

SYMPOSIUM

19. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 9. März 2023

Bauen mit Beton im Kreislauf Recycling, Re-Use und Ressourcenschonung



Ulrich Nolting, Frank Dehn, Vanessa Mercedes Kind (Hrsg.)

SYMPOSIUM

Bauen mit Beton im Kreislauf

Recycling, Re-Use und Ressourcenschonung

SYMPOSIUM

19. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 9. März 2023

Bauen mit Beton im Kreislauf
Recycling, Re-Use und Ressourcenschonung

Herausgegeben von
Ulrich Nolting, Frank Dehn, Vanessa Mercedes Kind

Mit Beiträgen von

| | |
|------------------------|---------------------|
| Eberhard Becker | Jörg Rickert |
| Günter Beuchle | Florian Robineck |
| Sebastian Bruckschlägl | Anja Rosen |
| Frank Dehn | Werner Rothenbacher |
| Torsten Dölle | Frank Schultmann |
| Jan Höffgen | Rebekka Volk |
| Christian Landes | Elena Vollmer |
| Marc Matzken | Mathias Wein |

Humberto Patarca Petrillo

Veranstalter:
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
76131 Karlsruhe

VDB – Verband Deutscher Betoningenieure e. V.
Regionalgruppen 8 und 10

InformationsZentrum Beton GmbH
Gerhard-Koch-Straße 2+4
73760 Ostfildern

Titelbildcollage

Oben links: © IZB, Oben Mitte: © Norbert Fiebig,
Oben rechts: © IZB, Unten links: © Stefan Meyer,
Rechts Mitte und Unten: © artismedia/emb grafika

Hinweis der Herausgeber

Für den Inhalt namentlich gekennzeichnete Beiträge ist die jeweilige Autorin bzw. der jeweilige Autor verantwortlich.

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding parts marked otherwise, the cover, pictures and graphs –
is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2023 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISBN 978-3-7315-1270-7

DOI 10.5445/KSP/1000154548

Vorwort

Die Betonbranche steht, wie viele andere Industriezweige auch, vor der großen Herausforderung, die CO₂-Emissionen drastisch zu senken und somit einen Beitrag zu Nachhaltigkeit und Klimaschutz zu leisten. In den Symposien der letzten Jahre diskutierten wir gemeinsam mit Ihnen bereits verschiedene Möglichkeiten, wie diese Ziele durch den Einsatz ressourcenschonender Betone, eine ausreichende Dauerhaftigkeit unserer Bauwerke und die Dekarbonisierung der Betonbauweise realisiert werden können.

Nun möchten wir den Fokus darauf richten, wie es uns gelingen kann, durch das Bauen im Kreislauf die Betonbranche nicht nur nachhaltiger, sondern auch kosteneffizienter zu gestalten. Dabei stehen insbesondere das Recycling von Beton und die Wiederverwendung ganzer Betonbauteile im Vordergrund dieses Symposiums.

Die Veranstaltung beginnt zunächst mit einem Überblick über die Sichtweisen der öffentlichen Hand sowie der Zementindustrie. Anschließend präsentieren Vertreter aus Forschung und Praxis, welche Möglichkeiten zur Verwendung von Betonbrechsanden und Rezyklaten bestehen. Darauf aufbauend erfolgt eine zusammenfassende ganzheitliche Betrachtung des Betonrecyclings. Die Veranstaltung schließt mit einer Vorstellung bereits realisierter Projekte und zeigt auf, wie das Bauen mit Beton im Kreislauf durch die Digitalisierung optimiert werden kann.

Die Veranstalter

Inhalt

| | | |
|--|--|----|
| | Vorwort | I |
| Jörg Rickert | Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton | 1 |
| Jan Höffgen Frank Dehn | Möglichkeiten zur Verwendung von Betonbrechsanden | 5 |
| Florian Robineck Mathias Wein | Möglichkeiten zur Verwendung von Rezyklaten - Praxiseinblick aus der Schweiz | 15 |
| Sebastian Bruckschlägl Günter Beuchle Elena Vollmer Humberto Patarca Petrillo Rebekka Volk Frank Schultmann Frank Dehn | Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie für ganzheitliches Betonrecycling | 21 |
| Eberhard Becker Torsten Dölle Werner Rothenbacher | Ressourcenschonender Umbau der Mercedes-Benz Arena | 37 |
| Anja Rosen Marc Matzken | Ressourcenschonender Umbau und Urban Mining Konzept - Rathaus Korbach | 49 |
| Christian Landes | Ressourceneffizienz durch Digitalisierung - Praxisbeispiele zum Re- und Upcycling von Beton | 51 |
| | Programm der Veranstaltung | 61 |
| | Autorenverzeichnis | 63 |
| | Übersicht über Tagungsbände vergangener Symposien | 65 |

Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton

Jörg Rickert, VDZ Düsseldorf

Zusammenfassung

Neben dem Klima- und Artenschutz gehört die Schonung natürlicher Ressourcen zu den großen ökologischen Herausforderungen unserer Zeit. Die vom VDZ veröffentlichte Studie „Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien“ unterstreicht den Anspruch der deutschen Zementhersteller, den Primärrohstoffeinsatz in der Wertschöpfungskette von Zement und Beton weiter deutlich zu reduzieren. Im Rahmen eines Szenarios 2050 wurden verschiedene Potenziale zur Ressourcenschonung identifiziert und beziffert. Zudem werden notwendige Voraussetzungen und Handlungsstrategien zur Umsetzung der Einsparpotenziale erläutert.

1 Ressourcenschonung in der Zement- und Betonherstellung

Auf die Herstellung von Zement und Beton entfallen jährlich etwa ein Fünftel der in Deutschland eingesetzten Primärrohstoffe (ca. 236 Mio. t). Hierzu gehören neben einer geringen Menge fossiler Brennstoffe vor allem mineralische Rohstoffe wie Kalkstein, Kies und Sand. Im Bewusstsein dieses Ressourcenbedarfs befassen sich die deutschen Zement- und Betonhersteller bereits seit Langem mit der Frage, wie die Baustoffherstellung mit weniger natürlichen Ressourcen auskommen kann. So decken schon heute alternative Rohstoffe fast 20 % des Ressourcenbedarfs der in Deutschland produzierten Zemente, wodurch jährlich rund 10 Mio. t Kalkstein eingespart werden.

2 Potenziale im Szenario 2050

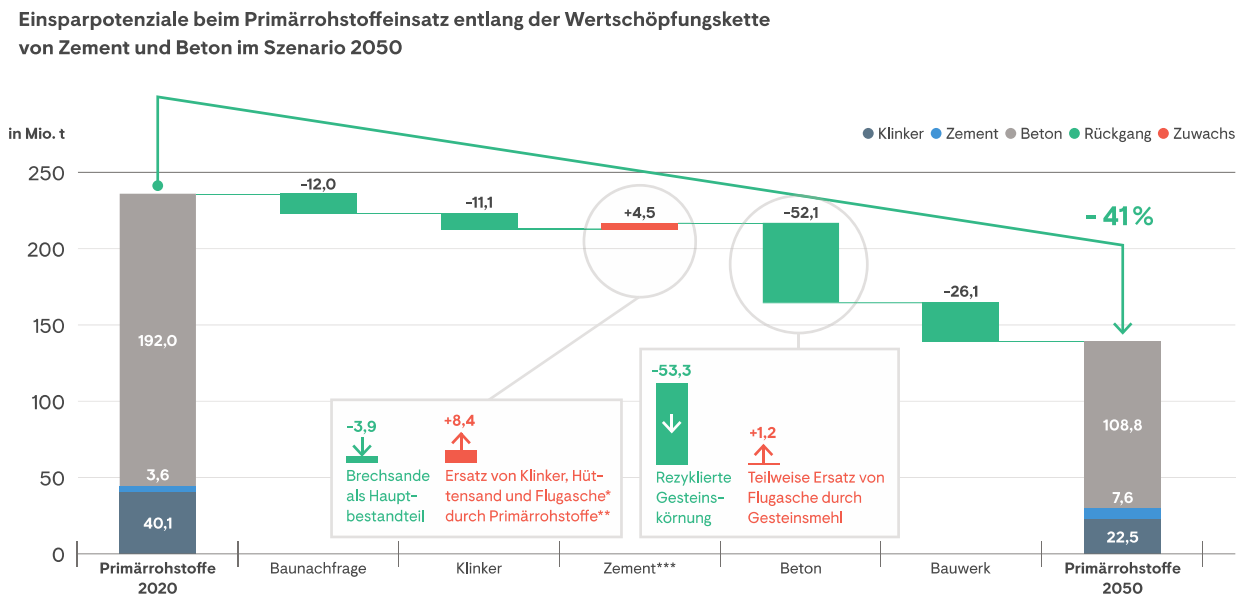
Im Szenario 2050 können entlang der Wertschöpfungskette von Zement und Beton pro Jahr insgesamt 96,8 Mio. t Primärrohstoffe eingespart werden. Das entspricht einer Reduktion um 41 % gegenüber 2020 (Abbildung 1). Die größten Potenziale ergeben sich in der Betonherstellung (-52,1 Mio. t), indem ein signifikanter Teil der natürlichen Gesteinskörnung im Beton künftig durch Recycling-Gesteinskörnung ersetzt wird.

Weitere Potenziale ergeben sich auf der Ebene der Klinker- und Zementherstellung durch den Einsatz von Betonbrechsanden bzw. Recyclingmehlen aus der Aufbereitung von Beton- und Mauerwerksbruch. Im Szenario 2050 können durch diese Maßnahme über 4 Mio. t Kalkstein ersetzt werden. Gleichwohl gibt es insbesondere bei der Zementherstellung infolge der sich verringernden Hüttensand- und Flugaschemengen auch gegenläufige Effekte, die einen größeren Einsatz bestimmter primärer Rohstoffe erfordern. Dies sind vor allem calcinierte Tone, um den Klinkergehalt im Zement zu reduzieren.

Auf Bauwerksebene ermöglichen die Weiterentwicklung der Betonbauweise und die Verlängerung der Bauwerksnutzungsdauer im Szenario 2050 eine Einsparung von 26,1 Mio. t natürlicher Rohstoffe. Hierbei wird u. a. angenommen, dass verstärkt Bauweisen zum Einsatz kommen, die mit einem geringeren Betonvolumen eine vergleichbare Leistungsfähigkeit erzielen. Über das Jahr 2050 hinaus werden weitere Potenziale durch

modulare Bauweisen und somit durch Wiederverwendung von Bauteilen oder ganzer Bauwerksstrukturen gesehen.

Als externer Effekt wurde im Szenario 2050 ein leichter Rückgang der Baunachfrage als Minderungsbeitrag berücksichtigt (-12,0 Mio. t). Mit Blick auf die Brennstoffe wird davon ausgegangen, dass die heute in Teilen noch eingesetzten fossilen Brennstoffe bis 2050 durch alternative Brennstoffe und grünen Wasserstoff vollständig substituiert werden. In Summe dürfte der Materialeinsatz in einer ähnlichen Größenordnung liegen wie zum jetzigen Zeitpunkt (ca. 5 Mio. t).



Quelle: VDZ
 Anmerkungen:
 * Ersetzt wird hier die Flugasche sowohl im Zement als auch im Beton.
 ** Hierunter fallen Kalkstein und calcinierte Tone.
 *** Umfasst primäre Hauptbestandteile und Sulfatträger; Klinker wird separat betrachtet.

Abb. 1: Einsparpotenziale beim Primärrohstoffeinsatz in der Wertschöpfungskette von Zement und Beton im Szenario 2050 bezogen im Vergleich zum Primärrohstoffbedarf in 2020

3 Voraussetzungen und Handlungsfelder

Um die dargestellten Potenziale zur Schonung natürlicher mineralischer Rohstoffe zu realisieren, bedarf es in allen Stufen des Bauprozesses künftig eines viel ausgeprägteren Bewusstseins und Knowhows im Hinblick auf Dauerhaftigkeit, Materialeffizienz, Wiederverwendung und Recycling. Eine effiziente und erfolgreiche Kreislaufwirtschaft erfordert ein gemeinsames Handeln von allen Baubeteiligten und ein Denken in Stoffströmen aus einer Lebenszyklus-Perspektive über die gesamte Wertschöpfungskette. Der Kommunikation im Planungs- und Bauprozess kommt eine entscheidende Bedeutung zu, weil kaum eine Maßnahme zur Ressourcenschonung in einem Bereich der Wertschöpfungskette ohne Auswirkung auf einen anderen Bereich bleibt.

Die Schonung natürlicher Ressourcen bei der Zement- und Betonherstellung basiert neben einer höheren Materialeffizienz und der Wiederverwendung von Bauteilen vor allem auf dem umfassenden Einsatz von Recycling-Baustoffen. Hierzu sind geeignete Stoffströme zu identifizieren und zu mobilisieren. Dem Urban Mining, der systematischen Bewirtschaftung des anthropogenen Rohstofflagers, kommt hierbei eine zentrale Bedeutung zu. Um dieses effizient zu nutzen, müssen u. a. Aufbereitungsverfahren weiterentwickelt werden.

Zement- und Betonhersteller benötigen eine kontinuierliche Versorgung mit Recycling-Baustoffen. Wesentliche Voraussetzung hierfür ist, dass urbane Räume als Zentren der Baustoffaufbereitung etabliert werden, um so kurze Transportwege zu gewährleisten.

Ein weiteres zentrales Handlungsfeld stellt die Förderung der Nachfrage nach ressourcenschonendem Bauen dar. Hier gilt es einerseits, Hemmnisse für den Einsatz von Recycling-Materialien abzubauen, andererseits aber auch, gezielte Anreize zu setzen. Das Abfallrecht sowie die teils negative Wahrnehmung von Recycling-Baustoffen können derzeit als ein Hemmnis gesehen werden. Um hier Abhilfe zu schaffen, sollten Recycling-Gesteinskörnungen künftig unmittelbar nach ihrer Herstellung nicht mehr als Abfall, sondern als Produkt gelten. Zur Förderung ihres Einsatzes kommt der öffentlichen Hand eine wichtige Rolle zu. Als größter Nachfrager von Bauleistungen können Bund, Länder und Kommunen Recycling-Baustoffe gezielt anfordern und so eine Vorbildwirkung für private Akteure entfalten. Geografisch differenzierte Recyclingquoten in Ausschreibungen unter Berücksichtigung lokaler Verfügbarkeiten können dabei ein effektives Instrument zur Initialisierung erster Absatzmärkte sein. Für Planer und Bauherren ist es dabei wichtig, dass transparente Informationen über Recycling-Baustoffe zur Verfügung stehen. Zertifizierung und Labeling müssen daher eine größere Rolle spielen und der Ressourcenschonung ein höheres Gewicht beimessen.

Auch nach Ausschöpfen der beschriebenen ambitionierten Potenziale wird der Großteil des Rohstoffbedarfs in 2050 durch natürliche Rohstoffe gedeckt werden müssen. Somit bleibt deren Sicherung ein weiteres zentrales Handlungsfeld, das für die Zement- und Betonherstellung eine existenzielle Grundlage darstellt.

Die neue Ressourcenstudie kann unter www.vdz-online.de/ressourcenschonung heruntergeladen werden.

4 Autor

Dr.-Ing. Jörg Rickert

VDZ Technology gGmbH

Toulouser Allee 71

40476 Düsseldorf

Möglichkeiten zur Verwendung von Betonbrechsanden

Jan P. Höffgen und Frank Dehn

Zusammenfassung

Betonbrechsande stellen in der derzeitigen Abfallerfassung und -aufbereitung einen wenig beachteten Stoffstrom dar. Dabei besitzen sie erhebliches Potential, um nicht nur feine natürliche Gesteinskörnungen, sondern auch einen Teil des Bindemittels bei der Betonherstellung zu ersetzen. Dieser Beitrag stellt zunächst baupraktisch relevante Betonbrechsandeigenschaften vor, um anschließend die derzeit aktuellen technischen Herausforderungen und normative Randbedingungen für die Wiederverwendung von Betonbrechsanden als feine rezyklierte Gesteinskörnung zu beschreiben. Fortgeschrittene Aufbereitungsverfahren lassen jedoch perspektivisch eine bessere Kreislaufführung von Betonbrechsanden erwarten, wenn diese gezielt fraktioniert und einzeln behandelt werden, um sowohl feine Gesteinskörnungen als auch (reaktive) Bindemittel zu erhalten.

1 Einleitung

Betonbrechsande sind Feinstoffe, die beim Rückbau von Betonbauteilen und deren Aufbereitung zu rezyklierten Gesteinskörnungen entstehen. Stofflich bestehen sie aus der primären natürlichen Gesteinskörnung des ursprünglichen Betons sowie aus hydratisiertem Zement bzw. Zementstein. Während erstere in der Regel dicht ist und eine niedrige Wasseraufnahme aufweist, ist Zementstein naturgemäß porös, was eine geringere Dichte, höhere Wasseraufnahme und niedrigere Kornfestigkeit zur Folge hat. Da bei der Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen eine Optimierung der Kornform und Wasseraufnahme der groben Fraktionen mit einer Trennung der primären Gesteinskörnung vom anhaftenden Zementstein einhergeht, reichert sich letzterer in den entstehenden Feinanteilen an. Infolgedessen nimmt der Unterschied zwischen natürlichen und rezyklierten Gesteinskörnungen mit abnehmender Partikelgröße zu. Jedoch wird dadurch die Verwendung der Feinstoffe als rezyklierte Gesteinskörnungen erschwert, wohingegen eine Anwendung als Bindemittelbestandteil mit steigendem Zementsteingehalt naheliegend ist. Da Betonbrechsande aus den gegebenen Gründen bislang als „unerwünschtes“ Nebenprodukt der Aufbereitung auftreten und nicht im Fokus der Kreislaufwirtschaft stehen, liegen nur wenige belastbare Daten zu ihrer Verfügbarkeit und ihren Eigenschaften vor.

Jährlich anfallende Betonbrechsandmengen können daher nur überschlägig aus Abfallstatistiken abgeschätzt werden. Abbildung 1 zeigt die zeitliche Entwicklung der jährlichen mineralischen Bau- und Abbruchabfallmengen (Abfallschlüsselnummer 1701), die in Bauschutttaufbereitungsanlagen behandelt wurden. Zuletzt entfielen auf die Abfallschlüsselnummer 170101 „Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton“ rd. 24 Mt [1]. Aus Unternehmensbefragungen ist bekannt, dass bei der Aufbereitung von Betonabfällen zu rezyklierten Gesteinskörnungen zwischen 20 und 45 Vol.-% Feinstoffe mit Korngrößen kleiner als 2 mm anfallen. Entsprechend lässt sich die Betonbrechsandmenge mit jährlich ca. 5 - 11 Mt abschätzen. Auch diese Abfallströme werden wiederverwendet: beispielsweise in ungebundenen Schichten des Straßen- und Wegebbaus oder im Deponiebau. Ein geschlossener Stoffkreislauf, wie er im Kreislaufwirtschaftsgesetz [2] angestrebt wird, wird dabei jedoch nicht erreicht.

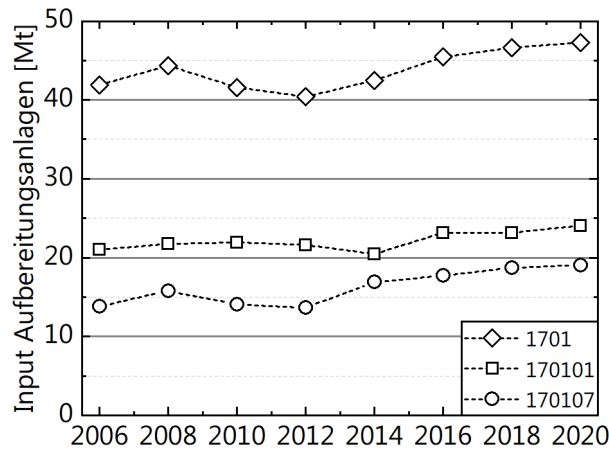


Abb. 1: Zeitliche Entwicklung der jährlichen in deutschen Aufbereitungsanlagen aufbereiteten mineralischen Bau- und Abbruchabfallmengen (1701) sowie Unterteilung in Beton (170101) und ungefährliche Gemische (170107) [1]

2 Betonbrechsande als rezyklierte Gesteinskörnungen

2.1 Normative Möglichkeiten

Für eine Verwendung von Betonbrechsanden als rezyklierte Gesteinskörnungen sind die physikalischen und geometrischen Eigenschaften der betrachteten Körnungsfractionen die wichtigsten Materialeigenschaften. Abbildung 2 zeigt die Ergebnisse mehrerer Metastudien zu Kornrohddichte und Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnungen [3-5].

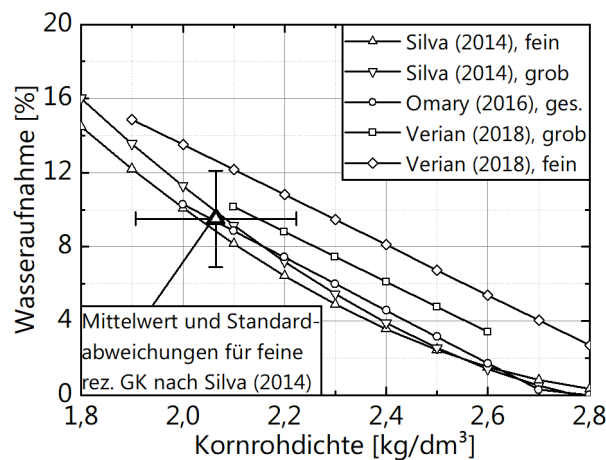


Abb. 2: Zusammenhang zwischen Kornrohddichte und Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnungen [3-5]

Bei einem Einsatz von feinen rezyklierten Gesteinskörnungen aus Betonabbruch muss die in der Regel im Vergleich mit groben rezyklierten Gesteinskörnungen verstärkte Beeinflussung der Frisch- und Festbetoneigenschaften bei der Betonkonzeption und der Bauteilbemessung berücksichtigt werden.

Die Bemessung von Stahlbetonbauwerken des Hochbaus nach DIN EN 1992-1-1:2011-01 (Eurocode 2) verwendet die Betondruckfestigkeit als zentrale Betoneigenschaft, aus der weitere relevante Kenngrößen wie der Elastizitätsmodul oder die Betonzugfestigkeit rechnerisch abgeleitet werden. Die DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 [6] schränkt daher den Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen soweit ein, dass der Einfluss letzterer auf die bemessungsrelevanten Betoneigenschaften vernachlässigt werden und die Bauteilbemessung wie für Beton mit ausschließlich natürlichen Gesteinskörnungen durchgeführt werden kann. Aus diesem Grund erlaubt [6] lediglich die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen mit einem nominellen Mindestkorndurchmesser von $d = 2 \text{ mm}$. Die Korngruppe 0 - 2 mm, die üblicherweise als Brechsand bezeichnet wird, darf in Beton

nach [6] nicht verwendet werden. Neben der stofflichen Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnungen beeinflussen die Bauteilexpositionsklassen die erlaubten Austauschraten natürlicher Gesteinskörnung. Tabelle 1 zeigt die maximal zulässigen Volumenanteile rezyklierter Gesteinskörnungen an der gesamten Gesteinskörnung für rezyklierte Gesteinskörnung vom Typ 1 - Betonsplitt (bestehend aus Beton und Naturstein mit höchstens 10 M.-% Nebenbestandteilen).

Tab. 1: Maximal zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen des Typs 1, > 2 mm an der gesamten Gesteinskörnung nach Bauteilexposition in Vol.-% gem. der aktuellen Richtlinie des DAfStb [6] und des Normentwurfs E DIN 1045-2:2022 07

| Alkali-Richtlinie [7] | DIN EN 206 und DIN 1045-2 | DAfStb-Richtlinie [6] | E DIN 1045-2: 2022-07 |
|----------------------------|--|-----------------------|-----------------------|
| WO (trocken) | Carbonatisierung XC1 | 45 | 45 ^b |
| WF (feucht) | Kein Korrosionsrisiko X0 | | |
| | Carbonatisierung XC1 bis XC4 | 35 | 45 |
| | Frostangriff ohne Taumittleinwirkung XF1 und XF3 und in Beton mit hohem Wassereindringwiderstand | | |
| | Chemischer Angriff XA1 | 25 | 25 |
| WA (feucht + Alkalizufuhr) | Chloridangriff XD1, XD2, XS1, XS2 | 0 | 30 |
| | Frostangriff mit Taumittel XF2, XF4 | | |

Zukünftig soll der Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen direkt in der Betonnorm DIN EN 206 bzw. DIN 1045-2 geregelt werden. Der aktuelle Normentwurf E DIN 1045-2:2022-07 enthält die Regelungen aus [6], die an den aktuellen Stand der Technik angepasst wurden. Dies spiegelt sich einerseits in den teilweise erhöhten zulässigen Austauschraten wider, die ebenfalls in Tabelle 1 dargestellt werden. Andererseits erlaubt E DIN 1045-2:2022-07 den Einsatz von Betonbrechsanden: In den Expositionsklassen X0, und XC1 in trockener Umgebung dürfen 20 Vol.-% der rezyklierten Gesteinskörnung einen Korndurchmesser $d < 2$ mm aufweisen, wenn die gesamte rezyklierte Gesteinskörnung aus einer einheitlichen Produktionslinie stammt (Anm. b in Tabelle 1).

Alternativ sieht E DIN 1045-2:2022-07 zwei weitere Möglichkeiten des Einsatzes von Betonbrechsanden vor: In den Feuchtigkeitsklassen WO und WF nach [7] dürfen bis zu 25 Vol.-% der gesamten Gesteinskörnung ohne weitere Einschränkungen durch Rezyklate, einschl. Betonbrechsande < 2 mm, ersetzt werden, wenn letztere aus der gleichen Produktion stammen wie die verwendete grobe rezyklierte Gesteinskörnung. Zudem wird es ermöglicht, Betone mit beliebigen Mengen rezyklierter Gesteinskörnungen einzusetzen, wenn ein Verwendungsnachweis, z. B. in Form einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) oder allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ), vorliegt.

2.2 Technische Optimierung

Wenn DIN 1045-2 in dieser Form bauaufsichtlich eingeführt wird - Änderungen sind im Rahmen des Normungsprozesses wahrscheinlich - bleiben die o. a. betontechnologischen Herausforderungen im Zusammenhang mit der erhöhten Wasseraufnahme von Betonbrechsanden erhalten. Die erhöhte Wasseraufnahme kann in der offenen Lagerung zu Agglomerationen, im Frischbeton zu einer schlechten Konsistenzhaltung und im Festbeton zu einer reduzierten Leistungsfähigkeit führen. Die Problematik lässt sich reduzieren, indem die Betonbrechsande durch geeignete Verfahren vergütet werden. Lösungsansätze hierfür lassen sich in zwei Kategorien einteilen: Verdichtung sowie Entfernung des anhaftenden Zementsteins [8-16]. Die im Folgenden vorgestellten Methoden wurden für die Vergütung von rezyklierten Gesteinskörnungen im Allgemeinen entwickelt, eignen sich dadurch jedoch nur eingeschränkt für die Behandlung von Betonbrechsanden.

Verfahren zur Entfernung des anhaftenden Zementsteins eignen sich nahezu ausschließlich für die Vergütung von groben Körnungen, da sich der entfernte Zementstein im Betonbrechsand anreichert. Die Möglichkeiten

reichen hier über optimierte Brech- und Mahlprozesse – teilweise in Verbindung mit einer thermischen Vorbehandlung zur Schwächung des Zementsteingefüges oder einer Ultraschallreinigung – bis hin zur Auflösung des Zementsteins in aggressiven Säuren. Letzteres erlaubt zwar die Rückgewinnung der groben natürlichen Gesteinskörnung nahezu ohne anhaftenden Zementstein, ist aber aus Gründen des Arbeitsschutzes, der Kosten für die Säuren und des Umgangs mit den Abfallstoffen bedenklich.

Bei der Verdichtung des Zementsteins in den rezyklierten Körnungen werden unterschiedliche Materialien in die Poren des Zementsteins eingebracht, die letztere verstopfen oder versiegeln. So können beispielsweise Bindemittel – hydraulisch, latent-hydraulisch oder puzzolanisch reaktiv – mit ausreichend kleinen Partikelgrößen als Suspension in das Porensystem eindringen und dort zu dichten Phasen reagieren. Alternativ ist auch eine Ummantelung der Körner möglich, die den porösen Zementstein umschließt und abdichtet sowie zusätzlich die Kornform positiv beeinflussen kann. Brechsande können damit zu Granalien mit größeren Korndurchmessern verarbeitet werden. Allerdings ist dies mit einem hohen Bindemittelbedarf verbunden. Eine Vergütung einzelner Partikel ist aufgrund deren kleiner Größe dadurch nicht möglich. Gleiches gilt für Verfahren, die sich die Ablagerung von Polymeren in den Porensystemen zum Ziel setzen.

Eine technisch umsetzbare Möglichkeit der Vergütung von Betonbrechsanden besteht in der Ablagerung von Calciumcarbonat. Hierfür gibt es zwei grundsätzlich unterschiedliche Verfahren. Bei der biogenen Carbonateinlagerung werden entsprechende Bakterien verwendet, die Calciumcarbonat in den Poren und Rissen der rezyklierten Körnungen ausscheiden. Dies ist unabhängig von der Partikelgröße, wobei insbesondere Feinstpartikel gebunden werden können. Alternativ lassen sich Betonabfälle künstlich carbonatisieren. Kohlenstoffdioxid (CO_2), das in erhöhten Konzentrationen entweder in Luft oder in Wasser vorliegen kann, reagiert dabei mit Calciumhydroxid, das sich in den Poren des Zementsteins des Betonbruchs befindet, zu Calciumcarbonat. Geringere Partikelgrößen wirken sich dabei positiv auf die Geschwindigkeit der Behandlung aus.

3 Betonbrechsande als Bindemittelbestandteil

3.1 Verwendung im Klinkerrohmehl

Portlandzement (CEM I) besteht überwiegend aus gemahlenem Zementklinker, der bei Temperaturen von bis zu $1450\text{ }^\circ\text{C}$ gebrannt und anschließend gemahlen wird. Dabei muss die chemische Zusammensetzung des Klinkerrohmehls engen Grenzwerten entsprechen, um nach dem Brennen reaktive Klinkerphasen zu erhalten. Aufgrund der chemisch ähnlichen Zusammensetzung von Portlandzement und Betonbrechsanden können letztere einen Teil des Rohmehls ersetzen. Dabei beeinflusst der Anteil der natürlichen Gesteinskörnung in den Betonbrechsanden ebenso wie eventuell vorhandene Betonzusatzstoffe den Anteil des Rohmehls, der ersetzt werden kann. Dieser reduziert sich, je stärker die chemische Zusammensetzung der Betonbrechsande, z. B. durch vorhandene silikatische Gesteinskörnung, von der erforderlichen Klinkerzusammensetzung abweicht. Bei einer sorgfältigen Vorauswahl der Betonbrechsande ist es bislang technisch möglich, bis zu 25 M.-% des Klinkerrohmehls zu ersetzen. Neben einer Reduktion des Primärrohstoffbedarfs geht dies mit einer Verringerung der CO_2 -Emissionen einher. Diese entstehen bei der Klinkerherstellung neben der Verbrennung kohlenstoffhaltiger Energieträger durch die Entsäuerung von Kalkstein (CaCO_3). Wenn dieser als Ausgangsstoff durch Calciumsilikathydrat und Calciumhydroxid, das in dem erhärteten Zementstein im Betonbrechsand vorhanden ist, ersetzt wird, entsteht beim Brennvorgang Wasser anstelle des Kohlenstoffdioxids. Die technisch möglichen Austauschraten sind in der Praxis jedoch mit vertretbarem Aufwand nur schwer erreichbar. Da die Zusammensetzung der Betonbrechsande aufgrund unterschiedlicher Ausgangsbetone zwischen einzelnen Bauwerken und Bauteilen ebenso wie aufgrund unterschiedlicher Aufbereitungsverfahren stark variieren kann, ist der Massenstrom im Vergleich zu den primären Klinkerrohstoffen in hohem Maße heterogen. Für eine industrielle Herstellung müsste daher die Zusammensetzung der Betonbrechsande fortlaufend in engen Intervallen überwacht werden, um die Rohmehlzusammensetzung durch die variable Zugabe von Primärrohstoffen einzustellen [17; 18].

3.2 Gemahlene Betonbrechsande

Alternativ lassen sich aufbereitete Betonbrechsande als Zementhauptbestandteil z. B. in Form von Portlandkompositzementen (CEM II) verwenden. Hierfür wird der Portlandzementklinker erst nach dem Brennvorgang mit Betonbrechsanden gemischt, sodass deren genaue chemische Zusammensetzung von geringerer Bedeutung ist. Da Betonbrechsande kein genormter Hauptbestandteil nach DIN EN 197-1:2011-11 sind, bedarf deren Verwendung einer individuellen Zulassung (ZiE oder abZ, s. o.). DIN prEN 197-6:2022-06, die die Verwendung von bis zu 20 M.-% aufbereiteten Betonbrechsands als Zementhauptbestandteil ermöglicht, befindet sich derzeit im Entwurfs- und Abstimmungsprozess. Alternativ ist es normativ möglich, aufbereitete Betonbrechsande als Zementnebenbestandteile zu verwenden. Diese sind in ihrer Herkunft und ihren Eigenschaften weniger eng definiert als Hauptbestandteile, wenngleich lediglich ein Anteil von bis zu 5 M.-% zulässig ist.

Für den Einsatz als Zementhauptbestandteil müssen Betonbrechsande gemahlen werden. Dadurch wird eine Feinheit ähnlich zu anderen Zementhauptbestandteilen mit Partikelgrößen $< 125 \mu\text{m}$ erzielt. Gemahlene Betonbrechsande haben dabei analog zu Kalksteinmehl eine Füllerwirkung. Zudem ist es möglich, dass der ursprüngliche Zement in den Betonbrechsanden nicht vollständig hydratisiert ist und nach dem Aufschluss durch die Mahlung eine hydraulische Reaktivität zeigt [19]. Massenanteile von bis zu 30 % sind möglich, um Kompositzemente mit ausreichender Festigkeit herzustellen. Einschränkungen sind jedoch hinsichtlich der Dauerhaftigkeit, insbesondere des Frostwiderstands, gegeben [20].

3.3 Gemahlene und carbonatisierte Betonbrechsande

In einem zusätzlichen Prozessschritt zur Mahlung kann der hydratisierte Zement in den Betonbrechsanden reaktiviert werden. Eine Möglichkeit hierfür stellt die Carbonatisierung dar. Bei steigenden CO_2 -Konzentrationen reagieren zusätzlich zum Calciumhydroxid in erhöhtem Maße Calciumsilikathydratphasen des Zementsteins mit Kohlenstoffdioxid. Auch hierbei entsteht Calciumcarbonat, das als Zementhauptbestandteil die Funktion eines inerten Füllers übernimmt. Zusätzlich wird bei der Carbonatisierung amorphes Siliciumdioxid gebildet, das eine puzzolanische Reaktivität zeigt [21; 22]. Während über das Maß der Puzzolanität noch keine gesicherten Erkenntnisse vorliegen, konnten in Technikumsversuchen mit 1 t Betonbrechsand 100 kg CO_2 aus dem Rauchgas eines Zementwerks gebunden werden [23].

3.4 Thermisch-mechanisch aufbereitete Betonbrechsande

Eine weitere Möglichkeit der Reaktivierung von Betonbrechsanden besteht in einer thermischen Behandlung. Bei Temperaturen bis zu ca. $700 \text{ }^\circ\text{C}$ gibt Calciumsilikathydrat (C-S-H) gebundenes Wasser ab, wodurch hydraulisch reaktive Phasen entstehen [24-26]. Da dehydratisiertes C-S-H im Gegensatz zu Zementklinker porös ist, unterscheiden sich dehydratisierte Betonbrechsande von Portlandzement hinsichtlich ihrer Festigkeitsbildung. Der Wasseranspruch und die Erstarrungszeiten sind verkürzt, was sich in einer verschlechterten Verarbeitbarkeit und hohen Frühfestigkeiten niederschlägt [27-31]. Das Verhalten ist besonders ausgeprägt, wenn dehydratisierte Betonbrechsande einen hohen Calciumoxidgehalt aufweisen. Calciumoxid entsteht bei der Zersetzung von Calciumhydroxid bei $450 - 550 \text{ }^\circ\text{C}$ und insbesondere bei der Zersetzung von Calciumcarbonaten zwischen 650 und $900 \text{ }^\circ\text{C}$, weshalb höhere Aufbereitungstemperaturen nicht zielführend sind [31]. Die erreichbaren Endfestigkeiten von dehydratisierten Betonbrechsanden liegen aufgrund der porösen Mikrostruktur unterhalb derer vergleichbarer Portlandzemente. Die wichtigste Einflussgröße ist die im Betonbrechsand vorhandene feine natürliche Gesteinskörnung, die durch die thermische Behandlung inert bleibt und nur eine Füllerwirkung aufweist. Entsprechend steigen erreichbare Festigkeiten mit einer verbesserten Trennung des Zementsteins von der natürlichen Gesteinskörnung im Betonbrechsand [32]. Bei einem teilweisen Austausch von Portlandzement durch thermisch-mechanisch reaktivierte Betonbrechsande sinken die erreichbaren Festigkeiten mit steigender Austauschrate. Hinsichtlich der für eine optimale Festigkeit zielführenden Mahlfeinheit und Aufbereitungstemperatur besteht in der Literatur bislang Uneinigkeit [19; 26; 33-38]. Gegenstand der Forschung sind zudem der Einfluss von reaktivierten Betonbrechsanden unterschiedlicher Herkunft und Zusammensetzungen auf das Langzeitverhalten daraus hergestellter Betone [39-41].

4 Fazit

Betonbrechsande stellen einen bislang durch die Abfallstatistiken nicht nachverfolgbaren und in der Kreislaufführung nicht hinreichend berücksichtigten Stoffstrom dar. Zwar sind die überschlägig berechneten anfallenden jährlichen Betonbrechsandmengen ebenso wie die Verwertungspotentiale erheblich, eine Aufbereitung mit dem Ziel eines geschlossenen Stoffkreislaufs findet jedoch kaum statt. Dabei ist die Wiederverwendung von Brechsanden im Gegensatz zu groben Betonsplitten als rezyklierte Gesteinskörnungen mit technischen und normativen Herausforderungen verbunden, da Betonbrechsande einen erhöhten Anteil hydratisierten Zements enthalten. Durch geeignete Aufbereitungsverfahren lassen sich dessen negativer Einfluss reduzieren und der enthaltene Zement reaktivieren. Verfahren hierfür sind derzeit in Entwicklung und werden teilweise großmaßstäblich erprobt. Dadurch lassen sich perspektivisch Betonbrechsande einsetzen, um sowohl natürliche Sande als auch den besonders klimaschädlichen Portlandzement in der Betonherstellung zu ersetzen.

Hierfür ist jedoch ein geeignetes Stoffstrommanagement erforderlich, um zunächst Betonbrechsande in zement- und gesteinskörnungsreiche Fraktionen aufzuteilen und diese anschließend gemäß ihrer Bestimmung als Zementersatzstoff bzw. als feine rezyklierte Gesteinskörnungen aufzubereiten. Für eine ökologisch sinnhafte Aufbereitung und Wiederverwendung muss zudem die gesamte Prozesskette - einschließlich des Rückbaus und der Transportwege - berücksichtigt werden.

Neben reinen Betonbrechsanden besitzen auch Gemische aus mineralischen Bau- und Abbruchabfällen (AVV Nr. 170107 in Abbildung 1) ein hohes Potential für die Aufbereitung als Gesteinskörnung und Bindemittel. Die vorliegenden Stoffstromdaten sind gegenüber für Betonbrechsande jedoch als noch schlechter einzuordnen, zumal die Möglichkeiten und die Effektivität der Aufbereitung von der stofflichen Zusammensetzung beeinflusst werden. Während hohe Mengen tonhaltiger Bestandteile (z. B. Ziegelbruch) einzelne Aufbereitungsverfahren wie die Carbonatisierung ausschließen, sind von geringen Tonanteilen positive Effekte auf die Bindemittleigenschaften zu erwarten [20].

5 Literatur

- [1] Statistisches Bundesamt Bauschutttaufbereitungsanlagen: Deutschland, Jahre, Abfallarten [online]. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online> [Zugriff am: 28. Jun. 2022].
- [2] (24.02.2012) Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz) - KrWG.
- [3] Omary, S.; Ghorbel, E.; Wardeh, G. (2016) Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties in: *Construction and Building Materials* 108, S. 163-174. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042>
- [4] Silva, R. V.; Brito, J. de; Dhir, R. K. (2014) Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production in: *Construction and Building Materials* 65, S. 201-217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>
- [5] Verian, K. P.; Ashraf, W.; Cao, Y. (2018) Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production in: *Resources, Conservation and Recycling* 133, S. 30-49. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.02.005>
- [6] DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 - Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1. Berlin: Beuth.
- [7] DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton - Alkali-Richtlinie. Berlin: Beuth.

- [8] Feng, C. et al. (2022) Enhancement technologies of recycled aggregate - Enhancement mechanism, influencing factors, improvement effects, technical difficulties, life cycle assessment in: *Construction and Building Materials* 317, S. 126168. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.126168>
- [9] Mistri, A. et al. (2020) A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials in: *Construction and Building Materials* 233, S. 117894. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117894>
- [10] Ohemeng, E. A.; Ekolu, S. O. (2020) A review on the reactivation of hardened cement paste and treatment of recycled aggregates in: *Magazine of Concrete Research* 72, H. 10, S. 526-539. <https://doi.org/10.1680/jmacr.18.00452>
- [11] Santha Kumar, G.; Minocha, A. K. (2018) Studies on thermo-chemical treatment of recycled concrete fine aggregates for use in concrete in: *Journal of Material Cycles and Waste Management* 20, H. 1, S. 469-480. <https://doi.org/10.1007/s10163-017-0604-6>
- [12] Shaban, W. M. et al. (2019) Quality Improvement Techniques for Recycled Concrete Aggregate: A review in: *Journal of Advanced Concrete Technology*, H. 17, S. 151-167. <https://doi.org/10.3151/jact.17.151>
- [13] Shi, C. et al. (2016) Performance enhancement of recycled concrete aggregate - A review in: *Journal of Cleaner Production*, H. 112, S. 466-472. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.08.057>
- [14] Wang, R.; Yu, N.; Li, Y. (2020) Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review in: *Construction and Building Materials* 242, S. 118164. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118164>
- [15] Pu, Y. et al. (2021) Accelerated carbonation technology for enhanced treatment of recycled concrete aggregates: A state-of-the-art review in: *Construction and Building Materials* 282, S. 122671. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122671>
- [16] Tam, V. W. et al. (2020) Utilising CO₂ technologies for recycled aggregate concrete: A critical review in: *Construction and Building Materials* 250, S. 118903. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118903>
- [17] Izoret, L. et al. (2019) Recycled concrete sand as alternative raw material for Portland clinker production in: Larrard, F. de; Colina, H. [Hrsg.] *Concrete recycling: Research and practice*. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, S. 63-81.
- [18] Kwon, E. et al. (2015) A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder in: *Construction and Building Materials* 83, S. 174-180. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.086>
- [19] Florea, M. V. A. (2014) *Secondary materials applied in cement-based products: treatment, modelling and environmental interaction* [Dissertation]. Technische Universiteit Eindhoven.
- [20] Verein Deutscher Zementwerke (2018) *Verbundvorhaben: R-Beton, Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation; Teilvorhaben 5: RC-Gesteinskörnung - Anwendung im Zement, Ökobilanzierung der Zement- und Betonherstellung, Bewertung der Alkaliempfindlichkeit: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben „R-Beton“ : Schlussbericht zu Nr. 3.2 BNBest-BMBF 98 - Teil I und Teil II*.
- [21] Kaliyavaradhan, S. K.; Li, L.; Ling, T.-C. (2022) Response surface methodology for the optimization of CO₂ uptake using waste concrete powder in: *Construction and Building Materials* 340, S. 127758. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127758>
- [22] Zajac, M. et al. (2021) CO₂ mineralization of demolished concrete wastes into a supplementary cementitious material - a new CCU approach for the cement industry in: *RILEM Technical Letters* 6, S. 53-60. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2021.141>
- [23] Hanson HeidelbergCementGroup (22.11.2022) Another carbon capture breakthrough demonstrated [online]. <https://www.hanson.co.uk/en/news-and-events/carbon-capture-breakthrough-at-ribblesdale-cement-works> [Zugriff am: 19. Dez. 2022].

- [24] Klingsch, E. W. (2014) Explosive spalling of concrete in fire [Dissertation]. ETH.
- [25] Schneider, U. (1982) Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen. Berlin: Wilhelm Ernst und Sohn.
- [26] Dora, B. (2001) Hydraulisch erhärtende Baustoffe aus Betonbrechsand [Dissertation]. TU Braunschweig.
- [27] Bogas, J. A.; Carriço, A.; Tenza-Abril, A. J. (2020) Microstructure of thermoactivated recycled cement pastes in: *Cement and Concrete Research* 138, S. 106226. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106226>
- [28] Bogas, J. A. et al. (2022) Hydration and phase development of recycled cement in: *Cement and Concrete Composites* 127, S. 104405. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2022.104405>
- [29] Zhang, L. et al. (2019) Effect of retarders on the early hydration and mechanical properties of reactivated cementitious material in: *Construction and Building Materials*, H. 212, S. 192-201. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.03.323>
- [30] Zhang, L. et al. (2018) Modification and enhancement of mechanical properties of dehydrated cement paste using ground granulated blast-furnace slag in: *Construction and Building Materials*, H. 164, S. 525-534.
- [31] Carriço, A.; Bogas, J. A.; Guedes, M. (2020) Thermoactivated cementitious materials - A review in: *Construction and Building Materials* 250, S. 118873. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>
- [32] Carriço, A. et al. (2021) Novel separation process for obtaining recycled cement and high-quality recycled sand from waste hardened concrete in: *Journal of Cleaner Production* 309, S. 127375. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127375>
- [33] Shui, Z. et al. (2009) Cementitious characteristics of hydrated cement paste subjected to various dehydration temperatures in: *Construction and Building Materials* 23, H. 1, S. 531-537. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.10.016>
- [34] Serpell, R.; Lopez, M. (2013) Reactivated cementitious materials from hydrated cement paste wastes in: *Cement and Concrete Composites* 39, S. 104-114. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2013.03.020>
- [35] Letelier, V. et al. (2017) Combined effects of recycled hydrated cement and recycled aggregates on the mechanical properties of concrete in: *Construction and Building Materials* 132, S. 365-375. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.010>
- [36] Wang, J.; Mu, M.; Liu, Y. (2018) Recycled cement in: *Construction and Building Materials* 190, S. 1124-1132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.09.181>
- [37] Zhutovsky, S.; Shishkin, A. (2021) Recycling of hydrated Portland cement paste into new clinker in: *Construction and Building Materials* 280, S. 122510. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.122510>
- [38] Real, S. et al. (op. 2021) Influence of the Treatment Temperature on the Microstructure and Hydration Behavior of Thermoactivated Recycled Cement in: Iqbal Khan, M. [Hrsg.] *Prime archives in material science*. 3. Aufl. Hyderabad (Telangana): Vide Leaf.
- [39] Carriço, A.; Real, S.; Bogas, J. A. (2021) Durability performance of thermoactivated recycled cement concrete in: *Cement and Concrete Composites* 124. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2021.104270>
- [40] Carriço, A. et al. (2022) Shrinkage and sorptivity of mortars with thermoactivated recycled cement in: *Construction and Building Materials* 333, S. 127392. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127392>
- [41] Real, S. et al. (2022) Life Cycle Assessment of Thermoactivated Recycled Cement Production in: *Materials* (Basel, Switzerland) 15, Nr. 19. <https://doi.org/10.3390/ma15196766>

6 Autoren

Jan P. Höffgen M. Sc.

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe

Möglichkeiten zur Verwendung von Rezyklaten – Praxiseinblick aus der Schweiz

Florian Robineck und Mathias Wein

Zusammenfassung

Die Eberhard Unternehmungen setzen sich bereits in der dritten Generation für eine bessere Ressourcennutzung und Umweltschonung im Bausektor ein. Die jüngste Innovation betrifft die zirkuläre Verwendung von Betongranulat als Zuschlagsstoff für zirkulit Beton. Die zirkulit AG wurde im April 2021 mit der Vision des zirkulären Bauens auf mineralischer Basis gegründet. zirkulit Beton verfolgt den ganzheitlichen zirkulären Ansatz. Der Primärressourcenverbrauch wird auf weniger als ein Drittel reduziert. Der CO₂-Fußabdruck wird zusätzlich durch eine von zirkulit entwickelte CO₂-Speichertechnologie reduziert und das bei gleichbleibenden technischen Eigenschaften wie bei herkömmlichen Beton. Dank eines Lizenzsystems ist der zirkulit Beton schweizweit verfügbar.

1 Vision des kreislauffähigen Hauses

Die Vision der zirkulit AG ist das vollständig kreislauffähige Haus auf mineralischer Basis. Sämtliche mineralische Baustoffe werden nach dem Rückbau hochwertig aufbereitet. Ein Downcycling soll vermieden und das Deponieren von Baumaterial möglichst ausgeschlossen werden.

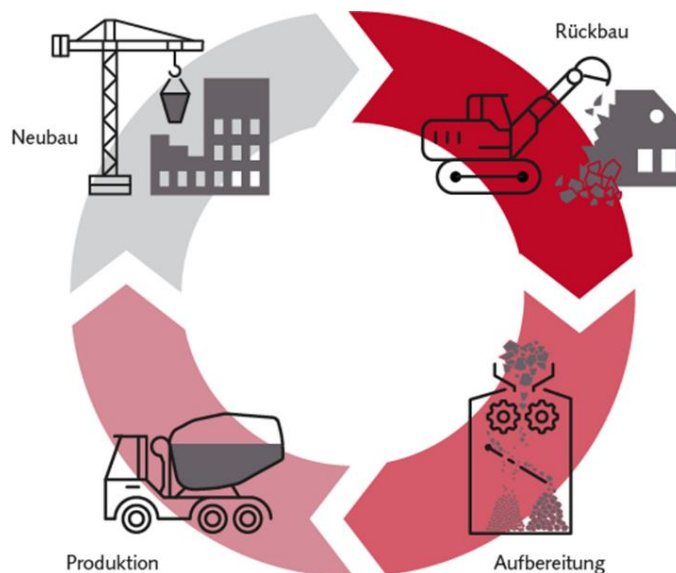


Abb. 1: Vision des kreislauffähigen Hauses veranschaulicht anhand des Baustoffkreislaufs

Kreislauffähige Baustoffe im Sinne der «urban mining» Idee reduzieren den Verbrauch an natürlichen Ressourcen. zirkulit ist der erste Beton, der nicht nur Ressourcen einspart, sondern auch das Klima durch die Reduktion des CO₂-Fußabdrucks schont. Im aktuellen Transformationsprozess von der Linear- zur Kreislaufwirtschaft (Abbildung 2) bedeutet die erklärte Vision der zirkulit AG, abfallfrei zu bauen.



Abb. 2: Transformationsprozess von linear zu zirkulär

2 Anforderungen an den zirkulit Beton

2.1 Differenzierungsmerkmale

Der zirkulit Beton zeichnet sich durch folgende Differenzierungsmerkmale aus:

1) Maximale Zirkularität

Die Rezeptur des zirkulit Betons besteht aus dem größtmöglichen Anteil an Sekundärrohstoffen. Dadurch wird der Bedarf an Primärrohstoffen auf das Minimum reduziert. Um maximale Sekundärrohstoffanteile zu erreichen wird für die Produktion des zirkulit Beton das Betongranulat in Einzelfractionen ausgesiebt.

2) Minimaler CO₂-Fußabdruck

Der zirkulit Beton zeichnet sich aus durch den kleinstmöglichen CO₂-Fußabdruck. Dies wird durch folgende Schritte erreicht:

1. Minimierung des Zementgehalts

Der minimale Zementgehalt richtet sich primär an die gültigen Normen. Betonsorten mit höherem Zementgehalt als in der Norm gefordert (z. B. Pumpbetone) werden auf das technische Minimum optimiert. Um den minimalen Zementgehalt zu erreichen, wird für die Produktion des zirkulit Beton das Betongranulat in Einzelfractionen ausgesiebt.

2. Verwendung von CO₂-armen Zementsorten

Der Zement hat den höchsten Einfluss auf die Ökobilanz des Betons. Im zirkulit Beton kommen daher ausschließlich CO₂-optimierte Zemente zum Einsatz.

3. CO₂-Speichertechnologie der zirkulit AG

Mit der CO₂-Sequestrierung im Betongranulat wird CO₂ permanent im zirkulit Beton gespeichert. Pro Kubikmeter zirkulit Beton werden auf diesem Weg mindestens 10 kg CO₂ gespeichert. Die Speichertechnologie der zirkulit AG wird sukzessive weiterentwickelt zur Maximierung der CO₂-Speicherung im Beton.

3) Gleiche technische Eigenschaften

Der zirkulit Beton zeichnet sich durch die gleichen technischen Eigenschaften wie herkömmlicher Beton aus. Dies nicht nur bezüglich der statischen Eigenschaften, sondern auch bezüglich Verarbeitbarkeit auf der Baustelle. Die Gewährleistung dieser technischen Eigenschaften bei maximalem Sekundärrohstoffanteil und bei

gleichzeitig minimalem Zementgehalt ist nur mit einer hochwertigen Rezeptur möglich. Die Rezeptur zeichnet sich durch ausgesiebte und für die entsprechende Betonsorte exakt zusammengesetzte Sekundärrohstoffe aus. Zusätzlich werden im zirkulit Beton spezifische Zusatzstoffe und Zusatzmittel zur Verbesserung der Betoneigenschaften verwendet.

2.2 Qualitätsanforderungen und Eigenschaften

Die technischen Eigenschaften von zirkulit Beton erfüllen die Anforderungen der folgenden Normen:

Tab. 1: Übersicht der geforderten Normen

| | |
|-------------------------------|---|
| SN EN 206:2013+A2:2021 | Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität |
| SIA 2030:2021 | Betone mit rezyklierter Gesteinskörnung. Merkblatt für Planer, Bauherren, Behörden und Bauunternehmer sowie Unternehmer für Rückbau, Aufbereitung und Betonherstellung. |
| SN EN 12620:2002 | Eigenschaften rezyklierter Gesteinskörnungen für Beton. |
| SN EN 933-11:2009 | Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 11: Einteilung der Bestandteile in grober rezyklierter Gesteinskörnung |
| SN EN 12390-13 | Prüfung von Festbeton – Teil 13: Bestimmung des Elastizitätsmoduls unter Druckbelastung (Sekantenmodul) |
| SN EN 1097-6 | Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme |

zirkulit Beton ist der Recyclingbetonklasse RC-C50 nach SIA 2030:2021 Tab. 1 [1] zugeteilt. Der Anteil an Betongranulat (C) in den Zuschlagstoffen beträgt 50 % - 100 %.

Tab. 2: Ausschnitt SIA 2030:2021 Tab. 1 [1]

| Recyclingbetonklasse | Betonsorte gemäss SN EN 206:2013 + A2:2021, Tabellen NA.5 und NA.8 | | | | | | | | |
|----------------------|--|---------------|---|---------------|---------------|------------|---|---|------------------------------|
| | 0 | A | B | C | D | E | F | G | Pfahlbeton P1, P2, P3, P4 |
| RC-C25 | zulässig | | | | ¹⁾ | unzulässig | | | zulässig |
| RC-C50 | zulässig | | | | ¹⁾ | unzulässig | | | ¹⁾ |
| RC-M10 | zulässig | | | ¹⁾ | unzulässig | | | | ¹⁾ |
| RC-M40 | zulässig | ¹⁾ | | | unzulässig | | | | ¹⁾ |

Der Nachweis für die Gesteinskörnungen von Beton inkl. der Zusammensetzung von Betongranulat (C) sind in der SN EN 12620:2002 [2] definiert resp. gemäß SIA 2030:2021 Tab. 3 [1] festgesetzt:

Tab. 3: Ausschnitt SIA 2030:2021 Tab. 3 [1]

| Bezeichnung | Bestandteile an rezyklierter Gesteinskörnung in Anlehnung an SN EN 12620:2002+A1:2008, Tabelle 20 | | | | Fremdstoffe | |
|----------------------|--|--|-----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|--|
| | Rc+Ru M.-% | Rc M.-% | Rb M.-% | Ra M.-% | X+Rg M.-% | FL cm ³ /kg |
| Betongranulat (C) | RCu ₉₀ (≥ 90 M.-%) | RC ₅₀ (≥ 50 M.-%) | Rb ₁₀ - (≤ 10 M.-%) | Ra ₁ - (≤ 1 M.-%) | XRg _{0,5} - (≤ 0,5 M.-%) | FL ₂ - (≤ 2 cm ³ /kg) |
| Mischgranulat (M) | RCu ₉₀ - (< 90 M.-%) | RCU _{angegeben} ¹⁾ | Rb ₁₀ - (> 10 M.-%) | Ra ₁ - (≤ 1 M.-%) | XRg _{0,5} - (≤ 0,5 M.-%) | FL ₂ - (≤ 2 cm ³ /kg) |

Die Deklaration des Elastizitätsmoduls ist nach SIA 2030:2021 [1] mit E-Modulklassen vorzunehmen. Der E-Modul von zirkulit Beton ist E25 für Betonsorten mit $w/z \geq 0.55$ resp. E30 für Betonsorten mit $w/z < 0.55$.

Tab. 4: Ausschnitt SIA 2030:2021 Tab. 2 [1]

| E-Modulklasse | E_{rcm} | $E_{rc,i,min}$ |
|-------------------|-------------------|-------------------|
| EX | Keine Anforderung | Keine Anforderung |
| E15 | $\geq 15\ 000$ | $\geq 12\ 000$ |
| E20 | $\geq 20\ 000$ | $\geq 17\ 000$ |
| E25 | $\geq 25\ 000$ | $\geq 22\ 000$ |
| E30 ¹⁾ | $\geq 30\ 000$ | $\geq 27\ 000$ |

¹⁾ Höhere E-Modulklassen sind nach entsprechenden Voruntersuchungen in 2000er-Schritten zulässig.

3 CO₂-Speichertechnologie

Die CO₂-Speichertechnologie ist eine Eigenentwicklung der zirkulit AG. Die Speichertechnologie ermöglicht die Speicherung von CO₂ im Betongranulat. Aktuell enthält ein Kubikmeter zirkulit Beton nach Abzug der Prozessemissionen mindestens 10 kg gespeichertes CO₂. Die Speichertechnologie wird sukzessive verbessert und ausgebaut, um noch mehr CO₂ pro Kubikmeter zirkulit Beton zu speichern.

Kohlenstoffdioxid aus biogener Herkunft wird an der Quelle abgeschieden. Um das CO₂ transportfähig zu machen, wird es an der Quelle verflüssigt. Per Lastwagen wird das verflüssigte CO₂ ins Betonwerk geliefert. Beim Betonwerk befindet sich ein Tank, in dem das flüssige CO₂ gelagert wird. Durch eine von der zirkulit AG entwickelte Sequestrierungstechnologie wird dann als zusätzlicher Schritt das CO₂ im Betongranulat gespeichert. Die auch natürlich ablaufende Karbonatisierung kann so in kurzer Zeit und mit einem höheren Wirkungsgrad umgesetzt werden. Das mit CO₂ angereicherte Betongranulat kann anschließend als rezyklierte Gesteinskörnung in der Betonproduktion verwendet werden. Die Sequestrierungstechnologie ist so in die Betonproduktion integriert, dass das angereicherte Betongranulat nach der CO₂-Behandlung an den laufenden Betrieb übergeben wird.

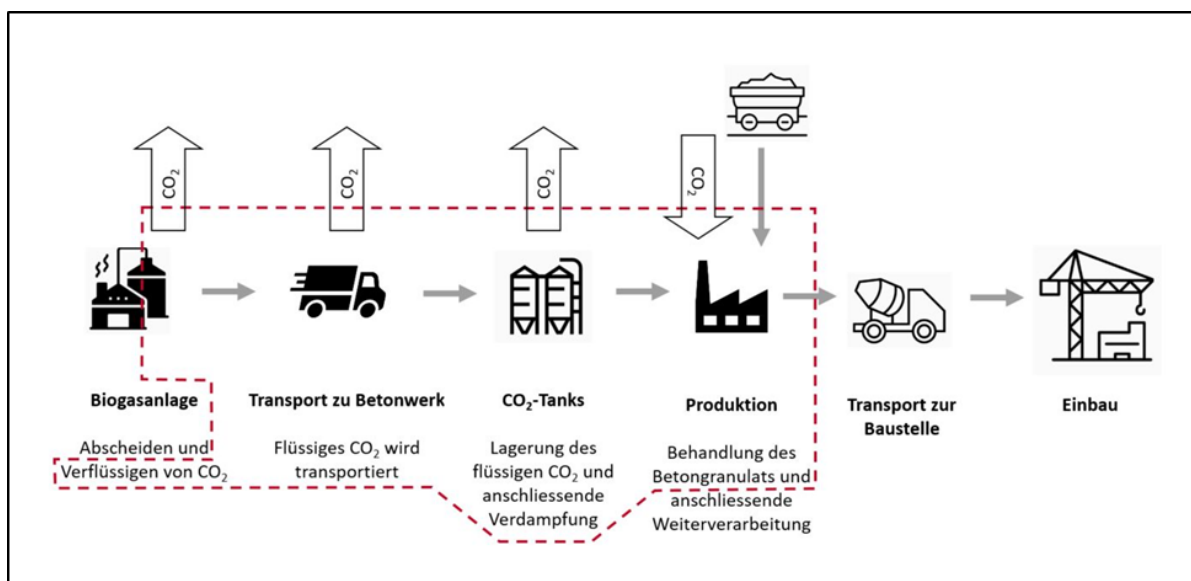


Abb. 3: Systemgrenze und Emissionsquellen und -senken des Speicherprozesses

Durch den chemischen Prozess der Karbonatisierung wird Kohlenstoffdioxid im Betongranulat gespeichert. Im Betongranulat, respektive im Zementstein in den Poren des Betongranulats, ist Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) enthalten, welches unter Zugabe von Kohlenstoffdioxid (CO_2) zu Calciumcarbonat (CaCO_3 , Kalkstein) und Wasser (H_2O) reagiert.



Durch diese chemische Reaktion ist das Kohlenstoffdioxid durch die Mineralisierung dauerhaft und unter üblichen Einsatzbedingungen irreversibel im Gestein gebunden [3]. Auch eine erneute Aufbereitung des aus dem CO_2 -Betongranulat produzierten Betons macht die Sequestrierung nicht rückgängig.

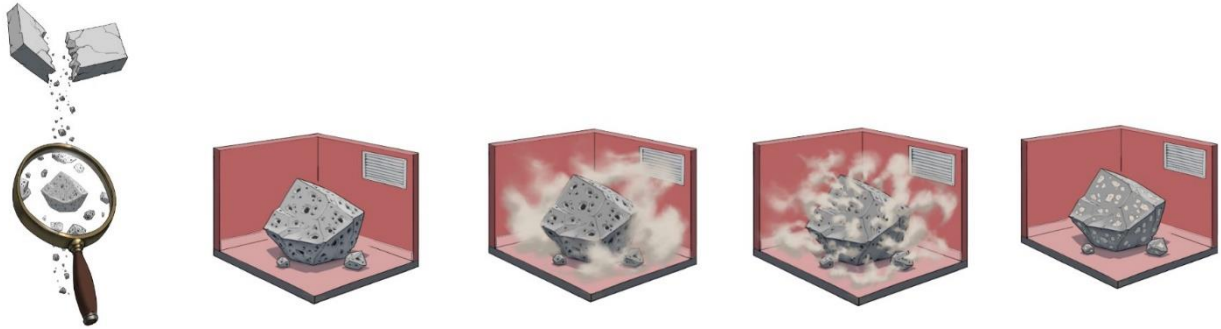


Abb. 4: zirkuliert CO_2 -Speicherprozess

Die CO_2 -Speichertechnologie wird fremdüberwacht. Die Speichermengen der einzelnen Vorhaben werden in einem regelmäßigen Monitoringbericht rapportiert. In einem regelmäßigen Rhythmus überwacht und bestätigt die unabhängige Stelle die gespeicherten Mengen.

4 Umweltnachweis

4.1 Umweltproduktdeklaration

Die Umweltwirkungen von Bauprodukten werden in Umweltproduktdeklarationen (engl. Environmental Product Declaration (EPD)) nach europäischem Standard [4] umfassend ausgewiesen. Die Berechnungen zur Ökobilanz werden nach einheitlicher Methodik erstellt und von unabhängigen Dritten verifiziert. So ist es möglich die Umweltwirkungen jedem Lebensabschnitt zuzuordnen und mit anderen Produkten zu vergleichen. Der CO_2 -Ausstoß für die Herstellungsphase (A1-A3) ist als Global Warming Potential (GWP) deklariert. Die zertifizierten EPDs für die zirkuliert Betonsorten sind auf der Unternehmenswebsite veröffentlicht. Der deklarierte Wert für das GWP wird in den Musterausschreibungstexten aufgegriffen und dient als Schwellenwert, der bei der Betonlieferung eingehalten werden muss. So kann der Bauherr nicht nur technische Beton-eigenschaften, sondern auch Umwelteigenschaften in der Ausschreibung berücksichtigen.

Die Überwachung der Umweltnachweise und der produzierten Mengen erfolgt im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle (WPK) durch den Schweizerischen Überwachungsverband für Gesteinsbaustoffe (SÜGB). Es findet ein Soll-Ist-Abgleich statt, welcher sich an den Anforderungen in SN EN 206 (Tabelle 27) [5] orientiert. So wird sichergestellt, dass die Anforderungen an den zirkuliert Beton aus Kapitel 2 erfüllt werden.

4.2 Umwelt-Impact-Zertifikat

Zum Projektabschluss wird dem Bauherren der Mehrwert durch den Einsatz von zirkuliert Beton im «Umwelt-Impact-Zertifikat» zusammengefasst. Die CO_2 -Emissionen werden im Umwelt-Impact-Zertifikat für die tatsächlich gelieferten Betonsorten und -mengen anhand der Chargenprotokolle berechnet. Die Berechnung

erfolgt mittels den spezifischen EPDs (A1-A3) der jeweiligen Betonsorte. Zusätzlich wird der Transportweg (A4) anhand einer Berechnung im Umwelt-Impact-Zertifikat berücksichtigt. Das Umwelt-Impact-Zertifikat weist zudem den Rohstoffeinsatz, die Zirkularität, sowie das im Betongranulat gespeicherte CO₂ aus. Der Zusammenschluss von verifizierter EPD und Fremdüberwachung durch den SÜGB garantiert dem Bauherrn transparente Umwelteigenschaften.

5 Literatur

- [1] SIA 2030:2021 Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen
- [2] SN EN 12620:2002 Gesteinskörnungen für Beton
- [3] Seidemann, Müller, Ludwig (2015): Weiterentwicklung der Karbonatisierung von rezyklierten Zuschlägen aus Altbeton (2. Phase: Prozessoptimierung im Labormaßstab und Technologieentwurf), Werkstoffe des Bauens, Bauhaus-Universität Weimar, Weimar, Deutschland
- [4] SN EN 15804+A1: 2013 Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltdeklarationen für Produkte - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte
- [5] SN EN 206:2013+A2:2021 Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

6 Autoren

Florian Robineck

Ehemals Projektleiter (ausgetreten zum Ende 2022)

zirkulit AG

Breitloostrasse 7

8154 Oberglatt

<https://zirkulit.ch/>

Mathias Wein

Leiter Qualitätssicherung

Zert. Sachverständiger Betoninstandsetzung

Betontechnologe, VDB

Eberhard Bau AG

Breitloostrasse 7

8154 Oberglatt

<https://eberhard.ch/>

Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie für ganzheitliches Betonrecycling

Sebastian Bruckschlögl, Günter Beuchle, Elena Vollmer, Humberto Patarca Petrillo, Rebekka Volk, Frank Schultmann, Frank Dehn

Zusammenfassung

Bereits seit 25 Jahren ist die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung zur Herstellung von Recycling-Beton (R-Beton) in Normen und Richtlinien gefasst. Trotz dieser langen Zeit wird nur ein sehr kleiner Anteil des anfallenden Bauschutts als sekundärer Rohstoff für den Betonbau genutzt. Insbesondere die Verwertung von feinen Brechsanden aus Beton und Mischabbruch stellt noch eine große Herausforderung dar, zumal es dabei nur noch ansatzweise um rezyklierte Gesteinskörnung, vielmehr eher um inerte oder reaktive Beton-zusatzstoffe sowie Rohmehlersatz geht. Mit steigenden Anforderungen an die Nachhaltigkeit und die Schonung natürlicher Ressourcen rückt die Verwendung von R-Beton immer weiter in den Vordergrund. Hinzu kommen die aufgrund des Kohleausstiegs wegfallenden Flugaschen und die reduzierten Mengen an Hütten-sanden, die derzeit für erhebliche Reduktionen des CO₂-Austoßes durch Reduktion der benötigten Portland-zementklinker im Betonbau verantwortlich sind. Im Rahmen einer Machbarkeitsstudie für ein ganzheitliches Betonrecycling (HolisCon) sollen die aktuellen Hemmnisse und Potenziale bei der Verwendung von R-Beton aufgezeigt und diskutiert werden. Der Fokus liegt hierbei auf der Ermöglichung eines geschlossenen Stoff-kreislaufs und der exemplarischen Anwendung in Ballungsgebieten Baden-Württembergs. Nur mit einer um-fassenden Betrachtung der technischen Möglichkeiten wie auch der Ökobilanzierung kann das Betonrecyc-ling in einen ganzheitlichen Rahmen gebracht werden. Der derzeitige Entwurf der DIN 1045-2 bringt dabei eine Reihe von Veränderungen mit sich, die für die Anwendung von R-Beton genutzt werden können. Her-vorzuheben ist die erstmalige Verwertung von feiner rezyklierter Gesteinskörnung des Typs 1 aus gleicher Produktion der groben rezyklierten Gesteinskörnung. Darüber hinaus sind jedoch noch weitere Maßnahmen nötig, um den Betonbau langfristig in geschlossene Stoffkreisläufe zu führen und die Potenziale zur Scho-nung natürlicher Ressourcen auszuschöpfen. Die Verwertung von Brechsanden als Betonzusatzstoffe oder bei der Zementproduktion, darunter auch bei der Herstellung von Belit-Zementen, bieten große Potenziale, die jedoch noch weiterer wissenschaftlicher Untersuchungen bedürfen.

1 Ausgangslage und Anforderungen

Rohstoffgeologisch sind in Deutschland, insbesondere in Baden-Württemberg, große Mengen an natürli-chem Kies und Sand verfügbar. Diese werden jedoch durch unterschiedlichste gesellschaftliche Nutzungsinteressen begrenzt und gerade in Ballungsgebieten steht die Flächeninanspruchnahme im Konflikt mit dem Abbau natürlicher Gesteinskörnungen. Dadurch entstehen zunehmend lokale Engpässe, wie bspw. der Man-gel an Sand und Feinkies in der Region zwischen Mannheim und Karlsruhe. In Anbetracht der Nachhaltigkeit und Schonung der verfügbaren Rohstoffvorkommen gewinnt das Betonrecycling immer mehr an Bedeutung.

Der Betonbau steht auch aufgrund des Wegfallens von Flugaschen und den in Zukunft reduzierten Hütensandmengen vor großen Herausforderungen. Die Rückführung von Bau- und Abbruchabfällen in den Betonbau bildet dabei einen unerlässlichen Schritt in Richtung einer geschlossenen Kreislaufführung.

1.1 Klassifizierung und Aufkommensanalyse

Ungenutzte Baustoffe, Verbrauchsmaterialien und Fehlchargen sowie ausgemusterte Baustoffe aus dem Abbruch von Gebäuden und Infrastrukturbauwerken bilden die Grundlage für die betrachteten Sekundärrohstoffe. Die Bau- und Abbruchabfälle können entsprechend ihrer Herkunft den resultierenden Bestandteilen nach DIN EN 12620:2008-07 [1] zugeordnet werden (siehe Tabelle 1). Neben der Verwendung als rezyklierte Gesteinskörnung können die anfallenden Abfälle je nach Zusammensetzung und Aufbereitung prinzipiell auch als aktive Anteile im Bindemittel genutzt werden.

Tab. 1: Klassifizierung der relevanten Bau- und Abbruchabfälle für Sekundärrohstoffe im Betonrecycling nach DIN EN 12620:2008-07 [1] in Verbindung mit DIN 4226-101:2017-08 [2] und der Abfallverzeichnisverordnung (AVV) [3]

| Rohmaterialien | Abfallschlüssel nach AVV [3] | Resultierender Bestandteil nach DIN EN 12620:2008-07 [1] |
|--|------------------------------|--|
| Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton | 17 01 01 | Rc |
| Ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörnung | 17 05 04 | Ru |
| Ziegel-Mauersteine (nicht porosiert) | 17 01 02 | Rb |
| Klinker, Fliesen | 17 01 03 | |
| Kalksandstein-Mauersteine | 17 01 07 | |
| Verschiedene Mauerziegel (porosiert) | 17 01 02 | |
| Bimsbeton, Porenbeton, nicht schwimmender Porenbeton | 17 01 07 | |
| Asphalt | 17 03 02 | Ra |
| Glas | 17 02 02 | Rg |

Weiter betrachtet werden können auch Abfallgruppen wie Boden, Steine und Baggergut sowie alter Gleis-schotter, sofern diese sich für die Anwendung als rezyklierte Gesteinskörnung im Betonbau eignen (siehe Abschnitt 2.3). Anhand der in Tabelle 1 resultierenden Bestandteile können bis zu vier Typen rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN 4226-101:2017-08 [2] gebildet werden, von denen aktuell Typ 1 (überwiegend reiner Betonbruch) und Typ 2 (Betonbruch mit höheren Anteilen an Mauerwerksbruch) für den Betonbau normativ geregelt sind.

Das Aufkommen mineralischer Bauabfälle in Deutschland wird in verschiedene Kategorien aufgeteilt und beläuft sich auf insgesamt 218,8 Mt (Stand 2018). Davon sind 130,3 Mt Boden und Steine, 59,8 Mt Bauschutt, 14,1 Mt Straßenaufbruch, 0,6 Mt Bauabfälle auf Gipsbasis und 14,0 Mt Baustellenabfälle [4a]. In der Landesstatistik von Baden-Württemberg werden zudem Bauschutt, Straßenaufbruch und andere Bau- und Abbruchabfälle in einer Kategorie zusammengefasst und nicht weiter in einzelne Materialkategorien aufgeteilt. Allgemein ist hierbei die anfallende Betonmenge nicht separat erfasst, die für die Anwendung eines methodischen Ansatzes zur umfassenden Datenerhebung und genaueren Abschätzung notwendig ist. Für Baden-Württemberg wurde zwischen 2015 und 2018 im Rahmen des Projekts „Stofffluss- und Akteursmodell als Grundlage für ein aktives Ressourcenmanagement im Bauwesen von Baden-Württemberg (StAR-Bau)“ [5] eine Quantifizierung des aktuellen und zukünftigen Gebäudebestandes, der Infrastruktur und der Stoffflüsse (die aus Zubau, Abriss, Sanierung sowie Umnutzung und Umbau resultieren) für verschiedene Kreise sowie kreisfreie Städte durchgeführt. Die dort angestellten Hochrechnungen zeigen, dass mit einem relativ gleichbleibenden Anteil von ca. 17 % bis 19 % an Betonabfällen im Bauschutt zu rechnen sein wird. Bei dem Vergleich der Abfallstatistiken zwischen 2016 und 2020 zeigen sich Abweichungen aufgrund der nicht direkt

vergleichbaren Abfallkategorien in der Landesstatistik. Die fehlende und nicht vergleichbare Datengrundlage sowie unzureichende Abfalltrennung am Entstehungsort stellen ein wesentliches Hemmnis dar, das sich auf die nachfolgenden Potenzialanalysen und Handlungsmöglichkeiten erheblich auswirkt.

1.2 Bisheriges Betonrecycling

Insgesamt liegt die Verwertungsquote von Bauschutt in Deutschland mit 93,9 % auf einem sehr hohen Niveau (Stand 2018, siehe Abbildung 1). Der größte Teil des Bauschutts wird jedoch im Straßen- und Tiefbau als Tragschichten, Frostschutzschichten und Auffüllungen verwertet. Lediglich ca. 0,7 % der verwendeten Recyclingbaustoffe wird wieder für Ortbeton und Betonbauteile aufbereitet und eingesetzt [4a, 4b].

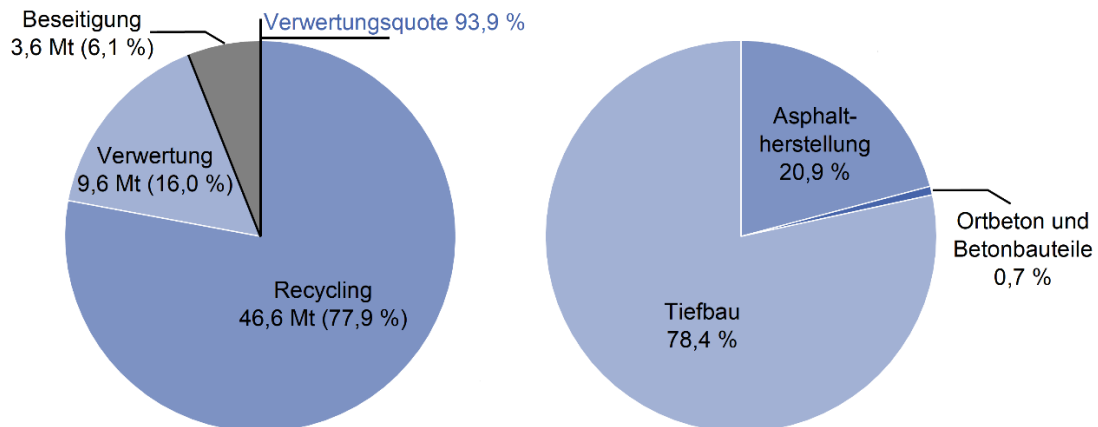


Abb. 1: Links: Verbleib der Fraktion Bauschutt 2018 in Deutschland (Zahlen nach [4a]) und Rechts: Verwendung von Recyclingbaustoffen 2018 in Deutschland (Zahlen nach [4b])

Nach den Angaben des statistischen Landesamts zeigt sich jedoch eine steigende Tendenz in Baden-Württemberg. Im Jahr 2016 wurden weniger als 1 % der Menge an Bauschutt als rezyklierte Gesteinskörnung aufbereitet, 2018 stieg die Zahl auf 1,4 % und in 2020 wurde ein Höchstwert von 3,8 % erreicht. Zwischen 2016 und 2018 wurden in Baden-Württemberg jährlich ca. 3,9 Mt Beton in Bauschuttrecyclinganlagen aufbereitet. Die Aufbereitung erfolgte dabei mit 79 % überwiegend in mobilen Anlagen.

Das Betonrecycling in Deutschland zeichnet sich in den vergangenen 25 Jahren durch eine Reihe von Pilotprojekten aus. Die niedrige Gesamtquote an verwendeter rezyklierter Gesteinskörnung zeigt jedoch, dass in diesem Zeitraum der Sprung zur breiten Anwendung in die Praxis noch nicht geschafft wurde. Im Jahr 1999 wurde als eines der ersten R-Beton-Projekte die Waldspirale in Darmstadt fertiggestellt. Grundlage hierfür war die erste DAfStb-Richtlinie „Beton mit rezykliertem Zuschlag“ von 1998. Mit dem Projekt wurden erste wichtige Erkenntnisse über den höheren Wasseranspruch und die Konsistenzentwicklung sowie Druckfestigkeit von R-Beton gesammelt. Die Waldspirale gilt als eines der ersten Leuchtturm-Projekte und erregte 1999 auch internationales Interesse. Danach wurden jedoch keine größeren Pilotprojekte in Deutschland in Angriff genommen. Grund hierfür ist ein mittlerweile überwundenes normatives Hemmnis, das die Anwendung von rezyklierter Gesteinskörnung zwischen 2008 und 2017 erheblich eingeschränkt hatte. Mit dem Ersatz der DIN 4226-100:2002-02 [6] durch die harmonisierte DIN EN 12620:2008-07 [1] fehlten in Deutschland die zulässigen Grenzwerte für enthaltene gefährliche Substanzen. Für die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen für Beton wurde somit eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) erforderlich. Das Urteil C-100/13 des Europäischen Gerichtshofs vom 16. Oktober 2014 bezüglich der CE-Kennzeichnung und den Bauregellisten erschwerte die Situation zudem noch weiter. Erst mit der Einführung der DIN 4226-101 [2] im August 2017 wurde das Hemmnis beseitigt. Nachfolgend bekam 2017 der R-Beton mit dem Bau des Umweltbildungszentrums in Mainz und der Umweltstation Würzburg im Jahr 2019 wieder neuen Schwung. Besonderheit hierbei war die Anwendung des R-Betons als Sichtbeton, die bei beiden Projekten erfolgreich umgesetzt werden konnte. Als weiteres Leitbild dient die im Jahre 2022 fertiggestellte Rathausenerweiterung

in Korbach. Hierbei wurde die alte Rathouserweiterung als lokale Rückgewinnung von Baumaterialien im Sinne des sog. „Urban Mining“ genutzt. Nicht direkt als R-Beton-Projekt zu bezeichnen, jedoch als weiterer Meilenstein in der Anwendung von R-Beton, ist die erst kürzlich erteilte allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) für den R-Beton der Borex GmbH & Co. KG für die sog. „Büscher-Wand“ [7] zu nennen. Die Fertigteilwände für die Expositionsclassen X0 und XC1 (trocken) für die Gebäudeklassen 1 bis 4 aus bis zu 100 % rezyklierter Gesteinskörnung ähnlich zu Typ 3 übertreffen die möglichen normativen Austauschraten von maximal 45 %. Für die Bemessung der Fertigteile sind ähnlich zu den Regelungen in der Schweiz angepasste Bemessungswerte anzusetzen.

1.3 Normative und rechtliche Regelungen

Die Regelungen im Bauwesen in Deutschland sind geprägt von einem Zusammenspiel europäischer und nationaler Gesetzgebung. Die geltenden Möglichkeiten und Einschränkungen haben einen signifikanten Einfluss auf die Akzeptanz und Anwendung von R-Beton in der Praxis. Zusammenfassend lassen sich für den Einsatz von R-Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung vier übergeordnete Handlungsebenen ableiten:

1. Einsatz als Normalbeton ohne zusätzliche Auflagen
2. Einsatz als Normalbeton mit zusätzlichen Auflagen
3. Berücksichtigung angepasster Bemessungswerte
4. Erforderlicher Verwendbarkeitsnachweis

Die ersten drei Handlungsebenen unterliegen normativen Regelungen. Liegt keine technische Regel vor, bedarf es eines Verwendbarkeitsnachweises in Form einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) oder einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE).

Die bauaufsichtlich eingeführte DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620, Ausgabe 2010:09“ [9] stellt derzeit im Bereich der zweiten Handlungsebene die einzige Möglichkeit zur Herstellung von R-Beton in Deutschland dar. Grobe rezyklierte Gesteinskörnung darf abhängig von der Expositionsklasse bis zu einem Maximum von 45 Vol.-% eingesetzt werden (siehe Tabelle 2). Die Verwendung von feiner rezyklierter Gesteinskörnung (< 2 mm Korndurchmesser) ist im Betonbau ausgeschlossen. Eine kleine Ausnahme bildet hier nur die Möglichkeit zur Verwendung von maximal 5 M.-% rezyklierter (i. d. R. gewaschener) Gesteinskörnung aus der Rückgewinnung in der Betonproduktion.

Tab. 2: Maximal zulässige Anteile grober rezyklierter Gesteinskörnungen, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (Vol. %) nach dem Normentwurf der DIN 1045-2 [8] im Vergleich zur derzeit geltenden DAfStb-Richtlinie für R-Beton [9] (Werte in Klammern)

| Anwendungsbereich | | Kategorie der Gesteinskörnung | |
|-------------------|--|-------------------------------|---------|
| Alkalirichtlinie | DIN EN 206 und DIN 1045-2 | Typ 1 | Typ 2 |
| WO (trocken) | XC1 | 45 (45) | 35 (35) |
| | X0 | | |
| WF (feucht) | XC1 bis XC4 | 45 (45) | 35 (35) |
| | XF1 und XF3 | 45 (35) | 35 (25) |
| | Beton mit hohem Wassereindringwiderstand | | |
| | XA1 | 25 (25) | 25 (25) |
| WA | XD1 und XD2 | 30 (0) | 20 (0) |
| | XS1 und XS2 | | |
| | XF2 und XF4 | | |

Im Vergleich dazu ist in der Schweiz der Einsatz feiner rezyklierter Gesteinskörnung sowie Austauschraten von grober rezyklierter Gesteinskörnung bis zu 100 % unter Berücksichtigung angepasster Bemessungswerte Stand der Praxis. Nach dem Normenentwurf der DIN 1045-2 [8] werden die Anwendungsmöglichkeiten für die Herstellung von R-Beton in Deutschland erweitert. Die zulässigen Austauschraten in den verschiedenen Expositionsklassen (siehe Tabelle 2) wurden auf Grundlage der R-Beton-Forschungsprojekte angepasst. Unterschieden wird der Einsatz von ≤ 25 Vol.-% grober rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonklasse BK-N und > 25 Vol.-% in der Betonklasse BK-E. Vereinfachungen zur Anwendung in der Betonklasse BK-N mit ≤ 25 Vol.-% grober rezyklierter Gesteinskörnung sind noch in Diskussion. Beim Einsatz von Gesteinskörnungen des Typs 1 soll unter bestimmten Randbedingungen der Einsatz feiner rezyklierter Gesteinskörnung (≤ 2 mm, ≤ 20 Vol.-%) aus gleicher Produktion der groben rezyklierten Gesteinskörnung ermöglicht werden. Eine Erhöhung der zulässigen rezyklierten Gesteinskörnung von 5 M.-% auf 25 M.-% bei der Rückgewinnung in der Betonherstellung sind derzeit ebenfalls im Entwurf der DIN 1045-2 [8] enthalten. Im Entwurf der DIN 197-6 [10] soll erstmals die Herstellung von Zement mit rezyklierten Baustoffen ermöglicht werden. Der damit hergestellte CEM II Zement darf neben dem Portlandzementklinker bis zu 20 M.-% Recyclingmehl bezogen auf die Zementmenge enthalten, das aus der Herstellung grober und/oder feiner rezyklierter Gesteinskörnung für Beton stammt.

2 Potenzialanalyse von Sekundärrohstoffen aus dem Betonbruch

2.1 Frischbetonrecycling

Durch die notwendige Reinigung der Gerätschaften und Fahrzeuge von Transportbeton- und Fertigteilherstellern ist das Frischbetonrecycling seit vielen Jahren gängige Praxis. Für das Frischbetonrecycling gibt es verschiedene Aufbereitungsverfahren. In Deutschland ist dabei das nass-mechanische Verfahren am weitesten verbreitet. Neben den Rückständen an den Gerätschaften und in den Fahrzeugen fallen auch Überschuss- und Restmengen an, die meist mit ca. 3 % der Betonproduktion abgeschätzt werden [11]. Bei einer Transportbetonherstellung von ca. 52,66 Mio. m³ in Deutschland (Stand 2018) fallen somit ca. 1,58 Mio. m³ Restbeton an, aus dem ca. 2,9 Mt Gesteinskörnung wiedergewonnen werden könnten [12]. Rund 88 % der Transportbetonwerke in Deutschland haben nach Angaben einer Umfrage [12] eine Frischbetonrecyclinganlage, bei ca. 39 % wird auch Restbeton mit der Anlage aufbereitet. Weiterhin werden 19 % zu Betonwaren verarbeitet und 25 % werden ohne bekannten Verwertungsweg entsorgt. Die übrigen 17 % werden anderweitig verwertet. Grund für die vergleichsweise hohe Recyclingrate ist, dass der Prozess in der Hand des Herstellers bleibt und dieser direkt in den gesamten Prozessablauf eingebunden werden kann. Viele Potenziale im Frischbetonrecycling werden bereits genutzt, jedoch kann die Verwertung anfallender Restbetonmengen noch weiter verbessert werden. Bei einer vermehrten Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen aus Bauschutt könnten zukünftig anfallende Restbetonmengen den Aufbereitungsanlagen für das Abbruchmaterial leichter zugeführt und damit hochwertig verwertet werden.

2.2 Bauschutttaufbereitung

Zur Aufbereitung des anfallenden Bauschutts kommen typischerweise Backenbrecher zum Einsatz. Das aufbereitete Material wird derzeit meist nach der ersten Aufbereitungsstufe als Verfüllmaterial im Straßen- und Tiefbau sowie in der Asphaltherstellung verwendet. Die resultierende Kornform ist eher flach und scharfkantig. Für rundere, weniger kantige Kornformen können beispielsweise Kegelbrecher als zweite Aufbereitungsstufe eingesetzt werden [13]. Weitere Aufbereitungsstufen umfassen Sieb- und Waschanlagen sowie Anlagen zum Separieren von Fremdstoffen. Zusätzliche Aufbereitungsstufen bedingen jedoch meist höhere Ausschussraten feiner Gesteinskörnungen. Bei fehlenden Verwertungsmöglichkeiten der abzuführenden Stoffströme (z. B. Brechsande aus Beton oder Mischabbruch) wird der Prozess schnell unwirtschaftlich und weniger ressourcenschonend. Erfahrungen aus der Praxis zeigen, dass für Betonbruch bereits ein Brechvorgang ausreichen kann, um eine ausreichende Qualität zu erzielen [14]. Stationäre Anlagen ermöglichen im Allge-

meinen eine höhere Produktqualität und Produktvielfalt. Mobile und semimobile Anlagen ermöglichen andererseits den wirtschaftlichen Einsatz bei kleinem Rohstoffaufkommen. Für die Herstellung von rezyklierter Gesteinskörnung für Beton gelten insgesamt deutlich höhere Anforderungen als für die Herstellung von Frost- und Tragschichten im Straßen- und Tiefbau. Der Einsatz von mobilen Anlagen ist daher im Betonbau aufgrund der erforderlichen Genehmigungen und Zertifizierungen deutlich erschwert.

Neben der in der Praxis eingesetzten Bauschutttaufbereitung sind weitere Verfahren möglich, um die Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnung zu verbessern und abzuführende Stoffströme zu nutzen. Fokus in der aktuellen Forschung liegt insbesondere auf den anfallenden Betonbrechsanden, die in dem Beitrag von Herrn Höffgen in diesem Tagungsband genauer thematisiert werden. Grundsätzlich kann zwischen der Stärkung oder der Entfernung des anhaftenden Zementsteins unterschieden werden [15]. Bei der Stärkung des Zementsteins ist die Karbonatisierung derzeit im Fokus der wissenschaftlichen Untersuchungen. Durch die Karbonatisierung des im Betonbruch enthaltenen Calciumhydroxids mit Kohlenstoffdioxid entsteht Calciumcarbonat. Dadurch werden die mechanischen Eigenschaften durch die Reduktion der Porosität und Wasseraufnahme sowie das teilweise Schließen von Mikrorissen verbessert. Die zusätzliche Bindung von CO₂ im Zementstein trägt zudem zum Klimaschutz bei. Methoden zum Entfernen des anhaftenden Zementsteins zielen auf die möglichst sortenreine Rückgewinnung der Gesteinskörnung ab. Problematisch in der Praxis ist jedoch, dass der abgetrennte Zementstein noch keiner Verwertung zugeführt werden kann und somit überwiegend deponiert werden muss. Derzeit liegt der Fokus daher auf einem möglichst geringen Ausschuss bei der Aufbereitung von rezyklierter Gesteinskörnung. Mit weiteren möglichen Verwertungswegen für den Zementstein (z. B. als Betonzusatzstoff oder zur Belit-Klinkerherstellung) wird die Separation zunehmend an Bedeutung gewinnen. Mögliche Verfahren sind unter anderem zusätzliches Brechen und Mahlen, thermische Behandlungen sowie Mikrowellen- und Ultraschallverfahren.

2.3 Ressourcenschonung sowie Klinkereffizienz durch weitere Sekundärrohstoffe

Flugaschen und Hüttensande leisteten in den letzten Jahrzehnten bereits einen sehr wichtigen Beitrag für die Ressourcenschonung sowie die Herstellung von klinkereffizienten Zementen im Betonbau. Durch den Einsatz von Flugaschen, Hüttensand und gebranntem Ölschiefer konnte der Klinker-Zementfaktor im Zement dabei auf 71 % gesenkt werden und zeigt die Möglichkeiten branchenübergreifender, industrieller Wertschöpfungsketten. Mit weiteren in der Normung enthaltenen CEM II- und CEM VI-Zementen ist eine Reduktion des Klinkergehalts auf bis zu 50 % möglich [16]. Aufgrund des 2020 beschlossenen Ausstiegs aus der Kohleverstromung in Deutschland bis 2038 entfallen die Steinkohle- und Braunkohleflugaschen für die Verwendung im Betonbau. Zudem fallen bei der angestrebten Umstellung auf wasserstoffbasierte Direktreduktionsverfahren bei der Roheisenherstellung ca. 40 % weniger Schlacken an [16]. Hinzu kommen die Produktionsrückgänge in der Roheisenherstellung seit 2018 [17], welche die verfügbaren Sekundärrohstoffe weiter reduzieren. Dem gegenübergestellt ist nicht mit einem wesentlichen Rückgang des Zementbedarfs in den kommenden Jahren zu rechnen [18]. Um die Umweltschutzziele zu erreichen und die Bestrebungen hin zu klinkereffizienten Zementen weiterhin gerecht zu werden, steht der Betonbau daher vor großen Herausforderungen. Zur Bewältigung ist es neben der Nutzung der Bau- und Abbruchabfälle notwendig, weitere Sekundärrohstoffe zur Kompensation der wegfallenden Flugaschen und Hüttensande zu verwenden.

Im Fokus liegen hierbei mengenmäßig und aus ökologischer Sicht die Verbrennungsrückstände aus thermischen Abfallbehandlungsanlagen (Müllverbrennung und von Sekundärbrennstoffen). Im Jahr 2017 fielen ca. 5,6 Mt Frischschlacke und ca. 1,3 Mt Rauchgasreinigungsrückstände an. Durch die Aufbereitung reduziert sich die Menge an Frischschlacke um 16,6 %, ca. 17,2 % werden deponiert und ca. 47,1 % als Deponie- oder Versatzbaustoff verwendet. Nur ca. 19,1 % werden für technische Bauwerke und sonstige Bereiche verwertet [19]. Die Verwendung im Betonbau steht dabei verfahrenstechnisch bedingt in Konkurrenz mit der Rückgewinnung von Metallen. Zur Eignung der Schlacken und Aschen sind abhängig von der Aufbereitung noch weitere Untersuchungen notwendig, insbesondere in Bezug auf die Umweltverträglichkeitsanforderungen.

Die Regelungen zur Verwendbarkeit sind je nach Land stark unterschiedlich. Zum Beispiel ist in der Schweiz die Verwendung untersagt und in den Niederlanden werden bereits Gesteinskörnungen für Beton aus Müllverbrennungsschlacken hergestellt [20, 21].

Durch den geplanten Ausstieg aus der Kohleverstromung bis 2038 wird auch der REA-Gips, der als Nebenprodukt anfällt, nicht mehr produziert. Gips ist ein wichtiges Ausgangsmaterial für die Zementherstellung sowie für viele bautechnische Produkte. Das Recycling von Bauabfällen auf Gipsbasis beläuft sich (Stand 2018) lediglich auf 4,7 % und verwertet werden rund 44,9 %. Die übrigen 50,4 % werden beseitigt [4b]. Derzeit finden Gipsabfälle, die Bestandteil mineralischen Bauschutts sind, keine besondere Erwähnung in der Abfallstatistik und schränken aufgrund des hohen Sulfatgehalts die Verwertung stark ein. In Anbetracht des wegfallenden REA-Gipses und dem damit verbundenen erhöhten Bedarf an Primärrohstoffen sollten Bauabfälle auf Gipsbasis besser getrennt werden, um vermehrt dem Kreislauf wieder zugeführt werden zu können.

Tab. 3: Produktion 2005 bis 2018 sowie 2019, Bedarf 2019 und Anteil zur Zementherstellung von REA-Gips sowie Gips- und Anhydritgestein [4a]

| | Produktion zwischen 2005 bis 2018 [Mt/a] | Produktion 2019 [Mt/a] | Bedarf 2019 [Mt/a] | Anteil Zementindustrie von Produktion [%] |
|---------------------------|--|------------------------|--------------------|---|
| REA-Gips | 6,9 | 5,2 | 4,0 | 4,2 |
| Gips- und Anhydritgestein | -- | 5,6 | 4,9 | 27,5 |

Als weitere Sekundärrohstoffe zur Herstellung von Gesteinskörnung sind die Fraktionen Boden, Steine und Baggergut sowie Gleisschotter zu nennen. Boden, Steine und Baggergut stellten mit ca. 131 Mt im Jahr 2020 den größten Anteil an Bau- und Abbruchabfällen dar [22]. Die enthaltene Kies- und Sandfraktion in gemischt-körnigen Böden können mit entsprechenden Sieb-, Wasch- und Klassifizierungsverfahren für die Anwendung im Betonbau genutzt werden. Gleiches gilt für den hochwertigen Kies und Splitt aus der Schotter-Aufbereitung, der aufgrund der Korngröße nicht für RC-Schotter geeignet ist. Dem Ressourcenschonungspotenzial ist hierbei der zusätzliche Aufwand der Aufbereitung und mögliche umwelttechnische Belastungen gegenüberzustellen. Abfallfraktionen wie Glas, Faserzement und Mineralwolle sind prinzipiell als Sekundärrohstoffe im Betonbau geeignet, stellen aber aufgrund ihrer bereits hohen Rückgewinnungsraten bzw. niedrigen Aufkommensmengen nur kleinere Potenziale dar.

3 Ansatzpunkte, Machbarkeiten und Diskussion

3.1 Anwendung grober rezyklierter Gesteinskörnung

Die Verwendung grober rezyklierter Gesteinskörnung im Betonbau ist bereits seit vielen Jahren technisch und regulativ möglich, aber in der Praxis noch wenig vertreten (siehe Abschnitt 1.2). Die Wiedergewinnung von Gesteinskörnung durch Frischbetonrecycling ist dabei noch am weitesten umgesetzt. Die derzeitigen Normenentwürfe (siehe Abschnitt 1.3) bieten für die Herstellung von Normalbeton in den entsprechenden Expositionsklassen (siehe Tabelle 2) eine Erweiterung von Möglichkeiten zum Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen, die genutzt werden sollten. Für den Einsatz größerer Mengen (höhere Austauschraten) an unbehandelten rezyklierten Gesteinskörnungen ist die Anpassung von Bemessungswerten erforderlich. Als Vorlage könnten Forschungsvorhaben, vergleichbare Regelwerke aus der Schweiz sowie Erfahrungen aus allgemein bauaufsichtlichen Zulassungen dienen. Durch die Förderung von Pilotprojekten, Geräten zur Aufbereitung, Zulassungsverfahren sowie einer Vorgabe zur Verwendung von R-Beton bei öffentlichen Bauvorhaben können die Prozesse gezielt beschleunigt werden. Ein wesentlicher Hebel bei der technischen Umsetzung hoher Austauschraten ist zudem eine möglichst sortenreine Trennung und die statistische Erfassung der Bau- und Abbruchabfälle. Zur weiteren Verbesserung der Eigenschaften rezyklierter Gesteinskörnungen sind zusätzliche Aufbereitungsschritte notwendig. Beginnend bei einfacheren Umsetzungen wie Waschvorgängen

oder eines weiteren Brechens bieten auch thermische Verfahren oder die Karbonatisierung von Betonbruch viele Potenziale. Insbesondere beim größeren Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen aus Mischabbruch werden zukünftig weitere Aufbereitungsschritte relevant.

3.2 Anwendung feiner rezyklierter Gesteinskörnung

Für die Anwendung von feiner rezyklierter Gesteinskörnung im Betonbau gibt es verschiedenste Möglichkeiten, allerdings ist bisher keine davon normativ geregelt. Einzelne Verwertungswege, wie die Substitution von Sand und die Verwendung als Zementhauptbestandteil sind in den derzeitigen Normenentwürfen enthalten. Die Verwendung als Betonzusatzstoff ist aktuell normativ noch nicht absehbar. Für mehr Details wird hierbei auf den Beitrag von Herrn Höffgen in diesem Tagungsband verwiesen. Die Verwendung als Rohmehlkomponente ist prinzipiell möglich, sofern die Anforderungen an den herzustellenden Zement erfüllt werden.

3.2.1 Als feine Gesteinskörnung (Sandsubstitution)

Nach dem Normenentwurf der DIN 1045-2:2022-07 [8] dürfen beim Einsatz von grober rezyklierter Gesteinskörnung des Typs 1 anfallende Betonbrechsande (≤ 2 mm, ≤ 20 Vol.-%) aus der gleichen Produktion entsprechend der Gesamtsieblinie und Expositionsklasse eingesetzt werden. Bei den anfallenden Mengen an Betonbruch in Deutschland und den benötigten Mengen an Gesteinskörnung könnten mit dieser Regelung die Betonbrechsande überwiegend als rezyklierte Gesteinskörnung verwertet werden. Allerdings gilt dies nur für Typ 1 Gesteinskörnungen und nicht für den großen Anteil in der Aufbereitung von Mischabbruch. Anfallende Mengen von Brechsanden bei der Verwertung im Straßen- und Tiefbau können ebenfalls nicht genutzt werden. Aufgrund der sehr niedrigen Herstellung von Typ 1 Gesteinskörnung für den Betonbau im Vergleich zum Gesamtaufkommen ist derzeit noch mit keiner erheblichen Verbesserung der Ausgangslage zu rechnen. Die Verwertung anfallender Brechsande aus Beton und vor allem aus Mischabbruch wird auch mit Einführung des Normenentwurfs der DIN 1045-2:2022-07 [8] eine große Herausforderung bleiben.

Ob unbehandelte Brechsande aus einer anderen Produktion oder auch aus Mischabbruch (z. B. Typ 2) bei der Herstellung von Normalbeton eingesetzt werden können, muss weiter untersucht werden. Aufgrund der höheren Anteile an porösen Zement- und Mauerwerksanteilen haben feine rezyklierte Gesteinskörnungen einen höheren Einfluss auf die Betoneigenschaften (E-Modul, Schwinden, Kriechen, Verarbeitbarkeit usw.) als grobe rezyklierte Gesteinskörnungen. Hinzu kommen meist Anreicherungen von Verunreinigungen und Schadstoffen im Feinanteil. Zusammenfassend ist davon auszugehen, dass höhere Austauschraten unbehandelter Betonbrechsande (Typ 1) derzeit aufgrund der streuenden Eigenschaften nicht zielführend sind. Mit einer entsprechenden Konditionierung (z. B. Karbonatisierung) sind die möglichen Austauschraten voraussichtlich höher, erfordern jedoch auch einen höheren Herstellungs- und Prüfaufwand. Die erzielbare Qualität ist dabei eng mit der vorangeschalteten Abfalltrennung und der Aufbereitungstechnik verbunden. Allgemein ist davon auszugehen, dass für bessere Qualitäten stationäre Anlagen mit nachgeschalteter Klassierung und Konditionierung erforderlich sind. Ein alternativer Ansatz zur Steigerung der Austauschraten ist die Anpassung der Bemessungswerte (entsprechend der 3. Handlungsebene in Abschnitt 1.3). Beispiele aus den normativen Regelungen in der Schweiz, aber auch anhand der allgemein bauaufsichtlichen Zulassung der sog. „Büscher-Wand“ [7] zeigen durch Austauschraten grober rezyklierter Gesteinskörnungen bis zu 100 Vol.-% inklusive feiner Anteile das Potenzial der Vorgehensweise.

3.2.2 Als Betonzusatzstoff bzw. Zementhauptbestandteil

Abhängig von der Aufbereitung können Brechsande aus Betonbruch und Mischabbruch als Betonzusatzstoff bzw. Zementhauptbestandteil entweder als inerte Füllstoff oder als aktive Komponente eingesetzt werden. Fein gemahlene Recyclingbaustoffe als Zementhauptbestandteil, welcher erstmals im Normenentwurf der DIN EN 197-6 [10] enthalten ist, soll in erster Linie den Klinkeranteil reduzieren (analog zur Beigabe von Kalksteinmehl). Ob und wie der Normenentwurf jedoch bauaufsichtlich eingeführt werden kann, ist derzeit

noch in Diskussion. Beim möglichen Einsatz als Betonzusatzstoff können die Betoneigenschaften durch Erhöhung der Packungsdichte verbessert werden. Die erzielbare Verbesserung der Eigenschaften bzw. der Reduktion des Klinkerbedarfs stehen jedoch der erhöhten Porosität und Wasseraufnahme des Materials entgegen. Gesteigert werden kann das Potenzial durch Berücksichtigung der Reaktivität der Ausgangsstoffe, welche durch die Aufbereitungstechnik beeinflusst werden kann. Betonbrechsande sind meist noch nicht vollständig hydratisiert und können durch entsprechende Verfahren (z. B. Wärmebehandlung) reaktiviert werden. Thematisiert wird dies detaillierter in Höffgen et al. [15]. Nach dem aktuellen Stand der Forschung ist bei der Wärmebehandlung ein Temperaturbereich von 600 °C – 700 °C durch die vollständige Dehydratation der Calcium-Silikat-Hydrat-Phasen (C-S-H) zielführend [23]. Allerdings erfolgt auch eine schnellere Abbindung durch die Dehydratation der Calciumhydroxid-Phasen zu Calciumoxid, welche durch entsprechende Erstarrungsverzögerer ausgeglichen werden muss. Auch Anteile an Ziegelmehl aus Mischabbruch können durch die puzzolanische Wirkung zur Festigkeitsentwicklung beitragen. Gleichermaßen zur Verwertung als recycelte Gesteinskörnung können die gemahlene Stoffe zusätzlich karbonatisiert werden. Aufgrund der hohen Mahlfineinheit kann die Karbonatisierung innerhalb weniger Minuten erfolgen. Neben der Einbindung von CO₂ und der Reduktion der Porosität sowie Wasseraufnahme entstehen durch die Karbonatisierung Calciumsilikat(aluminat)hydrate, welche zusätzliche puzzolanische Eigenschaften ausweisen.

Für die Zugabe als vorwiegend inertem Betonzusatzstoff können nach Höffgen et al. [15] ca. 20 % des Portlandzementklinkers durch feingemahlene Betonbrechsand mit nur geringfügig negativen Auswirkungen auf die Betoneigenschaften ersetzt werden. Verglichen dazu sind im Normenentwurf der DIN EN 197-6 [10] 20 % Recyclingmehl als Zementhauptbestandteil möglich. Für den Einsatz als aktiven Betonzusatzstoff bzw. aktiven Zementhauptbestandteil sind noch weitere Untersuchungen notwendig. Der Einsatz bietet aber großes Potenzial bei der Verwertung von feinen Brechsanden aus Beton und Mischabbruch. Durch die zusätzliche Karbonatisierung der Zementsteinanteile könnten in schnellen Verfahren gezielt große Mengen CO₂ gebunden werden und gleichzeitig die Einschränkungen aufgrund der heterogenen Zusammensetzungen durch eine Reaktivierung ausgeglichen werden.

3.2.3 Betonbrechsande als Rohmehl zur Belit-Zementherstellung

Betonbrechsande sind aufgrund ihrer allgemeinen Zusammensetzung für den Einsatz als Rohmehlkomponente grundsätzlich geeignet. Dies gilt für Portlandzementklinker, aber auch für die Herstellung von Belit-Zement. Aufgrund der vergleichsweise kleinen Chargengrößen und den wechselnden Eigenschaften der Betonbrechsande ist eine Herstellung mit großen Drehöfen wie bei der Portlandzementherstellung vergleichsweise schwierig. Belit-Zement kann in dem am KIT entwickelten Verfahren bei niedrigeren Prozesstemperaturen (1000 °C anstatt 1500 °C) in einem einfacheren und kleineren Stahldrehrohr ohne Keramikauskleidung hergestellt werden. Diese Anlagentechnik kann beispielsweise in Ballungsgebieten nahe des Abfallaufkommens und am Ort des Zementbedarfs errichtet werden.

Bei der Verwendung von Betonbrechsanden als Rohmehlkomponente ist die Anpassung der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung entscheidend. In den meisten Betonbrechsanden sind quarzische Gesteinskörnungen enthalten, die das Ausgangsprodukt siliziumhaltiger machen als für die Zementherstellung erforderlich. Um ein molares Verhältnis von CaO/SiO₂ (in der Zementnomenklatur C/S) von 2,0 für die Belit-Zusammensetzung einzustellen, muss dementsprechend Kalkstein zugemischt werden. Enthaltene Fremdbestandteile (prinzipiell alle Elemente außer Ca, Si und O) erzeugen nicht reaktive Produktphasen und verdünnen somit das Bindemittel. Die Anlagen im Labor- und Technikumsmaßstab sowie in der späteren Produktion müssen auf variable Produktchargen (Menge, Zusammensetzung, Körnung usw.) flexibel einstellbar sein. Der Belit-Binder soll als Substitut von Standardzementen eingesetzt werden, damit die Qualitätsanforderungen des Zements in den verschiedensten Anwendungen sicher eingehalten werden können. Einschränkungen an die Ausgangsstoffe sind unter anderem ein zu niedriger CaO-Gehalt, der eine sehr hohe Kalksteinzugabe erfordern würde und zu hohe Nebenbestandteile bzw. Schadstoffgehalte (Schwermetalle, Alkalien, Chlorid,

Sulfat), die die Reaktivität bzw. die Anwendung einschränken würden. Entsprechende Grenzwerte sind noch nicht definiert und müssen erst anhand weiterer experimenteller Untersuchungen bestimmt werden. Zur Beurteilung der Prozesskette wurde ein Beispiel-Szenario mit 50 kt/a Belit-Binder erstellt. Nach den ersten Schätzungen könnte in einem Ballungsraum bei einem Einzugsgebiet von ca. 500.000 Einwohnern ausreichend Betonabbruch anfallen, um die entsprechende Menge an Belit-Binder herstellen zu können, ohne dass die Transportdistanzen 20 km überschreiten. Die nachfolgende Abbildung 2 zeigt ein Fließschema, für das eine kontinuierliche Betriebsweise und eine entsprechende energetische Abschätzung zugrunde gelegt sind.

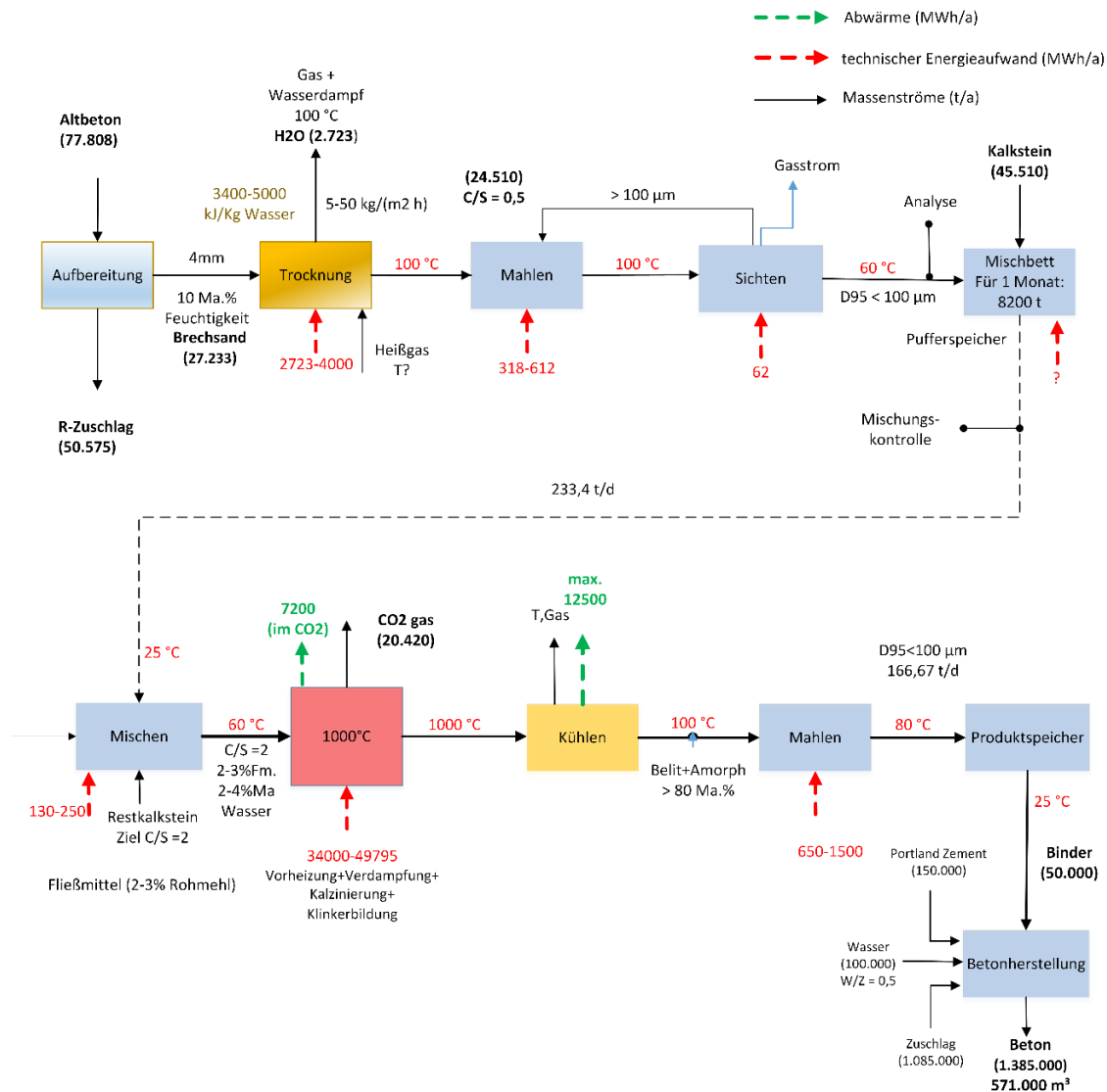


Abb. 2: Fließbild Betonbrechsand zu Belit (Beton zu Beton): Massen- und Energieströme

Zusammenfassend ergibt sich ein spezifischer Energieaufwand von 2.728 MJ/t Binder bis 4.048 MJ/t Binder (2.760 MJ/t für Portlandzement), ohne Berücksichtigung der Abwärme aus Trockner, Drehrohr und Kühler. Wenn die Abwärme z. B. für die Mahltrocknung weiter genutzt werden könnte, würde sich der Energieaufwand weiter reduzieren lassen. Anhand des Energieaufwands und der Ausgangskomponenten kann nachfolgend eine äquivalente CO₂-Emission berechnet und mit Portlandzementklinker verglichen werden. Beim rein elektrischen Betrieb der Anlage für 50 kt Belit-Binder (indirekt elektrisch beheiztes Drehrohr) ist mit den zugrunde gelegten Annahmen eine Einsparung von 3.940 t CO₂/a bis 9.460 t CO₂/a (-9,6 % bis -23 %) möglich. Bei einer zusätzlichen Karbonatisierung von zuvor abgetrennter grober Gesteinskörnung könnten die Einsparungen nochmals deutlich höher (-59 % bis -72 %) ausfallen.

3.3 Ansätze zur Ökobilanzierung verschiedener Szenarien

Die Ökobilanzierung (Life Cycle Assessment, kurz LCA) wird als international standardisierte Methode zur Produkt- und Prozessbewertung sowie Entscheidungsunterstützung verwendet. Die Betrachtung entsprechender Systemgrenzen und Randbedingungen sind daher für die holistische Betrachtung des Betonrecyclings unerlässlich. Jedes LCA setzt sich aus den Definitionen von Ziel und Untersuchungsrahmen sowie einer Sachbilanz für die Lebenszyklusprozesse, die Wirkungsabschätzung und Interpretation der Ergebnisse zusammen (vgl. ISO 14040:2021-02 [24]).

In der Literatur zu Ökobilanzierungen von R-Beton gibt es verschiedenste Ansätze und Annahmen zu den betrachteten Betoneigenschaften. Im Rahmen der erstellten Studie (HolisCon) wurden verschiedene Ansätze untersucht und verglichen. Als Ausgangspunkt sind unter anderem die betrachteten Betoneigenschaften eines Referenzbetons zu wählen. Der in Deutschland hergestellte Zement wird mit 54,3 % hauptsächlich an Transportbetonhersteller und mit 22,5 % an Hersteller für konstruktive Betonfertigteile und Betonwaren verkauft (Stand 2021). Hauptanwendungsgebiet ist der allgemeine Hochbau und ca. 65 % des Ortbetons werden für Außenbauteile mit der Expositionsklasse XC4 und Innenbauteile mit der Expositionsklasse XC1 verwendet [25]. Die Druckfestigkeitsklasse C25/30 ist mit 40,4 % (neben der C30/37 mit 21,1 %) die meist verwendete Druckfestigkeitsklasse und bietet sich daher am ehesten für einen Vergleich an. Durch die geltenden Richtlinien und aktuellen Normenentwürfe für R-Beton werden ca. 82,2 % der Gesamtproduktion (C8/10 bis C30/37) abgedeckt. Für den Vergleich von Zementen mit rezyklierten Anteilen (z. B. feingemahlene Betonbrechsande) bieten sich nach aktuellem Kenntnisstand Zemente mit vorwiegend inerten Zumahlstoffen (z.B. Kalkstein, CEM II/-L bzw. -LL) an.

In Bezug auf die betrachteten Systemgrenzen sollten LCA-Studien nicht nur auf Cradle-to-Gate beschränkt werden, da das Aussparen von Nutzungs- und Entsorgungsphasen unzulässig ist. Grund hierfür sind unterschiedliche Lebensdauern je nach Exposition, Karbonatisierungsverhalten von Beton und Verwertungsweg nach dem Abriss. Als Systemgrenzen sollten mindestens Cradle-to-Grave oder idealerweise Cradle-to-Cradle gewählt werden. Damit können die Vorteile, wie das Nutzen von Nebenprodukten aus dem Recyclingprozess als holistischer Ansatz, berücksichtigt werden. Je nach Systemgrenzdefinition ist zu beachten, dass auch die damit assoziierten Allokationen der Nebenprodukte sinnvoll und transparent festgelegt werden müssen [26].

Einen wesentlichen Stellenwert nehmen die betrachteten Transportdistanzen ein. In Abbildung 3 sind die relevanten Anlagen und Transportverbindungen dargestellt. Die in der Literatur gefundenen Ökobilanzierungen zu R-Beton im europäischen Raum zeigen eine hohe Variation der Transportdistanzen und eine ausgeprägte Transportsensitivität. Die Ergebnisse sind zudem stark abhängig vom gewählten Referenzbeton [26-31]. Neben dem Zement und der Gesteinskörnung spielen je nach Betonzusammensetzung auch die eingesetzten Betonzusatzmittel und -stoffe eine wichtige Rolle.

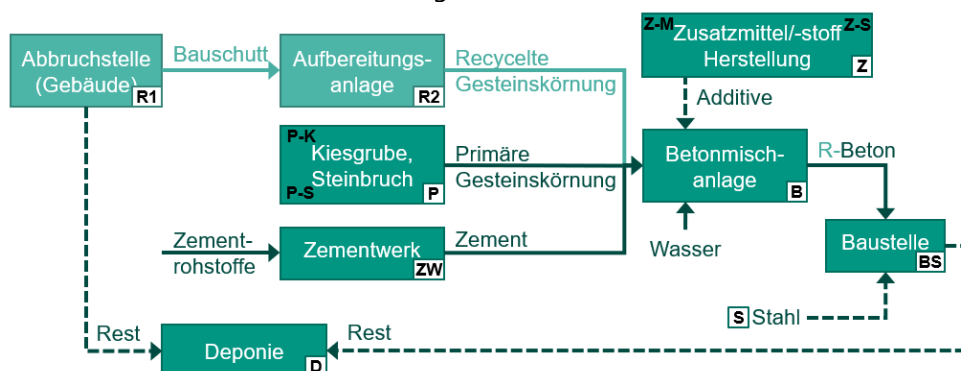


Abb. 3: Relevante Anlagen (Rechtecke) und Transporte (Pfeile) für die Herstellung von Beton (dunkelgrün) im Vergleich zu R-Beton (dunkel- und hellgrün). Gestrichelte Pfeile deuten auf Transporte hin, die nur in manchen Studien betrachtet werden. (Quelle Inhalt: [29, 30, 32-34])

Zur Berücksichtigung dieser Faktoren wurde für Baden-Württemberg eine erste Einschätzung der Transportdistanzen im Bereich Bauschuttrecycling durchgeführt. Durchschnittliche Entfernungen wurden hierbei im ersten Ansatz mittels direkter Luftlinienverbindung approximiert (siehe Abbildung 4). Der erste Ansatz zeigt, dass die Distanz zwischen Bauschuttabbauorten und Aufbereitungsanlagen am größten zu sein scheint. Dies ist jedoch derzeit noch mit einigen Unsicherheiten behaftet und im betrachteten Ansatz werden ausschließlich die identifizierten stationären Anlagen berücksichtigt. Schätzungsweise sind jedoch ca. 79 % der Bauschuttrecyclinganlagen mobil und können daher nicht direkt mit einem Standort in Verbindung gebracht werden. Die fehlenden Daten erschweren die Bilanzierungen erheblich. Beim Einsatz mobiler Anlagen ist jedoch mit einer deutlich geringeren Transportdistanz zu rechnen, die sich für die Herstellung von R-Beton günstig auswirken würde.

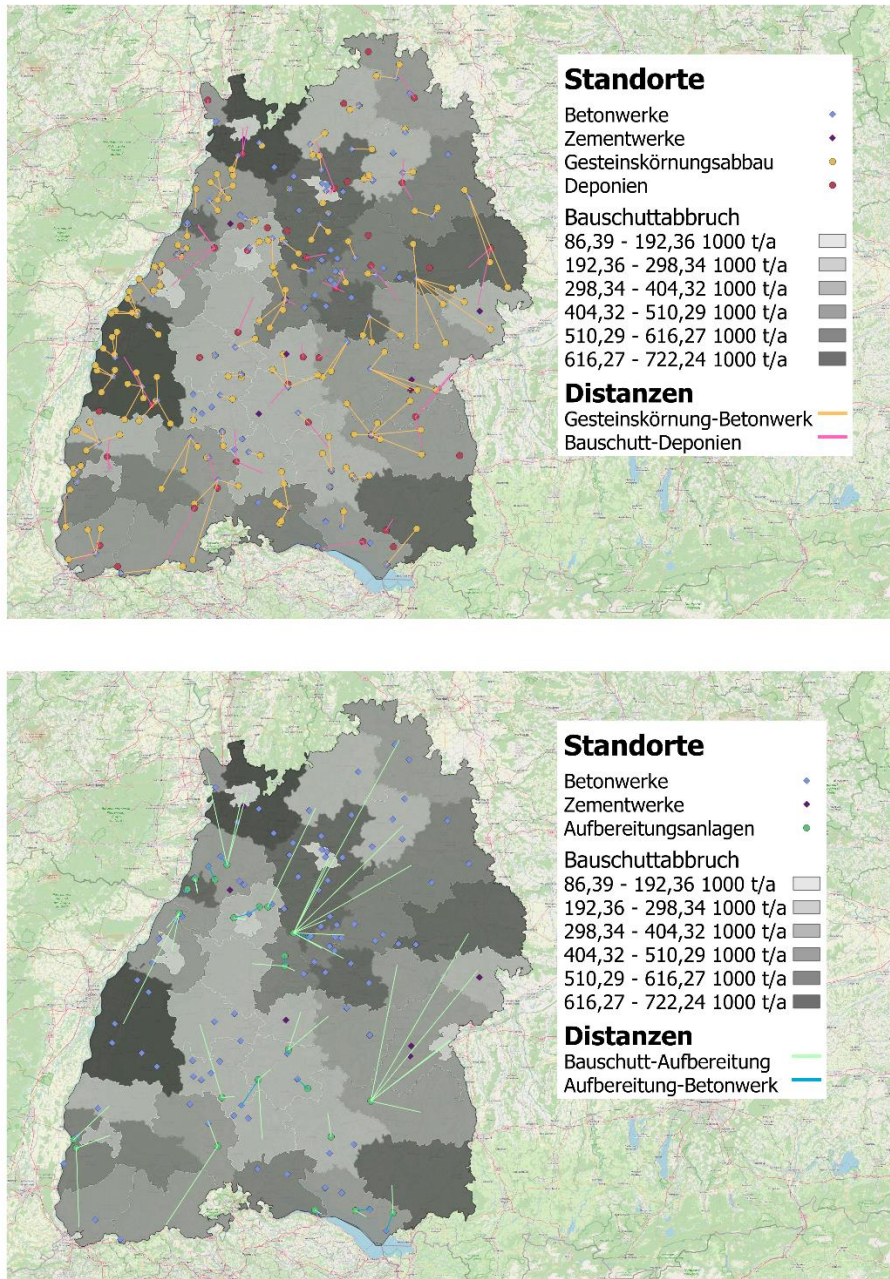


Abb. 4: Karten mit stationären Anlagenstandorten in Baden-Württemberg und direkten Distanzen zu nächstliegendem Werk (erstellt in QGIS) – oben: relevante Distanzen für primäre Werkstoffe, unten: für sekundäre Werkstoffe

Bei der Betrachtung der Stoff- und Energiebilanzen bilden das Treibhauspotenzial (Global Warming Potential, kurz GWP), die primäre Rohstoffeinsparung und der kumulierte Energiebedarf (Cumulative Energy Demand, kurz: CED) wichtige Kennzahlen, die von den verschiedenen Komponenten des Betons auf unterschiedlichste Weise beeinflusst werden. Aufgrund der veränderten Verarbeitbarkeit von Betonen mit rezyklierten Anteilen sind i. d. R. Anpassungen des Mischungsentwurfs notwendig (Fließmittelzugabe, Anpassung Wasser- bzw. Zementwert usw.). Ohne den Einsatz von zusätzlichen klinkereffizienten Zementen oder Betonzusatzstoffen und -mitteln zeigen R-Betone neben dem Hauptziel eines reduzierten Primärrohstoffbedarfs keine größeren ökologischen Vorteile gegenüber einem Referenzbeton [26, 32]. Für die Beeinflussung des GWP spielt der eingesetzte Zement eine wesentliche Rolle. Eingesetzte Zusatzmittel und -stoffe sowie der Wasser- und Energieverbrauch bilden weitere Stellschrauben für die Umweltwirkung der R-Betone, wie auch für konventionelle Betone aus Primärrohstoffen. Indikatoren und Umweltwirkungen, die bei zukünftigen LCA näher untersucht werden sollen, sind unter anderem die Abfallerzeugung, die abiotische Ressourcenerschöpfung (insb. bzgl. feiner rezyklierter Gesteinskörnungen) und das Versauerungspotenzial von Fließmitteln.

4 Literatur

- [1] DIN EN 12620:2008-07 - Gesteinskörnungen für Beton. Ausgabe Juli 2008.
- [2] DIN 4226-101:2017-08 - Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620 - Teil 101: Typen und geregelte gefährliche Substanzen. Ausgabe August 2017.
- [3] AVV: Abfallverzeichnis-Verordnung vom 10. Dezember 2001 (BGBl. I S. 3379), die zuletzt durch Artikel 1 der Verordnung vom 30. Juni 2020 (BGBl. I S. 1533) geändert worden ist
- [4a] Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V.: Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-Erden-Industrie bis 2040 in Deutschland Ausgabe 2022.
- [4b] Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e.V.: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2018 - Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2018 Ausgabe 2020.
- [5] Volk, R., Müller, R., Reinhardt, J., Schultmann, F.: An Integrated Material Flows, Stakeholders and Policies Approach to Identify and Exploit Regional Resource Potentials. In: Ecological Economics, Heft 161 (2019), S. 292-320. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2019.03.020>.
- [6] DIN 4226-100:2002-02 - Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel - Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen. Ausgabe Februar 2002.
- [7] Deutsches Institut für Bautechnik: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung / Allgemeine Bauartgenehmigung - Nummer: Z-3.51-2184 R-Beton der Borex GmbH & Co. KG für die Büscher Wand Ausgabe Juni 2021.
- [8] DIN 1045-2:2022-12 - Entwurf - Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton. Ausgabe Dezember 2022.
- [9] DAfStb-Richtlinie - Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620. Ausgabe 2010.
- [10] DIN EN 197-6:2022-06 - Entwurf - Zement - Teil 6 Zement mit rezyklierten Baustoffen. Ausgabe Juni 2022.
- [11] Rickert, J., Grube, H.: Analyse von Restwasserinhaltsstoffen. In: Thielen, G. (Hrsg.): Betontechnische Berichte - Concrete Technology Reports 1998-2000. Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf Ausgabe März 2001.

- [12] Technische Universität Kaiserslautern: Steigerung des Frischbetonrecyclings in der Transportbetonindustrie - Beitrag zur Ressourcenschonung und Abfallvermeidung bei Steigerung der Wirtschaftlichkeit. Technische Universität Kaiserslautern Ausgabe Juli 2021.
- [13] Silva, R.V.; Brito, J. de; Dhir, R.K.: Properties and composition of recycled aggregates from construction and demolition waste suitable for concrete production. In: *Construction and Building Materials* 65 (2014), S. 201-217. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117>.
- [14] Coelho, A.; Brito, J. de: Economic analysis of conventional versus selective demolition—A case study. In: *Resources, Conservation and Recycling* 55 (2011), Heft 3, S. 382-392. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2010.11.003>.
- [15] Höffgen, J.; Bauer, M., Dehn, F.: THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien - Entwicklung einer Strategie zum Umgang mit Betonbrechsanden in Baden-Württemberg Ausgabe in Vorbereitung.
- [16] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Dekarbonisierung von Zement und Beton - Minderungspfade und Handlungsstrategien. Verein Deutscher Zementwerke e.V. Ausgabe 2020.
- [17] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Deutschland - Rohstoffsituationsbericht 2020 Ausgabe 2021.
- [18] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Zementindustrie im Überblick 2022/2023, Berlin Ausgabe 2022.
- [19] ITAD - Interessengemeinschaft der Thermischen Abfallbehandlungsanlagen in Deutschland e.V.: Jahresbericht 2018 Ausgabe 2018.
- [20] Knappe, F.; Dehoust, G.; Petschow, U. et al.: Steigerung von Akzeptanz und Einsatz mineralischer Sekundärrohstoffe unter Berücksichtigung schutzgutbezogener und anwendungsbezogener Anforderungen, des potenziellen, volkswirtschaftlichen Nutzens sowie branchenbezogener, ökonomischer Anreizinstrumente, Dessau-Roßlau Ausgabe 2012.
- [21] Kurth, P.; Oexle, A.; Faulstich, M. (Hrsg.): Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft. 2. Auflage. Springer Verlag, 2022.
- [22] Statistisches Bundesamt: Abfallbilanz (Abfallaufkommen/ -verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen und Wirtschaftszweigen), 2020, https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.pdf?__blob=publicationFile [Zugriff am: 04.01.2023].
- [23] Carriço, A.; Bogas, J.A.; Guedes, M.: Thermoactivated cementitious materials - A review. In: *Construction and Building Materials* 250 (2020). <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118873>.
- [24] DIN EN ISO 14040:2021-02 -Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen. Ausgabe Februar 2021.
- [25] Nolting, U.; Dehn, F.; Mercedes Kind, V. (Hrsg.): Gutes Klima für die Zukunft - Dekarbonisierung als wichtiger Schlüssel zum nachhaltigen Bauen mit Beton, 2022.
- [26] Xing, W.; Tam, V.; Le, K. et al.: Life cycle assessment of recycled aggregate concrete on its environmental impacts: A critical review. In: *Construction and Building Materials* (2022), Heft 317. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2021.125950>.
- [27] Marinković, S.; Radonjanin, V.; Malešev, M. et al.: Comparative environmental assessment of natural and recycled aggregate concrete. In: *Waste management (New York, N.Y.)*, Vol. 30 (2010), Iss. 11, pp. 2255-2264. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2010.04.012>.
- [28] Knoeri, C.; Sanyé-Mengual, E.; Althaus, H.-J.: Comparative LCA of recycled and conventional concrete for structural applications. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 18 (2013), Heft 5, S. 909-918. <https://doi.org/10.1007/s11367-012-0544-2>.

- [29] Tošić, N.; Marinković, S.; Dašić, T. et al.: Multicriteria optimization of natural and recycled aggregate concrete for structural use. In: *Journal of Cleaner Production* 87 (2014), S. 766-776. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.070>.
- [30] Turk, J.; Cotič, Z.; Mladenović, A. et al.: Environmental evaluation of green concretes versus conventional concrete by means of LCA. In: *Waste management (New York, N.Y.)*, Vol. 45 (2015), pp. 194-205. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.06.035>.
- [31] Stürmer, S.; Kulle, C.: Untersuchung von Mauerwerksabbruch (verputztes Mauerwerk aus realen Abbruchgebäuden) und Ableitung von Kriterien für die Anwendung in Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Beton mit Typ 2 Körnung) für den ressourcenschonenden Hochbau. Hochschule Konstanz - Fakultät Bauingenieurwesen Ausgabe Oktober 2017.
- [32] Weil, M.; Jeske, U.; Schebek, L.: Closed-loop recycling of construction and demolition waste in Germany in view of stricter environmental threshold values. In: *Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, Vol. 24 (2006), Iss. 3, pp. 197-206. <https://doi.org/10.1177/0734242X06063686>.
- [33] Serres, N.; Braymand, S.; Feugeas, F.: Environmental evaluation of concrete made from recycled concrete aggregate implementing life cycle assessment. In: *Journal of Building Engineering* 5 (2015), S. 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2015.11.004>.
- [34] Colangelo, F.; Navarro, T.G.; Farina, I. et al.: Comparative LCA of concrete with recycled aggregates: a circular economy mindset in Europe. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 25 (2020), Heft 9, S. 1790-1804. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01798-6>.

5 Autoren

Sebastian Bruckschlögl M. Sc.

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe

Dr. Günter Beuchle

Institut für Technische Chemie (ITC)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1
76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Elena Vollmer M. Sc.

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Hertzstr. 16
76187 Karlsruhe

Humberto Patarca Petrillo M. Sc.

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Hertzstr. 16
76187 Karlsruhe

Dr.-Ing. Rebekka Volk

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Hertzstr. 16
76187 Karlsruhe

Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Hertzstr. 16
76187 Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB)
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe

Ressourcenschonender Umbau der Mercedes-Benz Arena

Eberhard Becker, Tosten Dölle und Werner Rothenbacher

Zusammenfassung

Der schonende Umgang mit Primärrohstoffen ist eine wichtige gesellschaftliche Aufgabe in diesen herausfordernden Zeiten. Deshalb steht das ressourcenschonende und nachhaltige Bauen immer mehr im Fokus der Betrachtung von Bauherren und Planern bei der Umsetzung von Bauprojekten. Bei der Modernisierung der Mercedes-Benz Arena in Stuttgart wurde ein Teil der Haupttribüne abgerissen. Es bot sich dabei an, den hochwertigen Betonabbruch für die Neuerstellung der Haupttribüne wiedereinzusetzen. Im Sinne der Kreislaufwirtschaft sollte somit ein Teil des Abbruchmaterials für den neu einzubauenden Beton wiederverwendet werden. Da die Anforderungen an die Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen zum Teil über die gültigen Regelwerke hinausgingen, wurde die Verwendung über eine „Zustimmung im Einzelfall (ZiE)“ abgedeckt.

1 Einleitung

Bis zur Fußball-Europameisterschaft in Deutschland im Jahr 2024 wird die Arena und Heimspielstätte des VfB Stuttgart umfassend modernisiert. Herzstück der Umbauarbeiten ist der Teil-Neuaufbau und die Erweiterung der Haupttribüne, die noch aus dem Jahr 1974 stammt. Neue Sport- und Funktionsräume, ein modernisiertes, erweitertes Business Center, eine Produktionsküche und neue Kioske sowie technische Anlagen für eine nachhaltigere Arena-Nutzung entstehen während des laufenden Arena-Betriebs. Bis zum Winter 2023 wird die finale Ausbauphase von Deutschlands sechstgrößter Sportstätte realisiert. Danach wird Stuttgart über eines der modernsten Fußballstadien in Europa verfügen, mit einer Zuschauerkapazität von über 60.000.



Abb. 1: Visualisierung der geplanten Modernisierung (Quelle: asp Architekten GmbH)

Bei den Modernisierungsarbeiten stand die Nachhaltigkeit stets im Mittelpunkt. Auch aus diesem Grund hatten die Bauherren, die Stadt Stuttgart und der VfB Stuttgart, gemeinsam mit den Planern, dem Architekturbüro asp aus Stuttgart, stets nach möglichst nachhaltigen Lösungen für den Bau und späteren Betrieb gemeinsam mit dem Generalunternehmer Ed. Züblin AG/ROM Technik GmbH & Co. KG gesucht.

Da ein Teil der Tribüne rückgebaut wurde, lag es nahe, den Betonabbruch für den Neubau zu verwenden. Im folgenden Bericht wird über die Entwicklung und den Einsatz des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung bei dem Projekt berichtet.

2 Was genau ist Recyclingbeton?

Als Recyclingbeton wird ein besonders ressourcenschonender Beton, oder auch R-Beton bezeichnet, bei dem rezyklierte Gesteinskörnung verwendet wird, die aus Rückbaumaßnahmen stammt. Diese rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt teilweise die natürliche grobe Gesteinskörnung im Beton. Somit werden Lagerstätten natürlicher Gesteinskörnungen geschont und ein Beitrag zur Kreislaufwirtschaft geleistet.

3 Regelwerke zum Einsatz von RC-Beton im Betonbau

Die Grundlagen zur Anwendung sind in der Richtlinie des DAfStb "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620" [1] geregelt. Dabei werden in der Richtlinie zwei für den Betonbau maßgebende Gesteinskörnungskategorien unterschieden. Typ 1 bezeichnet den „Betonsplitt“ der zu über 90 % aus Betonprodukten (Beton, Pflaster, Mauersteine aus Beton) besteht. Typ 2 wird als „Bauwerkssplitt“ bezeichnet mit einem Anteil von mind. 70 % aus Betonprodukten (Tabelle 1).

Tab. 1: Stoffliche Zusammensetzung der Typen der rezyklierten Gesteinskörnungen [1]

| Spalte | 1 | 2 | 3 |
|---|----------------------------|-------------------------------|-------------------|
| Zeile | Bestandteile ^{a)} | Kategorie der Gesteinskörnung | |
| | | Typ 1 | Typ 2 |
| 1 | Rc + Ru | RCu ₉₀ | RCu ₇₀ |
| 2 | Rb | Rb ₁₀₋ | Rb ₃₀₋ |
| 3 | Ra | Ra ₁₋ | Ra ₁₋ |
| 4 | X + Rg | XRg ₁₋ | XRg ₂₋ |
| 5 | FL | FL ₂₋ | FL ₂₋ |
| ^{a)} Dabei bedeuten: Rc: Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton Ru: Ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörnung Rb: Mauerziegel (d. h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandsteine, nicht schwimmender Porenbeton Ra: Bitmenhaltige Materialien Rg: Glas X: Sonstige Materialien: Bindige Materialien (d. h. Ton und Boden), verschiedene sonstige Materialien: Metalle (Eisen- und Nichteisenmetalle), nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi, Gips FL: Schwimmendes Material im Volumen | | | |

Der Rest kann beispielweise aus Mauerziegeln, Kalksandsteinen oder Porenbeton bestehen. Die rezyklierte Gesteinskörnung hat eine Korngröße von > 2 mm. Brechsand ≤ 2 mm aus dem Recyclingprozess darf derzeit noch nicht verwendet werden. In dem neuen Entwurf zur E-DIN 1045-2 [2] ist die Verwendung von Brechsand ≤ 2 mm beim Typ 1 zukünftig vorgesehen. Ein weiterer Schritt, die Nachhaltigkeit von R-Beton zu erhöhen. Für den Einsatz im Beton nach DIN EN 206-1, DIN 1045-2 [1] sind in Abhängigkeit des Kategorie-Typs 1 oder 2 unterschiedliche maximale Zugabemengen der rezyklierten Gesteinskörnung im Beton möglich. Je nach Einsatzmenge und Kategorie sind dann Abstufungen in den Expositions- und Festigkeitsklassen zu beachten.

Tab. 2: Zulässige Anteile in Vol.-% rezyklierte Gesteinskörnungen > 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung [1]

| Spalte | 1 | 2 | 3 | 4 |
|--------|------------------------------|--|-------------------------------|-------|
| Zeile | Anwendungsbereich | | Kategorie der Gesteinskörnung | |
| | Alkalirichtlinie | DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 | Typ 1 | Typ 2 |
| 1 | WO (trocken) | Karbonatisierung XC1 | ≤ 45 | ≤ 35 |
| 2 | WF ^{a)} (feucht) | Kein Korrosionsrisiko X0 Karbonatisierung XC1 bis XC4 | | |
| 3 | | Frostangriff ohne Taumittleinwirkung XF1 ^{a)} und XF3 ^{a)} und in Beton mit hohem Wassereindringwiderstand | ≤ 35 | ≤ 25 |
| 4 | | Chemischer Angriff (XA1) | ≤ 25 | ≤ 25 |

^{a)} zusätzliche Anforderungen s. Abschnitt 1, (3) und (4)

Beispielsweise können bei den Expositionsklassen XC1-XC4 bei der Gesteinskörnungskategorie Typ 1 bis zu 45 Vol.-% der gesamten Gesteinskörnung durch rezyklierte Gesteinskörnung ersetzt werden. Bei Einsatzgebieten in der Expositionsklasse XF1 sind dann noch 35 Vol.-% Einsatzmenge möglich. Im Bereich der Druckfestigkeit sind die Betone bis zur Festigkeitsklasse C30/37 herstellbar.

Für die Betone laut Richtlinie ist eine erweiterte Erstprüfung erforderlich, wo zusätzlich das Konsistenzverhalten des Betons und das Saugverhalten der RC-Gesteinskörnung zu bestimmen sind. Außerdem muss der Lieferant der RC-Gesteinskörnung die Umweltverträglichkeit des Materials über eine Herstellererklärung nachweisen.

4 Besonderheiten für den Betonhersteller

Im Regelfall wird die rezyklierte Gesteinskörnung als eine Kornfraktion mit einer größeren Spannweite eingesetzt, zum Beispiel 2–16 mm. Für die Einlagerung der rezyklierten Gesteinskörnung muss eine zusätzliche Lagermöglichkeit im Transportbetonwerk vorhanden sein, da diese als separate Kornfraktion zu behandeln ist.



Abb. 2: Separate Box für rezyklierte Gesteinskörnung im Transportbetonwerk (Bild: Schwenk)

Der Betonhersteller muss laut Richtlinie den eingeschränkten Anwendungs- und Einsatzbereich des Betons berücksichtigen. Außerdem muss er zusätzliche Prüfungen bezüglich des Feuchtegehaltes der rezyklierten Gesteinskörnung und des Konsistenzverhaltens des Betons durchführen, da rezyklierte Gesteinskörnungen ein anderes Saugverhalten als natürliche Gesteinskörnungen haben können. Der Recyclingbeton muss auf dem Lieferschein und Sortenverzeichnis entsprechend gekennzeichnet werden.

Zu beachten ist weiterhin, dass der Elastizitätsmodul des Recyclingbetons niedriger sein kann als bei natürlicher Gesteinskörnung. Deshalb ist es empfehlenswert, den E-Modul seines Normal- und Recyclingbetons zu kennen. Wichtig ist dies, wenn weitgespannte Bauteile (Decken oder Träger) mit einem Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen hergestellt werden sollen. Dies muss aber kein Ausschlusskriterium sein. Vielmehr dient es dem Tragwerksplaner dazu, die mögliche Durchbiegung bewerten zu können.

Bei der Herstellung von R-Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen ist es empfehlenswert, den maximal zugelassenen Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung nach Tabelle 2 nicht auszuschöpfen. So wird sichergestellt, dass der Einfluss auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften gering bleibt.

5 Verarbeitung von RC-Beton

Bei der Verarbeitung von Recyclingbeton auf der Baustelle, wird das Bauunternehmen den Unterschied kaum wahrnehmen, wenn die maximal möglichen Zugabemengen nicht ausgeschöpft werden. Die rezyklierte Gesteinskörnung ist wie die natürliche Gesteinskörnung im Zementleim eingebettet. Die Verarbeitung, Verdichtung und Nachbehandlung erfolgt wie bei Normalbeton. Die Förderung des Betons mittels Betonpumpen ist unter Einhaltung der Rahmenbedingungen (z. B. Mörtelgehalt) wie bei Normalbeton möglich.



Abb. 3: Vergleich gesägter Probekörper von RC-Beton und geschalte Fläche (Bild: Schwenk)

Optisch sieht man den Bauteilen die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen nicht an, wenn die Oberflächen nicht geschliffen oder gesägt werden (Abbildung 3). Bei Sichtbetonanforderungen muss beachtet werden, dass im „DBV/VDZ-Merkblatt Sichtbeton“ [3] der Recyclingbeton nicht behandelt wird. Trotzdem ist es möglich Sichtbeton mit Recyclingbeton herzustellen. Dies sollte dann zwischen dem Auftraggeber und dem Bauunternehmen vereinbart werden. Wie im Merkblatt beschrieben, sollte dann eine entsprechende Erprobungsfläche zur Beurteilung hergestellt werden.

6 Ausgangslage Projekt und Beton

Nachdem für Auftraggeber, Planer und Auftragnehmer klar war, dass für die Betonarbeiten der Betonabbruch des abzureißenden Bauwerks und der Tribüne verwendet werden sollte, wurden die Betonmassen zusammengestellt. Dementsprechend sollten möglichst viele Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen hergestellt werden. Infrage kamen folgende Betonfestigkeitsklassen und Expositionsklassen für RC-Beton:

- Festigkeitsklasse bis C30/37, XC4, XF1, XA1 (nach DAfStb-Richtlinie)
- Festigkeitsklasse C35/45, XC4, XA2, XF1 (ZiE erforderlich)

Die Betone bis zur Festigkeitsklasse C30/37 werden von der DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ [1] vollständig abgedeckt. Diese Betone können nach Durchführung der erweiterten Erstprüfung mit den Zusatzanforderungen, wie oben beschrieben, verwendet werden. Der Betonlieferant hatte diese Betone bereits in seinem Lieferprogramm und konnte sie ohne zusätzliche Vorprüfungen liefern.

Der RC-Beton der Festigkeitsklasse C35/45 und Expositionsklasse XA2 (chemisch mäßig angreifend) wird durch die Richtlinie nicht abgedeckt. Da es sich jedoch um eine große Menge handelte und genügend geeignetes Abbruchmaterial zur Verfügung stand, entschloss man sich dazu, für diesen Beton eine „Zustimmung im Einzelfall (ZiE)“ beim zuständigen Landesamt für Bautechnik in Tübingen zu beantragen. Zur Erstellung einer „gutachterlichen Stellungnahme“ wurde Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit von der TU Kaiserslautern beauftragt. Prof. Breit hatte viel Erfahrung bei der Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen, da er einige Forschungsvorhaben zum Thema „R-Beton“ [4] bearbeitet hatte und auch im Normungsprozess bei den Regelungen zur E-DIN 1045-2 zu der erweiterten Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen eingebunden war. Die durchzuführenden Prüfungen mit der RC-Gesteinskörnung wurden mit dem Gutachter und der Zulassungsstelle abgestimmt, anschließend durchgeführt und entsprechend dokumentiert. Zusätzlich zu den üblichen Frisch- und Festbetonprüfungen wurde der E-Modul des RC-Betons bestimmt.

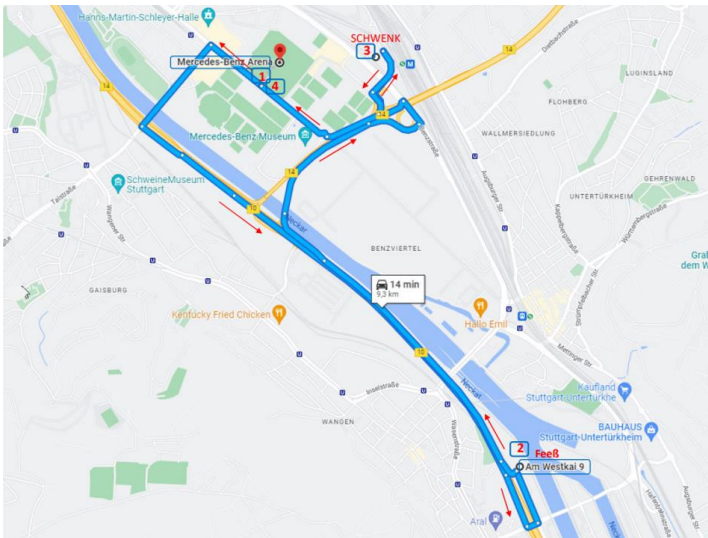
7 Aufbereitung des Betonabbruchs vor Ort

Der Betonabbruch wurde direkt auf der Baustelle der Mercedes-Benz Arena aufgenommen und zur Aufbereitungsstelle an den Hafen per LKW zur Firma Heinrich Feeß GmbH & Co. KG transportiert. Dort wurde das Material abgekippt und der LKW nahm auf der Rückfahrt bereits aufbereitete RC-Gesteinskörnung zum Transportbetonwerk der Firma SCHWENK mit. Dieses befand sich in direkter Nähe zur Baustelle Mercedes-Benz Arena. Somit entstand keine Leerfahrt. Der LKW legte für Ab- und Antransport eine Strecke von insgesamt 10 km zurück.



Abb. 4: Teilabbruch Tribüne mit Unterfangung (Bild: Arnim Kilgus)

Da das Abbruchmaterial aus sehr reinem Betonabbruch bestand, konnte die rezyklierte Gesteinskörnung dem Typ 1 nach DAfStb-Richtlinie [1] zugeordnet werden. Die aufbereitete Gesteinskörnung durchlief dabei das übliche Überwachungsszenario für rezyklierte Gesteinskörnungen.



1. Abbruchmaterial wird in der Mercedes-Benz-Arena aufgenommen
- 2.a. Fahrt zur Firma Feess am Westkai 9, 70327 Stuttgart
 - b. Material wird abgeladen, aufbereitet. LKW nimmt eine Ladung RC-Splitt 2-16 auf
- 3.a. Abladen im TB-Werk der SCHWENK Beton Stuttgart in der Alte-Untertürkheimer Str. 70, 70372 Stuttgart
 - b. Material wird in einer separaten Box gelagert
 - c. Beton wird je nach Abruf produziert
4. Beton wird im Fahrmischer in die Mercedes-Benz-Arena geliefert und eingebaut

Die gesamte Fahrstrecke vom Abbruch über die Aufbereitung und den gelieferten Beton in die Mercedes-Benz-Arena beträgt ca. 10 km

Abb. 5: Ablaufschema Transport Abbruch, Aufbereitung und Verarbeitung (Quelle: Schwenk)

8 Betonzusammensetzung und Erstprüfung

Mit der Lieferung des Betons für das gesamte Projekt wurde die SCHWENK Beton Stuttgart GmbH & Co. KG beauftragt. Dort wurden auch sämtliche Erstprüfungen und zusätzliche Prüfungen als Grundlage für die gutachterliche Stellungnahme durch die Betontechnologen des SCHWENK Technologiezentrums erarbeitet.

Da das SCHWENK Transportbetonwerk schon einige Jahre Erfahrung mit der Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen für Betone bis zur Festigkeitsklasse C30/37 hatte, konnte schnell eine Rezeptur für die Anforderung C35/45, XA2 in Abstimmung mit der Firma Ed. Züblin AG entwickelt werden. Tabelle 3 zeigt die entsprechende Zusammensetzung für den Beton.

Tab. 3: Betonzusammensetzung für den „ZiE-RC-Beton“

| Parameter | Dimension | |
|--------------------------------------|-------------------|-----------------------|
| Rezepturbezeichnung | | RC505RS-T1 |
| Konsistenzklasse | | F3 |
| Festigkeitsklasse | | C 35/45 |
| Expositionsclassen | | XC4, XA2, XF1 WF |
| 0/2 mm | kg/m ³ | 611 (35 %) |
| 2/8 mm Splitt | kg/m ³ | 323 (18 %) |
| 8/16 mm Splitt | kg/m ³ | 432 (24 %) |
| 2/16 RC-Betonsplitt Typ 1 (Fa. Fees) | kg/m ³ | 374 (23 %) |
| Zementart | | CEM III/A 52,5 N - SR |
| Hersteller | | SCHWENK Zement |
| Herstellwerk | | Karlstadt |
| Zementmenge | kg/m ³ | 330 |
| Zusatzstoff | | Flugasche Powerment |
| Dosiermenge | kg/m ³ | 75 |
| Zusatzmittel | | MC EVO 522 |
| Dosiermenge | % v. Z. | 0,85 |
| Wassergehalt gesamt | kg/m ³ | 170 |
| W/Z - Wert | | 0,47 |

Die Zusammensetzung wurde so gewählt, dass der Anteil der rezyklierten Gesteinskörnung ≤ 25 M.-% der gesamten Gesteinskörnung entsprach. Damit wurde die Anforderung der DAfStb-Richtlinie [1] für die Expositionsklasse XA1 erfüllt. Als Zement wurde der CEM III/A 52,5 N-SR aus dem SCHWENK Zementwerk Karlstadt verwendet. Dieser Zement wurde auch im Bahnprojekt Stuttgart 21 bei gleichzeitiger Verwendung von Flugasche für die Expositionsklasse XA3 ohne zusätzlichen Schutz erfolgreich eingesetzt. Damals hatte ein Gutachten der TU München die guten Dauerhaftigkeitseigenschaften der Betone mit dem CEM III/A 52,5 N-SR in Verbindung mit Flugasche auch in dem schwierigen Stuttgarter Baugrundverhältnissen mit dem kombinierten „Sulfatangriff und kalklösender Kohlensäure“ bestätigt [5]. Für CEM III/A-Zement lag anhand einer europäischen technischen Bewertung (ETA) die Anwendung für hohen Sulfatwiderstand (SR) vor [6]. Die rezyklierte Gesteinskörnung ist auch im Hinblick auf die Gefahr einer möglichen schädigenden Alkali-kieselsäurereaktion hin zu beurteilen. Wenn die Herkunft der Gesteinskörnung im Betonabbruch nicht bekannt ist, muss diese laut Alkalirichtlinie in die Kategorie E III-S eingeordnet werden. Da unsere Betonrezeptur einen Zementgehalt unter 330 kg/m^3 enthielt, waren in diesem Fall keinerlei Maßnahmen erforderlich.

Des Weiteren wurden durch den CEM III/A-Zement der ökologische Fußabdruck des Betons und damit die CO_2 -Emissionen gegenüber einem CEM I-Zement um etwa 40 % und gegenüber einem CEM II/A-Zement immerhin noch um etwa 30 % reduziert. Ein wichtiger Aspekt, der allen Beteiligten in Bezug auf die Nachhaltigkeit ebenfalls sehr wichtig war. Mit der verwendeten Rezeptur konnten folgende Frisch- und Festbetonparameter erreicht werden:

Tab. 4: Frisch- und Festbetonparameter des RC-Betons C35/45

| Parameter | Dimension | |
|--|-----------------|--------|
| Lufttemperatur | °C | 20,0 |
| Betontemperatur | °C | 24,0 |
| Frischbetonrohddichte | kg/m^3 | 2350 |
| Luftporengehalt | % | 1,4 |
| Konsistenz nach ... | | |
| 10 Minuten | mm | 500 |
| 45 Minuten | mm | 470 |
| 90 Minuten | mm | 430 |
| Druckfestigkeit der 150-er Würfel nach ... | | |
| 2 Tagen | N/mm^2 | 25,0 |
| 7 Tagen | N/mm^2 | 46,5 |
| 14 Tagen | N/mm^2 | 55,7 |
| 28 Tagen | N/mm^2 | 60,5 |
| E-Modul nach DIN EN 12390-13 nach ... | | |
| 14 Tagen | N/mm^2 | 33.800 |
| 28 Tagen | N/mm^2 | 33.900 |

An den Frischbetonparametern ist zu erkennen, dass nach 90 Minuten ein moderates Rücksteifen von 70 mm zu erwarten war. Diese Werte sind mit denen von Betonen mit natürlicher Gesteinskörnung vergleichbar. Die Druckfestigkeit nach 28 Tagen lag bei der Prüfung bei $60,5 \text{ N/mm}^2$ und wurde für einen C35/45 mit ausreichend Vorhaltemaß erreicht. Der r-Wert für die Ermittlung der notwendigen Nachbehandlungsdauer ergibt einen Wert von 0,41 und wird somit als „mittlere Festigkeitsentwicklung“ definiert. Der Elastizitätsmodul nach 28 Tagen lag bei der Erstprüfung bei 33.900 N/mm^2 . Der Rechenwert für den E-Modul nach Eurocode beträgt für den C35/45 34.000 N/mm^2 . Daraus ergab sich, dass der RC-Beton bei der Bemessung wie Normalbeton behandelt werden konnte.

Dies bestätigte auch Univ.-Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Breit von der TU Kaiserslautern in seiner ausführlichen gutachterlichen Stellungnahme. Das Gutachten wurde an die Landesstelle für Bautechnik zur Beurteilung und Ausstellung der „Zustimmung im Einzelfall (ZiE)“ weitergeleitet, welche nach Begutachtung der Unterlagen erteilt wurde.

9 Einbau und Verarbeitung auf der Baustelle

Wie bereits vorher beschrieben, bedarf es bei der Förderung, der Verarbeitung und dem Einbau des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung keinerlei besonderer Vorkehrungen. Durch den Anteil der RC-Gesteinskörnung von < 25 M.-% sind die Auswirkungen auf die Frischbetoneigenschaften sehr gering. Der Beton kann normal verarbeitet und verdichtet werden. Durch den Zementgehalt in Verbindung mit der Flugasche und dem moderaten Gesamtwassergehalt stellt der Beton eine robuste Mischung dar.

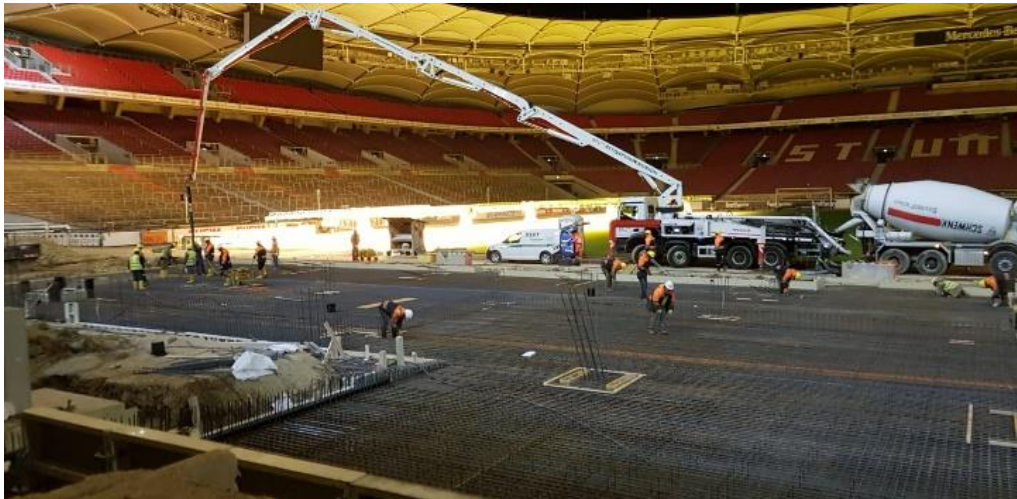


Abb. 6: Betoneinbau mit Pumpe in Innenbereich der Mercedes-Benz Arena (Bild: Ed. Züblin AG)

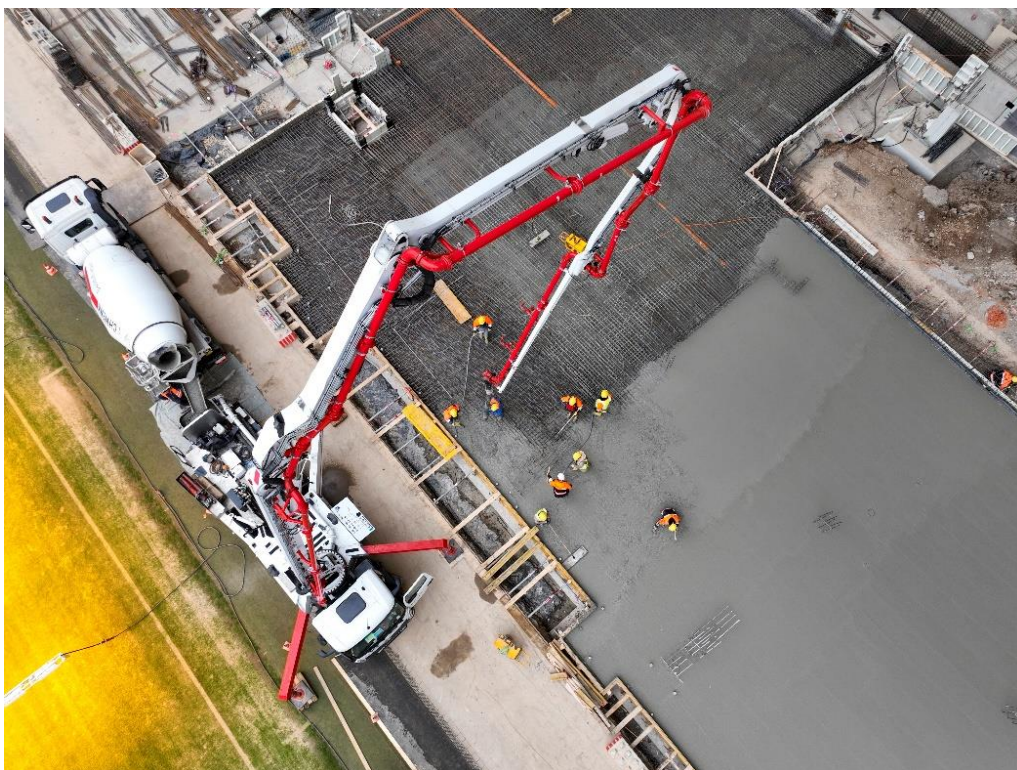


Abb. 7: Luftaufnahme Betoneinbau im Innenbereich der Mercedes-Benz Arena (Bild: Arnim Kilgus)

Der Beton unterlag nach DIN 1045-3 [7] der Überwachungskategorie ÜK2 und wurde auf der Baustelle durch eine anerkannte Überwachungsstelle des Bauunternehmens entsprechend beprobt und überwacht. Trotz der Verwendung eines Hochofenzementes CEM III/A war eine gute Festigkeitsentwicklung des Betons vorhanden

und die Bauteile mussten nicht länger in der Schalung belassen werden, wie man das bei Hochofenzementen normalerweise erwarten würde. Die Bauleiter und Poliere der Firma Ed. Züblin AG bestätigten, dass es keinerlei Unterschiede zur Verarbeitung gegenüber von Normalbeton gab. Vor allem die gute Festigkeitsentwicklung des Hochofenzementes überraschte alle positiv. Bei der komplexen Bauaufgabe war es sehr wichtig, dass der Beton ein zügiges Weiterarbeiten gewährleistete.



Abb. 8: Neuaufbau Haupttribüne mit Wand aus RC-Beton (Bild: Ed. Züblin AG)

10 Einfluss auf den ökologischen Fußabdruck durch Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung

Durch die Verwendung von Recyclingbeton wird der ökologische Fußabdruck im Hinblick auf die CO₂-Emissionen des Betons kaum verändert. Der Einfluss des Zementes schlägt sich in der CO₂-Bilanz je Kubikmeter Beton mit 80 % - 90 % nieder. Auf die Gesteinskörnungen entfallen lediglich etwa 5 %. Somit wird klar, dass die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung nur geringen Einfluss auf den CO₂-Fußabdruck des Betons hat. Es kann sich sogar gegenläufig entwickeln, wenn die RC-Gesteinskörnung von weither angefahren werden muss und im Vergleich Kies aus direkter Umgebung ersetzt wird. Das Positionspapier des „Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e.V.“ mit dem Titel „Energetischer Aufwand der Betonherstellung mit Primär- und Sekundärmaterial“ [8] beschreibt diesen Einfluss ganz gut.

Trotzdem werden bei der Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen natürliche Ressourcen geschont. Dies ist ein sehr wichtiger Aspekt. Um den CO₂-Fußabdruck im Recyclingbeton nachhaltig zu senken, können auch klinkerreduzierte CEM II- und CEM III-Zemente verwendet werden. Dies war in dem vorliegenden Fall ohnehin geplant und wurde auch umgesetzt. Da im beschriebenen Beispiel die Transportentfernung der rezyklierten Gesteinskörnung um einiges kürzer war als von den Primärgesteinskörnungen, kann man hier von einer weiteren Reduzierung der CO₂-Emissionen je Kubikmeter Beton ausgehen (Abbildung 5).

11 Fazit

Nachhaltiges und ressourcenschonendes Bauen ist eine der wichtigsten Aufgaben der gesamten Baubranche. Durch die Verwendung von Betonabbruch kann ein wichtiger Beitrag zur Kreislaufwirtschaft geleistet werden. Im vorstehenden Beispiel, bei der Modernisierung der Mercedes-Benz Arena in Stuttgart, wurde der Betonabbruch der alten Haupttribüne aufbereitet und für den Neubau verwendet. Da die Aufbereitungsanlage für die rezyklierte Gesteinskörnung nur wenige Kilometer von der Baustelle entfernt war, konnten lange Transportwege vermieden werden. Bereits auf dem Rückweg konnte der LKW aufbereitete Gesteinskörnung zum Transportbetonwerk mitnehmen. Ein gutes Beispiel für funktionierende und gelungene Kreislaufwirtschaft.

Die Baustelle hatte keinerlei Probleme mit der Förderung und Verarbeitung des Betons mit der rezyklierten Gesteinskörnung. Trotzdem ist es bei so einem komplexen Projekt notwendig, dass alle Beteiligten eng und partnerschaftlich zusammenarbeiten.

In der Entwicklung der künftigen Betonnormen E DIN 1045-2 sollen die Verwendungsmöglichkeiten von rezyklierten Gesteinskörnungen und erstmalig auch von Brechsanden erweitert werden. Diese Möglichkeit wird künftig sicherlich mehr Aufbereitungsunternehmen motivieren, Betonabbruchmaterial für die Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen für die Betonherstellung aufzubereiten. Die Nachfrage nach ressourcenschonendem Beton nimmt stetig zu.

Alle Beteiligten entlang der gesamten Wertschöpfungskette sind angehalten, Lösungen für das nachhaltige und ressourcenschonende Bauen anzubieten. Die kombinierte Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen in Verbindung mit klinkerreduzierten Zementen bietet hier gute Ansätze und Möglichkeiten. Somit bleibt zu hoffen, dass viele Transportbetonhersteller den Bauherren, Planern und Bauunternehmen bald flächendeckend Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen zur Verfügung stellen können. Das Bauen mit R-Beton sollte in Zukunft nicht mehr die Ausnahme darstellen, sondern Standard sein. Das wäre ein wichtiger Beitrag zur Nachhaltigkeit von Beton und zur Schonung von Ressourcen.

12 Literatur

- [1] DAfStb-Richtlinie: „Beton nach DIN EN 206-1, DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“, Ausgabe September 2010
- [2] E DIN 1045-2: 2022-07 (Entwurf) Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton
- [3] Deutscher Beton und Bautechnik-Verein E.V./Verein Deutscher Zementwerke VDZ e.V.: Merkblatt Sichtbeton. Fassung Juni 2015
- [4] Scheidt, J; Breit, W.: BMBF-Verbundforschungsvorhaben „R-Beton - Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation“, Teilvorhaben 3: Aufweitung der vorhandenen Anwendungsbeschränkungen für Beton mit rezyklierter feiner und grober Gesteinskörnung. Schriftenreihe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 639. 2022
- [5] Gutachterliche Stellungnahme: Untersuchung der Beständigkeit von Bindemitteln gegenüber Sulfatangriff und kombinierten chemischen Angriff für Tunnelbetone der Teilprojekte Fildertunnel und Tunnel Zuführung Ober-/Untertürkheim im Rahmen von Stuttgart 21. Nr. 10-10-0054. TU München. Centrum für Baustoffe und Materialprüfung MPA BAU, Abteilung Baustoffe, München. 2010.
- [6] DIBt: Europäische Technische Bewertung. ETA-20/0242: Hochofenzement CEM III/A 52,5 N-SR „Karlstadt“. Hochofenzement CEM III/A mit Bewertung des Sulfatwiderstandes.
- [7] DIN 1045-3: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 3: Bauausführung - Anwendungsregeln zu DIN EN 13670. Ausgabe 03.2012.
- [8] BTB (Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V.): Positionspapier: Energetischer Aufwand der Betonherstellung mit Primär- und Sekundärmaterial. 2019.

13 Autoren

Dipl.-Ing. Architekt Eberhard Becker

asp Architekten GmbH
Talstraße 41
70188 Stuttgart

Dipl.-Ing. Torsten Dölle

Ed. Züblin AG / TPA GmbH
Albstadtweg 3
70567 Stuttgart

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Werner Rothenbacher

SCHWENK Zement GmbH & Co. KG
Hindenburgring 15
89077 Ulm

Ressourcenschonender Umbau und Urban Mining Konzept – Rathaus Korbach

Anja Rosen und Marc Matzken

Zusammenfassung

Anhand des Modellprojekts wurden die Möglichkeiten eines selektiven Rückbaus mit anschließendem orts-nahen Recycling der mineralischen Abbruchmaterialien und Wiedereinsatz für den Neubau untersucht und aufgezeigt. Das Urban Mining Konzept nutzt den abgebrochenen Rathausanbau als „urbane Mine“ und führt die daraus zurückgewonnenen mineralischen Baustoffe dem Neubau zu. Die Neubauten wurden so gestaltet, dass sie nachfolgenden Generationen wiederum als urbane Mine dienen. Alle Materialien wurden so gefügt, dass sie bei einem späteren Rückbau oder einer Sanierung sortenrein trennbar sind. Für das Modellprojekt wurde erstmals der Urban Mining Index angewandt - ein Planungsinstrument für zirkuläres Bauen, mit dem die Kreislaufkonsistenz von Baukonstruktionen in der Planung bewertet und optimiert werden kann.

1 Allgemeines

Abbildung 1 ist zu entnehmen, wie anhand des Modellprojekts die Möglichkeiten eines selektiven Rückbaus mit anschließendem orts-nahem Recycling aufgezeigt werden sollten. Abbildung 2 zeigt das Rathausensemble mit Hauptgebäude, historischem Rathaus und dem Langhaus im Bildhintergrund. Weiterführende Beschreibungen des Projekts sind in der angegebenen Literatur [1 -3] zu finden.

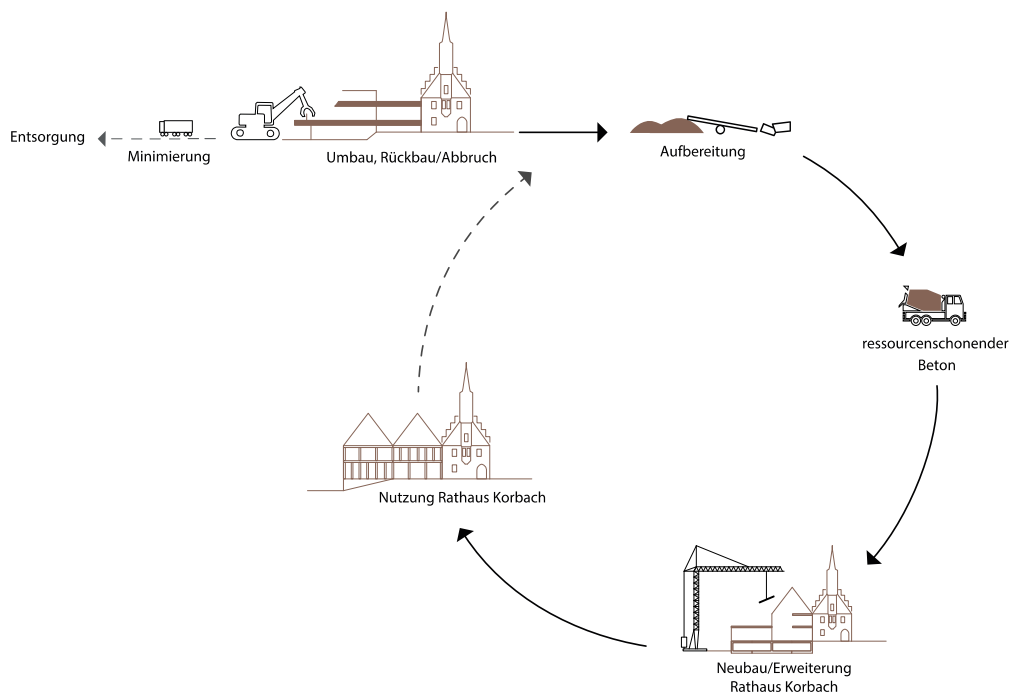


Abb. 1: Anhand des Modellprojekts Rathaus Korbach sollten die Möglichkeiten eines selektiven Rückbaus mit anschließendem orts-nahem Recycling aufgezeigt werden, Grafik Anja Rosen / ARGE agn heimspielarchitekten



Abb. 2: Rathausensemble mit Hauptgebäude, historischem Rathaus und dem Langhaus im Bildhintergrund, Foto Caspar Sessle

2 Literatur

- [1] Rosen, A. (2021) Ressourcen schonen - aber wie? Rathaus Korbach als Modellprojekt. Beton Bauteile 2022, Entwerfen, Planen, Ausführen, 70. Jahrgang, 2021 Bauverlag BV GmbH, ISBN 978-3-7625-3694-9
- [2] Grebe, R., Matzken, M. (2021) Nachhaltiger Sichtbeton. Recycling-Beton-Fassade, neues Rathaus Korbach. Beton Bauteile 2022, Entwerfen, Planen, Ausführen, 70. Jahrgang, 2021 Bauverlag BV GmbH, ISBN 978-3-7625-3694-9
- [3] Rosen, A., Matzken, M. (2022) Urban Mining für den Rathaus-Neubau in Korbach. betonprisma, Beiträge zur Architektur, 58. Jahrgang, Ausgabe 114/2022

3 Autoren

Prof. Dr.-Ing. Anja Rosen

Architektin | DGNB-Auditorin
Sachverständige für Nachhaltiges Bauen (SHB)
C5 GmbH
Bült 13
48143 Münster

Marc Matzken

Architekt
heimspiel architekten Matzken Kampherbeek
Kanalstraße 2
48147 Münster

Ressourceneffizienz und Digitalisierung – Praxisbeispiele zum Re- und Upcycling von Beton

Christian Landes

Zusammenfassung

Die Zukunft des Wirtschaftens liegt in der Circular Economy (Kreislaufwirtschaft) und einer digitalen Vernetzung. Christian Landes, der Gründer und Geschäftsführer der N1 Trading GmbH, erklärt in seinem Beitrag, warum Materialströme von und zu Baustellen nachhaltig organisiert werden müssen, und warum die Software Site Depot das Betriebssystem bei der Beschaffung, Entsorgung und optimierten Wiederverwendung von Primär- und Sekundärrohstoffen sein kann.

1 Wieso die Kreislaufwirtschaft zur Normalität werden muss

Produzieren, verwenden, wegwerfen: Die bisherige Logik unseres linearen Wirtschaftens ist längst an ihre Grenze gekommen. Viele Ressourcen, die wir verwenden, sind besorgniserregend knapp, gerade in einem rohstoffarmen Land wie Deutschland. Gleichzeitig gehen die Rohstoffgewinnung und -entsorgung mit einem riesigen Energie- und CO₂-Aufwand einher, die zusätzlich die Umwelt und das Klima belasten.

Abfall ist also kein nachhaltiger Ansatz. Wirtschaft und Gesellschaft müssen weg vom Gedanken der Einmal-Nutzung. Eine Schlüsselrolle kommt dabei einer Kreislaufwirtschaft und einer digitalen Vernetzung zu, gerade in der Bauwirtschaft. Ziel ist es, Ressourcen zu nutzen, sie aber nicht zu verbrauchen. Um diese globale Herausforderung zu bewältigen, sind kreative Ansätze gefragt.

Ein großes Potenzial an Materialien steckt in unserer Infrastruktur, in Städten, in Bauwerken wie Häusern, Brücken oder Straßen. Bisher werden diese Quellen jedoch kaum genutzt, weil es schlichtweg keine Übersicht und keine Transparenz gab, potenzielle Materialien für das Re- und Upcycling zu identifizieren, für die Bauwirtschaft regional verfügbar und in Kalkulationen planbar zu machen.

Dafür bietet Site Depot, eine Software der N1 Trading GmbH, nun eine digitale Lösung. Anwender können damit Materialströme von und zu Baustellen nachhaltig organisieren und zielgenau wieder- und weiterverwerten. Die Software ist damit die erste am Markt, die Beschaffung, Entsorgung und optimierte Wiederverwendung von Primär- und Sekundärrohstoffen ermöglicht. Damit wird aus der Sackgasse des linearen Wirtschaftens endlich ein nachhaltiger Kreisverkehr.

Auch wenn alle Rohstoffe der Bauwirtschaft Teil einer Circular Economy sein können und künftig sein sollen, fokussiert sich N1 mit seinen Projekten und Kooperationen in einem ersten Schritt vor allem auf die Wiederverwertung von Beton. Aus gutem Grund: Dieser Bereich hat eine elementare Bedeutung für die Nachhaltigkeit und die Kreislaufwirtschaft, da kaum ein Bauwerk ohne diesen Baustoff auskommt. Bei der Herstellung fallen global allein 2,8 Milliarden Tonnen CO₂ an, das sind fast acht Prozent der weltweiten Emissionen und damit mehr als der Flugverkehr und Rechenzentren zusammen ausstoßen.

Mit der N1-Software lassen sich Beton-Recyclingmaterialien identifizieren, analysieren und bewerten. Die Vernetzung der Nutzer ermöglicht einen interaktiven Austausch von möglichen Anbietern und Abnehmern mit allen relevanten Daten. Neben einer Optimierung der CO₂-Bilanz können Bauherren und -unternehmen als Anwender ihre Kosten pro Bauprojekt um bis zu 20 Prozent durch das Einsparen von Entsorgungskosten reduzieren. Upcycling-Prozesse bieten sogar die Chance, zusätzliche Einnahmen zu realisieren.

2 Site Depot – das Betriebssystem der Kreislaufwirtschaft

2.1 Ressourcen effizienter nutzen

Der Bausektor ist einer der materialintensivsten Wirtschaftssektoren in Deutschland. Jährlich werden eine große Menge an Rohstoffen für den Bau von Gebäuden, Brücken, Straßen und sonstigen Infrastrukturen aufgewendet, die meist nach vielen Jahren infolge von Abbruch- und Umbaumaßnahmen als Tonnen von Bauabfällen freigesetzt werden.

Allein im Jahr 2020 mussten laut Bundesumweltamt 229,4 Millionen Tonnen Bau- und Abbruchabfälle verwertet oder beseitigt werden. Das sind fast 60 Prozent des deutschen Gesamtabfallsaufkommens. Die Verwertungsmöglichkeiten für diese Abfälle und daraus gewonnenen Materialien sind vielfältig. Bei entsprechender Sortierung und gesicherter Qualität können Gesteinskörnungen aus Beton- und Mauerwerksbruch beispielsweise für die Herstellung von neuen Betonen eingesetzt werden.

Weit über 80 Prozent der Bau- und Abbruchabfälle werden auch tatsächlich verwertet. Ein toller Erfolg, könnte man meinen. Sieht man sich die Verwertungswege jedoch genauer an, werden die Materialien nicht nach ihren stofflichen-technischen Eigenschaften weitergenutzt, sondern es findet zu einem überwiegenden Teil eine minderwertige Verwertung statt, ein Downcycling. So fallen pro Jahr rund 52 Millionen Tonnen Bauschutt vor allem aus dem Hochbau an, wovon aber nur ein Bruchteil wieder als hochwertiger Betonzuschlagsstoff verwendet wird. Rund 34 Millionen Tonnen Recycling-Baustoffe gelangen jährlich in den Straßenbau, aber auch dort werden sie vor allem wenig hochwertig im Wegebau oder als Ausgleichs- und Verfüllmaterial eingesetzt. Ein Teil der Baustoffe landet am Ende sogar auf der Mülldeponie – allein in der EU rund drei Milliarden Tonnen pro Jahr.

„Für eine nachhaltige und klimafreundliche Bauwirtschaft müssen wir Ressourcen beim Bauen effizienter und schonender einsetzen. Das heißt, das Kreislaufprinzip muss in der Baubranche stärker Anwendung finden“, hat denn auch der Amtschef des Umweltministeriums Baden-Württemberg, Helfried Meinel, bei einem Symposium zur Ressourceneffizienz und Kreislaufwirtschaft in der Bauwirtschaft gefordert. Schon bei den Planungen müsse bedacht werden, wie und welche Baustoffe eingesetzt werden. „So setzen wir unsere Ressourcen verantwortungsvoll ein und vermeiden, dass Bauabfälle am Ende deponiert werden müssen. Dazu benötigen wir noch mehr innovative Lösungen und müssen diese in der Praxis umsetzen“, ergänzte Meinel. Genau daran arbeitet die N1 Trading GmbH. Seit mehreren Jahren beschäftigen wir uns mit innovativen digitalen Lösungen für die Bauindustrie und allen Phasen des Bauzyklus. An erster Stelle stehen hierbei Software-Applikationen, die Prozesse optimieren, etwa bei der Kalkulation oder der Organisation von Materialströmen. Dabei setzt N1 auf Künstliche Intelligenz (KI) und eine automatische Analyse von Leistungsverzeichnissen.

Ressourcen beim Bauen effizienter einzusetzen, gehört zu den größten Herausforderungen unserer Branche. Es ist unerlässlich, ganzheitliche Konzepte zu entwickeln, die Re- und Upcycling begünstigen. Eine Kreislaufwirtschaft ermöglicht es nicht nur, den Ressourcenverbrauch und den CO₂-Fußabdruck nachhaltig zu reduzieren, sondern auch das Abfallproblem anzugehen. Mit jedem Recyclingbaustoff werden Primärressourcen für die nächsten Generationen geschont sowie Entsorgungskosten und damit Deponieraum gespart.

Mit der Software Site Depot ist N1 genau das gelungen: In der Vergangenheit gab es schlichtweg keine Übersicht und keine Transparenz, potenzielle Materialien für das Re- und Upcycling zu identifizieren, für die Bauwirtschaft regional verfügbar und in Kalkulationen planbar zu machen. Site Depot hat das geändert. Bauunternehmen, Recyclingbetriebe und Baustoffproduzenten können nun Materialströme von, zu und zwischen Baustellen nachhaltig intern neu organisieren und damit zielgenau wieder- und weiterverwerten oder sich mit Partnern zu größeren Re- und Upcyclingkreisläufen zusammenschließen.

Anwender von Site Depot ist auch der größte Bauherr Deutschlands – die öffentliche Hand, der es eine übergreifende Transparenz von Bauvorhaben zwischen einzelnen Kommunen, den Städten und dem Bund ermöglicht. Die N1-Software liefert hier das digitale Betriebssystem. Durch eine Weiterentwicklung der Grundlagentechologie lassen sich Stoffströme mithilfe von Künstlicher Intelligenz sichtbar und nutzbar machen. Indem N1 dabei hilft, die lineare Produktion hinter sich zu lassen und aus Abfällen die Ressourcen der Zukunft zu machen, verbessert es die Umweltbilanz seiner Kunden und erfüllt zugleich das Nachhaltigkeitsstreben der Verbraucher. In vielen Branchen lässt sich schon jetzt beobachten, dass Kunden ihre Kaufentscheidungen genau von diesen Nachhaltigkeitsaspekten abhängig machen. Dieses Verhalten wird sich auch in der Baubranche weiter verstärken.

In den nordischen Ländern ist bei Ausschreibungen schon jetzt der CO₂-Fußabdruck der Baumaßnahme der entscheidende Faktor. Schon deshalb muss diese Downcycling-Praxis durch andere, neue Verwertungspfade und durch eine verbesserte Kreislaufwirtschaft für Baurestmassen ersetzt werden. Bisher ist das zum Teil an rechtlichen Hindernissen, vor allem aber an der fehlenden Vernetzung von Informationen und Logistik gescheitert.

2.2 So funktioniert Site Depot

Bei Bauprojekten entstehen Aushub- und Abbruchmaterialien, die unterschiedlich vorbelastet oder verunreinigt sind. Eine Vielzahl an regionalen Vorgaben, nationalen Vorschriften und Gesetzen zur Gefährlichkeit und Eignung solcher Stoffe machen eine umweltgerechte Verwertung und Entsorgung zu einem komplexen Thema. Zudem braucht es ein hohes Maß an Transparenz über regional verfügbare Materialien und dazu passende Verwertungs- und Entsorgungsoptionen. Die Software Site Depot schafft genau das: Sie organisiert intern sowie durch Vernetzung mit anderen Unternehmen das Stoffstrommanagement, egal ob es sich dabei um Haufwerke handelt, die entsorgt werden müssen, oder um Kippstellen, die eine Verfüllung benötigen. Ziel ist jeweils der optimierte Einsatz von Sekundär- oder Primärrohstoffen. Ermöglicht hat diese Transparenz die Analyse von Bauprojekten mit Künstlicher Intelligenz, die Site Depot zur Extraktion und Aufbereitung der Daten nutzt. Erst durch diese digitale Transparenz und Vernetzung wird eine Identifizierung von Stoffströmen und ein Matching zwischen den Marktakteuren (intern sowie extern) möglich.

Das Grundproblem waren bisher die temporären und wandernden Stoffströme auf Baustellen. Pro Baustelle können manchmal hunderte solcher zeitlich und mengenmäßig begrenzter Material-Depots entstehen, was erklärt, warum die Übersicht darüber bisher selbst innerhalb der Unternehmen fehlte, von einem Austausch mit Partnern ganz zu schweigen. Die Digitalisierung ist hier das entscheidende Instrument im Kampf um aktuelle Daten, die Hoheit darüber und in Folge mehr Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit. Sie bietet das Potenzial, Stoffströme sichtbar zu machen, sie zu vernetzen und Entscheidungen zu beschleunigen. So können Ressourcen wesentlich effizienter genutzt werden.

In den Leistungsverzeichnissen von Bauprojekten ist hinterlegt, was wann, wo und wie gebaut oder abgerissen werden soll und welche Baustoffe dafür benötigt werden bzw. anfallen. Mithilfe einer Künstlichen Intelligenz liest Site Depot diese Informationen aus, auch wieviel und welche Art von Material benötigt wird oder entsteht, welche Körnung das Material hat und ob es etwa belastet ist. Mit der Software lassen sich dann die

passenden Haufwerke, Kipp- oder Annahmestellen sowie Rohstoffquellen binnen Sekunden finden. Die wirtschaftlich sinnvollsten Verwertungsoptionen werden übersichtlich dargestellt – inklusive Fracht- und Entsorgungskosten sowie Optimierungspotenzialen. Interne und externe Haufwerke und Kippstellen können über Site Depot anderen Marktteilnehmern angeboten und angefragt werden. Hierdurch entsteht indirekt eine Art Marktplatz, jedoch in direkter Verbindung zwischen den handelnden Unternehmen, ohne einen Dritten, der in die Wertschöpfung eingreift. Plakativ gesprochen Microsoft statt Amazon – Site Depot als Betriebssystem für eine funktionierende Kreislaufwirtschaft.

Mithilfe verschiedener Sichtbarkeits-Modi bestimmt das Bauunternehmen den Empfängerkreis eigener Angebote selbst, inklusive kartographischer Darstellung und Informationen zu Material, Standort, Menge, Zeit und Preis. Ein Bauverantwortlicher muss also nur noch entscheiden, ob er das Material nur intern und/oder extern am Markt anbieten möchte und zu welchem Preis. Wenn beispielsweise eine Grube bei Projekt A ausgehoben werden muss und es ein weiteres Projekt B gibt, bei dem Füllgut benötigt wird, oder ein anderes Unternehmen in der Nähe Material braucht, lassen sich Stoffströme und damit auch die Ressourcennutzung optimieren. Für Bauabfälle, die entsorgt werden müssen, oder Material, das aus primären Quellen angefragt werden muss, sind zudem in Site Depot aktuell über 5000 individuell editier- und ergänzbare Standorte hinterlegt.

Mit der Applikation steigern Unternehmen ihre Verwertungsrate von Baustoffen und reduzieren Entsorgungskosten. So handeln sie ressourceneffizient und fördern ihre Nachhaltigkeit und Wirtschaftlichkeit. Warum wir uns hier so sicher sind? Weil N1 die Software aus der Praxis und am tatsächlichen Bedarf mehrerer mittelständischer Bau- und Baustoffunternehmen in Baden-Württemberg entwickelt hat.

Der Markenkern und USP von N1 ist es, Unternehmen aus der Baubranche auf ihrem Weg zur Kreislaufwirtschaft mit individuellen Softwarelösungen zu begleiten. Durch das modular aufgebaute SaaS-Konzept (Software as a Service) bezahlen die Kunden nur das, was sie brauchen. Da N1 zudem nicht als Händler auftritt, sondern nur als neutraler Technologielieferant, unterstützt es Bauunternehmen, Recyclingbetriebe und Baustoffproduzenten die wirtschaftlichen Chancen in der Optimierung ihrer Stoffströme selbst zu heben. Anders als andere Marktteilnehmer, die mit ihrem Geschäftsmodell selbst Teil der Prozesskette werden und damit Kapital aus den Daten der Nutzer schlagen.

Als einziger Dienstleister in der Branche bietet N1 zudem eine Lösung für die gesamte Prozesskette, vom Kalkulator bis zum Disponenten. Site Depot schlüsselt schon in der Planungsphase von Bauprojekten auf, welche Stoffströme zukünftig anfallen und welche an anderer Stelle wiederverwertet werden können. Anstatt immer weiter neue und endliche Ressourcen zu verwenden, findet die Software das Material für Re- und Upcycling und optimiert dabei noch die Logistik.

Darin sehen auch viele N1-Kunden den größten Nutzen: die Nachhaltigkeit zu einer tragenden Säule ihrer Firmenphilosophie machen und schon bald die CO₂-Belastung auf Null senken zu können. Mit Site-Depot sollen Dutzende zusätzliche Transporte nicht mehr nötig sein, weil Material, das entsorgt werden würde, nun an anderer Stelle verwertet oder verbaut werden kann.

Das rechnet sich, denn es ist bereits heute zum Teil teurer, Material zu entsorgen als frisches einzukaufen. So hat beispielsweise eine Gemeinde in Baden-Württemberg, die einen Lärmschutzwall bauen wollte, noch 200.000 Euro damit verdient. So viel war ein Bauunternehmer bereit zu zahlen, nachdem er Material von einer anderen Baustelle dort als Lärmschutzwall einbauen durfte. Und auch für den Unternehmer sei es ein Gewinn gewesen – einen sechsstelligen Betrag hat er sich gespart, den er sonst für die Entsorgung des Materials hätte zahlen müssen.

„Das ist ein enormer wirtschaftlicher Hebel. Wer ein Drittel weniger Material einkaufen muss, weil er den Rest von anderen Baustellen erhält, hat das in der Kalkulation einen riesigen Vorteil. Entweder steigert das seinen Gewinn oder er kann im Wettbewerb mit anderen Unternehmen seine Leistung günstiger anbieten. Zumal ein Wirtschaftlichkeitsmonitor in Site-Depot dem Anwender zeigt, ob es sich lohnt, das benötigte Material komplett von der Kiesgrube in zehn Kilometer Entfernung oder einen Teil von umliegenden Baustellen zu ordern, da auch Deltamengen berücksichtigt werden.

Erste Analysen im Markt haben gezeigt: Kunden der N1-Lösungen können ihre Kosten pro Bauprojekt um bis zu 20 Prozent reduzieren. Zudem bieten Upcycling-Prozesse von vermeintlich minderwertigen Materialien die Chancen, zusätzliche Einnahmen zu realisieren. Dies lässt sich bereits heute beim Upcycling von „Produktionsabfällen“ aus dem Bereich der Sand- und Kiesgewinnung beobachten. Reststoffe, die heute für 10 Euro pro Tonne entsorgt würden, lassen sich in anderen Teilbranchen wiederverwenden und können dort als Rohstoffe verkauft werden, zu einem Vielfachen der Entsorgungskosten.

Upcycling funktioniert aber auch in anderen Materialsegmenten wie bei Kunststoffen und Metallen, indem sie etwa benachbarten Branchen als Rohstoffe zur Verfügung gestellt werden. Dieser Branchenwechsel lässt auch für Site Depot die Option offen, zu einem späteren Zeitpunkt in andere Geschäftsfelder zu skalieren. Denn die Systematik und die KI von Site Depot kann auch auf die Kreislaufwirtschaft anderer Branchen übertragen werden.

Das Hauptaugenmerk von N1 liegt vorerst aber auf einem Segment der Bauwirtschaft: die Wiederverwertung von Beton. Für den Klimaschutz ist ein Tempolimit auf Autobahnen und das Sammeln von Joghurtbechern zwar nicht umsonst. Wollen wir aber etwas bewegen und einen Effekt erzielen, müssen wir beim Beton eine Kreislaufwirtschaft etablieren, da noch immer kaum ein Bauwerk ohne diesen Baustoff auskommt. Zudem landet noch immer ein Teil dieses hochwertigen Baustoffes bei Abriss und Sanierung auf der Deponie, in der EU immerhin rund 3 Milliarden Tonnen pro Jahr.

Dass das nicht sein muss, haben auch die ersten Projekte gezeigt, die komplett über Site Depot abgewickelt wurden. Wie etwa der Abriss der Casella-Brücke in Frankfurt am Main und das Recycling des dort verwendeten Altbetons.

2.3 Beispiel: Site Depot managt die Stoffströme beim Abriss der Casella-Brücke in Frankfurt

Über die Casella-Brücke in Frankfurt sind schon seit drei Jahren keine Fußgänger mehr gegangen oder Fahrradfahrer geradelt. Sie galt als einsturzgefährdet. Seit 1964 hatte sie mit ihrer leicht geschwungenen Betonkonstruktion die 760 Meter zwischen dem Süden Fechenheims und der Hanauer Landstraße überbrückt. Nun wird die Brücke abgerissen, als eine von 5.000 Brücken pro Jahr in Deutschland.

Den Auftrag dafür bekam das Bauunternehmen Max Wild GmbH, das den Abbruch betreibt. Aus der Brücke werden dafür etwa vier Meter lange und 30 Tonnen schwere Brückenteile herausgesägt, per Autokran herausgehoben und dann zwischengelagert. Um die Lärmbelastung vor Ort möglichst gering zu halten, werden die Teile bzw. mehr als 6000 Tonnen Beton per Lkw anschließend abtransportiert.

Das übernimmt die Blasius Schuster KG, deren Wurzeln in der Logistik liegen. Längst hat sich das Unternehmen aber als Spezialist für eine innovative Aufbereitung mineralischer Rohstoffe einen Namen in der Branche gemacht. Aufbereitetes Material wird als Recyclingbaustoff wieder dem Stoffkreislauf zugeführt – nachhaltig und umweltfreundlich. Zumal Blasius Schuster eine Niederlassung in Frankfurt hat und so mehr als 500 Lkw-Fahrten mit dem Brückenteilen aus Frankfurt raus entfielen – und auch wieder rein, denn nach der Aufbereitung wurde der mineralische Bauschutt an das Holcim-Betonwerk vor Ort geliefert.

Bei Holcim ersetzt das Recyclingmaterial Teile des Betonzuschlag. So wird der primäre Rohstoff eingespart und auch auf weite Transportwege vom Steinbruch zum Betonwerk verzichtet, was zusätzlich eine Verringerung der CO₂-Emissionen bedeutet. Der entstehende Recyclingbeton weist dieselben Eigenschaften wie konventioneller Transportbeton auf und kann auch so eingesetzt werden, etwa zum Betonieren einer Hochhausdecke.

Mit Hilfe von Site Depot haben sich die Projekt-Partner gefunden und nutzen nun die Lösung zur Abwicklung der Geschäfte. Alle beteiligten Unternehmen wickeln die Transaktionen des Abrisses und der Wiederverwendung über Site Depot ab, angefangen bei der Kalkulation, über Abriss und Logistik der Stoffströme bis hin zur Aufbereitung und dem Recycling in frischem Beton.

Die Evaluation dieses Projektes und die Erfahrungen aus anderen Projekte haben die Vorteile des Einsatzes von Site-Depot gezeigt:

- **Zeitersparnis:** > 90 %, bei der Analyse der Ausschreibungen auf Nachhaltigkeitspotenzial, aus Stunden werden Minuten
- **Kostenreduktion:** > 100 %, aus Entsorgungskosten werden durch Upcycling Einnahmen (Vorzeichenwechsel)
- **Nachhaltigkeit:** Bis zu 30 % Einsparung von CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Beton und Zement durch Re- und Upcycling
- **Umweltaspekte:** Starke Reduktion von Abfallmengen und Schutz von primären Ressourcen, geringere Logistikkosten (CO₂-Ausstoß) durch Aufbereitung des Bauschutts in Frankfurt

2.4 Site Depot als Grundlage von Urban Mining und der „Circular Cities“

Das Thema Nachhaltigkeit spielt mittlerweile in weiten Teilen der Wirtschaft eine wichtige Rolle. Dass nicht nur Rohstoffe, sondern auch Bauabfälle einen Wert haben, erkennen zunehmend auch die Kommunen. Organisierte Up-Cycling-Prozesse im Sinne der Kreislaufwirtschaft sind derzeit aber weitestgehend auf Pilot-Projekte in größeren Städten begrenzt, wie Berlin, Hamburg, Frankfurt oder Oslo. Ein städteübergreifendes Urban-Mining-Netzwerk wurde bisher nicht angestoßen.

Seit 2015 untersucht Amsterdam die Möglichkeiten einer Kreislaufwirtschaft in der Stadt und im erweiterten Metropolraum. Inzwischen wurden die Ergebnisse und Erkenntnisse von über 70 Kreislaufprojekten veröffentlicht und zeigen: Kreislaufwirtschaft ist realistisch und profitabel. Realistisch, denn Stoffkreisläufe ließen sich lokal schließen. Profitabel, denn zirkuläre Projekte erwiesen sich als ökonomisch wettbewerbsfähiger als lineare Modelle, wenn die externen Kosten mitkalkuliert werden.

Auch wenn Amsterdams Kreislaufwirtschaft funktioniert, ist es nur eine Insel. Aus einem Netzwerk der Städte und Kommunen können deshalb die ökologischen und ökonomischen Chancen und Vorteile noch größer sein:

- neue Möglichkeiten für Wachstum und Innovation sowie Einsparungen aufgrund höherer Ressourceneffizienz
- verbesserte Ressourcensicherheit und sinkende Abhängigkeiten von Primärrohstoffen dank niedrigerem Rohstoffbedarf
- reduzierte Umweltauswirkungen einschließlich einer drastischen Reduzierung von Treibhausgas-Emissionen durch Upcycling von Rohstoffen aus dem Bestand
- soziale Vorteile wie zum Beispiel die Entstehung neuer Arbeitsplätze

Bestehende Lösungsansätze sind aktuell überregional wenig oder nicht existent und beschränken sich eher auf Einzellösungen bzw. eine manuelle Optimierung. Auch hier ist der Grund die fehlende Datentransparenz

über Materialverfügbarkeiten und Materialbedarfe von Sekundärmaterial. Darüber hinaus ist das Geschäft durch einen hohen manuellen Dispositionsaufwand und mangelnde planerische Weitsicht geprägt.

Die Grundlage einer funktionierten Kreislaufwirtschaft ist aber die Extraktion von Daten aus unterschiedlichen Quellen, genau das, was N1 mit seiner spezifischen KI automatisiert leisten kann und wofür das Unternehmen mit dem Innovationspreis in Baden-Württemberg ausgezeichnet wurde. Nicht zuletzt deshalb engagiert sich N1 im Projekt „CCBW - Circular Cities Baden-Württemberg - Die Stadt als Rohstofflager“, durch das die Städte und Kommunen in Baden-Württemberg vernetzt werden sollen, um die Ressourceneffizienz zu erhöhen und durch eine Wiederverwertung von Materialien CO₂ einzusparen.

Mit Bezug auf das Projektziel, Städte und Kommunen als Rohstofflager für eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft nutzbar machen, ist die Nutzung der N1-Softwarelösungen ein erster Schritt, um ein Upcycling in einer kommunalen Kreislaufwirtschaft zu etablieren. Es profitiert dabei nicht nur N1, durch neue Möglichkeiten in der Entwicklung von digitalen Dienstleistungen, sondern vielmehr alle mit dem Ökosystem verbundenen Städte und Kommunen. Das Potenzial für die Umwelt und Wirtschaft ist groß: deutschlandweit gibt es 10785 Gemeinden, darunter 2055 Städte.

3 Ausblick: Ein Zehn-Punkte-Plan für die Kreislaufwirtschaft

Deutschland hat zum Ziel, bis zum Jahr 2045 CO₂-neutral zu werden. Dafür ist ein gigantischer Transformationsprozess unserer Wirtschaft nötig. Ganze Branchen werden sich wandeln müssen und kein Stein auf dem anderen bleiben. Es wird Verlierer geben, aber auch Chancen für neue Geschäftsmodelle. Dabei ist die Kreislaufwirtschaft sicher nicht der Heilsbringer. Sie ist aber für die Resilienz und Nachhaltigkeit der deutschen Wirtschaft von elementarer Bedeutung.

Trotzdem sind nach einer Studie der Boston-Consulting Group aus 2020 nur 10,4 % der deutschen Wirtschaft zirkulär. Das geschätzte Marktpotenzial für Deutschland bezüglich der Rückgewinnung, Verwendung und des Verkaufs von Sekundärrohstoffen wird von der Studie auf 140 - 200 Milliarden Euro geschätzt - pro Jahr.

Das Umweltbundesamt sieht zudem nicht allein aus Aspekten der Ressourcenschonung es künftig für notwendig an, die derzeitige Downcycling-Praxis in der Bauwirtschaft durch andere Verwertungspfade für Baurestmassen zu ersetzen. So würden etwa durch die demografische Entwicklung und eines absehbaren Wandels der Wohnbedürfnisse die Bauschuttmengen durch Abbruch und Sanierung signifikant zunehmen. Bis 2050 zeichnet sich demnach ab, dass deutschlandweit insgesamt eine weit größere Menge an Baustoffen, etwa das Anderthalbfache, aus dem Wohngebäudebestand abfließt, als neu in diesen eingebracht werden wird. Langfristig wird damit der Gebäudebestand zur Rohstoffquelle und zu einer Herausforderung bzw. Chance.

Die Entwicklung von N1 in den letzten Jahren, das Umsatzwachstum und das große Interesse von Kunden, Investoren und auch der Fachpresse an Site Depot sprechen für sich. Für die richtigen wirtschaftlichen Rahmenbedingungen braucht es jedoch die Politik. Und auch hier möchten wir als Unternehmen die Zukunft mitgestalten. Wir wollen nicht behandelt werden, sondern aktiv handeln, anschieben und anpacken.

Gemeinsam mit anderen Unternehmen der Branche hat N1 sein Wissen gebündelt, um der Politik klare Handlungsempfehlungen für eine wirtschaftlich und ökologisch nachhaltigere Zukunft des Bauwesens zu geben. Dazu zählen Big Player wie Holcim Deutschland oder auch Mittelständler wie die Blasius Schuster KG, die Heinrich Feeß GmbH & Co. KG oder die Max Wild GmbH. Zusammen haben wir einen 10-Punkte-Plan zur

Stärkung der Kreislaufwirtschaft entwickelt, in dem es in den ersten vier Punkten um die Stärkung der gesetzlichen Grundlagen geht (siehe Abbildung 1). Die klare Definition, was zu tun ist, um aus Bauabfall ein Produkt zu machen, wird genauso gefordert, wie die Ausweisung von Vorzugsflächen für die Aufbereitung oder die beschleunigte Genehmigung von stationären und mobilen Aufbereitungsanlagen.

10 Punkte-Plan: Zur Stärkung der Kreislaufwirtschaft

Stärkung gesetzlicher Grundlagen



1. Beschleunigung und Vereinheitlichung

Beschleunigung und Vereinheitlichung von Genehmigungsverfahren für stationäre Aufbereitungsanlagen (nach BImSchG)



2. Vorzugsflächen zur Aufbereitung

Ausweisung von Vorzugsflächen zur Stärkung der dezentralen und regionalen Aufbereitung von „Bauabfällen“



3. Vereinfachte Genehmigung

Einführung eines vereinfachten und digitalen Genehmigungsverfahrens für den temporären Betrieb von mobilen Aufbereitungsanlagen (nach BImSchG), sowie Einführung eines Zertifizierungs-Templates zur Herstellung von (RC-)Baustoffen auf Baustellen



4. Klare Definition

Klare Definition was zu tun ist, um aus „Bauabfall“ ein Produkt zu machen

Stärkung der Nachfrage von RC-Baustoffen



5. Mehr Handlungsspielraum

Mehr Handlungsspielraum bei der Vergabe von Bauleistungen im Hinblick auf Nachhaltigkeitsaspekte



6. Vorfahrt für RC-Baustoffe

„Bevorzugung“ von RC-Baustoffen in Ausschreibungen bei gleicher technischer Eignung und Verfügbarkeit



7. Fast-Track Zulassung

Einführung eines Fast-Track Zulassungsverfahrens für innovative und neuartige Baustoffe die in hohem Maße CO₂- oder Rohstoffe einsparen z.B. CO₂-reduzierte Zemente oder R-Betone



8. Muster-Bausatzung

Erstellung einer kreislaufwirtschaftsfreundlichen Muster-Bausatzung für Kommunen mit klaren Handlungsempfehlungen

Stärkung der Digitalisierung



9. Mehr Transparenz durch Vernetzung

Schaffung von mehr Transparenz durch die Vernetzung öffentlicher Ausschreibungs- und Projektdaten auf allen Ebenen (Bund, Land, Kommune) zur Identifikation möglicher Kreislaufpotenziale



10. Förderung nachhaltiger Digitalisierung

Förderung zur Einführung von digitalen Instrumenten zur Ressourceneinsparung in der Bauindustrie (z.B. Digitalisierungsgutscheine)

Heidelberg, im September 2022

Max Wild
Profis ohne Grenzen

Holcim

feess

BLASIUS
SCHUSTER

Abb. 1: In einer kreislaufforientierten Wirtschaft wird der Wert von Produkten, Stoffen und Ressourcen möglichst lange erhalten, um möglichst wenig Abfall und Umweltbelastungen zu erzeugen. Damit das funktioniert, hat N1 mit Partnern einen 10-Punkte-Plan angestoßen, der die Kreislaufwirtschaft stärken soll.

Wichtig ist uns als Unternehmen auch die Stärkung der Nachfrage nach Recycling-Baustoffen, etwa durch mehr Handlungsspielraum bei der Vergabe von Bauleistungen bezüglich Nachhaltigkeitsaspekten. Durch eine „Vorfahrt“ für solche Baustoffe bei gleicher technischer Eignung und Verfügbarkeit oder durch die Erstellung einer kreislaufwirtschaftsfreundlichen Muster-Bausatzung für Kommunen.

Als dritter Aspekt wird die Stärkung der Digitalisierung von der Politik gefordert. Durch die Schaffung von mehr Transparenz durch die Vernetzung öffentlicher Ausschreibungs- und Projektdaten auf allen Ebenen (Bund, Land, Kommune), um mögliche Kreislaufpotenziale identifizieren zu können. Sowie die Förderung der Einführung von digitalen Instrumenten, um die Ressourceneinsparung in der Bauindustrie zu ermöglichen, etwa durch einen Digitalisierungsgutschein.

Papier ist geduldig. Das wissen auch wir. Deshalb sucht N1 mit seinen Partnern bewusst das Gespräch mit den politisch Verantwortlichen, zuletzt etwa mit Dr. Franziska Brantner, Bundestagsabgeordnete und Staatssekretärin im Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. Aus dem Bewusstsein heraus: Wenn wir wirtschaftlich und ökologisch etwas bewegen wollen, dann muss eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft schnell etabliert werden. Natürlich wollen wir als Unternehmer und Unternehmen alle Geld verdienen. Aber hier geht es doch um mehr. Es geht darum, aus Abfällen wieder Rohstoffe zu machen, damit wir und unsere Kinder auch morgen noch gut leben können. Dazu wollen wir einen Beitrag leisten.

4 Autor

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christian Landes

Geschäftsführer

N1 Trading GmbH

Beethovenstraße 24

69221 Dossenheim

Programm des Symposiums

09. März 2023, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

| | | | |
|-----------|---|-----------|--|
| 09:00 Uhr | Anmeldung Kaffee | 13:45 Uhr | Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie für ganzheitliches Betonrecycling Sebastian Bruckschlögl Karlsruher Institut für Technologie (KIT) |
| 09:30 Uhr | Begrüßung Moderation Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Dr.-Ing. Michael Aufrecht Verband Deutscher Betoningenieure e. V. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH | 14:15 Uhr | Ressourcenschonender Umbau der Mercedes-Benz Arena... ...aus Sicht des Bauherrn Stadion NeckarPark GmbH & Co. KG, vertreten durch Dipl.-Ing. Architekt Eberhard Becker asp Architekten ...aus Sicht der Bauausführung Dipl.-Ing. Torsten Dölle Ed. Züblin AG ...aus Sicht der Baustoffbereitstellung Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Werner Rothenbacher SCHWENK Zement GmbH & Co. KG |
| 09:45 Uhr | Grußwort des KIT Prof. Dr. Thomas Hirth Karlsruher Institut für Technologie (KIT) | 15:00 Uhr | Kaffeepause |
| 10:00 Uhr | Grußwort des Umweltministeriums Ministerialrat Martin Kneisel Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft des Landes Baden-Württemberg | 15:30 Uhr | Ressourcenschonender Umbau und Urban Mining Konzept - Rathaus Korbach Marc Matzken heimspiel architekten |
| 10:15 Uhr | Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien Dr.-Ing. Jörg Rickert VDZ gGmbH | 16:00 Uhr | Ressourceneffizienz durch Digitalisierung – Praxisbeispiele zum Re- und Upcycling von Beton Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christian Landes N1 Trading GmbH |
| 10:45 Uhr | Kaffeepause | 16:30 Uhr | Zusammenfassung Schlusswort Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Dr.-Ing. Michael Aufrecht Verband Deutscher Betoningenieure e. V. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH |
| 11:15 Uhr | Möglichkeiten zur Verwendung von Betonbrechsanden Jan Höffgen Karlsruher Institut für Technologie (KIT) | | |
| 11:45 Uhr | Möglichkeiten zur Verwendung von Rezyklaten – Praxiseinblick aus der Schweiz Florian Robineck zirkulit AG Mathias Wein Eberhard Bau AG | | |
| 12:15 Uhr | Mittagspause | 16:45 Uhr | Umtrunk Imbiss |

Autorenverzeichnis

19. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Bauen mit Beton im Kreislauf - Recycling, Re-Use und Ressourcenschonung

Dipl.-Ing. Eberhard Becker

asp Architekten GmbH, Talstraße 41, 70188 Stuttgart

Dr. Günter Beuchle

Institut für Technische Chemie (ITC), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Hermann-von-Helmholtz-Platz 1, 76344 Eggenstein-Leopoldshafen

Sebastian Bruckschlögl

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB), Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB), Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe

Dipl.-Ing. Torsten Dölle

Ed. Züblin AG / TPA GmbH, Albstadtweg 3, 70567 Stuttgart

Jan Höffgen

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB), Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Christian Landes

N1 Trading GmbH, Beethovenstr. 24, 69221 Dossenheim

Marc Matzken

heimspiel architekten Matzken Kampherbeek PartGmbH, Kanalstraße 2, 48147 Münster

Humberto Patarca Petrillo

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe

Dr.-Ing. Jörg Rickert

VDZ Technology gGmbH, Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf

Florian Robineck

zirkulit AG, Breitloostrasse 7, 8145 Oberglatt (CH)

Prof. Dr.-Ing. Anja Rosen

C5 GmbH, Bült 13, 48143 Münster

Dipl.-Ing. Dipl.-Wirt.-Ing. (FH) Werner Rothenbacher

SCHWENK Zement GmbH & Co. KG, Hindenburgring 15, 89077 Ulm

Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe

Elena Vollmer

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe

Dr.-Ing. Rebekka Volk

Institut für Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Hertzstr. 16, 76187 Karlsruhe

Mathias Wein

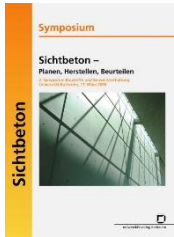
Eberhard Bau AG, Breitloostrasse 7, 8145 Oberglatt (CH)

Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Themen vergangener Symposien (2004-2022)



1. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Instandsetzung bedeutsamer Betonbauten der Moderne in Deutschland
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Vogel, M. Haist
ISBN 978-86644-098-2



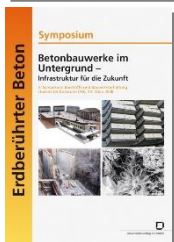
2. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Sichtbeton – Planen, Herstellen, Beurteilen
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 3-937300-43-0



3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Innovationen in der Betonbautechnik
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 3-86644-008-1



4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Industrieböden aus Beton
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-120-0



5. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betonbauwerke im Untergrund – Infrastruktur für die Zukunft
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-214-6



6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Dauerhafter Beton – Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-341-9



7. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Beherrschung von Rissen in Beton
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-487-4



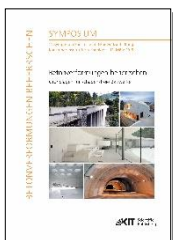
8. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Schutz und Widerstand durch Betonbauwerke bei chemischem Angriff
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-654-0



9. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Nachhaltiger Beton – Werkstoff, Konstruktion und Nutzung
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer
ISBN 978-3-86644-820-9



10. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Gestalteter Beton – Konstruieren in Einklang von Form und Funktion
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer
ISBN 978-3- 73150-179-4



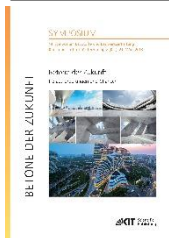
11. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betonverformungen beherrschen – Grundlagen für schadensfreie Bauwerke
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer
ISBN 978-3-7315-0343-9



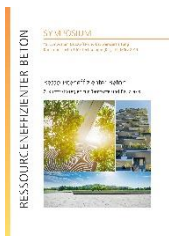
12. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Bauwerkserhaltung – Instandsetzung im Beton- und Stahlbetonbau
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-7315-0474-0



13. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Sicherheit durch Beton – Schutz vor Explosion, Brand und Risikostoffen
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, J. Link
ISBN 978-3-7315-0629-4



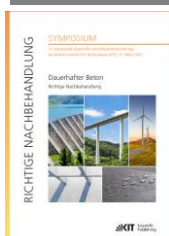
14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, J. Link
ISBN 978-3-7315-0767-3



15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Ressourceneffizienter Beton – Zukunftsstrategien für Baustoffe und Baupraxis
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, J. Link, V. Mercedes Kind
ISBN 978-3-7315-0993-6



16. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Klima, Risse und Co. – Betonbau im herausfordernden Umfeld
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, V. Mercedes Kind
ISBN 978-3-7315-0994-3



17. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Dauerhafter Beton - Richtige Nachbehandlung
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, V. Mercedes Kind
ISBN 978-3-7315-1073-4



18. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
**Gutes Klima für die Zukunft.
Dekarbonisierung als wichtiger Schlüssel zum nachhaltigen Bauen mit Beton**
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, V. Mercedes Kind
ISBN 978-3-7315-1163-2

Alle Bände sind kostenfrei als Download bei **KIT Scientific Publishing** (<http://www.ksp.kit.edu>) oder für einen Unkostenbeitrag im Buchhandel erhältlich.

Die Betonbranche steht, wie viele andere Industriezweige auch, vor der großen Herausforderung, die CO₂-Emissionen drastisch zu senken und somit einen Beitrag zu Nachhaltigkeit und Klimaschutz zu leisten. In den Symposien der letzten Jahre diskutierten wir gemeinsam mit Ihnen bereits verschiedene Möglichkeiten, wie diese Ziele durch den Einsatz ressourcenschonender Betone, eine ausreichende Dauerhaftigkeit unserer Bauwerke und die Dekarbonisierung der Betonbauweise realisiert werden können. Nun möchten wir den Fokus darauf richten, wie es uns gelingen kann, durch das Bauen im Kreislauf die Betonbranche nicht nur nachhaltiger, sondern auch kosteneffizienter zu gestalten. Dabei stehen insbesondere das Recycling von Beton und die Wiederverwendung ganzer Betonbauteile im Vordergrund dieses Symposiums. Die Veranstaltung beginnt zunächst mit einem Überblick über die Sichtweisen der öffentlichen Hand sowie der Zementindustrie. Anschließend präsentieren Vertreter aus Forschung und Praxis, welche Möglichkeiten zur Verwendung von Betonbrechanden und Rezyklaten bestehen. Darauf aufbauend erfolgt eine zusammenfassende ganzheitliche Betrachtung des Betonrecyclings. Die Veranstaltung schließt mit einer Vorstellung bereits realisierter Projekte und zeigt auf, wie das Bauen mit Beton im Kreislauf durch die Digitalisierung optimiert werden kann.

Schirmherrschaft:



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

www.betoninstitut.de
www.beton.org
www.betoningenieure.de

ISBN 978-3-7315-1270-7

