,7	–	2,4	4,3
Hydraulischer Radius (m)	0,27	0,22	0,30	0,22
$v \text{ (m s}^{-1}\text{)}$	1,8	3,0	1,4	1,1
Fließzeit für 2 km (min)	18	11	24	30
Fließzeit (%)	100	–40	+30	+62

im Wald. Durch Wegseitengräben im steilen Gelände besteht das Risiko, diesen Zwischenabfluss aufzufangen und rasch abzuleiten. (Steile) Wälder können dann ähnlich schnell liefern wie landwirtschaftliche Flächen.

Ist ein Graben erforderlich, sollte dieser aus hydrologischer Perspektive grundsätzlich breit und flach sowie hydraulisch rau angelegt werden. Konkret wird eine Sohlbreite von wenigstens 1 m und eine Böschungsneigung von 1:1,5 empfohlen (► Abb. 6.21). (Zum Vergleich: In der Richtlinie für die Anlage und Dimensionierung Ländlicher Wege [62] wird eine Sohlbreite von 0,3 m empfohlen.) Wenn Gräben größere Einzugsgebiete entwässern (>20 ha), sollte die Sohle bis auf 1,5 m verbreitert werden, da andernfalls bei Starkregen ein Überlaufen zu erwarten ist. Rauheit ist am einfachsten durch das Tolerieren von Bewuchs erreichbar. Entsprechend sollte ein Unterhalt von Wegseitengräben ausschließlich bei

Bedarf, z. B. bei größerem Gehölzaufwuchs oder der Gefahr von Verklausungen und keinesfalls vorsorglich erfolgen. Ist im Rahmen des Unterhalts, zum Beispiel zum Erreichen der erforderlichen Grabentiefe, ein schälendes Werkzeug wie eine Humusschaufel erforderlich, sollten zu Beginn der Arbeiten Grassoden abgetragen und nach der Räumung, zumindest abschnittsweise, wieder auf die glatte Oberfläche aufgebracht werden. Dies fördert einen schnelleren Aufwuchs und reduziert das Erosionsrisiko. Eine entsprechende Verbreiterung der Sohle mindert darüber hinaus nicht nur die Abflussgeschwindigkeit bei Starkregen, sondern fördert auch den Wasserrückhalt bei kleinen und mittleren Niederschlägen.

Diese Empfehlungen beruhen auf hydraulischen Vergleichsrechnungen, bei denen der Effekt von Aufweitung und Bewuchs auf die Fließgeschwindigkeit in einem Wegseitengraben für verschiedene Grabenquer-

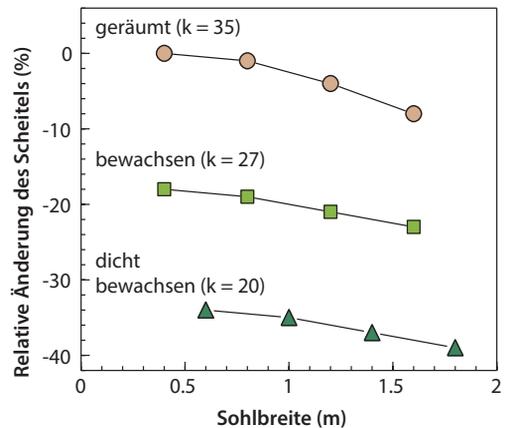


■ **Abb. 6.21** Regelquerschnitt eines Wegs mit Wegseitengraben mit einer auf 1 m verbreiterten Sohle. (Quelle: Ingenieurbüro Lenz)

6

schnitte und Rauheiten bei identischen Abflüssen verglichen wurde. Als Referenz dient ein typischer geräumter Graben mit einer Sohlbreite von 0,3 m, einer Böschungsneigung von 1:1,5 (Höhe:Breite) und einer Tiefe von 0,7 m, wie er von der Richtlinie für die Anlage und Dimensionierung Ländlicher Wege (RLW) empfohlen wird [69]. Ausgehend davon reduziert sich bei einer Verdoppelung der Öffnungsweite von 2,4 auf 4,8 m (z. B. durch eine Sohlbreite von 2,8 m und gleicher Böschungsneigung) die Fließgeschwindigkeit (und damit der Scheitelabfluss) um knapp 20 %. Ob die Öffnungsweite durch eine flachere Böschung oder durch eine breitere Sohle verbreitert wird, ist weitgehend irrelevant. Der hydraulische Radius reduziert sich in beiden Fällen von etwa 0,26 (typische Verhältnisse) auf 0,19 m (sehr breiter Graben). Wird die Grabensohle von 0,3 m auf 1 m verbreitert, ergibt sich bei gleicher Tiefe und Böschungsneigung eine Öffnungsweite von 3,1 m. Dadurch steigt der Platzbedarf des Grabens um knapp 20 %, die Fließgeschwindigkeit vermindert sich allerdings nur geringfügig im niedrigen einstelligen Prozentbereich (■ **Abb. 6.22**, „geräumter Graben“). Dennoch kann mit einer solchen Verbreiterung der Abfluss gebremst werden, wenn parallel dazu die Rauheit (stark) erhöht wird, wozu bei einer 1 m breiten Sohle bereits genug Platz vorhanden wäre. Werden typische Rauheitsbeiwerte für stark verkrautete

Bäche und Fließgewässer angesetzt, ist eine Verzögerung des Abflusses von etwa 20 % zu erwarten. Werden Rauheitsbeiwerte sehr rauher Standorte (z. B. Sukzessionsflächen oder Hochstaudenfluren) angesetzt, sind sogar Verzögerungen von 35–40 % möglich (■ **Abb. 6.22**, „bewachsen“ und „dicht bewachsen“). Die zusätzliche Verstärkung des Effekts durch eine Zunahme der Retention ist dabei noch nicht



■ **Abb. 6.22** Relative Reduktion des Abflussscheitels durch einen Graben bei unterschiedlicher Sohlbreite und Rauheit für eine einheitliche Abflussrate von 800 l s^{-1} . In allen Fällen wurden trapezförmige Abflussquerschnitte (Böschungsneigung 1:1,5) und eine Grabentiefe von 0,7 m angenommen. Die Grabengesamtbreite nimmt von links nach rechts von etwa 2,5 auf 4 m zu

berücksichtigt. Ein dichter Bewuchs ist daher essenziell, da für eine (deutliche) Aufweitung von Gräben nur in den seltensten Fällen Flächen verfügbar sind. Gleichzeitig lässt sich ein dichter Bewuchs bei breiten Gräben leichter etablieren und managen, sodass beide Einflüsse Hand in Hand gehen. Bei ausreichender Flächenverfügbarkeit sollte eine Aufweitung des Grabens >5 m, ggf. auch in Kombination mit unterschiedlichen Böschungsneigungen erwogen werden.

Um die Bedeutung von Wegseitengräben für die Entwässerung eines Gebietes zu beurteilen, werden Verlauf und Eigenschaften des Grabennetzwerks und die Einzugsgebiete der Gräben benötigt. Für hydraulische Berechnungen sind zusätzlich Querschnittsgeometrie, Gefälle und Rauheit wichtig. Gräben können teilweise auch digital aus dem Verlauf ländlicher Wege und hochauflösender Geländemodelle abgeleitet werden [70]. Es ist zusätzlich jedoch fast immer eine Geländebegehung notwendig, da hochaufgelöste Daten meist durch Artefakte behaftet sind, z. B. durch Abschattungen oder Verrohrungen, und da Informationen über Querprofile gegenwärtig grundsätzlich nur im Gelände ermittelt werden können.

Fehlen Querschnitts- und Profildaten, gibt die Richtlinie zur Anlage und Dimensionierung ländlicher Wege (RLW) [62] Hinweise auf typische Größen. Die Gestalt von Gräben weicht in der Praxis allerdings häufig stark von den Empfehlungen der Richtlinie ab. Letztere gibt vor, dass zur Entwässerung ländlicher Verbindungs- und Hauptwirtschaftswege, unabhängig vom Einzugsgebiet, ein Wegseitengraben anzulegen ist. Übliche Dimensionierungsvorgaben der trapezförmigen Regelprofile sind: Sohlbreite 30 cm, Böschungsneigung Höhe:Breite $\leq 1:1,5$, Tiefe 60–70 cm je nach Hangneigung und Stärke von Planum und Wegekörper. Zusätzlich gibt die RLW vor, dass Wegseitengräben zu begrünen sind, um sie vor Erosion zu schützen. Mulden werden nur in Ausnahmefällen konstruiert. Typische Abflussraten trapezförmiger Gräben mit Regelprofil betragen bei flachem Terrain

(Gefälle 1 %) etwa $0,8 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$. Bei steilem (Gefälle 5 %) erhöht sich die maximale Abflussrate auf etwa $1,6 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, bevor es zu einem Überlaufen kommt.

■ Praxisbeispiel

Abflussverzögernde Maßnahmen an Gräben können sehr vielfältig umgesetzt werden, wobei die angrenzende Topographie und Flächenverfügbarkeit meist die wesentlichen Randbedingungen vorgeben. Die Wirkung von Gräben auf die Abflussgeschwindigkeit wird hier an einem Praxisbeispiel illustriert. Ein weiteres, ausführliches Rechenbeispiel zum Einfluss von Gräben auf die Gebietsentwässerung in der Gemeinde Birnbach gibt ▶ Kap. 7.

Hier wird eine kleine, bereits umgesetzte Maßnahme aus einem bodenständig-Projekt in der Gemeinde Teugn im Landkreis Kehlheim in Bayern skizziert. Anlass waren wiederkehrende Abfluss- und Erosionsprobleme, da Siedlungsflächen in wassersensible Bereiche wie Unterhänge und Talauen expandiert hatten, das oberhalb liegende Einzugsgebiet (Hangneigungen 5–15 %) zu ca. 70 % ackerbaulich genutzt wird (Maisanteil ca. 30 %) und ein zentraler Entwässerungsweg der Fläche durch die südöstlichen Ortsrandlagen führte. Die im Folgenden dargestellte Grabenaufweitung ist nur eine von mehreren Maßnahmen zur Abflussminderung im Gebiet.

Der bestehende Graben hatte eine durchschnittliche Breite 4 m, ein Gefälle von 5 % und eine Länge von rund 500 m. Er lag unmittelbar oberhalb der Ortschaft und war Bestandteil des Fließpfades, über den die Fläche entwässerte (▶ Abb. 6.23, links). Eine Berechnung mit der GMS-Gleichung (Rauheitsbeiwert $= 30 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$) ergab, dass bei einem Gebietsniederschlag von 75 mm im bestehenden Graben mit einer (enormen) Fließgeschwindigkeit von $3,3 \text{ m s}^{-1}$ zu rechnen ist. Dividiert man die 500 m Grabenstrecke durch die Fließgeschwindigkeit, ergibt sich eine Fließzeit von nur 2,5 min.



▣ **Abb. 6.23** Dargestellt sind die Fließpfade des Oberflächenabflusses in einem Teileinzugsgebiet der Gemeinde Teugn (a). Die Pfade wurden aus einem hochauflösenden Geländemodell (Rasterweite 1 m) mit einem Fließpfadalgorithmus extrahiert. Die Breite der Linie ist relativ zu ihrer Einzugsgebietsgröße skaliert. Die rote Box markiert die Lage der Grabenaufweitung. Das Schrägluftbild (b) zeigt die umgesetzte Maßnahme mit Blick auf die Ortschaft; es wurde von einer Drohne von der Stelle aus aufgenommen, die im Bild links mit dem schwarzen Dreieck markiert ist. (Quelle: [71])

Zur Geschwindigkeitsminderung wurde die Sohle des bestehenden Grabens um 2 m verbreitert und durch Tolerieren von Bewuchs eine raue Oberfläche geschaffen. Zusätzlich konnte im unteren Drittel des Grabens ein 150 m langer, 20 m breiter Ackerrandstreifen als Ausuferungsmöglichkeit angelegt werden. Um die Ausuferung zu fördern, wurden innerhalb des Ackerrandstreifens flache (bewirtschaftbare) Querdämme modelliert (▣ Abb. 6.23, rechts). Während der Ackerrandstreifen Privateigentum blieb, wurde für die Grabenverbreiterung Grund erworben. Durch die erhöhte Rauheit (Annahme: $k = 25 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$) und den breiteren Fließquerschnitt reduzierte sich die Fließgeschwindigkeit im Graben rechnerisch auf etwa $2,6 \text{ m s}^{-1}$, wodurch die Fließzeit im Graben um rund 30 % auf 3,2 min steigt. Da der Grabenabschnitt – ausgehend von der Wasserscheide – nur einen kleinen Teil des gesamten Fließwegs einnimmt, ist die

Wirkung auf die Gesamtfließzeit und damit auch auf die Reduktion des Abflussscheitels gering, aber in Kombination mit weiteren abflussmindernden Maßnahmen (nicht dargestellt) wurde für das betrachtete Teileinzugsgebiet von einer Scheitelreduktion von 20 % ausgegangen [71].

6.7 Wege- und Wasserführung

Wege sind Bestandteil der technischen Infrastruktur mit grundlegender Funktion für den ländlichen Raum. Sie prägen die Kulturlandschaft und lassen sich nicht vermeiden. Verlauf und konstruktive Gestaltung des Wegenetzes sowie die Anlage und Ausführung von Wegseitengräben beeinflussen den Landschaftswasserhaushalt oft tiefgreifend und – durch ihre hohe Lebensdauer – über sehr lange Zeiträume. Die Konzeption und Anlage ländlicher Wege ist daher nicht nur eine bedeutsame Aufgabe der ländlichen

6.7 · Wege- und Wasserführung

Entwicklung, die rund drei Viertel aller ländlichen Wege, oft in Zusammenhang mit Flurneuordnungen anlegt [64], sie beeinflusst auch dauerhaft den Wasser- und Stoffhaushalt der Landschaft. Die Einflüsse des Wegebaus auf den Wasserhaushalt erfordern daher ein besonderes Augenmerk. Wesentliche Einflussgrößen sind die konstruktive Bauausführung von Wegen und Wegseitengräben und die Trassenwahl. Die Bauausführung beeinflusst vor allem, wie viel Abfluss auf befestigten Flächen entsteht, der Wegverlauf prägt die Ableitung von Wasser durch die Landschaft. Das gilt insbesondere für Gebiete mit hoher Dichte an Wegen und Wegseitengräben und für Oberflächenabfluss bei Starkregen.

Aufgrund der Vielzahl von Wegetypen und -verläufen und der großen Variation konstruktiver Aspekte [72] sind die Möglichkeiten, den Wasserrückhalt in der Fläche durch Aspekte des Wegebaus zu fördern, vielfältig und oft auch fallspezifisch. Im Folgenden wird nur der Einfluss der Wegbefestigung auf die Abflussbildung quantitativ dargestellt. Ansätze zur Beeinflussung der Wasserführung werden nur allgemein beschrieben bzw. in Abhängigkeit vom Wegeverlauf im ► Anhang 8.7 qualitativ skizziert.

Je nach konstruktiver Ausgestaltung der Fahrbahn (s. a. ■ Abb. 6.24) variieren die Abflussbeiwerte um den Faktor vier (■ Tab. 6.10). Die Werte gelten aber offensichtlich nur für kleinere und evtl. mittlere



■ **Abb. 6.24** Zu den Wegetypen, die sich günstiger auf den Wasserhaushalt auswirken als durchgehend asphaltierte Fahrbahnen, zählen Wege mit wassergebundener Tragdeckschicht (Schotterwege) (a), Pflaster spurwege (b) und Grünwege (c). Bei wenig befahrenen Schotterwegen (d) „begrünt“ sich der Mittelstreifen oft von selbst. Das Bild zeigt deutlich die Vernässung in der Hangmulde, die häufig als Begründung für eine Wegbefestigung genannt wird. Die Vernässung ließe sich einfach vermeiden, indem der Weg auf einem kleinen Damm geführt und hinter dem Damm ein Retentionsbecken geschaffen würde. (Bildquellen: a, b und c: Peter Pfarr, d: Karl Auerswald)

■ Tab. 6.10 Mittlere Abflussbeiwerte für unterschiedliche Wegoberflächen

Befestigungsart	Mittlerer Abflussbeiwert [nach 45]	Abflussbeiwert bei Starkregen
Asphalt, fugenloser Beton	0,90	0,98
Pflaster mit dichten Fugen	0,75	0,95
fester Kiesbelag (wassergebundene Decken)	0,60	0,92
Pflaster mit offenen Fugen	0,50	0,90
lockerer Kiesbelag, Schotterrasen	0,30	0,86
Verbundsteine mit Fugen, Sickersteine	0,25	0,85
Rasengittersteine	0,15	0,83 (Bodengruppe D: 0,88)

6

Regen, sind aber auf Starkregen nicht anwendbar, da sie deutlich niedriger sind als die Endabflussbeiwerte selbst von Wald (vgl. ■ Tab. 8.12). Für Starkregen wurden daher die Werte um den Betrag $(1 - \text{Mittel}) \times 0,8$ erhöht. Rasengittersteine entsprechen dann etwa Reihenkulturen, was ihre Abflussneigung bei Starkregen vermutlich immer noch unterschätzt.

Mögliche Ansatzpunkte zur Förderung des Wasserrückhalts bestehen daher einerseits darin, eine Fahrbahndecke mit kleinem Abflussbeiwert zu wählen – der Effekt bei Starkregen ist aber klein. Die zweite Maßnahme ist, die versiegelte Fläche zu vermindern, indem nur Spurwege angelegt werden. Bei den für Wirtschaftswege üblichen Dimensionen (Fahrbahnbreite 3 m bzw. Zwischenstreifenbreite bei Spurwegen 0,9 m) [62] reduziert sich die versiegelte Fläche durch die Beschränkung des Weges auf die Fahrspuren um 30 % und etwa ebenso das Abflussvolumen. Für ein Einzugsgebiet mit einer Fläche von 100 ha ließe sich durch die konsequente Anlage von Spurwegen mit Verbundsteinen bei einer mittleren Wegenetzdichte von rund 60 m ha^{-1} [73] bei einer Niederschlagshöhe von 50 mm ein Abflussvolumen von rund 70 m^3 in der Fläche zurückhalten. Etwa ebenso groß wäre die Abflussminderung, wenn statt der Verbund-

steine eine Kiesdecke verwendet würde. Kombiniert man Spurweg und Kies, steigt die Verminderung auf 120 m^3 .

Um den Wasserrückhalt in der Fläche zu fördern und den Abfluss zu verzögern, gelten für das Wegenetz folgende allgemeine Empfehlungen. Eine detailliertere (qualitative) Beschreibung von Ansatzpunkten für unterschiedliche Wegverläufe kann ► Anhang 8.7 entnommen werden:

- Die Länge (Dichte) des Wegenetzes und die Wegbreite sollten so gering wie möglich sein, da sich der Oberflächenabfluss proportional zur Vergrößerung des versiegelten Flächenanteils erhöht [74]. Dieser Effekt ist auch für Waldgebiete nachgewiesen und dort von größerer Bedeutung als die Bestandszusammensetzung [67].
- Natürliche, topographisch bedingte Entwässerungswege dürfen durch die Anlage von Wegen und Wegseitengräben nicht verkürzt (z. B. durch Verrohrungen oder Begradigung) oder in ihrer abflussabführenden Wirkung verstärkt werden (z. B. durch die Anlage von Wegen oder Gräben in der Tiefenlinie).
- Das Sammeln und konzentrierte Ableiten von Abfluss erfordert Sicherungsmaßnahmen unterhalb, z. B. begrünte Abflussmulden.

Wege und Wegseitengraben können auch als Abflusshindernis eingesetzt werden. Dazu sollten Wege möglichst senkrecht zur Hauptgefällerrichtung angelegt werden, da hierdurch die hydraulisch wirksame Hanglänge verkürzt wird. Je größer die Anzahl hanggliedernder Strukturen, d. h. je kürzer der Hang, desto mehr Möglichkeiten gibt es, die Fließgeschwindigkeit zu reduzieren und die Fließstrecke zu verlängern bzw. hochwassermindernde Abflusswegen in der Fläche zu etablieren. Wege, die parallel zu den Höhenlinien verlaufende Wege verbinden, sollten auf Höhenrücken (d. h. entlang der topographischen Wasserscheide) liegen, da das Einzugsgebiet dann klein und die Bedeutung des Weges für die Gebietsentwässerung gering ist [9, 75]. Bei Umsetzung dieser Prinzipien resultieren lange, hangparallele und arbeits- wie betriebswirtschaftlich günstig geschnittene Flurstücke [62], die in der Landschaft jedoch bis heute wenig verbreitet sind.

Da Hänge immer gemuldet sind, die Wege aber gerade geführt werden, um eine gerade Bewirtschaftung zu ermöglichen, durchschneiden diese Wege die Hangmulden. Das schafft die Möglichkeit, viele kleine Retentionsbecken mit gedrosseltem Auslauf anzulegen. Dazu werden die Wege in den Hangmulden etwas angehoben, wodurch dahinter ein Retentionsbecken entsteht (Abb. 6.25, Abb. 8.19). Das erleichtert und verbessert auch die Befahrbarkeit, da weniger Neigungen entlang des Weges auftreten und da der Weg oberhalb der nassen Hangmulde bleibt und damit rasch abtrocknet. Der gedrosselte Auslauf stellt sicher, dass der Weg nicht durchweicht und die landwirtschaftliche Nutzung im Becken weiterhin möglich bleibt, weil es innerhalb von wenigen Tagen wieder auslaufen kann. Da Abfluss spätestens am Auslauf konzentriert wird, muss er idealerweise in einer begrünten Abflussmulde weitergeführt werden (linke Becken in Abb. 6.25), oder – weit ungünstiger – durch Verrohrung (siehe gestrichelte Linie der rechten Becken in Abb. 6.25).

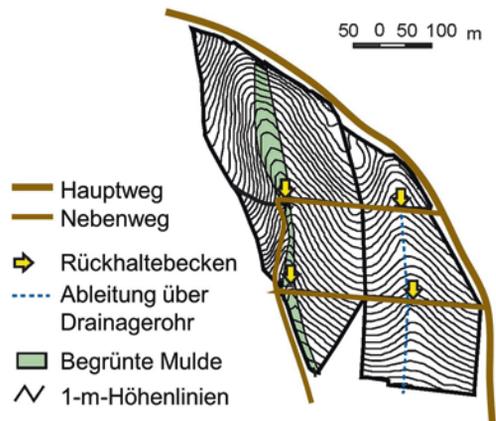


Abb. 6.25 Die Anlage von Wirtschaftswegen quer zum Hauptgefälle (höchster Punkt ist in der Zeichnung oben) verkürzt die Abflusswegen und erlaubt durch Erhöhung des Fahrwegs in den Tiefenlinien, die Befahrbarkeit bei nassen Verhältnissen zu verbessern und gleichzeitig dahinter Retentionsbecken zu schaffen. (Nach [49], verändert)

Literatur

1. Brandhuber R, Treisch M, Fischer F et al (2017) Starkregen, Bodenerosion, Sturzfluten. Schriften Bayer Landesanst Landwirtsch 2: Freising
2. Kainz M (1989) Runoff, erosion and sugar beet yields in conventional and mulched cultivation. *Soil Technol Ser* 1:103–114
3. Renard KG, Yoder DC, Lightle DT, Dabney SM (2011) Universal soil loss equation and revised universal soil loss equation. In: Morgan RPC, Nearing MA (Hrsg) 137–167, Blackwell, Oxford
4. Fröba N, Brunotte J, Mosimann T et al (2015) Gute fachliche Praxis. Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz, aid Infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz, Bonn
5. Auerswald K, Albrecht H, Kainz M, Pfadenhauer J (2000) Principles of sustainable land-use systems developed and evaluated by the Munich Research Alliance on Agro-Ecosystems (FAM). *Petermanns Geogr Mitt* 144:16–25
6. Natural Resources Conservation Service (2004) Estimation of direct runoff from storm rainfall. In: *National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology, chapter 10.* United States Department of Agriculture, Washington
7. Fiener P, Wilken F, Auerswald K (2019) Filling the gap between plot and landscape scale – eight years of soil erosion monitoring in 14 adjacent watersheds under soil conservation at Scheyern,

- Southern Germany. *Adv Geosci* 48:31–48. [▶ https://doi.org/10.5194/adgeo-48-31-2019](https://doi.org/10.5194/adgeo-48-31-2019)
8. Mosimann T, Sanders S, Brunotte J (2007) Erosionsminderung in Fahrgassen – Wirkung der Intervallbegrünung in Weizen und Zuckerrüben bei verschiedenen Bodenbearbeitungsverfahren. *Pflanzenbauwissenschaften* 11:57–66
 9. Bronstert A, Seiert S, Oberholzer G (1993) Maßnahmen der Flurbereinigung und ihre Wirkung auf das Abflussverhalten ländlicher Gebiete. *Schriftenr Landesamt Flurneuord Landent Baden-Württemberg 3: Kornwestheim*
 10. Natural Resources Conservation Service (2018) Contour farming (Code 330). Conservation Practice Standard. US Department of Agriculture, Washington
 11. Auerswald K (1992) Verfeinerte Bewertung von Erosionsschutzmaßnahmen unter deutschen Anbaubedingungen mit dem P-Faktor der Allgemeinen Bodenabtragsgleichung (ABAG). *Z Kulturtechnik Landentwick* 33:137–144
 12. Demmel M, Kirchmeier H, Blumenthal B et al (2016) Streifenbodenbearbeitung vor Zuckerrüben und Körnermais. *Schriftenr Bayer Landesanst Landwirtsch 3: Freising*
 13. Kornmann M, Schmidt W, Müller E (2006) Umsetzung erosionsmindernder und hochwasserreduzierender Maßnahmen auf Einzugsgebietsebene am Beispiel des Stausees Baderitz. In: *Landwirtschaftlicher Bodenschutz. Schriftenr Sächs Landesanst Landwirtsch 10:79–86, Dresden*
 14. Tomer MD, Meek DW, Kramer LA (2005) Agricultural practices influence flow regimes of headwater streams in Western Iowa. *J Environ Qual* 34:1547. [▶ https://doi.org/10.2134/jeq2004.0199](https://doi.org/10.2134/jeq2004.0199)
 15. Wang X, Gassman PW, Williams JR et al (2008) Modeling the impacts of soil management practices on runoff, sediment yield, maize productivity, and soil organic carbon using APEX. *Soil Tillage Res* 101:78–88
 16. Dabney SM, Moore MT, Locke MA (2006) Integrated management of in-field, edge-of-field, and after-field buffers. *J Am Water Resour Assoc* 42:15–24. [▶ https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb03819.x](https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2006.tb03819.x)
 17. Chen B, Krajewski WF, Helmers MJ, Zhang Z (2019) Spatial variability and temporal persistence of event runoff coefficients for cropland hillslopes. *Water Resour Res* 55:1583–1597. [▶ https://doi.org/10.1029/2018WR023576](https://doi.org/10.1029/2018WR023576)
 18. Atkins DM, Coyle JJ (1977) Grass Waterways in Soil Conservation. US Department of Agriculture, Leaflet 477: Washington
 19. Berg NA, Gray RJ (1984) Soil conservation: “The search for solutions”. *J Soil Water Conserv* 39:18–22
 20. Natural Resources Conservation Service (1999) CORE4 Conservation Practices Training Guide. US Department of Agriculture, Washington
 21. Fiener P, Auerswald K (2005) Measurement and modeling of concentrated runoff in grassed waterways. *J Hydrol* 301:198–215. [▶ https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.030](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.030)
 22. Fiener P, Auerswald K (2003) Concept and effects of a multi-purpose grassed waterway. *Soil Use Manag* 19:65–72. [▶ https://doi.org/10.1079/SUM2002170](https://doi.org/10.1079/SUM2002170)
 23. Fiener P, Auerswald K (2018) Grassed waterways. In: Delgado J, Sassenrath G, Mueller T (Hrsg) *Precision Conservation: Geospatial Techniques for Agricultural and Natural Resources Conservation. Agronomy Monographs 59:131–150, Madison*
 24. Neufang L, Auerswald K, Flacke W (1989) Automatisierte Erosionsprognose- und Gewässer-verschmutzungs-karten mit Hilfe der dABAG – ein Beitrag zur standortgerechten Bodennutzung. *Bayer Landwirtsch Jahrb* 66:1–19
 25. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2015) Begrünung von erosionsgefährdeten Abflussbahnen. Dresden
 26. Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie (2010) Erosionsschutz in reliefbedingten Abflussbahnen. *Schriftenr 13: Dresden*
 27. Flacke W, Auerswald K, Neufang L (1990) Combining a modified Universal Soil Loss Equation with a digital terrain model for computing high resolution maps of soil loss resulting from rain wash. *Catena* 17:383–397
 28. Kagerer J, Auerswald K (1997) Erosionsprognose-Karten im Maßstab 1:5000 für Flurbereinigungsverfahren und Landwirtschaftsberatung. *Schriftenr Bayer Landesanst Bodenkultur Pflanzenbau 2: Freising*
 29. Fiener P, Auerswald K (2006) Influence of scale and land use pattern on the efficacy of grassed waterways to control runoff. *Ecol Eng* 27:208–218. [▶ https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.02.005](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.02.005)
 30. Fiener P, Auerswald K (2006) Seasonal variation of grassed waterway effectiveness in reducing runoff and sediment delivery from agricultural watersheds in temperate Europe. *Soil Tillage Res* 87:48–58. [▶ https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.035](https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.035)
 31. Sieker F, Wilcke D, Reich M, et al (2007) Vorbeugender Hochwasserschutz durch Wasser-rückhalt in der Fläche unter besonderer Berücksichtigung naturschutzfachlicher Aspekte – am Beispiel des Flusseinzugsgebietes der Mulde in Sachsen. Abschlussbericht, Institut für Wasserwirtschaft, Hydrologie und landwirtschaftlichen Wasserbau der Leibniz Universität Hannover.

- Deutsche Bundesstiftung Umwelt (Projekt AZ 214679), Hannover
32. Bracmort KS, Engel BA, Frankenberger JR (2004) Evaluation of structural best management practice 20 years after installation. *J Soil Water Conserv* 59:191–196
 33. Lenz A, Karlstetter M, Knogler F (2006) Sanierung des ländlichen Stoffhaushalts durch Ländliche Entwicklung. Teil B: Fallbeispiel Schwimmbach. Ingenieurbüro Lenz, Ringelai
 34. Reichert E, Achtziger R, Seidler C et al (2007) Maßnahmensteckbriefe zur Broschüre Wasser+Landschaft. Arbeitsgrundlage zur Optimierung einer nachhaltigen Landnutzung aus Sicht des Hochwasserschutzes und des Natur- und Landschaftsschutzes. Deutsche Bundesstiftung Umwelt, Interdisziplinäres Ökologisches Zentrum, Technische Universität Bergakademie, Freiberg
 35. Auerswald K (2019) Grünlandverlust – Ursachen und Wirkungen. *Schriftenr Bayer Landesanst Landwirtsch* 6:17–20, Freising
 36. Kreiter T (2007) Dezentrale und naturnahe Retentionsmaßnahmen als Beitrag zum Hochwasserschutz in mesoskaligen Einzugsgebieten der Mittelgebirge. Dissertation, Universität, Trier
 37. Schepers JS, Francis DD, Mielke LN (1985) Water quality from erosion control structures in Nebraska. *J Environ Qual* 14:186–190. ► <https://doi.org/10.2134/jeq1985.00472425001400020007x>
 38. Natural Resources Conservation Service (1997) Ponds – Planning, Design, Construction. *Agric Handbook* 590: US Department of Agriculture, Washington
 39. Natural Resources Conservation Service (2011) Terraces. In: *Engineering Field Handbook*. Part 650, chapter 8. US Department of Agriculture, Washington
 40. Natural Resources Conservation Service (2019) Earth Dams and Reservoirs. Technical Release 210-60: US Department of Agriculture, Washington
 41. Deutschen Institut für Normung (2004) Stauanlagen – Teil 12: Hochwasserrückhaltebecken. DIN 19700: Beuth Verlag, Berlin
 42. Zanke U (2012) *Hydraulik für den Wasserbau*. Springer, Berlin
 43. Schröder W, Euler G, Schneider F, Knauf D (1994) *Grundlagen des Wasserbaus*. Werner, Düsseldorf
 44. Patt H, Jüpner R (2013) *Hochwasser-Handbuch. Auswirkungen und Schutz*. Springer, Berlin
 45. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2013) Bemessung von Regenrückhaltebecken. *Arbeitsbl DWA-A* 117: Hennef
 46. Teschemacher S, Rieger W (2018) Ereignisabhängige Optimierung dezentraler Kleinrückhaltebecken unter Berücksichtigung von Standort, Retentionsvolumen und Drosselweite. *Hydrol und Wasserbewirtsch* 62:297–311. ► <https://doi.org/10.5675/HyWa>
 47. McLemore AJ, Tyner JS, Yoder DC, Buchanan JR (2013) Discharge coefficients for orifices cut into round pipes. *J Irrig Drain Eng* 139:947–954. ► [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)IR.1943-4774.0000641](https://doi.org/10.1061/(ASCE)IR.1943-4774.0000641)
 48. Wanielista MP, Kersten R, Eaglin R (1996) *Hydrology: water quantity and quality control*. Wiley, New York
 49. Fiener P, Auerswald K, Weigand S (2005) Managing erosion and water quality in agricultural watersheds by small detention ponds. *Agric Ecosyst Environ* 110:132–142. ► <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.03.012>
 50. Harrell LJ, Ranjithan SR (2003) Detention pond design and land use planning for watershed management. *J Water Resour Plan Manag* 129:98–106. ► [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2003\)129:2\(98\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2003)129:2(98))
 51. Heitz LF, Khosrowpanah S, Nelson J (2000) Sizing of surface water runoff detention ponds for water quality improvement. *J Am Water Resour Assoc* 36:541–548. ► <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2000.tb04285.x>
 52. Hong Y-M, Yeh N, Chen J-Y (2006) The simplified methods of evaluating detention storage volume for small catchment. *Ecol Eng* 26:355–364. ► <https://doi.org/10.1016/J.ECOLENG.2005.12.006>
 53. Lukas A (2003) *Wasserrückhaltung durch Ländliche Entwicklung – Evaluierung von dezentralen Wasserrückhaltemaßnahmen*. Diplomarbeit, Lehrstuhl für Bodenordnung und Landentwicklung, Technische Universität München
 54. Ankenbrand E, Schwertmann U (1989) The land consolidation project of Freinhausen, Bavaria. *Soil Technol Ser* 1:167–173
 55. Schwertmann U, Vogl W, Kainz M (1987) *Bodenerosion durch Wasser – Vorhersage des Bodenabtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen*. Ulmer, Stuttgart
 56. Kistler M, Brandhuber R, Maier H (2013) Wirksamkeit von Erosionsschutzmaßnahmen, Ergebnisse einer Feldstudie. *Schriftenr Bayer Landesanst Landwirtsch* 8: Freising
 57. Petit S, Stuart RC, Gillespie MK, Barr CJ (2003) Field boundaries in Great Britain: stock and change between 1984, 1990 and 1998. *J Environ Manag* 67:229–238. ► [https://doi.org/10.1016/S0301-4797\(02\)00176-7](https://doi.org/10.1016/S0301-4797(02)00176-7)
 58. Müller G (2013) *Europas Feldeinfriedungen: Wallhecken (Knicks), Hecken, Feldmauern (Steinwälle), Trockenstrauchhecken, Biegehecken, Flechthecken, Flechtzäune und traditionelle Holzzäune*. Neuer Kunstverlag, Stuttgart

59. Merot P (1999) The influence of hedgerow systems on the hydrology of agricultural catchments in a temperate climate. *Agro-nomie* 19:655–669. ▶ <https://doi.org/10.1051/agro:19990801>
60. Seidler M (2018) Verringerung von Sturzfluten nach Starkregenereignissen – Möglichkeiten und Potentiale der Flurneuordnung durch abfluss-bremsende Flurgestaltung. Masterarbeit, Lehrstuhl für Bodenordnung und Landentwicklung, Technische Universität München
61. Gamperl H (1967) Ländliche Neuordnung (Flurbereinigung). In: Jordan W, Eggert O, Kneissl M (Hrsg) *Handbuch der Vermessungskunde* 4b: Metzler, Stuttgart
62. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2016) *Richtlinien für den Ländlichen Wegebau (RLW) Teil 1: Richtlinien für die Anlage und Dimensionierung ländlicher Wege*. Arbeitsbl DWA-A 904–1: Hennef
63. Bäuml N, Aulig G, Overland H, Krüger G-M (2006) Vorbeugender Hochwasserschutz in der ländlichen Entwicklung – aufgezeigt an der Studie zum vorbeugenden und dezentralen Hochwasserschutz in der Regionalen Landentwicklung Auerbergland. *LWF Wissen* 55: 67–72 Bayer Landesanst Wald und Forstwirt. Freising
64. Bronstert A, Vollmer S, Ihringer J (1995) Die Bedeutung von Flurbereinigungsmaßnahmen für das Abflussverhalten von Starkniederschlägen in ländlichen Gebieten. *Wasser Boden* 47:29–46
65. Moussa R, Voltz M, Andrieux P (2002) Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrol Process* 16:393–412. ▶ <https://doi.org/10.1002/hyp.333>
66. Fiener P, Auerswald K, Van Oost K (2011) Spatio-temporal patterns in land use and management affecting surface runoff response of agricultural catchments-A review. *Earth-Sci Rev* 106:92–104. ▶ <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.01.004>
67. Tempel M (2006) *Abflussverhalten kleiner, forstlich genutzter Bacheinzugsgebiete am Beispiel des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches im Soonwald/Hunsrück*. Dissertation, Johannes-Gutenberg-Universität, Mainz
68. Binder F, Macher C, Klöcking B (2006) *Integrale Planung von Erstaufforstungen am Beispiel der Paar in der Gemeinde Geltendorf*. *LWF Wissen* 55:73–82 Bayer Landesanst Wald und Forstwirt. Freising
69. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2016) *Richtlinien für den Ländlichen Wegebau (RLW) Teil 1: Richtlinien für die Anlage und Dimensionierung ländlicher Wege*. Arbeitsbl DWA-A 904–1: Hennef
70. Steppich J (2014) *Wasserabfluss und Stoffaus-träge von Ackerflächen und die Auswirkung von Straßengräben*. Digitale Berechnungsmodelle und Hinweise für die Planung in der Ländlichen Entwicklung. Masterarbeit, Institut für Geodäsie, GIS und Landmanagement, Technische Universität, München
71. H&S Ingenieure (2018) *Arbeitspapier Roith-bauernbächlein*. Bericht zur Empfehlung und Umsetzung von Maßnahmen im Rahmen des bodenständig-Projektes Teugn – Roit-bauernbächlein. Freising
72. Landesamt für Flurneuordnung (2008) *Natur-naher Wegebau im ländlichen Raum*. Regierungs-präsidium Stuttgart, Kornwestheim
73. Machl T, Ewald W, Donaubaue A, Kolbe TH (2016) *Entwicklung eines Werkzeugs zur landesweit flächendeckenden Analyse landwirtschaftlicher Transportbeziehungen in Bayern*. *Z für Geodäsie, Geoinf und Landmanagement* 3:197–205
74. Luft G, Vogelbacher A (1985) *Modellrechnungen zum Einfluß von Großterrassierungen auf den Abflußprozeß*. *Z für Kulturtech und Flurberein* 26:1–12
75. Hach G, Hörtl W (1989) *Maßnahmen zur Erhaltung und Verbesserung der Wasserrückhalte-, Wasser-reinhalte- und Speicherfähigkeit in der Landwirt-schaft*. *Z Kulturtech Landentwicl* 30:8–21

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/ die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Anwendungsbeispiel zur quantitativen Abschätzung von Abflusssituation und Abflussminderung

- 7.1 Einführung – 160
- 7.2 Methoden – 160
- 7.3 Ergebnisse – 163
- 7.4 Zusammenfassung – 170
- Literatur – 171

7.1 Einführung

Zur Illustration der vorgestellten Methoden wird die Verringerung des Abflussscheitels durch Aufweitung eines Grabens und Veränderung der Flächenbewirtschaftung durchgespielt. Gegenstand des Planungsbeispiels ist die Ortschaft Birnbach im südlichen Landkreis Regensburg, die in der Vergangenheit häufiger von kleineren Überschwemmungen betroffen war. Der Siedlungsbereich liegt im Kopfeinzugsgebiet des Allersdorfer Bachs, der bei Schierling in die Große Laaber mündet. Ursache der Überschwemmungen ist die Kessellage der Ortschaft (Abb. 7.1, oben). Auf dem Weg von der Wasserscheide zum Allersdorfer Bach verlaufen die Entwässerungswege verschiedener Teileinzugsgebiete durch die südöstlichen bzw. nordwestlichen Ortsrandlagen. Das Einzugsgebiet ist rund 1,5 km² groß und überwiegend landwirtschaftlich genutzt. Vor allem im Bereich westlich der Hauptverbindungsstraße, die in Nord-Süd-Richtung und durch die Ortschaft verläuft, beträgt der Ackeranteil fast 100 %.

Das Gebiet wird durch ein langes, verästeltes Grabensystem sehr feingliedrig erschlossen. Die Gräben sind parallel zu den Feldwegen angelegt, die überwiegend in den Tiefenlinien verlaufen (siehe das kleine, im Nordwesten gelegene, 47 ha große Teileinzugsgebiet in Abb. 7.1, unten). Die Gräben untergliedern das Teileinzugsgebiet in noch feinere Einzugsgebiete (A-D) und entwässern schließlich gemeinsam über einen in der Tiefenlinie verlaufenden Sammelgraben in den Allersdorfer Bach. Die Länge des künstlichen Grabensystems übersteigt die Länge des Allersdorfer Bachs um ein Vielfaches. Allein im nordwestlichen Teileinzugsgebiet ist das künstliche Grabensystem sechsfach länger als der zugehörige Abschnitt des Allersdorfer Bachs.

7.2 Methoden

Um die Abflusssituation im Gebiet quantitativ zu fassen, wird für das ausgewiesene Teileinzugsgebiet exemplarisch der Scheitel

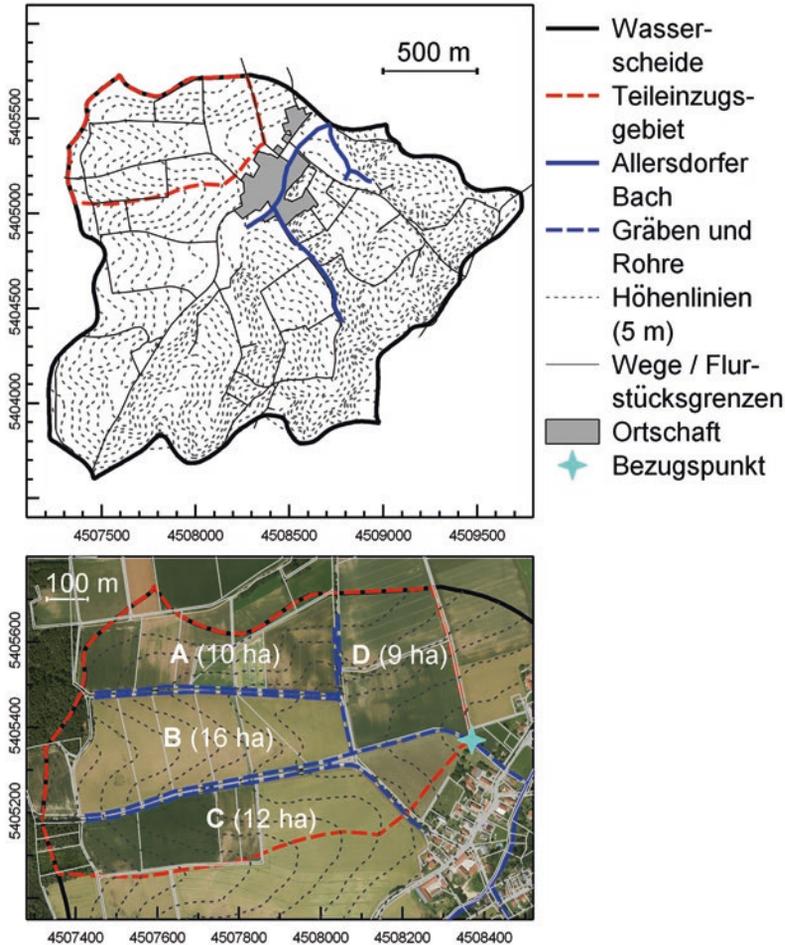
einer Abflusswelle ermittelt, der am Bezugspunkt im Graben vor der Ortschaft (vgl. Abb. 7.1, unten) auftreten kann. Dazu wird zunächst der Anteil des Niederschlags bestimmt, der bei einem typischen Starkregen abfließt. Dann wird die Konzentrationszeit des Gebietes ermittelt, indem der Fließweg des Oberflächenabflusses von der Wasserscheide bis zum Bezugspunkt analysiert wird. Aus der Höhe des abflusswirksamen Niederschlags, der Einzugsgebietsgröße und der Konzentrationszeit ergibt sich der zu erwartende Scheitelabfluss.

In einem zweiten Schritt wird der Einfluss der Gräben auf die Abflusskonzentration und damit auf den Wellenscheitel untersucht, indem fiktiv von einer Aufweitung der Gräben und der Herstellung hydraulisch rauer Bedingungen ausgegangen wird, z. B. durch das Tolerieren eines dichten Bewuchses und den Verzicht auf eine regelmäßige Mahd. Der Effekt dieser Maßnahmen lässt sich abschätzen, indem die veränderte Konzentrationszeit und damit der veränderte Scheitelabfluss ermittelt und der aktuellen Situation gegenübergestellt wird. Und schließlich wird noch die Wirkung einer flächendeckenden Mulchdirektsaat betrachtet. Das Vorgehen entspricht dem Rechenweg typischer Bemessungs- und Dimensionierungsaufgaben und lässt sich auf viele Anwendungsfälle übertragen.

7.2.1 Bemessungsniederschlag und abflusswirksame Niederschlagshöhe

Die Bestimmung der abflusswirksamen Niederschlagshöhe mit dem CN-Verfahren (vgl. Kap. 4) erfordert die Vorgabe eines Bemessungsniederschlags sowie Informationen zur Landnutzung und hydrologischen Bodengruppe (vgl. Anhang 8.6).

Als Niederschlagsszenario wird ein Regen mit 51 mm in 1 h angenommen. Im Einzugsgebiet entspricht dies einem Starkregen mit einem Wiederkehrintervall von 100 Jahren nach



■ **Abb. 7.1** Übersichtskarte des Einzugsgebietes der Ortschaft Birnbach (oben). Im Gebiet sind fein verästelte Grabensysteme vorhanden, die exemplarisch für ein Teileinzugsgebiet dargestellt sind (unten). Durch die Gräben wird wiederum in vier weitere Teilflächen (A bis D) untergliedert. (Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung)

KOSTRA (zum Vergleich, ein 30-jährlicher, einstündiger Regen hätte eine Höhe von 41 mm) [1]. Die Landnutzung wurde aus Luftbildern und einer Geländebegehung erhoben und mit einer Karte der hydrologischen Bodengruppe (für Bayern verfügbar über das Landesamt für Umwelt) in einem Geographischen Informationssystem verschnitten. Die Auswertung ergab, dass das Gebiet nahezu vollständig ackerbaulich genutzt wird (Grünland- und Waldanteil betragen jeweils etwa 5 %; der Anteil der Straßen an der Gesamtfläche beträgt <2 %) und dass die Fläche zu

über 2/3 der hydrologischen Bodengruppe C zugeordnet ist (nicht graphisch dargestellt). Die Bewirtschaftung erfolgte zum Zeitpunkt der Geländebegehung etwa zu gleichen Teilen in Hauptgefällerrichtung wie parallel dazu.

Es wird von mittleren Feuchtebedingungen ausgegangen und vereinfachend angenommen, dass die hydrologische Bodengruppe C das Gebiet adäquat repräsentiert und dass die Gesamtfläche ackerbaulich genutzt wird. Für das Planungsbeispiel wird daher einheitlich ein CN-Wert von 80 unterstellt. Das entspricht nach ■ **Abb. 4.3** einer

mittleren Bodenbedeckung von 10 % bzw. nach **Tab. 4.2** einem CN-Wert, der z. B. bei Sommergetreide im April und Anfang September und bei Mais Ende Mai und Anfang Oktober zu erwarten ist.

Für reale Planungsfälle sollte eine detailliertere Berechnung erfolgen, indem die existierenden Landnutzungsformen mit den hydrologischen Bodengruppen verschnitten und die Abflussbildung dann für jede resultierende Einheit individuell bestimmt wird. Die Dauerstufe des Niederschlags sollte zudem der Konzentrationszeit des Oberflächenabflusses im Einzugsgebiet entsprechen. Da die Konzentrationszeit auf Ackerflächen über das Jahr variiert, sollten ggf. Modellregen unterschiedlicher Dauerstufen (je nach Konzentrationszeit) und Jährlichkeiten betrachtet werden, um die Größenordnung typischer Abflussreaktionen einschätzen zu können. Hier wird aber vereinfachend nur ein einziger, mittlerer Fall betrachtet. **Tab. 7.1** enthält eine Zusammenfassung der Eingangsparameter für die Ermittlung der abflusswirksamen Niederschlagshöhe nach dem CN-Verfahren.

7.2.2 Ermittlung der Konzentrationszeit

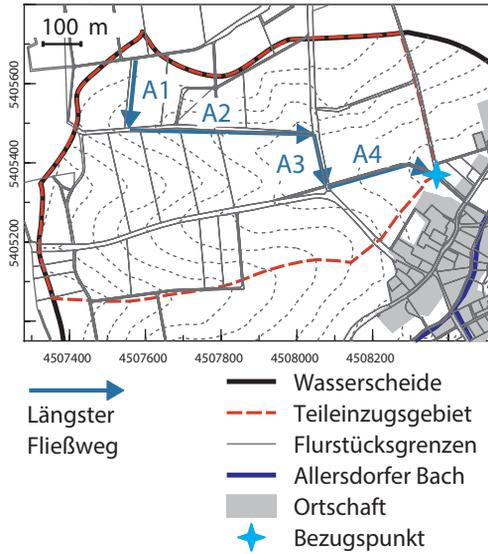
Zur Abschätzung der Konzentrationszeit wird die Geschwindigkeitsmethode (vgl. **Abschn. 5.3.3**) verwendet. Dazu wird zunächst der längste Entwässerungsweg im Einzugsgebiet bestimmt und anhand von Abflusstyp, Gefälle und Fließpfadquerschnitt in hydraulisch ähnliche Abschnitte untergliedert. Im Beispielgebiet gliedert er sich in vier Abschnitte (**Abb. 7.2**). Der erste (A1) beginnt an der Wasserscheide und erstreckt sich über die landwirtschaftliche Nutzfläche bis zum Hangfuß. Bei Starkregen ist hier schichtförmiger Abfluss und flacher, konzentrierter Abfluss in Rinnen und Rillen zu erwarten. Am Hangfuß tritt

Tab. 7.1 Eingangsparameter zur Bestimmung der abflusswirksamen Niederschlagshöhe im nordwestlichen Teil des Einzugsgebietes des Allersdorfer Baches bei Birnbach (Landkreis Regensburg)

Parameter	Einheit	Wert
Niederschlagshöhe (N)	mm	51
Hydrologische Bodengruppe	–	C
CN-Wert	–	80 (Getreide mit hoher Abflussneigung)

das Wasser in ein Grabensystem über, das das Wasser bis in den Allersdorfer Bach leitet (Abschnitte A2, A3 und A4). Über die hydraulischen Eigenschaften der einzelnen Fließpfade und die GMS-Gleichung lässt sich die Fließzeit des Oberflächenabflusses in den einzelnen Abschnitten des Fließpfades abschätzen. Die Summe dieser Fließzeiten ergibt die Konzentrationszeit des Gebietes. Mit dem gleichen Ansatz kann auch der Einfluss der Grabengestaltung auf die Abflusskonzentration ermittelt werden, indem Gerinnequerschnitt und Rauheit verändert und die Fließzeiten der einzelnen Abschnitte bei gleicher Abflussrate neu ermittelt werden.

Zur Parametrisierung der GMS-Gleichung werden Neigung und Länge der einzelnen Fließpfadabschnitte aus der topographischen Karte bzw. dem digitalen Höhenmodell ermittelt. Repräsentative Querprofile der einzelnen Grabenabschnitte wurden im Gelände erfasst (A2, A3 und A4 sind überwiegend als steile, geräumte Trapeze ausgebildet). Anhand der kartierten Oberflächenbeschaffenheit wurden Rauheitsbeiwerte für Schichtabfluss und den Abfluss in Gräben aus **Tab. 8.2** und **Tab. 5.1** entnommen. **Tab. 7.2** enthält eine Zusammenfassung der hydraulischen Parameter der genannten Fließpfadabschnitte.



■ **Abb. 7.2** Darstellung des längsten Fließwegs ausgehend von einem Weg nahe der Wasserscheide bis zur Mündung in den Ortsbereich. Die einzelnen Pfeile (A1 bis A4) gliedern den Fließweg in Abschnitte mit ähnlichen hydraulischen Eigenschaften. (Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung)

7.2.3 Abschätzung der Scheitelhöhe

Zur Abschätzung der Scheitelhöhe wird das Dreiecksganglinienverfahren verwendet. Dabei bestimmen Abflusshöhe, Einzugsgebietsgröße, Scheitelanstiegs- und -ablaufzeit die Scheitelhöhe (vgl. ▶ Abschn. 3.2.1). Die Einzugsgebietsgröße (A_{EZG}) ergibt sich aus Gebieteigenschaften. Abflusshöhe (N_{eff}) und Scheitelanstiegszeit (t_p) werden mit dem CN-Verfahren bzw. der Geschwindigkeitsmethode ermittelt, indem angenommen wird, dass die Scheitelanstiegszeit (t_p) der Konzentrationszeit (t_c) des Gebietes entspricht. Die Ablaufzeit der Abflusswelle (t_{fal}) hängt von den Retentionseigenschaften des Einzugsgebietes ab. Sie berechnet sich aus dem Produkt von Konzentrationszeit und einem Formfaktor F (–) (hier $F=1,5$) (vgl. ■ Tab. 3.2 und ▶ Gl. 3.2). Sind alle erforderlichen Parameter

und Größen bekannt, ergibt sich der Scheitelabfluss (q_p) nach (vgl. ▶ Gl. 3.3):

$$q_p = \frac{N_{eff}}{0,5 \cdot (t_c + t_{fal}) \cdot 0,06} \cdot A_{EZG}$$

7.3 Ergebnisse

7.3.1 Abflussentstehung

Die maximal mögliche Retention (S) wird nach ▶ Gl. 4.1 ermittelt. Für den CN-Wert von 80 ergibt sie sich zu:

$$S = 254 \cdot \left(\frac{100}{CN} - 1 \right) = 254 \cdot \left(\frac{100}{80} - 1 \right) = 63,5 \text{ mm}$$

Für die gewählte Niederschlagshöhe von 51 mm errechnet sich mit ▶ Gl. 4.2 ein abflusswirksamer Niederschlag N_{eff} von:

$$N_{eff} = \frac{(N - 0,2 \cdot S)^2}{N + 0,8 \cdot S} = \frac{(51 - 0,2 \cdot 63,5)^2}{51 + 0,8 \cdot 63,5} = 14,4 \text{ mm}$$

Aufgrund der Teileinzugsgebietsfläche von 47 ha ist bei dem gewählten Niederschlag ein Gesamtabflussvolumen zu erwarten in Höhe von (▶ Gl. 2.4):

$$Q = 0,0144 \text{ m} \cdot 470.000 \text{ m}^2 = 6772 \text{ m}^3$$

7.3.2 Konzentrationszeit

7.3.2.1 Bestimmung der Fließzeit von Schichtabfluss und flachem, konzentriertem Abfluss in Rinnen und Rillen

Der erste Abschnitt A1 führt über eine Ackerfläche von der Wasserscheide nahezu senkrecht nach Süden bis zum ersten Graben. Es wird angenommen, dass der Oberflächenabfluss in diesem Abschnitt zunächst als Schichtabfluss auftritt, dessen Länge rechnerisch zu bestimmen ist, weil dies aus Luftbildern

Tab. 7.2 Hydraulische Eigenschaften der Fließpfadabschnitte A1, A2, A3 und A4 (vgl. **Abb. 7.2**) im Teileinzugsgebiet des Allersdorfer Bachs

Fließpfadabschnitt	Abflusstyp	Länge (m)	Gefälle (%)	Rauheit ($m^{1/3} s^{-1}$)	Sohlbreite (m)	Böschungsneigung ^a (m/m)
A1	Schichtabfluss und Abfluss in Rinnen und Rillen im Feld	200	7,0	17	–	–
A2	Abfluss im trapezförmigen Graben	470	2,4	35	0,35	1
A3	Abfluss im trapezförmigen Graben	180	3,0	35	0,35	1
A4	Abfluss im trapezförmigen Graben	300	2,2	35	0,7	0,6

^aDefiniert als Breite dividiert durch Höhe. Werte < 1 entsprechen Neigungen < 45 % und umgekehrt

7

und auch im Gelände, außer bei einem entsprechenden Starkregen, nicht zu ermitteln ist. Danach fließt der Abfluss immer noch im Feld in flachen Rinnen und Rillen bis zum Hangfuß. Da die Hänge bei A1 relativ kurz, gerade und ohne nennenswerte Einmündung ausgebildet sind, ist eine Konzentration des Abflusses in Hangmulden nicht zu erwarten.

Die Länge des Schichtabflusses wird mithilfe von **► Gl. 8.1** im Anhang anhand der Rauheit der Bodenoberfläche abgeschätzt. Für einen Acker mit spärlicher Bedeckung (Bedeckung < 5 %), weist **Tab. 8.2** eine Rauheit von $k=17$ ($m^{1/3} s^{-1}$) aus. Demnach ergibt sich für den Schichtabfluss eine Fließpfadlänge von:

$$l_s = \frac{200}{\sqrt{k}} = \frac{200}{\sqrt{17}} = 49 \text{ m}$$

Aus der Differenz der Gesamtlänge des Abschnitts A1 und der Fließstrecke des Schichtabflusses ergibt sich die mittlere Länge des Rinnen- und Rillenabflusses:

$$l_R = 200 - 49 = 151 \text{ m}$$

Auf diese beiden Fließstrecken wird nun die GMS-Gleichung (**► Gl. 5.5**) angewendet. Eingangsrößen für den Schichtabfluss sind ein Gefälle J von 7 % (bestimmt aus der topographischen Karte), die bereits festgelegte

Rauheit der Oberfläche k von $17 m^{1/3} s^{-1}$ und der hydraulische Radius R . Letzterer wird nach **► Anhang 8.2.1** vereinfachend für einen schichtförmigen Abfluss mit 2 mm geschätzt. Als Fließgeschwindigkeit ergibt sich:

$$\begin{aligned} v &= R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \cdot k \\ &= 0,002^{\frac{2}{3}} \cdot 0,07^{\frac{1}{2}} \cdot 17 \\ &= 0,07 \text{ m s}^{-1} \\ &= 7 \text{ cm s}^{-1} \end{aligned}$$

Dies ist ein typischer Wert für den Schichtabfluss. Wird diese Geschwindigkeit durch die Länge des Schichtabflusses dividiert, ergibt sich nach **► Gl. 5.7** eine Fließzeit von

$$t_s = \frac{49}{60 \cdot 0,07} = 11,3 \text{ min}$$

Für den Abfluss in Rinnen und Rillen wird ebenfalls von einem Gefälle J von 7 % ausgegangen. Durch die kastenförmige Ausspülung der Fließpfade liegt die Rauheit analog **Tab. 8.2** im Anhang bei $k=25 m^{1/3} s^{-1}$. Der hydraulische Radius R wird pauschal mit 0,04 m angesetzt (**► Anhang 8.2.2**). Damit ergibt sich die Fließgeschwindigkeit zu:

$$v = 0,04^{\frac{2}{3}} \cdot 0,07^{\frac{1}{2}} \cdot 25 = 0,8 \text{ m s}^{-1}$$

Durch die Konzentration des Abflusses in flachen Rillen und die geringere Rauheit fließt der Abfluss hier bereits fast 10-mal schneller als der Schichtabfluss. Würde die Konzentration des Abflusses in Rillen durch eine höhere Rauheit, z. B. durch eine Mulchschicht, hinausgezögert, würde die Gesamtzeit, die der Abfluss sich im Fließabschnitt A1 bewegt, deutlich verlängert. Wird die Länge der Rinnen und Rillen durch die Fließgeschwindigkeit dividiert, resultiert eine mittlere Fließzeit von:

$$t_R = \frac{151}{60 \cdot 0,8} = 3,3 \text{ min}$$

7.3.2.2 Bestimmung der Fließzeit in den Wegseitengräben

Erreicht der Oberflächenabfluss am Hangfuß das Ende von Abschnitt A1, tritt er in den Wegseitengräben über. Letzterer verläuft zunächst nach Osten bis zur T-Kreuzung der Straße (Abschnitt A2). Dort führt eine Verrohrung in einen kurzen, in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Graben (Abschnitt A3), der am südlichsten Punkt an den Sammelgraben (Abschnitt A4) angeschlossen ist (■ Abb. 7.2).

Die Fließzeit in den Grabenabschnitten wird indirekt geschätzt, da für die GMS-Gleichung die Fließtiefe erforderlich ist. Daher muss zunächst die Fließtiefe näherungsweise berechnet werden. Dazu werden die Gleichungen aus ■ Abb. 8.4 zur Bestimmung von Gerinnequerschnittsfläche (A) und hydraulischem Radius (R) von Trapezen,

$$A = \frac{1}{2}(B + b) \cdot h = \frac{1}{2}(2b + 2m \cdot h) \cdot h$$

und

$$R = \frac{(b + m \cdot h) \cdot h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}}$$

und die GMS-Gleichung (vgl. ► Gl. 5.5),

$$v = R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \cdot k$$

sowie die allgemeine Fließgleichung benötigt (vgl. ► Gl. 5.1)

$$q = v \cdot A$$

Dabei sind B , b und h Wasserspiegelbreite, Sohlbreite und Fließtiefe des trapezförmigen Grabens in m . Die Böschungsneigung (m) ist dimensionslos, R ist der hydraulische Radius in m , J das Gefälle (dimensionslos) und k der Rauheitsbeiwert in $m^{1/3} s^{-1}$. In der letzten Formel steht v für die Fließgeschwindigkeit in $m s^{-1}$, die Querschnittsfläche hat die Einheit m^2 .

Werden die Gleichungen aus ■ Abb. 8.4, 5.5 und 5.1 ineinander eingesetzt und durch die Einzugsgebietsfläche dividiert, ergibt sich die Abflussspende (q_s) in Abhängigkeit von der Fließtiefe (h) nach:

$$q_s(h) = \left(\frac{(b + m \cdot h) \cdot h}{b + 2h\sqrt{1 + m^2}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \cdot k \cdot \frac{1}{2} (2b + 2m \cdot h) \cdot h \cdot \frac{1}{A_{EZG}}$$

Die Gleichung kann nun gelöst werden, indem die Werte eingesetzt und die Fließtiefe h schrittweises (iterativ) verändert wird, bis das resultierende q_s etwa der erforderlichen Abflusshöhe von $14,4 \text{ mm h}^{-1}$ entspricht. Dazu wird der Abfluss im Graben unter Berücksichtigung der Einzugsgebietsfläche (A_{EZG}) am Übergang von A2 nach A3 ($A_{EZG} = 10 \text{ ha}$ bzw. 100.000 m^2) berechnet (stationäre Bedingungen). Für das gewählte Regenereignis ergibt sich eine Fließtiefe im ersten, 470 m langen Grabenabschnitt von rund 34 cm :

$$q_s = \left(\frac{(0,35 + 1 \cdot 0,34) \cdot 0,34}{0,35 + 2 \cdot 0,34\sqrt{1 + 1^2}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot 0,024^{\frac{1}{2}} \cdot 35 \cdot \frac{1}{2} (2 \cdot 0,35 + 2 \cdot 1 \cdot 0,34) \cdot 0,34 \cdot \frac{1000 \cdot 3600}{100.000} \approx 14,3 \text{ mm h}^{-1}$$

Ist die Fließtiefe bekannt, lässt sich die Fließgeschwindigkeit abschätzen:

$$\begin{aligned}
 v &= R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \cdot k = \left(\frac{(b + m \cdot h) \cdot h}{b + 2 h \sqrt{1 + m^2}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \cdot k \\
 &= \left(\frac{(0,35 + 0,34) \cdot 0,34}{0,35 + 2 \cdot 0,34 \sqrt{1 + 1}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot 0,024^{\frac{1}{2}} \cdot 35 \\
 &= 1,7 \text{ m s}^{-1}
 \end{aligned}$$

Durch Division von Fließstrecke und -geschwindigkeit ergibt sich die Fließzeit im ersten Grabenabschnitt zu:

$$t = \frac{l}{v} = \frac{470}{1,7 \cdot 60} = 4,6 \text{ min}$$

Für den in Nord-Süd-Richtung verlaufenden Grabenabschnitt A3 und den Teil des Sammelgrabens bis zum Beginn der Ortschaft (A4) werden die Rechenschritte analog wiederholt. Die Einzugsgebietsfläche am Übergang von A3 zu A4 beträgt etwa 12 ha. In A3 ergibt sich eine ähnliche mittlere Fließtiefe von rund 0,35 m, da sich die entgegengesetzt gerichteten Wirkungen der größeren Einzugsgebietsfläche und des höheren Gefälles kompensieren:

$$\begin{aligned}
 q_s &= \left(\frac{(0,35 + 1 \cdot 0,35) \cdot 0,35}{0,35 + 2 \cdot 0,35 \sqrt{1 + 1^2}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot 0,03^{\frac{1}{2}} \cdot 35 \\
 &\cdot \frac{1}{2} (2 \cdot 0,35 + 2 \cdot 0,35) \cdot 0,35 \cdot \frac{1000 \cdot 3600}{120.000} \\
 &\approx 14,4 \text{ mm h}^{-1}
 \end{aligned}$$

Gegenüber dem ersten Grabenabschnitt ist die mittlere Fließgeschwindigkeit in A3 durch das höhere Gefälle geringfügig höher:

$$\begin{aligned}
 v &= R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \cdot k \\
 &= \left(\frac{(b + m \cdot h) \cdot h}{b + 2 h \sqrt{1 + m^2}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \cdot k \\
 &= \left(\frac{(0,35 + 1 \cdot 0,35) \cdot 0,35}{0,35 + 2 \cdot 0,35 \sqrt{1 + 1}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot 0,03^{\frac{1}{2}} \cdot 35 \\
 &= 2,0 \text{ m s}^{-1}
 \end{aligned}$$

Daraus errechnet sich die mittlere Fließzeit zu:

$$t = \frac{l}{v} = \frac{180}{2,0 \cdot 60} = 1,5 \text{ min}$$

Der Sammelgraben (A4) entwässert nun nahezu das komplette Teileinzugsgebiet von 47 ha bis zum Bezugspunkt. Die Bestimmung der Fließzeit erfolgt analog zu dem Vorgehen bei A2 und A3 mit den in Tab. 7.2 genannten Größen. Um die gewünschte Abflusshöhe zu erreichen, ist eine Fließtiefe von 68 cm erforderlich.

$$\begin{aligned}
 q_s &= \left(\frac{(0,7 + 0,6 \cdot 0,68) \cdot 0,68}{0,7 + 2 \cdot 0,68 \sqrt{1 + 0,6^2}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot 0,022^{\frac{1}{2}} \cdot 35 \\
 &\cdot \frac{1}{2} (2 \cdot 0,7 + 2 \cdot 0,6 \cdot 0,68) \cdot 0,68 \cdot \frac{1000 \cdot 3600}{470.000} \\
 &\approx 14,3 \text{ mm h}^{-1}
 \end{aligned}$$

Nach den gleichen Prinzipien wie oben ergeben sich die mittlere Fließgeschwindigkeit zu

$$\begin{aligned}
 v &= R^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \cdot k = \left(\frac{(b + m \cdot h) \cdot h}{b + 2 h \sqrt{1 + m^2}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot J^{\frac{1}{2}} \cdot k \\
 &= \left(\frac{(0,7 + 0,6 \cdot 0,68) \cdot 0,68}{0,7 + 2 \cdot 0,68 \sqrt{1 + 0,6^2}} \right)^{\frac{2}{3}} \cdot 0,022^{\frac{1}{2}} \cdot 35 \\
 &= 2,5 \text{ m s}^{-1}
 \end{aligned}$$

und die mittlere Fließzeit zu:

$$t = \frac{l}{v} = \frac{300}{2,5 \cdot 60} = 2,0 \text{ min}$$

Entsprechend der einzelnen Abschnitte des Fließpfads ergibt sich von der Wasserscheide bis zum Erreichen des Bezugspunktes im Sammelgraben am Ortseingang von Birnbach für den Oberflächenabfluss eine mittlere Konzentrationszeit (t_C) von:

$$t_C = 11,3 + 3,3 + 4,6 + 1,5 + 2,0 \approx 23 \text{ min}$$

Obwohl der Fließweg, auf dem der Abflussschichtförmig fließt, nur 49 m oder 5 % der gesamten Fließstrecke bis zum Ende von A3 ausmacht, verweilt hier der Abfluss 50 % der gesamten Abflussdauer. Das heißt, dass in diesem Fall die Dämpfung der Hochwasserwelle auf den ersten 49 m genauso stark ist wie auf den folgenden 1100 m. Dies zeigt die fatale Wirkung der Bündelung des Abflusses bzw., wie nützlich es ist, wenn der Abfluss

möglichst lange schichtförmig fließt. Das ist der wesentliche Vorteil von Grünland oder einer Mulchdirektsaat mit einer durchgehenden Bodenbedeckung $\geq 30\%$, wo das Einschneiden in Rillen und Rinnen normalerweise nicht erfolgt. Für Grünland hätte man über die ganzen 200 m von Abschnitt A1 schichtförmiges Fließen mit einer entsprechend starken Dämpfung der Hochwasserwelle annehmen können.

Selbst im unteren Teilstück von A1, in dem der Abfluss bereits in Rillen und Rinnen fließt, ist die Fließgeschwindigkeit nur halb so hoch wie in den Gräben, obwohl die Neigung des Feldes mehr als doppelt so stark ist, wie die der Gräben. Dies zeigt die starke Beschleunigung, die ein Abfluss durch Einengung in ein glattes Gerinne erfährt. Je länger der Abfluss breit fließen kann und je breiter er fließt, nachdem er gebündelt wurde, umso länger und stärker gedämpft ist er unterwegs. Der moderne Wege- und Straßenbau kann also höchst problematisch für den Landschaftswasserhaushalt sein, weil dadurch oft ein sekundäres Gewässernetz entsteht, dass durch Oberflächen- und Zwischenabfluss bei starken Niederschlägen aktiviert wird (■ Abb. 7.3). Es leitet Abfluss und Abtrag aus den Hanglagen, wo der Abtrag mindestens



■ **Abb. 7.3** Selbst kleine Entwässerungsgräben (hier der Wegseitengraben eines Feldwegs) beschleunigen den Abfluss stark, wie deutlich am unterschiedlichen Strömungsmuster im Graben links und auf dem Feld rechts zu erkennen ist

um Faktor 10 bis 100 höher ist als in den Talagen, direkt und ungepuffert in das primäre Fließgewässernetz. Daher ist es wenig verwunderlich, dass Zusammenhänge zwischen Landnutzungseffekten, Feinsedimentdeposition und den aquatischen Lebensgemeinschaften nachgewiesen wurden [2, 3].

7.3.3 Scheitelabflussrate bei Starkregen

Anhand der Oberflächenabflusshöhe N_{eff} in mm, der Scheitelanstiegszeit t_p in min (die t_C gleichgesetzt wird), der Zeit des fallenden Wellenastes t_{fal} in min und der Gesamtgröße des Teileinzugsgebietes A_{EZG} in km^2 lässt sich über das Dreiecksganglinienverfahren der Abflussscheitel q_p in l s^{-1} für das gewählte Starkregenszenario abschätzen. Wird vereinfachend davon ausgegangen, dass die Teilgebiete B und C identische Konzentrationszeiten wie Teilgebiet A aufweisen, überlagern sich die Abflusswellen der einzelnen Teilflächen beim Eintritt in den Sammelgraben A4 linear (ungünstigster Fall). Für diesen Fall bestimmt die Flächengröße die Scheitelhöhe und bei einem 100-jährlichen Starkregen muss mit einem Spitzenabfluss von knapp 4000 l s^{-1} gerechnet werden.

$$\begin{aligned} q_p &= \frac{N_{\text{eff}}}{0,5 \cdot (t_c + t_{\text{fal}}) \cdot 0,06} \cdot A \\ &= \frac{14,4}{0,5 \cdot (23 + 1,5 \cdot 23) \cdot 0,06} \cdot 0,47 \\ &= 3970 \text{ l s}^{-1} \end{aligned}$$

7.3.4 Einfluss der Grabengestaltung auf Abflusskonzentration und Scheitelabflussrate

Um Möglichkeiten der Grabengestaltung zur Minderung des Abflussscheitels einzuschätzen, wird angenommen, dass die bestehenden Wegseitengräben aufgeweitet und abgeflacht werden (Sohlbreite $b = 1,5 \text{ m}$

für A2 und A3 bzw. 2 m für A4, Böschungseigung m einheitlich 2,5) und sich durch den Verzicht auf eine regelmäßige Mahd ein dichter, hydraulisch rauher Bewuchs einstellt (Rauheitsbeiwert k von $20 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$). Werden die dargestellten Rechenschritte für diese Randbedingungen wiederholt, erhöht sich die Fließzeit gegenüber dem aktuellen Zustand um 30 % von rund 23 auf 30 min. ■ Tab. 7.3 fasst die Berechnungsergebnisse für einen Abfluss von $14,4 \text{ mm}$ zusammen.

Wird nun die längere Fließzeit von rund 30 min verwendet, um den Abflussscheitel am Bezugspunkt zu schätzen, errechnet sich aus dem Dreiecksganglinienverfahren eine um 25 % reduzierte Scheitelhöhe von rund 3000 l s^{-1} :

$$\begin{aligned}
 q_P &= \frac{N_{\text{eff}}}{0,5 \cdot (t_c + t_{\text{fal}}) \cdot 0,06} \cdot A \\
 &= \frac{14,4}{0,5 \cdot (29,5 + 1,5 \cdot 29,5) \cdot 0,06} \cdot 0,47 \\
 &= 3055 \text{ l s}^{-1}
 \end{aligned}$$

7.3.5 Wirkung einer flächendeckenden Mulchdirektsaat

Würde dagegen die Bewirtschaftungsrichtung um 90° gedreht, was z. B. im Teilgebiet A einfach möglich wäre, und würde flächendeckend auf Mulchdirektsaat umgestellt, könnte für das flächenhafte Fließen statt einem Rauheitsbeiwert von $17 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ einer von $8 \text{ m}^{1/3} \text{ s}^{-1}$ angenommen werden (vgl. ■ Tab. 8.2). Dieser niedrige Rauheitsbeiwert kommt daher, dass bei Mulchdirektsaat eine rauhe, abflussbremsende Bodenoberfläche selbst zehn Monate nach der Bodenbearbeitung noch erhalten bleibt (■ Abb. 7.4), weil die abfrierende Zwischenfrucht in ein sehr rauhes Saatbett gesät werden kann. Die sich im August rasch entwickelnde Zwischenfrucht schützt diese Rauheit vor der einebnenden Wirkung der Witterung, sodass sie selbst im Mai, wenn der Mais keimt, noch zum großen Teil vorhanden ist. Zusätzlich liefern zunächst die wachsende Zwischenfrucht und dann nach dem Winter ihre abgefrorenen Reste eine

dichte, abflussbremsende Mulchdecke. Durch die noch aufrechtstehenden, verwurzelten Stängel ist die Mulchdecke hervorragend gegen Abschwemmung geschützt. Gleichzeitig erfüllt die Mulchdirektsaat auch die konträren Forderungen, die an ein optimales Saatbett gestellt werden und die normalerweise nur durch aufwendige Bodenbearbeitung gleichzeitig realisiert werden können: Der für die Keimung notwendige kapillare Anschluss des Saatkorns ist durch die zehntonatige Boden-setzung ohne weitere Bearbeitung ideal. Im konventionellen Saatbett muss dies dagegen durch eine technische Bodenverdichtung erzeugt werden. Gleichzeitig verringert die Mulchschicht die Bodenverdunstung und damit einen unproduktiven Wasserverlust. Im konventionellen Saatbett erreicht man dies durch eine wenige Zentimeter dicke, durch intensives Zerschlagen von Bodenaggregaten erzeugte Schicht, die auf der Verdichtungszone aufliegt. Diese Schicht aus Feinbröckeln ist hydraulisch glatt und wird rasch durch Regen weiter geglättet, da die Bröckel durch die intensive Bearbeitung instabil sind [4]. Sobald Oberflächenabfluss auftritt, kann Feinmaterial von dieser auf der Verdichtungszone aufliegenden Feinbröckelschicht leicht abgeschwemmt werden. Die Erosionsrate ist dann hoch. Bei Mulchdirektsaat verhindert dagegen die Mulchschicht ein Verschlämmen und hält die Infiltrationsrate hoch. Wird die Infiltration trotzdem überschritten, baut sich eine dicke Wasserschicht auf, die zusätzlich zur Mulchschicht ein Auftreffen der Regentropfen auf der Bodenoberfläche und die Produktion von abschwembarem Feinmaterial reduziert [5, 6].

Durch diese Maßnahme würde, weil das Wasser nun langsamer fließt und sich dadurch auch erst später in Rillen und Rinnen bündelt, die Fließzeit im Feld auf 26 min steigen (rund 80 % mehr) und entsprechend der Hochwasserscheitel auf rund 2600 l s^{-1} (34 % weniger als im aktuellen Zustand) sinken. Weil dadurch aber auch die Infiltration verbessert wird (nach ► Gl. 4.8 und 4.9 kann für Mulchdirektsaat und konturparallelen

Tab. 7.3 Zusammenfassung der Berechnungen für die Grabenabschnitte A2, A3 und A4 bei einer Abflussrate von $14,4 \text{ mm h}^{-1}$ eines 100-jährlichen Regens. „Aktuell“ gilt für die gegenwärtige Grabengestalt, das Szenario „Aufgeweitet + Bewuchs“ gilt für flachere und hydraulisch rauere Verhältnisse

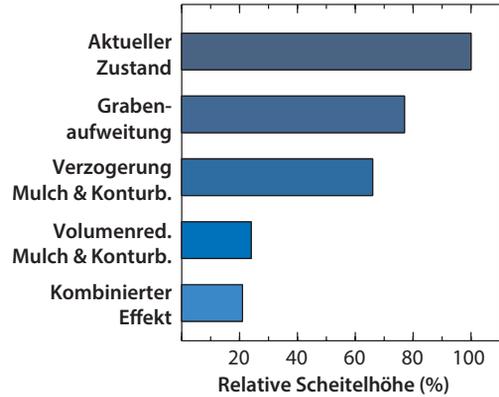
	Parameter	Aktuell	Aufgeweitet & Bewuchs
A2	Sohlbreite b (m)	0,35	1,5
	Böschungsneigung m (m m^{-1})	1,0	2,5
	Fließtiefe d (m)	0,34	0,21
	Wasserspiegelbreite B (m)	1,0	2,6
	Grabenöffnungsweite (m)	1,8	5,0
	Durchflossene Querschnittsfläche A (m^2)	0,23	0,43
	Hydraulischer Radius R (m)	0,18	0,16
	Fließgeschwindigkeit v (m s^{-1})	1,7	0,9
	Mittlere Abflussrate Q bei AEZG=10 ha (l s^{-1})	400	400
	Fließzeit Abschnitt A2 (min)	4,6	8,5
A3	Sohlbreite b (m)	0,35	1,5
	Böschungsneigung m (m^{-1})	1,0	2,5
	Fließtiefe d (m)	0,35	0,22
	Wasserspiegelbreite B (m)	1,1	2,6
	Grabenöffnungsweite (m)	1,8	5,0
	Durchflossene Querschnittsfläche A (m^2)	0,25	0,45
	Hydraulischer Radius R (m)	0,18	0,17
	Fließgeschwindigkeit v (m s^{-1})	2,0	1,1
	Mittlere Abflussrate Q bei $A_{\text{EZG}}=12 \text{ ha}$ (l s^{-1})	480	480
	Fließzeit Abschn. A3 (min)	1,5	2,8
A4	Sohlbreite b (m)	0,70	2
	Böschungsneigung m (m^{-1})	0,60	2,5
	Fließtiefe d (m)	0,68	44
	Wasserspiegelbreite B (m)	1,5	4,2
	Grabenöffnungsweite (m)	1,5	5,5
	Durchflossene Querschnittsfläche A (m^2)	0,76	1,4
	Hydraulischer Radius R (m)	0,33	0,31
	Fließgeschwindigkeit v (m s^{-1})	2,5	1,4
	Mittlere Abflussrate Q bei $A_{\text{EZG}}=47 \text{ ha}$ (l s^{-1})	1880	1880
	Fließzeit Abschn. A4 (min)	2,0	3,7
A1	Fließzeit im Feld (schichtförmig + Rinnen + Rillen) (min)	14,6	14,6
A1–A4	Summe Fließzeit (min)	22,7	29,5
	Summe relativ (%)	100	130



▣ **Abb. 7.4** Raue, abflussbremsende Bodenoberfläche selbst zehn Monate nach der Bodenbearbeitung bei Mulchdirektsaat. (Bildquelle: Robert Brandhuber)

7

Anbau ein CN-Wert von 69 angesetzt werden), würden bei diesem Szenario nur 5,3 mm anstelle von 14,4 mm abfließen (ca. 60 % weniger; diese enorme Wirkung wurde auch in Beregnungsversuchen nachgewiesen [7]). Dadurch würde das Wellenvolumen und damit der Abflussscheitel um weitere 40 % auf rund 1000 l s^{-1} gesenkt. In der Folge führt das gesamte Entwässerungssystem weniger Wasser. Dadurch wiederum fließt auch in den folgenden Abschnitten, den Rillen und Rinnen und in A2 bis A4, der Abfluss aufgrund der geringen Schichtdicke langsamer, was den Abflussscheitel weiter senkt, und zwar um 5 %. Als willkommener „Nebeneffekt“ wird gleichzeitig auch der Bodenabtrag mehr als halbiert, was die Bodenfruchtbarkeit erhöht und die Grabenräumungskosten senkt. Weil die Gräben nun sehr viel weniger verschlammten, macht es erst wirklich Sinn, die Fließgeschwindigkeit in den Gräben durch eine Umgestaltung zu vermindern. Kombiniert man also die veränderte Flächenbewirtschaftung mit der oben dargestellten, veränderten Grabengestaltung, kann der Hochwasserscheitel eines kurzen, schauerartigen Niederschlags im betrachteten Gebiet um bis zu 80 % reduziert werden



▣ **Abb. 7.5** Exemplarische Darstellung der potenziellen Reduktion des Abflussscheitels durch Maßnahmen zur Volumenreduktion und Abflussverzögerung in der Flur bei kurzen, schauerartigen Starkregenereignissen in einem Teileinzugsgebiet des Allersdorfer Baches

(▣ **Abb. 7.5**). Das Überflutungsrisiko für die Gemeinde sollte damit deutlich reduziert werden können – oder umgekehrt: Die wiederkehrenden Hochwasserschäden sind durch den Menschen verursacht.

Die Effekte der einzelnen Maßnahmen sind in ▣ **Abb. 7.5** gegenübergestellt. Sie gelten nur für das betrachtete Gebiet und die genannten Randbedingungen. Eine exakte Trennung und Quantifizierung der einzelnen Effekte ist streng genommen nicht möglich, da sie ineinandergreifen. Die Auswertung soll nur den Beitrag der einzelnen Maßnahmen zur Gesamtwirkung exemplarischen verdeutlichen.

7.4 Zusammenfassung

In der Ortschaft Birnbach treten immer wieder kleinere Überschwemmungen auf. Ursache sind die Kessellage der Ortschaft, die flächendeckend landwirtschaftliche Bodennutzung und die durch Gräben künstlich beschleunigte Abflusskonzentration im Einzugsgebiet. Die Gräben sammeln und bündeln

den bei Starkregen anfallenden Oberflächenabfluss und leiten ihn direkt in und durch Teilbereiche der Ortschaft.

Um den Einfluss der Gräben (und der Flächennutzung) auf die Abflusssituation einzuschätzen, wurden exemplarisch potenzielle Spitzenabflüsse und Fließzeiten des Oberflächenabflusses in einem Teileinzugsgebiet für einen etwa 100-jährlichen Starkregen ermittelt. Dabei wurde der aktuelle Zustand des Gebietes mit einem Szenario verglichen, bei dem die vorhandenen Wegseitengräben stark aufgeweitet und bewachsen, d. h. hydraulisch rau angelegt sind. Der Vergleich ergab, dass sich durch eine (durchgehende) Veränderung der Grabengestalt die Abflusskonzentration in dem ausgewählten Teileinzugsgebiet um rund 30 % verzögern und der Scheitel der Abflusswelle um 25 % reduzieren ließe. Bei einer weiterreichenden Veränderung (zusätzlich flächendeckende Umstellung auf Mulchdirektsaat und hangparallele Bewirtschaftung) wäre eine Abflussminderung um 50 % und mehr gegenüber der aktuellen Situation zu erwarten und eine Minderung des Hochwasserscheitels um 80 %. Eine weitere Reduktion wäre mit überschaubarem Aufwand möglich durch gezielte Heterogenisierung des Anbaus (z. B. Streifenanbau) oder durch die Anlage von

kleinen Retentionsbecken (besonders entlang der Fließstrecke A2 und am Übergang von A3 zu A4).

Literatur

1. Brandhuber R, Treisch M, Fischer F et al (2017) Starkregen, Bodenerosion, Sturzfluten. Schriften Bayer Landesanst Landwirtsch 2: Freising
2. Bierschenk AM, Mueller M, Pander J, Geist J (2019) Impact of catchment land use on fish community composition in the headwater areas of Elbe, Danube and Main. *Sci Total Environ* 652:66–74
3. Knott J, Mueller M, Pander J, Geist J (2019) Effectiveness of catchment erosion protection measures and scale-dependent response of stream biota. *Hydrobiologia* 830:77–92
4. Auerswald K (1993) Influence of initial moisture and time since tillage on surface structure breakdown and erosion of a loessial soil. *Catena Suppl* 24:93–101
5. Palmer RS (1964) The influence of a thin water layer on waterdrop impact forces. *IAHS Publ* 65:141–148
6. Poesen J, Savat J (1981) Detachment and transportation of loose sediments by raindrop splash – Part II: Detachability and transportability measurements. *Catena* 8:19–41
7. Kainz M (1989) Runoff, erosion and sugar beet yields in conventional and mulched cultivation. *Soil Technol Ser* 1:103–114

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz ([▶ http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de](http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de)) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.





Anhang

- 8.1 **Wirksamkeit dezentraler Maßnahmen zur Abflussminderung – 174**
 - 8.2 **Hydraulische Eigenschaften unterschiedlicher Abflusstypen und Fließpfade – 174**
 - 8.3 **Das Verhältnisverfahren zur Bestimmung des Scheitelabflusses – 184**
 - 8.4 **Ableitung von Gebiets- und Bemessungsniederschlägen – 188**
 - 8.5 **Bestimmung der Abflusshöhe nach Lutz – 202**
 - 8.6 **Hydrologische Bodengruppe – 208**
 - 8.7 **Wegebau und Wasserführung – 211**
 - 8.8 **Kartierung von Fließwegen im Gelände – 215**
 - 8.9 **Geodaten und Geodatenanalyse – 216**
 - 8.10 **Einfluss der Bodenbedeckung auf CN-Werte bei kleinen Regen, bei Vorverschlämmung, bei natürlichen Regen und bei aufeinanderfolgenden Regen – 217**
- Literatur – 224**

8.1 Wirksamkeit dezentraler Maßnahmen zur Abflussminderung

Siehe [Tab. 8.1](#).

8.2 Hydraulische Eigenschaften unterschiedlicher Abflusstypen und Fließpfade

In diesem Anhang sind hydraulische Grundlageninformationen für unterschiedliche Abflusstypen und Fließpfade zusammengefasst, die z. B. zur Bestimmung der Konzentrationszeit eines Einzugsgebietes mit der Geschwindigkeitsmethode von Bedeutung sein können. Der Anhang gliedert sich nach den Abflusstypen in 1) Schichtabfluss, 2) Abfluss in Rinnen, Rillen und Hangmulden, 3) Abfluss in Gräben, teilgefüllten Rohren und anderen offenen Gerinnen, sowie in 4) Ansätze zur Bestimmung der Fließzeit durch Wasserkörper und Feuchtgebiete. Das letzte Unterkapitel 5) fasst Berechnungsansätze zur Bestimmung des hydraulischen Radius für unterschiedliche Gerinnetypen zusammen.

8.2.1 Schichtabfluss

Die Fließgeschwindigkeit des Schichtabflusses wird mit der GMS-Formel ermittelt ([► Gl. 5.5](#)), wobei ein typischer hydraulischer Radius von 0,2 cm angesetzt wird (übliche Spannweite 0,1–0,6 cm). In Ausnahmefällen, bei denen ein Einschneiden oder Zusammenlaufen des Abflusses erschwert ist, z. B. auf versiegelten Parkplätzen, können bei extremen Regen auch Schichtdicken von 1–2 cm auftreten [[18](#), [19](#)]. Die Rauheitsbeiwerte für Schichtabfluss ([► Tab. 8.2](#)) sind wesentlich niedriger als die von konzentriertem Abfluss in offenen Gerinnen. Dies liegt an den geringen Fließtiefen, wodurch das Mikorelief aus Feststoffen

wie Mulch, Pflanzenteilen oder Steinen den Abfluss stark bremst. Zusätzlich bremsen auch die auftreffenden Regentropfen, da sie Turbulenzen erzeugen und selbst beschleunigt werden müssen. Und auch der erosionsbedingte Feststofftransport verbraucht Energie.

Wegen der rauheitsfördernden Wirkung von Mulch bremsen konservierende Bodenbearbeitungs- und Bewirtschaftungsweisen den Schichtabfluss deutlich ab. Mehr als der Faktor 5 ist möglich ([► Tab. 8.2](#)). Berücksichtigt man weiter, dass durch Verschlämmung der Rauheitsbeiwert um den Faktor 4 ansteigen kann, kann der Unterschied zwischen unbedeckten und stark verschlammten Oberflächen und dicht bedeckten Oberflächen mehr als den Faktor 20 betragen. Es sei aber noch auf eine weitere Wirkung dichter Bodenbedeckung hingewiesen, die sich nicht direkt in der GMS-Gleichung bemerkbar macht. Je höher die ungerichtete Rauheit, z. B. durch Mulch, umso länger wird die Fließstrecke mit schichtförmigem Fließen, da sich mit zunehmender Bodenbedeckung das Wasser weniger leicht eigene Bahnen schaffen und zusammenfließen kann. In eigenen Bahnen fließt Wasser aber immer viel schneller, als wenn es breitflächig fließt. Dies beruht auf dem Einfluss des hydraulischen Radius und weil so niedrige Rauheitsbeiwerte, wie sie beim breitflächigen Abfluss möglich sind, beim konzentrierten Abfluss nie auftreten.

Ist die Größenordnung der Fließgeschwindigkeit des Schichtabflusses bekannt, kann die Fließzeit nach [► Gl. 5.3](#) ermittelt werden. Dazu wird zunächst die Länge des Schichtabflusses l_s pauschal oder mithilfe einfacher Annahmen abgeschätzt. Als pauschaler, eher konservativer Wert werden 30 m empfohlen [[22](#)]. Um dem Einfluss der Rauheit Rechnung zu tragen, wird [► Gl. 8.1](#) vorgeschlagen. Sie ergibt bei stark verschlammten Oberflächen eine typische Fließlänge von 21 m, in den meisten Fällen des Ackerbaus eine Fließlänge

8.2 · Hydraulische Eigenschaften unterschiedlicher Abflusstypen und Fließpfade

Tab. 8.1 Wirkung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen in kleinen Einzugsgebieten. Die Minderung des Wellenscheitels ist meist in Prozent angegeben und bezieht sich auf bestimmte Wiederkehrintervalle von Abflüssen, wie dem 5-, 10-, 20-, 50- oder 100-jährlichen Hochwasser (HQ5, HQ10, HQ20, HQ50 bzw. HQ100), oder Niederschlägen (z. B. N10, N20, N50, usw.). Abweichende Angaben sind gesondert gekennzeichnet. Bei Rückhaltebecken sind Beckenzahl, mittleres und, soweit bekannt, minimales und maximales Volumen (V_{mittel} , V_{min} , V_{max}) angegeben. Weiter wird in Spalte „Art“ zwischen Simulationsergebnissen (S) und Messdaten (M) unterschieden. Die Tabelle ist nach der Gebietsgröße sortiert. Es wurden nur Gebiete <75 km² berücksichtigt. Falls in einer Studie unterschiedliche Maßnahmen untersucht wurden, sind diese in individuellen Zeilen aufgeführt (Daten verändert nach [1]).

Projekt-, Gebiets- oder Gewässerbezeichnung [Quelle]	Art	Maßnahme	Gebietsgröße	Erzielte Scheitel-minderung
Einfluss von Kleinstrückhaltebecken auf Erosion und Wasserqualität in landwirtschaftlichen Einzugsgebieten [2]	M	4 Rückhaltebecken ($V_{\text{mittel}} = 366 \text{ m}^3$, $V_{\text{min}} = 221 \text{ m}^3$, $V_{\text{max}} = 486 \text{ m}^3$)	17 ha	Faktor 3 bei großen natürlichen Regen
Messung und Modellierung von konzentriertem Abfluss in begrünter Abflussmulden [3, 4]	M/S	Zwei verschiedene begrünzte Abflussmulden	Ca. 20 ha	45 % bei N10, bis zu 70 % des Gesamtabflusses
Einfluss von Einzugsgebietsgröße und Landnutzung auf die Effektivität begrünter Abflussmulden	S	Begrünzte Abflussmulden	0,1–1 km ²	40 % unter ungünstigen Bedingungen, 15 % bis N50
Wirkung verschiedener Landnutzungen auf Oberflächenabfluss und Bodenerosion	S	Aufforstung von 14 auf 100 %	6 bzw. 9 km ²	Reduktion des Abflussvolumens 100 % bei HQ5, 20 % bei HQ100
Wirkung verschiedener Landnutzungen auf Oberflächenabfluss und Bodenerosion	S	Vollständige Umstellung auf Direktsaat	6 bzw. 9 km ²	Abflussminderung mindestens 17 % bei N100
DBU-Projekt „Hochwasserschutz und naturschutzgerechte Behandlung umweltschädigter Wälder und Offenlandbereiche der Durchbruchstäler des Osterzgebirges“	S	Vollständige Aufforstung der landwirtschaftlichen Flächen	3,5 km ² , 6,2 km ²	88 % (Gottleuba), 72 % (Trebnitz) bei HQ100
Hochwasser und Naturschutz im Weißeritzkreis (HochNatur) (DBU-Projekt 21278)	S	Umwandlung Ackerflächen in Grünland, Zwischenfruchtanbau, Aufforstung, Komplettbewaldung	16,7 km ² , 7,4 km ²	10–20 % (Höckenbach), 10–30 % (Weißbach) bei HQ100

(Fortsetzung)

Tab. 8.1 (Fortsetzung)

Projekt-, Gebiets- oder Gewässerbezeichnung [Quelle]	Art	Maßnahme	Gebietsgröße	Erzielte Scheitel-minderung
DBU-Projekt „Hochwasser- und Naturschutz im Weißeritzkreis“ (HochNatur)	S	Etablierung von Ufergehölzen	7,4 km ²	~14 % bei HQ5, ~24 % bei HQ100
Reduzierung des Hochwasserabflusses durch unterschiedliche Bodenbearbeitungsverfahren und Bewirtschaftungsformen	S	Begrünte Abflussmulden	7,6 km ²	2 % bei HQ1, HQ10, HQ50 und Q100
Reduzierung des Hochwasserabflusses durch unterschiedliche Bodenbearbeitungsverfahren und Bewirtschaftungsformen	S	Organischer Landbau	7,6 km ²	2 % bei HQ10, 1 % des HQ50
Obere Blies	S	5 Rückhaltebecken ($V_{\text{mittel}} = 10.863 \text{ m}^3$, $V_{\text{min}} = 149 \text{ m}^3$, $V_{\text{max}} = 41.036 \text{ m}^3$)	8,5 km ²	50 % bei HQ 100
DBU-Projekt „Hochwasser und Naturschutz im Weißeritzkreis“ (HochNatur)	S	Renaturierung des Grundbachgebietes	11 km ²	25–30 % bei HQ100
Thalfanger Bach	S	5 Rückhaltebecken ($V_{\text{mittel}} = 25.400 \text{ m}^3$)	17 km ²	20 % bei HQ50
Thalfanger Bach	S	5 Rückhaltebecken ($V_{\text{mittel}} = 13.961 \text{ m}^3$, $V_{\text{min}} = 1800 \text{ m}^3$, $V_{\text{max}} = 50.000 \text{ m}^3$)	17 km ²	30 % bei HQ100
Thalfanger Bach	S	Tieflockerung von Ackerstandorten und Wegebau-Maßnahmen	17 km ²	<5 % bei HQ10
Flurneueinrichtung und Dorferneuerung in der Geisenfelder Gruppe	S	119 Rückhaltebecken ($V_{\text{mittel}} = 250 \text{ m}^3$)	17 km ²	Schutz vor 20-jährlichen Ereignissen
Umsetzung erosionsmindernder und hochwasserreduzierender Maßnahmen im Einzugsgebiet des Stausees Baderitz	M/S	Konservierende Bodenbearbeitung	17 km ²	Direktabflussreduktion um bis zu 50 % bei N5–N10

(Fortsetzung)

Tab. 8.1 (Fortsetzung)

Projekt-, Gebiets- oder Gewässerbezeichnung [Quelle]	Art	Maßnahme	Gebietsgröße	Erzielte Scheitel-minderung
Paar	S	Aufforstung von 31 auf 43 % und 100 %	38 km ³	Reduktion des mittleren Hochwasserabflusses um 8, 38 und 46 %
Umweltverträglicher Hochwasserschutz an der Bauna	S	Gewässerrenaturierung	50 km ²	~ 10 % des HQ1, ~ 20 % des HQ20, ~ 15 % des HQ100
Umweltverträglicher Hochwasserschutz an der Bauna	S	28 Rückhaltebecken (V _{mittel} = 12.050 m ³ , V _{min} = 1500 m ³ , V _{max} = 50.000 m ³)	50 km ²	~ 18 % des HQ5, ~ 10 % bei HQ10-HQ50, ~ 20 % des HQ100
Untersuchung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen, Windacheinzugsgebiet	S	19 Rückhaltebecken, (V _{mittel} = 13.150 m ³ , V _{min} = 1500 m ³ , V _{max} = 50.000 m ³)	65 km ²	14 % des HQ10, 10 % des HQ100
Untersuchung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen, Windacheinzugsgebiet	S	Auwaldrenaturierung an den Windachzuflüssen	65 km ²	6 % des HQ10, 5 % des HQ100
Untersuchung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen, Windacheinzugsgebiet	S	Naturnahe Mischwoldaufforstung von 25 auf 40 % des Einzugsgebiets	65 km ²	20 % des HQ10, 3–11 % des HQ100
Untersuchungen an der Oberen Elsenz, Kraichgau	S	Rückhaltebecken (V _{mittel} = 13.150 m ³)	75 km ²	20–35 % des HQ100

um die 50 m, bei Querbearbeitung und hoher Mulchbedeckung bis zu 100 m, ebenso im Wald.

$$l_s = \frac{200}{\sqrt{k}} \quad (8.1)$$

mit

l_s - Pfadlänge des Schichtabflusses (m)

Für detaillierte Untersuchungen lässt sich l_s nach Starkregenereignissen im Feld oder mit Luftbildern anhand von Änderungen in der Struktur der Bodenoberfläche abschätzen [23]. Von Schichtabfluss überströmte Bereiche zeichnen sich üblicherweise durch eine ein-

heitlich glatte, oft auch verschlammte Oberfläche aus. Bündelt sich der Schichtabfluss zu flachem konzentriertem Abfluss, bilden sich auf der Bodenoberfläche Rillen, die den Abfluss zusammenführen. Die Länge des Schichtabflusses ergibt sich daher aus der mittleren Entfernung zwischen der Wasserscheide und dem Auftreten der ersten Rillen [23].

Bei Dammkulturen beschränkt sich der flächenhafte Abfluss auf die Dammlanken. Die Fließstrecke bleibt daher im Bereich weniger Dezimeter und kann vernachlässigt werden. Entsprechend bedeutender ist der flache konzentrierte Abfluss.

Tab. 8.2 Rauheitsbeiwerte k für Schichtabfluss und für flachen konzentrierten Abfluss mit Fließtiefen ≤ 3 cm. Werte für konzentrierten Abfluss > 5 cm sind **Tab. 5.1** zu entnehmen. Für Fließtiefen zwischen 3 und 5 cm ist zwischen den Werten beider Tabellen zu interpolieren

Bedeckung/Bearbeitung	Bodenbedeckung ^a (%)	k	Quelle
Asphalt, Betondecken, verschlammte Oberflächen		91	[20]
Wassergebundene Decken		50	[20]
Bestellte Ackerflächen	<5	17	[21]
	5–30	12	[21]
	30–70	5	[21]
	>70	3	[21]
Querbearbeitung ^b	<5	12	[21]
	5–30	8	[21]
	30–70	4	[21]
	>70	2	[21]
Kastenförmig ausgespülte Erosionsrinnen in Ackerflächen		25	Expertenschätzung
Pflugfurche (frisch ... abgesetzt)		2 ... 10	[21]
Grünland (Sommer... Winter)		4 ... 12	Expertenschätzung
Sukzessionsflächen, Hochstaudenfluren (dichter ... spärlicher Unterwuchs)		5 ... 10	Expertenschätzung
Wälder und Forsten (dichte ... spärliche Streu-/Krautschicht)		2 ... 6	[21]

^aSumme von direkt auf der Oberfläche aufliegenden Pflanzenteilen, Mulch und Steinen. Rückstände mit einem Abstand > 5 cm zur Bodenoberfläche beeinflussen den Schichtabfluss nicht

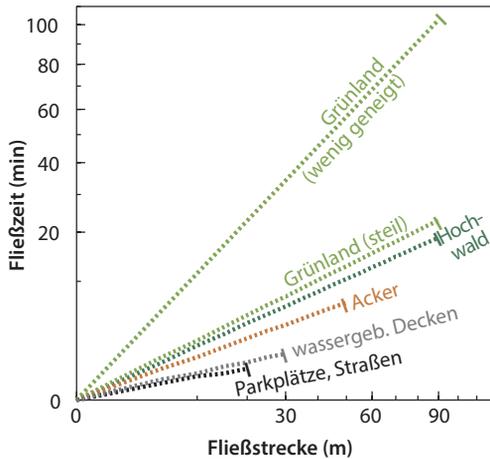
^bÜber einen mittleren Querbearbeitungsfaktor von 0,68 aus dem Wert für bestellte Ackerflächen geschätzt (abgeleitet aus Tab. 5 in [21])

Zur Illustration der geschilderten Zusammenhänge zeigt **Abb. 8.1** mittlere Fließzeiten des Schichtabflusses für verschiedene Oberflächenbeschaffenheiten als Funktion der Fließstrecke. Dies erlaubt eine überschlägige Abschätzung typischer Effekte unterschiedlicher Landnutzungen, die sich um den Faktor 100 in der Fließzeit des flächenhaften Abflusses unterscheiden können (vergleiche die Endpunkte der Kurven in **Abb. 8.1**).

8.2.2 Flacher konzentrierter Abfluss (Rillenabfluss)

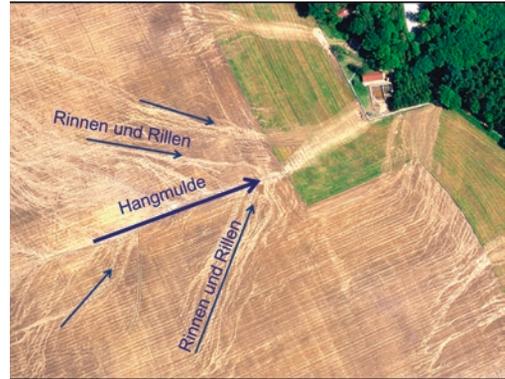
Flacher konzentrierter Abfluss fließt in fein verästelten Rillen und Rinnen oder gebündelt in Hangmulden (**Abb. 8.2**). Landnutzung und Bodenbedeckung haben einen starken Einfluss auf die Ausbildung der Fließpfade. Rinnen und Rillen bilden sich erosionsbedingt nur auf Ackerflächen aus. Auf Grünland oder im Wald fehlen sie meist und Schichtabflusses geht dort direkt in Hangmuldenabfluss über.

8.2 · Hydraulische Eigenschaften unterschiedlicher Abflusstypen und Fließpfade



■ **Abb. 8.1** Typische Längen des schichtförmigen Fließens bei unterschiedlichen Oberflächen (siehe Endpunkte der Kurven) und Fließzeiten, die sich daraus zusammen mit den unterschiedlichen Rauheiten ergeben. Beide Achsen sind logarithmisch skaliert, weil die Flächennutzung die Fließstrecke und noch mehr die Fließzeit stark beeinflusst und sich aus beidem ein weiter Bereich ergibt. Die angenommenen Gefälle (J in %) und Rauheitsbeiwerte (k in $m^{1/3} s^{-1}$) betragen für Grünland flach ($J = 1$, $k = 5$), Grünland steil ($J = 20$, $k = 5$), Hochwald ($J = 30$, $k = 5$), Acker ($J = 8$, $k = 16$), wassergebundene Decken ($J = 3$, $k = 50$) und Parkplätze, Straßen ($J = 3$, $k = 91$). Der hydraulische Radius wurde einheitlich mit $0,3$ cm angesetzt. Die Länge der Fließstrecke wurde nach ► Gl. 8.1 bestimmt

Rillen und Rinnen in Ackerflächen sind üblicherweise kastenförmig ausgespült, $2\text{--}12$ cm tief und $5\text{--}30$ cm breit. Wie beim Schichtabfluss kann die mittlere Strömungsgeschwindigkeit mit der GMS-Formel (► Gl. 5.5) abgeschätzt werden. Für allgemeine Bemessungsfragen kann ein mittlerer hydraulischer Radius von $R = 0,04$ m angenommen werden (Fließtiefe = 8 cm, Wasserspiegelbreite = 20 cm). Der hydraulische Radius ist damit um ca. den Faktor 10 größer als beim Schichtabfluss. Entsprechend schneller fließt der Abfluss in Rillen und Rinnen. Maßnahmen, die das Auftreten von Rillen und Rinnen verzögern (dichte ober-



■ **Abb. 8.2** Zeugnisse von flachem, konzentriertem Abfluss in fein verästelten, flächig auftretenden Rinnen und Rillen, der in der Hangmulde (Tiefenlinie) zusammenfließt (Quelle: W. Bauer, Agroluftbild, 1998, Aufnahme aus dem Landkreis Passau)

flächennahe Durchwurzelung > dichte Mulchbedeckung > hohe Aggregatstabilität) bremsen daher wesentlich den Abfluss des Gesamtanges. Für typische Oberflächen, bei denen Rinnen und Rillen auftreten, ergeben sich die mittleren Fließgeschwindigkeiten in Abhängigkeit von der Neigung nach ■ Tab. 8.3.

Ist die Fließgeschwindigkeit bekannt, lässt sich die Fließzeit nach ► Gl. 5.3 ermitteln. Wie beim Schichtabfluss ist hierfür die Länge des Fließpfades erforderlich. Typischerweise ist das die Entfernungen zwischen dem ersten Auftreten von Rillen bzw. Rinnen und der Flurstücksgrenze oder einer Hangmulde. Gliedert sich auf langen Hängen der Abfluss in Passagen von Schicht-, Rinnen- und Hangmuldenabfluss, kann als Faustwert für die Fließstrecke in Rinnen und Rillen die doppelte Schichtabflusslänge angesetzt werden, da auch die Ausbildung von Rinnen und Rillen primär von der Rauheit der Oberfläche abhängt.

$$l_R = 2 \cdot l_S \quad (8.2)$$

mit

l_R - Pfadlänge von Rinnen und Rillen (m)

Tab. 8.3 Formeln zur überschlägigen Bestimmung der Fließgeschwindigkeit des Abflusses in Rinnen und Rillen für verschiedene Oberflächen in Abhängigkeit von der Neigung (J in %) und für einen typischen hydraulischen Radius von 0,04 m. Nur bei Dammkulturen wurde ein hydraulischer Radius von 0,025 m angenommen, da das Einzugsgebiet jeder Furche klein bleibt und die Form der parabelförmigen Rinnen durch das Dammformgerät vorgegeben ist

Oberfläche	Rauheitsbeiwert ($m^{1/3} s^{-1}$)	Geschwindigkeitsformel ($m s^{-1}$)
Schotterwege	45	$v = 5,6J^{1/2}$
Acker	30	$v = 3,8J^{1/2}$
Dammkulturen	30	$v = 2,7J^{1/2}$
Wald	10	$v = 1,3J^{1/2}$

8.2.3 Abfluss in Hangmulden

Konzentriert sich der Abfluss weiter in Hangmulden, spülen sich auf schwach bedeckten Ackerstandorten rechteckige Profile aus. Typische hydraulische Radien betragen dort $R=0,10$ m. Auf Grünland, Ackerstandorten mit dichter Bodenbedeckung oder im Wald ist die Bodenoberfläche besser vor einem Einschneiden geschützt oder tritt wenig Oberflächenabfluss auf. Dort sind die Tiefenlinien üblicherweise breite, flache Parabeln mit etwas geringeren hydraulischen Radien ($R=0,09$ m). In angelegten und hydraulisch sehr rauen, begrünten Abflussmulden (engl. grassed waterways) (siehe auch ▶ Abschn. 6.3) kann ein hydraulischer Radius von $R=0,07$ m (Breite 5 m, Tiefe 0,11 m) angesetzt werden. Daraus resultieren einfache Schätzgleichungen zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit in Hangmulden (Tab. 8.4).

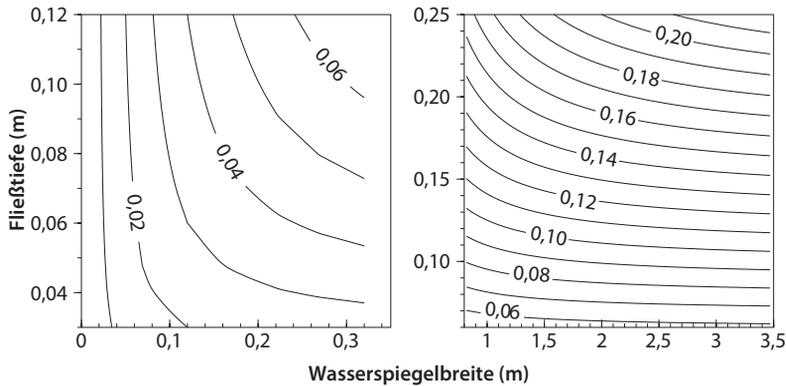
Ist die Fließgeschwindigkeit bekannt, lässt sich die Fließzeit wieder nach ▶ Gl. 5.3 ermitteln. Die dazu erforderliche Länge der Hangmulde kann oft anhand der Topographie abgeschätzt werden. Alternativ kann sie über die Differenz von Hanglänge – Schichtabflusslänge – Länge des Rinnen- und Rillenabflusses angenähert werden. Oft werden Längen von mehreren hundert Metern erreicht.

Zur Untersuchung spezieller Fälle oder wenn Oberflächenbeschaffenheit oder Fließpfadgeometrie von den genannten Annahmen abweichen, gilt die allgemeine GMS-Formel zur Bestimmung der mittleren Fließgeschwindigkeit (▶ Gl. 5.5) mit den Rauheitsbeiwerten aus Tab. 5.1. Der hydraulische Radius ist entsprechend der Gleichungen in Abb. 8.4 zu bestimmen oder nach Abb. 8.3 abzuschätzen.

Für Dammkulturen (z. B. Hopfen, Kartoffel, Spargel) entfällt der flächenhafte Abfluss und die Dämme erzwingen von

Tab. 8.4 Formeln zur überschlägigen Berechnung der Fließgeschwindigkeit in Hangmulden und Tiefenlinien für verschiedene Oberflächen in Abhängigkeit von der Neigung (J) und für typische hydraulische Radien

Oberfläche	Rauheitsbeiwert ($m^{1/3} s^{-1}$)	Geschwindigkeitsformel ($m s^{-1}$)
Acker	30	$v = 6,6J^{1/2}$
Grünland	25	$v = 5,0J^{1/2}$
Begrünte Abflussmulde	15	$v = 3,0J^{1/2}$
Wald	10	$v = 2,0J^{1/2}$



■ **Abb. 8.3** Hydraulische Radien in m rechteckiger Rinnen und Rillen (links) und Hangmulden (rechts) in Abhängigkeit von Fließtiefe (m) und Wasserspiegelbreite (m) nach den Gleichungen aus ■ Abb. 8.4. Für begrünte Abflussmulden gelten aufgrund der teilweise hohen Rauheit, der parabolischen Querschnitte und der in Folge größeren Wasserspiegelbreite andere Werte

Anfang an einen flachen, konzentrierten, linienhaften Abfluss. Solange die Dämme nicht brechen, bleibt das Einzugsgebiet jeder Dammfurche allerdings klein, weshalb der hydraulische Radius (0,02 m) typischerweise etwas geringer ist als in erosionsbedingten Rinnen. Dennoch fließt der Oberflächenabfluss in Dammkulturen wegen des Wegfalls des schichtförmigen Fließens schneller als in eben angebauten Kulturen, wenn die Dämme in Gefällerrichtung verlaufen. Wesentlich günstiger und ein hervorragendes Mittel zur Minderung der Abflussgeschwindigkeit stellen Dammkulturen dar, bei denen die Dammrichtung von der Gefällerrichtung abweicht, weil dann das Gefälle entlang der Fließstrecke abnimmt. Je stärker die Abweichung von der Gefällerrichtung wird, umso besser; allerdings dürfen die Dämme nicht quer zum Hang angelegt werden, sondern sollten mindestens noch eine Neigung der Fließstrecke von 1 % haben. Bei quer angelegten Dämmen besteht die Gefahr, dass sich das Wasser hinter dem Damm staut, ihn an einer Stelle durchbricht und dann auch alle unterhalb liegenden Dämme durchbrochen werden. Dieses Risiko besteht insbesondere dann, wenn die Dämme eine Hangmulde durchlaufen, weil sie dann in der Tiefenlinie zwangsweise quer zum Gefälle angeordnet sind. Wenn Hangmulden nicht

vermieden werden können, muss bei Dammkulturen, die zur Gefällerrichtung gedreht sind, in der Hangmulde unbedingt eine dauerhaft begrünte Abflussmulde angelegt werden.

8.2.4 Abfluss in Gräben, teilgefüllten Rohren und anderen offenen Gerinnen

Für den Abfluss in Gräben, Bächen und nicht vollständig gefüllten Rohren gelten die allgemeine GMS-Formel (► Gl. 5.5) und die Weg-Zeit-Geschwindigkeitsgleichung (► Gl. 5.3). Zur Bestimmung von Fließzeit und -geschwindigkeit ist zunächst wieder der Fließpfad zu bestimmen und in Abschnitte mit einheitlichen hydraulischen und geometrischen Eigenschaften zu unterteilen. Durchflossene Querschnittsfläche, benetzter Umfang und hydraulischer Radius ergeben sich aus den Ansätzen in ■ Abb. 8.4.

Bei Verrohrungen sind der Verlauf und die verwendeten Materialien oft unbekannt. Zur Bestimmung der Fließpfadlänge wird empfohlen, die Länge aus der direkten Entfernung in Luftlinie zwischen Rohreinlass und Auslass zu verwenden. Daraus ergibt sich auch die mittlere Neigung. Wenn der Leitungstyp nicht erkenn-



Gerinnequerschnitt	Fläche (A)	Benetzter Umfang (U)	Hydraulischer Radius (R)	Wasserspiegelbreite (B)	Fließgeschwindigkeit (%)
	$\frac{D \cdot U}{4} - B \cdot \frac{D - 2 \cdot h}{4}$	$D \cdot \cos^{-1}\left(1 - 2 \cdot \frac{h}{D}\right)$	$\frac{\frac{1}{4} \cdot \left(U - B \cdot \left(1 - 2 \cdot \frac{h}{D}\right) \right)}{\cos^{-1}\left(1 - 2 \cdot \frac{h}{D}\right)}$	$2 \cdot \sqrt{h \cdot (D - h)}$	100
	$b \cdot h$	$b + 2 \cdot h$	$A = \frac{b \cdot h}{b + 2 \cdot h}$	b	53
	$\frac{1}{2} \cdot (B + b) \cdot h$	$b + 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{B-b}{2}\right)^2 + h^2}$	$\frac{h/2 \cdot (B + b)}{b + 2 \cdot \sqrt{\left(\frac{B-b}{2}\right)^2 + h^2}}$	$b + 2 \cdot m \cdot h$	52
		mit: $h = \frac{B - b}{2 \cdot m}$	oder: $\frac{(b + m \cdot h) \cdot h}{b + 2 \cdot h \cdot \sqrt{1 + m^2}}$		
	$\frac{2}{3} \cdot B \cdot h$	$B + \frac{8 \cdot h^2}{3 \cdot B}$	$\frac{\frac{2}{3} \cdot B \cdot h}{B + \frac{8 \cdot h^2}{3 \cdot B}}$	B	41
		mit: $\varphi < 1^{(1)}$	mit: $\varphi < 1^{(1)}$		

$^{(1)} \varphi = (4 \cdot h) / B$; für $\varphi > 1$ gilt $U = B/2 \cdot (\sqrt{1 + \varphi^2} + 1) / \varphi \cdot \ln(\varphi + \sqrt{1 + \varphi^2})$ und $R = 2 \cdot B \cdot h / (3 \cdot U)$

Abb. 8.4 Formeln zur Bestimmung von durchflossener Querschnittsfläche, benetztem Umfang und hydraulischem Radius (nach [28–30]). Zur Orientierung, welche Form zu einem hohen Hochwasserscheitel wegen einer hohen Fließgeschwindigkeit führt, ist in der letzten Spalte eine relative Fließgeschwindigkeit angegeben. Bei der Berechnung wurden typische Breiten und Böschungsneigungen sowie ein einheitliches Gefälle und einheitliche Rauheitswerte (Ausnahme Rohr) angenommen und die Wassertiefe so eingestellt, dass in allen Fällen die gleiche Wassermenge pro Zeiteinheit abgeleitet, also die Entwässerung nicht beeinträchtigt wird. Für die Ermittlung der genannten Parameter kann auch auf frei verfügbare, internetbasierte Hydraulikrechner zurückgegriffen werden, z. B. Gerinnehydraulik online berechnen. ▶ <https://www.peacesoftware.de/einigewerte/gerinnehydraulik.html>

bar ist, können die Rauheitsbeiwerte von zusammengesetzten Betonrohrleitungen (z. B. für Rohrverbindungen unter Feldzufahrten oder bei Wasserführungen durch Straßen), von (perforierten) PVC-Rohren (neuere Drainagen) oder gebranntem Ton (alte Drainagen) angenommen werden. Die Rauheitsbeiwerte typischer Rohre liegen daher zwischen 70 und 95, wodurch Rohre besonders glatt sind, und der Abfluss in Rohren besonders schnell werden kann. Typische Nennweiten (DN) für Wasserführungen betragen 300 bis 500 mm, Drainagen sind meist kleiner als 200 mm.

Methoden zur Bestimmung der Fließzeit in kleinen Bächen und Flüssen sind in der Literatur bereits gut und umfangreich beschrieben [24]. Für Gewässer existieren zudem fortgeschrittene Verfahren zur Bestimmung von Rauheitsbeiwerten, wie die Anpassungsverfahren nach Einstein/Horton [25], Cowan [26] oder Sellin [27], die es ermöglichen, Rauheitsbeiwerte für gegliederte Gewässerbetten oder heterogene Fließabschnitte abzuschätzen.

8.2.5 Fließzeit durch Wasserkörper und Feuchtgebiete

Die Fließzeit durch Seen, Weiher und Teiche ist relevant, wenn die Konzentrationszeit eines Gebietes ermittelt werden muss und der Fließpfad durch Wasserkörper verläuft. Für Seen mit großem Volumen und hoher Wassertiefe ist dazu die Rückhalterwirkung (Retention) zu bestimmen. Für kleine Weiher und Teiche ist diese oft vernachlässigbar und es kann angenommen werden, dass der Wassertransport durch den Wasserkörper augenblicklich erfolgt (Prinzip der kommunizierenden Röhre), da die Fließstrecke kurz, der hydraulische Radius groß und die Rauheit gering sind. Es wird dann vereinfachend davon ausgegangen, dass jede Erhöhung des Zuflusses eine

unmittelbare Erhöhung des Wasserspiegels verursacht, wodurch im selben Augenblick die gleiche Wassermenge durch den Abfluss abgegeben wird. Die Fließzeit durch den Wasserkörper wird daher gleich null gesetzt. Bei der Bestimmung der Konzentrationszeit eines Einzugsgebietes können kleine Teiche und Weiher daher ignoriert und die Fließzeit bis zum Zu- bzw. ab dem Ablauf nach der Standardmethode mit der GMS-Gleichung bestimmt werden.

Für große Wasserkörper wie Seen kann die Fließzeit nach [22] mithilfe der Wellengeschwindigkeitsgleichung (8.3) und der Weg-Zeit-Geschwindigkeitsgleichung angenähert werden.

$$v_w = \sqrt{g \cdot D_m} \quad (8.3)$$

mit

v_w - Wellengeschwindigkeit (m s^{-1})

g - Erdbeschleunigung ($9,81 \text{ m s}^{-2}$)

D_m - Mittlere Tiefe des Wasserkörpers (m)

Fließgeschwindigkeiten nach der Wellengeschwindigkeitsgleichung sind allgemein sehr hoch. Wirkt der See als Speicher oder Rückhalterraum, weil der Wasserstand gezielt geändert wird, werden Speicherroutingverfahren notwendig, um den Einfluss auf eine Hochwasserwelle zu berechnen. Solche Seen finden sich aber normalerweise nicht in der ländlichen Flur. Sie erfordern wegen der Größe ihres Einzugsgebietes eine Betrachtung auf anderer Maßstabsebene. Die Wellengeschwindigkeitsgleichung kann auch zur Bestimmung der Fließzeit durch Feuchtgebiete verwendet werden, wenn diese über große freie Wasserflächen verfügen.

8.2.6 Bestimmung des hydraulischen Radius

Zur Bestimmung des hydraulischen Radius werden die Geometrie des Fließpfades und die Fließtiefe benötigt. Die Fließtiefe hängt

wiederum von der Geometrie des Fließpfades und der Abflusshöhe ab. ■ Abb. 8.4 fasst für typische Querschnittsformen die Gleichungen zur Berechnung von Querschnittsfläche, benutztem Umfang und hydraulischem Radius zusammen.

8.3 Das Verhältnisverfahren zur Bestimmung des Scheitelabflusses

Eines der ältesten und einfachsten Verfahren zur Bestimmung des Scheitelabflusses ist das Verhältnis- oder Zeitbeiwertverfahren. Es ist im englischen Sprachraum als „rational method“ Ende des 19. Jahrhunderts bekannt geworden [32]. Variationen des Verfahrens sind weltweit verbreitet und werden aufgrund ihrer einfachen Handhabung auch heute noch zur Ermittlung von Scheitelabflüssen verwendet, z. B. bei der Dimensionierung von Kanalnetzen oder von Entwässerungsmaßnahmen an technischen Bauwerken [33].

Beim Verhältnisverfahren wird davon ausgegangen, dass es hinreichend ist, die Niederschlagsintensität als konstant anzunehmen, und dass die Niederschlagsdauer der Konzentrationszeit des Einzugsgebietes entspricht. Die (mittlere) Regenintensität wird als kritische Regenintensität bezeichnet (Erläuterung s. u.). Unter stationären Bedingungen ergibt sich der zu erwartende (ungünstigste) Scheitelabfluss (q_p) an einem definierten Gerinnequerschnitt dann aus dem Produkt von kritischer Regenintensität (i_D), Einzugsgebietsfläche (A) und einer landnutzungsspezifischen Verhältniszahl (σ).

$$q_p = 2,78 \cdot \sigma \cdot i_D \cdot A_{EZG} \quad (8.4)$$

wobei

q_p - Scheitelabfluss ($l \cdot s^{-1}$)

σ - Verhältniszahl (-)

i_D - Kritische Regenintensität ($mm \cdot h^{-1}$)

A_{EZG} - Einzugsgebietsfläche (ha)

2,78 - Faktor zum Umrechnen der Einheiten

Die Verhältniszahl σ ist dimensionslos und variiert zwischen 0 und 1. Trotz identischem Wertebereich und identischer Dimension entspricht σ nicht dem volumetrischen Abflussbeiwert Ψ . Während der Abflussbeiwert die Abflussmenge relativ zur Niederschlagshöhe angibt, ergibt sich σ beim Umstellen von ► Gl. 8.4 aus dem Verhältnis von Scheitelabflussrate zu Regenintensität multipliziert mit überregener Fläche. Konzeptionell kann man sich die Verhältniszahl σ als den (undurchlässigen) Teil der Einzugsgebietsfläche vorstellen, der Abfluss bildet. Nach [32] kann σ entweder direkt durch Abschätzen des relevanten Flächenanteils oder aus Literaturwerten ermittelt werden (■ Tab. 8.5). Letztere gelten für den ungünstigsten Fall, bei dem die Niederschlagsdauer mit der Konzentrationszeit des Einzugsgebietes übereinstimmt. Entsprechend der Definition von σ ist die Massenbilanz beim Verhältnisverfahren nicht geschlossen. Daher es ist nicht möglich, mit der Methode auf das Wellenvolumen bzw. den volumetrischen Abflussbeiwert zu schließen. Dieser und weitere, mit dem Verhältnisverfahren verbundene Fallstricke, werden von [34] erläutert.

Das Verhältnisverfahren dient dazu, den für ein bestimmtes Wiederkehrintervall höchstmöglichen Scheitelabfluss zu bestimmen. Daher wird als kritische Regenintensität die maximal zu erwartende Niederschlagsrate angesetzt, die bei einem Regen auftreten kann, dessen Dauer (D) der Konzentrationszeit des Gebietes entspricht. Diese Annahme berücksichtigt den Umstand, dass die Niederschlagsintensität mit zunehmender Regendauer immer geringer wird. Zur Bestimmung der kritischen Regenintensität muss daher die Konzentrationszeit (t_C) bekannt sein. Dabei sollte t_C nach der Geschwindigkeitsmethode bestimmt werden, die in ► Abschn. 5.3.3 beschrieben ist.

Mithilfe von t_C kann die kritische Regenintensität aus KOSTRA-Daten [36] abgeleitet werden. Dazu wird für ein gewähltes Wiederkehrintervall und für die nächsthöhere

8.3 · Das Verhältnisverfahren zur Bestimmung des Scheitelabflusses

■ **Tab. 8.5** Verhältniszahlen (σ) ausgewählter Landnutzungstypen. Die angegebenen Werte wurden durch Optimierung ermittelt und gelten nur für den Fall, dass die Niederschlagsdauer der Konzentrationszeit des Gebietes entspricht. Teilweise beziehen sich die Werte auf die hydrologische Bodengruppe (HBG) C (siehe ► Abschn. 8.6). Für HBG A und B können Abschläge und für HBG D können Zuschläge gemacht werden (0,05 je Klasse). Für Ackerflächen sind jeweils zwei Werte angegeben, um abflussmindernde Anbaubedingungen (-), wie Querbearbeitung oder Direktsaatverfahren, von abflussfördernden Bedingungen (+) zu unterscheiden. Verhältniszahlen anderer Landnutzungstypen und HBGs können der Literatur entnommen werden z. B. [35]

Landnutzung	Verhältniszahl (-)
Straßen und Parkplätze (Beton, Asphalt)	0,9
Stadtkerne mit dichter Versiegelung	0,7 – 0,9
Wohngebiete mit aufgelockerter Bebauung	0,3 – 0,7
Weideland (HBG C)	0,25
Reihenkulturen (HBG C)	0,65 ⁻ 0,70 ⁺
Getreide (HBG C)	0,25 ⁻ 0,45 ⁺
Wiesen (HBG C)	0,45
Wald (HBG C)	0,33 – 0,59

Dauerstufe von t_c , sofern $t_c < 2$ h ist, die Regensumme ermittelt. Für $t_c > 2$ h gilt die Dauerstufe, die t_c am nächsten kommt. Der Quotient aus Regenmenge und Dauerstufe liefert die kritische Regenintensität. Ein Überblick über verschiedene, für weite Teile Süddeutschlands typische Größenordnungen von i_D ist in ■ Tab. 8.6 gegeben.

Dem Verhältnisverfahren liegen die Annahmen zugrunde, dass Verhältniszahl, Niederschlagsintensität und Konzentrationszeit innerhalb des Einzugsgebietes konstant sind, weswegen sich der größte Abflussscheitel bei dem Regen einstellt, dessen Dauer der Konzentrationszeit entspricht. Praxiserfahrungen zeigen, dass diese Annahmen typischerweise nur in kleinen (<100 ha), einheitlich strukturierten Gebieten (z. B. gleichmäßige Verteilung versiegelter Fläche, homogene Fließpfadtopologie) mit Konzentrationszeiten zwischen 10 und 300 min zutreffen [35]. Hohe Unsicherheiten und Abweichungen in der Größe von 50 % und mehr gegenüber anderen Verfahren treten beim Verhältnisverfahren mitunter

deswegen auf, da Verluste und Gebietsrückhalt vernachlässigt werden und keine spezifische Ermittlung des abflusswirksamen Niederschlags erfolgt.

Die übliche Anwendung des Verfahrens gliedert sich in folgende Arbeitsschritte:

1. Bestimmung der Einzugsgebietsfläche A_{EZG}
2. Bestimmung der Konzentrationszeit t_c
3. Prüfen, ob die zugrundeliegenden Annahmen der Verhältnismethode die zu untersuchende Situation einschließen
4. Bestimmung der kritischen Niederschlagsintensität i_D
5. Auswahl der Verhältniszahl
6. Berechnung des Scheitelabflusses

8.3.1 Anwendungsbeispiel

Es soll der ungünstigste Scheitelabfluss am Fuß einer 5 ha großen, quadratischen Ackerfläche mit einem mittleren Gefälle von 5 % für einen Starkregen mit einem 30-jährigen Wiederkehrintervall ermittelt

Tab. 8.6 Kritische Regenintensitäten (i_D) in mm h^{-1} für unterschiedliche Wiederkehrintervalle und Niederschlagsdauern im Bereich der für kleine Einzugsgebiete typischen Konzentrationszeiten; berechnet nach KOSTRA [36]. Die dargestellten Werte können näherungsweise für weite Teile Süddeutschlands verwendet werden. Davon ausgenommen sind Mittelgebirgslagen und Voralpenraum bzw. die Alpen, wo im Mittel etwa 10 % bzw. 17 % größere Werte anzusetzen sind

Niederschlagsdauer D (min)	Wiederkehrintervall			
	10 a	20 a	30 a	50 a
10	116	135	146	160
20	70	81	87	95
30	55	63	68	75
60	35	41	44	48

8

werden. Anhand der Geschwindigkeitsmethode wird die Konzentrationszeit ohne abflussmindernde Maßnahmen auf 24 min geschätzt (Ermittlung nicht dargelegt). Mit abflussmindernden Maßnahmen (Mulchsaat und Querbearbeitung) erhöht sich die Konzentrationszeit auf rund 54 min.

Für die Abschätzung des Scheitelabflusses wird anhand dieser Konzentrationszeiten die kritische Niederschlagsdauer für den ersten Fall mit 30, für den zweiten Fall mit 60 min angesetzt. Nach KOSTRA (vgl. Tab. 4.3) ergibt sich für diese Regendauern und eine

Wiederkehrzeit von 30 Jahren eine Regenmenge von 35 mm bzw. 42 mm. Diese Werte entsprechen mittleren Niederschlagsintensitäten von 70 bzw. 42 mm h^{-1} . Aus Tab. 8.5 ergibt sich im ersten Fall σ mit 0,70, im zweiten Fall mit 0,65 beim Anbau von Reihenkulturen auf einem Standort der hydrologischen Bodengruppe C. Im ersten Fall resultiert ein Scheitelabfluss von 680 l s^{-1} (Tab. 8.7). Im zweiten Fall beträgt der Scheitelabfluss 380 l s^{-1} , ist also durch Querbearbeitung und Mulchsaat etwa 50 % niedriger.

Tab. 8.7 Abschätzung des höchsten Scheitelabflusses unterhalb einer 5 ha großen Ackerfläche mithilfe der Verhältnismethode für den ersten der in Abb. 3.1 genannten Fälle

Größe	Einheit	Wert	Kommentar
Gebietsgröße A	ha	5	Gegeben
Konzentrationszeit t_c	min	24	Über die Geschwindigkeitsmethode ermittelt
KOSTRA-Niederschlagsdauerstufe D	min	30	KOSTRA-Dauerstufe, die der ermittelten Konzentrationszeit am nächsten kommt; bei größeren Differenzen kann interpoliert werden
Bemessungsniederschlagshöhe N_B	mm	35	Aus KOSTRA-Daten für einen 30-jährlichen Regen
Kritische Niederschlagsintensität i_D	mm h^{-1}	70	Aus N_B und D berechnet
Verhältniszahl σ	–	0,65	Wert aus Tab. 8.5
Scheitelabflusswert q_p	l s^{-1}	680	Nach Gl. 8.4 berechnet

8.3.2 Das erweiterte Verhältnisverfahren

Das erweiterte Verhältnisverfahren (engl. „modified rational method“) erlaubt die Konstruktion einfacher Ganglinien auch bei Regen, deren Dauer von der Konzentrationszeit abweichen, während das normale Verhältnisverfahren nur die maximale Scheitelhöhe schätzt. Der Ansatz wurde entwickelt, um das Verhältnisverfahren zur Dimensionierung von Rückhaltemaßnahmen in Siedlungsgebieten verwenden zu können [35, 37]. Die Anwendung des Verfahrens auf 1400 Abflussereignisse aus 80 verschiedenen Einzugsgebieten in den USA zeigte, dass der Ansatz gleichwertige Ergebnisse wie andere Bemessungsansätze liefern kann, vorausgesetzt, dass der abflusswirksame Niederschlag für alle Ansätze gleich ermittelt wird [38].

Die Modellvorstellung des erweiterten Verhältnisverfahrens beruht darauf, dass bei Niederschlägen, deren Dauer die Konzentrationszeit des Gebietes übersteigt, höhere Abflussvolumina, aber kleinere Wellenscheitel entstehen müssen. Dieser Zusammenhang ergibt sich daraus, dass die Intensität eines Regen mit zunehmender Dauer zurückgeht. Umgesetzt wurde diese Vorstellung, indem die Ganglinie eines Regens

der Dauer $D = t_C$ als gleichschenkliges Dreieck mit einer Basislänge von $2 \cdot t_C$ definiert wurde (Abb. 8.5a). Die Scheitelanstiegs- und Wellenablaufzeit entsprechen also t_C , wodurch von einem sehr geringen Retentionsvermögen im Einzugsgebiet ausgegangen wird (zum Vergleich, beim Dreiecksganglinienverfahren werden, je nach Landnutzung, Wellenablaufzeiten in der Größenordnung von bis zu $2 t_C$ und damit eine asymmetrische Wellenform unterstellt, siehe Abschn. 3.2.1).

Übersteigt die Regendauer D die Konzentrationszeit t_C , resultiert eine trapezförmige Ganglinie (Abb. 8.5b). Ihr Scheitelabfluss wird mit dem normalen Verhältnisansatz (Gl. 8.4) bestimmt. Allerdings wird die kritische Niederschlagsintensität i_D nun für einen Regen mit der Dauer D bestimmt, wobei D größer ist als t_C . Dadurch wird die kritische Intensität und damit auch der Scheitelabfluss kleiner als bei $D = t_C$. Die Scheitelanstiegszeit beträgt weiterhin t_C . Der Scheitel wird über eine Zeitspanne von $(D - t_C)$ gehalten und fällt dann wieder über einen Zeitraum, der t_C entspricht, auf null ab. Für den Fall, dass die Regendauer kleiner als Konzentrationszeit ist, resultiert ebenfalls eine trapezförmige Ganglinie (Abb. 8.5c). Durch das Auseinanderziehen der Welle, das im Trapez zum Ausdruck kommt, ist

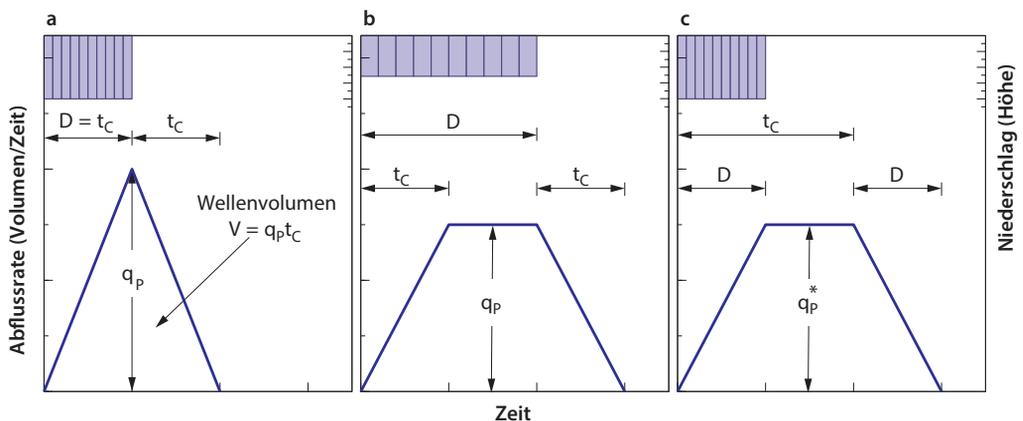


Abb. 8.5 Darstellung verschiedener Ganglinien (blaue Dreiecke und Trapeze), die aus dem modifizierten Verhältnisansatz resultieren, wenn die Regendauer (D) der Konzentrationszeit (t_C) des Gebietes entspricht (a), wenn $D > t_C$ (b) und für den Fall $D < t_C$ (c). Der Regen ist schematisiert durch die vertikalen Balken dargestellt

der Scheitelabfluss wie schon bei den langen Regen relativ gering, obwohl bei kurzen Regen hohe Intensitäten möglich sind. In diesem Fall kommt es zu einem Auseinanderziehen, weil zu keinem Zeitpunkt das gesamte Gebiet Abfluss liefert und die Lieferung je nach Entfernung des Liefergebietes zum Gewässer zu unterschiedlichen Zeiten im Gewässer ankommt. Der ungünstigste Fall ist daher $D = t_C$, weil der die höchste Intensität liefert, bei dem zum Zeitpunkt D (genau am Regenende) auch das gesamte Gebiet liefert und so der höchste Scheitelabfluss entsteht.

Im erweiterten Verhältnisverfahren wird dieser Zusammenhang bei kurzen Regen umgesetzt, indem der Scheitelabfluss (q_P^*) um das Verhältnis von D/t_C vermindert wird (► Gl. 8.5), da zum Zeitpunkt D erst ein Teil des Einzugsgebietes liefert. Dieser Anteil entspricht D/t_C . Erst bei $D = t_C$ liefert das gesamte Einzugsgebiet (D/t_C wird dann 1). Wellenanstiegs- und -ablaufzeit entsprechen bei kurzen Regen nicht mehr t_C , sondern sind auf die Regendauer D beschränkt. Die Phase konstanter Lieferung ergibt sich aus der Differenz ($t_C - D$). Dem liegt die Vorstellung zugrunde, dass selbst nach Ablauf von D (dem Regenende) das Einzugsgebiet weiterhin kontinuierlich liefert, weil der Abfluss schon unterwegs ist. Wie lange er unterwegs ist, bestimmt t_C . (■ Abb. 8.5c). Weitere Informationen sind den genannten Literaturstellen zu entnehmen.

$$q_P^* = 2,78 \cdot \sigma \cdot i_D \cdot A_{EZG} \cdot \frac{D}{t_C} \quad (8.5)$$

8.4 Ableitung von Gebiets- und Bemessungsniederschlägen

Niederschlagsdaten spielen für die Quantifizierung von Wasserflüssen in der Landschaft eine zentrale Rolle, z. B. wenn ein historisches Hochwasserereignis rekonstruiert oder eine Maßnahme zum Wasserrückhalt dimensioniert werden soll. Je nach Fragestellung kommen dabei unterschiedliche

Niederschlagsdaten zum Einsatz: Zur Rekonstruktion historischer Ereignisse werden idealerweise Messdaten verwendet. Die Dimensionierung von Maßnahmen orientiert sich dagegen meist an gebietspezifischen Niederschlagsszenarien mit bestimmten statistischen Eigenschaften. Dafür werden i. d. R. synthetische Modellregen eingesetzt, für die unterschiedliche Möglichkeiten der Ableitung existieren.

In den Unterkapiteln werden zunächst allgemeine Kenngrößen, Grundlagen und Definitionen von Niederschlägen wiederholt. Im Anschluss folgt die Ableitung von Gebietsniederschlägen aus (historischen) Messdaten. Danach wird auf synthetische Modell- und Bemessungsregen eingegangen. Am Ende sind einige Beispiele zur Erstellung von Gebiets- und Modellregen und zur statistischen Einordnung extremer Niederschläge aufgeführt.

8.4.1 Grundlagen, Kenngrößen und Definitionen

Niederschlag ist ein Sammelbegriff für aus der Atmosphäre ausfallendes Wasser und umfasst neben Regen, Schnee und Hagel auch Tau, Nebel und Reif. Für die Hochwasserentstehung ist nur der Regen, bei plötzlichem Wetterumschwung im Winter unter Umständen auch das schnelle Schmelzen großer Schneemengen relevant. Die an einem Ort maximal mögliche Regenmenge ist durch die in der Luftmasse verfügbare Menge an Wasserdampf limitiert. Sie wiederum wird von der Temperatur bestimmt. Je wärmer die Luftmasse, umso mehr Wasser kann sie aufnehmen. Aus diesem Grund sind die Niederschlagshöhen extremer Starkregen im Sommer deutlich höher als die im Winter. Aus dem gleichen Grund muss im Zuge der Klimaerwärmung auch mit einer Zunahme hochwasserauslösender Niederschlagsereignisse gerechnet werden (vgl. ► Abschn. 8.4.6).

Die wichtigsten Kenngrößen zur Beschreibung von Starkregenereignissen sind

Niederschlagshöhe und -dauer. Die Niederschlagshöhe beschreibt die Regenmenge, gemessen in einer Volumeneinheit (z. B. Liter) bezogen auf eine definierte Fläche (z. B. 1 m^2). Aus dem Quotienten einer Volumen- und einer Flächeneinheit ergibt sich eine Längeneinheit, weshalb die Niederschlagshöhe üblicherweise in mm oder seltener in cm angegeben wird. Wird die Niederschlagshöhe auf eine bestimmte Zeitspanne bezogen, ergibt sich die Regenintensität oder -stärke, typischerweise in mm h^{-1} oder mm d^{-1} .

Prozesse wie Erosion oder Oberflächenabfluss sind räumlich begrenzt und zeitlich an das Auftreten von Regenintensitätsspitzen gekoppelt. Ihre Betrachtung erfordert daher relativ hoch aufgelöste Niederschlagsdaten mit Zeitintervallen $\leq 1 \text{ h}$. Für langfristige Simulationen des Wasserhaushalts oder Klimaprojektionen genügen oft Zeitintervalle von $\geq 1 \text{ d}$. Neben der Niederschlagshöhe und -dauer sind in zweiter Instanz der zeitliche Verlauf der Niederschlagsintensität sowie die räumliche Verteilung bedeutsam. Für spezifische Bemessungsfragen ist zusätzlich die statistische Wiederkehrzeit (T_n) relevant. Sie gibt die Wahrscheinlichkeit, dass ein Ereignis definierter Stärke (Starkniederschlag, Hochwasser) eintritt oder überschritten wird, als durchschnittliche Zeitspanne in Jahren an. Dadurch kann anschaulich von zum Beispiel 50- oder 100-jährlichen Ereignissen gesprochen werden. Wichtig ist, dass das nur im Durchschnitt gilt und über die wahre Zeitspanne zwischen zwei z. B. 100-jährlichen Ereignissen keine Aussage gemacht werden kann.

Der Niederschlag, wie er an Wetterstationen gemessen wird, gilt nur für einen Punkt. Will man den Niederschlag in einem Einzugsgebiet wissen, braucht man den Gebietsniederschlag. Er beschreibt die über eine definierte Zeit summierte und über eine bestimmte Fläche gemittelte Niederschlagsmenge. Gebietsniederschläge beziehen sich daher immer auf eine konkrete Fläche, meist ein Einzugsgebiet und eine definierte Zeit-

spanne. Eine typische Gebietsniederschlagsangabe kann zum Beispiel lauten: In einem Gebiet hat es von 10 bis 16 Uhr in Summe 65 mm geregnet.

8.4.2 Bestimmung von Gebietsniederschlägen aus Messdaten

Messdaten können als Punktmessungen (Stationsdaten), Radaraufzeichnungen von Niederschlagsfeldern oder als Kombinationen daraus vorliegen. Die Art und Weise, wie Gebietsniederschläge aus Messdaten erzeugt werden, hängt von der Fragestellung, dem Naturraum und dem verwendeten Datentyp ab. Berücksichtigt werden hier nur Stationsdaten, die vor allem zur Rekonstruktion historischer Ereignisse oft die einzige verfügbare Quelle darstellen, und der Einsatz kombinierter Stations- und Radardaten. Beide Datentypen haben unterschiedliche Nachteile und Vorzüge und können meist kostenfrei über das Internet bezogen werden. Für praktische Anwendungszwecke wird die Nutzung der Radardaten empfohlen, weil sie flächen- und zeitdeckend vorliegen, hohe räumliche und zeitliche Auflösung haben und weil sie bereits Gebietsniederschläge sind (nämlich vom 1-km^2 -Rasterflächen).

8.4.3 Radardaten

Radardaten werden vom DWD in zwei Produkten bereitgestellt. In einer sogenannten Radar-Online-Aneichung (RADOLAN) kombiniert der DWD seit 2005 punktuell erfasste Regenmengen an über 1000 Niederschlagsstationen mit Wetterradardaten [39, 40]. Stationsdaten können den zeitlichen Verlauf und die Niederschlagshöhe an einem Ort zwar präzise erfassen, nicht aber die räumlichen Muster zwischen einzelnen Stationen. Für Wetterradar gilt das Gegenteil. Radar kann den bodennahen Niederschlag nicht

direkt messen, dafür aber die räumliche Verteilung von Wasser in der Atmosphäre sehr gut bestimmen. Die Kombination beider Datenquellen verbindet daher die Vorteile verschiedener Messtechniken. Die Aneichung erfolgt stündlich, sodass die Daten fast in Echtzeit zur Verfügung stehen und für aktuelle Hochwasserprognosen verwendet werden können. Anschließend werden die Daten weiteren aufwendigen Korrekturverfahren unterzogen und die Daten von weiteren ca. 3000 Wetterstationen werden eingespeist. Diese Auswertungen dauern über ein Jahr, stehen also nicht aktuell zu Verfügung, verbessern aber das Ergebnis signifikant. Dieser Datensatz wird dann RADKLIM (Radar-Klimatologie) genannt [41] und stellt die beste, aktuell verfügbare Datenbasis in Deutschland bereit.

Radardaten können zeitlich hochaufgelöst (5-min, 60-min oder 24 h), in einer Intensitätsauflösung von 0,1 mm und in einer räumlichen Auflösung von 1 km² kostenfrei und flächendeckend für ganz Deutschland über das Internet¹ bezogen werden. Zur Analyse von Hochwasserereignissen sind Daten in wenigstens stündlicher Auflösung angeraten. Die Bereitstellung der Rasterdaten im Climate Data Center des DWD im Internet erfolgt binär und im ASCII-GIS-Format. Bei stündlichen Werten existiert daher pro Stunde eine Rasterdatei mit Niederschlagswerten für ganz Deutschland bzw. 24 Dateien pro Tag (bei 5-min Auflösung sind es entsprechend $5 \times 12 \times 24 = 1440$ Dateien pro Tag). Die Messwerte für einen bestimmten Ort können am einfachsten in einem Geographischen Informationssystem (GIS) bestimmt werden, indem die Radar-Rasterkacheln mit den Koordinaten des gewünschten Ortes überlagert werden. Die Koordinatenangaben der Rasterdaten beziehen sich dabei immer auf den linken unteren Eckpunkt des Gebiets in „Radar-Projektion“. Messwerte sind in

0,1 mm angegeben. D. h. ein Wert von 127 entspricht einer Niederschlagshöhe von 12,7 mm. Fehlwerte sind mit -1 kodiert, negative Werte kommen nicht vor. Neben den eigentlichen Daten ist auch eine Kurzeinführung in das RADOLAN-Format sowie eine Viewer-Software zum Betrachten der Daten unter der angegebenen Internetadresse im Climate Data Center des DWD zu finden. Eine offizielle Export- oder Abfragefunktion des DWD, die beispielsweise Ganglinien des (Gebiets-)Niederschlags für definierte Gebiete direkt aus den Radardaten erzeugt, existiert gegenwärtig nicht. Als Alternative steht seit Juni 2018 jedoch die quelloffene, auf Python basierende ArcGIS Erweiterung „Radproc“ zur Verfügung [42]. Sie schließt diese Lücke und erleichtert das Datenmanagement. Trotzdem ist die Handhabung der Radar-Daten gegenwärtig noch aufwendiger als die von Stationsdaten.

Um schließlich Gebietsniederschläge aus Radardaten und allgemein aus Rasterdaten abzuleiten, wird bei wasserwirtschaftlichen Fragestellungen in Einzugsgebieten <5 km² empfohlen, den Gebietsniederschlag als arithmetisches Mittel der einzelnen Rasterzellen zu bestimmen.

8.4.4 Stationsdaten

Stationsdaten von Niederschlagsmessern, sogenannten Ombrometern, erfassen direkt den zeitlichen Verlauf und die Niederschlagshöhe an einem Ort. Die entstehenden Ganglinien sind einfach und intuitiv zu handhaben. Stationsdaten sind auch historisch von hoher Bedeutung. Für die Nachrechnung abgelaufener Hochwasserereignisse und allgemein für Zeiträume vor der Jahrtausendwende sind Stationsdaten oft der einzig verfügbare Datentyp. Ein Nachteil von Stationsdaten ist, dass es sich um Punktmessungen handelt, die nur mithilfe von Annahmen in die Fläche übertragen werden können. Hinzu kommt, dass Niederschlagsstationen teils nur Tagessummen

1 Climate Data Center des DWD: ftp://ftp.dwd.de/pub/CDC/grids_germany/hourly/radolan

erfassen und die zeitliche Auflösung, z. B. für die Simulation von Hochwasserprozessen, in feinere Intervalle umgerechnet werden muss. Geeignete Ansätze, Datenquellen und Hinweise zum Umgang mit Unsicherheiten werden im Folgenden kurz skizziert. Da ihre Anwendung jedoch häufig fundierte Kenntnisse erfordert, wird nicht vertieft darauf eingegangen. Sofern möglich, sollten für praktische Anwendungsfragen immer Radardaten verwendet werden, auch wenn diese in der Handhabung oft mühsamer sind.

Wichtige Quellen für Niederschlagsmessdaten sind insbesondere das Climate Data Center des Deutschen Wetterdienstes (FTP-Server: <ftp://ftp-cdc.dwd.de/pub/CDC/>). Darüber hinaus unterhalten private Anbieter z. B. Kachelmannwetter (► www.kachelmannwetter.com), aber auch Behörden wie die Wasserwirtschafts-, Umwelt- und Landwirtschaftsverwaltungen (z. B. Agrarmeteorologische Messnetz in Bayern, ► <http://www.wetter-by.de>), Nationalparke und diverse Kommunen und Zweckverbände der Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung weitere (lokale) Messnetze. Auf Anfrage können diese Daten meist bereitgestellt werden.

Für die Bestimmung von Gebietsniederschlägen aus Punktmessungen sind, abhängig von der Gebietsgröße, ggf. Daten von mehreren Messstellen und Interpolationsverfahren erforderlich. Sie erlauben es, die an Niederschlagsstationen gemessenen Werte in die Fläche zu übertragen und damit Karten der räumlichen Niederschlagsverteilung oder Ganglinien des mittleren Gebietsniederschlags zu erstellen. In kleinen Gebieten (<10 km²) und einer Messstelle wird oft vereinfachend angenommen, dass der Messwert der Punktmessung repräsentativ für das gesamte Gebiet und damit dem Gebietsniederschlag gleichzusetzen ist. Dies ist aber mehr Hoffnung als Wissen, denn Radardaten zeigen, dass die Ausdehnung konvektiver Niederschlagszellen, die Sturzfluten auslösen können, in etwa 90 % der Fälle kleiner als 10 km ist [43], und die Gradienten darin sind

enorm, weil der Niederschlag am Rand der Zelle praktisch auf null abfällt [44]. Dass sich das Untersuchungsgebiet, die Konvektionszelle und die Messstation so ideal überdecken, dass die Daten der Messstation repräsentativ sind, ist also unwahrscheinlich. Daher werden Regenmesserdaten oft mit sogenannten Flächenreduktionsfaktoren auf die Größe des Einzugsgebietes skaliert [45–47].

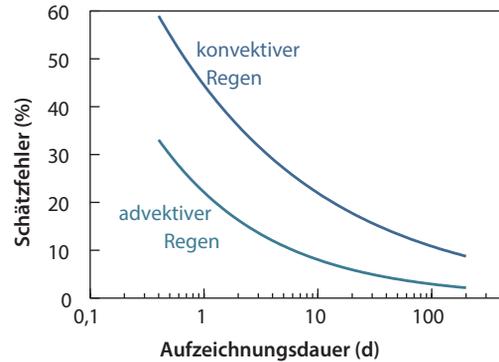
Ist das Gebiet größer als 10 km² oder ist keine Messstelle vorhanden, muss der Gebietsniederschlag aus anderen, weiter entfernten Messstellen geschätzt werden, wobei mindestens drei Messstationen berücksichtigt werden sollten. Einfache Ansätze umfassen beispielsweise die arithmetische Mittelung, Isohyeten oder Thiessen-Polygone. In größeren Gebieten oder Regionen mit ausgeprägten Höhenunterschieden sind aufwendigere Interpolationsmethoden, idealerweise geostatistische Verfahren, z. B. multiple Regressionen, Rasterpunkt-Verfahren [48, 49] oder Kriging [50] angeraten. Durch die Berücksichtigung der Höhenlage kann die Interpolationsgüte im Allgemeinen deutlich verbessert werden. Das gilt bereits für Untersuchungsgebiete, die Höhenunterschiede von einigen Hundert Metern aufweisen. Grundlagen zu den Verfahren können auch den einschlägigen Lehrbüchern entnommen werden (z. B. [51–55]).

Neben einer räumlichen Schätzung des Niederschlags ist in bestimmten Fällen auch eine Veränderung der zeitlichen Auflösung der vorhandenen Niederschlagswerte erforderlich. Das umfasst einerseits das Aggregieren, bei dem beispielsweise Stunden- zu Tageswerten aufsummiert werden. Aggregieren geht immer mit einem Verlust an Information über die Variation in feineren Zeiteinheiten (subskalige Variabilität) einher. Der umgekehrte Schritt wird Disaggregation genannt. Hier werden mithilfe bestimmter Annahmen zeitlich grob aufgelöste Daten in Werte feinerer Auflösung transformiert. Dadurch können Daten unterschiedlicher zeitlicher Auflösung kombiniert werden,

und die Schätzgüte des Gebietsniederschlags kann durch die Berücksichtigung zusätzlicher Stationsdaten verbessert werden. Mögliche Ansätze werden u. a. von Gebner [56] beschrieben.

Praxistaugliche Empfehlungen hinsichtlich der erforderlichen räumlichen und zeitlichen Auflösung von Niederschlagsmessdaten hängen immer von der Untersuchungsfrage ab und sind dadurch schwierig zu verallgemeinern. Obwohl bekannt ist, dass selbst in Gebieten $< 1,5 \text{ km}^2$ eine enorme, kleinräumige Niederschlagsvariation auftritt [57], liegen in der Praxis meist deutlich dünnere Messnetze aus Niederschlagsstationen vor. Zur Schätzung von Gebietsniederschlägen in Gebieten $< 200 \text{ km}^2$ empfehlen Schaake et al. [50], wenigstens drei meteorologische Stationen zu verwenden. Dabei wird angenommen, dass die Daten einer Niederschlagspunktmessung repräsentativ für eine Fläche von ca. 70 km^2 sind, was wesentlich unter der Auflösung von Radardaten liegt und daher nur ein Notbehelf sein kann.

Bedingt durch die Auflösung der Messgeräte und der Genauigkeit der Schätz- und Übertragungsmethoden ist die Bestimmung des (Gebiets-)Niederschlags generell mit großen Unsicherheiten behaftet. Im Allgemeinen sind diese bei konvektiven Niederschlägen (Gewitterzellen) deutlich größer als bei großflächigen Niederschlägen (Landregen) und bei kurzen Bezugszeiträumen (Stunden, Minuten) größer als bei langen. Messfehler des Niederschlags am Messpunkt des Niederschlags liegen üblicherweise im Bereich von 5–10 %. In Einzelfällen, z. B. bei starkem Wind oder Schnee sind auch Messfehler von 20–30 % möglich [54]. Hinzu kommen Unsicherheiten bei der Interpolation in die Fläche, wodurch in Summe häufig Fehler in der Größenordnung von mindestens 20 % auftreten. Bei kurzen, lokal begrenzten Starkregen ist der Fehler oft noch deutlich größer (Abb. 8.6) [55, 59]. Werden Stationsdaten verwendet, wird generell empfohlen, eine zumindest grobe Plausibilitätsprüfung



■ **Abb. 8.6** Größenordnung typischer Messfehler bei der Bestimmung der Gebietsniederschlagshöhe aus einer Messstation für ein 1 km^2 großes Gebiet in Abhängigkeit von dem Niederschlagstyp und der Aufzeichnungsdauer (Daten nach [54])

durchzuführen. Ein Prüfen auf negative Werte, Folgen identischer Werte und eine Plausibilisierung des Niveaus der Extremwerte lässt sich mit einfachen Mitteln umsetzen. Aufwendigere Prüfungen, z. B. auf zeitliche Konsistenz (Gradienten zwischen den Zeitschritten), innere Konsistenz (z. B. Vergleich Luftfeuchte mit Niederschlag) oder räumliche Konsistenz (Vergleich mit Nachbarstationen) sind für die meisten praktischen Anwendungen dagegen zu aufwendig.

8.4.5 Synthetische Gebietsniederschläge

Als synthetische Gebietsniederschläge (Modellregen) werden in der Praxis Daten der koordinierten Starkniederschlagsregionalisierung (KOSTRA) des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Grundlagen des Datensatzes und ausgewählte Karten der Starkniederschlagshöhen für Deutschland sind im Hauptteil in ► Abschn. 4.4.2 beschrieben.

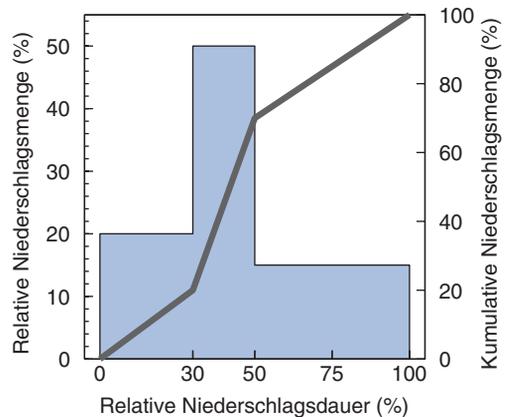
Entscheidend für Bemessungsaufgaben sind die Wahl von Jährlichkeit und Dauerstufe, da mit zunehmender Regendauer die Niederschlagshöhe zu-, die Regenintensität

■ **Tab. 8.8** Zeitliche Niederschlagsverteilung für Bemessungsniederschläge entsprechend DVWK [61]

Verteilung	Statistische Kennzeichen
Blockregen	Konstante Niederschlagsintensität während des gesamten Ereignisses
Anfangsbetont	in den ersten 20 % der Niederschlagsdauer fallen 50 % der Niederschlagssumme, in den nächsten 30 % der Niederschlagsdauer 20 % und im dritten und vierten Viertel der Niederschlagsdauer je 15 % der Niederschlagssumme
Mittenbetont	in den ersten 30 % der Niederschlagsdauer fallen 20 % der Niederschlagssumme, in den nächsten 20 % der Niederschlagsdauer 50 % und im dritten und vierten Viertel der Niederschlagsdauer je 15 % der Niederschlagssumme
Endbetont	im ersten und zweiten Viertel der Niederschlagsdauer fallen je 15 % der Niederschlagssumme, in den folgenden 30 % der Niederschlagsdauer 20 % und in den letzten 20 % der Niederschlagsdauer 50 % der Niederschlagssumme

aber abnimmt. Entsprechend nimmt bei größeren Dauerstufen das Abflussvolumen zu. Ebenso nimmt zunächst der Abflussscheitel auch zu, bis die Regendauer D der Konzentrationszeit t_c entspricht. Bei noch größeren Dauerstufen nimmt rechnerisch der Scheitel wieder ab, weil die mittlere Intensität abnimmt, während die Abflussvolumina mit zunehmender Dauerstufe weiter steigen. Für mittlere Bedingungen und Planungsaufgaben kann aber auch vereinfachend davon ausgegangen werden, dass der Regen der nächstgrößeren Dauerstufe immer noch der gleiche Regen ist, der den größten Scheitel erzeugt hat, nur dass in den hinzugekommenen Zeiten die Intensität deutlich geringer ist. Unter diesen Umständen bleibt der Abflussscheitel derselbe und damit konstant. Diese Perspektive hat den Vorteil, dass die maßgebende Niederschlagshöhe unabhängig von Gebietseigenschaften definiert werden kann. Dieses Vorgehen wurde beispielsweise im Leitfaden zum Kommunalen Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg [60] aufgegriffen, wo Starkniederschläge einheitlich als Regen mit einer Dauerstufe von $D=1$ h definiert wurden.

Zusätzlich zu Jährlichkeit und Dauerstufe ist zur Bestimmung von Bemessungsregen die zeitliche (und ggf. auch räumliche) Verteilung festzulegen. Dafür existieren unterschiedliche Ansätze, wobei in der wasserwirtschaft-



■ **Abb. 8.7** Empfohlene, mittenbetonte zeitliche Niederschlagsverteilung für Bemessungsniederschläge; die blaue Fläche zeigt den relativen Niederschlag, die Linie die kumulative Niederschlagsmenge

lichen Praxis meist DVWK-Empfehlungen [61, 62] verwendet werden. Sie unterscheiden anfangs-, mitten- und endbetonte Niederschlagsverteilungen sowie den Blockregen (■ Tab. 8.8 und ■ Abb. 8.7).

In der Realität ist die zeitliche Niederschlagsverteilung meist deutlich komplexer und mehrgipflige (sogenannte bi- und multimodale) Verteilungen sind die Regel. Entscheidend für die Praxis ist, dass die DVWK-Verteilungen unterschiedliche Abflussscheitel verursachen. Dies ist wichtig, weil der Abflussscheitel meist die Höhe des Schadens und die geschädigte Fläche

bestimmt. Die kleinsten Scheitelabflüsse entstehen meist, wenn ein Blockregen angenommen wird. Eine konstante Niederschlagsintensität ist allerdings in der Regel unrealistisch, gerade bei kurzen, konvektiven Starkregen. Die höchsten Scheitel treten normalerweise bei endbetonten Regen auf, da der Abflussbeiwert mit zunehmender Regendauer zunimmt. Sofern für Bemessungsaufgaben nicht vom ungünstigsten Fall ausgegangen werden soll, ist die Verwendung eines mittenbetonten Niederschlags mit drei verschiedenen Intensitätsstufen ein guter Kompromiss. Er wird daher, analog zu den Empfehlungen in [61], als Standard zur Abschätzung von Abflussscheiteln und für Dimensionierungsfragen empfohlen.

Alternativ zur DVWK-Empfehlung kann die zeitliche Verteilungen von Modellregen auch nach Euler (Typ 2) [63] oder anhand des statistischen Ansatzes von Otter und Königer [64] festgelegt werden. Beide Verfahren werden in Deutschland unter anderem zur Bemessung von Entwässerungssystemen eingesetzt [33]. Bei der Euler-Verteilung (Typ 2) tritt die größte Niederschlagsintensität bei 30 % der Regendauer auf. Die zeitliche Verteilung wird aus KOSTRA-Niederschlagsdauern und -höhen abgeleitet. Dabei wird angenommen, dass z. B. der größte Tagesniederschlag auch den größten Stundenniederschlag und den größten 10-min-Niederschlag eines bestimmten Wiederkehrintervalls enthält. Dadurch sind hohe Intensitäten, die für kleine Gebiete maßgebend sind, ebenso enthalten, wie Spitzenwerte größerer Dauer, die für größere Gebiete maßgebend sind und hohe Abflussvolumina verursachen.

Otter und Königer leiten die zeitliche Verteilung von Niederschlagsintensitäten aus historischen Ganglinien ab. Dadurch können normierte, regionale Intensitätsverläufe für Modellregengruppen erstellt werden [65]. Die Ableitung der Kenngrößen ist allerdings aufwendig und langjährige Niederschlagsganglinien ($\geq 20\text{--}30$ a) sind erforderlich. Ein solches Vorgehen ist auch

in anderen Ländern, darunter den USA, verbreitet. Dort werden gebietstypische Niederschlagsverteilungen skaliert, sodass die Niederschlagshöhe einer definierten Jährlichkeit erreicht wird [66]. Für Deutschland liegen entsprechende Auswertungen nicht flächendeckend vor. Um das Vorgehen nachzuziehen, kann die Methode auf Einzelereignisse angewendet werden. Dazu wird ein historisches Ereignis ausgewählt, z. B. das größte Ereignis der letzten 10 Jahre im Untersuchungsgebiet, der zeitliche Verlauf wird übernommen, und die Niederschlagshöhe wird in jedem Intervall so skaliert, dass sie einer definierten Jährlichkeit, z. B. nach KOSTRA-DWD entspricht (s. Bsp. in ► Abschn. 8.4.7.2). Aktuelle Auswertung bestätigen, dass mit derartigen Ansätzen der Hochwasserwellenablauf und die Wellenüberlagerung in größeren Einzugsgebieten realistischer wiedergegeben werden als durch Verwendung der DVWK-Verteilungen. Das gilt insbesondere für längere Regen und Gebiete mit ausgeprägten Höhenunterschieden, wie Mittelgebirgslagen oder (vor) alpine Landschaftsräume. Dort weicht die zeitliche Niederschlagsverteilung durch Stau-effekte und charakteristische atmosphärische Strömungsmuster häufig stark von den DVWK-Verteilungen ab [67].

Sind Jährlichkeit, Dauerstufe und zeitlicher Verlauf definiert, müssen daraus Folgen mit gleichen (äquidistanten) Zeitintervallen erstellt werden. Die Wahl des Zeitschrittes orientiert sich wieder an der Fragestellung. Prinzipiell gilt für Hochwasser: Je detaillierter die gewünschte Darstellung und je kleiner das Gebiet, desto feiner die erforderliche zeitliche Auflösung. Eine zu grobe Auflösung führt unweigerlich dazu, dass der Abflussscheitel zu niedrig ausfällt, da die Spitzen bei einer zu starken Mittelung nicht aufgelöst werden können. Bei Regendauern ≥ 10 h und Fließzeiten > 2 h genügen oft stündliche Werte; bei kürzeren Ereignissen und Fließzeiten sind Zeitintervalle von 5, 10 oder 20 min vorzuziehen. Beispiel: Angewendet auf einen 10-h, mittenbetontem Modellregen ($N=100$ mm),

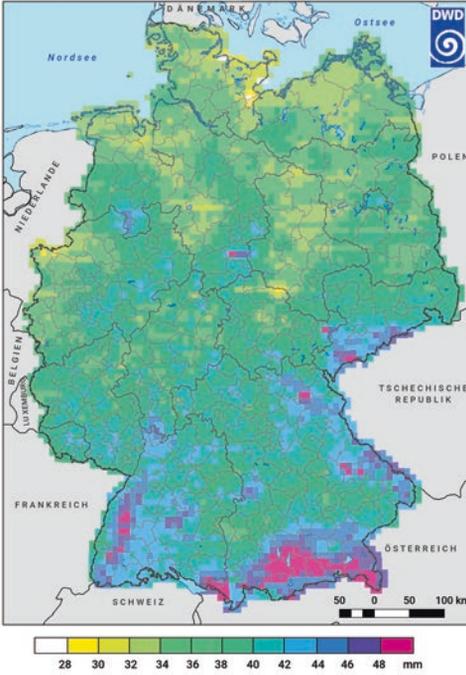
bei dem 20 % des Niederschlags in den ersten 30 % der Niederschlagsdauer fallen, wären nach  Tab. 8.8 20 mm Niederschlag in 3 h anzusetzen. Verteilt auf stündliche Intervalle ergeben sich für die ersten drei Zeitschritte der Ganglinie Niederschlagsintensitäten von $20 \text{ mm}/3 \text{ h} = 6,7 \text{ mm h}^{-1}$. In den nächsten zwei Intervallen wären es jeweils 25 mm h^{-1} , usw. Bei der Aufteilung der Werte in feinere Zeitschritte wird üblicherweise angenommen, dass die Regenintensität innerhalb der feineren Zeitschritte konstant ist.

Neben KOSTRA stehen weitere Datenprodukte zur Verfügung: Als Referenz zur Abschätzung noch seltener Extremwerte eignen sich beispielsweise die Maximierten Gebietsniederschlagshöhen (MGN) [68] oder für definierte Wiederkehrzeiten ($T_n = 1000 \text{ a}$ und $T_n = 10.000 \text{ a}$) der PEN-LAWA-Datensatz (Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags in Deutschland) [69]. Um den kombinierten Einfluss von Schneeschmelze und Starkregen zu erfassen, wurde der REWANUS-Datensatz (Regionalisierung der Extremwerte der Wasserabgabe aus Niederschlag und Schneedecke) entwickelt, der auf Anfrage beim DWD bezogen werden kann. Ein weiterer, zunehmend an Bedeutung gewinnender Datensatz sind Extremwertauswertungen von Radardaten [70, 71]. Verglichen mit den KOSTRA-Daten aus dem Bodenmessnetz unterscheiden sich die Radardaten vor allem im Raummuster bei kurzen Dauerstufen stark ( Abb. 8.8; vergleiche a und b). Die Radardaten zeigen insbesondere, dass kurze Starkregen (und damit Sturzfluten) überall auftreten können. Die Flecken der Karte entstehen nur, weil 17 Jahre Radardaten zu kurz sind, um an jedem Ort einen kurzen, heftigen Starkregen zu erfassen. Erst mit zunehmender Dauerstufe gleichen sich die räumlichen Unterschiede zwischen Daten aus dem Bodenmessnetz und denen aus dem Radar an ( Abb. 8.8; vergleiche c und d), und die Verteilung der Extremwerte wird im Wesentlichen von der Topographie bestimmt [72].

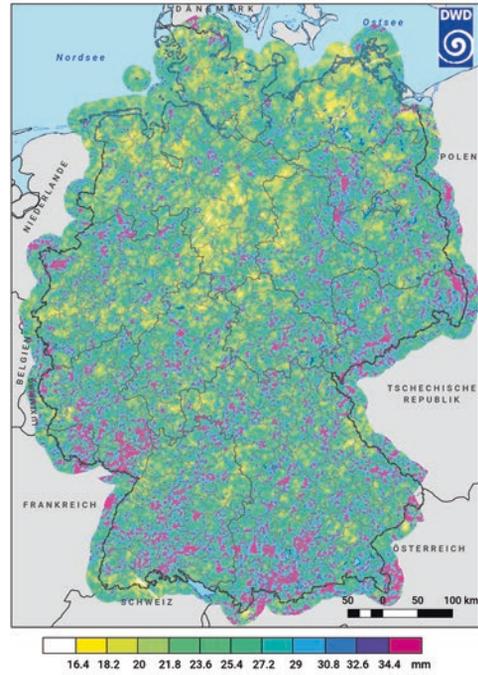
8.4.6 Veränderungen durch den Klimawandel

Eine Veränderung der Niederschlagsdynamik (Häufigkeit, Intensität) durch den Klimawandel ist omnipräsent [73], konkrete Angaben über Ausmaß und die räumlichen und zeitlichen Veränderungen sind jedoch noch immer mit großen Unsicherheiten behaftet. Auswertungen historischer Stationsmessdaten belegen eine starke Zunahme erosiver Starkregen in Deutschland in den vergangenen Jahrzehnten [74–76]. Gleiche Trends ergeben auch die Auswertungen von Radardaten und Klimaprojektionen. Letztere legen nahe, dass sich die Niederschlagsmenge 10-jährlicher Starkregeneignisse zwischen 2010 und 2040 um etwa 10 % erhöhen wird [77]. Ähnliche Ergebnisse sind auch für die Veränderung typische Großwetterlagen, wie *Tief Mitteleuropa* vorhanden, die in der Vergangenheit mit dem Auftreten schwerer Sturzfluten und Flussüberschwemmungen einhergegangen sind [78]. Die Autoren gehen davon aus, dass die Häufigkeit des Auftretens dieser Wetterlagen bei uns von 1950 bis 2100 um 50 % zunehmen wird. Zeitreihen von Stationsniederschlagsmessungen und Radardaten zeigten, dass die Erosivität seit den 1970er-Jahren bereits um 66 % zugenommen hat [79]. Diese Trends decken sich auch mit der Zunahme schwerer Gewitter und Hagelstürme [80], die auf dem physikalischen Zusammenhang zwischen Lufttemperatur und der in der Luft gespeicherten Wassermenge beruhen. Dabei ist der Anstieg bei Starkregen etwa doppelt so stark, als man allein aufgrund der Clausius-Clapeyron-Gleichung oder ihrer Vereinfachung, der August-Roche-Magnus-Gleichung, erwarten kann [76]. Außerdem nehmen die Intensitäten zu [81, 82]. Hinzu kommt, dass durch die Erderwärmung die Winde abgebremst werden [83], wodurch die Wahrscheinlichkeit steigt, dass konvektive Regenzellen längere Zeit über einem Ort verweilen. Auch wenn die Regenmenge insgesamt nicht steigt, führt das doch

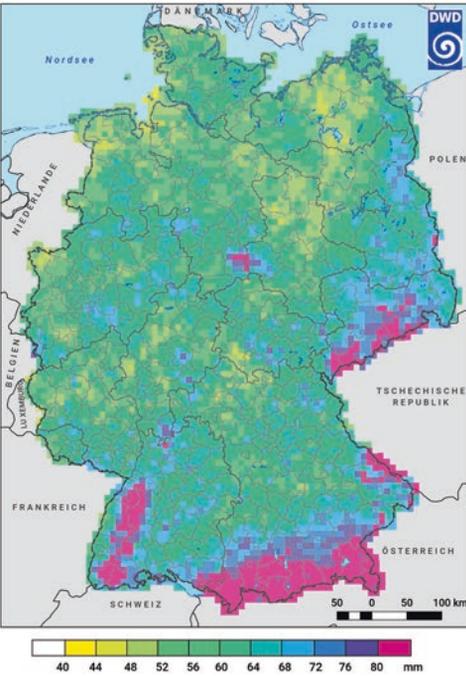
a D = 1 h T_n = 20 a



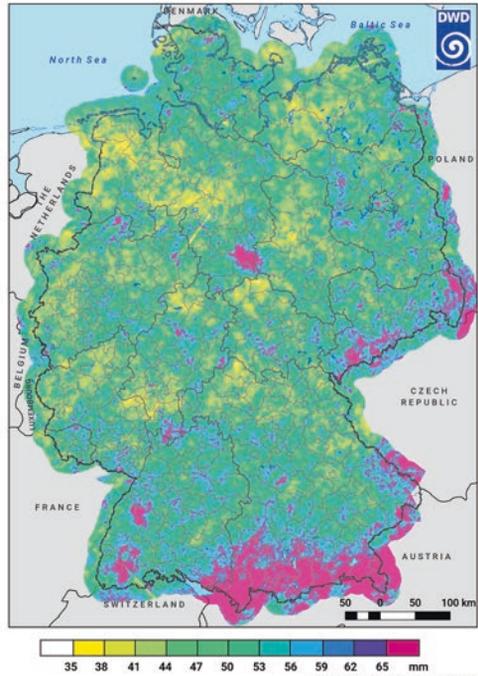
b D = 1 h T_n = 20 a



c D = 12 h T_n = 20 a



d D = 12 h T_n = 20 a



Geobase-Data: © GeoBasis-DE/BKG 2014
Climate Data and Projection: © DWD 2019

▣ **Abb. 8.8** Vergleich der Extremwertauswertung einstündiger (obere Zeile) und 12-stündiger (untere Zeile), 20-jährlicher Niederschläge in Deutschland basierend auf dem Bodenmessnetz (1951–2010; linke Spalte) und den Radardaten (2001–2018; rechte Spalte). (Quelle: Deutscher Wetterdienst 2019)

dazu, dass in nächster Nachbarschaft Orte viel zu viel und viel zu wenig Regen bekommen. Das Simbach-Ereignis [84, 85] ist ein hervorstechendes Beispiel dafür. Ein im Grunde moderater Regen hat Schäden in Milliardenhöhe und mehrere Tote hinterlassen, weil sich das konvektive Zell-Cluster innerhalb von zwei Tagen um weniger als 10 km bewegt hat und dadurch über genau einem Einzugsgebiet abgeregnet ist. Zusammenfassend muss daher davon ausgegangen werden, dass sich die Anzahl schwerer Starkregen in den kommenden 30 Jahren (bis 2050) gegenüber dem aktuellen Stand (2015) etwa verdoppeln wird.

8.4.7 Anwendungsbeispiele zur Festlegung von Bemessungsniederschlägen

8.4.7.1 Erstellung eines Modellregens aus KOSTRA-Daten

■ Aufgabenstellung

Zum Wasserrückhalt in der Fläche sollen im Einzugsgebiet des Waginger Sees im Rupertiwinkel im Landkreis Traunstein (Oberbayern) Kleinstrückhaltebecken in der Landschaft installiert werden. Zur Abschätzung ihres Volumens werden unterschiedliche Bemessungsniederschläge nach KOSTRA benötigt. Es ist daher zu ermitteln, mit welchen Niederschlagshöhen in der Region zu rechnen ist, wenn es 1, 3, 12 oder 24 h (Dauerstufe $D=1, 3, 12$ und 24) regnet und die statistische Wiederkehrhäufigkeit dieser Regen 2, 10 oder 50 Jahren entspricht (Jährlichkeit $T_n=2, 10$ und 50 a). Um konkrete Abflussganglinien für die Zuflüsse Schinderbach und Höllenbach zu erstellen, ist es zudem erforderlich, die ermittelten KOSTRA-Niederschlagshöhen in Modellregen zu überführen. Benötigt wird dafür eine

Ganglinie mit etwa 10 gleichlangen Intervallen. Es kann von mittleren Verhältnissen ausgegangen werden und eine mittenbetonte Verteilung entsprechend [61] verwendet werden. Hier wird beispielhaft die Ganglinie für einen Fall ($D=3$ h, $T_n=10$ a) erzeugt.

■ Erforderliche Daten und Hilfsmittel

- Geographisches Informationssystem
- Koordinaten des Waginger Sees, alternativ topographische Karte
- KOSTRA-DWD Datensatz (Version 2010R)

■ Lösung

1. Bestimmung der Bemessungsniederschlagshöhen: Durch Überlagerung der KOSTRA-Rasterelemente mit dem Einzugsgebiet des Waginger Sees in einem Geographischen Informationssystem werden relevante Zellen identifiziert und mögliche Niederschlagsextreme für unterschiedliche Dauerstufen und Wiederkehrintervalle ermittelt (■ Tab. 8.9). Die kurzen Dauerstufen geben Auskunft über mögliche Niederschlagsmengen bei konvektiven Ereignissen (Gewittern), die langen Dauerstufen über ergiebige Landregen.
2. Ableitung einer Ganglinie für den Bemessungsniederschlag $N_B=53$ mm ($D=3$ h, $T_n=10$ a): Zunächst wird ein mittenbetonter Modellregen entsprechend der DVWK-Verteilung konstruiert. Für mittenbetonte Niederschläge gilt nach ■ Tab. 8.8, dass in den ersten 30 % der Niederschlagsdauer 20 % der Niederschlagssumme fallen, in den nächsten 20 % der Niederschlagsdauer 50 % und im dritten und vierten Viertel der Niederschlagsdauer je 15 % der Niederschlagssumme. Für den konkreten Fall ergibt sich für das erste Intervall von $3 \text{ h} \cdot 0,3 = 54 \text{ min}$ eine Regenmenge von $53 \cdot 0,2 = 11 \text{ mm}$, usw.

Tab. 8.9 Niederschlagshöhen in mm für unterschiedliche Dauerstufen (D) und Wiederkehrintervalle (T_n) entsprechend KOSTRA, Version 2010R im Untersuchungsgebiet

	D=1 h	D=3 h	D=12 h	D=24 h
$T_n = 2 \text{ a}$	28	35	48	64
$T_n = 10 \text{ a}$	42	53	73	96
$T_n = 50 \text{ a}$	55	72	99	129

Tab. 8.10 Konstruktion einer mittenbetonten Ganglinie für einen Bemessungsniederschlag von 53 mm innerhalb von 180 min. Die Spalten 1 bis 5 sind der aufsummierte Zeiteanteil, der Niederschlagsanteil des Zeitschritts, die aufsummierte Zeit, der Niederschlag des Zeitschritts, der aufsummierte Niederschlag

(1)	(2)	(3)	(4)	(5)
Σt	ΔN_B	t (min)	ΔN_B (mm)	ΣN_B (mm)
0,3	0,2	54	11	11
0,5	0,5	90	27	37
0,75	0,15	135	8	45
1	0,15	180	8	53

Eine einfache tabellarische Lösung für beliebige Intervalle ist möglich, indem die relativen Zeit- und Niederschlagsanteile der gewählten Verteilung von **Tab. 8.8** in Spalte 1 und 2 von **Tab. 8.10** übernommen werden. Durch Multiplikation der relativen Zeit mit der Regendauer D (min) und der relativen Niederschlagsanteile (ΔN_B) mit der Bemessungsniederschlagshöhe (mm) resultieren absolute Werte (Spalte 3 und 4 in **Tab. 8.10**). Zur Kontrolle kann Spalte fünf erzeugt werden, in der die Werte aus Spalte 4 aufsummiert werden. Der unterste Wert muss mit der vorgegebenen Bemessungsniederschlagshöhe (N_B) übereinstimmen. Eine grafische Darstellung (**Abb. 8.9**) macht deutlich, dass im zweiten Intervall, in dem am meisten Regen fällt, die Intensität besonders hoch ist, weil die Dauer dieses Intervalls kürzer als das der anderen ist.

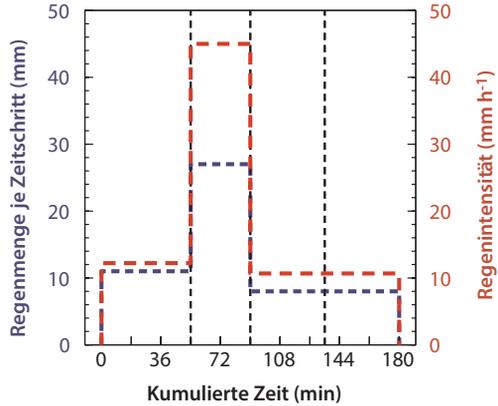
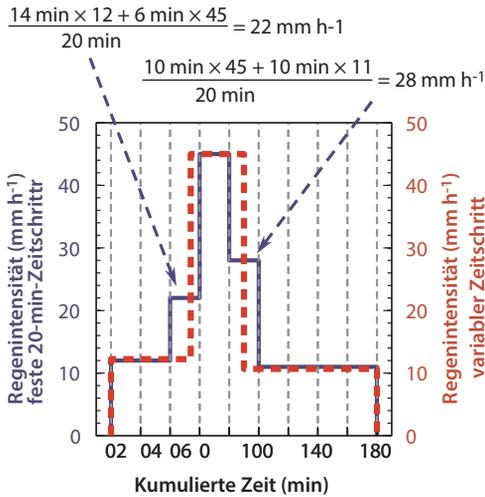


Abb. 8.9 Regenmenge je Zeitintervall und daraus abgeleitete Regenintensität für einen mittenbetonten Bemessungsniederschlag von 53 mm innerhalb von 180 min. Die Gitterlinien trennen die vier vorgegebenen Zeitintervalle für einen mittenbetonten Niederschlag

Um die Ganglinie für die Modellierung zu erzeugen, werden die Intervalle von **Tab. 8.10** in feinere und äquidistante Intervalle aufgeteilt. In den meisten Fällen (und auch für die vorliegende Fragestellung) reicht es, den Regen in ca. 10 gleichlange Intervalle aufzuteilen. In dem Fall wäre es besonders einfach, zehn Intervalle à 18 min zu bilden. Dann würde die erste Intensität für die ersten drei Zeitschritte gelten, die zweite Intensität für die nächsten zwei Zeitschritte und die letzten fünf Zeitschritte hätten die dritte bzw. die gleich hohe vierte Intensität (vergleiche die Markierungen auf der x-Achse von **Abb. 8.9**, die 18-min-Intervalle abgrenzen). Etwas schwieriger wird es, wenn man das Intervall z. B. auf $\Delta t = 20 \text{ min}$ festlegt.

8.4 · Ableitung von Gebiets- und Bemessungsniederschlägen



■ **Abb. 8.10** Aufteilung (Disaggregation) der Ganglinie des Bemessungsniederschlags mit wenigen, ungleich langen Zeitschritten aus ■ **Abb. 8.9** (rote Linie) in neun gleichlange (äquidistante) Zeitintervalle von 20 min Länge (blaue Linie). Die Regenmenge je Zeitschritt ist ein Drittel (20 min/60 min) der dargestellten Intensität bei festem 20-min-Zeitschritt

Den Rechenweg im dritten und fünften Zeitintervall, in denen bei konstantem 20-min-Intervall die Regenintensität des mittenbetonen Modellregens wechselt, veranschaulicht ■ **Abb. 8.10**.

8.4.7.2 Skalierung eines historischen Regens

■ Aufgabenstellung

Aus Gründen des Gewässerschutzes sollen der Nährstoffeintrag und die Abschwemmung von Bodenmaterial in den Vilstal-Stausee in Niederbayern reduziert werden. Um die Stofffrachten in dem wichtigsten Zufluss, dem Schwimmbach, zu ermitteln und das Potenzial von Rückhaltemaßnahmen abzuschätzen zu können, sollen Modellrechnungen durchgeführt werden. Dafür ist eine Niederschlagsganglinie als Eingabegröße erforderlich. Es soll ein 6-stündiger KOSTRA-Niederschlag ($D = 6$ h) verwendet

■ **Tab. 8.11** Niederschlagsganglinie eines historischen Regens (N) und daraus abgeleitete Ganglinie des Bemessungsregens (N_B)

(1)	(2)	(3)
Zeit (h)	N_h (mm)	N_B (mm)
1	3	10,2
2	2	6,8
3	1	3,4
4	4	13,6
5	5	16,9
6	3	10,2
Summe	18	61

werden, der statistisch alle 30 Jahre erreicht oder überschritten wird ($T_n = 30$ a). Um lokale meteorologische Gegebenheiten zu berücksichtigen, soll die Ganglinie dabei der Ganglinie eines historischen, im Gebiet erfassten Regens (N_h) entsprechen (Spalte 1 und 2 in ■ **Tab. 8.11**).

■ Erforderliche Daten und Hilfsmittel

- Geographisches Informationssystem
- Einzugsgebietsgrenze des Untersuchungsgebietes (auch aus DGM oder topographischer Karte ableitbar)
- KOSTRA-DWD Datensatz (Version 2010R)

■ Lösung

1. Bestimmung der Bemessungsniederschlagshöhe (N_B): In einem Geographischen Informationssystem werden die Rasterelemente des KOSTRA-Datensatzes ($D = 6$ h, $T_n = 30$ a) mit dem Einzugsgebiet des Schwimmbachs überlagert (■ **Abb. 8.11**). Der nordwestliche Teil des Gebietes wird von Rasterelementen der Klasse 55–60 mm überdeckt, der übrige Teil von Rasterelementen mit 60–70 mm. Unter der Annahme, dass ein einheitlicher Wert das Gebiet hinreichend genau beschreibt,

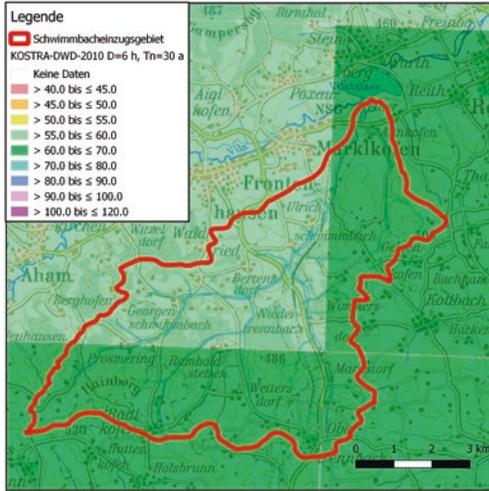


Abb. 8.11 Schematische Darstellung von Topographischer Karte (Hintergrund), Grenze des Schwimmbacheinzugsgebietes bei Marklkofen in Niederbayern (rote Linie) und Starkregenhöhe nach KOSTRA-DWD Version 2010R (grüne, halbtransparente Polygone) (Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung)

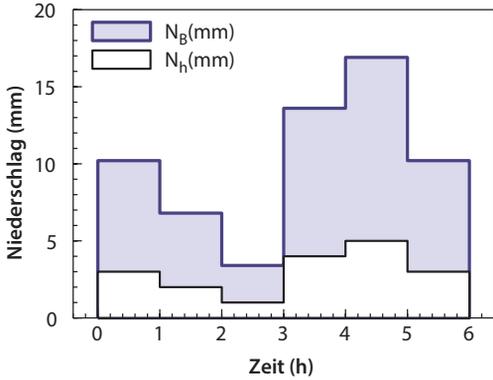


Abb. 8.12 Ableitung eines 6-h synthetischen Bemessungsregens (N_B) aus gemessenen historischen Daten (N_h) durch Multiplikation der stündlichen Messwerte mit einem Faktor ($C_s = 3,39$)

- wird der Mittelwert gebildet und $N_B = 61$ mm festgelegt.
- Ermittlung des Skalierungsfaktors (C_s) für das historische Ereignis. Der Faktor ergibt sich aus dem Quotienten der Bemessungsniederschlagshöhe ($N_B = 61$ mm) und der Höhe des gemessenen Niederschlags ($N_h = 18$ mm):

$$C_s = \frac{\sum N_B}{\sum N_h} = \frac{61}{18} = 3,39 \quad (8.6)$$

- Skalierung des historischen Regens: Die Ganglinie des Bemessungsregens wird abgeleitet, indem jeder Wert des beobachteten Ereignisses (Spalte 2 in **Tab. 8.11**) mit dem ermittelten Skalierungsfaktor $C_s = 3,39$ multipliziert wird. Die resultierenden Werte zeigt Spalte 3 in **Tab. 8.11**. Die unterschiedlichen Regensummen des historischen und des skalierten Modellregens bei gleichem zeitlichem Verlauf sind in **Abb. 8.12** dargestellt.

8.4.7.3 Rekonstruktion und Erstellung einer Niederschlagsganglinie aus Radardaten

Aufgabenstellung

In der Nacht vom 08. auf den 09.06.2016 traten bei Günzburg, Wertingen und Augsburg mehrere lokale Starkregen auf. Ausuferungen des Riemgrabens bei Günzburg verursachten dabei unter anderem die Vollsperrung der Bundesstraße B16. Ein Hauptproblem dieses Ereignisses war, dass die hohen Fließgeschwindigkeiten große Schlammfrachten aus der Fläche in ein kleines Gewässer, den Riemgraben, und von dort bis in eine Unterführung der B16, den Mühlwegtunnel, transportierten. Im Tunnel verstopfte der mitgeführte Schlamm die Straßenentwässerung und verhinderte so den Ablauf des Wassers über die Kanalisation², wodurch weiträumige Straßensperrungen erforderlich wurden. Um die Abflussbildung zu untersuchen

2 <http://www.augsburger-allgemeine.de/dillingen/Ueberflutungen-nach-Starkregen-Wodroht-jetzt-Hochwasser-id38030907.html>

und die Fließpfade im Einzugsgebiet des Riemgrabens ($A_{EZG} = 5,6 \text{ km}^2$) nachzuvollziehen, soll das Ereignis mithilfe einfacher Modellrechnungen rekonstruiert werden. Als Modelleingabe ist unter anderem eine Niederschlagsganglinie erforderlich, die aus Radardaten rekonstruiert werden soll, da die umliegenden Niederschlagsstationen die gewittrigen Schauer aufgrund der kleinen räumlichen Ausdehnung nicht erfasst hatten.

■ Erforderliche Daten und Hilfsmittel

- Geographisches Informationssystem
- Koordinaten des Einzugsgebietes des Riemgrabens bei Günzburg (z. B. WGN25 Datensatz) oder topographische Karte
- Radardaten des 08. und 09.06.2016 in stündlicher Auflösung (z. B. im ascii-Format, verfügbar im Climate Data Center des DWD, hier wird zur Illustration mit RADOLAN Daten gearbeitet, alternativ und teilweise besser geeignet ist der RADKLIM Datensatz)

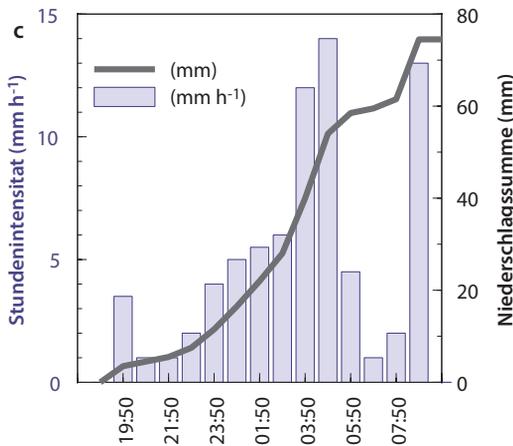
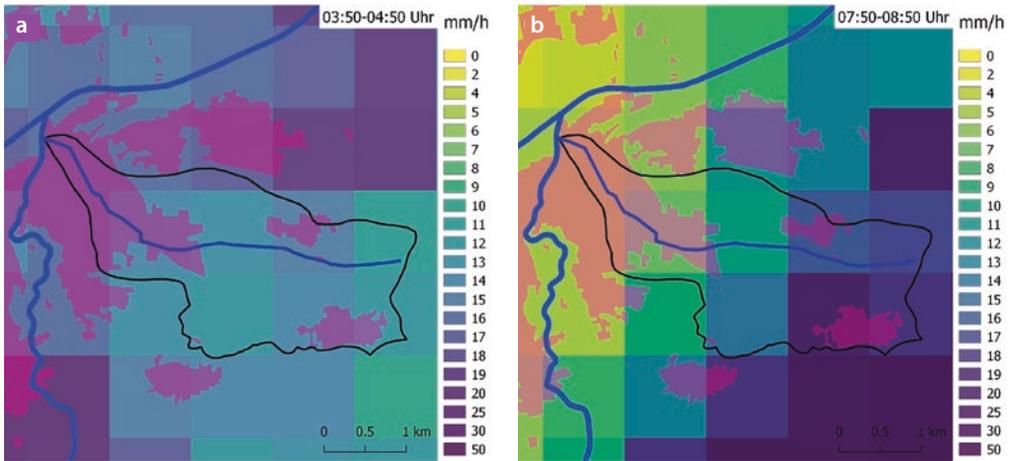
■ Lösung

Um die Niederschlagsganglinie zu erzeugen, müssen die relevanten Rasterzellen in den RADOLAN-Daten (Flächenabdeckung: ganz Deutschland, eine Datei pro Stunde) identifiziert werden. Die erforderliche Ganglinie ergibt sich, indem die Pixelwerte über den Zeitraum des Regens aneinandergereiht werden. Ist lediglich eine RADOLAN-Kachel relevant, können die Pixelwerte direkt ausgelesen werden. Wird das Gebiet von mehreren Rasterzellen überdeckt, ergibt sich der Gebietsniederschlag aus dem Mittel der einzelnen Zellen.

Die Identifizierung der Pixel kann auf unterschiedlichen Wegen erfolgen. Eine Möglichkeit besteht darin, die Koordinaten des Einzugsgebietes in das RADOLAN-Koordinatensystem zu übersetzen. Dadurch lassen sich die Zeilen- und Spaltenindizes der relevanten Rasterkacheln ermitteln und die Niederschlagswerte können direkt aus der Rasterdatei (ascii Format) entnommen werden. Dieser Ansatz erfordert

außer einem Werkzeug zur Koordinatentransformation keine weiteren speziellen Computerprogramme. Alternativ kann die Bestimmung der Rasterzellen und -werte visuell in einem Geographischen Informationssystem erfolgen. Die wesentlichen Arbeitsschritte dieses Weges werden im Folgenden skizziert; Details werden aufgrund der Vielzahl unterschiedlicher GIS-Programme und Versionen aber nicht beschrieben:

1. Erforderliche RADOLAN-Daten herunterladen und zusammen mit den Geodaten im GIS visualisieren (Hinweise zum Umgang mit der RADOLAN-Projektion sind im Downloadbereich des DWD zu finden). Ggf. Anlegen und Laden einer Layer-Datei, um alle RADOLAN-Daten einheitlich darzustellen.
2. Identifizierung der relevanten Rasterzellen durch Überlagerung des Untersuchungsgebietes mit den RADOLAN-Daten: Das Einzugsgebiet des Riemgrabens wird durch zehn RADOLAN-Zellen abgedeckt. Für die Bestimmung der Ganglinien des Gebietsniederschlags eignen sich Werkzeuge wie „Zonale Statistik“, die im Standardumfang von GIS-Programmen enthalten sind. Sie erlauben unter anderem, den Mittelwert der in dem Fall zehn Rasterzellen zu ermitteln, die mithilfe eines Polygons (Einzugsgebietsgrenze) identifiziert werden. Bei kurzen Regendauern kann der Schritt von Hand für jede RADOLAN-Datei einzeln durchgeführt werden. Müssen viele Dateien verarbeitet werden, bietet sich eine automatisierte Abarbeitung an. Eine Visualisierung der Arbeitsschritte im GIS bietet den Vorteil, dass zeitliche und räumliche Muster in den Regenmengen deutlich werden (■ Abb. 8.13, a und b).
3. Durch Aneinanderreihung der mittleren Rasterwerte jeder Stunde ergibt sich für die Nacht vom 08. auf den 09.06.2016 ein Gebietsniederschlag von rund 75 mm in



▣ **Abb. 8.13** Räumliche Verteilung der Niederschlagsstundensummen (bunte Kacheln) um 4 Uhr (a) bzw. 8 Uhr morgens (b) am 09.06.2016 über dem Einzugsgebiet (schwarze Linie) des Riemgrabens (dünne blaue Linie) bei Günzburg (rosa Fläche). Der Riemgraben mündet in die Günz und diese in die Donau (dicke blaue Linien). Den RADOLAN-Daten nach (c) fielen in der Nacht knapp 75 mm Niederschlag mit maximalen Stundenintensitäten von fast 15 mm h⁻¹ (Geobasisdaten: Bayerische Vermessungsverwaltung)

14 h. Es handelte sich um einen zeitlich mitten- bis endbetonten Verlauf (▣ Abb. 8.13 c).

8.5 Bestimmung der Abflusshöhe nach Lutz

Eine Alternative zum CN-Verfahren zur Bestimmung der abflusswirksamen Niederschlagshöhe ist das Verfahren von Lutz [86]. Es berücksichtigt wesentliche Mechanismen

und basiert auf Modellvorstellungen, die auch anderen Standardverfahren wie dem Konzept koaxialer Graphiken [87, 88] oder dem CN-Verfahren [89] zugrunde liegen. Die Ableitung des Verfahrens und die Schätzung der Variablen beruht auf Auswertung von 961 Niederschlag-Abfluss-Ereignissen aus 75 Einzugsgebieten in verschiedenen Regionen Deutschlands (Einzugsgebietsgröße 3–250 km²). Modifikationen des ursprünglichen Verfahrens und Vergleiche mit anderen Verfahren werden von [90] und

8.5 · Bestimmung der Abflusshöhe nach Lutz

[91] beschrieben. Da das Verfahren in der operationellen wasserwirtschaftlichen Praxis in Deutschland eine gewisse Bedeutung erlangt hat [92], wird es hier beschrieben.

Beim Lutz-Verfahren wird, wie beim CN-Verfahren, von einem gewissen Rückhalt zu Beginn eines Regens ausgegangen. Erst wenn der Niederschlag die Anfangsverluste übersteigt, fließt ein Teil des folgenden Regens ab. Die resultierende, abflusswirksame Niederschlagshöhe ergibt sich aus Standort- und ereignisspezifischen Eigenschaften: Berücksichtigt werden Anfangsverluste und ein maximaler Abflussbeiwert, die beide von der Landnutzung und hydrologischen Eigenschaften des Bodens abhängen, sowie ereignisspezifische Kenngrößen (Niederschlagshöhe, Vorfuchte und Jahreszeit). Zudem verfügt das Modell über drei Parameter, die üblicherweise als Kalibriergrößen verwendet werden. Letztere stellen einen wesentlichen Unterschied zum CN-Verfahren dar, da sie eine Anpassung des Modells an gebietsspezifische Bedingungen ermöglichen. Der Einsatz von Kalibriergrößen birgt jedoch auch Nachteile, da die ursächlichen Gründe, die die Modellanpassung erfordern, meist im Unklaren bleiben. Zusätzlich sind lange Messreihen erforderlich, um die Kalibriergrößen robust zu bestimmen. Die Übertragung angepasster Modellparameter auf andere Gebiete, selbst auf Teilgebiete oder die Anwendung des Modells im Extrapolationsbereich ist damit streng genommen unzulässig.

Konzeptionell ergibt sich die abflusswirksame Niederschlagshöhe beim Lutz-Verfahren aus der Summe des von unbebauten ($N_{\text{eff,U}}$) und von bebauten Gebieten ($N_{\text{eff,S}}$) abfließenden Niederschlags (► Gl. 8.7–8.9). Unbebaut ist dabei nicht landwirtschaftlich zu verstehen, sondern meint nicht-versiegelte Flächen. Auf unbebauten Flächen wird der abfließende Niederschlag aus zwei Komponenten ermittelt: Die erste ist statisch und durch den maximalen Abfluss-

beiwert definiert (linker Term von ► Gl. 8.8). Der maximale Abflussbeiwert ist der prozentuale Anteil des Niederschlags, der bei einem unendlich langen und großen Regen abfließt. In diesem Aspekt ähneln sich Lutz- und CN-Verfahren stark, da die von Lutz verwendeten Abflussbeiwerte aus CN-Werten abgeleitet wurden. Sie variieren in Abhängigkeit von Landnutzung, hydrologischer Bodenklasse und der Bewirtschaftungsweise und können Nachschlagetabellen (► Tab. 8.12) entnommen werden. Die zweite Komponente des Modells (rechter Term von ► Gl. 8.8) trägt dem Umstand Rechnung, dass der Abflussanteil erst mit zunehmender Sättigung der Speicherkapazität des Bodens steigt. Hier gehen ereignisspezifische Variablen und gebietsspezifische Konstanten ein. Bei ungünstigen Bedingungen (z. B. undurchlässige Böden mit geringem Speichervermögen, spärliche Vegetationsbedeckung, hohe Vorfuchte) wird der rechte Term klein und der Abfluss strebt gegen den vom linken Term definierten, maximal möglichen Abfluss. Bei günstigen Bedingungen (z. B. durchlässige Böden mit hohem Speichervermögen, hohe Vegetationsbedeckung, geringe Vorfuchte) wird der rechte Term groß und der resultierende Abfluss in Folge gering. In bebauten Gebieten wird ein konstanter Abflussbeiwert verwendet und davon ausgegangen, dass nach Abdeckung des Anfangsverlustes der komplette Niederschlag abfließt (► Gl. 8.9), wobei auch für diese Gleichung Variationen beschrieben sind, um beispielsweise den Versiegelungsgrad zu berücksichtigen [93].

$$S = N - N_{\text{eff}} = N - (N_{\text{eff,U}} + N_{\text{eff,S}}) \quad (8.7)$$

Wobei

S - Gebietsrückhalt (mm)

N - Gebietsniederschlag (mm)

N_{eff} - Abfließender Teil des Niederschlags (mm)

$N_{\text{eff,U}}$ - Abfluss von unversiegelten Flächen (mm)

$N_{\text{eff,S}}$ - Abfluss von versiegelten Flächen (mm)

Tab. 8.12 Maximale Abflussbeiwerte (Ψ_{\max}) (-) für unterschiedliche hydrologische Bodengruppen und Landnutzungstypen (verändert nach [86]). Um ackerbauliche Bewirtschaftungspraktiken wie nicht-wendende Bodenbearbeitung (NW), Mulchsaat ($MS_{5-30\%}$), Mulchdirektsaat ($MS_{>30\%}$) und höhenlinienparallelen Anbau (HP) zu berücksichtigen, sind die jeweiligen maximalen Abflussbeiwerte um die unten angegebenen Faktoren zu reduzieren. Letztere wurden mithilfe linearer Regressionen aus CN-Werten abgeleitet. Dabei wurde angenommen, dass die von Lutz in den 1980er-Jahren definierten Ψ_{\max} -Werte den CN-Werten für „poor conditions“ entsprechen und infiltrationsfördernde Bedingungen („good conditions“) z. B. durch Fruchtfolgen mit Klee gras und Leguminosen, hohe durchgehende Bedeckung, gute Bodenstruktur und ausgeprägte Bodenfauna den Effekten einer nicht-wendenden Bodenbearbeitung gleichgesetzt werden können

	Acker ^a			Grünland		Sonstige	Wald
Hydrologische Bodengruppe ^b	Reihen- kulturen	Getreide- anbau	Klee gras, Lu zerne, etc.	Weide- land	Dauer- wiese	Haine, Obstanlagen, u. Ä.	Wald
A	0,62	0,54	0,51	0,34	0,10	0,17	0,17
B	0,75	0,70	0,68	0,60	0,46	0,48	0,48
C	0,84	0,80	0,79	0,74	0,63	0,66	0,62
D	0,88	0,85	0,84	0,80	0,72	0,77	0,70
Bewirtschaftung	Reduktionsfaktoren						
NW	6 %	3 %	–	–	–	–	–
$MS_{5-30\%}$	4 %	2 %	–	–	–	–	–
$MS_{>30\%}$	15 %	8 %	–	–	–	–	–
HP	5 %	4 %	–	–	–	–	–
HP + NW	11 %	7 %	–	–	–	–	–
HP + $MS_{5-30\%}$	9 %	8 %	–	–	–	–	–
HP + $MS_{>30\%}$	16 %	10 %	–	–	–	–	–
HP + NW + $MS_{>30\%}$	17 %	13 %	–	–	–	–	–

^aSonderkulturen wie Spargel, Hopfen, Gemüse oder Wein sind wie Reihenkulturen (z. B. Kartoffeln, Mais, Zuckerrübe und Sonnenblumen) zu behandeln

^bKurzbeschreibung der hydrologischen Bodengruppen:

A: Schotter, Kies, Sand (sehr durchlässig, kleinster Abfluss)

B: Feinsand, Löss, leicht tonige Sande (durchlässig, mäßiger Abfluss)

C: Bindige Böden mit Sand, Mischböden: lehmiger Sand, sandiger Lehm, tonig-lehmiger Sand (mäßig durchlässig, mittlerer Abfluss)

D: Tone, Lehm, dichter Fels, stauender Untergrund (relativ undurchlässig, großer Abfluss)

8.5 · Bestimmung der Abflusshöhe nach Lutz

und

$$N_{eff,U} = \left[(N - A_{V,U}) \cdot \Psi_{max} - \frac{\Psi_{max}}{a} \cdot \left(1 - e^{-a \cdot (N - A_{V,U})} \right) \right] \cdot \frac{A_{EZG} - A_S}{A_{EZG}} \quad (8.8)$$

$$N_{eff,S} = (N - A_{V,S}) \cdot \Psi_S \cdot \frac{A_S}{A_{EZG}} \quad (8.9)$$

Hier sind:

$A_{V,U}$ - Anfangsverlust unversiegelter Flächen (mm)

$A_{V,S}$ - Anfangsverlust versiegelter Flächen (mm)

Ψ_{max} - Maximaler Abflussbeiwert unversiegelter Flächen bei unendlich großen Regen (-)

a - Proportionalitätsfaktor (1/mm)

A_{EZG} - Einzugsgebietsfläche (km²)

A_S - versiegelte Einzugsgebietsfläche (km²)

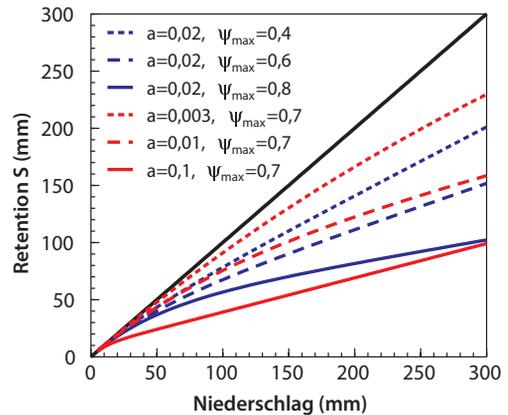
Ψ_S - Abflussbeiwert versiegelter Flächen (-)

Den größten Einfluss im ländlichen Raum haben der maximale Abflussbeiwert (Ψ_{max}) und der Proportionalitätsfaktor (a). Bei großem Faktor a strebt der zweite Term in der Klammer von ► Gl. 8.8 gegen null und der Abfluss wird durch den maximalen Abflussbeiwert bestimmt. Ein kleiner Faktor a reduziert dagegen den Abfluss bzw. erhöht den Rückhalt. Die Parameter a und Ψ_{max} sind gleichermaßen sensitiv und in ihrer Wirkung ähnlich wenn auch reziprok. Sie können sich zum Teil gegenseitig ersetzen (► Abb. 8.14).

In ländlichen Einzugsgebieten ohne nennenswerte Bebauung und Straßen gilt $N_{eff,S} = 0$ und $A_S = 0$, wodurch ► Gl. 8.9 entfällt und ► Gl. 8.8 vereinfacht werden kann:

$$N_{eff} = (N - A_{V,U}) \cdot \Psi_{max} - \frac{\Psi_{max}}{a} \cdot \left(1 - e^{-a \cdot (N - A_{V,U})} \right) \quad (8.10)$$

Die wesentlichen Einflussgrößen in dieser Gleichung sind der Gebietsniederschlag (N), der maximale Abflussbeiwert (Ψ_{max}) sowie der Proportionalitätsfaktor (a). Die Festlegung



► **Abb. 8.14** Einflüsse von maximalem Abflussbeiwert (Ψ_{max}) und Proportionalitätsfaktor (a) auf den Gebietsrückhalt (S) beim Lutz-Verfahren [86]

von Bemessungs- oder die Bestimmung von Gebietsniederschlägen ist in ► Abschn. 4.4 und 8.4 beschrieben. Maximale Abflussbeiwerte können in Abhängigkeit von der hydrologischen Bodengruppe (vgl. ► Abschn. 8.6) und der Landnutzung aus ► Tab. 8.12 geschätzt werden. Anfangsverluste sind in ► Tab. 8.13 zusammengestellt. Treten in einem Gebiet unterschiedliche Bodengruppen und Landnutzungen auf, sind einheitliche Teilgebiete abzugrenzen. Die abflusswirksame Niederschlagshöhe ist für diese Teilgebiete getrennt zu ermitteln. Werden versiegelte Flächen berücksichtigt, wird der maximale Abflussbeiwert dort konstant mit $\Psi_S = 1$ angesetzt. Gleiches gilt für Wasserflächen, die analog zu versiegelten Gebieten behandelt werden. Um weitere, für spezielle Bedingungen maximale Abflussbeiwerte aus CN-Werten abzuleiten, kann die Gleichung in der Klammer ($\Psi_{max} = 0,0118 \cdot CN - 0,214$) verwendet werden. Dies erfordert allerdings Umsicht, da das Lutz-Verfahren im Jahresverlauf wechselnde Abflussbedingungen (z. B. der Wechsel zwischen Brache und einer wachsenden Kultur und den wechselnden Abflussbedingungen innerhalb einer Kultur) nicht im maximalen Abflussbeiwert berücksichtigt, sondern in einer Wochenzahl, die für

■ **Tab. 8.13** Anfangsverluste für unterschiedliche hydrologische Bodengruppen und Landnutzungen nach Lutz; weiterführende Informationen zur hydrologischen Bodengruppen können ► Abschn. 8.6, eine Kurzbeschreibung ■ Tab. 8.12 entnommen werden

Hydrologische Bodengruppe	Anfangsverluste in mm			
	A	B	C	D
Landwirtschaftliche Flächen	7,0	4,0	2,0	1,5
Bewaldete Flächen	8,0	5,0	3,0	2,5
Versiegelte Flächen	1			

alle Landnutzungen einheitlich gilt. Würde man im Jahresverlauf wechselnde CN-Werte zur Ableitung des maximalen Abflussbeiwerts Ψ_{\max} verwenden, würde der Jahresgang quasi doppelt berücksichtigt werden.

8.5.1 Bestimmung des Proportionalitätsfaktors a

Zur Bestimmung des Proportionalitätsfaktors a werden die von Lutz [86] empfohlene Variante sowie zwei weitere, neu abgeleitete Alternativen beschrieben: Lutz berücksichtigt bei der Bestimmung von a zwei ereignisspezifische Variablen (WZ und q_B) und drei gebietsspezifischen Konstanten ($C_1 \dots C_3$). Dieses Vorgehen ist geeignet, wenn die Konstanten mit Messdaten kalibriert werden können. Der Faktor a ergibt sich dann aus:

$$a = C_1 \cdot e^{-C_2/WZ} \cdot e^{-C_3/q_B} \quad (8.11)$$

Wobei

WZ - Wochenzahl (-)

q_B - Basisabflussspende zum Ereignisbeginn ($l \ s^{-1} \ km^{-2}$)

$C_1 \dots C_3$ - Gebietsspezifische Konstanten mit den Einheiten C_1 (mm^{-1}), C_2 (-) und C_3 ($l \ s^{-1} \ km^{-2}$)

Die Ermittlung der gebietsspezifischen Konstanten (C_1 , C_2 und C_3) ist in ► Abschn. 8.5.2 beschrieben. Die Wochenzahl

in ► Gl. 8.11 bildet saisonale Effekte ab. Sie ist dreiecksförmig definiert und im Sommer, bei größter biotischer Aktivität, am kleinsten (■ Tab. 8.14). Je kleiner die Wochenzahl ist, desto kleiner wird a und desto kleiner der resultierende Abfluss. Umgekehrt resultieren außerhalb der Vegetationsperiode und insbesondere im Winter höhere Abflüsse, da WZ steigt und in Folge a größer wird. Ein Nachteil der Wochenzahl besteht darin, dass sie eine Vielzahl möglicher Einflüsse zusammenfasst und nur die mittlere (historische) Situation der Einzugsgebiete von Lutz [86] abbildet. Unterschiedliche Kulturen oder die Veränderungen von Klima (z. B. erfolgt die Einsaat von Mais heute etwa 3 Wochen früher als in den 1960er-Jahren, aus denen die Daten von Lutz stammen) können damit nicht abgebildet werden.

Die Vorfeuchte eines Einzugsgebietes beeinflusst sein Abflussverhalten ebenfalls, da sie die relative Sättigung der Speicherkapazität des Bodens bestimmt. Verbreitete Hilfsgrößen zur Abschätzung der relativen Sättigung stützen sich auf Vorregenindizes oder den Gewässerabfluss bzw. die Abflussspende vor Regenbeginn z. B. [94]. Das gilt auch für das Lutz-Verfahren, das die Abflussspende eines Gewässers vor Regenbeginn als Schätzgröße verwendet. Daher kann ohne Kenntnis der Abflusssituation vor einem Ereignis der Parameter a nicht bestimmt werden. Um den Faktor a trotzdem nach ► Gl. 8.11 bestimmen zu können, wurden drei Vorfeuchteklassen gebildet (trocken, mittel, nass) und ihnen durch Auswertung von Ereignisabflüssen mit Daten aus dem Donaueinzugsgebiet [95] eine mittlere Abflussspende zugewiesen (■ Tab. 8.15). Für Planungsfälle ist die Näherung hinreichend genau. Sind Messwerte der Abflussspende für konkrete Ereignisse verfügbar, sind diese den Klassenmitteln vorzuziehen.

Die zweite Möglichkeit, den Faktor a zu bestimmen, nutzt in Anlehnung an das CN-Verfahren anstelle der Wochenzahl die Bodenbedeckung, um die jahreszeitliche

8.5 · Bestimmung der Abflusshöhe nach Lutz

■ **Tab. 8.14** Zuordnung von Wochenzahlen für die Monate des Jahres

Monat	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Wochenzahl	23	21	18	15	11	8	5	8	11	15	18	21

■ **Tab. 8.15** Mittlere Abflussspende für das Lutz-Verfahren je nach Vorfeuchteklasse

Vorfeuchteklasse	Trocken	Mittel	Nass
Typische Situation	Im Sommer und Spätsommer nach längeren Perioden, in denen die Verdunstung größer als der Niederschlag war (der Deutsche Wetterdienst weist typischerweise auf Lehmböden einen nutzbaren Wasservorrat von weniger als 50 % der nutzbaren Feldkapazität aus)	Normalfall	Im Winter und Frühjahr, wenn der Bodenspeicher wieder aufgefüllt ist; im Sommer nach ergiebigen vorausgegangenen Regen (der Deutsche Wetterdienst weist typischerweise auf Lehmböden einen nutzbaren Wasservorrat nahe der nutzbaren Feldkapazität aus)
Abflussspende ($l s^{-1} km^{-2}$)	10	30	70

Veränderungen der Bedeckung und Verschlammung abzubilden [3, 96]:

$$a = C_1 \cdot 0,83 \left(1 - \frac{\sigma}{100}\right)^{0,24} \cdot e^{-C_3/qB} \quad (8.12)$$

mit

σ - Bodenbedeckung (%)

Dadurch wird der zeitlichen Dynamik landwirtschaftlicher Fruchtfolgen besser Rechnung getragen. Die Bedeckung kann im Gelände erhoben werden; alternativ kann der typische Jahresgang der Bedeckung wichtiger landwirtschaftlicher Kulturen aus [97] oder [98] verwendet werden. Vor allem für konkrete Niederschlags-Abfluss-Ereignisse und für einzelne Schläge wird dieses Vorgehen empfohlen. Werden größere Einzugsgebiete betrachtet, ist die Bedeckung entweder als flächengewichtetes Mittel zu bestimmen oder ► Gl. 8.11 der Vorzug zu geben. Im Rahmen der Messgenauigkeit und bei Verwendung einheitlicher Parameter C_1 , C_2 und C_3 liefern beide Gleichungen identische Ergebnisse.

Die dritte Möglichkeit, den Proportionalitätsfaktor a zu bestimmen, ist die größte, aber einfachste. Hier wird von Standardwerten für

$C_2=4,62$ und $C_3=2$ ausgegangen. Weiter wird eine mittlere Feuchte angenommen. Entsprechend ■ Tab. 8.15 gilt für die Abflussspende dann ein Wert von 30 ($l s^{-1} km^{-2}$) und ► Gl. 8.11 vereinfacht sich zu:

$$a = C_1 \cdot e^{-\frac{4,62}{WZ}} \cdot 0,94 \quad (8.13)$$

8.5.2 Bestimmung der Gebietskonstanten C_1 , C_2 und C_3

Die Gebietskonstanten beeinflussen den Faktor a und damit den geschätzten Abfluss stark. Dabei ist C_1 ein komplexer Parameter zur Beschreibung von Gebietseigenschaften, während C_2 und C_3 dazu dienen, die Einflüsse von Jahreszeit bzw. Bedeckung und Vorfeuchte unterschiedlich zu gewichten. Verglichen mit C_2 und C_3 ist C_1 sehr sensitiv. Nach Lutz [86] sind idealerweise alle Gebietskonstanten, insbesondere aber C_1 , gebietspezifisch zu bestimmen. Da dies häufig nicht möglich ist, empfiehlt er Standardwerte aus einer Regionalisierungsstudie, in der $C_1=0,02$, $C_2=4,62$ und $C_3=2$ festgelegt wurden.

Eine Überprüfung und Anpassung von C_1 , C_2 und C_3 an einen größeren, aktuelleren Datensatz existiert nicht. Auch eine Schätzgleichung, über die C_1 aus Gebietseigenschaften robust abgeleitet werden kann, ist nicht bekannt. Einzelne Studien aus den 1990er-Jahren sind lediglich aus Bayern bekannt, wo der Standardwert für C_1 mit 0,05 für Südbayern bzw. 0,01 für den Alpenraum definiert wurde [90, 93]. Eine naturräumliche Variation von C_1 liegt daher nahe. Eigene (unveröffentlichte) Anwendungen des Verfahrens auf einen Datensatz aus dem Donaueinzugsgebiet (22 Einzugsgebiete mit 15–150 km², 1174 Niederschlag-Abfluss-Ereignisse) von [95] bestätigten die für C_2 und C_3 empfohlenen Standardwerte von [86]. Gleichzeitig verdeutlichte sie auch die hohe Sensitivität von C_1 . Veränderungen im niedrigen, einstelligen Prozentbereich von C_1 wirken sich bereits deutlich auf das Ergebnis aus. Eine Anwendung des Verfahrens auf einen Datensatz künstlich berechneter Parzellen (336 Berechnungsversuche, Parzellengrößen 6–44 m²) aus [99, 100] zeigte, dass das Lutz-Verfahren durch Variation von C_1 auch an Niederschlag-Abfluss-Ereignisse auf dieser Raumskala angepasst werden kann. Dieses Ergebnis ist aus zweierlei Gründen bedeutsam: Einerseits, weil dabei sehr gute Ergebnisse erzielt wurden, obwohl die im Lutz-Verfahren empfohlenen Anfangsverluste verwendet worden waren, während im genannten Datensatz die Anfangsverluste teilweise 15–20 mm erreichten [101] und damit 5- bis 10-fach größer waren als die von Lutz angesetzten Werte in [Tab. 8.13](#). Andererseits ergab die Optimierung des C_1 -Parameters für die Parzellenversuche Werte, die im Mittel um eine Zehnerpotenz größer waren als die C_1 -Werte, die in 15–150 km² großen Gebieten ermittelt worden waren. Dadurch liegt eine Skalenabhängigkeit der Werte nahe. Im Hinblick auf die Festlegung und Wirkung von C_1 besteht daher noch Forschungsbedarf.

Gegenwärtig kommen daher nur drei Möglichkeiten zur Bestimmung von C_1 in Betracht: Möglichkeit 1 ist die Verwendung der oben genannten Standardparameter, trotz der hohen damit verbundenen Unsicherheit. Möglichkeit 2 ist die Übertragung von C_1 -Werten aus ähnlichen Gebieten, für die der C_1 -Wert bekannt ist. Dies ist gegenwärtig jedoch allenfalls in Gebieten >50 km² der Fall, wo das Verfahren häufig angewendet wird. Schwierig bleibt dabei allerdings, woran eine Ähnlichkeit zwischen zwei Gebieten festgemacht werden kann. Die Möglichkeit 3 besteht in der Optimierung der gebietspezifischen Konstanten an gemessenen Niederschlags- und Direktabflusssummen historischer Ereignisse. Dieses Vorgehen ist aufwendig, aber am genauesten, um C_1 und ggf. auch C_2 und C_3 zu bestimmen. Die Genauigkeit hängt dabei vom Umfang der verfügbaren Niederschlag-Abfluss-Daten ab. Es sollten wenigstens 20 unterschiedlich große Ereignisse aus verschiedenen Jahreszeiten vorliegen. Auch ein geeigneter Optimierungsalgorithmus bzw. dessen adäquate Parametrisierung sind wichtig, da C_1 , C_2 und C_3 unterschiedliche Wertebereiche umfassen und sich in ihrer Sensitivität stark unterscheiden. Korrelationen zwischen den Parametern sind vorhanden (vor allem zwischen C_1 und C_2), aber schwach, sodass eine einfache hierarchische Optimierung, beginnend mit C_1 , danach C_2 und C_3 ausreicht, um die gebietspezifischen Konstanten hinreichend genau festzulegen.

8.6 Hydrologische Bodengruppe

Die hydrologische Bodengruppe ist ein wichtiger Parameter zur Bestimmung des abflusswirksamen Niederschlags in verbreiteten Modellansätzen wie dem CN- oder dem Lutz-Verfahren. Das Konzept der hydrologischen Bodengruppe stammt aus den USA. In der Primärliteratur werden

hydrologische Bodengruppen anhand ihres Versickerungsvermögens und ihrer Neigung zur Abflussbildung unterschieden [102, 103]. Dort werden Standorte entsprechend ihrer Wasserleitfähigkeit und dem Auftreten stauender Horizonte einer von vier Gruppen zugewiesen:

Gruppe A: Böden, die selbst bei nassen

Bedingungen ein geringes Potenzial haben, Oberflächenabfluss zu bilden. Sie umfassen im Wesentlichen gut bis sehr gut drainierte, sandige oder kiesige Böden mit einer gesättigten Wasserleitfähigkeit $> 8 \text{ mm h}^{-1}$ ($\triangleq 19,2 \text{ cm d}^{-1}$).

Gruppe B: Böden, die bei nassen Bedingungen mittlere Infiltrationsraten aufweisen.

Sie umfassen vor allem mittel- bis tiefgründige, mittel bis gut drainierte Böden mittlerer bis grobkörniger Textur. Gruppe-B-Böden haben eine gesättigte Wasserleitfähigkeit von $4 \text{ bis } 8 \text{ mm h}^{-1}$ ($\triangleq 9,6\text{--}19,2 \text{ cm d}^{-1}$).

Gruppe C: Böden, die bei nassen Bedingungen geringe Infiltrationsraten haben. Sie

umfassen Böden mit einem infiltrationshemmenden Horizont und Böden mit lehmiger Textur. Böden der Gruppe C haben eine gesättigte Wasserleitfähigkeit von $1 \text{ bis } 4 \text{ mm h}^{-1}$ ($\triangleq 2,4\text{--}9,6 \text{ cm d}^{-1}$). Von allen Gruppen treten Böden der Gruppe C am häufigsten auf.

Gruppe D: Böden mit einem hohen Potenzial

zur Bildung von Oberflächenabfluss. Bei nassen Bedingungen weisen sie geringe Infiltrationsraten auf. Sie umfassen vorwiegend Böden mit hohem Tongehalt (smectitreich), Böden mit hoch anstehendem Grundwasserstand und flachgründige Böden über Festgestein. Die Böden haben eine geringe gesättigte Wasserleitfähigkeit von unter 1 mm h^{-1} ($\triangleq 2,4 \text{ cm d}^{-1}$). Auch undrainierte Niederungsstandorte, die in drainiertem Zustand auch einer anderen Gruppe zugeordnet werden könnten, fallen in diese Gruppe.

Für Deutschland existiert bisher keine einheitliche Karte der hydrologischen Bodengruppe, obwohl das CN- und das Lutz-Verfahren bereits seit den 1980er-Jahren weit verbreitet sind [61, 92]. Mögliche Ursachen sind, dass die bodenkundliche Datenbasis zwischen den Bundesländern variiert und auch, dass das aus den USA stammende Klassifizierungssystem nicht direkt übertragen werden kann. Zur Anwendung beider Verfahren muss die hydrologische Bodengruppe daher aus verfügbaren Bodeneigenschaften geschätzt oder aus Korngrößenanalysen ermittelt werden. Wegen des Fehlens einer deutschlandweiten Karte existieren heute unterschiedliche regionale Ableitungsverfahren und Karten der hydrologischen Bodengruppe – wenigstens für Reinland-Pfalz, Baden-Württemberg und Bayern –, die i. d. R. auf Anfrage über die jeweiligen Landesumweltämter verfügbar sind. Die aktuell in Bayern verfügbare Version (Stand 2019) basiert beispielsweise auf der Übersichtsbodenkarte 1:25.000. Sie ging aus einer Expertenschätzung hervor, bei der die Bodenart zunächst anhand einer Zuordnungstabelle aus [104] einer einzelnen hydrologischen Bodengruppen zugeordnet wurden (die Bodenart erlaubt Rückschlüsse auf die Korngrößenverteilung und damit auf die Wasserleitfähigkeit). Darauf aufbauend folgten weitere Klassifizierungsschritte, die Legendeneinträge und Angaben zu Oberboden und Deckschicht, Hydromorphologie, Relief, Rohbodenstandorten sowie die Lage von besiedelten Flächen und Gewässern, aber auch Spezialwissen aus einzelnen Regionen berücksichtigten.

Liegen keine Karten vor, lässt sich die hydrologische Bodengruppe auch aus einer Korngrößenanalyse oder der Reichsbodenschätzung ableiten. Dazu werden im Folgenden zwei Ansätze vorgeschlagen. Ein systematischer Vergleich und ihre Weiterentwicklung hin zu einem einheitlich anwendbaren und akzeptierten Verfahren sind anzustreben.

8.6.1 Bestimmung der hydrologischen Bodengruppe aus einer Korngrößenanalyse

Da Steine wesentlich zur Durchlässigkeit eines Standortes beitragen und das gesamte Bodenprofil zu betrachten ist, ist eine Zuordnung nach der Bodentextur einzelner Horizonte unzureichend. Daher wurde in **Tab. 8.16** ein Zuweisungsschlüssel basierend auf dem mittleren Tongehalt im obersten Meter (Gesamtboden incl. Steine) und dem medianen Korndurchmesser im Oberboden (incl. Steine) entwickelt. Der Tongehalt des Gesamtbodens ist dabei ein Maß für die Durchlässigkeit des Bodens. Dadurch, dass die Summe über die Gesamtbodentiefe angegeben wird, ist dieser Parameter unabhängig von der Horizontierung einzelner Böden. Damit können auch Böden mit unterschiedlichen Horizontmächtigkeiten verglichen werden. Der mediane Korndurchmesser [105] im Oberboden ist auch ein Maß dafür, ob grobe Primärteilchen (Sand, Steine) im Oberboden vorhanden sind, die ein Verschlämmen der Bodenoberfläche verzögern.

Tab. 8.16 Hydrologische Bodengruppe A bis D in Abhängigkeit vom Tongehalt im obersten Meter (Gesamtboden incl. Steine) und dem medianen Korndurchmesser im Oberboden (incl. Steine). Böden mit hochanstehendem Grundwasser oder flachgründige Böden über Festgestein sollten eine Bodengruppe tiefer eingestuft werden (also z. B. D statt C)

Ton (%)	Medianer Korndurchmesser (mm)	
0–100 cm	> 0,10	0,001–0,10
0–20	A	B
20–25	C	C
25–30	C	C
30–35	C	D
>35	D	D

Der mediane Korndurchmesser d_g in mm ergibt sich aus:

$$d_g = \exp(a_g) \tag{8.14}$$

wobei

$$a_g = \sum_{i=1}^n f_i \cdot \ln(M_i) \tag{8.15}$$

wobei

f_i - Massenanteil der Fraktion i am Gesamtboden

$\ln(M_i)$ - Mittelwert der natürlichen Logarithmen von Ober- und Untergrenze der Fraktion i (mm)

n - Zahl der vorhandenen Körnungsfractionen

Für die Schlufffraktion (2 μm bis 63 μm) ist $\ln(M_i) = (\ln(0,002) + \ln(0,063))/2 = -4,49$. Je mehr Körnungsfractionen vorhanden sind, umso besser. Es müssen aber auf alle Fälle Steinfraktionen mitberücksichtigt werden, sofern Steine vorkommen. Für die kleinste Fraktion, d. h. meist die Tonfraktion (< 2 μm), wird als Untergrenze für die Berechnung von $\ln(M_i)$ der Wert 0,04 μm angenommen. Für die obere Grenze der größten Steinklasse wird der Durchmesser des größten gefundenen Steines angenommen [105]. Der Vorteil des medianen Korndurchmessers ist, dass er unabhängig von der gewählten Einteilung der Kornfraktionen ist. Diese Einteilungen können sich je nach Datenquelle stark unterscheiden, besonders bei den Sand- und Steinfraktionen. Sofern keine Steine vorhanden sind, liegt der mediane Korndurchmesser nur bei den vier Bodenarten Sand (Ss), schwach toniger (St2), schwach lehmiger (Sl2) oder schwach schluffiger Sand (Su2) über 0,10 mm, sofern es sich nicht um ausgesprochen grobsandige Böden handelt (Bezeichnung und Abkürzung der Bodenarten nach [106]). Bei grobsandigem Sand kommen auch noch die tonigen (St3), lehmigen (Sl3) oder schwach schluffigen Sande (Su3) hinzu, während bei feinsandigem Sand nur der Sand (Ss) und der schwach schluffige Sand (Su2) einen medianen Korndurchmesser über 0,10 mm haben.

8.6.2 Bestimmung der hydrologischen Bodengruppe aus der Bodenschätzung

Falls keine Daten aus einer Korngrößenanalyse zur Verfügung stehen, kann die hydrologische Bodengruppe alternativ auch aus der (Reichs-)Bodenschätzung ermittelt werden. Bei der Bodenschätzung wurden beginnend Ende der 1930er-Jahre alle Flurstücke in sehr hoher Auflösung (mindestens 50 m) mit einem definierten Kartierschlüssel erfasst. Dieser Schlüssel basiert auf der Bodenart (mittlere Korngrößenverteilung der oberen 60 cm); bei Ackerstandorten wurden zusätzlich eine Zustandsstufe, die die Bodenentwicklung charakterisiert, und eine Klassifikation des geologischen Ausgangsmaterials verwendet; bei Grünlandstandorten sind neben der weniger stark differenzierenden Bodenart die Wasserverhältnisse und das Klima klassifiziert. Aus diesen Angaben werden dann Wertzahlen abgeleitet, die die Ertragsfähigkeit kennzeichnen. Der Vorteil des Datensatzes liegt darin, dass die Kartierung auf dem kompletten deutschen (und weitgehend auch österreichischen) Staatsgebiet durchgeführt wurde und somit für alle Grünland- und Ackerstandorte konsistente und einheitliche Klassifikationen vorliegen. Nur Waldflächen wurden nicht kartiert.

Die Ableitung hydrologischer Bodengruppen aus der Bodenschätzung unterscheidet sich dementsprechend zwischen Acker- und Grünlandstandorten. Auf Ackerstandorten erfolgt die Gruppeneinteilung anhand von Bodenart und Entstehung (Tab. 8.17). Auf Grünlandstandorten nach Bodenart und Wasserverhältnissen (Tab. 8.18). Weitere, bei der Bodenschätzung erhobene Daten wie Zustandsstufe, Klima oder Wertzahlen sind für die Ableitung der hydrologischen Bodengruppe nicht notwendig und bleiben unberücksichtigt.

Tab. 8.17 Zuordnung hydrologischer Bodengruppen zu den Ackerbeschrieben der Bodenschätzung. Zur Definition der Begriffe und Abkürzungen der Bodenschätzung, die sich trotz ähnlicher Namen und Abkürzungen von den bodenkundlichen Definitionen unterscheiden, siehe [106, 107]

Bodenart Entstehung	S	SI	IS	SL	sL	L	LT	T
Alg/ Dg/ Vg	A	A	A	A	A	B	B	C
V	A	A	B	B	C	C	D	D
Al, D	A	A	B	B	C	C	D	D
Lö	-	-	C	C	C	C	-	-

Tab. 8.18 Definition hydrologischer Bodengruppen für Grünlandbeschriebe und Moorstandorte der Bodenschätzung. Moore (Mo) lassen sich nicht allgemein zuordnen, da ihre Wirkung von der Entwässerung abhängt. Nicht-entwässerte Moore haben kaum noch zusätzliche Speichermöglichkeiten und auch stark entwässerte Moore nehmen Wasser kaum auf. In beiden Fällen ist D angemessen, während geringfügig entwässerte Moore je nach noch verfügbarer Wasseraufnahmefähigkeit in A bis C fallen können

Wasserstufe	Bodenart				
	S	IS	L	T	Mo
1	A	B	C	D	(D)
2	B	C	C	D	(D)
3	C	C	D	D	(D)
4	C	C	D	D	(D)
5	D	D	D	D	(D)

8.7 Wegebau und Wasserführung

Der Verlauf von Wegen und Wegseitengräben beeinflusst die Entwässerung kleiner Einzugsgebiete maßgeblich. Die Probleme und Ansatzpunkte sind dabei besonders vielfältig und variieren in Abhängigkeit vom Wegeverlauf, der Topographie und der konstruktiven Bauausführung von Weg und

Wegseitengraben. Sie werden hier nur schlaglichtartig beleuchtet.

Hinsichtlich des Wegverlaufs können grundsätzlich vier Fälle unterschieden werden (Abb. 8.15), die sich hydraulisch und hydrologisch unterschiedlich auswirken: Verläufe im oder nahe des Talwegs (1), höhenlinienparallele Wege (2), Wege auf dem Höhenrücken (3) und Wege mit einem Verlauf schräg zum Gefälle (4). Diese Differenzierung ist hilfreich, da sich die Größen der Wegezugsgebiete in Abhängigkeit vom Wegverlauf unterscheiden und da Abflussgeschwindigkeit und Bündelungswirkung mit dem Gefälle zunehmen.

Wie auf alten Flurkarten oder noch besser in Bodenschätzungsurkarten zu erkennen, wurden früher die Wege häufig entlang der Höhenrücken geführt, während in den feuchten Talmulden oft schmales Grünland

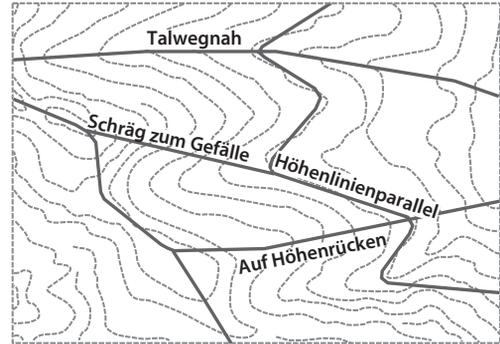


Abb. 8.15 Schematische Darstellung unterschiedlicher Wegverläufe in Abhängigkeit von der Topographie. Die Höhenlinien sind grau dargestellt

lag (Abb. 8.16). Entlang der Höhenrücken sammelten die Wege wenig Wasser, brauchten deswegen nicht befestigt werden und erforderten wenig Unterhalt. Im Rahmen von

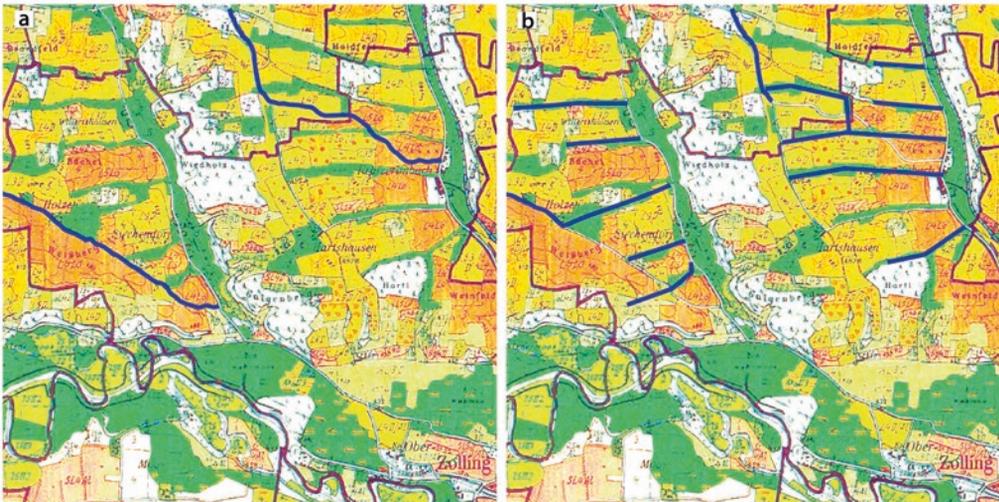


Abb. 8.16 Veränderung der Führung überwiegend landwirtschaftlich genutzter Wege zwischen 1950 und 2020. Hintergrund ist die Bodenschätzungsübersichtskarte (Blatt 7536, Freising Nord von 1958, verändert), in der das Grünland grün dargestellt ist, weiß sind Wälder und Gelbtöne sind Ackerflächen. Um 1950 (linke Tafel) verliefen die wenigen Wege (dicke blaue Linien) überwiegend auf Höhenrücken und Schultern, damit die Wege nicht ausgespült wurden. Um 2020 (rechte Tafel) sind diese Wege weitgehend verschwunden und durch eine Vielzahl von Wegen ersetzt, die nun in den Talmulden laufen, wo der Oberflächenabfluss sich sammelt. Sie haben dort die Grünlandstreifen ersetzt. Anmerkung: Aus Gründen der Übersichtlichkeit sind nicht alle Wege markiert. Die größeren Ortsverbindungswege, die leicht schräg in Nord-Süd-Richtung in den größeren Tälern und auf dem dazwischenliegenden Haupthöhenzug verlaufen, waren bereits 1950 vorhanden und verlaufen 2020 immer noch dort. Geändert haben sich im Wesentlichen die Felderschließungswege. Sie haben sich mehr als verdoppelt (+160 %)

privaten oder staatlichen Flurneuordnungen wurden dann die Wege häufig in die Talmulden gelegt und ersetzen dort das Grünland. Um die teuren Bauwerke zu schützen, wurden nun Wegseitengräben zur Wasserführung und Wegaussicherung notwendig. Die stark abflussbremsende, weil hydraulisch rau und flach ausgeformte Talmulde wurde also verbreitert durch einen hydraulisch effizienten Graben ersetzt. Gleichzeitig liefert der befestigte Weg selbst auch mehr Abfluss, als es ein Spurweg mit wassergebundenen Spuren vorher getan hat. Die Umorganisation der Wege im ländlichen Raum und die damit geschaffenen Netze aus Wegseitengräben sind daher vielerorts ein wesentlicher Grund für das beschleunigte Abflussverhalten.

Im steilen Gelände, also besonders in forstlich genutzten Bereichen, erfordert die Anlage von Wegen oft tiefe Einschnitte in die Geländeoberfläche. Dies ist besonders dann der Fall, wenn – um die Befahrbarkeit zu verbessern – trotz steiler Neigung die Steigung des Weges gering sein soll. Durch den Einschnitt werden unterirdische Abflussbahnen (Zwischenabfluss) angeschnitten [108]. Die abflussmindernde Wirkung des Waldes beruht wesentlich darauf, dass bei ihm wenig Oberflächenabfluss, dafür aber viel Zwischenabfluss auftritt [54]. Der Zwischenabfluss fließt viel langsamer als der Oberflächenabfluss, was die Hochwasserwelle streckt und so den Scheitel mindert. Auf langen Hängen trägt meist nur der Zwischenabfluss des unteren Hangteils zum Hochwasserabfluss bei, weil der Zwischenabfluss aus dem Oberrhang an durchlässigeren Stellen in tiefere Schichten versickern kann [109]. Wird der Bodenhorizont, in dem der Zwischenabfluss fließt, dagegen angeschnitten, so tritt der Zwischenabfluss in den Wegseitengräben über und wird rasch abgeleitet (■ Abb. 8.17). Die hochwassermindernde Wirkung eines Waldes kann reduziert oder durch das steile Terrain sogar umgekehrt werden, da die Abflusswelle ähnlich schnell wird wie die der

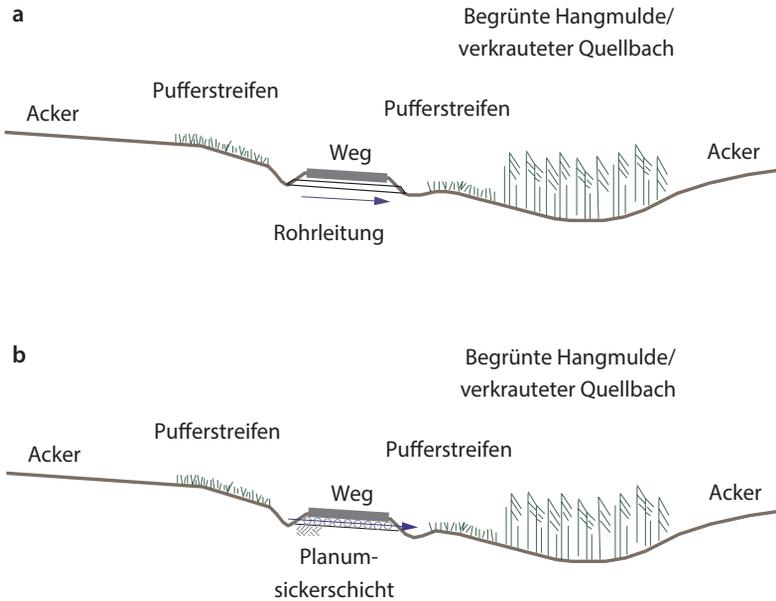


■ **Abb. 8.17** Gefrierender Zwischenabfluss an einem Forststraßenanschnitt. In dem Fall hätte wegen des anstehenden Festgesteins bereits ein Anschnitt des Hanges von einem halben Meter gereicht, um eine vollständige Exfiltration des Zwischenabflusses zu erzwingen (Bildquelle: Karl Auerswald)

agrarisch genutzten Gebiete, sodass sich beide Wellen ungünstig überlagern und sich die Scheitel addieren. Gerade in Wäldern kann der Wegebau daher enormen Einfluss auf die Gebietsentwässerung haben, was durch Messdaten aus dem Einzugsgebiet der Nahe in Rheinlandpfalz dokumentiert ist [110]. Ansätze zur Modellierung des Effektes sind von [108] und [111] beschrieben.

Beide Beispiele aus dem agrarischen bzw. dem forstlichen Raum zeigen, dass der Wegebau das Hochwassergeschehen im ländlichen Raum stark beeinflussen kann und stark beeinflusst hat. Hier besteht eine Verantwortung, aber auch Potenzial, um den Abfluss zu verlangsamen.

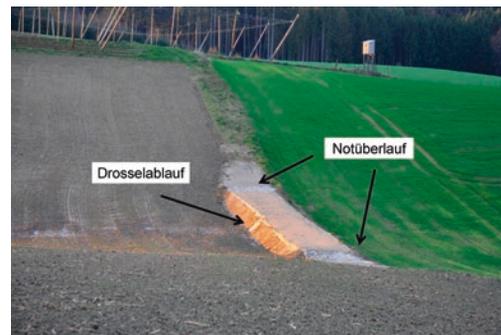
Wenn Wege in den ehemals begrünnten Tiefenlinien geführt werden, ist die Funktion der begrünnten Tiefenlinien so gut wie möglich wiederherzustellen. Dazu sollte der Wegseitengraben als breite, verkrautete Mulde ausgeführt werden und wichtiger noch, es sollten in regelmäßigen Abständen Ver-



▣ **Abb. 8.18** Schematische Darstellung zur Herstellung durchgängiger Wasserwege von der Berg- auf die Tal- seite durch Rohre (a) oder Planumsickerschichten (b) in eine talseitige Abflussmulde (verändert nach [112])

bindungsleitungen (z. B. tragfähige Rohre oder Sickerschichten durch das Planum, wenn wenig Feststofftransport zu erwarten ist) von der Berg- auf die Talseite installiert werden, um eine Durchgängigkeit in die Tiefenlinie zu gewährleisten (▣ Abb. 8.18).

Wegabschnitte, die (quasi) parallel zum Hang verlaufen, verkürzen die effektive Hanglänge. Da unterhalb wieder flächenhaftes und damit besonders langsames Fließen beginnt, wird dort der Abfluss stark verlangsamt, was sich günstig auswirken kann. Entscheidend für ihre Wirkung ist aber, wie ihre Entwässerung gestaltet wird. Problematisch ist vor allem, wenn wegen der Steilheit des Geländes ein tiefer Einschnitt erforderlich wird und damit Zwischenabfluss exfiltrieren kann, oder wenn das vom Oberrhang gesammelte Wasser gebündelt und damit schnell abgeleitet wird. Verlaufen hangparallele Wege durch Tiefenlinien, lassen sich dort durch Wegehöherlegungen mit geringem Aufwand kleine Rückhaltebecken anlegen



▣ **Abb. 8.19** Installation von Kleinrückhaltebecken in Muldenzügen durch Wegehöherlegung. Verlaufen mehrere Wege parallel zueinander, können Beckenkaskaden entstehen. Die Drosselung des Abflusses erfolgte hier durch ein schmales Rohr im Dammkörper. Als Notentlastung dienen zwei gemuldete und befestigte Überläufe (Bildquelle: H&S Ingenieure Freising)

(▣ Abb. 8.19), die dieses Problem mindern oder lösen (siehe ► Abschn. 6.4). Ideal ist, wenn eine Weiterleitung dann in einer begrünten Abflussmulde erfolgt.

8.8 Kartierung von Fließwegen im Gelände

Dieses Kapitel gibt praktische Hinweise und Empfehlungen zur Erfassung von Fließwegen im Gelände, besonders in landwirtschaftlich geprägten Gebieten bis zu einer Größe von etwa 5 maximal 10 km².

Als Grundlage werden idealerweise Luftbilder mit überlagerten Höhenlinien, Einzugsgebietsgrenzen, Gewässernetz und Flurstücksgrenzen (im Maßstab 1:10.000) verwendet. Topographische Karten sind ebenfalls geeignet; die Verortung und Dokumentation von Strukturen wie Gräben oder Rohren ist in Luftbildern aber meist einfacher. Ein weiterer Vorteil von Luftbildern besteht darin, dass durch die Überlagerung mit den Flurstücken die Schläge schnell und einfach abgegrenzt und die Flächennutzungen abgeglichen werden können. Eine Darstellung der topographischen Wasserscheiden und ggf. auch digital abgeleiteter Fließwege erleichtert die Abgrenzung hydrologischer Einheiten im Feld, wobei die Gültigkeit der Wasserscheiden und Fließwege vor Ort zu prüfen ist, da Wege und Entwässerungsgräben oder Drainagen diese leicht verändern können. Weitere hilfreiche Datenquellen sind Drainagepläne, soweit am zuständigen Wasserwirtschaftsamt oder dem örtlichen Vermessungsamt vorhanden, die Bodenurschätzung³ aus den 1940er- und 1950er-Jahren, die Auskunft über (historische) Grünländer und (an)moorige Standortbedingungen gibt, sowie Auskünfte der Akteure vor Ort, wie Landwirte oder Mitarbeiter des örtlichen Bauhofs. Gerade Letztere sind durch den regelmäßigen Unterhalt der Wege und Gräben meist gut mit den örtlichen Gegebenheiten vertraut. Eine Zusammenstellung von Geodaten, die zur

Bearbeitung typischer hydrologischer Fragestellungen hilfreich sind, kann ▶ Abschn. 8.9 entnommen werden.

Eine Kartierung sollte alle Elemente erfassen, die den Wasserfluss in der Fläche lenken oder beeinflussen können. Ein strukturiertes Vorgehen und die Verwendung eines an die örtlichen Gegebenheiten angepassten Kartierschlüssels (▣ Abb. 8.20) sind hilfreich. Wichtige Elemente und Strukturen werden im Folgenden entsprechend ihrer Geometrie aufgeführt:

- Lineare Strukturen: Reliefbedingte Hangmulden, Erosionsrinnen, Wegseitengräben, Rohrleitungen, Drainagen, befestigte Wege, die in Tiefenlinien verlaufen, Fließgewässer, Kleinstrukturen, wie Feldraine, sofern sie eine hydrologische z. B. wasserableitende Funktion haben, begrünte Abflussbahnen, vorhandene oder fehlende Pufferstreifen, usw.
- Punktuelle Elemente: Entwässerungs- und Sickerschächte, Bauwerke wie Rechen oder Rohreinlässe, wenn sie anfällig für Verklausungen sind, Mulden oder Vertiefungen, die potenziell als Standorte für Rückhaltebecken dienen könnten, größere befestigte Flächen, die bei Starkregen hohe Abflussmengen erzeugen können, Dolinen und alle weiteren Strukturen und Elemente, die Einfluss auf den Wasser- und Stoffhaushalt haben können, wie Lagerplätze für Wirtschaftsdünger.
- Flächige Elemente: Überschwemmungsgefährdete Gebiete, erosionsgefährdete Flächen, Bereiche, bei denen mit flächigem Stoffeintrag in ein Gewässer zu rechnen ist, z. B. Hangfüße, die ohne Pufferstreifen an ein Gewässer oder Graben grenzen, Flurstücke mit mehreren Zufahrten (Übererschließung), usw.

Für die Erfassung bietet sich an, das Gebiet in Teileinzugsgebiete zu untergliedern und von der Wasserscheide zum Gewässernetz oder in umgekehrter Richtung vorzugehen, um alle wesentlichen Entwässerungswege lückenlos

3 Online für Bayern z. B.: ▶ https://www.lfu.bayern.de/boden/boden_karten_daten/bsk25/index.htm (Stand Januar 2019)



8 **Abb. 8.20** Beispiel eines möglichen Kartierschlüssels (verändert nach [112])

zu erfassen. Wegseitengräben und Entwässerungssysteme wie Rohre und Drainagen (soweit ersichtlich) erfordern besondere Aufmerksamkeit, da sie Fließwege verkürzen können. Der beste Zeitraum für Geländeaufnahme ist außerhalb der Vegetationsperiode zwischen Oktober und April, wobei die Fließwege und -prozesse besonders bei der Schneeschmelze oder nach stärkeren Regenereignissen am besten erkennbar sind.

Aufbauend auf den im Feld erfassten Strukturen lassen sich Karten des aktuellen Zustands visualisieren. Sie stellen gleichzeitig eine sehr gute Basis zur Ableitung von Maßnahmen dar (Abb. 8.21). Idealerweise wird jedem im Gelände erfassten Element eine konkrete Maßnahmen- oder Handlungsempfehlung zugeordnet.

8.9 Geodaten und Geodatenanalyse

Geodaten stellen wichtige Informationen wie Eigenschaften und Verlauf von Fließpfaden oder Wasserscheiden und Einzugsgebietsgrößen bereit. Die relevanten

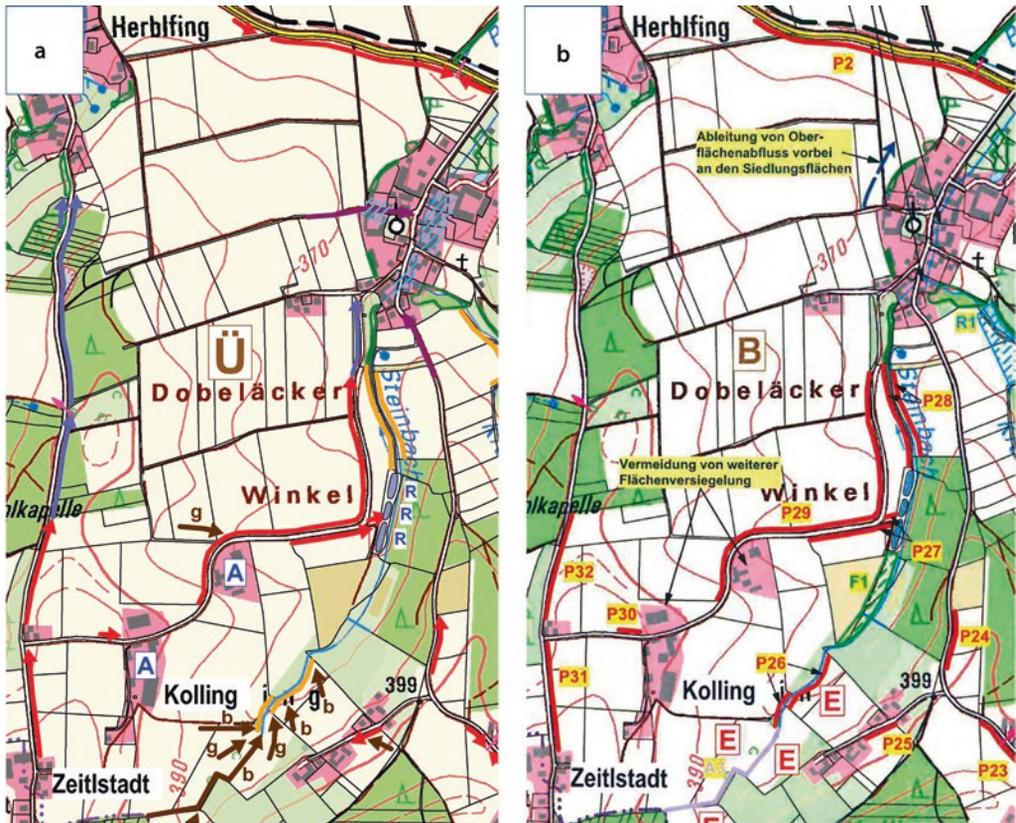
Daten und Analyseschritte richten sich nach der Aufgabenstellung. Eine Übersicht typischer Datensätze und deren Bedeutung für hydrologische Fragestellungen fasst Tab. 8.19 zusammen. Auf eine Angabe der Bezugsquelle wurde verzichtet, da diese länderspezifisch variiert.

Zur Visualisierung und Bearbeitung von Geodaten sind hydrologische Analysewerkzeuge erforderlich. Geeignete, nicht-kommerzielle Geographische Informationssystem (GIS) sind beispielweise QGIS⁴ (mit GRASS GIS Integration), SAGA GIS⁵ oder die Whitebox Geospatial Analysis Tools (GAT)⁶ [114]. Hervorhebenswert sind vor allem Letztere, da sie nicht nur kompakt, plattformunabhängig und quelloffen sind, sie verfügen aktuell auch über die umfangreichsten Werkzeuge und Methoden zur Bearbeitung von Rasterdaten. Dadurch sind sie gerade für hydrologische Fragestellungen

4 ► www.qgis.org

5 ► <http://www.saga-gis.org/>

6 ► <http://www.uoguelph.ca/~hydrogeo/Whitebox>



■ **Abb. 8.21** Auszug der Bestandskarte erfasster hydrologischer Strukturen, Prozesse und Fließwege im Gebiet Wallerfing (a). Die verwendeten Symbole entstammen der Legende in ■ **Abb. 8.20**. Die rechte Tafel (b) zeigt die im zweiten Schritt abgeleitete Maßnahmenkarte, in der jedem Element der Bestandskarte eine Maßnahme zugeordnet ist (Codierung mit Großbuchstaben oder Kombinationen aus Buchstaben und Zahlen z. B. P29) (aus [113])

vielen kommerziellen GIS Produkten überlegen (Stand 2019).

8.10 Einfluss der Bodenbedeckung auf CN-Werte bei kleinen Regen, bei Vorverschlämmung, bei natürlichen Regen und bei aufeinanderfolgenden Regen

CN-Werte lassen sich durch natürliche Regen oder künstliche Beregnungsversuche nur ermitteln, wenn dabei auch

Oberflächenabfluss auftritt. In Beregnungsversuchen wählt man daher üblicherweise große Regenhöhen und große Regenintensitäten. Die Beregnungen, mit denen der Einfluss der Bedeckung auf die CN-Werte ermittelt worden war (vgl. ■ **Abb. 4.3**), hatten daher überwiegend eine Regenintensität von etwa 65 mm h^{-1} , die eine Stunde lang appliziert worden war. Es stellt sich daher die Frage, ob so ermittelte CN-Werte auch bei weniger extremen, eher realistischen Regen gültig sind. Von Wolfgarten [115] wurden Beregnungsversuche bei unterschiedlicher Bodenbedeckung gemacht, die es erlauben, diese Frage zu prüfen. Im Speziellen

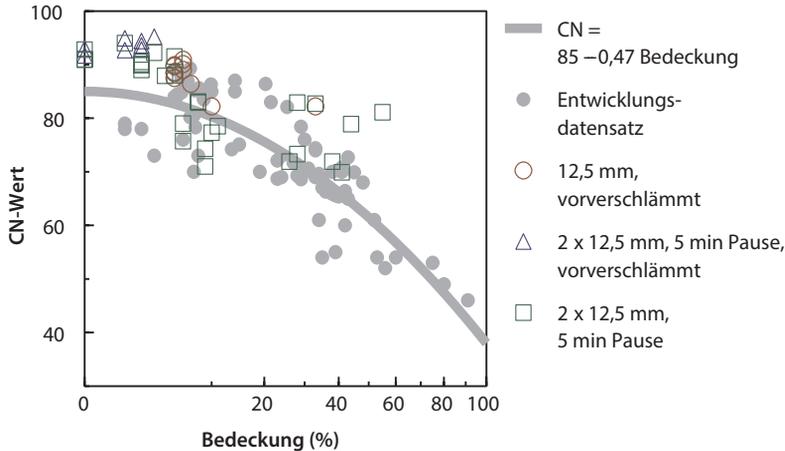
Tab. 8.19 Übersicht hilfreicher Datensätze zur Kartierung von Fließwegen und zur Bestimmung hydraulischer Eigenschaften

Datensatz	Maßstab/Auflösung	Bemerkung
Digitales Geländemodell (DGM)	1–5 m	Vorzugsweise ein DGM mit 1–2 m Auflösung verwenden, da z. B. der Verlauf von Gräben bei größerer Rasterweite bereits nicht mehr ersichtlich ist.
Drainagepläne	Diverse	Bedeutsam, besonders wenn unterirdische Fließpfade (gelöste Stoffe) relevant sind.
Flurkarte	1:5000	–
Kommunale Flächen	Nach Bedarf	Ermöglicht die Visualisierung potenziell leicht verfügbarer Flächen, z. B. zur Identifizierung von Maßnahmenstandorten oder für einen Flächentausch.
Ländliche Wege (ATKIS-Basis-DLM)	1:25.000	Auszug aus dem amtlichen digitalen Basis-Landschaftsmodell
Luftbilder	–	Frei verfügbare Luftbilder lassen sich meist problemlos in Geographische Informationssysteme einbinden.
Mündliche Mitteilungen, Fotos oder Videos, z. B. von Anwohnern, Flächennutzern, Gemeinde- oder Bauhofmitarbeitern, etc.	–	Oft wertvoll, wenn auch meist subjektiv und räumlich begrenzt.
Bodenschätzungskarten aus den 1950er-Jahren	1:25.000	Kennzeichnet die Lagen historisch (an-)mooriger Standorte und Grünlandflächen
Topographische Karten	1:10.000 - 1:25.000	Zentrale Grundlage, da das Relief die Fließrichtung des Oberflächenabflusses vorgibt
Überschwemmungsgebiete	1:1000	Amtliche festgesetzte Gebiete nach §76 des Wasserhaushaltsgesetz bzw. der Ländergesetze
Wasserwirtschaftliches Gewässernetz	1:25.000	Fließgewässernetz und Einzugsgebietsgrenzen

applizierte er Regen mit einer Höhe von nur 12,5 mm in einer Viertelstunde, zwei Regen von 12,5 mm in jeweils einer Viertelstunde, die von einer fünfminütigen Pause unterbrochen waren (Gesamthöhe also 25 mm) und Regen, die auf stark verschlammte Bodenoberflächen durch vorangegangene Regen appliziert wurden. Trotz dieser besonderen Situationen folgten die aus seinen Daten ermittelten CN-Werte weitgehend den Erwartungen von ► Gl. 4.4 (■ Abb. 8.22). Die stark vorverschlammten Flächen hatten

CN-Werte, die am oberen Ende der Streubreite lagen, aber der Unterschied war relativ gering. Im Mittel waren die CN-Werte bei Vorverschlämmung um 3 höher. Bei sieben Berechnungen trat kein Oberflächenabfluss auf. Bei einer Regenhöhe von 12,5 mm ist das dann der Fall, wenn der CN-Wert unter 80 liegt. Daher treten in ■ Abb. 8.22 für diese Regenhöhe keine kleineren CN-Werte auf, obwohl sie vorkamen, aber eben mangels Abfluss nicht bestimmt werden konnten. Dies erklärt auch, warum unter

8.10 · Einfluss der Bodenbedeckung auf CN-Werte bei kleinen Regen ...



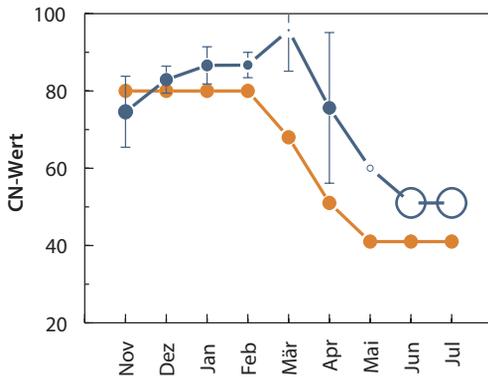
■ **Abb. 8.22** CN-Werte, berechnet aus den Abflussmessungen von Wolfgarten [115], der geringe Regenhöhen (12,5 und 25 mm), Regen mit einer Regenpause von 5 min und teilweise stark vorverschlämzte Bodenoberflächen gewählt hatte. Die hier empfohlene Gleichung zur Berechnung des CN-Wertes aus der Bodenbedeckung und der ihr zugrundeliegende Entwicklungsdatensatz sind zum Vergleich mit eingezeichnet. Die x-Achse ist wurzelskaliert, um die Auflösung bei geringer Bodenbedeckung zu verbessern, da dort viele Werte vorliegen. Deswegen erscheint die lineare Gleichung zu Prognose des CN-Wertes gekrümmt

diesen Bedingungen nur CN-Werte oberhalb, aber nicht unterhalb von ► Gl. 4.4 ermittelt werden konnten. Mit einer Regenhöhe von 25 mm lassen sich keine CN-Werte unter 67 ermitteln und traten daher auch nicht auf. Insgesamt ist ► Gl. 4.4 aber offensichtlich in der Lage, CN-Werte für eine große Vielfalt an Bedingungen zu prognostizieren.

Bei natürlichen Regen ist eine Validierung der CN-Werte noch schwieriger. Zum einen sind die Regen nicht standardisiert, lassen sich also nur schwer vergleichen. Zum anderen sind sie häufig klein, wodurch sich kleine CN-Werte nicht oder nur unsicher berechnen lassen, da kein oder nur wenig Abfluss auftritt. In Folge wirken sich Fehler in der Niederschlags- und Abflussmessung oder Besonderheiten wie lokale Verdichtungen stark aus. Dennoch soll eine Validierung an einem kleinen Datensatz gezeigt werden, der Dikau [116] entnommen wurde.

Der Datensatz stammt von einer 720 m² großen, 60 m langen, 21 % geneigten Parzelle, auf der Wintergerste wuchs. Während der Vegetationsperiode lösten 25 Regen Abfluss aus. Der kleinste Regen, der Abfluss auslöste,

hatte 2,6 mm (im März). Die beiden größten Abflüsse, die keinen Abfluss erzeugten, hatten 49 mm. Sie traten einmal im Juni und einmal im Juli auf, weswegen in diesen beiden Monaten kein CN-Wert errechnet werden kann. Für diese beiden Monate kann daher nur der CN-Wert berechnet werden, der mindestens unterschritten wird. Aus den Abflüssen wurden CN-Werte berechnet und zu Monatsmitteln zusammengefasst. Zusätzlich wurden nach dem in ► Kap. 4 beschriebenen Verfahren die monatlichen CN-Werte aus der Bedeckung vorhergesagt. Es wurde dazu der mittlere Jahresgang der Bodenbedeckung von Wintergerste nach [97] zugrunde gelegt. Analog zu ► Kap. 4 wurde in den Monaten November bis März eine Bodenfeuchte nahe der Feldkapazität, in den Monaten ab Mai eine Bodenfeuchte nahe 50 % Feldkapazität und im April ein dazwischenliegender Wert angenommen. Vergleicht man die aus Abflussmessungen berechneten CN-Werte mit den aus der Bedeckung vorhergesagten, so zeigt sich eine bemerkenswerte Übereinstimmung im Jahresgang (► Abb. 8.23). Die vorhergesagten Werte



▣ **Abb. 8.23** Mit ▶ Gl. 4.4 aus dem typischen Jahresgang der Bedeckung nach [97] vorhergesagte CN-Werte von Wintergerste (orange Symbole und Linien) und aus Abflussmessungen von [116] berechnete CN-Werte für Wintergerste (blaue Symbole und Linien; die Symbolgröße variiert in Abhängigkeit vom größten Niederschlag des Monats zwischen 2,4 mm im März und 49 mm im Juni und Juli; die gefüllten Symbole zeigen Monate, in denen Abfluss auftrat und daher ein CN-Wert berechnet werden konnte; die offenen Symbole zeigen Monate, in denen kein Abfluss auftrat und bei denen daher nur der CN-Wert berechnet werden konnte, unterhalb dessen der wahre CN-Wert liegen muss; traten mehrere Abflüsse in einem Monat auf, wurden die CN-Werte entsprechend der Regenhöhe gewichtet gemittelt, um große Ereignisse stärker zu berücksichtigen, da sie wichtiger sind und da bei ihnen die Berechnung des CN-Wertes genauer ist; die Fehlerbalken zeigen den 95 %-Vertrauensbereich des arithmetischen Mittels)

liegen etwas unter den gemessenen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Regen zu klein waren, um kleinere CN-Werte ermitteln zu können. Nur bei Regen, bei denen aufgrund besonderer Umstände, z. B. einer hohen Intensität, Oberflächenabfluss auftrat, gingen in die Berechnung ein. Teilweise gab es wesentlich größere Regen, bei denen kein Abfluss auftrat. Da bei diesen Regen kein CN-Wert errechnet werden kann, können diese Regen auch nicht in die Mittelwertbildung aufgenommen werden. Dies verschiebt den Mittelwert fälschlich nach oben. Ungeachtet dieser typischen Schwierigkeit bei der Auswertung natürlicher Regen zeigt sich aber, wie auch schon in der Modellierung der

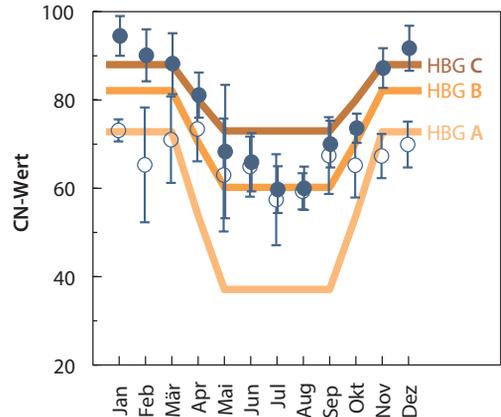
Infiltration durch [117], dass die Bedeckung einen dominanten Einfluss auf die Abflussbildung hat und daher zur Prognose der CN-Werte verwendet werden kann.

Die aus der Bedeckung vorhergesagten CN-Werte, die mit den Messwerten gut übereinstimmen, legen eine verschlammungs-gesteuerte Infiltration nahe. Dies deckt sich mit einer umfangreichen mechanistischen Modellierung des Oberflächenabflusses aller Datensätze von Dikau [116], bei der die durch die Bedeckung gesteuerte Verschlämmung wesentlich für die Abflusstenstehung war [117]. Dazu wurde das die Verschlämmung abbildende Modell HKIN [118, 119] verwendet, aber auch andere Modelle, denen andere Modellvorstellungen zugrunde liegen, wie das mit Sättigungsflächen arbeitende TOPMODEL [120] oder das Modell NASIM [121], das die Infiltration bodenfeuchte-abhängig berechnet. Eine verschlammungs-gesteuerte Infiltration erklärte bei diesen Modellierungen die Messwerte gut, auch wenn in einzelnen Fällen Schneeschmelze, Zwischenabfluss und Makroporenfluss ebenfalls eine Rolle spielten [117].

In ▣ Tab. 4.2, in der die Jahresgänge der CN-Werte verschiedener Landnutzungen zusammengestellt sind, fällt auf, dass der Jahresgang für Wald deutlich weniger ausgeprägt ist als bei Ackerkulturen. Dies verwundert nicht, nachdem bei Wald – besonders bei hohem Nadelbaumanteil – die jahreszeitliche Variation der Abflussdisposition fast nur durch den Jahresgang der Bodenfeuchte bedingt wird, da selbst bei Laubbäumen im unbelaubten Zustand eine Bodenbedeckung durch Streu gegeben ist. In ▣ Tab. 4.2 ist daher nur ein mittlerer Jahresgang der Bodenfeuchte berücksichtigt. Wenig überraschend ist der Wald deutlich abflussmindernder als Ackerflächen, wenn die Ackerflächen wenig bedeckt sind. Allerdings dreht sich das Bild in Zeiten, in denen Ackerflächen sehr gut bedeckt sind, wegen des wenig ausgeprägten Jahresgangs von Wald um. Es gibt wenig Datensätze, die diese etwas überraschende Einstufung unter

deutschen Bedingungen überprüfen lassen. Tempel [110] hat mehrjährig zwei Wald-einzugsgebiete im Hunsrück gemessen und die Messwerte auch mit einem physikalisch basierten Modell (MMS/PRMS, [122–124]) nachvollzogen. Diese Modellierung hat den Vorteil, dass sie es erlaubt, zwischen echtem Oberflächenabfluss und exfiltrierendem Zwischenabfluss zu trennen. Von Tempel [110] werden die Messwerte nicht und auch die Modellierungsergebnisse nur als Monats-summen mitgeteilt. Berechnet man CN-Werte aus Monatssummen statt aus Ereigniswerten, führt dies zu CN-Werten, die wesentlich zu niedrig sind, weil auch alle kleinen, voll-ständig infiltrierenden Regen dem abflussaus-lösenden Niederschlag angerechnet werden. Allerdings ist bei Wald eine Zuordnung des Abflusses zu einem Regenereignis auch wegen des langsamen Abflusses schwierig. Dadurch fällt möglicherweise bereits der nächste Regen, während der Abfluss des vor-hergehenden Regens noch nicht beendet ist. Dies wird besonders dann häufig der Fall sein, wenn exfiltrierender Zwischenabfluss, der noch langsamer fließt als echter Oberflächen-abfluss, eine bedeutende Rolle einnimmt. Dies war bei den beiden Einzugsgebieten der Fall, wodurch eine korrekte Zuordnung von Regen und Abfluss praktisch nicht mehr mög-lich und die Unterschätzung der CN-Werte bei Verwendung von Monatssummen kaum zu vermeiden ist. Trotz dieser prinzipiellen Schwierigkeiten sollte durch die Monats-summen der Jahresgang noch hinreichend aufgelöst werden, auch wenn die Tendenz zur Unterschätzung der CN-Werte bestehen bleibt.

Eine weitere, grundsätzliche Schwierig-keit bei der Modellierung des Oberflächen-abflusses, gerade von Waldgebieten, ist die große Standortheterogenität. In Waldgebieten ist sie meist wesentlich ausgeprägter als in landwirtschaftlich genutzten Gebieten. Die Böden der Untersuchungsgebiete von Tempel [110] entsprachen in den Kamm- und Ober-hanglagen der hydrologischen Bodengruppe A. Große Teile des Mittelhanges gehörten



■ **Abb. 8.24** Empfohlene CN-Werte für Wald bei den hydrologischen Bodengruppen A, B und C (Linien) und aus den Daten von Tempel [110] für zwei Wald-einzugsgebiete im Hunsrück berechnete CN-Werte. Die offenen Symbole wurden aus den Monatssummen von Oberflächenabfluss und Niederschlag berechnet, die gefüllten Symbole berücksichtigen zusätzlich den Zwischenabfluss. Die Fehlerbalken geben das 95%-Vertrauensintervall an ($n = 6$; zwei Einzugs-gebiete und drei Jahre)

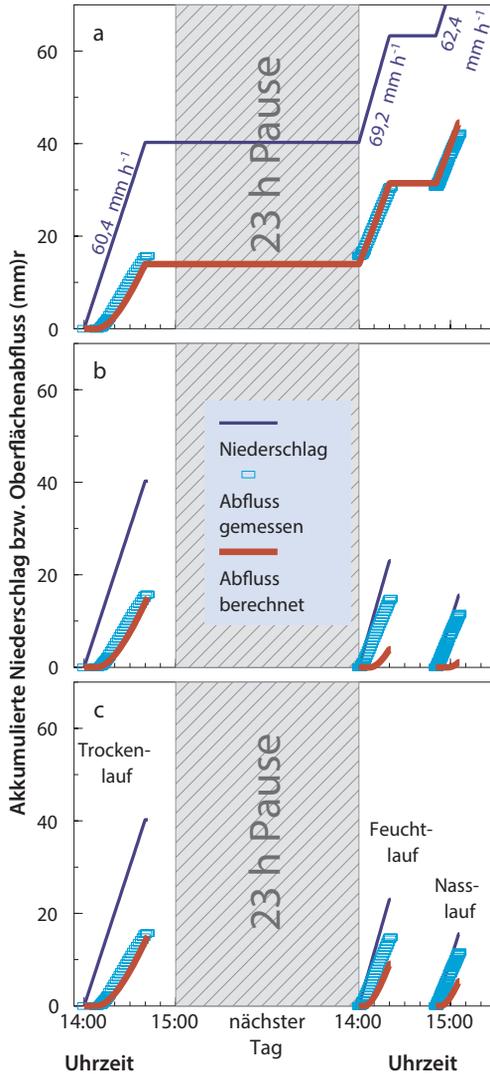
zur Bodengruppe B, und der Unterhang, der durch Hangzugswasser dauerhaft feucht, teil-weise pseudovergleyt und auch wesentlich feinkörniger war, entsprach Bodengruppe C. In ■ **Abb. 8.24** sind daher die empfohlenen Jahresgänge der CN-Werte von Wald für alle drei Bodengruppen eingetragen und mit den aus den Daten von Tempel [110] berechneten Werten verglichen. Die nur aus dem Ober-flächenabfluss berechneten CN-Werte liegen in den Sommermonaten nahe bei den für die hydrologische Bodengruppe B vorausgesagten Werten, während sie in den Wintermonaten unter der Vorhersage liegen. Nimmt man auch noch den Zwischenabfluss bei der Berech-nung hinzu, ändert sich in den Sommermonaten wenig, in den Wintermonaten steigen die CN-Werte aber deutlich an. Insgesamt liegen dann die aus den Daten von Tempel [110] berechneten CN-Werte in allen Monaten etwa in dem Bereich, der für die hydrologischen Bodengruppen B und C erwartet werden kann. Ein wesentlicher Konflikt mit den empfohlenen CN-Werten ist nicht erkennbar.

Das CN-Modell ist ein Ereignismodell und ein häufiger Fehler in seiner Anwendung resultiert daraus, dass zeitlich nah aufeinanderfolgende Regen als getrennte Ereignisse betrachtet werden. Allerdings ist nirgends definiert, wodurch ein Ereignis vom nächsten Ereignis abzutrennen ist, wie das z. B. bei der Definition von Erosionsereignissen gegeben ist, wo innerhalb eines Ereignisses regenfreie Perioden von bis zu 6 h möglich sind [79, 125]. Bei der Definition von Ereignissen ist wichtig, dass mit jedem neuen Ereignis wieder Anfangsverluste ($0,2 \cdot S$) (vgl. ► Abschn. 4.3) berücksichtigt werden, während dies bei einer Fortsetzung des vorhergegangenen Regens nicht der Fall ist. Dies bedeutet, dass nach dem vorhergehenden Ereignis genug Zeit verstrichen sein muss, damit der Speicher, der den Anfangsverlust bewirkt (Interzeption durch Pflanzen, Speicherung auf der Bodenoberfläche durch die Mikrotopographie und Speicherung im Oberboden) wieder soweit entleert ist, dass er für eine erneute Befüllung bereitsteht. Folgt ein Regentag auf einen Regentag, so ist die Evapotranspiration und die Umverteilung innerhalb des Bodens meist zu gering, um den Oberbodenspeicher wieder zu entleeren, der am meisten zum Anfangsverlust beiträgt. Daher tritt kaum ein Anfangsverlust auf, wenn ein Regentag auf einen Regentag folgt und der Folgeregen muss als Fortsetzung des ersten Regens angesehen werden. Dies zeigt sich schön bei Beregnungsversuchen. Die in den 1960er-Jahren in den USA etablierte [126, 127] und in der Folge dann auch in Deutschland eingesetzte Methodik [128, 129] sieht einen sogenannten Trockenlauf am ersten Tag, einen sogenannten Feuchtlauf 24 h später und einen Nasslauf nach einer weiteren, meist halbstündigen Pause vor.

Unter anderem wurden von Martin [130] viele solche Beregnungszyklen zu unterschiedlichen Jahreszeiten auf 32 sehr unterschiedlichen Böden, vom Dünsand bis zum schwerem Ton, durchgeführt. Die Daten wurden später zusammen mit weiteren Beregnungsdaten in einer frei zugänglichen

Datenbank veröffentlicht [99–101]. Hier wird der erste Datensatz aus den Juli-Beregnungen von [130] gezeigt. Dabei handelt es sich um eine kolluvial überprägte Parabraunerde aus Löß bei Straubing in Bayern, ein sogenannter Weißlehm. Martin hatte hier am ersten Tag etwa 40 mm in 40 min appliziert, was nach der Definition des Deutschen Wetterdienstes einem heftigen Starkregen entspricht. Am nächsten Tag folgte ein halbstündiger Feuchtlauf mit 23 mm und nach einer halben Stunde Pause ein 15-min Nasslauf mit weiteren 16 mm. Die Regen fanden an Schönwettertagen statt. Daher ist zunächst auf Grund der für Beregnungsversuche geringen Menge des Trockenlaufs und der hohen Verdunstung im Juli von einer besonders schnellen Regeneration des Anfangsspeichers auszugehen. Es wurden ja nur die Parzellen beregnet, während die Umgebung trocken blieb. Dennoch zeigen die Messergebnisse deutlich, dass Feucht- und Nasslauf keine eigenständigen Ereignisse sind, sondern als Fortsetzung des Trockenlaufs angesehen werden müssen. Modelliert man alle drei Beregnungen als ein durch Pausen unterbrochenes Ereignis mit dem CN-Modell, wobei ein CN-Wert von 86 zugrunde gelegt wurde, dann überlagern sich Modellierung und Messung nahezu perfekt (■ Abb. 8.25 a). Dies gilt für jeden einzelnen Lauf. Am Ende des Trockenlaufs (gemessener Abfluss 16 mm) ist der berechnete Abfluss nur 2 mm niedriger, am Ende des Feuchtlaufs (gemessener kumulierter Abfluss 31 mm) beträgt der berechnete Abfluss ebenfalls 31 mm und am Ende des Nasslaufs (gemessener kumulierter Abfluss 42 mm) beträgt der berechnete Abfluss 45 mm.

Behandelt man dagegen die drei Läufe als unabhängige Regen, bleibt die Modellierung und damit die gute Übereinstimmung beim Trockenlauf gleich, beim Feucht- und Nasslauf werden aber die Abflussmengen grob unterschätzt. Statt der gemessenen 15 mm im Feuchtlauf werden nur 4 mm berechnet und statt der gemessenen 12 mm in Nasslauf wird nur 1 mm errechnet (■ Abb. 8.25b).



◀ **Abb. 8.25** Mit dem CN-Modell berechneter und gemessener kumulativer Oberflächenabfluss bei drei aufeinanderfolgenden Beregnungen (Trocken-, Feucht- und Nasslauf) einer Parabraunerde aus Löß im Vergleich zum kumulierten Niederschlag (Messdaten aus [130]). **a** Die drei Regen werden als ein Ereignis aufgefasst und Regen wie Oberflächenabfluss über den gesamten Beregnungszyklus kumuliert (Gesamtregensmenge 79 mm; nicht ganz dargestellt; die Zahlen an der Regenlinie geben die jeweilige Intensität wieder). **b** Die drei Regen werden als unabhängige Ereignisse mit Gesamtmengen von 40, 23 und 16 mm aufgefasst und daher auch getrennt modelliert. **c** Die drei Regen werden als unabhängige Ereignisse aufgefasst und getrennt modelliert. Für die Folgeregen wird aber der vorhergegangene Regen durch Feuchtekorrektur des CN-Wertes berücksichtigt. Der CN-Wert steigt dadurch von 86 im Trockenlauf (auch in (a) und (b) verwendet) auf 93 im Feuchtlauf und auf 94 im Nasslauf

erwartet, obwohl 12 mm abgefließen sind (Abb. 8.25c).

Abb. 8.25b und c zeigen deutlich, dass bei einer individuellen Betrachtung der einzelnen Regen der Anfangsverlust die wesentliche Ursache für diese Fehleinschätzung ist. Die berechneten Abflusskurven beginnen wesentlich später als die gemessenen Abflüsse und können daher auch nicht so hohe Abflusssummen erreichen. Im Feuchtlauf wurde bereits nach 51 s der erste Oberflächenabfluss gemessen und beim Nasslauf sogar schon nach 30 s während es im Trockenlauf 499 s (8,3 min) gedauert hatte. Auch dies wird in dem speziellen Fall nahezu perfekt vom CN-Modell vorhergesagt, bei dem Abfluss nach 495 s auftritt. Die Verzögerungen im Feucht- und Nasslauf beruhen nur darauf, dass zunächst ein Abflussfilm aufgebaut werden muss, bis es überhaupt zum Abfluss kommt. Rechnerisch ergibt sich aus der Anfangsverzögerung beim Feuchtlauf eine Schichtdicke von 1 mm und beim Feuchtlauf eine Schichtdicke von 0,5 mm. Dieses Oberflächenwasser fließt aber nach Regenende ebenfalls ab (s. a. [129]). Aus dem Nachfluss errechnen sich ebenfalls Schichtdicken von ca. 0,5 mm.

Dies ändert sich auch nicht grundsätzlich, wenn die CN-Werte für den Feucht- und Nasslauf mit Hilfe von ▶ Gl. 4.3 entsprechend der nun höheren Bodenfeuchte angepasst werden. Zwar steigt dann der CN-Wert von 86 im Trockenlauf auf 93 im Feuchtlauf und auf 94 im Nasslauf und die Diskrepanzen zu den gemessenen Abflüssen werden geringer, aber das grundsätzliche Problem bleibt weiterbestehen. Im Nasslauf werden dann trotz des hohen CN-Wertes nur 5 mm Abfluss

Das gleiche Verhalten wie bei dem in **Abb. 8.25** berechneten Boden trat bei nahezu allen von Martin [130] berechneten 32 Böden und bei allen seinen 96 Berechnungszyklen mit je drei Läufen auf. Auch bei den übrigen in der Datenbank [99–101] enthaltenen Berechnungen, sofern sie mehrere Läufe umfassten, trat dieses Verhalten auf (siehe beispielsweise auch die Abbildung in [129]). Kurz aufeinanderfolgende Regen müssen daher zwingend als ein Ereignis aufgefasst und gemeinsam berechnet werden. Sie über eine höhere Bodenfeuchte mit Hilfe von **Gl. 4.3** abzubilden ist dagegen unzureichend (**Abb. 8.25**), wird dem Mechanismus nicht gerecht und ist wohl eine verbreitete Ursache für systematische Fehler in der Anwendung des CN-Verfahrens.

Es stellt sich die Frage, wie groß die Regenpause sein muss, damit ein Folgeregen als unabhängiges Ereignis betrachtet werden kann. Da die Fehleinschätzung nicht aus einer Unterschätzung des CN-Wertes resultierte, sondern aus einer Überschätzung des Anfangsabzugs, ist dazu die Frage zu beantworten, wann der den Anfangsabzug verursachende Speicher wieder zur Verfügung steht. Bei dem in **Abb. 8.25** dargestellten Ereignis infiltrierten 25 mm von den im Trockenlauf applizierten 40 mm. Unterstellt man im Juli eine tägliche Verdunstung von 5 mm d^{-1} , könnte der Anfangsspeicher nach fünf Tagen wieder zur Verfügung stehen. Nach drei Tagen ist vielleicht die Hälfte des Anfangsspeichers wieder verfügbar. Den Anfangsverlust von 0,2 S auf 0,1 S zu vermindern, wäre dann eine einfach umsetzbare Lösung in dieser Zwischenzeit. Eine Feuchtekorrektur des CN-Wertes sollte dann aber nicht vorgenommen werden. Die eignet sich dagegen besser, um hohe Bodenfeuchte zu berücksichtigen, die nicht durch abflussauslösende Starkregen hervorgerufen wurden. Solche Bedingungen sind besonders im Winterhalbjahr wegen der dann geringen Evapotranspiration gegeben.

Literatur

1. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2015) Dezentrale Maßnahmen zur Hochwasserminderung. Merkblatt DWA-M 550: Hennef
2. Fiener P, Auerswald K, Weigand S (2005) Managing erosion and water quality in agricultural watersheds by small detention ponds. *Agric Ecosyst Environ* 110:132–142. [▶ https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.03.012](https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.03.012)
3. Fiener P, Auerswald K (2006) Influence of scale and land use pattern on the efficacy of grassed waterways to control runoff. *Ecol Eng* 27:208–218. [▶ https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.02.005](https://doi.org/10.1016/j.ecoleng.2006.02.005)
4. Fiener P, Auerswald K (2005) Measurement and modeling of concentrated runoff in grassed waterways. *J Hydrol* 301:198–215. [▶ https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.030](https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2004.06.030)
5. Fiener P, Auerswald K (2006) Seasonal variation of grassed waterway effectiveness in reducing runoff and sediment delivery from agricultural watersheds in temperate Europe. *Soil Tillage Res* 87:48–58. [▶ https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.035](https://doi.org/10.1016/j.still.2005.02.035)
6. Seidel N (2008) Untersuchung der Wirkung verschiedener Landnutzungen auf Oberflächenabfluss und Bodenerosion mit einem Simulationsmodell. Dissertation, Technische Universität Bergakademie Freiberg, Freiberg
7. Sonnemann S, Münch A, Dittrich I, Eisenhauer D-R (2008) Einfluss des Waldanteils, der Baumartenzusammensetzung und der Bestandsstruktur sowie der Waldbewirtschaftung auf das Abflussregime von Flusseinzugsgebieten im Osterzgebirge. In: Schmidt PA, Eckehard GW, Eisenhauer DR (Hrsg) Waldbehandlung, Waldmehrung und Auengestaltung unter Berücksichtigung von Hochwasservorsorge und Naturschutz im Osterzgebirge. DBU-Projekt (Abschlussbericht), pp 147–159
8. Matschullat J, Richert E, Bianchin S, et al (2007) Hochwasser- und Naturschutz im Weißeritzkreis. TU Bergakademie Freiberg, Internationales Hochschulinstitut Zittau, Büro für Hydrologie und Bodenkunde, Endbericht DBU-Vorhaben 21278, Freiberg
9. Weiß A (2009) Beitrag unterschiedlicher Bodenbearbeitungsverfahren und Bewirtschaftungsformen der Landwirtschaft zur Reduzierung des Hochwasserabflusses. Dissertation, Kasseler Wasserbau-Mitteil 17: Universität, Kassel
10. Kreiter T (2007) Dezentrale und naturnahe Retentionsmaßnahmen als Beitrag zum Hochwasserschutz in mesokaligen Einzugsgebieten der Mittelgebirge. Dissertation, Universität, Trier

11. Dohm B, Kreiter T (1999) Bemessung und Optimierung von Kleinrückhalten im Rahmen dezentraler Hochwasserschutzkonzepte. Diplomarbeit, Fachbereich Bauingenieurwesen, Fachhochschule, Trier
12. Lukas A (2003) Wasserrückhaltung durch Ländliche Entwicklung – Evaluierung von dezentralen Wasserrückhaltemaßnahmen. Diplomarbeit, Lehrstuhl Bodenordnung und Landentwicklung, Technische Universität, München
13. Kornmann M, Schmidt W, Müller E (2006) Umsetzung erosionsmindernder und hochwasserreduzierender Maßnahmen auf Einzugsgebietsebene am Beispiel des Stausees Baderitz. Schriftenr Sächs Landesanst Landwirtschaft 9:79–86, Dresden
14. Binder F, Macher C, Klöcking B (2006) Integrale Planung von Erstaufforstungen am Beispiel der Paar in der Gemeinde Geltendorf. LWF Wissen, 55:73:82 Bayer Landesanst Wald und Forstwirt, Freising
15. Röttcher K, Tönsmann F (2001) Möglichkeiten und Grenzen des dezentralen Hochwasserschutzes am Beispiel der Bauna. Wasser & Boden 53:29–34
16. Rieger W (2012) Prozessorientierte Modellierung dezentraler Hochwasserschutzmaßnahmen. Mitt des Inst Wasserwesen Wasserwirt Ressourcenschutz, 116: Universität der Bundeswehr München, Neubiberg
17. Assmann A (1999) Die Planung dezentraler, integrierter Hochwasserschutzmaßnahmen mit dem Schwerpunkt der Standortausweisung von Retentionsarealen an der Oberen Elsenz, Kraichgau. LFLBW-Schriftenr 11: Landesamt für Flurneueordnung und Landentwicklung Baden-Württemberg, Kornwestheim
18. Welle PJ, Woodward DE (1986) Time of concentration. Hydrology Technical Note No. N4. U.S. Department of Agriculture, Soil Conservation Service, Chester
19. Savat J (1977) The hydraulics of sheet flow on a smooth surface and the effect of simulated rainfall. Earth Surf Proc Land 2:125–140. [▶ https://doi.org/10.1002/esp.3290020205](https://doi.org/10.1002/esp.3290020205)
20. Woolhiser DA (1975) Simulation of unsteady overland flow. In: Mahmood K, Yevjevich V (Hrsg) Unsteady flow in open channels 2: chapter 12. Water Resources Publication, Fort Collins
21. Engman ET (1986) Roughness coefficients for routing surface runoff. J Irrig Drain Eng 112:39–53
22. Natural Resources Conservation Service (2010) Time of concentration. In: National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology, chapter 15. US Department of Agriculture, Washington
23. Seybert TA (2006) Stormwater management for land development. Methods and calculations for quantity control. Wiley, Hoboken
24. Landesanstalt für Umweltschutz Baden-Württemberg (2003) Hydraulik naturnaher Fließgewässer. Teil 1 Grundlagen und empirische hydraulische Berechnungsverfahren. Karlsruhe
25. Keulegan G (1938) Laws of turbulent flows in open channels. J Natl Bur Stand 21:707–741
26. Cowan WL (1956) Estimating hydraulic roughness coefficients. Agric Eng 37:473–475
27. Sellin RHJ (1964) A laboratory investigation into the interaction between the flow in the channel of a river and that over its flood-plain. La Houille Blanche 7:793–802
28. Chow VT (1959) Open channel hydraulics. Blackburn Press, Caldwell, New Jersey, USA
29. Freimann R (2014) Hydraulik für Bauingenieure: Grundlagen und Anwendungen. Hanser, München
30. Wikipedia (2017) Hydraulischer Durchmesser. Wikipedia. [▶ https://de.wikipedia.org/wiki/Hydraulischer_Durchmesser](https://de.wikipedia.org/wiki/Hydraulischer_Durchmesser). Zugegriffen: 22. Jan. 2018
31. Sächsisches Landesamt für Umwelt und Geologie (2003) Hydraulische Bemessung von Freigefälledruckleitungen zum Abwassertransport. Dresden
32. Kuichling E (1889) The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts. Trans Am Soc Civ Eng 20:1–56
33. Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall (2006) Hydraulische Bemessung und Nachweis von Entwässerungssystemen. Arbeitsbl DWA-A 118: Hennef
34. Pennington M (2012) The rational method—frequently used, often misused. [▶ https://www.waternz.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment_id=846](https://www.waternz.org.nz/Attachment?Action=Download&Attachment_id=846)
35. Cleveland G, Thompson DB, Fang X (2011) Use of the rational and modified rational methods for hydraulic design. Res Rep 0-6070-1: Texas Tech Center for Multidisciplinary Research in Transportation, Lubbock
36. Junghänel T, Ertel H, Deuschländer T (2017) KOSTRA-DWD-2010R. Bericht zur Revision der koordinierten Starkregenregionalisierung und -auswertung des Deutschen Wetterdienstes in der Version 2010. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
37. Poertner H (1974) Practices in Detention of Urban Stormwater Runoff. APWA Special Rep 43: American Public Works Association, Washington
38. Dhakal N, Fang X, Thompson DB, Cleveland TG (2014) Modified rational unit hydrograph method and applications. Proc Inst Civ Eng Water Manag 167:381–393 [▶ https://doi.org/10.1680/wama.13.00032](https://doi.org/10.1680/wama.13.00032)

39. Bartels H, Weigl E, Reich T, et al (2004) Projekt RADOLAN: Routineverfahren zur Online-Aneichung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer). Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
40. Weigl E (2011) Verifikation, Aneichstationsdichte und Ombrometerverfügbarkeit. *Newsl Hydrometeorol* 6:4–13
41. DWD (2018) RADKLIM. Erstellung einer radargestützten hochaufgelösten Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderungen des Extremverhaltens von Niederschlag. Beschreibung des Kompositformats und der verschiedenen Reprozessierungsläufe. Offenbach am Main
42. Krecklow J (2018) Radproc – A GIS-compatible Python-Package for automated RADOLAN Composite Processing and Analysis. Version 0.1.2. ► <https://doi.org/10.5281/zenodo.1313701>
43. Mahlke H (2017) Mechanismen der Auslösung hochreichender Konvektion im südwestdeutschen Mittelgebirgsraum. Dissertation, Wiss Ber Inst Meteor Klimaforsch 65: Karlsruher Institut für Technologie, Karlsruhe
44. Lochbihler K, Lenderink G, Siebesma AP (2017) The spatial extent of rainfall events and its relation to precipitation scaling. *Geophys Res Lett* 44:8629–8636. ► <https://doi.org/10.1002/2017GL074857>
45. Allen RJ, DeGaetano AT (2005) Areal reduction factors for two eastern United States regions with high rain-gauge density. *J Hydrol Eng* 10:327–335. ► [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1084-0699\(2005\)10:4\(327\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1084-0699(2005)10:4(327))
46. Asquith W, Famiglietti J (2000) Precipitation areal-reduction factor estimation using an annual-maxima centered approach. *J Hydrol* 230:55–69. ► [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00170-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00170-0)
47. De Michele C, Rosso R (2002) A multi-level approach to flood frequency regionalisation. *Hydrol Earth Syst Sci* 6:185–194
48. National Oceanic and Atmospheric Administration (1972) National Weather Service River Forecast System Forecast Procedures. NWS-Hydro-14, NOAA Technical Memorandum. US Department of Commerce, Washington
49. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1982) Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil I: Analyse. Regeln zur Wasserwirtschaft 112: Paul Parey, Hamburg
50. Goovaerts P (2000) Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall. *J Hydrol* 228:113–129. ► [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(00\)00144-X](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(00)00144-X)
51. Dyck S, Peschke G (1995) Grundlagen der Hydrologie. Verlag für Bauwesen GmbH, Berlin
52. Merz R (2006) Regionalisierung von Ereignisgrößen. In: Günter B, Godina R, Merz R (Hrsg) Methoden der hydrologischen Regionalisierung. *Wiener Mitt* 197:179–194 Technische Universität, Wien
53. Patt H, Jüpner R (2013) Hochwasser-Handbuch Auswirkungen und Schutz. Springer, Berlin
54. Wohlrab B, Ernstberger H, Meuser A (1992) Landschaftswasserhaushalt. Paul Parey, Hamburg
55. Maniak U (2016) Hydrologie und Wasserwirtschaft. Springer, Berlin
56. Gebner D (1995) Klimatologie und Regionalisierung starker Gebietsniederschläge in der nordalpinen Schweiz. *Zürcher Geogr Schr* 59: ETH Zürich
57. Fiener P, Auerswald K (2009) Spatial variability of rainfall on a sub-kilometer scale. *Earth Surf Proc Land* 34:848–859
58. Schaake J, Duan Q, Smith M, Koren V (2000) Criteria to select basins for hydrologic model development and testing. 15th Conference on Hydrology P1.8:1–4, American Meteorological Society, Long Beach
59. Bronstert A, Agarwal A, Boessenkool B et al (2018) Forensic hydro-meteorological analysis of an extreme flash flood: the 2016-05-29 event in Braunsbach, SW Germany. *Sci Total Environ* 630:977–991. ► <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.241>
60. Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (2016) Leitfaden Kommunales Starkregenrisikomanagement in Baden-Württemberg. Karlsruhe
61. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (1984) Arbeitsanleitung zur Anwendung von Niederschlag-Abfluß-Modellen in kleinen Einzugsgebieten. Teil II: Synthese. Regeln zur Wasserwirtschaft 113: Paul Parey, Hamburg
62. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft u. Kulturbau (1999) Hochwasserabflüsse. DVWK-Schriften 124: Wirtschafts- und Verlagsgesellschaft Gas und Wasser mbH, Bonn
63. Althaus J (1985) Vergleich von Modellregnen zur Kanalnetzrechnung. *Mitt Inst Wasserwirtsch Hydrol und Landwirtschaftl Wasserbau* 56: Universität, Hannover
64. Otter J, Königer W (1986) Bemessungsregen für Kanalnetz, Regenüberläufe und Regenbecken. *Gas-Wasser-Abwasser* 66:124–128
65. Schaardt V (1999) Belastungsannahmen bei der Kanalnetzrechnung größerer Einzugsgebiete. *gwf Wasser Abwasser* 1:27–31

66. Natural Resources Conservation Service (2015) National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology. US Department of Agriculture, Washington. ► <http://t1p.de/NRCS-NEH>
67. Stahl N, Casper M (2017) Eine neue ereignisbasierte Variante zur Ableitung von synthetischen Niederschlagsverteilungen zur Generierung von Hochwasserganglinien mit dem Niederschlag-Abfluss-Modell LARSIM am Beispiel des Isareinzugsgebietes. *Hydrol und Wasserbewirtschaftung* 61:93–119. ► https://doi.org/10.5675/HyWa_2017,2_2
68. Deutscher Wetterdienst (2015) Maximierte Gebietsniederschlagshöhen für Deutschland (MGN). Offenbach am Main
69. Institut für technisch-wissenschaftliche Hydrologie (2010) Praxisrelevante Extremwerte des Niederschlags. (PEN-LAWA). Hannover
70. Winterrath T, Brendel C, Hafer M, et al (2018) RADKLIM Version 2017.002: Reprocessed gauge-adjusted radar-data, one-hour precipitation sums (RW). Offenbach am Main. ► https://doi.org/10.5676/dwd/radklim_rw_v2017.002
71. Winterrath T, Brendel C, Hafer M, et al (2018) RADKLIM Version 2017.002: Reprocessed quasi gauge-adjusted radar data, 5-minute precipitation sums (YW). Offenbach am Main. ► https://doi.org/10.5676/dwd/radklim_yw_v2017.002
72. Winterrath T, Brendel C, Hafer M, et al (2017) Erstellung einer dekadischen radargestützten hochauflösenden Niederschlagsklimatologie für Deutschland zur Auswertung der rezenten Änderung des Extremverhaltens von Niederschlag. DWD-Berichte 251: Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
73. Huntington TG (2006) Evidence for intensification of the global water cycle: review and synthesis. *J Hydrol* 319:83–95. ► <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2005.07.003>
74. Auerswald K, Fischer F, Winterrath T et al (2019) Klimabedingte Veränderung der Regenerosivität seit 1960 und Konsequenzen für Bodenabtragsschätzungen. In: Bachmann G, König W, Utermann J (Hrsg) Bodenschutz, Ergänzbares Handbuch der Maßnahmen und Empfehlungen für Schutz, Pflege und Sanierung von Böden, Landschaft und Grundwasser (Loseblattsammlung). Erich Schmidt, Berlin
75. Müller EN, Pfister A (2011) Increasing occurrence of high-intensity rainstorm events relevant for the generation of soil erosion in a temperate lowland region in Central Europe. *J Hydrol* 411:266–278. ► <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2011.10.005>
76. Bürger G, Heistermann M, Bronstert A et al (2014) Towards subdaily rainfall disaggregation via Clausius-Clapeyron. *J Hydrometeorol* 15:1303–1311. ► <https://doi.org/10.1175/JHM-D-13-0161.1>
77. Feldmann H, Schädler G, Panitz HJ, Kottmeier C (2013) Near future changes of extreme precipitation over complex terrain in Central Europe derived from high resolution RCM ensemble simulations. *Int J Climatol* 33:1964–1977. ► <https://doi.org/10.1002/joc.3564>
78. Ziese M, Junghänel T, Becker A (2016) Andauernde Großwetterlage Tief Mitteleuropa entfaltet ihr Unwetterpotential mit starken Gewittern und massiven Schadensgeschehen in Deutschland. Deutscher Wetterdienst, Offenbach am Main
79. Auerswald K, Fischer FK, Winterrath T, Brandhuber R (2019) Rain erosivity map for Germany derived from contiguous radar rain data. *Hydrol Earth Syst Sci* 23:1819–1832. ► <https://doi.org/10.5194/hess-23-1819-2019>
80. Kunz M, Sander J, Kottmeier C (2009) Recent trends of thunderstorm and hailstorm frequency and their relation to atmospheric characteristics in southwest Germany. *Int J Climatol* 29:2283–2297. ► <https://doi.org/10.1002/joc.1865>
81. Westra S, Fowler HJ, Evans JP et al (2014) Future changes to the intensity and frequency of short-duration extreme rainfall. *Rev Geophys* 52:522–555. ► <https://doi.org/10.1002/2014RG000464>
82. Lenderink G, van Meijgaard E (2008) Increase in hourly precipitation extremes beyond expectations from temperature changes. *Nat Geosci* 1:511–514. ► <https://doi.org/10.1038/ngeo262>
83. Coumou D, Lehmann J, Beckmann J (2015) Climate change The weakening summer circulation in the Northern Hemisphere mid-latitudes. *Science* 348:324–7. ► <https://doi.org/10.1126/science.1261768>
84. Hübl J, Heiser M, Braito S, et al (2017) Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse Rottal-Inn 2016, Ereignisanalyse Simbach. IAN REPORT 180(2): Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien
85. Hübl J, Heiser M, Braito S, et al (2017) Ereignisdokumentation und Ereignisanalyse Rottal-Inn 2016, Ereignisdokumentation. IAN REPORT 180(1): Institut für Alpine Naturgefahren, Universität für Bodenkultur, Wien
86. Lutz W (1984) Berechnung von Hochwasserabflüssen unter Anwendung von Gebietskenngrößen. *Mitt Inst Hydrol Wasserwirt* 24: Universität Karlsruhe
87. Linsley RK, Kohler MA, Paulhus JLH (1949) *Applied hydrology*. McGraw-Hill, New York

88. Kohler MA, Linsley RK (1951) Predicting the Runoff from Storm Rainfall. US Department of Commerce, Weather Bureau, Res Paper 34, Washington
89. Natural Resources Conservation Service (2004) Estimation of direct runoff from storm rainfall. In: National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology, chapter 10. US Department of Agriculture, Washington 90
90. Ott M (1997) Untersuchungen zur Ermittlung regional gültiger Hochwasserabflüsse am Beispiel des südbayerischen Donaupraums – Erfassung von abflußrelevanten Bodeneigenschaften bei der Anwendung eines einfachen Niederschlag-Abfluß-Modells. Ber Fachgeb Wasserbau Wasserwirt 5: Universität, Kaiserslautern
91. Koehler G (1999) Regionalisierung von Hochwasserabflüssen für kleine Einzugsgebiete im südlichen Donauebiet. In: Koehler G (Hrsg) Bemessungsabflüsse für kleine Einzugsgebiete. Ber Fachgeb Wasserbau Wasserwirt 9:165–178, Universität, Kaiserslautern
92. Plate EJ, Ihringer J, Lutz W (1988) Operational models for flood calculations. J Hydrol 100:489–506. ► [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(88\)90198-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(88)90198-9)
93. Bayerisches Landesamt für Umwelt (2016) Loseblattsammlung Hydrologische Planungsgrundlagen. Augsburg
94. Graeff T, Zehe E, Blume T et al (2012) Predicting event response in a nested catchment with generalized linear models and a distributed watershed model. Hydrol Process 26:3749–3769. ► <https://doi.org/10.1002/hyp.8463>
95. Seibert SP, Jackisch C, Pfister L, et al (2016) Exploring the interplay between state, structure and runoff behavior of lower mesoscale catchments. Hydrol Earth Syst Sci Discuss 1–51. ► <https://doi.org/10.5194/hess-2016-109>
96. Van Oost K (2003) Spatial modelling of soil redistribution processes in agricultural landscapes. Dissertation, Katholieke Universiteit, Leuven
97. Schwertmann U, Vogl W, Kainz M (1987) Boden-erosion durch Wasser – Vorhersage des Bodenabtrags und Bewertung von Gegenmaßnahmen. Ulmer, Stuttgart
98. Deutsches Institut für Normung (2017) Bodenbeschaffenheit – Ermittlung der Erosionsgefährdung von Böden durch Wasser mit Hilfe der ABAG. DIN 19708:2017-08, Beuth Verlag, Berlin
99. Seibert SP, Auerswald K, Fiener P, et al (2011) Surface runoff from arable land—a homogenized data base of 726 rainfall simulation experiments. ► <https://doi.org/10.1594/GFZ.TR32.2>
100. Fiener P, Seibert SP, Auerswald K (2011) A compilation and meta-analysis of rainfall simulation data on arable soils. J Hydrol 409:395–406. ► <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.08.034>
101. Fiener P, Auerswald K, Winter F, Disse M (2013) Statistical analysis and modelling of surface runoff from arable fields in central Europe. Hydrol Earth Syst Sci 17:4121–4132. ► <https://doi.org/10.5194/hess-17-4121-2013>
102. Musgrave GW (1955) How much of the rain enters the soil? Water. US Department of Agriculture. Yearbook, Washington
103. Natural Resources Conservation Service (2009) Hydrologic soil groups. In: National Engineering Handbook. Part 630 Hydrology, chapter 7. US Department of Agriculture, Washington
104. Maidment D (1993) Handbook of Hydrology. McGraw-Hill Education, New York
105. Scheinost AC, Sinowski W, Auerswald K (1997) Regionalization of soil water retention curves in a highly variable soilscape, I. Developing a new pedotransfer function. Geoderma 78:129–143
106. Ad-hoc Arbeitsgruppe Boden (2005) Bodenkundliche Kartieranleitung, 5. Aufl. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten, Hannover
107. Bayerisches Landesamt für Steuern (2009) Merkblatt über den Aufbau der Bodenschätzung. Nürnberg
108. Bowling L, Lettenmaier DP (2001) The effects of forest roads and harvest on catchment hydrology in a mountainous maritime environment. In: Wigmosta MS, Burges SJ (Hrsg) Land Use and Watersheds 2:145–164 AGU Water Science and Applications. ► <https://doi.org/10.1029/WS002p0145>
109. Klaus J, Jackson CR (2018) Interflow is not binary: a continuous shallow perched layer does not imply continuous connectivity. Water Resour Res 54:5921–5932. ► <https://doi.org/10.1029/2018WR022920>
110. Tempel M (2006) Abflussverhalten kleiner, forstlich genutzter Bacheinzugsgebiete am Beispiel des Einzugsgebietes des Oberen Gräfenbaches im Soonwald/Hunsrück. Dissertation, Johannes Gutenberg-Universität Mainz
111. Wigmosta MS, Nijssen B, Storck P (2002) The distributed hydrology soil vegetation model. In: Singh VP, Frevert DK (Hrsg) Mathematical models of small watershed hydrology and applications 1:7–42. Water Resource Publications, Littleton
112. Ingenieurbüro Lenz (2017) Planungshandbuch. Initiative boden.ständig. Ringelai. ► https://www.boden-staendig.eu/_Resources/Persisent/8e414f5335c25a92c760d80cd91699c2dc

- ba11dc/Planungshandbuch-bodenstaendig-
Stand-2017-11.pdf
113. Ingenieurbüro Lenz A (2017) Sanierung des landwirtschaftlichen Stoffhaushalts durch Ländliche Entwicklung. Boden-Ständig Projekt Wallerfing, Ringelai. ► www.boden-staendig.eu
 114. Lindsay JB (2016) Whitebox GAT: a case study in geomorphometric analysis. *Comput Geosci* 95:75–84. ► <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2016.07.003>
 115. Wolfgang HJ (1989) Acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen zur Verminderung der Bodenerosion und der Nitratverlagerung im Zuckerrübenanbau. Dissertation. Universität, Hannover
 116. Dikau R (1986) Experimentelle Untersuchungen zu Oberflächenabfluß und Bodenabtrag von Meßparzellen und landwirtschaftlichen Nutzflächen. *Heidelberger Geographische Arbeiten* 81. Selbstverlag des Geographischen Institut, Universität, Heidelberg
 117. Schröder R (2000) Modellierung von Verschlammung und Infiltration in landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. Dissertation, Universität, Bonn
 118. Schröder R, Auerswald K (2000) Modellierung des Jahresgangs der verschlammungsinduzierten Abflussbildung in kleinen landwirtschaftlich genutzten Einzugsgebieten. *Z Kulturtechnik Landentwickl* 41:167–172
 119. Auerswald K, Schröder R (2001) Simulation von verschlammungsgesteuertem Abfluss heterogen genutzter Einzugsgebiete. *Wasser und Boden* 53:17–20
 120. Beven K, Kirkby MJ (1979) A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrol Sci Bull* 24:43–69
 121. Ostrowski MW, Wolf U, Rohde F (1984) Die Berechnung der aktuellen Infiltration mittels Bodenfeuchtesimulation. *Wasserwirtschaft* 74:3–7
 122. Leavesley GH, Lichty RW, Troutman BM, Saindon LG (1983) Precipitation-runoff modelling system—user's manual. Investigation Rep 83-4238. US Geological Survey Water Resources, Denver
 123. Leavesley GH, Markstrom SL, Brewer MS, Viger RJ (1996) The modular modelling system (MMS)—the physical process modeling component of a database-centered decision support system for water and power management. *Water Air Soil Pollut* 90:303–311
 124. Leavesley G, Markstrom S, Viger R, Hay L (2007) The modular modelling system (MMS): a toolbox for water and environmental resources management. In: Wheeler H, Sorooshian S, Sharma K (Hrsg) *Hydrological modelling in arid and semi-arid areas*. International Hydrology Series. University Press, Cambridge, S 87–98
 125. Wischmeier WH (1959) A rainfall erosion index for a universal soil-loss equation. *Soil Sci Soc Am Proc* 23:246–249
 126. Meyer LD (1960) Use of the rainulator for runoff plot research. *Soil Sci Soc Am Proc* 24:319–322
 127. Wischmeier WH, Mannering JV (1969) Relation of soil properties to its erodibility. *Soil Sci Soc Am Proc* 33:131–137
 128. Auerswald K (1985) Erosionsgefährdung unter Zuckerrüben und Sommergerste. *J Agron Crop Sci* 155:34–42
 129. Auerswald K, Eicher A (1992) Comparison of German and Swiss rainfall simulators—accuracy of measurement and effect of rainfall sequence on runoff and soil loss rates. *Z Pflanzenernähr Bodenkd* 155:191–195. ► <https://doi.org/10.1002/jpln.19921550306>
 130. Martin W (1988) Die Erodierbarkeit von Böden unter simulierten und natürlichen Regen und ihre Abhängigkeit von Bodeneigenschaften. Dissertation, Technische Universität, München

Open Access Dieses Kapitel wird unter der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (► <http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>) veröffentlicht, welche die Nutzung, Vervielfältigung, Bearbeitung, Verbreitung und Wiedergabe in jeglichem Medium und Format erlaubt, sofern Sie den/ die ursprünglichen Autor(en) und die Quelle ordnungsgemäß nennen, einen Link zur Creative Commons Lizenz beifügen und angeben, ob Änderungen vorgenommen wurden.

Die in diesem Kapitel enthaltenen Bilder und sonstiges Drittmaterial unterliegen ebenfalls der genannten Creative Commons Lizenz, sofern sich aus der Abbildungslegende nichts anderes ergibt. Sofern das betreffende Material nicht unter der genannten Creative Commons Lizenz steht und die betreffende Handlung nicht nach gesetzlichen Vorschriften erlaubt ist, ist für die oben aufgeführten Weiterverwendungen des Materials die Einwilligung des jeweiligen Rechteinhabers einzuholen.



Serviceteil

Stichwortverzeichnis – 233

Stichwortverzeichnis

A

Abbauland 65
 Abfluss 13
 – direkter s. Niederschlag, effektiver
 – mittlerer 25
 – Oberflächenabfluss s. Niederschlag, effektiver
 – Scheitelabfluss s. dort
 – Zwischenabfluss s. dort
 Abflussbeiwert 12, 16
 – maximaler 203
 Abflussbeschleunigung 142, 146
 Abflussganglinie 16–18, 34, 47
 Abflusskonzentration 13, 16, 96, 114
 Abflusskurve s. Abflussganglinie
 Abflussminderung 16
 Abflussmulde, begrünte 109, 124, 175
 Abflussprozess 13
 Abflussrate 16, 104
 Abflussscheitel s. Scheitelabfluss
 Abflussspende 16, 104
 Abflusstyp 97, 174
 Abflussverzögerung 16, 26, 37, 96
 Abflussvolumen 13, 16, 25, 34, 37
 Abflusswelle 25, 34
 Ablaufzeit 34, 41
 Ackerfläche 79, 97, 109, 175, 178, 180
 Ackerfutter, mehrjähriges 65, 89, 116, 204
 Ackerrandfurche 99
 Ackerrandstreifen 150
 Anfangsverlust 16, 64, 203, 206
 Annuität s. Jährlichkeit
 Anstiegszeit s. Scheitelanstiegszeit
 Asbestrohr 109
 Asphalt 109, 178, 185
 Aue 109
 Aufforstung 175
 Ausuferung 25
 Auwald 109, 177

B

Bach 108, 181
 Bauplatz s. Abbauland
 Bearbeitung
 – nicht-wendende 204
 – no-till 73
 – Streifen 83, 120
 – wendende 73

Bebauung 35
 Bedeckung 64, 67, 115, 207, 219
 Bemessung 17
 Bemessungsabfluss 74
 Bemessungsniederschlag 40, 160, 188
 Bemessungsziel 74
 Beton 109, 178, 185
 Betonrohr 109
 Bewirtschaftung 86, 160
 – höhenlinienparallele s. Konturnutzung
 Bewirtschaftungsrichtung s. Konturnutzung
 Bezugspunkt 14, 39
 Blockregen 193
 Bodenabtrag s. Erosion
 Bodenart 210
 Bodenbearbeitung 116
 – konservierende 176
 Bodenbedeckung s. Bedeckung
 Bodenfeuchte 62, 64
 Bodengruppe, hydrologische 19, 67, 68, 70, 72, 86, 89, 90, 204, 208
 Bodenschätzung 211
 Bodentextur 210
 Bodenwasservorrat 64
 Brache 64
 Bruchwald s. Auwald
 Buchweizen s. Getreide, Zwischenfrucht

C

Check dam 28
 CN-Verfahren 62, 217
 Curve-Number-Verfahren s. CN-Verfahren

D

Dammkultur 116, 120, 177, 180
 – Jahresgang der Bedeckung 117
 Dauerstufe 40, 77
 Decke, wassergebundene 109, 178
 DEGL-Verfahren s. Einheitsganglinienverfahren
 Dinkel s. Getreide
 Direktabfluss s. Niederschlag, effektiver
 Direktsaat s. auch Mulchdirektsaat
 Drainage 96

Dreiecksganglinienverfahren 38
 Drosselblende 130
 Durchfluss 17

E

EGL-Verfahren s. Einheitsganglinienverfahren
 Einheitsganglinie 17
 Einheitsganglinienverfahren 46
 Eintrittswahrscheinlichkeit 17
 Einzugsgebiet 14, 17
 – hydrogeologisches 14
 – oberirdisches 14
 – topographisches 14
 – unterirdisches 14
 Einzugsgebietsform 36
 Erdkanal 108
 Erosion 114, 139
 Erosionsrinne 178

F

Fahrweg s. Weg
 Feldrain 96, 98
 Festgestein 209
 Feuchtgebiet 183
 Filterstreifen s. Grünstreifen
 Flächenparzellierung 82, 137
 Flash flood s. Sturzflut
 Fließbreite 96
 Fließgeschwindigkeit 18, 104
 Fließgewässer
 – periodisches 36
 – permanentes 36
 Fließgewässerlandschaft 18
 Fließpfad 18, 96, 103
 Fließtiefe 96, 181
 Fließweg s. Fließpfad
 Fließwegkartierung 215
 Fließzeit s. Konzentrationszeit
 Flurbereinigung s. Flurneuordnung
 Flurneuordnung 100, 142, 143
 Flussbett 108
 Flusshochwasser s.
 Flussüberschwemmung
 Flussüberschwemmung 18, 22
 Forst s. Wald
 Fruchtartenwechsel 84, 86
 Fruchtfolge 86

G

- Ganglinie 18, 34, 38
 Gauckler-Manning-Strickler-Gleichung
 s. GMS-Gleichung
 Gebietsniederschlag 13, 18, 188
 – synthetischer 192
 Gebietsrückhalt 12
 Gefälle 84
 Gemüse s. Reihenkultur
 Gerinne 181
 Gerste s. Getreide
 Geschwindigkeitsmethode 103, 105
 Getreide s. auch Wintergetreide,
 Sommergetreide 64, 65, 184, 204
 Gewässerbett 108
 Gewässernetz 99, 100
 – primäres 100
 – sekundäres 100
 Gewässernetzdichte 36
 Gewässerrenaturierung 177
 Gewässersohle 108
 Gewässervorland 109
 Gewerbegebiet 65
 Gitterstein 109
 GMS-Gleichung 102, 106
 Golfplatz 65
 Graben 43, 96, 100, 108, 146, 160, 181
 Grassed Waterway s. Abflussmulde,
 begrünte
 Grasstreifen s. Grünstreifen
 Grundwasserstand 209
 Grünland, s. auch Wiese, Weide 64,
 79, 97, 142, 175, 178
 Grünstreifen 18, 121

H

- Hafer s. Getreide
 Hanglänge, kritische 84, 117
 Hangmulde 43, 84, 180
 Hangmuldenabfluss 97
 Hangneigung s. auch Gefälle 73,
 117, 180
 Hartholzauwe 109
 Hecke 81, 96
 Hochstaudenflur 109, 178
 Hochwasser 18, 22
 – extremes 76
 – häufiges 76
 Hochwasserschutz
 – dezentraler 17, 26, 183
 – zentraler 26
 Hopfen s. Reihenkultur, Dammkultur

I

- Industriegebiet 65
 Infiltration 62, 73, 116, 209
 – Nachregen 138
 – Runon 82
 Initiative boden:ständig 2
 Intensität s. Niederschlagsintensität
 Interflow s. Zwischenabfluss

J

- Jahresgang
 – Ackerfrüchte 68, 207
 – CN-Werte 64, 68, 70
 – klimatische Wasserbilanz 66
 – Niederschlag 77
 – Oberflächenabfluss 86
 Jährlichkeit 17, 19, 41, 74, 77

K

- Kanal, gemauerter 109
 Kartoffel s. Dammkultur, Reihenkultur
 Kiesgrube s. Abbauland
 Kirpich-Gleichung 40
 Klee gras s. Ackerfutter, mehrjähriges
 Kleinstrückhaltebecken s. Retentions-
 becken
 Klimawandel 22, 195
 Konturnutzung 73, 88, 96, 116, 178,
 204
 Konzentrationszeit 19, 39, 96, 102,
 105, 137, 162, 183
 Korndurchmesser, medianer 210
 Korngröße 209
 KOSTRA 41, 74, 76, 184, 192, 197

L

- Landbau, ökologischer s. Landbau,
 organischer
 Landbau, organischer 65, 89, 176
 Landnutzung 19, 79
 – heterogene 72
 Landregen 22
 Landschaftsgliederung 82, 86, 141,
 143
 Lutz-Verfahren 203
 Luzerne s. Ackerfutter, mehrjähriges

M

- Mähdruschfrucht s. Getreide
 Mähweide s. Grünland
 Mais s. auch Reihenkultur 4, 100, 119
 Manning's n s. Rauheitsbeiwert
 Manning-Strickler-Gleichung s.
 GMS-Gleichung
 Maximalretention 64
 Modellregen 192
 Monokultur 86
 Mulchdirektsaat 19, 43, 72, 86, 114,
 204
 Mulchsaat 19, 72, 88, 204

N

- Neigung s. Gefälle, Hangneigung.
 Niederschlag 12, 19, 188
 – abfließender s. Niederschlag,
 effektiver
 – abflusswirksamer s. Niederschlag,
 effektiver
 – Bemessung s. Bemessungsnieder-
 schlag
 – effektiver 12, 62, 160
 – Ganglinie s. Ganglinie
 – Gebiet s. Gebietsniederschlag
 – Intensität s. Niederschlagsintensi-
 tät
 – Verteilung 35
 – Zugrichtung 35
 Niederschlag-Abfluss-Process 12
 Niederschlagsdauer 189
 Niederschlagshöhe 77, 189
 Niederschlagsintensität 19, 40
 – kritische 184, 186
 Niederschlagsmesser 190
 Niederschlagsskalierung 199
 Niederschlagsverteilung
 – anfangsbetonte 193
 – endbetonte 193
 – mittenbetonte 53, 193
 Niederschlagswasser 20
 Niederschlag
 – abfließender s. Niederschlag,
 effektiver

O

- Oberflächenabfluss s. Niederschlag,
 effektiver
 – Obstanlage 65, 204
 Ölrettich s. Zwischenfrucht

Ombrometer 190

P

Parkplatz 109, 185
 PEN-LAWA-Datensatz 195
 Pflaster 109
 Pflugfurche 178
 Phazelia s. Zwischenfrucht
 PVC-Rohr 109

Q

Querbearbeitung s. Konturnutzung
 Querschnittsfläche 104, 184
 Querschnittsform 96, 147, 184

R

Radardaten 77, 189, 201
 Radius, hydraulischer 96, 106, 181, 183
 Ranke 96, 98
 Raps s. Getreide
 Rational method 37
 Rauheit 20, 115, 147
 Rauheitsbeiwert 106–108, 178
 Regen s. Niederschlag
 Reihenabstand 67
 Reihenkultur 65, 97, 115, 185, 204
 – Jahresgang der Bedeckung 117
 Retention 63
 Retentionsbecken 129, 175, 214
 REWANUS-Datensatz 195
 Rille 43, 97, 116, 178
 Rinne s. Rille
 Roggen s. Getreide
 Rohr 146, 181
 Routing 20
 Rübe s. Reihenkultur
 Rückhaltebecken s. Retentionsbecken
 Runoff-Curve-Number-Verfahren s. CN-Verfahren
 Runon-Infiltration 82

S

Sandgrube s. Abbauand
 Scheitelabfluss 25, 34, 37, 163
 Scheitelanstiegszeit 25, 34, 39, 114
 Scheitelhöhe s. Scheitelabfluss
 Schichtabfluss 43, 97, 174
 Schlaggrenze 96, 99
 Schotterweg 180

SCS-Curve-Number-Verfahren s. CN-Verfahren

Sediment 29
 See 183
 Senf s. Zwischenfrucht
 Siedlung
 – dörfliche 65
 – städtische 65
 Silomais s. Mais
 Sohlrampe, raue 108
 Soja s. Reihenkultur
 Sonnenblume s. Reihenkultur
 Spargel s. Reihenkultur, Dammkultur
 Sportplatz 65
 Stadtkern 185
 Stahlrohr 109
 Starkniederschlag 41
 Starkniederschlagshöhe 78
 Starkregen 20, 22, 42
 Steinbruch s. Abbauand
 Steinschüttung 108
 Stoffrückhalt 28
 Straße 65, 185
 Straßengraben s. Wegseitengraben
 Streifenbearbeitung 83, 116
 Strickler-Beiwert s. Rauheitsbeiwert
 Strickler-Gleichung s. GMS-Gleichung
 Sturzflut 20, 22

T

Teich 183
 Teileinzugsgebiet 21
 Terrasse 28, 73, 85, 88
 Tieflockerung 176
 Tongehalt 210
 Tonrohr 109
 Triticale s. Getreide

U

Ufergehölz 176
 Uferandstreifen s. Grünstreifen
 Untersaat 21, 116

V

Vegetationsentwicklung 67
 Verhältnisverfahren 37, 184
 – erweitertes 187
 Verhältniszahl 185
 Verrohrung 96
 Verschlammung 62, 116, 178
 Versiegelung 100, 185
 Vorfeuchte 206

Vorgewende 73

W

Wald 65, 70, 97, 101, 178, 180, 185, 204, 213, 220
 Wasser, wild abfließendes 20, 34
 Wasserfläche 65
 Wasserkörper 183
 Wasserleitfähigkeit 209
 Wasserrückhalt 21, 26, 28
 Wasserscheide 15
 Wasserspiegelbreite 181
 Weg 96, 99, 109, 150
 – befestigter 65
 – Grünweg 151
 – Pflasterspurweg 151
 – Schotterrasenspurweg 151
 – wassergebundener 65, 151
 Wegebau 211
 Wegführung 102, 211
 Wegseitengraben s. auch Graben 212
 Weichholzaue 109
 Weide s. auch Grünland 65, 184, 204
 Weiher 183
 Wein 65, 204
 Weizen s. Getreide
 Wellenablauf 34
 Wellengeschwindigkeit 183
 Wellenscheitel s. Scheitelabfluss
 Wellenvolumen 34, 37, 41
 Werkkanal 109
 Wiederholungszeitspanne s. Jährlichkeit
 Wiederkehrintervall s. Jährlichkeit
 Wiese s. auch Grünland 64, 65, 109, 184, 204
 Wildbach 108
 Winter 67
 Wintergerste 219, 220
 Wintergetreide 117, 220
 Winterroggen 118
 Winterweizen 117
 Wirtschaftsweg s. Weg
 Wohngebiet 185
 Wolkenbruch 22

Z

Zeitbeiwertverfahren s. Verhältnisverfahren
 Zementrohr 109
 Zuckerrübe s. Reihenkultur
 Zwischenabfluss 13, 101, 213, 221
 Zwischenfrucht 21, 116, 175



Willkommen zu den Springer Alerts

Unser Neuerscheinungs-Service für Sie:
aktuell | kostenlos | passgenau | flexibel

Mit dem Springer Alert-Service informieren wir Sie individuell und kostenlos über aktuelle Entwicklungen in Ihren Fachgebieten.

Abonnieren Sie unseren Service und erhalten Sie per E-Mail frühzeitig Meldungen zu neuen Zeitschrifteninhalten, bevorstehenden Buchveröffentlichungen und speziellen Angeboten.

Sie können Ihr Springer Alerts-Profil individuell an Ihre Bedürfnisse anpassen. Wählen Sie aus über 500 Fachgebieten Ihre Interessensgebiete aus.

Bleiben Sie informiert mit den Springer Alerts.

Jetzt
anmelden!

Mehr Infos unter: springer.com/alert

Part of **SPRINGER NATURE**