

Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie für ganzheitliches Betonrecycling

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

Zusammenfassung

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

1 Ausgangslage und Anforderungen

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

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

1.1 Klassifizierung und Aufkommensanalyse

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

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

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

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

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

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

1.2 Bisheriges Betonrecycling

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

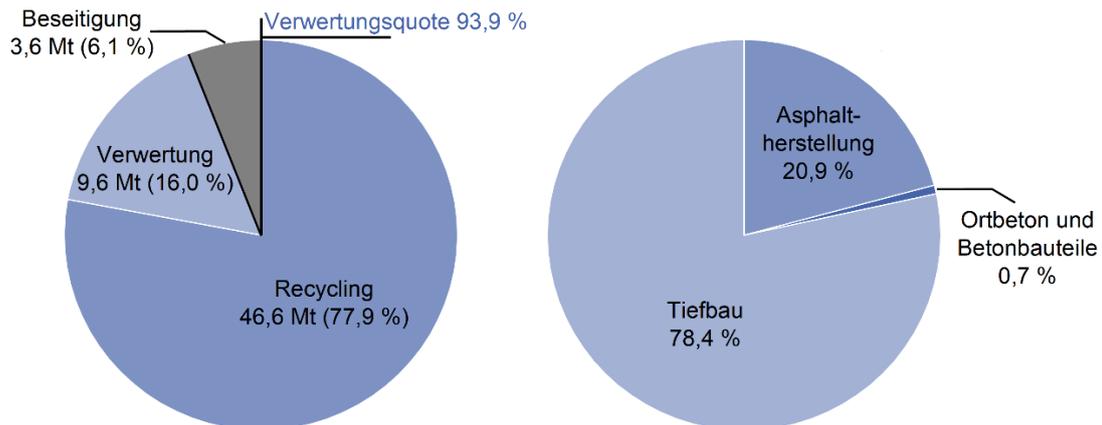


Abb. 1: Links: Verbleib der Fraktion Bauschutt 2018 in Deutschland (Zahlen nach [4a]) und Rechts: Verwendung von Recyclingbaustoffen 2018 in Deutschland (Zahlen nach [4b])

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

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

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

1.3 Normative und rechtliche Regelungen

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

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

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

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

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

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

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

2 Potenzialanalyse von Sekundärrohstoffen aus dem Betonbruch

2.1 Frischbetonrecycling

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

2.2 Bauschutttaufbereitung

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

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

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

2.3 Ressourcenschonung sowie Klinkereffizienz durch weitere Sekundärrohstoffe

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

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

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

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

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

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

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

3 Ansatzpunkte, Machbarkeiten und Diskussion

3.1 Anwendung grober rezyklierter Gesteinskörnung

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

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

3.2 Anwendung feiner rezyklierter Gesteinskörnung

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

3.2.1 Als feine Gesteinskörnung (Sandsubstitution)

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

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

3.2.2 Als Betonzusatzstoff bzw. Zementhauptbestandteil

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

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

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

3.2.3 Betonbrechsande als Rohmehl zur Belit-Zementherstellung

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

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

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

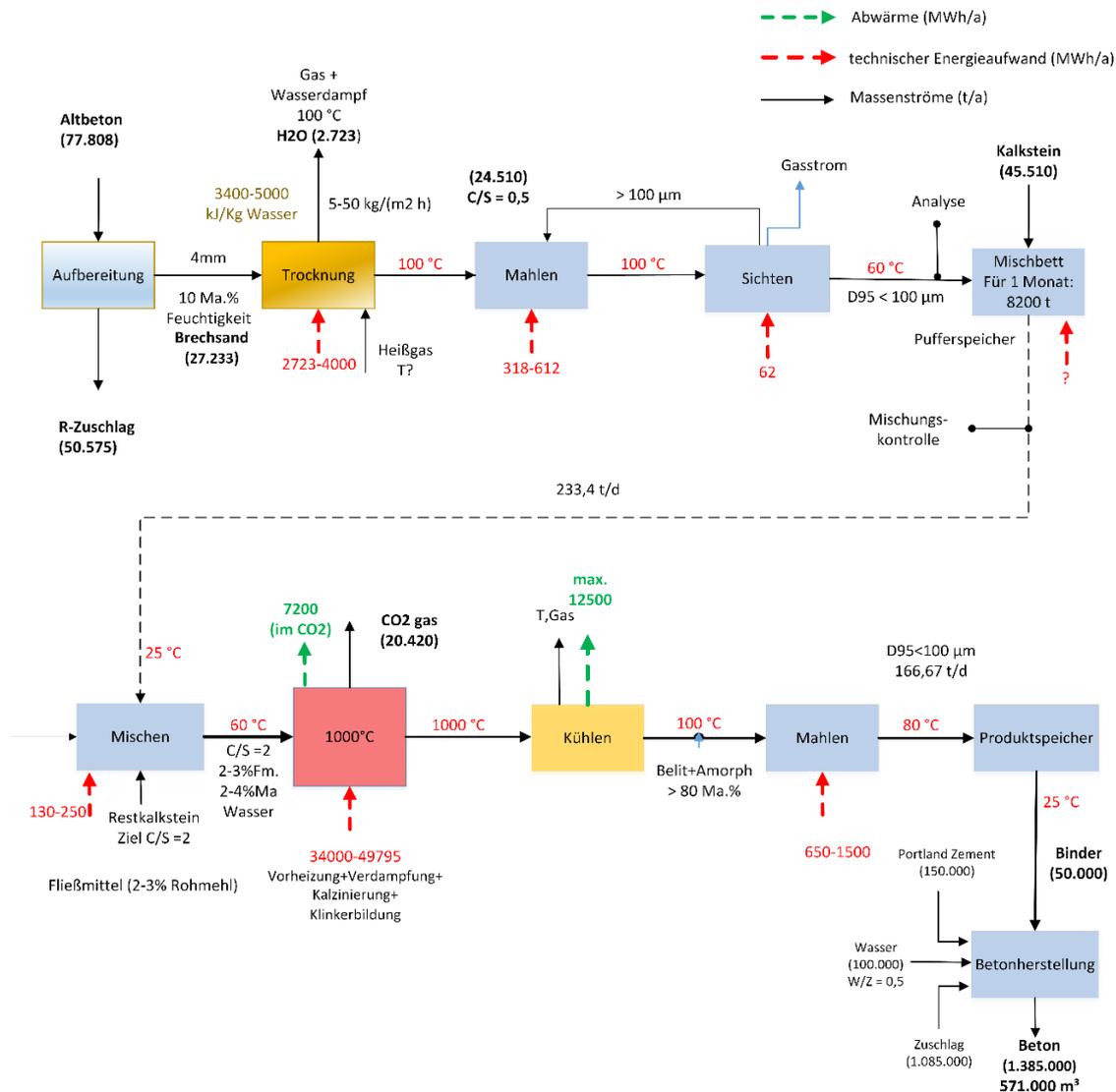


Abb. 2: Fließbild Betonbrechsand zu Belit (Beton zu Beton): Massen- und Energieströme

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

3.3 Ansätze zur Ökobilanzierung verschiedener Szenarien

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

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

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

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

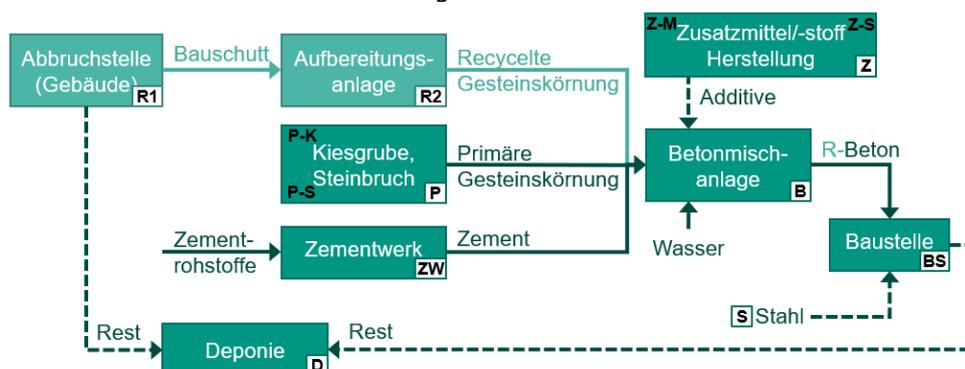


Abb. 3: Relevante Anlagen (Rechtecke) und Transporte (Pfeile) für die Herstellung von Beton (dunkelgrün) im Vergleich zu R-Beton (dunkel- und hellgrün). Gestrichelte Pfeile deuten auf Transporte hin, die nur in manchen Studien betrachtet werden. (Quelle Inhalt: [29, 30, 32-34])

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

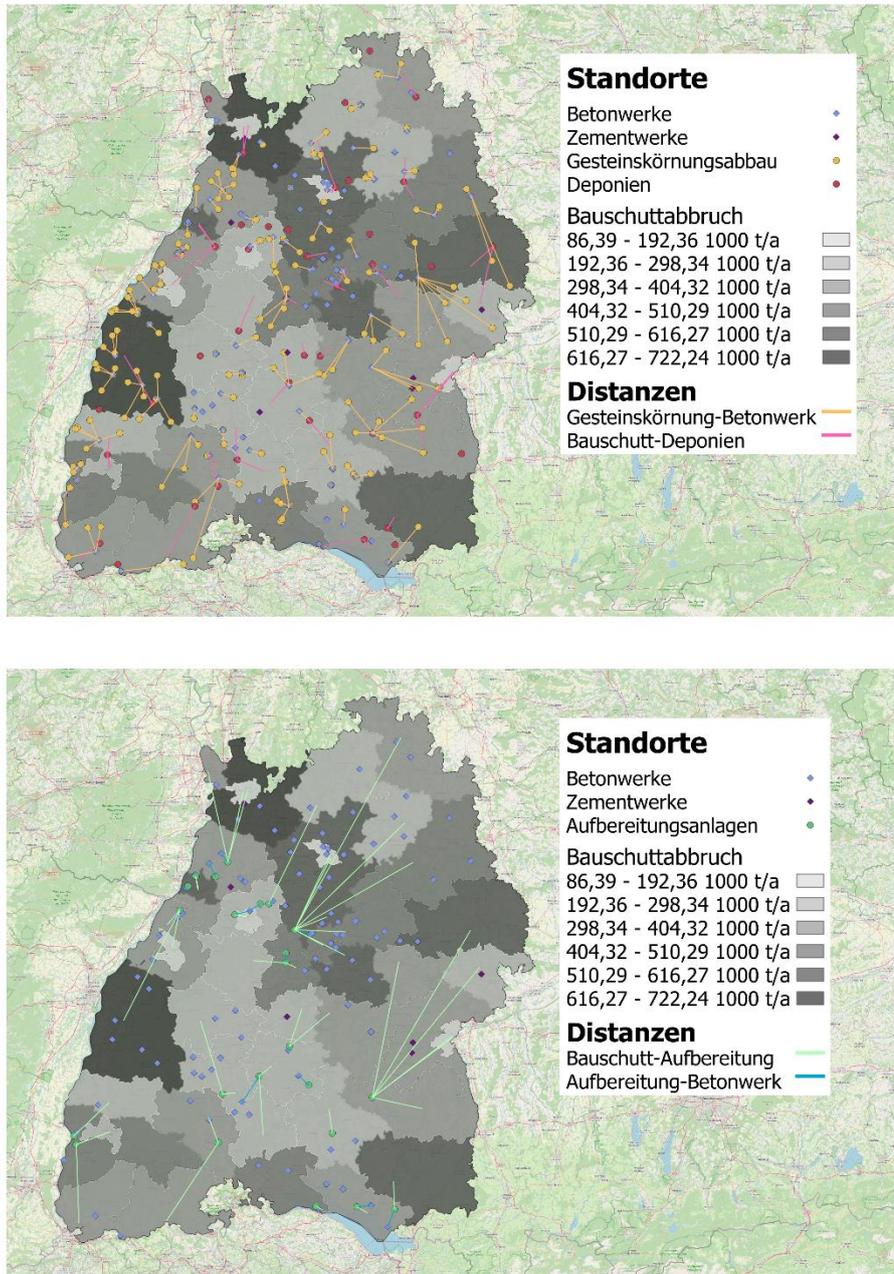


Abb. 4: Karten mit stationären Anlagenstandorten in Baden-Württemberg und direkten Distanzen zu nächstliegendem Werk (erstellt in QGIS) – oben: relevante Distanzen für primäre Werkstoffe, unten: für sekundäre Werkstoffe

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

4 Literatur

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

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

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

5 Autoren

Sebastian Bruckschlögl M. Sc.

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

Dr. Günter Beuchle

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

Elena Vollmer M. Sc.

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

Humberto Patarca Petrillo M. Sc.

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

Dr.-Ing. Rebekka Volk

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

Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann

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

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

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