

Möglichkeiten zur Verwendung von Betonbrechsanden

Jan P. Höffgen und Frank Dehn

Zusammenfassung

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

1 Einleitung

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

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

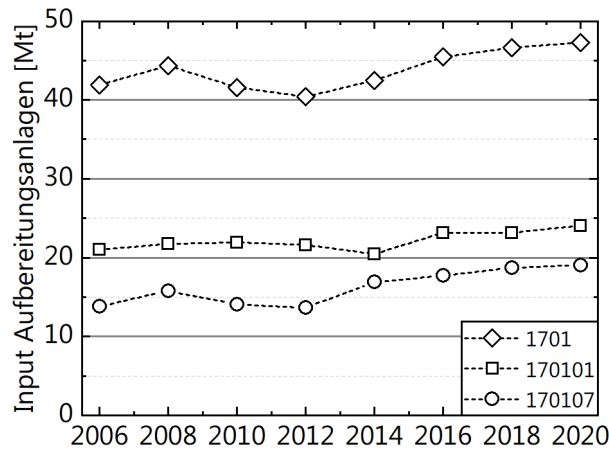


Abb. 1: Zeitliche Entwicklung der jährlichen in deutschen Aufbereitungsanlagen aufbereiteten mineralischen Bau- und Abbruchabfallmengen (1701) sowie Unterteilung in Beton (170101) und ungefährliche Gemische (170107) [1]

2 Betonbrechsande als rezyklierte Gesteinskörnungen

2.1 Normative Möglichkeiten

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

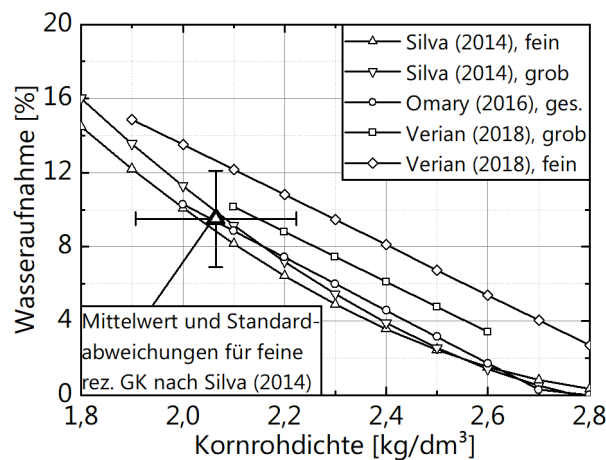


Abb. 2: Zusammenhang zwischen Kornrohddichte und Wasseraufnahme rezyklierter Gesteinskörnungen [3-5]

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

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

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

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

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

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

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

2.2 Technische Optimierung

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

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

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

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

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

3 Betonbrechsande als Bindemittelbestandteil

3.1 Verwendung im Klinkerrohmehl

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

3.2 Gemahlene Betonbrechsande

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

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

3.3 Gemahlene und carbonatisierte Betonbrechsande

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

3.4 Thermisch-mechanisch aufbereitete Betonbrechsande

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

4 Fazit

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

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

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

5 Literatur

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

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

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

6 Autoren

Jan P. Höffgen M. Sc.

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

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

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