

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien

Entwicklung einer Strategie zum Umgang mit Betonbrech- sanden in Baden- Württemberg

Autoren

J. P. Höffgen, M.Sc. / M. Bauer, B.Sc. / Prof. Dr.-Ing. F. Dehn

Inhaltsverzeichnis

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Abbildungsverzeichnis | 03 |
| Tabellenverzeichnis | 04 |
| Vorwort | 05 |
| 1 Einleitung | 06 |
| 2 Mineralische Ausgangsstoffe in der Betonherstellung | 07 |
| 2.1 Gesteinskörnungen | 07 |
| 2.2 Zemente | 08 |
| 3 Derzeitige Kreislaufführung von Betonbrechsanden | 11 |
| 3.1 Rechtliche und normative Grundlagen | 11 |
| 3.1.1 Rechtliche Grundlagen | 11 |
| 3.1.2 Normative Grundlagen | 12 |
| 3.2 Stoffströme und Eigenschaften von Betonbrechsanden | 16 |
| 3.2.1 Jährlich anfallende Betonbrechsandmengen | 16 |
| 3.2.2 Chemisch-mineralogische, physikalische und thermische Eigenschaften von Betonbrechsanden | 19 |
| 3.3 Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen in der Betonherstellung | 23 |
| 4 Verfahren zur Behandlung von Betonbrechsanden | 25 |
| 4.1 Verbesserung der Gebrauchseigenschaften feiner rezyklierter Gesteinskörnungen | 25 |
| 4.1.1 Stärkung des anhaftenden Zementsteins | 25 |
| 4.1.2 Entfernung des anhaftenden Zementsteins | 27 |
| 4.1.3 Bewertung der Verfahren | 28 |
| 4.2 Aufbereitung von Betonbrechsanden als Bindemittelbestandteil in der Betonherstellung | 31 |
| 4.2.1 Gemahlener Betonbrechsand als Betonzusatzstoff bzw. Zementhauptbestandteil | 31 |
| 4.2.2 Carbonatisierter Betonbrechsand als Betonzusatzstoff bzw. Zementhauptbestandteil | 31 |
| 4.2.3 Thermisch aktivierter Betonbrechsand als Betonzusatzstoff bzw. Zementhauptbestandteil | 32 |
| 4.2.4 Betonbrechsand als Rohmehl in der Zementherstellung | 33 |

| | |
|----------------------------------------------------------------------------|----|
| 5 Szenarien für den Einsatz von Betonbrechsanden in der Betonherstellung | 34 |
| 5.1 Betonbrechsande als rezyklierte Gesteinskörnung | 34 |
| 5.1.1 Unbehandelte Betonbrechsande als rezyklierte Gesteinskörnung | 34 |
| 5.1.2 Behandelte Betonbrechsande als rezyklierte Gesteinskörnung | 35 |
| 5.2 Betonbrechsande als Bindemittelkomponente | 36 |
| 5.2.1 Betonbrechsande als Rohmehl in der Klinkerherstellung | 36 |
| 5.2.2 Betonbrechsande als Betonzusatzstoff oder Zementbestandteil | 36 |
| 5.3 Mischszenario | 37 |
| 5.4 Vergleich der Szenarien | 38 |
| 6 Empfehlungen für eine Stärkung der Kreislaufführung von Betonbrechsanden | 40 |
| Autorenschaft | 43 |
| Literaturverzeichnis | 44 |
| Impressum | 49 |

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Abbildung 2.1 | Jährlicher Bedarf an Gesteinskörnungen im Bauwesen in Deutschland | 08 |
| Abbildung 2.2 | Inlandsversand von Zement in Deutschland | 10 |
| Abbildung 3.1 | Erfasste Mengen mineralischer Bau- und Abbruchabfälle in Deutschland und der Europäischen Union | 16 |
| Abbildung 3.2 | Input in Bauschuttzubereitungsanlagen in Deutschland | 17 |
| Abbildung 3.3 | Input in Bauschuttzubereitungsanlagen in Baden-Württemberg | 18 |
| Abbildung 3.4 | Fotografische Aufnahmen von Rheinsand, Kalksteinsand und zwei Betonbrechsanden mit Korngrößen zwischen 1 mm und 2 mm | 19 |
| Abbildung 3.5 | Zusammenhang von Kornrohichte und Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnungen | 22 |
| Abbildung 5.1 | Volumenanteile der unterschiedlichen mineralischen Ausgangsstoffe und einsetzbar | 39 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|--------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabelle 2.1 | Chemische Zusammensetzung von Portlandzementklinkerrohmehl | 09 |
| Tabelle 3.1 | Zusammensetzung rezyklierter Gesteinskörnungen | 13 |
| Tabelle 3.2 | Maximal zulässige Anteile grober rezyklierter Gesteinskörnungen an der gesamten Gesteinskörnung | 14 |
| Tabelle 3.3 | Chemische Zusammensetzung von Betonbrechsanden unterschiedlicher Herkunft | 21 |
| Tabelle 3.4 | Maßgebende Umwandlungsreaktionen bei der thermischen Behandlung rezyklierter Gesteinskörnungen aus Beton | 22 |
| Tabelle 3.5 | Relative Festbetoneigenschaften bei 100% Gesteinskörnungsaustausch durch rezyklierte Gesteinskörnungen | 24 |
| Tabelle 4.1 | Einfluss verschiedener Aufbereitungsverfahren für Betonbrechsande auf Rohdichte und Wasseraufnahme | 30 |

Vorwort

Laut Umweltbundesamt stellen Bauabfälle mit einem Anteil von rund 60 Prozent am Gesamtaufkommen die größte Abfallfraktion dar. Von den derzeit jährlich anfallenden etwa 52 Millionen Tonnen an Bauschutt, überwiegend aus dem Hochbau, werden zwar knapp 80 Prozent recycelt, aber nur ein Bruchteil davon wird als hochwertiger Betonzuschlagstoff wiedereingesetzt.

Hüttensande aus der Roheisenherstellung und Flugaschen aus der Kohleverstromung werden bisher als Recyclingprodukte in der Zement- und Baustoffindustrie eingesetzt. Mit Blick auf die Schließung der Kohlekraftwerke und der Dekarbonisierung der Industrie werden diese zukünftig in deutlich geringerem Maße oder der nicht mehr zur Verfügung stehen. Auch hierfür braucht es Alternativen wie die Brechsande.

Rezyklierte Gesteinskörnungen wie Betonbrechsande können aufgrund ihrer Zusammensetzung eine bedeutende, aber bislang weitestgehend ungenutzte Sekundärrohstoffquelle darstellen. Nachteil ist, dass sich bei ihrer Verwendung die Frisch- und Festbetoneigenschaften verschlechtern. Daher sind sie derzeit in DIN EN 197-1 als Zementhauptbestandteile nicht definiert.

Mit der vorliegenden Studie zeigt der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien Potentiale für ein Recycling von Betonbrechsanden als Gesteinskörnung im Beton und als Bestandteil von Zementen auf. Mit acht konkret vorgeschlagenen Handlungsfeldern können die Industrie und Verwaltung den Einsatz von Baustoffen ressourceneffizienter gestalten und deren Kreislaufführung stärken. Wir freuen uns, damit einen Beitrag für ein nachhaltigeres und ressourcenschonenderes Bauen leisten zu können.



Dr. Christian Kuehne

Geschäftsführer

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien

1 Einleitung

Die Herstellung von Bauwerken aller Art ist mit einem hohen Ressourcenverbrauch und Emissionen verbunden. Beton als Massenbaustoff benötigt in der Herstellung Gesteinskörnungen und Zement als mineralische Ausgangsstoffe. Die Gewinnung von Sanden und Kiesen aus natürlichen Ablagerungsstätten ist in der Regel mit einem hohen Flächenbedarf und Schallemissionen verbunden. Bei der Herstellung von Zement werden erhebliche Mengen Kohlenstoffdioxid (CO₂) freigesetzt.

Neben der Herstellung bringt auch der Rückbau von Betonbauwerken eine erhebliche Umweltbelastung mit sich, sodass eine möglichst vollständige Kreislaufführung des rückgebauten Betons aus Gründen der Nachhaltigkeit erforderlich ist. Für beide mineralische Ausgangsstoffe ermöglichen die Aufbereitung und das Recycling von Betonabbruchabfällen eine Reduktion des Primärrohstoffverbrauchs.

Insbesondere für die beim Rückbau von Betonbauwerken und der Aufbereitung zu gebrochenen Gesteinskörnungen anfallenden Feinstoffe mit Korndurchmessern < 2 mm, sog. Betonbrechsande, sind bislang in Deutschland keine kreislaufgerechten Verwertungsmöglichkeiten zulässig. Im Vergleich zu groben rezyklierten Gesteinskörnungen weisen Betonbrechsande einen erhöhten Anteil an hydratisiertem Zement auf, der eine Verwendung als Gesteinskörnung unattraktiv werden lässt. Betonbrechsande werden deshalb bislang der sonstigen Verwertung als Verfüllmaterial zugeführt oder deponiert.

Die vorliegende Studie zeigt Potentiale für ein Recycling von Betonbrechsanden als Gesteinskörnung im Beton und als Bestandteil von Zementen auf. Hierfür werden zunächst Grundlagen der Beton- und Zementherstellung vorgestellt, bevor Stoffströme und Eigenschaften von (feinen) rezyklierten Gesteinskörnungen sowie der Stand der Technik für deren Recycling im Betonbau dargestellt werden. Anschließend werden in der Forschung beschriebene Verfahren zur Behandlung von Betonbrechsanden, die entweder eine Verbesserung der Gebrauchseigenschaften als feine rezyklierte Gesteinskörnungen oder eine Verwendung als Zementbestandteil haben, vorgestellt. Auf der Grundlage der zukünftigen Normenentwicklung und der vorgestellten Verfahren werden Szenarien für eine verstärkte Kreislaufführung von Betonbrechsanden vorgestellt, die abschließend in Handlungsempfehlungen münden, um der Maßgabe des Kreislaufwirtschaftsgesetzes zur Wiederverwendung bzw. zum Recycling von mineralischen Abbruchabfällen gerecht zu werden.

Die Studie stützt sich dabei überwiegend auf den in der Literatur beschriebenen Stand der Wissenschaft und Technik. Um praxisnahe Empfehlungen auszusprechen, wurden im Rahmen der Bearbeitung 28 Unternehmen aus den Bereichen Rückbau, Aufbereitung, Zement- oder Betonherstellung in Baden-Württemberg kontaktiert und sieben Gespräche geführt. Die dabei diskutierten Erfahrungen sind umfänglich in die abschließenden Empfehlungen eingeflossen.

2 Mineralische Ausgangsstoffe in der Betonherstellung

Moderne Betone sind Fünfkomponentensysteme, die aus Gesteinskörnungen, Zementen und Wasser sowie Betonzusatzstoffen und -mitteln bestehen. Im Folgenden werden die für die vorliegende Studie relevanten und in den anteilmäßig größten Mengen verwendeten Bestandteile, Gesteinskörnungen und Zemente in Verbindung mit Betonzusatzstoffen, vorgestellt. Für eine tiefergehende Betrachtung wird auf die einschlägige Literatur [siehe [19, 62]] verwiesen.

2.1 Gesteinskörnungen

Gesteinskörnungen bilden den höchsten Volumenanteil im Beton, da sie überwiegend z. B. in Form von Flusskiesen und -sanden vorliegen und ohne großen Aufwand nutzbar gemacht werden können. Die überwiegend verwendeten dichten natürlichen Gesteinskörnungen – auf industriell hergestellte (leichte) Gesteinskörnungen soll an dieser Stelle nicht weiter eingegangen werden, siehe hierfür [19, 62] – weisen hohe Festigkeiten und chemische Beständigkeiten sowie geringe Verformungsneigungen auf, weshalb ein hoher Gesteinskörnungsgehalt im Beton angestrebt wird. Hierfür sind hohe Packungsdichten der Körnungen erforderlich, die in optimierten Korngrößenverteilungskurven (sog. Regelsieblinien) resultieren. Relevant sind zudem ein möglichst großer Größtkorndurchmesser und ein geringer Feinkorngehalt, um mit einer niedrigen spezifischen Oberfläche den Wasserbedarf zur Benetzung der Oberflächen zu reduzieren. Andererseits benötigen Betone für eine ausreichende Frischbetonstabilität einen Mindestmehlkorngehalt, der alle mineralischen Bestandteile mit Korndurchmessern $< 125 \mu\text{m}$ umfasst. Eine weitere wichtige Einflussgröße ist die Kornform der Gesteinskörnung: Je stärker die Körnungen von der idealisierten Kugelform – z. B. in Form von gebrochenen Oberflächen – abweichen, desto größer sind die spezifischen Oberflächen und desto niedriger die erreichbaren Packungsdichten. Gesteinskörnungen haben im Beton i. d. R. einen Volumenanteil von 70 v% bis 80 v%.

Abb. 2.1 zeigt den deutschlandweiten Bedarf an Gesteinskörnungen im Bauwesen. Im Jahr 2019 wurden im Hochbau 61 % der Gesteinskörnungen für Ortbeton und weitere 17 % für Betonfertigteile und Betonwaren eingesetzt. Im Tiefbau hat die Betonherstellung eine untergeordnete Bedeutung. Lediglich jeweils 13 % werden für Betonerzeugnisse und Ortbeton verwendet. Der überwiegende Anteil der Gesteinskörnungen wird in ungebundenen Frostschuttschichten und Tragschichten (40 % bzw. 10 %) eingesetzt* [11].

*Über den Anteil in hydraulisch gebundenen Tragschichten kann keine Aussage getroffen werden, da in [11] nicht zwischen den Bauweisen differenziert wird.

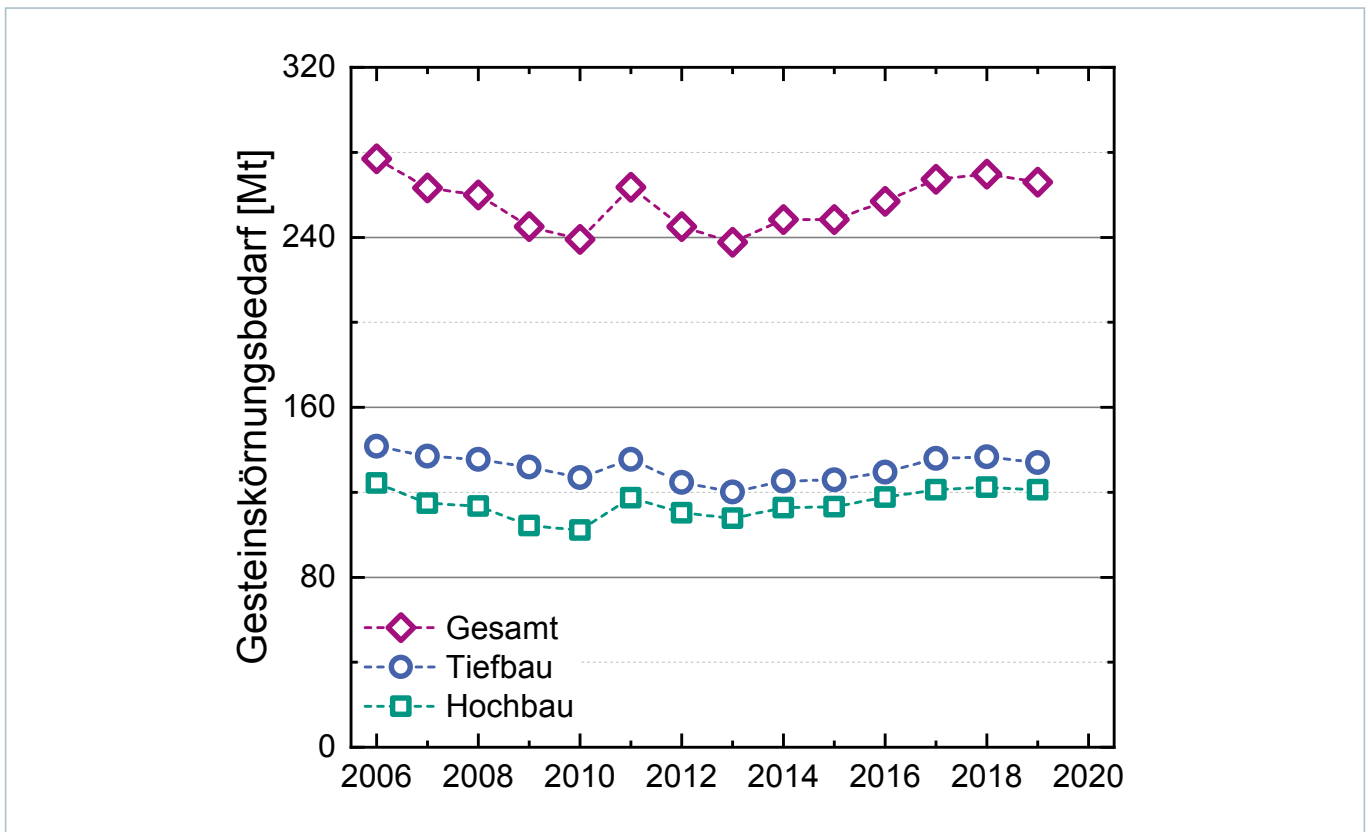


Abb. 2.1: Jährlicher Bedarf an Gesteinskörnungen im Bauwesen in Deutschland [10, 11, 12, 20]

Perspektivisch sind die verfügbaren Mengen insbesondere in Baden-Württemberg stark rückläufig: In den vergangenen Jahren laufen zunehmend mehr Genehmigungen bestehender Sand- und Kiesgruben aus, während aus Gründen der Flächenkonkurrenz oder des Emissions- und Naturschutzes immer weniger neue Förderstätten erschlossen werden [8]. Zur Kompensation werden bestehende Förderstätten vertieft, was jedoch ein Konzept mit dem Umgang mit den dabei häufig anfallenden Waschsclämmen erforderlich macht. Alternativ zu Flusskiesen und -sanden lassen sich gebrochene natürliche Gesteinskörnungen verwenden. Zuletzt wird dem Einsatz rezyklierter Gesteinskörnungen aus Betonabbruch erhebliches Potential zugeschrieben [29].

2.2 Zemente

Die Verbindung der Gesteinskörnungen untereinander erfolgt durch eine Matrix aus Zement und Wasser, die im flüssigen Zustand als Zementleim und im erhärteten Zustand als Zementstein bezeichnet wird. Das Massenverhältnis von Wasser und Zement, der sog. w/z-Wert, definiert maßgebende Betoneigenschaften wie Festigkeit, Verformungsverhalten und Dauerhaftigkeit. Ein ausreichend hoher Wassergehalt ist erforderlich, um die Gesteinskörnung zu benetzen und eine Verarbeitbarkeit des Frischbetons zu gewährleisten. Mit steigendem w/z-Wert steht im Beton jedoch mehr Wasser zur Verfügung, als durch die Hydratation des Zements verbraucht wird. Das überschüssige Wasser bildet Kapillarporen, die die Festigkeit senken und das Eindringen von Fremdstoffen erleichtern.

Der anteilmäßig wichtigste Zementhauptbestandteil ist Portlandzementklinker (kurz: Klinker). Er wird durch das Brennen des Klinkerrohmehls, einer Mischung aus Kalkstein, Ton, Mergel, Quarzsand und Eisenerz, bei 1450 °C hergestellt. Die Anteile hängen dabei von den chemischen Zusammensetzungen der einzelnen Komponenten ab. **Tab. 2.1** zeigt Bandbreiten der erforderlichen Rohmehlzusammensetzung. Durch das Brennen entstehen die relevanten Klinkerphasen Tricalciumsilicat $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C_3S ; Alit], Dicalciumsilicat $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ [C_2S ; Belit], Tricalciumaluminat $3 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ [C_3A] und Calciumaluminatferrit $4 \text{ CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ [C_4AF][7].

Tab. 2.1: Chemische Zusammensetzung von Portlandzementklinkerrohmehl [23]

| Chemisch | Zementchemisch | Anteil [m%] |
|--------------------------------|----------------|-------------|
| CaO | C | 60 – 69 |
| SiO ₂ | S | 20 – 25 |
| Al ₂ O ₃ | A | 4 – 7 |
| Fe ₂ O ₃ | F | 0,2 – 5 |

Neben Portlandzementklinker enthalten Zemente weitere Haupt- und Nebenbestandteile. Während letztere in Mengen geringer als 5 m% einzelne Gebrauchseigenschaften definieren, z. B. in Form von Gips als Erstarrungsregler, liefern Hauptbestandteile mit Anteilen größer als 5 m% einen Beitrag zur Festigkeitsentwicklung. Hauptbestandteile können hydraulisch reaktiv (Klinker, gebrannter Schiefer, kalkreiche Flugaschen), latent-hydraulisch (Hüttensand), puzzolanisch (Flugaschen, Silicastaub, etc.) oder inert (Kalksteinmehl) sein. Werden sie nicht im Zement, sondern während des Betonmischvorgangs hinzugeben, werden sie nach DIN EN 206:2021-06 als Betonzusatzstoffe Typ 1 (inert) oder Typ 2 (puzzolanisch oder latent-hydraulisch reaktiv) bezeichnet. Unabhängig von der Verwendungsart besteht das Ziel, den Portlandzementklinkerbedarf zu reduzieren, da dieser im Vergleich zu alternativen Bindemitteln eine höhere negative Umweltwirkung in Form von CO₂-Emissionen und Energiebedarf während der Produktion aufweist. Für das Brennen des Klinkers werden je Tonne 3,90 GJ thermische Energie benötigt und 0,81 t CO₂ freigesetzt [2019]. Dazu kommt ein elektrischer Energieaufwand von 0,41 GJ, der unter Berücksichtigung einer mittleren CO₂-Emission von 411 g/kWh mit einem weiteren Ausstoß von 0,05 t CO₂ verbunden ist [1, 63]. Alternative Hauptbestandteile weisen eine deutlich bessere Bilanz auf, da in der Regel das Brennen entfällt oder bei deutlich niedrigeren Temperaturen stattfindet. Zudem entspricht die Verwendung von Hüttensanden und Flugaschen, die bei anderen Industrieprozessen als unerwünschte Nebenprodukte entstehen, dem Grundgedanken der Abfallverwertung. Insgesamt wurden in Deutschland im Jahr 2019 24,6 Mt Klinker und 34,2 Mt Zement hergestellt, was einem durchschnittlichen Klinkerfaktor von 0,72 entspricht. Davon war 27,4 % Portlandzement (CEM I), der gem. DIN EN 197-1:2011-11 zu 95 % – 100 % aus Klinker besteht. Portlandkompositzemente (CEM II) mit einem Klinkergehalt von 65 % – 94 % und Hochofenzemente (CEM III) mit einem Klinkergehalt von 5 % – 64 % hatten einen Anteil von 49,1 % bzw. 22,6 % [4]. Aktuelle Bestrebungen der Zementindustrie haben zum Ziel, durch den verstärkten

Einsatz etablierter und neuartiger alternativer Hauptbestandteile diesen Anteil von Klinker am Zement weiter zu reduzieren. Eingesetzt werden die Zemente überwiegend in der Transportbetonherstellung, auf die ca. 56 % der inländischen Zemente entfallen, gefolgt von der Betonfertigteilherstellung mit ca. 22 % [4] (siehe **Abb. 2.2**).

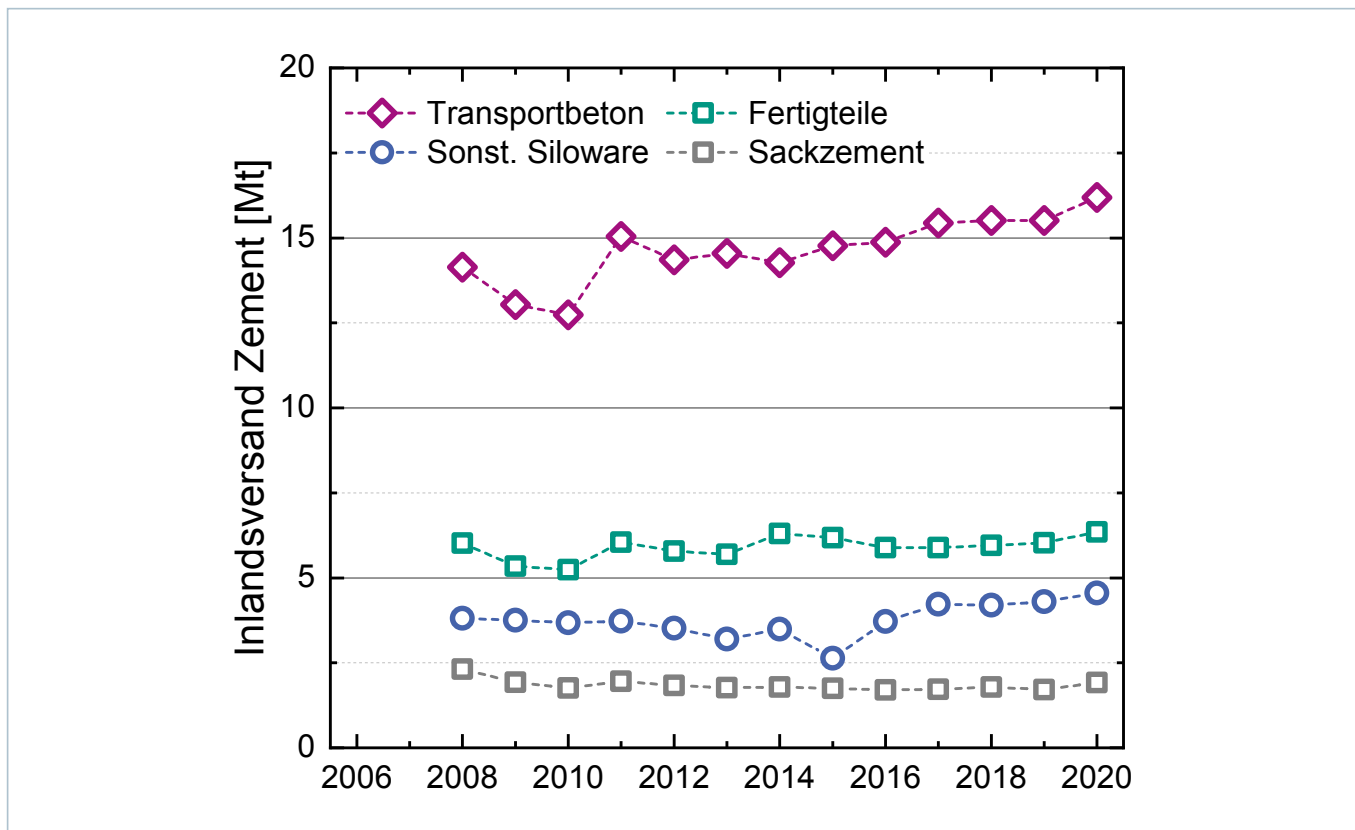


Abb. 2.2: Inlandsversand von Zement in Deutschland ohne Export und Import [2, 3, 5]

3 Derzeitige Kreislaufführung von Betonbrechsanden

Um die beim Rückbau von Betonbauwerken entstehenden Abfallmassen als Gesteinskörnungen zu rezyklieren, sind rechtliche und technische Randbedingungen zu beachten. Im Folgenden werden zunächst die Zielsetzungen der bestehenden Gesetze und Verordnungen hinsichtlich des Betonrecyclings dargestellt, bevor die den Betonbau und das Betonrecycling betreffenden Normen und Richtlinien beschrieben werden. Anschließend werden Stoffströme und Eigenschaften von (feinen) rezyklierten Gesteinskörnungen sowie deren derzeitige Verwendung im Betonbau erläutert.

3.1 Rechtliche und normative Grundlagen

3.1.1 Rechtliche Grundlagen

Abfälle, die beim Bau und Abbruch von Bauwerken entstehen, werden in Abhängigkeit ihrer stofflichen Zusammensetzung gemäß [14] in unterschiedliche Abfallklassen eingeteilt. Für die Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen, zu denen Betonabbruchabfälle gehören, sind die folgenden Abfallklassen mit den jeweiligen Abfallschlüsselnummern relevant [64]:

17 Bau- und Abbruchabfälle (einschließlich Aushub von verunreinigten Standorten)

1701 Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik

170101 Beton

170102 Ziegel

170103 Fliesen und Keramik

170106 Gemische aus oder getrennte Fraktionen von Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik, die gefährliche Stoffe enthalten

170107 Gemische aus Beton, Ziegeln, Fliesen und Keramik mit Ausnahme derjenigen, die unter 170106 fallen

1702 Holz, Glas und Kunststoff

1703 Bitumengemische, Kohlenteer und teerhaltige Produkte

1704 Metalle (einschließlich Legierungen)

1705 Boden (einschließlich Aushub von verunreinigten Standorten), Steine und Baggertgut

1706 Dämmmaterial und asbesthaltige Baustoffe

1708 Baustoffe auf Gipsbasis

1709 Sonstige Bau- und Abbruchabfälle

Um natürliche Ressourcen zu schonen, sollen Abfälle gem. Kreislaufwirtschaftsgesetz [6] vorrangig vermieden, wiederverwendet oder recycelt werden, bevor es zu einer energetischen Verwertung, Verfüllung oder Beseitigung kommt. Die Aufbereitung von mineralischen Bau- und Abbruchabfällen mit dem Ziel der Wiederverwendung bzw. des Recyclings wird in einer Ersatzbaustoffverordnung bzw. Mantelverordnung des Bundes gefordert, wobei Anforderungen und Einschränkungen an die Zusammensetzung und Herstellung der Ersatzbaustoffe festgelegt werden [13].

3.1.2 Normative Grundlagen

DIN EN 206: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

DIN EN 206:2021-06 gilt für Ort- und Transportbetone für Bauteile des Hochbaus und Ingenieurbaus und legt Anforderungen an Betonausgangsstoffe sowie Frisch- und Festbetoneigenschaften fest. Gesteinskörnungen müssen den Anforderungen nach DIN EN 12620 bzw. DIN EN 13055 erfüllen, während Zemente DIN EN 197-1 genügen müssen. Außerdem werden u. a. Betondruckfestigkeitsklassen definiert, bei denen Betone anhand ihrer Druckfestigkeit in Klassen mit Rechenwerten für ihr mechanisches Verhalten eingeteilt werden. Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit von Betonen legt DIN EN 206 Expositionsklassen mit zugehörigen Mindestanforderungen an Betondruckfestigkeit und Zementgehalt sowie höchstzulässige w/z-Werte fest.

DIN EN 197: Zement

DIN EN 197-1:2011-11 legt die Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement fest. Es werden verschiedene Zementarten definiert, die in unterschiedlichen Anteilen aus sog. Haupt- und Nebenbestandteilen bestehen. Zudem sind Anforderungen an die Anfangs- und Normfestigkeit, Erstarrungsbeginn, Raumbeständigkeit, chemische Zusammensetzung und Dauerhaftigkeit festgelegt. DIN EN 197-5:2021-07 beschreibt weitere Zementarten, deren Zusammensetzungen über DIN EN 197-1 hinausgehen. In DIN EN 197-6:2023-12 wird Recyclingmehl als Zementhauptbestandteil sowie dessen Verwendung definiert. Zusammen mit Portlandzementklinker und maximal einem weiteren Hauptbestandteil dürfen hiernach bis zu 20 % Recyclingmehl im Zement verwendet werden. Das Recyclingmehl muss dafür aus Anlagen für die Herstellung von [rezyklierten] Gesteinskörnungen für Beton stammen und Höchstwerte an organischem Kohlenstoff von 0,8 m% sowie Sulfat von 2,0 m% aufweisen.

DIN EN 12620: Gesteinskörnungen für Beton

DIN EN 12620:2008-07 legt Eigenschaften von Gesteinsmehlen und -körnungen für die Verwendung im Beton fest. Ergänzend zu (natürlichen oder industriell hergestellten) Gesteinskörnungen mit einer Mindesttrockenrohdichte von $2,00 \text{ t/m}^3$ werden auch Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen mit Trockenrohdichten zwischen $1,50 \text{ t/m}^3$ und $2,00 \text{ t/m}^3$ beschrieben.

DIN EN 12620 definiert Gesteinskörnungen gemäß ihrer Herkunft und Korngröße: Korngruppen mit einer oberen Siebgröße $D \leq 4 \text{ mm}$ werden als feine Gesteinskörnung und Korngruppen mit einer oberen Siebgröße $D \geq 4 \text{ mm}$ und einer unteren Siebgröße $d \geq 2 \text{ mm}$ werden als grobe Gesteinskörnungen bezeichnet. Rezyklierte Gesteinskörnung hiernach besteht aus Material anorganischem Ursprungs, das im Anschluss an einen Einsatz als Baustoff aufbereitet wurde. Anschließend sind in DIN EN 12620 Anforderungen an geometrische, physikalische und chemische Anforderungen festgelegt.

Rezyklierte Gesteinskörnungen werden gem. DIN 4226-101:2017-08 aufbauend auf DIN EN 12620 in vier Typen mit unterschiedlichen stofflichen Zusammensetzungen eingeteilt. **Tab. 3.1** zeigt Grenzwerte der stofflichen Komponenten sowie ihre Zuordnungen zu Abfallschlüsselnummern nach [14] dar. Stofflich reine Betonsplitt und Betonbrechsande sind demnach als rezyklierte Gesteinskörnungen Typ 1 zu klassieren. Ferner regelt DIN 4226-101 Höchstwerte für gefährliche Substanzen (Eluat- und Feststoffparameter).

Tab. 3.1: Zusammensetzung rezyklierter Gesteinskörnungen Typ 1 – 4 nach DIN 4226-101:2017-08 in Verbindung mit DIN EN 12620:2008-07. AVV: Europ. Abfallverzeichnis [14]

| Bestandteile | Grenzwerte [m%] | | | | | |
|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| | AVV | Abk. | Typ 1 | Typ 2 | Typ 3 | Typ 4 |
| Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton | 170101 | Rc | | | | |
| Ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörnung | 170504 | Ru | ≥ 90 | ≥ 70 | ≤ 20 | ≥ 80 |
| Ziegel-Mauersteine (nicht porosiert) | 170102 | Rb | ≤ 10 | ≤ 30 | ≥ 80 | |
| Klinker, Fliesen | 170103 | | | | | |
| Kalksandstein-Mauersteine | 170107 | | | | | |
| Verschiedene Mauerziegel (porosiert) | 170102 | | | | | |
| Bimsbeton, Porenbeton, nicht schwimmender Porenbeton | 170107 | | | | | |
| Asphalt | 170302 | Ra | ≤ 1 | ≤ 1 | ≤ 1 | ≤ 20 |
| Glas | 170202 | Rg | ≤ 1 | ≤ 2 | ≤ 2 | ≤ 2 |
| Sonstige Materialien | | X | | | | |
| Schwimmendes Material [v%] | | FL | ≤ 2 | ≤ 2 | ≤ 2 | ≤ 5 |

DIN 1045-2: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität

DIN 1045-2:2008-08 beinhaltet nationale Anwendungsregeln zu DIN EN 206. Hinsichtlich der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnungen verweist DIN 1045-2:2008-08 auf die DAfStb-Richtlinie „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ [21] und beschränkt die Verwendung von Rezyklaten auf die Typen 1 und 2 nach DIN 4226-101. In [21] werden Höchstwerte für den Anteil grober rezyklierter Gesteinskörnungen ($d > 2 \text{ mm}$) an der gesamten Gesteinskörnung in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen festgelegt. Die Verwendung von feiner rezyklierter Gesteinskörnung ist nicht zulässig. Die entsprechenden Zuordnungen gibt **Tab. 3.2** wieder. Bezüglich der Feuchtigkeitsklasse WF der DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“ [22] schreibt [21] einen Verwendungsnachweis vor, falls die Alkaliunbedenklichkeit der rezyklierten Gesteinskörnung unbekannt ist. Die Einhaltung der Anforderungen in [21] erlaubt die Bemessung von Betonbauteilen nach den gängigen Bemessungsnormen, da für Betone bis zur Festigkeitsklasse C30/37 die Gültigkeit der geltenden Materialmodelle angenommen wird.

Tab. 3.2: Maximal zulässige Anteile grober rezyklierter Gesteinskörnungen an der gesamten Gesteinskörnung in v% nach [21] für Expositionsklassen gem. DIN EN 12620 und DIN 1045-2 sowie [22] (AKR). Änderungen nach DIN 1045-2:2023-08 in Klammern.

| AKR | DIN EN 206/DIN 1045-2 | Typ 1 | Typ 2 |
|-----|--------------------------------------------------------------------------|---------|---------|
| WO | Carbonatisierung [XC1] | | |
| WF | Kein Korrosionsrisiko [X0] | 45 | 35 |
| | Carbonatisierung [XC1 – XC4] | | |
| | Frostangriff ohne Taumittel [XF1, XF3] hoher Wassereindringwiderstand | 35 [45] | 25 [35] |
| | Chemischer Angriff [XA1] | 25 | 25 |
| WA | Chloridangriff [XD1, XD2, XS1, XS2] | 0 [30] | 0 [20] |
| | Frostangriff mit Taumittel [XF2, XF4] | | |

Ergänzend zu den Anforderungen nach DIN EN 12620 gibt [21] Höchstwerte für die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung in 10 min an, die das Verhalten der Gesteinskörnung im Frischbeton abbilden soll, und erlaubt einen alternativen Betonversuch, um die Frostbeständigkeit der Gesteinskörnung nachzuweisen. Die Erstprüfung von Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 206 und DIN 1045-2 wird um die Prüfung der zeitlichen Veränderung der Konsistenz und die Vorgabe der Festlegung einer Dosieranweisung für Fließmittel erweitert.

Im Rahmen der Neufassung der DIN 1045-2:2023-08 wurden die Anforderungen an rezyklierte Gesteinskörnungen nach [21] in DIN 1045-2 integriert und an den Stand der Technik angepasst. Die zulässigen Austauschraten grober rezyklierter Gesteinskörnung wurden teilweise erhöht (siehe **Tab. 3.2**) und weitere Expositionsklassen aufgenommen. Für die Feuchtigkeitsklasse WA ist die Alkaliunempfindlichkeit nachzuweisen. Abweichend zu [21] dürfen in den Expositions- und Feuchtigkeitsklassen X0-WF und XC1-WO bis zu 20 v% der austauschbaren rezyklierten Gesteinskörnung des Typs 1 einen Korndurchmesser < 2 mm aufweisen, solange die feine rezyklierte Gesteinskörnung aus einer Produktion grober rezyklierter Gesteinskörnung vom Typ 1 stammt.

Wenn gem. DIN 1045-2:2023-08 nur bis zu 25 v% der gesamten Gesteinskörnung ausgetauscht werden, darf die rezyklierte Gesteinskörnung (Typ 1 oder Typ 2) wie natürliche Gesteinskörnung in den Festigkeitsklassen bis C50/60 und den Feuchtigkeitsklassen WO und WF nach [22] ohne Berücksichtigung der o. a. Anforderungen mit Ausnahme von DIN 4226-101 verwendet werden. Für rezyklierte Gesteinskörnung des Typs 1 dürfen zudem feine rezyklierte Gesteinskörnungen verwendet werden, deren Anteil sich an der Gesamtsieblinie orientieren muss.

Alternativ erlaubt DIN 1045-2:2023-08 den Einsatz höherer Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen (inkl. feiner rezyklierter Gesteinskörnungen) als gem. **Tab. 3.2** mit Anteilen bis zu 100 v%. Dafür müssen jedoch besonders festzulegende Anforderungen an Planung, Bauausführung und Kommunikation zwischen den Baubeteiligten eingehalten werden. Die Baustoffe erfordern einen gesonderten Verwendbarkeitsnachweis.

3.2 Stoffströme und Eigenschaften von Betonbrechsanden

3.2.1 Jährlich anfallende Betonbrechsandmengen

Betonbrechsandmengen werden nicht als eigenständige Stoffgruppe in nationalen und internationalen Erhebungen erfasst, da sie stofflich der Abfallkategorie „Beton“ [170101] zugeordnet werden. Der Anteil der Betonbrechsande, der bei der Aufbereitung von Beton zu rezyklierten Gesteinskörnung anfällt, hängt von den Eigenschaften des Ausgangsbetons – wie der Festigkeit und der verwendeten primären Gesteinskörnung sowie den gewählten Aufbereitungsverfahren – ab und liegt in der Praxis bei ca. 20 % – 40 %.

In Deutschland wurden in den vergangenen Jahren jährlich ca. 60 Mt mineralische Bau- und Abbruchabfälle [Beton, Ziegel, Fliesen und Keramik sowie Gemische] erfasst, in der Europäischen Union ca. 300 Mt mit tendenziell steigenden Werten [25, 64] [siehe **Abb. 3.1**].

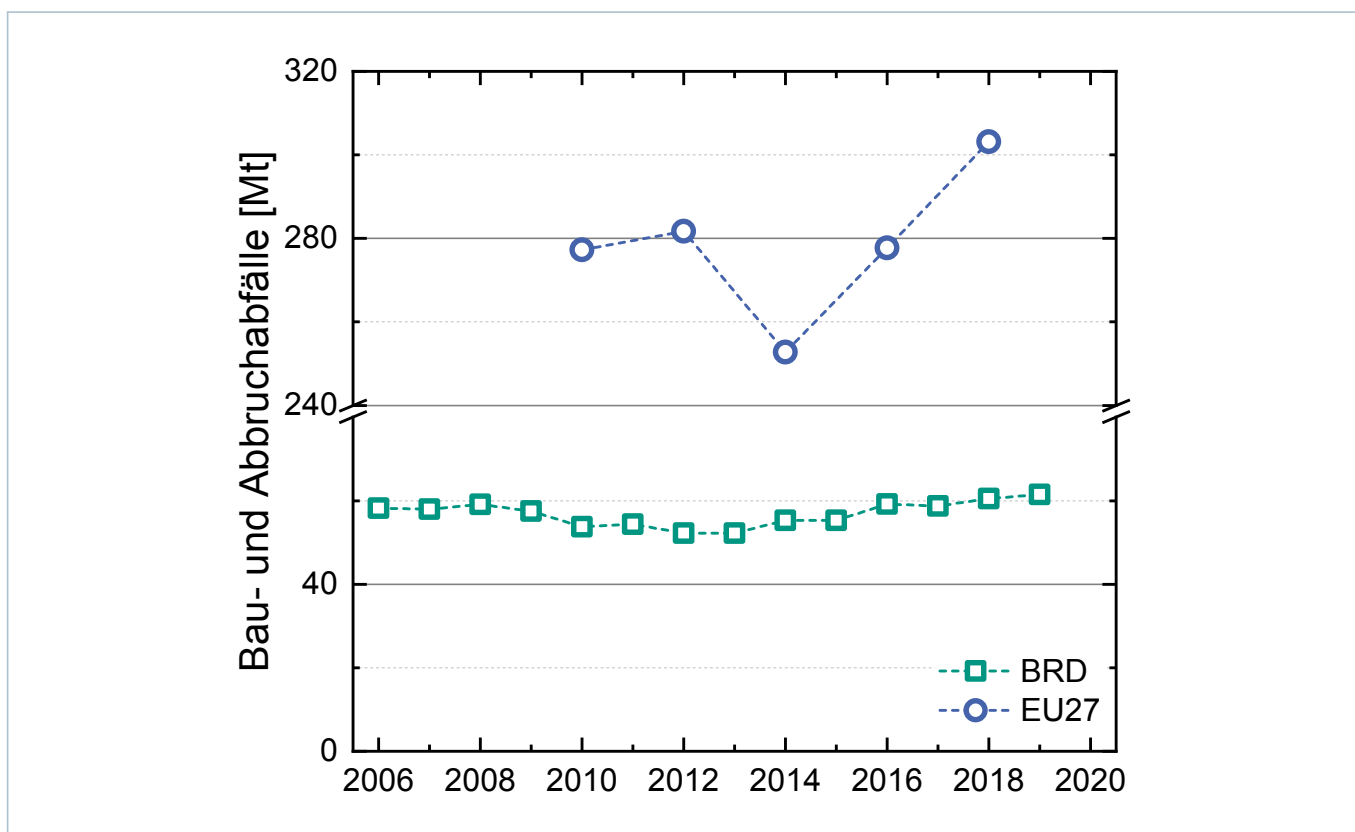


Abb. 3.1: Erfasste Mengen mineralischer Bau- und Abbruchabfälle in Deutschland [BRD] [64] und der Europäischen Union [EU27] [25]

[64] und [25] enthalten keine detaillierten Aufschlüsselungen der einzelnen Abfallströme. Für Deutschland ist eine ausführlichere Darstellung jedoch in Statistiken zur Abfallaufbereitung enthalten [65] [siehe **Abb. 3.2**]. Dabei ist ersichtlich, dass ein erheblicher Anteil der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle [AVV Nr. 1701] nicht aufbereitet oder nicht entsprechend erfasst wird [2018: 23 %]. Jährlich aufbereitete Mengen Beton [AVV Nr. 170101] belaufen sich auf 24 Mt [2020]. Daraus ergeben sich – je nach Aufbereitung – Betonbrechsandmengen von 5 Mt bis 10 Mt, mit potenziell zukünftig steigenden Mengen. Prinzipiell bieten auch Gemische mineralischer Bau- und Abbruchabfälle [AVV Nr. 170107] mit 19 Mt (im Jahr 2020) Potential im Rahmen der vorliegenden Studie. Jedoch sind bei diesen Abfällen die stofflichen Zusammensetzungen variabel und statistisch nicht erfasst, sodass auch keine Auswirkungen auf etwaige Brechsandzusammensetzungen bekannt sind. Daher werden diese Mengen im Folgenden nicht weiter betrachtet.

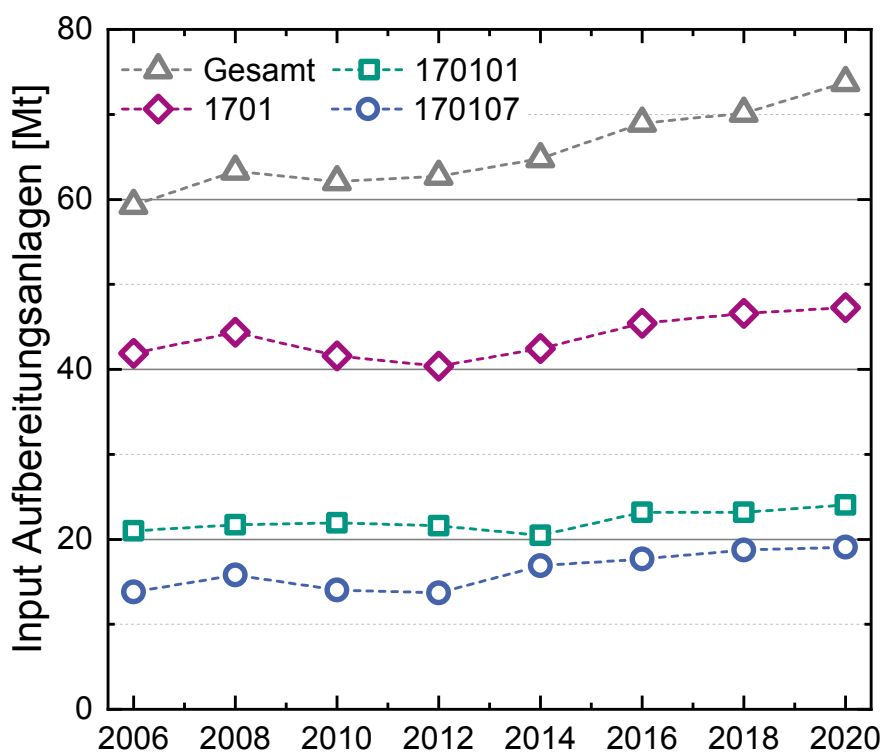


Abb. 3.2: Input in Bauschutttaufbereitungsanlagen in Deutschland [65]

Für Baden-Württemberg wurden keine detaillierten Betonabbruchmengen recherchiert. Aus [66] gehen jährlich steigende Mengen mineralischer Bau- und Abbruchabfälle [AVV Nr. 1701] hervor, die sich zuletzt auf 7,1 Mt (im Jahr 2020) beliefen (**Abb. 3.3**). Unter der Annahme, dass die Abfallfraktion 1701 in Deutschland und Baden-Württemberg ähnlich zusammengesetzt ist, ergibt sich eine Betonmenge von ca. 2,3 Mt Beton, der jährlich landesweit aufbereitet wird. Betonbrechsandmengen lassen sich analog zu 0,5 Mt bis 0,9 Mt p. a. abschätzen. Perspektivisch kann aufgrund steigender Bau- und Rückbautätigkeiten von einer jährlichen Betonbrechsandmenge von über 1 Mt ausgegangen werden.

Aus **Abb. 3.3** geht hervor, dass im Jahr 2020 ca. 79 % der mineralischen Bau- und Abbruchabfälle in mobilen Aufbereitungsanlagen verarbeitet wurden. [66] gibt zudem an, dass (bei insgesamt 11,1 Mt landesweit aufbereiteten Bau- und Abbruchabfällen) 0,4 Mt Erzeugnisse für die Verwendung als Betonzuschlag [sic] hergestellt wurden, davon 95 % in mobilen Anlagen. Im Gegensatz zu stationären Aufbereitungsanlagen lassen sich damit in der Regel weniger hochwertige Rezyklate herstellen, da auf eine Kombinationen von Brech- und Sortierverfahren, die zur Erzielung optimierter Kornformen erforderlich sind, verzichtet wird. Durch die Nähe zwischen Rückbau, Aufbereitung und Neubau können bei mobilen Anlagen jedoch Transportwege eingespart werden [39].

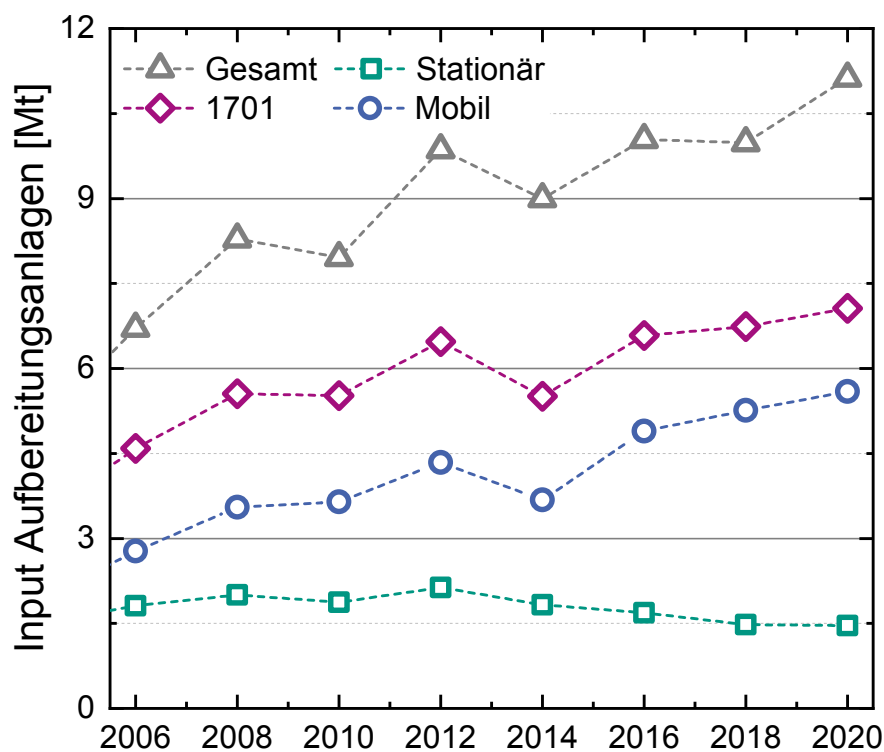


Abb. 3.3: Input in Bauschutttaufbereitungsanlagen in Baden-Württemberg [66]

3.2.2 Chemisch-mineralogische, physikalische und thermische Eigenschaften von Betonbrechsanden

Aufgrund unterschiedlicher Betone aus diversen Ausgangsstoffen und verschiedenen Aufbereitungsverfahren unterliegen die Eigenschaften von Betonbrechsanden starken Streuungen. Dies schlägt sich in variablen Anteilen von erhärtetem Zement und primärer Gesteinskörnung in den Betonbrechsanden nieder. Beton hat üblicherweise einen Gesteinskörnungsanteil von 70 m% – 80 m%. Dadurch, dass sich Zementstein leichter zerkleinern lässt, sinkt der Gesteinskörnungsanteil mit kleiner werdendem Korndurchmesser von zerkleinerten Betonabfällen auf bis zu unter 20 m% ab [31]. Hierfür sind jedoch aufwändige Zerkleinerungs- und Sortierverfahren erforderlich [16, 27]. Üblicherweise liegt der Gesteinskörnungsanteil im Betonbrechsand bei ca. 40 m% – 60 m% [31], wenngleich keine standardisierten Verfahren zur Bestimmung des Gesteinskörnungsgehalts von Betonbrechsanden vorliegen. **Abb. 3.4** zeigt fotografische Aufnahmen von zwei Betonbrechsanden mit Korngrößen zwischen 1 mm und 2 mm im Vergleich zu Rheinsand und Kalksteinsand. Hierbei lassen sich unterschiedliche Zementsteingehalte und Kornformen optisch erkennen.

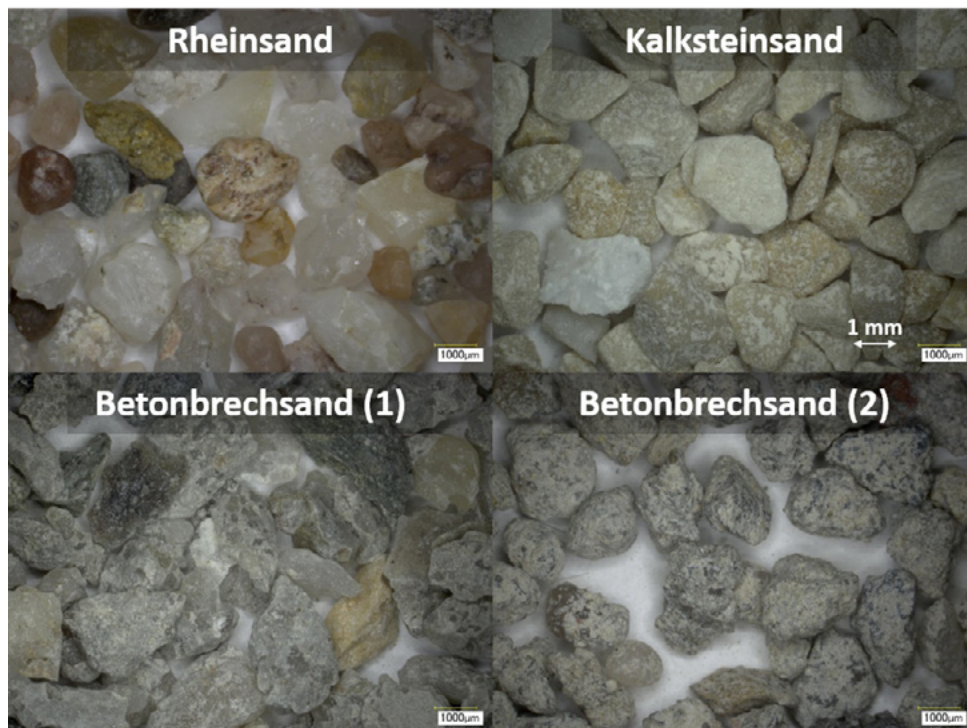


Abb. 3.4: Fotografische Aufnahmen von Rheinsand, Kalksteinsand und zwei Betonbrechsanden mit Korngrößen zwischen 1 mm und 2 mm

Tab. 3.3 zeigt chemische Zusammensetzungen von Betonbrechsanden aus drei unterschiedlichen Studien [9, 28, 30]. Hieraus lassen sich jedoch keine Rückschlüsse auf den Gesteinskörnungsanteil ziehen, da die den Betonbrechsanden zugrundeliegenden Bindemittel – Zemente und Betonzusatzstoffe – bereits unterschiedliche chemische Zusammensetzungen aufweisen. Insbesondere die Art der primären Gesteinskörnung – silikatisch und/oder calcitisch – hat eine große Auswirkung auf die chemische Zusammensetzung der Betonbrechsande, ohne einen Einfluss auf die betontechnologisch relevanten physikalischen Eigenschaften zu haben.

Die wichtigsten physikalischen Eigenschaften von feinen Gesteinskörnungen sind ihre Dichte und Wasseraufnahme. Metastudien ergaben Rohdichten von $\rho_{SSD} = 2,300[101]$ kg/dm^{3*} und $\rho_{ODD} = 2,065[158]$ kg/dm^{3*} und eine Wasseraufnahme nach 24 h von $W_{A_{24h}} = 9,5[26]$ % [53] bzw. $\rho_{SSD} = 2,283[181]$ kg/dm³ und eine Wasseraufnahme nach 24 h von $W_{A_{24h}} = 8,5[22]$ % [40]. Rohdichte und Wasseraufnahme werden durch die Zusammensetzung der Betonbrechsande analog beeinflusst. **Abb. 3.5** zeigt den empirischen Zusammenhang der beiden Kenngrößen für Betonbrechsande als Ergebnis unterschiedlicher Metastudien.

Neben der Zusammensetzung und den physikalischen Eigenschaften von Betonbrechsanden ist hinsichtlich der Aufbereitung das Verhalten bei erhöhten Temperaturen relevant. **Tab. 3.4** gibt einen Überblick über die maßgebenden Zersetzungsreaktionen bei der Temperaturbehandlung von Beton bzw. daraus hergestellten rezyklierten Gesteinskörnungen. Bei Temperaturen bis 100 °C wird freies und physikalisch gebundenes Wasser abgegeben. Insbesondere bei Betonbrechsanden ist eine Trocknung häufig unumgänglich, um Agglomerationen und Lufteinschlüsse zu vermeiden, die bei einer Lagerung in Silos oder Sandboxen sowie bei der Betonherstellung hinderlich sein können. Steigende Temperaturen führen zu einer Dehydratation und damit verbunden zur Zersetzung der Hydratationsprodukte, sodass die Festigkeit der Körner mit steigender Temperatur abnimmt. Während die Dehydratation von Calciumsilikathydrat [C-S-H] sich über einen breiten Temperaturbereich (120 °C – 700 °C) erstreckt und mit fortschreitenden Zersetzungen und Umwandlungsreaktionen verbunden ist, ist die Dehydratation von Calciumhydroxid [CH] in einem Bereich von 450 °C – 550 °C enger eingegrenzt. Zusätzlich zur Dehydratation des Zementsteins finden auch in den Gesteinskörnungen Umwandlungsreaktionen statt. Quarzhaltige silikatische Gesteinskörnung erfährt bei 573 °C eine Phasenumwandlung, die mit einem reversiblen Volumensprung verbunden ist. Die Zersetzung von calcitischer Gesteinskörnung sowie von Calciumcarbonatphasen im Zementstein beginnt bei ca. 650 °C. Hierbei wird CO₂ freigesetzt. Bei einer weiteren Temperatursteigerung beginnt bei ca. 1200 °C die Schmelze des Betons.

* auf wassergesättigter oberflächentrockener Basis
 † auf ofentrockener Basis

Tab. 3.3: Chemische Zusammensetzung von Betonbrechsanden unterschiedlicher Herkunft

| Quelle | Chemische Zusammensetzung [m%] | | |
|--------------------------------|--------------------------------|-------------|-------------|
| | [9] | [28] | [30] |
| Anzahl | 3 | 22 | 4 |
| CaO | 14,8 - 22,8 | 5,0 - 37,5 | 15,5 - 20,8 |
| SiO ₂ | 38,5 - 63,9 | 16,0 - 77,9 | 46,6 - 58,5 |
| Al ₂ O ₃ | 3,6 - 4,6 | 2,1 - 7,0 | 2,5 - 5,6 |
| Fe ₂ O ₃ | 1,5 - 1,9 | 0,9 - 2,9 | 1,6 - 20,6 |
| SO ₃ | 0,3 - 0,7 | 0,3 - 1,0 | 0,4 - 0,6 |
| Na ₂ O | 0,3 - 0,8 | 0,1 - 0,8 | 0,2 - 0,8 |
| K ₂ O | 0,7 - 1,1 | 0,3 - 1,9 | 0,5 - 1,1 |
| MgO | 1,3 - 6,4 | 0,5 - 6,5 | 0,6 - 1,2 |
| P ₂ O ₅ | 0,1 - 0,1 | 0,0 - 0,3 | 0,1 - 0,1 |
| TiO ₂ | 0,2 - 0,3 | 0,1 - 0,4 | 0,1 - 0,2 |
| Cl | 0,0 - 0,1 | 0,0 - 0,1 | - |
| Mn ₂ O ₃ | 0,1 - 0,1 | 0,0 - 0,3 | - |
| MnO | - | - | 0,1 - 0,1 |
| SrO | - | - | 0,1 - 0,1 |
| ZnO | - | - | - |
| ZrO ₂ | - | - | - |
| CO ₂ | 5,5 - 22,2 | 3,0 - 32,7 | - |
| Sulfid | - | 0,0 - 0,1 | - |
| Na ₂ O-Äqu. | - | 0,3 - 2,0 | - |
| C-Org | 0,1 - 1,0 | 0,1 - 1,5 | - |
| H ₂ O | 2,1 - 6,3 | 3,1 - 8,4 | - |
| LOI | 11,8 - 24,4 | - | 17,1 - 21,6 |

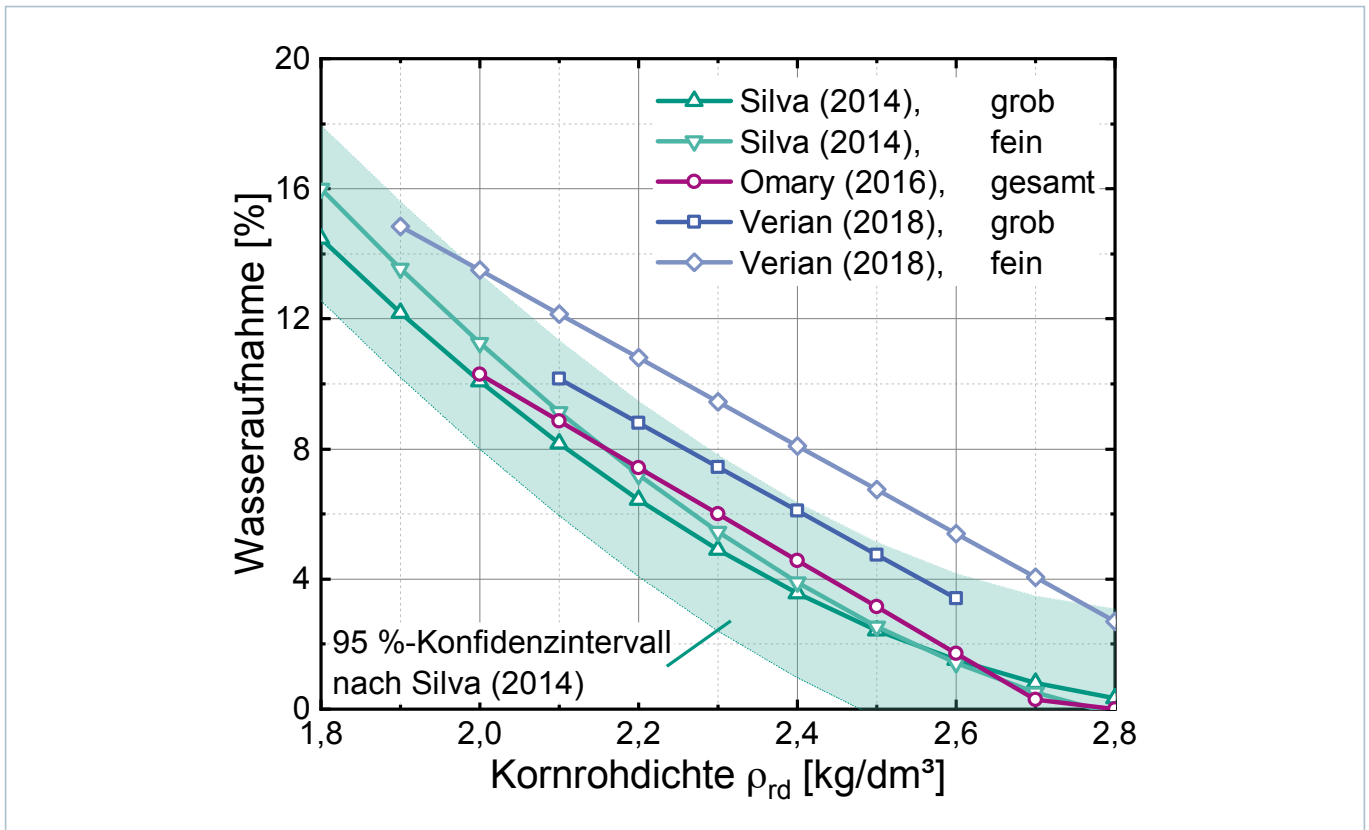


Abb. 3.5: Empirischer Zusammenhang von Kornrohddichte und Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnungen mehrerer Metastudien, in Anlehnung an [42, 53, 69]

Tab. 3.4: Maßgebende Umwandlungsreaktionen bei der thermischen Behandlung rezyklierter Gesteinskörnungen aus Beton [33, 49]

| Temperatur | [°C] | Reaktion | |
|------------|------|------------------------------------------------------|------------------------------------------|
| < | 100 | Abgabe von freiem und physikalisch gebundenem Wasser | |
| 120 | - | 700 | Dehydratation der C-S-H-Phasen |
| 450 | - | 550 | Dehydratation von Calciumhydroxid |
| | 573 | | Quarzsprung |
| 650 | - | 900 | Decarbonatisierung von Calciumcarbonaten |
| > | 1200 | | Schmelze |

3.3 Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen in der Betonherstellung

Einfluss von rezyklierten Gesteinskörnungen auf Frisch- und Festbetoneigenschaften

Der Austausch von dichten fluvialen Gesteinskörnungen durch gebrochene rezyklierte Gesteinskörnungen wirkt sich im Allgemeinen negativ auf die Gebrauchstauglichkeitseigenschaften daraus hergestellter Betone aus.

Im Frischbeton führt der hohe Anteil gebrochener Oberflächen durch die erhöhte spezifische Oberfläche und die reduzierte Eigenpackungsdichte zu einer Verschlechterung der Verarbeitbarkeit. Zusätzlich entzieht der anhaftende Mörtel dem Frischbeton Anmachwasser, sodass sich die Verarbeitbarkeit innerhalb kurzer Zeit weiter verschlechtert. In [21] und DIN 1045-2:2023-08 werden daher Grenzwerte für die zeitliche Abnahme des Betonausbreitmaßes festgelegt. Um die Wasseraufnahme durch die rezyklierte Gesteinskörnung zu kompensieren, werden in der Baupraxis zwei Ansätze verfolgt. Mittels speziell abgestimmter verzögernd wirkender Fließmittel wird eine bessere Verarbeitbarkeit und Konsistenzhaltung erzielt. [21] lässt zudem eine Nachdosierung von Fließmitteln, z. B. für Transportbetone, zu. Als kostengünstiger erweist sich i. d. R. eine zusätzliche Wasserzugabe in Form einer Vornässung der rezyklierten Gesteinskörnung oder als Anmachwasser, um die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung zu kompensieren. Die Menge lässt sich praxisüblich anhand der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung in 10 min abschätzen. Da das zusätzliche jedoch u. U. auf den w/z-Wert angerechnet wird, sind dem Verfahren durch die in den Expositionsklassen gem. DIN EN 206 definierten Höchstwerte für den w/z-Wert Grenzen gesetzt.

Im Festbeton führt der Austausch natürlicher dichter Gesteinskörnungen durch rezyklierte Gesteinskörnungen in der Regel zu einer reduzierten Druckfestigkeit. Ursächlich hierfür ist das Bruchverhalten von Betonen: Risse beginnen i. d. R. in den Kontaktzonen zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung. Hier entstehen einerseits aufgrund unterschiedlicher Materialsteifigkeiten Eigenspannungen und Spannungsspitzen. Andererseits zeichnen sich Kontaktzonen durch einen lokal erhöhten w/z-Wert mit einhergehender gesteigerter Porosität und einer reduzierten Kohäsion aufgrund des einseitigen Hydratphasenwachstums aus. Mit fortschreitender Rissbildung verbinden sich Mikrorisse in den Kontaktzonen zu Trennrissen, die durch die Zementsteinmatrix verlaufen. Dichte Gesteinskörnungen in normalfesten Betonen behindern die Rissausbreitung. Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen weisen eine gesteigerte volumenbezogene Kontaktzonenfläche auf, da einerseits die spezifischen Oberflächen der gebrochenen Gesteinskörnungen erhöht und andererseits Kontaktzonen in den Gesteinskörnern aus dem ursprünglichen, rezyklierten Beton enthalten sind. Zusätzlich sind rezyklierte Gesteinskörnungen infolge der Zerkleinerung des Betonabbruchs in Form von Mikrorissen vorgeschädigt. Die Eigenschaften der Kontaktzonen zwischen Zementstein und rezyklierten Gesteinskörnungen lassen sich durch den Wassergehalt der rezyklierten Gesteinskörnung beeinflussen: Wassersaugende Gesteinskörnung führt i. A. zu dichten Kontaktzonen, während vollständig wassergestättigte Gesteinskörnungen den lokalen w/z-Wert in den Kontaktzonen durch eine Wasserabgabe an den Zementleim

zusätzlich erhöhen können [72]. Rezyklierte Gesteinskörnungen wirken aufgrund ihres Zementsteingehalts zudem weniger rissausbreitungsbehindernd als natürliche Gesteinskörnungen und können sogar rissfördernd sein, wenn höherfeste Betone als der Ursprungsbeton der rezyklierten Gesteinskörnungen hergestellt werden.

Neben der Druckfestigkeit weisen Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen i. d. R. verschlechterte Verformungs- und Dauerhaftigkeitseigenschaften auf. **Tab. 3.5** zeigt die Auswirkungen eines Austauschs von 100 % der groben und feinen Gesteinskörnung durch Rezyklate auf ausgewählte Festbetoneigenschaften. Die Porosität der rezyklierten Gesteinskörnung erleichtert das Eindringen korrosiver Medien in den Beton, insbesondere bei einer schlechten Qualität des rezyklierten Betons. Die Erhöhung des Zementsteingehalts im Beton durch rezyklierter Gesteinskörnung führt i. A. zu einem reduzierten Elastizitätsmodul, einer erhöhten Kriechzahl und einem erhöhten Schwindmaß. Abgesehen von den lastabhängigen Verformungswiderständen (E-Modul und Kriechen) ist es jedoch auch möglich, durch den Austausch von natürlichen durch rezyklierte Gesteinskörnungen verbesserte Festbetoneigenschaften zu erzielen.

Tab. 3.5: Relative Festbetoneigenschaften bei 100% Gesteinskörnungsaustausch durch rezyklierte Gesteinskörnungen (RGK). Angegebene Werte des 95%- bzw. 5%-Vertrauensintervalls unter Annahme eines linearen Zusammenhangs zwischen Austauschrate und Veränderung der Festbetoneigenschaften (0% := 100).

| | | grobe RGK | feine RGK |
|------------------------|------|-----------|-----------|
| Druckfestigkeit | [55] | 56 – 117 | 55 – 107 |
| Spaltzugfestigkeit | [57] | 40 – 114 | 54 – 87 |
| E-Modul | [59] | 44 – 96 | 55 – 98 |
| Kriechzahl | [54] | 100 – 180 | |
| Schwinden | [56] | < 180 | |
| Carbonatisierungstiefe | [58] | 82 – 247 | 148 – 870 |
| Chloriddiffusion | [60] | 90 – 165 | 40 – 295 |

Die genannten Beobachtungen gelten allgemein für Betone mit rezyklierten Gesteinskörnungen. Sie lassen sich auf den Einsatz von Betonbrechsanden übertragen, da diese abgesehen von einer partikelgrößenbedingt höheren spezifischen Oberfläche aus den gleichen Stoffen bestehen – wenngleich in einem für die Betoneigenschaften schlechteren höheren Verhältnis von Zementstein zu ursprünglicher Gesteinskörnung. Dadurch wirken sich Betonbrechsande mit gleicher Tendenz stärker auf Betoneigenschaften aus als Betonsplitt, insbesondere auf dauerhaftigkeitsrelevante Betonwiderstände.

Tab. 3.5 zeigt, dass sich selbst mit einem Austausch der gesamten Gesteinskörnung durch Betonsplitt und Betonbrechsand angestrebte Druckfestigkeiten erreichen lassen. Jedoch ist hierbei zu beachten, dass die den Bemessungsnormen (z. B. DIN EN 1992) zugrundeliegenden empirischen Zusammenhänge zwischen den Festbetoneigenschaften keine Validität mehr besitzen. Dies ist auf die unterschiedlichen Auswirkungen des Gesteinskörnungsaustauschs auf die Druckfestigkeit und die weiteren Festbetoneigenschaften zurückzuführen.

4 Verfahren zur Behandlung von Betonbrechsanden

Da Betonbrechsande in variablen Anteilen aus Zementstein und feiner natürlicher Gesteinskörnung bestehen, schließt ihre Kreislaufführung sowohl eine Verwendung als rezyklierte Gesteinskörnungen im Beton als auch als Bindemittelbestandteil ein. Betonbrechsande lassen auch ohne spezielle Aufbereitung als rezyklierte Gesteinskörnungen verwenden. Um jedoch den negativen Einfluss auf die Betoneigenschaften möglichst zu reduzieren, ist eine gesonderte Aufbereitung angezeigt. Verfahren hierfür werden nachfolgend vorgestellt und bewertet. Anschließend werden Möglichkeiten der Aufbereitung der Betonbrechsande für eine Verwendung als Bindemittel bzw. Zementbestandteil aufgezeigt.

4.1 Verbesserung der Gebrauchseigenschaften feiner rezyklierter Gesteinskörnungen

Für die Verwendung von Betonbrechsanden als rezyklierte Gesteinskörnungen im Beton ist der enthaltene Zementstein aufgrund seiner Porosität und Mikrorisse mit den in Abschnitt 3.3 beschriebenen Auswirkungen auf die Betoneigenschaften die zu bewältigende Herausforderung für einen großmaßstäblichen Einsatz.

Aufbereitungsverfahren zur Verbesserung der Gebrauchseigenschaften feiner rezyklierter Gesteinskörnungen unterteilen sich daher in zwei Kategorien: Einerseits ist es möglich, durch chemische oder physikalische Verfahren den natürlichen Gesteinskörnern anhaftenden Zementstein zu stärken und zu verdichten. Andere, überwiegend mechanische, thermische und chemische Verfahren fokussieren auf einer optimierten Trennung des Zementsteins von den natürlichen Gesteinskörnern. Ein vertiefender Überblick über die dargestellten Verfahren ist in [26, 38, 41, 45, 50, 51, 70] enthalten.

4.1.1 Stärkung des anhaftenden Zementsteins

Verfahren zur Stärkung und Verdichtung des Zementsteinanteils von Betonbrechsanden zielen auf die Abdichtung des Porengefüges und das Verschließen von Mikrorissen ab. Die Zielsetzung der Forschung liegt hierbei überwiegend auf der Optimierung von rezyklierten Gesteinskörnungen im gesamten gebrauchstüblichen Korngrößenbereich, ohne auf Betonbrechsande im Speziellen einzugehen. Eine Übertragbarkeit auf Betonbrechsande ist jedoch i. d. R. möglich.

Eine Möglichkeit der Vorbehandlung von Betonbrechsanden ist das Vermischen mit einer **Bindemittelsuspension** im Vorlauf der eigentlichen Betonherstellung. Hierbei werden zunächst die einzelnen Körner mit einer zusätzlichen Bindemittelschicht ummantelt, wodurch eine Verbesserung der Kornform und des Verbunds zwischen dem behandelten Gesteinskorn und dem späteren Zementstein erreicht wird. Werden ausreichend feine Bindemittel verwendet, können diese in die Poren und Mikrorisse eindringen und diese verschließen. Infrage kommen hochfeste Zemente oder Betonzusatzstoffe wie Hüttsand, Flugaschen oder Silicastaub. Insbesondere bei letzterem wurden zusätzliche positive Effekte auf das Festigkeitsverhalten der späteren Betone beobachtet. Jedoch ist die Ummantelung der einzelnen Körner zeit-, energie- und insbesondere materialaufwändig. Der Suspensionsbedarf steigt mit zunehmender spezifischer Oberfläche des aufzubereitenden Materials an. Eine Möglichkeit der Weiterentwicklung dieses Verfahrens ist die Herstellung von zementgebundenen Granalien aus Betonbrechsand. Hierzu konnten jedoch keine erprobten Verfahren identifiziert werden.

Anstatt mit Bindemittelsuspensionen lassen sich rezyklierte Gesteinskörnungen mit wässrigen Lösungen, z. B. **Natronwasserglas** oder organischen **Polymeren** – häufig in Kombinationen – behandeln. Diese können sich in den Poren ablagern und diese verschließen oder die rezyklierten Gesteinskörner oberflächlich hydrophobieren. Insbesondere Letzteres ist von begrenzter Dauer und kann negative Auswirkungen auf die späteren Betoneigenschaften haben.

Derartige negative Wechselwirkungen lassen sich vermeiden, wenn die abgelagerten Materialien als Betonbestandteile etabliert sind, was für Calciumcarbonat der Fall ist. Hierfür gibt es zwei grundsätzliche Herangehensweisen: Biodisposition und Carbonatisierung. Die **Ausfällung von Calciumcarbonat** macht sich den Stoffwechsel unterschiedlicher Mikroorganismen, die u. a. Kohlenstoffdioxid ausscheiden, zunutze. Letzteres reagiert in calciumhaltiger Umgebung zu Calciumcarbonat. Durch die örtliche Begrenzung dieser Reaktion auf die Poren und Mikrorisse eines rezyklierten Gesteinskorns werden diese innerhalb einiger Tage abgedichtet und verschlossen. Außerdem lassen sich oberflächlich angelagerte Feinstoffe an größere Gesteinskörner binden. Die Auswahl effektiver Mikroorganismen, Carbonat- und Calciumquellen und die damit verbundenen spezifischen Umgebungsbedingungen wie pH-Wert der Porenlösung oder Temperatur bedarf jedoch noch zusätzlicher Forschungsarbeit.

Dagegen ist die **Carbonatisierung** von rezyklierten Gesteinskörnungen vergleichsweise gut erforscht [35, 44, 67]. Hierbei reagieren Phasen des Zementsteins mit Kohlenstoffdioxid aus der Umgebungsluft zu Calciumcarbonat. Die wichtigste Reaktion ist die Carbonatisierung von Calciumhydroxid, wengleich in geringerem Umfang auch andere Zementsteinphasen carbonatisieren können. Da sich das Calciumhydroxid überwiegend in den Poren und Kontaktzonen des Zementsteins befindet, werden diese durch die Carbonatisierung verdichtet und verstärkt. Die Effektivität der Carbonatisierung hängt von mehreren Parametern ab. Die natürliche Carbonatisierung, die aufgrund der Depassivierung des Bewehrungsstahls in Betonbauwerken eine unerwünschte Reaktion darstellt, benötigt bei der CO_2 -Konzentration

von 0,4 % in der Atmosphärenluft mehrere Jahre, um relevante Betontiefen im Millimeterbereich zu erreichen. Analog zu Laborversuchen zur Bestimmung des Carbonatisierungswiderstands von Betonen lassen sich die chemischen Reaktionen beschleunigen: Eine Erhöhung der CO_2 -Konzentration bewirkt einerseits eine schnellere Carbonatisierung des Calciumhydroxids. Zudem korreliert die Reaktivität des Calciumsilikathydrats positiv mit steigender CO_2 -Konzentration, sodass hierdurch zusätzliche positive Effekte hervorgerufen werden können. Andererseits wurden bei sehr hohen CO_2 -Konzentrationen negative Effekte auf die physikalischen Eigenschaften behandelter Gesteinskörnungen beobachtet. Effektive CO_2 -Konzentrationen liegen im Bereich von 20 % – 50 % [44] bzw. 40 % – 60 % [36]. Desweiteren lässt sich die Carbonatisierungsgeschwindigkeit durch eine moderate Gasdruckerhöhung im Bereich von 10 kPa – 500 kPa beschleunigen. Zudem haben sich übliche klimatische Randbedingungen (20 °C – 30 °C und 40 % – 70 % r. F.) als effektiv erwiesen. Da die Carbonatisierung mit zunehmender Expositionsdauer kontinuierlich fortschreitet, wirken sich längere Zeiträume positiv auf die Effektivität der Behandlung aus. Jedoch nimmt die Carbonatisierungsgeschwindigkeit mit fortschreitender Carbonatisierung ab, da das sich bildende Calciumcarbonat in den Poren das Eindringen von CO_2 zunehmend erschwert. Innerhalb der ersten Stunde nach Exposition findet der überwiegende Teil der CO_2 -Aufnahme statt, während die Reaktion nach einem Tag in eine stabile Phase mit sehr langsamen Carbonatisierungszuwächsen übergeht. Weiterentwicklungen des Carbonatisierungsverfahrens beinhalten eine vorgeschaltete Sättigung der Gesteinskörnung mit zugesetztem Calciumhydroxid oder die Verwendung von Wasser als CO_2 -Träger.

4.1.2 Entfernung des anhaftenden Zementsteins

Methoden zur Entfernung des Zementsteins von der ursprünglichen Gesteinskörnung zielen auf eine möglichst sortenreine Rückgewinnung natürlicher Kiese und Sande ab, die ohne oder nur mit geringen Einschränkungen für die Herstellung neuer Betone verwendet werden können.

Der grundlegende Prozess hierfür ist ein optimiertes **Brechen** bzw. **Mahlen** der rezyklierten Gesteinskörnungen. Nach dem Rückbau liegen Betonabbruchmassen i. d. R. nicht in einer brauchbaren Kornverteilung vor. In einem weiteren Zerkleinerungsschritt werden packungsdichteoptimierte Kornabstufungen hergestellt. Durch die Anwendung optimierter Verfahren lässt sich dabei die Kornform zu möglichst kubischen oder sphärischen Körnern verbessern. Damit verbunden ist eine verstärkte Abrasion des Zementsteins. Zur Anwendung kommen überwiegend rotierende Mühlen, während mit klassischen Brechern keine verbesserten Kornformen erzielt werden. Dabei machen sich die Verfahren unterschiedliche Festigkeiten des Zementsteins und der natürlichen Gesteinskörnung zu eigen und sind daher insbesondere bei niederfesten Betonen effektiv. Insbesondere bei normal- und hochfesten Betonen kann eine zusätzliche Schwächung des Zementsteins zielführend sein.

Durch eine Kombination des Mahlens mit einer vorangehenden **thermischen Behandlung** lässt sich aufgrund der bei hohen Temperaturen fortschreitenden Zersetzung des Zementsteins und der damit verbundenen Schwächung der Kohäsion eine bessere Trennung der natürlichen Gesteinskörnung vom anhaftenden Zementstein erzielen. Zusätzlich entstehen durch die unterschiedlichen Temperatúrausdehnungskoeffizienten Eigenspannungen zwischen Zementstein und Gesteinskörnung, die Risse in den Kontaktzonen zur Folge haben. Für die thermische Behandlung sind Temperaturen im Bereich 250 °C – 500 °C ausreichend. Höhere Temperaturen können zu Schädigungen der natürlichen Gesteinskörnung führen, wenngleich die Festigkeit des Zementsteins mit steigender Temperatur ab ca. 700 °C so stark abnimmt, dass die die Trennung der Komponenten durch ein einfaches Sieben erfolgen kann. Die Wärmebehandlung kann in klassischen Öfen erfolgen. Als zielführend hat sich auch eine Mikrowellenbehandlung erwiesen, die sich die erhöhte Porosität der Kontaktzonen zu eigen macht, um an diesen Stellen Temperaturgradienten und Eigenspannungen zu erzeugen.

Alternativ lässt sich die Zementsteinmatrix durch eine **Säurebehandlung** schwächen. Hierfür eignen sich anorganische [Salzsäure, HCl; Schwefelsäure, H₂SO₄; Salpetersäure, HNO₃; Phosphorsäure, H₃PO₄] und organische [Essigsäure, C₂H₄O₂; Tanninsäure, C₇₆H₅₂O₄₆] Säuren. Hierbei werden die Hydratphasen des Zementsteins aufgelöst, um eine Trennung zu erzielen. Dabei ist auf eine Kompatibilität zwischen der eingesetzten Säure und der natürlichen Gesteinskörnung des aufzubereitenden Betonabbruchs zu achten, um eine Auflösung letzterer zu vermeiden.

Im Anschluss an die Schwächung des Zementsteins muss dieser von der primären natürlichen Gesteinskörnung getrennt werden. Aufgrund der reduzierten Kohäsion ist hierfür i. d. R. kein Brechen oder Mahlen erforderlich. Stattdessen reichen oft Siebungen oder Windsichtungen. Vereinzelt wurden auch Ultraschallverfahren erfolgreich eingesetzt.

4.1.3 Bewertung der Verfahren

Tab. 4.1 zeigt ausgewählte aus der Literatur identifizierte Auswirkungen unterschiedlicher Aufbereitungsverfahren auf die Rohdichte und Wasseraufnahme von Betonbrechsanden. Ein quantitativer Vergleich der unterschiedlichen Verfahren wird durch die große Variabilität der aufbereiteten rezyklierten Gesteinskörnungen und verwendeten Referenzprüfungen erschwert. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass alle betrachteten Verfahren hinsichtlich der Verbesserung der Gebrauchseigenschaften rezyklierter Gesteinskörnungen effektiv sind. Für eine Bewertung der Aufbereitungsverfahren von Betonbrechsanden sind jedoch insgesamt nur wenige Daten und Kriterien vorhanden, sodass im Folgenden Hypothesen aufgestellt werden, die durch zukünftige Forschung validiert werden müssen.

Verfahren zur Stärkung des anhaftenden Zementsteins unterscheiden sich in den aufgebrauchten Materialien. Insofern bestimmen Verbrauchskosten maßgeblich den Aufwand und die Effektivität der Aufbereitungsverfahren, während Anschaffungs-, Personal- und Kapitalkosten in den Hintergrund treten und nur bei einer genaueren Betrachtung der einzelnen Verfahren von Relevanz sind [41]. Da mit kleiner werdendem Korndurchmesser der Zementsteinanteil in der rezyklierten Gesteinskörnung zunimmt, steigt der Bedarf an Verbrauchsmaterialien für die Behandlung von Betonbrechsanden an. Eine Polymerbehandlung ist ebenso wie die Natronwasserglasbehandlung im Vergleich mit anderen Verfahren ineffizient, weil diese Materialien gesondert hergestellt werden müssen. Die Ummantelung der Gesteinskörnungen in Bindemittelsuspensionen ist effizienter, sofern Bindemittel verwendet werden, die ohnehin in der Betonherstellung verbreitet sind. Jedoch weisen damit hergestellte Betone in Summe einen erhöhten Bindemittelgehalt auf, was angesichts des hohen CO_2 -Ausstoßes der Zementherstellung und der perspektivischen Verknappung von Hütten- und Flugaschen negativ zu bewerten ist. Zudem ist die Übertragbarkeit dieses Verfahrens auf Betonbrechsande zweifelhaft, weil eine Ummantelung sehr feiner Körner aufgrund der erforderlichen Mindestschichtdicke an physikalische Grenzen stößt. Insofern hat sich die Carbonatisierung von rezyklierten Gesteinskörnungen als vielversprechendes Verfahren erwiesen. Das Verbrauchsmaterial – CO_2 – ist als unerwünschter schädlicher Abfallstoff, für den es keine umfassende Verwendung gibt, perspektivisch in großen Mengen mit negativen Rohstoffkosten verfügbar. Bei einer effektiven Monetarisierung der Emissionen kann durch die Carbonatisierung ein erheblicher Anteil des Mehraufwands für die Aufbereitung kompensiert werden. Die vielversprechenden Potentiale des Carbonatisierungsverfahrens für Betonbrechsande wurde bereits in **Tab. 4.1** gezeigt. Hierbei wirkt sich einerseits der erhöhte Zementsteinanteil positiv auf die relative Stärkung der Betonbrechsande aus. Andererseits sind für die Carbonatisierung von Betonbrechsanden deutlich geringere Dauern erforderlich als für Betonsplitt, sodass sie innerhalb weniger Stunden vergütet werden können. Einschränkungen bestehen beim Carbonatisierungsverfahren, wenn in den Betonbrechsanden nicht genügend reaktionsfähiges Calciumhydroxid vorhanden ist – z. B. aufgrund enthaltener puzzolanischer Bindemittel oder eines erhöhten Anteils an Ziegelbruch. Hier kann eine Vorbehandlung mit Calciumhydroxid Abhilfe schaffen, was jedoch mit zusätzlichem Aufwand verbunden ist. Es ist anzunehmen, dass die Ausfällung von Calciumcarbonat unter der Annahme einer Wiederverwendung der Mikroorganismen ähnlich effizient wie das Carbonatisierungsverfahren ist*, wobei sie positiv auf einen reduzierten Calciumhydroxidgehalt in den Betonbrechsanden reagiert und zusätzlich durch die Agglomeration von Feinststoffen die Korngrößenverteilung der Betonbrechsande positiv verändert wird.

* vergleichende Berechnungen zur Wirtschaftlichkeit liegen nicht vor

Tab. 4.1: Einfluss verschiedener Aufbereitungsverfahren für Betonbrechsande auf Rohdichte und Wasseraufnahme (WA). D: Größtkorndurchmesser, u: unbehandelt, b: behandelt. Methoden: Säure (S), Carbonatisierung (C), thermisch (T), Puzzolanimprägung (P).

| Methode | D | Rohdichte [kg/dm ³] | | WA [m%] | | Quelle |
|----------------|------|------------------------------------|------|------------|-----|--------|
| | [mm] | u | b | u | b | |
| S | 5 | | | 5,8 | 1,9 | [61] |
| S | 3,15 | | | 11,2 | 9,0 | [70] |
| S+T | 4,75 | 1,28 | 1,79 | 7,0 | 1,9 | [46] |
| C | 1,25 | 2,46 | 2,59 | 9,4 | 6,3 | [74] |
| | 2,5 | 2,50 | 2,60 | 7,8 | 5,6 | |
| C | 2,5 | 2,53 | 2,65 | 8,1 | 5,8 | [73] |
| | | 2,49 | 2,63 | 8,7 | 6,4 | |
| C | 4,75 | 2,64 | | 4,4 | 1,7 | [43] |
| C | 2,2 | 2,45 | 2,51 | 5,5 | 3,9 | [18] |
| C | 6,0 | 2,64 | 2,79 | 7,9 | 5,5 | [24] |
| C | 4,75 | 2,49 | 2,56 | 5,3 | 3,9 | [52] |
| P ^f | | | 2,51 | | 4,0 | |
| P ^s | | | 2,50 | | 4,2 | |
| P ⁿ | | | 2,50 | | 4,2 | |

^f Flugasche

^s Silicastaub

ⁿ Nanosilicasuspension

Der Aufwand für die Trennung der primären natürlichen Gesteinskörnung vom anhaftenden Zementstein hängt von den Eigenschaften des aufzubereitenden Materials und den angestrebten Materialeigenschaften ab, sodass einerseits Steuerungsmöglichkeiten bestehen, andererseits allgemeingültige Aussagen erschwert werden. Offensichtlich bringen große Festigkeitsunterschiede zwischen Zementstein und primärer Gesteinskörnung, die vorrangig einer intensiven Aufbereitung bedürfen, eine leichtere Trennung der Komponenten mit sich. Zudem steigt der Aufwand mit kleiner werdenden angestrebten Korngrößen erheblich an, da die spezifischen Oberflächen der primären Gesteinskörnungen zunehmen. Außerdem ändert sich das Volumenverhältnis von Zementstein und primärer Gesteinskörnung ungünstig. Während spezielle Brecher oder Mühlen in bestehende Zerkleinerungsanlagen von Bauschutt integriert werden können, bedürfen thermische Verfahren ebenso wie Säure- oder Ultraschallbäder spezieller technischer Ausrüstungen, wodurch insbesondere bei letzteren die Effizienz sinkt. Umwelt- und arbeitsschutztechnisch sind bei mechanischen Verfahren Staubentwicklungen und bei Säurebädern ätzende Flüssigkeiten problematisch. Zudem sind Säuren großmaßstäblich aufwändig herzustellen. Allen Verfahren zur optimierten Trennung von primärer Gesteinskörnung und Zementstein ist gemein, dass letzterer auch nach der Aufbereitung nicht als rezyklierte Gesteinskörnung geeignet ist und daher als Reststoff anfällt.

4.2 Aufbereitung von Betonbrechsanden als Bindemittelbestandteil in der Betonherstellung

4.2.1 Gemahlener Betonbrechsand als Betonzusatzstoff bzw. Zementhauptbestandteil

Analog zu Kalksteinmehl lässt sich Betonbrechsand nach einer Aufmahlung auf Korngrößen $< 125 \mu\text{m}$ als inerter Betonzusatzstoff bzw. Zementhauptbestandteil verwenden. Bei der Mahlung sind geeignete Mühlen zu verwenden, um die Emission von gesundheitsschädlichen Stäuben zu vermeiden. Im Bindemittel haben die Partikel eine Füllerwirkung, wodurch die Packungsdichte verbessert werden kann. Außerdem wurde beobachtet, dass in vielen Bauteilen Zementpartikel nicht vollständig hydratisieren und nach einer Aufmahlung bei Verwendung als Bindemittel eine geringfügige hydraulische Reaktivität zeigen [27]. Bei Austauschraten von bis zu 30 m% des Portlandzements bzw. Klinkers können unter Berücksichtigung eines überwachten Stoffstroms von Betonbrechsanden mit ausreichender Qualität Zementfestigkeiten und Frischbetoneigenschaften erzielt werden, die nur geringfügig unterhalb von Portlandzementen liegen und entsprechende Zulassungskriterien erfüllen. Jedoch weisen Betone mit aufgemahlenem Betonbrechsand als Zementhauptbestandteil unzulängliche Dauerhaftigkeitseigenschaften auf, sodass insbesondere bei hohen Austauschraten nur die Herstellung von Innenbauteilen, die keiner Frost-Tausalzexposition unterliegen, möglich ist [68].

Zemente mit gemahlenden Betonbrechsanden als Hauptbestandteil sind derzeit nicht nach DIN EN 197-1 oder anderen Zementnormen genormt, sodass für die Verwendung bis zur Einführung von DIN EN 197-6 eine Zulassung im Einzelfall (ZiE) oder eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ) erforderlich ist. Erste Produkte mit gemahlenem Betonbrechsand als Nebenbestandteil (Anteil $< 5 \text{ m}\%$) in Portlandhüttenzementen sind bereits in Deutschland verfügbar.

4.2.2 Carbonatisierter Betonbrechsand als Betonzusatzstoff bzw. Zementhauptbestandteil

Analog zur Verbesserung der Gebrauchseigenschaften von Betonbrechsanden zur Verwendung als rezyklierte Gesteinskörnung können auch gemahlene Betonbrechsande, die als Betonzusatzstoffe oder Zementhauptbestandteile verwendet werden sollen, carbonatisiert werden. Aufgrund der geringen Partikelgrößen kann eine effektive Behandlung innerhalb weniger Minuten erfolgen. Die Carbonatisierung wirkt sich positiv auf die Porosität der Brechsandpartikel aus, wobei das entstehende Calciumcarbonat als Zementhauptbestandteil etabliert ist. Zusätzlich entsteht bei der Carbonatisierung von Calciumsilicat(aluminat)-hydrat ein amorphes Alumosilicagel mit einer hohen spezifischen Oberfläche. Dieses ist puzzolanisch reaktiv, sodass sich carbonatisierte gemahlene Betonbrechsande als Zementhauptbestandteil analog zu Portlandkompositzementen mit Flugasche und Kalkstein verwenden lassen [32, 71]. Verfahren zur Umsetzung im Technikumsmaßstab sind derzeit in Entwicklung.

4.2.3 Thermisch aktivierter Betonbrechsand als Betonzusatzstoff bzw. Zementhauptbestandteil

Werden Betonbrechsande zusätzlich zu einer Mahlung thermisch behandelt, entstehen aus dem Zementstein dehydrierte Phasen, die bei erneutem Kontakt mit Wasser eine hydraulische Reaktivität zeigen. Im Vergleich zu thermisch unbehandelten Betonbrechsanden nimmt hierbei der Einfluss der Korngrößenverteilung ab – selbst für grobe Verteilungen mit Größtkorndurchmessern von 250 µm werden gute Ergebnisse erzielt [23] –, während die Aufbereitungstemperatur einen signifikanten Einfluss auf die Bindemittleigenschaften hat. Für die Reaktivität sind die Menge und Zusammensetzungen der dehydrierten Phasen entscheidend. Schon bei Temperaturen ab 300 °C dehydriert ein Teil der Calcium-Silicat-Hydrat-Phasen (C-S-H) im Zementstein und kann bei Wasserzugabe erneut C-S-H-Kristalle formen. Die Dehydratation von C-S-H ist bei ca. 650 °C abgeschlossen, weshalb Temperaturen zwischen 600 °C und 700 °C in vielen Forschungsarbeiten als zielführend angesehen werden [15]. Eine genaue Wahl der Temperatur hängt jedoch von weiteren Aufbereitungsparametern wie der Erwärmungs- und Abkühlungsgeschwindigkeit oder der Bauart der Öfen ab. Dehydriertes C-S-H ist im Gegensatz zu Zementklinker metastabil und feinporig und hat deshalb einen höheren Wasseranspruch und bindet schneller ab als Portlandzement. Geeignete Erstarrungsregler konnten bislang nicht identifiziert werden. Das ebenfalls im Zementstein enthaltene Calciumhydroxid (CH) dehydriert bei Temperaturen um 500 °C. Das entstehende Calciumoxid reagiert innerhalb kurzer Zeit nach Wasserzugabe erneut zu Calciumhydroxid, wodurch sich jedoch die Verarbeitbarkeit daraus hergestellter Betone verschlechtert. Bei rückgebauten Betonbrechsanden ist der Calciumhydroxidgehalt jedoch durch natürliche Carbonatisierung reduziert. Das entstehende Calciumcarbonat zersetzt sich erst bei Temperaturen zwischen 700 °C und 800 °C, wobei neben dem gasförmigen CO₂ ebenfalls reaktives Calciumoxid entsteht. Aus diesem Grund sind Behandlungstemperaturen über 700 °C zu vermeiden. Mit thermisch aufbereitetem Zementstein als Bindemittel lassen sich Festbetoneigenschaften erzielen, die nur geringfügig schlechter als die mit Portlandzementen erreichbaren sind. Jedoch wirkt sich die in Betonbrechsanden enthaltene inerte primäre Gesteinskörnung negativ auf die Eigenschaften der Betonbrechsande nach der thermischen Behandlung aus, da dadurch der reaktivierbare Anteil sinkt. Deshalb ist eine möglichst umfangreiche Trennung von primärer Gesteinskörnung und Zementstein anzustreben. Um die Verschlechterung der Bindemittleigenschaften zu reduzieren, ist eine Verwendung als Kompositbindemittel zusammen mit Portlandzementklinker angezeigt [15]. Kompositzemente mit einem Anteil von bis zu 50 m% thermisch aufbereitetem Betonbrechsand als Hauptbestandteil sind derzeit technisch realisierbar, wobei insbesondere die Dauerhaftigkeit daraus hergestellter Betone nur vereinzelt untersucht wurde [17].

4.2.4 Betonbrechsand als Rohmehl in der Zementherstellung

Reiner hydratisierter Zement lässt sich mit allenfalls geringen Beimischungen vollständig als Rohmehl in der Zementherstellung verwenden. Nach einer thermischen Behandlung bei den üblichen Klinkerbrenntemperaturen von 1450 °C entstehen aus der Schmelze die relevanten Klinkerphasen. Vereinzelt wurden auch geringere Temperaturen als zielführend definiert [37]. Da reale Betonbrechsande jedoch in nicht unerheblichem Umfang natürliche primäre Gesteinskörnungen enthalten, ist insbesondere das erforderliche Verhältnis von Calcium und Silicium ungünstig verschoben, sodass aus der Schmelze von Betonbrechsanden keine reaktiven oder nur minderreaktive Phasen entstehen. Die einzige Ausnahme bildet hier sog. „Completely Recyclable Concrete“ (CRC), bei dem die Zusammensetzung der gesamten mineralischen Betonbestandteile in Form einer Verwendung eines Gemischs aus calcitischen und quarzitäen Gesteinskörnungen im Rahmen des Herstellungsprozess so gewählt wird, dass sie nach dem Rückbau einem Klinkerrohmehl entspricht [37, 47, 48]. Da die Konzeption von CRC vergleichsweise neu ist und dementsprechend bislang weder im Bau noch im Bestand eine Rolle spielt, können vorhandene Betonbrechsande nur einen Teil des Rohmehls ersetzen. Der Betonbrechsandanteil muss dabei so gewählt werden, dass die chemische Zusammensetzung der resultierenden Rohmehle die in Abschnitt 2.2 beschriebenen Anforderungen erfüllt. Besondere Relevanz kommt hierbei dem Calciumgehalt der Betonbrechsande zu: Bei quarzitäen primären Gesteinskörnungen ist zunächst eine möglichst umfassende Trennung des Zementsteins von der primären Gesteinskörnung zielführend, um den Calciumcarbonatanteil im Rohmehl, der zur Erreichung eines brauchbaren Kalkstandards erforderlich ist, zu reduzieren. Bei steigenden Quarzgehalten im Betonbrechsand wurde zudem selbst bei optimierter Rohmehlzusammensetzung beobachtet, dass nur eine unvollständige Bildung von Tricalciumsilicat aus der Schmelze (zu Gunsten von erhöhten Mengen an Freikalk und Quarz) erfolgte. Infolgedessen sanken die Zementfestigkeit und die Fließfähigkeit von Zementleimen ab [34]. Betonbrechsande mit calcitischen primären Gesteinskörnungen können selbst ohne optimierte Trennverfahren in größerem Umfang eingesetzt werden. Für eine größtmögliche Minderung der CO₂-Emissionen im Klinkerbrennprozess ist jedoch unabhängig von der primären Gesteinskörnung eine Trennung anzustreben, um ein möglichst hohes Verhältnis von Calciumsilikathydraten zu Calciumcarbonaten im Rohmehl zu erreichen [34]. [30] konnte in Laboruntersuchungen bis zu 25 m% des Rohmehls durch Betonbrechsand ersetzen, während bei einer Herstellung im Technikumsmaßstab ein Austausch von bis zu 15 m% möglich war. Essentiell sind hierbei homogene Massenströme und eine kontinuierliche Überwachung der Betonbrechsand- und Rohmehlzusammensetzung.

5 Szenarien für den Einsatz von Betonbrechsanden in der Betonherstellung

Aufbauend auf den zuvor vorgestellten Verfahren zur Aufbereitung von Betonbrechsanden werden nachfolgend Szenarien vorgestellt, um unter Berücksichtigung des derzeitigen und absehbaren Stands des technischen Regelwerks Betonbrechsande zu recyklieren. Dafür werden zunächst Verwertungsmöglichkeiten als feine rezyklierte Gesteinskörnung bzw. als Bindemittelbestandteil getrennt voneinander betrachtet, um abschließend ein gemischtes Szenario vorzustellen. Die in den Szenarien enthaltenen Anteile an Betonbrechsanden resultieren aus dem in Kapitel 3 und Kapitel 4 dargestellten Stand der Normung, Technik und Forschung.

5.1 Betonbrechsande als rezyklierte Gesteinskörnung

5.1.1 Unbehandelte Betonbrechsande als rezyklierte Gesteinskörnung

Gemäß DIN 1045-2:2023-08 dürfen bis zu 25 v% der gesamten Gesteinskörnung durch Rezyklate ausgetauscht werden, ohne dass ergänzende Einschränkungen der Verwendbarkeit oder Anforderungen an die Betonüberwachung ergänzend zu DIN 4226-101:2017-08 gelten. In diesem Fall dürfen auch Betonbrechsande mit Korndurchmessern $D < 2$ mm eingesetzt werden, die bei der Produktion von groben rezyklierten Gesteinskörnungen anfallen. Der Anteil des Betonbrechsands ergibt sich aus der Gesamtsieblinie, die je nach Korngrößenverteilung einen Sandanteil (Korngröße $D < 2$ mm) zwischen 11 v% (Sieblinie A63) und 57 v% (Sieblinie B8) besitzen.

Bei einer flächendeckenden Umsetzung, z. B. in Form einer vorgegeben Recyclingquote im Beton, lassen sich dadurch theoretisch sämtliche in Baden-Württemberg anfallenden Betonbrechsande als Gesteinskörnung verwenden. Dies setzt jedoch hohe Investitions- und Produktkosten bei Aufbereitungsunternehmen und Betonherstellern voraus. Zunächst ist eine flächendeckende Infrastruktur für die Aufbereitung erforderlich. Die Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen für Beton erfolgt derzeit überwiegend durch mobile Anlagen, beispielsweise indem die beim Rückbau anfallenden Betonabfälle für Neubauten an gleicher Stelle eingesetzt werden. Stationäre Anlagen, die in großem Maßstab Rezyklate aus Beton in hoher Qualität herstellen, befinden sich bislang nur in den Großräumen Mannheim und Stuttgart. Der flächendeckende Einsatz von Betonen mit einem teilweisen Austausch des Sands durch Betonbrechsand erfordert, dass auch in allen Regionen Betonbrechsand verfügbar ist. Dies verlangt Investitionen in zusätzliche stationäre Aufbereitungsanlagen oder dezidierte Distributionsstellen, in denen nicht verwendete Betonbrechsande der mobilen Aufbereitungsanlagen gesammelt, ggf. homogenisiert und anschließend verteilt werden. Alternativ ist die Bereitstellung von Betonbrechsanden für die Betonherstellung mit hohen Transportkosten und Emissionen verbunden.

Betonhersteller müssen zudem zusätzliche Investitionen tätigen, um neben den primären Gesteinskörnungen rezyklierte Gesteinskörnungen in den entsprechenden Fraktionen vorzuhalten. Dies bringt einen zusätzlichen Platzbedarf in den Betonwerken mit sich. Insbesondere bei Betonbrechsanden ist die Lagerhaltung problematisch, da diese aufgrund hoher Anteile an Feinstoffen und unhydratierten Zementpartikeln zu Agglomerationen neigen, was bei offener Lagerung durch einen erhöhten Maschinenaufwand kompensiert werden kann. Für eine Silolagerung müssen Betonbrechsande zudem getrocknet werden, wofür zusätzlich ein erhöhter Aufwand (insb. energetisch) entsteht.

5.1.2 Behandelte Betonbrechsande als rezyklierte Gesteinskörnung

DIN 1045-2:2023-08 ermöglicht den Einsatz beliebiger Betonbrechsandanteile bei der Betonherstellung nach einem Verwendbarkeitsnachweis im Rahmen der Betonklasse BK-S. Dies ermöglicht es, im Rahmen von einzelnen Bauvorhaben bis zu 100 % der Gesteinskörnung (insb. der Sande) durch Rezyklate auszutauschen, wenn z. B. bei Ersatzneubauten eine ausreichende Betonbrechsandmenge lokal verfügbar ist und die sonstigen projektspezifischen Gegebenheiten dies zulassen. Insbesondere bei Betonbrechsandanteilen > 50 % ist der Einsatz effektiver Aufbereitungsverfahren (siehe Abschnitt 4.1) zu empfehlen, um den Aufwand der Kompensation der Frisch- und Festbetoneigenschaften der Betone mit rezyklierten Gesteinskörnung durch betontechnologische und planerische Maßnahmen zu reduzieren.

Durch den Einsatz möglichst hoher Rezyklatanteile an der Gesteinskörnung lassen sich der Primärrohstoffbedarf und damit verbundene Emissionen und Transportaufwände erheblich reduzieren. Dabei ist projektspezifisch zu bilanzieren, inwieweit die positive ökologische Wirkung der Betonbrechsandverwertung den erhöhten Planungs- und Überwachungsaufwand rechtfertigt.

5.2 Betonbrechsande als Bindemittelkomponente

5.2.1 Betonbrechsande als Rohmehl in der Klinkerherstellung

Der Einsatz von Betonbrechsanden in der Portlandzementklinkerherstellung bringt eine deutliche CO₂-Emissionsminderung mit sich und weist damit eine deutlich bessere Umweltwirkung als der Einsatz als Gesteinskörnung im Beton auf. Die CO₂-Emissionen der Zementherstellung beruhen überwiegend auf der Bereitstellung der benötigten thermischen Energie und der Entsäuerung von Kalkstein als Primärrohstoff. Letzteres lässt sich durch eine Verwendung umweltfreundlicher Brennstoffe und Prozessoptimierungen nicht vermeiden. Durch einen Austausch eines Teils des Klinkerrohmehls durch Betonbrechsand lassen sich die Emissionen weiter senken. Bei einem Austausch von 15 % des Klinkerrohmehls durch Betonbrechsand ist [34] nach eine CO₂-Reduktion um ca. 12,5 % möglich.

Zemente mit Betonbrechsand als Rohmehlkomponente lassen sich in bestehenden Klinkerproduktionsanlagen herstellen. Es kann jedoch aufgrund von Verunreinigungen der Betonbrechsande (z. B. organische Bestandteile) zu einer Überschreitung lokaler Emissionsgrenzwerte kommen, die eine entsprechende Vorbehandlung erfordern. Für eine großmaßstäbliche Herstellung sind zudem konstante Massenströme und homogene Betonbrechsandszusammensetzungen erforderlich, die in der Praxis in der Regel nicht vorliegen.

Da den auf diese Weise hergestellten Zemente eine Leistungserklärung der Hersteller zugrunde liegt, können sie von Betonherstellern ohne Einschränkungen verwendet werden, sodass keine zusätzlichen Aufwände im Vergleich zu üblichen Zementen aus Primärrohstoffen entstehen. Dies lässt eine hohe Akzeptanz erwarten.

5.2.2 Betonbrechsande als Betonzusatzstoff oder Zementbestandteil

Zusätzlich zum Betonbrechsandeinsatz im Klinkerrohmehl lassen sich Betonbrechsande analog zu etablierten Betonzusatzstoffen und Zementhauptbestandteilen verwenden, um den Portlandzementbedarf bzw. den Klinkerfaktor zu reduzieren. Durch eine Mahlung der Betonbrechsande auf entsprechende Bindemittelfeinheit lassen sich ca. 20 % des Portlandzements mit geringfügigen negativen Auswirkungen auf die Eigenschaften daraus hergestellter Betone produzieren. Zudem reduzieren sich die CO₂-Emissionen, da für den Recyclinganteil CO₂-Emissionen nur bei der Energiebereitstellung für die Mahlung und ggf. durch den Transport der Betonbrechsande bzw. Betonzusatzstoffe entstehen.

Dies erfordert eine produktspezifische allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ), die seitens der Hersteller mit einem hohen Aufwand verbunden ist. Bislang in Deutschland verfügbare Produkte verwenden Betonbrechsande als Nebenbestandteil, sodass unter Berücksichtigung des erhöhten Herstellungsaufwands nur geringfügige positive Umweltwirkungen zu erwarten sind.

Bei höheren Anteilen besteht insb. aufgrund der Heterogenität der Stoffströme die Gefahr, dass Einschränkungen der Anwendbarkeit, z. B. für ausgewählte Expositionsklassen, die Zemente für Betonhersteller unattraktiv werden lassen.

Durch eine Reaktivierung der Betonbrechsande in Verbindung mit einer Mahlung lassen sich Einschränkungen hinsichtlich der Heterogenität und Dauerhaftigkeit erfolgreich reduzieren, sodass ein Austausch von ca. 40 % des Portlandzements möglich ist, wenngleich noch keine großmaßstäblichen Umsetzungen beider Verfahren existieren. Zusätzlich zu den Einschränkungen für die Verwendung nichtreaktiver Betonbrechsande erfordern beide Ansätze eine speziell abgestimmte technische Infrastruktur für die Aufbereitung. Zudem sind Investitionen hinsichtlich einer Optimierung der Verfahren und einer Umsetzung im Technikumsmaßstab erforderlich.

5.3 Mischszenario

Zusätzliches Potential für eine Kreislaufführung möglichst hoher Betonbrechsandmengen entsteht durch eine gekoppelte Verwendung als Gesteinskörnung und Bindemittelbestandteil. Die bisher diskutierten Ansätze verwenden Betonbrechsande in der Regel mit Korngrößen bis 2 mm als Ganzes. Jedoch ist bekannt, dass auch innerhalb dieser Sandfraktion korngrößenabhängige Unterschiede in den chemischen und physikalischen Eigenschaften sowie der stofflichen Zusammensetzung bestehen. Eine Separation der zementsteinreichen Feinstanteile von der gröberen Sandfraktion mit einem höheren Gesteinskörnungsgehalt erlaubt einen zielgerichteten Einsatz der einzelnen Fraktionen. Dieser Ansatz erfordert eine Herangehensweise auf Systemebene unter Berücksichtigung aller an der Kreislaufführung Beteiligten – (Rück-)Bau- und Aufbereitungsunternehmen sowie Zement- und Betonhersteller, die bislang in der Forschung nicht verfolgt wurde. Dabei sind mehrere Einflussgrößen zu untersuchen und hinsichtlich ihrer Umweltwirkung über die gesamte Wertschöpfungskette zu bilanzieren.

Bisherige Untersuchungen zum Einfluss der Verwendung von Betonbrechsanden auf Beton-eigenschaften lassen keinen Rückschluss auf die Beschränkung auf Teilfraktionen zu. Es kann jedoch davon ausgegangen werden, dass insbesondere nach einer Absiebung der Feinststoffe die Porosität der rezyklierten Gesteinskörnungen sinkt und Frisch- und Festbetoneigenschaften verbessert werden. Gleichzeitig ist für die Frischbetonstabilität ein ausreichender Gehalt an Körnern mit Durchmessern $< 125 \mu\text{m}$ erforderlich, während der Aufwand für die Fraktionierung mit kleiner werdendem Grenzkorndurchmesser steigt.

Für die Trennung der Teilfraktionen existieren unterschiedliche Verfahren (siehe Abschnitt 4.1.2), die in Wechselwirkung mit der anschließenden Weiterverarbeitung stehen. Bereits die Wahl der Abbruch- und Brechverfahren hat einen großen Einfluss auf die Menge der entstehenden Feinstoffe. Daneben kann die Effizienz einzelner Verfahren durch erforderliche Zwischenschritte sinken: Die Verwendung von Betonbrechsanden als inerte Betonzusatzstoffe oder als Rohmehlkomponente in der Zementherstellung erfordert im Gegensatz zu einer Carbonatisierung trockene Ausgangsstoffe, die nach einer Nasssiegung o. ä. nicht vorliegen. Die Effizienz der Carbonatisierung steigt wiederum, wenn sie in räumlicher Nähe zu CO₂-Emittenten stattfindet, beispielsweise durch eine Nutzung des Rauchgases von Zementwerken. Andererseits kann die Effizienz einer thermischen Behandlung der Betonbrechsande mit anschließender Absiebung der Feinstoffe steigen, wenn letztere gemahlen und als reaktiver Bindemittelbestandteil verwendet werden.

Ohne eine ausführliche Betrachtung der einzelnen Teilprozesse kann nur eine grobe Abschätzung der Betonbrechsandanteile an der Gesteinskörnung bzw. im Bindemittel erfolgen. Bisherige Forschungsergebnisse lassen erwarten, dass infolge einer optimierten Separation mit anschließender Stärkung des verbleibenden anhaftenden Zementsteins an der größeren Betonbrechsandfraktion ein Einsatz von 100 % Betonbrechsand als feine Gesteinskörnung mit nur geringfügigen betontechnologischen Kompensationsmaßnahmen möglich ist. Aufgrund des höheren Zementsteinanteils in der Feinstfraktion wird eine Verwendung als Bindemittelbestandteil effektiver, sodass sich bis zu 25 % des Klinkerrohmehls und 50 % des Klinkers austauschen lassen. Auf diese Weise kann sämtlicher landesweit anfallende Betonbrechsand ohne hohen betontechnologischen Aufwand wiederverwendet werden.

5.4 Vergleich der Szenarien

Das Potential der Szenarien wird anhand eines repräsentativen Referenzbetons veranschaulicht. Dieser besteht aus Portlandzement [310 kg/m³* bzw. 100 m³/m³] mit einem w/z-Wert von 0,55*, feiner [560 kg/m³ bzw. 210 m³/m³] und grober Gesteinskörnung [1325 kg/m³ bzw. 500 m³/m³]. Mit * gekennzeichnete Parametergrößen stellen ebenso wie das Volumenverhältnis von feiner zu grober Gesteinskörnung Invarianten der Vergleichsberechnungen dar. **Abb. 5.1** zeigt das Ergebnis der Analyse der Szenarien in Form von Volumenanteilen der unterschiedlichen mineralischen Ausgangsstoffe in den Betonen.

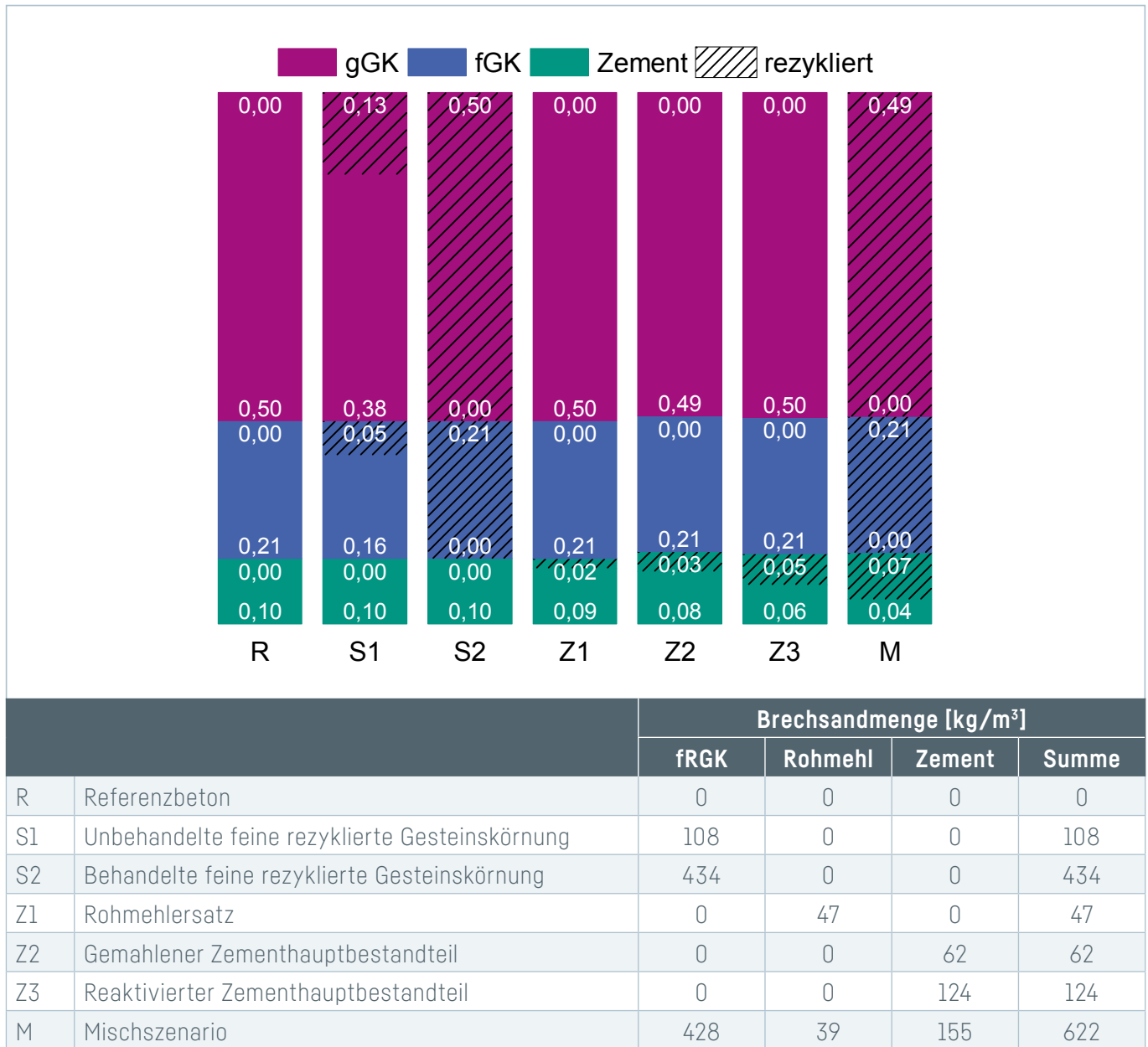


Abb. 5.1: Volumenanteile der unterschiedlichen mineralischen Ausgangsstoffe (oben) und einsetzbare Mengen aufbereiteten Betonbrechsands je Kubikmeter Beton infolge der unterschiedlichen Szenarien (unten). gGK: grobe Gesteinskörnung, fGK: feine Gesteinskörnung; schraffiert: Austausch durch Rezyklate.

Abb. 5.1 [unten] stellt die Betonbrechsandmengen, die feine Gesteinskörnung, Portlandzementklinker und Zement im Rahmen der einzelnen Szenarien austauschen können, dar. Die Szenarien zeigen dabei einen deutlichen Unterschied in den verwendbaren Betonbrechsandmengen. Um die ungefähre jährlich in Baden-Württemberg anfallende maximale Betonbrechsandmenge von 1 Mt gem. Szenario S1 als unbehandelte feine rezyklierte Gesteinskörnung verwerten zu können, müssten demnach 9 Mio. m³ Beton hergestellt werden. Bei einem alleinigen Einsatz als Klinkerrohmehlersatz [Z1] beläuft sich die Betonmenge auf 22 Mio. m³. Im Mischszenario M, das den aktuellen Stand der Technik vollständig ausnutzt, wird eine Betonmenge von weniger als 2 Mio. m³ benötigt.

6 Empfehlungen für eine Stärkung der Kreislaufführung von Betonbrechsanden

Betonbrechsande fallen als Fraktion mit Korndurchmessern $D < 2$ mm beim Rückbau von Betonbauwerken und der Herstellung von rezyklierten Gesteinskörnungen aus Beton an. Sie bestehen stofflich aus primären Gesteinskörnungen und hydratisiertem Zement, wodurch sie verglichen mit natürlichem Sand in der Regel eine geringere Dichte und eine höhere Porosität aufweisen. Bei der Verwendung als rezyklierte Gesteinskörnungen führt dies zu verschlechterten Frisch- und Festbetoneigenschaften. Betonbrechsande werden deshalb deponiert oder vereinzelt für untergeordnete Zwecke eingesetzt.

Dabei stellen Betonbrechsande aufgrund ihrer Zusammensetzung eine bedeutende, aber bislang weitestgehend ungenutzte Sekundärrohstoffquelle dar. Nach dem aktuellen Stand der Technik existiert eine Vielzahl von Verfahren zur Aufbereitung von Betonbrechsanden, um den negativen Einfluss von feinen rezyklierten Gesteinskörnungen auf Betoneigenschaften zu reduzieren. Zudem trägt die nächste Normengeneration des Betonbaus der wachsenden Erfahrung im Umgang mit Betonbrechsanden Rechnung und wird die Nutzung auch normativ ermöglichen. Daneben bietet sich für eine Kreislaufführung von Betonbrechsanden auch der Einsatz als Bindemittelkomponente an.

Im Rahmen der vorliegenden Studie wurden verschiedene Aufbereitungsverfahren beschrieben und hinsichtlich ihrer Wirkungen und Effektivität diskutiert. Die einzelnen Verfahren wurden mit Vertretern von Bauunternehmen, Zement- und Betonherstellern diskutiert, um Herausforderungen und Hemmnisse bei einer möglichen praktischen Umsetzung festzustellen. Daraus wurden unterschiedliche Szenarien abgeleitet, um die Potentiale von Betonbrechsand auszuschöpfen. Die Kreislaufführung von Betonbrechsanden erfordert Maßnahmen in Verwaltung, Forschung und Ausführung:

- Betonbrechsand muss als wertvoller Sekundärrohstoff definiert und ein vollständig geschlossener Stoffkreislauf zum Ziel gesetzt werden.
- Über die beim Rückbau und der Aufbereitung anfallenden Betonbrechsandmengen gibt es derzeit keine verlässlichen Informationen. Insofern ist eine Abschätzung von Stoffströmen schwierig. Die Kreislaufführung dieses Materials bedarf einer gezielteren Erfassung und Dokumentation. Neben den anfallenden Mengen sind dabei die stoffliche und chemisch-mineralogische Zusammensetzung sowie physikalische Eigenschaften hinsichtlich einer späteren Verwertung interessant.

- Betonbrechsande fallen derzeit überwiegend in mobilen Bauschuttauflbereitungsanlagen an. Der weitere Verbleib ist in der Regel nicht dokumentiert, während gröbere Fraktionen an gleicher Stelle weiterverwendet werden. Um eine geschlossene Kreislaufführung umzusetzen, ist eine Betonbrechsand-Infrastruktur für die Sammlung, Homogenisierung und Disposition notwendig. Des könnte in Zusammenhang mit einem regionalisierten Ausbau von stationären Aufbereitungsanlagen erfolgen, die sich bislang auf wenige Regionen beschränken.
- Da die bisherigen Betonbaunormen die Verwendung von Betonbrechsanden als rezyklierte Gesteinskörnung ausgeschlossen haben, liegen damit nur wenige belastbare Praxiserfahrungen vor. Insbesondere die praxistaugliche Umsetzung von Verfahren für die Optimierung der Eigenschaften von Betonbrechsand ist bislang für Aufbereitungsunternehmen wenig interessant.
- Die aktuell vorliegenden Versionen der nächsten Normengeneration erlauben beliebige Betonbrechsandmengen als rezyklierte Gesteinskörnungen. Wenn diese Normen rechtsverbindlich werden, sollten die neuen Möglichkeiten im Rahmen von öffentlichen oder öffentlich geförderten repräsentativen Einzelprojekten ausgeschöpft werden, um die Erfahrungen mit Betonbrechsanden zu erweitern. Eine wissenschaftlich-technische Begleitung ist dabei im Rahmen der Betonklasse BK-S erforderlich. Eine weitere Möglichkeit, Betonbrechsande vermehrt einzusetzen, besteht im Rahmen der Betonklasse BK-N, bei der geringe Mengen Betonbrechsand als Gesteinskörnung verwendet werden dürfen. Hierbei ist kein zusätzliches Monitoring der Baumaßnahme erforderlich. Eine wissenschaftliche Begleitung wird zur Dokumentation und Weiterverwendung der Ergebnisse empfohlen.
- Für eine flächendeckende Umsetzung müssen die entstehenden Mehraufwände bilanziert werden, damit sich die ergriffenen Maßnahmen zur Ressourceneffizienz nicht ins Gegenteil verkehren, z. B. in Form von erhöhten Aufbereitungs- oder Vorhaltungskosten oder Emissionen infolge erhöhter Transportwege („Greenwashing“). Dies erfordert eine Bilanzierung der Aufbereitung im System unter Berücksichtigung von gegebenen Wechselwirkungen. Einzelne Verfahren können isoliert betrachtet effizient, aber im Gesamtsystem problematisch sein. Um Transportwege und Verfügbarkeiten von Aufbereitungsmaterialien zu berücksichtigen, kann eine detaillierte Bewertung der Verfahren zudem nur individuell und standortbezogen erfolgen.
- Verwaltungstechnisch sollte für bestehende Vorschriften überprüft werden, inwieweit sie ein Hemmnis für die Kreislaufführung insb. von Betonbrechsanden darstellen. Dazu gehören Obergrenzen für Schadstoffe oder lokale Emissionen, die sich an Primärrohstoffen orientieren. Im Rahmen der o. a. Bilanzierung können diese Grenzwerte vor dem Hintergrund der Schaffung eines geschlossenen Stoffkreislaufs ggf. zurückstehen, solange die untersuchten Verfahren insgesamt als positiv bewertet werden.

- Die Separation der Betonbrechsande in einen gesteinskörnungsreichen Grob- und einen zementsteinreichen Feinstanteil mit anschließender getrennter Aufbereitung als feine Gesteinskörnung bzw. Bindemittelkomponente wird im Rahmen der vorliegenden Studie als vielversprechender Weg zur Schaffung eines vollständigen Recyclings von Betonbrechsanden aufgezeigt. Die Umsetzung sollte zeitnah begonnen werden, da die erforderlichen Vorarbeiten und Produktzulassungen erfahrungsgemäß mehrere Jahre in Anspruch nehmen. Einzelne Teile dieses Konzepts können unabhängig voneinander umgesetzt werden.

Die vorliegende Studie beschränkt sich aufgrund ihrer Zielsetzung und dem Stand der Technik, Forschung und Normung auf stofflich reine Betonbrechsande (Abfallschlüsselnummer 170101). Beton liegt beim Rückbau jedoch häufig in Form von Mischungen mit anderen mineralischen Abbruchabfällen (Ziegel, Fliesen und Keramik; Abfallschlüsselnummer 170107) vor. Insbesondere bei einem hohen Betonanteil in diesen Abfällen ist eine Verwertung analog zu Betonbrechsanden ökologisch und wirtschaftlich interessant. Die vorgestellten Ergebnisse der Studie lassen sich – mit Einschränkungen hinsichtlich in der Regel unbekannter stofflicher Zusammensetzungen – in Teilen übertragen. Neben der Umsetzung der Studienergebnisse zur Verwertung von Betonbrechsanden sollten auch die Feinanteile der gemischten mineralischen Abbruchabfälle verstärkt untersucht werden.

Autorenschaft

Jan P. Höffgen, M.Sc.:

Konzeption, Literatursichtung, Experteninterviews, Datenaufbereitung und -auswertung, Manuskripterstellung

Manuel Bauer, B.Sc.:

Literatursichtung, Datenaufbereitung

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn:

Konzeption, Einwerbung von Fördermitteln, Validierung, Manuskriptüberarbeitung

Die Autoren bedanken sich bei ihren Kolleginnen, Kollegen und Studierenden am KIT-Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (KIT-IMB/MPA/CMM), namentlich Dr.-Ing. Andreas Wiedmann, Carla Neuhaus, M.Sc., Sebastian Bruckschlögl, M.Sc., Nils Haller, B.Sc., Laura Hahn, B.Sc. und Lukas Reichert, B.Sc. für ihre Unterstützung bei der Erstellung des vorliegenden Berichts.

Literaturverzeichnis

- [1] Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.): Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2020. Berlin, 2021. <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/umweltdaten-der-deutschen-zementindustrie-2020>
- [2] Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.): Zementindustrie im Überblick 2013. Berlin, 2013. <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/zementindustrie-im-ueberblick-2013>
- [3] Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.): Zementindustrie im Überblick 2016/2017. Berlin, 2016. <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/zementindustrie-im-ueberblick-2016-2017>
- [4] Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.): Zementindustrie im Überblick 2020/2021. Berlin, 2020. <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/zementindustrie-im-ueberblick-2020-2021>
- [5] Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.): Zementindustrie im Überblick 2021/2022. Berlin, 2021. <https://www.vdz-online.de/wissensportal/publikationen/zementindustrie-im-ueberblick-2021-2022>
- [6] Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen [Kreislaufwirtschaftsgesetz]: KrWG. <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>.
Version: 24.02.2012
- [7] Benedix, R.: Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten. 7. Auflage. Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2020. <http://dx.doi.org/Roland>. ISBN 978-3-658-26441-3
- [8] Benzel, L.: Bewertung der regionalen Rohstoffverfügbarkeit für die Herstellung von Beton. In: Nolting, U. (Hrsg.); Dehn, F. (Hrsg.); Link, J. (Hrsg.); Mercedes Kind, V. (Hrsg.): Ressourceneffizienter Beton: 15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Karlsruhe, 2019, S. 13-20
- [9] Brameshuber, W.; Hannawald, J.; Hauer, B.; Herbst, T.; Meng, B.; Nebel, H.; Pierkes, R.; Rübner, K.; Schäfer, S.; Seidel, M.; Vollpracht, A.: DAfStb-Heft. Bd. 584: Verbundforschungsvorhaben Nachhaltig Bauen mit Beton: Potenziale des Sekundärstoffeinsatzes im Betonbau - Teilprojekt B Effiziente Sicherstellung der Umweltverträglichkeit von Beton - Teilprojekt E. Beuth, Berlin, 2011. <http://gbv.ebib.com/patron/FullRecord.aspx?p=2033364>. - ISBN 978-3-410-65094-2
- [10] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Deutschland - Rohstoffsituation 2018. Hannover, 2020. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/produkte_node.html
- [11] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Deutschland - Rohstoffsituation 2019. Hannover, 2019. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/produkte_node.html
- [12] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Deutschland- Rohstoffsituation 2014. Hannover, 2015. https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/produkte_node.html
- [13] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz: Verordnung zur Einführung einer Ersatzbaustoffverordnung, zur Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung und zur Änderung der Deponieverordnung und der Gewerbeabfallverordnung. 09.07.2021
- [14] Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit: 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: AVV. 30.06.2020
- [15] Carriço, A.; Bogas, J. A.; Guedes, M.: Thermoactivated cementitious materials – A review. In: Construction and Building Materials 250 [2020], S. 118873. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.118873. - ISSN 09500618
- [16] Carriço, A.; Bogas, J. A.; Hu, S.; Real, S.; Costa Pereira, M. F.: Novel separation process for obtaining recycled cement and high-quality recycled sand from waste hardened concrete. In: Journal of Cleaner Production 309 [2021], S. 127375. DOI 10.1016/j.jclepro.2021.127375. - ISSN 09596526
- [17] Carriço, A.; Real, S.; Bogas, J. A.: Durability performance of thermoactivated recycled cement concrete. In: Cement and Concrete Composites 124 [2021]. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2021.104270. - ISSN 09589465
- [18] Chinzorigt, G.; Lim, M. K.; Yu, M.; Lee, H.; Enkbold, O.; Choi, D.: Strength, shrinkage and creep and durability aspects of concrete including CO₂ treated recycled fine aggregate. In: Cement and Concrete Research 2020 [2020], Nr. 136. DOI 10.1016/j.cemconres.2020.106062. - ISSN 00088846

- [19] Dehn, F.; Wiens, U.: Beton. In: Bergmeister, K. (Hrsg.); Fingerloos, F. (Hrsg.); Wörner, J.-D. (Hrsg.): Beton-Kalender 2022. Berlin: Ernst & Sohn, 2022. – ISBN 978-3-433-03344-9, S. 1-174
- [20] Deutsche Rohstoffagentur [DERA] in der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe: Deutschland- Rohstoffsituation 2010. Hannover, 2011.
https://www.bgr.bund.de/DE/Themen/Min_rohstoffe/Produkte/produkte_node.html
- [21] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: 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. Aug. September 2010. Berlin
- [22] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton: Alkali-Richtlinie. Oktober 2013. Berlin
- [23] Dora, B.: Hydraulisch erhärtende Baustoffe aus Betonbrechsand, TU Braunschweig, Dissertation, 2001
- [24] dos Reis, G. S.; Cazacliu, B. G.; Artoni, R.; Torrenti, J.-M.: Effect of the accelerated carbonation treatment on the recycled sand physicochemical characteristics through the rolling carbonation process. In: Journal of CO₂ Utilization 39 [2020], S. 101181. DOI 10.1016/j.jcou.2020.101181. – ISSN 22129820
- [25] eurostat: Abfallaufkommen nach Abfallkategorie, Gefährlichkeit und NACE Rev. 2 Tätigkeit: Angepasster Datensatz. <https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/bookmark/5ff2a6c8-a398-4ad1-bd57-bd8c95cc6ec0?lang=de> (geprüft am 30.06.2022).
- [26] Feng, C.; Cui, B.; Huang, Y.; Guo, H. ; Zhang, W.; Zhu, J.: Enhancement technologies of recycled aggregate – Enhancement mechanism, influencing factors, improvement effects, technical difficulties, life cycle assessment. In: Construction and Building Materials 317 [2022], S. 126168. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.126168. – ISSN 09500618
- [27] Florea, M. V. A.: Secondary materials applied in cement-based products: treatment, modelling and environmental interaction, Technische Universiteit Eindhoven, Dissertation, 2014. DOI 10.6100/IR772902
- [28] Hauer, B.; Ramolla, S.: Potenziale des Sekundärstoffeinsatzes im Betonbau – Teilprojekt B1. In: Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton“, S. 131-222. Berlin and Wien and Zürich: Beuth, 2007 [Deutscher Ausschuss für Stahlbeton]. – ISBN 978-3-410-65772-9
- [29] Höffgen, J. P.; Vogel, M.; Blask, O.; Schlager, P.; Dehn, F.: Gesteinskörnungen: Zukünftige Rohstoffversorgung. In: beton [2021], Nr. 4, S. 112-119
- [30] Izoret, L.; Diliberto, C.; Mechling, J. M.; Lecomte, A.; Natin, P.: Recycled concrete sand as alternative raw material for Portland clinker production. In: Larrard, F. de (Hrsg.); Colina, H. (Hrsg.): Concrete recycling. Boca Raton, FL: CRC Press/Taylor & Francis Group, 2019. – ISBN 1351052829, S. 63-81
- [31] Juan, M. S.; Gutiérrez, P. A.: Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. In: Construction and Building Materials 23 [2009], Nr. 2, S. 872-877. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2008.04.012. – ISSN 09500618
- [32] Kaliyavaradhan, S. K.; Li, L.; Ling, T.-C.: Response surface methodology for the optimization of CO₂ uptake using waste concrete powder. In: Construction and Building Materials 340 [2022], S. 127758. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.127758. – ISSN 09500618
- [33] Klingsch, E. W.: Explosive spalling of concrete in fire. Zürich, ETH, Dissertation, 2014. DOI 10.3929/ethz-a-010243000
- [34] Kwon, E.; Ahn, J.; Cho, B.; Park, D. : A study on development of recycled cement made from waste cementitious powder. In: Construction and Building Materials 83 [2015], 174-180. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.02.086. – ISSN 09500618
- [35] Liang, C.; Pan, B.; Ma, Z.; He, Z. ; Duan, Z.: Utilization of CO₂ curing to enhance the properties of recycled aggregate and prepared concrete: A review. In: Cement and Concrete Composites 105 [2020], S. 103446. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2019.103446. – ISSN 09589465

- [36] Liang, C.; Zhang, Y.; Wu, R.; Yang, D.; Ma, Z.: The utilization of active recycled powder from various construction wastes in preparing ductile fiber-reinforced cementitious composites: A case study. In: *Case Studies in Construction Materials* 15 [2021], S. e00650. DOI 10.1016/j.cscm.2021.e00650. – ISSN 22145095
- [37] Liu, Y.; Yang, C.; Wang, F.; Hu, S.; Zhu, M.; Hu, C.; Lu, L.; Liu, Z.: Evaluation on recycled clinker production and properties from regeneration of completely recycle concrete. In: *Construction and Building Materials* 301 [2021], S. 123882. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.123882. – ISSN 09500618
- [38] Mistri, A.; Bhattacharyya, S. K.; Dhama, N.; Mukherjee, A.; Barai, S. V.: A review on different treatment methods for enhancing the properties of recycled aggregates for sustainable construction materials. In: *Construction and Building Materials* 233 [2020], S. 117894. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2019.117894. – ISSN 09500618
- [39] Müller, A.: *Baustoffrecycling: Entstehung - Aufbereitung - Verwertung*. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden, 2018. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-22988-7>. – ISBN 9783658229870
- [40] Nedeljkovic, M.; Visser, J.; Šavija, B.; Valcke, S.; Schlangen, E.: Use of fine recycled concrete aggregates in concrete: A critical review. In: *Journal of Building Engineering* 38 [2021], S. 102 196. DOI 10.1016/j.job.2021.102196. – ISSN 23527102
- [41] Ohemeng, E. A.; Ekolu, S. O.: A review on the reactivation of hardened cement paste and treatment of recycled aggregates. In: *Magazine of Concrete Research* 72 [2020], Nr. 10, S. 526–539. DOI 10.1680/jmacr.18.00452. – ISSN 0024–9831
- [42] Omary, S.; Ghorbel, E.; Wardeh, G.: Relationships between recycled concrete aggregates characteristics and recycled aggregates concretes properties. In: *Construction and Building Materials* 108 [2016], S. 163–174. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2016.01.042. – ISSN 09500618
- [43] Pan, G.; Zhan, M.; Fu, M.; Wang, Y.; Lu, X.: Effect of CO₂ curing on demolition recycled fine aggregates enhanced by calcium hydroxide pre-soaking. In: *Construction and Building Materials* [2017], Nr. 154, S. 810–818. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.07.079. – ISSN 09500618
- [44] Pu, Y.; Li, L.; Wang, Q.; Shi, X.; Luan, C.; Zhang, G.; Fu, L.; El-Fatah Abomohra, A.: Accelerated carbonation technology for enhanced treatment of recycled concrete aggregates: A state-of-the-art review. In: *Construction and Building Materials* 282 [2021], S. 122671. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2021.122671. – ISSN 09500618
- [45] Raman, J. V. M.; Ramasamy, V.: Various treatment techniques involved to enhance the recycled coarse aggregate in concrete: A review. In: *Materials Today: Proceedings* 45 [2021], S. 6356–6363. DOI 10.1016/j.matpr.2020.10.935. – ISSN 22147853
- [46] Santha Kumar, G.; Minocha, A. K.: Studies on thermo-chemical treatment of recycled concrete fine aggregates for use in concrete. In: *Journal of Material Cycles and Waste Management* 20 [2018], Nr. 1, S. 469–480. DOI 10.1007/s10163-017-0604-6. – ISSN 1438–4957
- [47] Schepper, M. de; Snellings, R.; Buysser, K. de; van Driessche, I.; Belie, N. de: The hydration of cement regenerated from Completely Recyclable Concrete. In: *Construction and Building Materials* 60 [2014], 33–41. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.02.067. – ISSN 09500618
- [48] Schepper, M. de; van den Heede, P.; van Driessche, I.; Belie, N. de: Life Cycle Assessment of Completely Recyclable Concrete. In: *Materials [Basel, Switzerland]* 7 [2014], Nr. 8, S. 6010–6027. DOI 10.3390/ma7086010. – ISSN 1996–1944
- [49] Schneider, U.: *DAfStb-Heft. Bd. 337: Verhalten von Beton bei hohen Temperaturen*. Berlin: Wilhelm Ernst und Sohn, 1982
- [50] Shaban, W. M.; Yang, J.; Su, H.; Mo, K. H.; Li, L.; Xie, J.: Quality Improvement Techniques for Recycled Concrete Aggregate: A review. In: *Journal of Advanced Concrete Technology* [2019], Nr. 17, S. 151–167. DOI 10.3151/jact.17.151. – ISSN 1346–8014
- [51] Shi, C.; Li, Y.; Zhang, J.; Li, W.; Chong, L.; Xie, Z.: Performance enhancement of recycled concrete aggregate – A review. In: *Journal of Cleaner Production* [2016], Nr. 112, S. 466–472. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.08.057. – ISSN 09596526

- [52] Shi, C.; Wu, Z.; Cao, Z.; Ling, T. C.; Zheng, J.: Performance of mortar prepared with recycled concrete aggregate enhanced by CO₂ and pozzolan slurry. In: *Cement and Concrete Composites* 86 [2018], S. 130–138. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2017.10.013. – ISSN 09589465
- [53] 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. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.04.117. – ISSN 09500618
- [54] Silva, R. V.; Brito, J. de; Dhir, R. K.: Comparative analysis of existing prediction models on the creep behaviour of recycled aggregate concrete. In: *Engineering Structures* 100 [2015], S. 31–42. DOI 10.1016/j.engstruct.2015.06.004. – ISSN 01410296
- [55] Silva, R. V.; Brito, J. de; Dhir, R. K.: The influence of the use of recycled aggregates on the compressive strength of concrete: a review. In: *European Journal of Environmental and Civil Engineering* 19 [2015], Nr. 7, S. 825–849. DOI 10.1080/19648189.2014.974831. – ISSN 1964–8189
- [56] Silva, R. V.; Brito, J. de; Dhir, R. K.: Prediction of the shrinkage behavior of recycled aggregate concrete: A review. In: *Construction and Building Materials* 77 [2015], S. 327–339. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.12.102. – ISSN 09500618
- [57] Silva, R. V.; Brito, J. de; Dhir, R. K.: Tensile strength behaviour of recycled aggregate concrete. In: *Construction and Building Materials* 83 [2015], S. 108–118. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2015.03.034. – ISSN 09500618
- [58] Silva, R. V.; Neves, R.; Brito, J. de; Dhir, R. K.: Carbonation behaviour of recycled aggregate concrete. In: *Cement and Concrete Composites* 62 [2015], S. 22–32. DOI 10.1016/j.cemconcomp.2015.04.017. – ISSN 09589465
- [59] Silva, R. V.; Brito, J. de; Dhir, R. K.: Establishing a relationship between modulus of elasticity and compressive strength of recycled aggregate concrete. In: *Journal of Cleaner Production* 112 [2016], S. 2171–2186. DOI 10.1016/j.jclepro.2015.10.064. – ISSN 09596526
- [60] Silva, R. V.; Brito, J. de; Neves, R.; Dhir, R.: Prediction of Chloride Ion Penetration of Recycled Aggregate Concrete. In: *Materials Research* 18 [2015], Nr. 2, S. 427–440. DOI 10.1590/1516–1439.000214
- [61] Song, I. H.; Ryou, J. S.: Hybrid techniques for quality improvement of recycled fine aggregate. In: *Construction and Building Materials* [2014], Nr. 72, S. 56–64. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2014.08.041. – ISSN 09500618
- [62] Springenschmid, R.: *Betontechnologie für die Praxis. 2., aktualisierte und erweiterte Auflage.* Beuth Verlag GmbH, Berlin, Wien, Zürich, 2018. ISBN 978–3–410–24466–0
- [63] Statista: Entwicklung des CO₂-Emissionsfaktors für den Strommix in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2021. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/38897/umfrage/co2-emissionsfaktor-fuer-den-strommix-in-deutschland-seit-1990/> [geprüft am 29.06.2022]
- [64] Statistisches Bundesamt: Abfallbilanz (Abfallaufkommen /-verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen nach Wirtschaftszweigen) - 2019. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/Abfallwirtschaft/Publikationen/Downloads-Abfallwirtschaft/abfallbilanz-pdf-5321001.html> [geprüft am 29.06.2022]
- [65] Statistisches Bundesamt: Bauschuttzubereitungsanlagen: Deutschland, Jahre, Abfallarten. <https://www-genesis.destatis.de/genesis/online> [geprüft am 28.06.2022]
- [66] Statistisches Landesamt Baden-Württemberg: Abfall: Bauschuttrecycling- und Asphaltmischanlagen. <https://www.statistik-bw.de/Umwelt/Abfall/a2d02.jsp> [geprüft am 28.06.2022]
- [67] Tam, V. W.; Butera, A.; Le, K. N.; Li, W.: Utilising CO₂ technologies for recycled aggregate concrete: A critical review. In: *Construction and Building Materials* 250 [2020], S. 118903. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.118903. – ISSN 09500618
- [68] Verein Deutscher Zementwerke: *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, Förderkennzeichen 13N13125 Düsseldorf, 2018.*

- [69]** Verian, K. P.; Ashraf, W.; Cao, Y.: Properties of recycled concrete aggregate and their influence in new concrete production. In: Resources, Conservation and Recycling 133 (2018), S. 30–49. DOI 10.1016/j.resconrec.2018.02.005. – ISSN 09213449
- [70]** Wang, R.; Yu, N.; Li, Y.: Methods for improving the microstructure of recycled concrete aggregate: A review. In: Construction and Building Materials 242 (2020), 118164. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2020.118164. – ISSN 09500618
- [71]** Zajac, M.; Skocek, J.; Skibsted, J.; Ben Haha, M.: CO₂ mineralization of demolished concrete wastes into a supplementary cementitious material – a new CCU approach for the cement industry. In: RILEM Technical Letters 6 (2021), S. 53–60. DOI 10.21809/rilemtechlett. 2021.141
- [72]** Zhang, H.; Xu, X.; Liu, W.; Zhao, B. ; Wang, Q.: Influence of the moisture states of aggregate recycled from waste concrete on the performance of the prepared recycled aggregate concrete [RAC] – A review. In: Construction and Building Materials 326 (2022), S. 126891. DOI 10.1016/j.conbuildmat.2022.126891. – ISSN 09500618
- [73]** Zhang, J.; Shi, C.; Li, Y.; Pan, X. ; Poon, C.-S.; Xie, Z.: Performance Enhancement of Recycled Concrete Aggregates through Carbonation. In: Journal of Materials in Civil Engineering 27 (2015), Nr. 11, S. 04015029. DOI 10.1061/[ASCE]MT.1943-5533.0001296. – ISSN 0899-1561
- [74]** Zhao, Z. F.; Jin, P. F.; Zhao, Q. Q.: Influence of Laboratory Accelerated Carbonation on the Properties of Recycled Concrete Aggregates. In: Advanced Materials Research 919-921 (2014), S. 1817–1820. DOI 10.4028/www.scientific.net/AMR.919-921.1817

Impressum

Herausgeber

THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien
angesiedelt am Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
c/o Unternehmer BW e. V.
Türnenstrasse 2, 70191 Stuttgart
Homepage: www.thinktank-irs.de
LinkedIn: THINKTANK industrielle Ressourcenstrategien

Ausführende Stelle

- › Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
- › Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB)
Abteilung Baustoffe und Betonbau
- › Materialprüfungs- und Forschungsanstalt Karlsruhe (MPA)
- › Kompetenzzentrum für Materialfeuchte (CMM)
Prof. Dr.-Ing. F. Dehn, Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe

Autoren

- › Jan P. Höffgen, M.Sc.
- › Manuel Bauer, B.Sc.
- › Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Stand

Juli 2022

Grafische Konzeption, Illustration, Satz

unger+ kreative strategien GmbH, Stuttgart, www.ungerplus.de

DOI-Nummer

10.5445/IR/1000169796

Copyright

Wiedergaben in jeglicher Form, auch in Auszügen, müssen mit Quellenangaben gekennzeichnet werden.

Verteilerhinweis

Diese Informationsschrift wurde mit Mitteln des Landes Baden-Württemberg und des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg gefördert.

Der THINKTANK Industrielle Ressourcenstrategien ist gefördert aus Mitteln des Ministeriums für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg.



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT