

Brechsand als Zementhauptbestandteil – Leitlinien künftiger Anwendung im Zement und Beton

Die Potenziale der Recyclingbrechsande: Von der Aufbereitung mineralischer Bauabfälle bis zur Herstellung ressourcenschonender Betone

Klimaschutz und Ressourceneffizienz sind zwei wesentliche Themen der umweltpolitischen Agenda. Sie werden zweifelsohne auch das Bauen mit Zement und Beton weiterhin beeinflussen. Der Einsatz von Recyclingbrechsand im Zementwerk trägt dazu bei, mineralische Stoffkreisläufe weiter zu schließen. Seine Verwendung als Hauptbestandteil bietet eine Möglichkeit, den Anteil des Portlandzementklinkers zu reduzieren und somit CO₂-Emissionen zu senken. Allerdings muss hierzu ein kontinuierlicher, gleichmäßiger Stoffstrom von entsprechender Qualität zwischen Aufbereitern und Zementwerk gegeben sein. Zudem wäre eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung/Zustimmung im Einzelfall notwendig.

Ausgehend von aktuell geltenden Regelwerken werden im Folgenden Ergebnisse aus dem Forschungsvorhaben „R-Beton“ (www.r-beton.de) vorgestellt sowie Vorschläge zur Herstellung ressourcenschonender Zemente mit gemahlenem Recyclingbrechsand als Hauptbestandteil abgeleitet. Im Projekt „R-Beton“ wurden die brechsandhaltigen Zemente als „R-Zemente“ bezeichnet. Das Projekt wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) gefördert.

Definitionen und normative Verweise

Mineralische Bauabfälle setzen sich aus

- Bauschutt
- Straßenaufbruch
- Boden und Steinen
- Bauabfällen auf Gipsbasis
- Baustellenabfällen

zusammen (vgl. „Monitoring 2016 – Mineralische Bauabfälle“ der Kreislaufwirtschaft Bau). Recycling-Baustoffe (RC-Baustoffe) werden durch aktives Aufbereiten mineralischer Bauabfälle hergestellt. Der Aufbereitungsprozess beinhaltet im Wesentlichen Zerkleinerungs-, Sortier- und Klassierverfahren. In diesem Prozess entstehen Recycling-Gesteinskörnungen, unter anderem feine rezyklierte Gesteinskörnungen, die sog. Brechsande.

Der Begriff „rezyklierter Brechsand“ ist in DIN 4226-100 (Gesteinskörnungen für

Mörtel und Beton, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen) als rezyklierte Gesteinskörnung ≤ 4 mm definiert. Größere rezyklierte Gesteinskörnung > 4 mm ist als „rezyklierter Splitt“ definiert.

Je nach Herkunft, Bauzeit und Verwendung der eingesetzten Materialien und je nach Selektierung und Aufbereitung der Bauabfälle können grobe und feine rezyklierte Gesteinskörnungen eine entsprechend große Variabilität an chemisch-mineralogischen sowie physikalischen Eigenschaften aufweisen. In Abhängigkeit der Materialqualitäten werden in DIN 4226-100 folgende Liefertypen unterschieden:

- Betonsplitt, Betonbrechsand (Typ 1)
- Bauwerksplitt, Bauwerkbrechsand (Typ 2)
- Mauerwerksplitt, Mauerwerkbrechsand (Typ 3)
- Mischsplitt, Mischbrechsand (Typ 4).

Innerhalb dieser Liefertypen variieren die stofflichen Zusammensetzungen hinsichtlich ihrer Anteile, z. B. an ungebundenen bzw. hydraulisch oder keramisch gebundenen Stoffen wie Naturstein, Beton oder Ziegel.

Anwendungsmöglichkeiten und Stoffkreisläufe

Verwertungswege für RC-Gesteinskörnungen

In der Aufbereitung mineralischer Bauabfälle werden in Abhängigkeit von der Art der Wiederverwendung der rezyklierten Gesteinskörnungen (RC-Gesteinskörnungen) lt. „Monitoring 2016 – Mineralische Bauabfälle“ folgende wesentliche Verwertungswege unterschieden:

- Beton- und Asphaltherstellung
- Straßenbau
- Erdbau
- Sonstige.

Die uneingeschränkte Verwendung von feinen rezyklierten Gesteinskörnungen (< 4 mm) ist derzeit nicht möglich.

Verfüllungen mit RC-Gesteinskörnungen

Während der Stoffstrom aus Boden und Steinen überwiegend unaufbereitet in seine Verwertung als Verfüll- oder Auffüllmaterial im Straßen-, Landschafts- und Deponiebau bzw. zur Rekultivierung von Abbauflächen gelangt (Quelle: Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V.), sind RC-Baustoffe grundsätzlich aufzubereiten. Die zum Großteil ungebunden eingesetzten, rezyklierten Gesteinskörnungen weisen nach ihrer Aufbereitung definierte, auf das konkrete Einsatzgebiet abgestimmte Korngrößenverteilungen auf, die sowohl den Feinbereich (0 - 4 mm) als auch den Grobbereich (> 4 mm) abdecken.

Betone mit RC-Gesteinskörnungen

Für die Anwendung im Beton sind die RC-Baustoffe so aufzubereiten, dass sie gemäß der Recyclingrichtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) „Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620“ eingesetzt werden dürfen. In der aktuellen Richtlinie ist der Anwendungsbereich der rezyklierten Gesteinskörnungen begrenzt und auf Gesteinskörnungen der Liefertypen 1 (Betonspplitt) und 2 (Bauwerkspplitt) mit der Körnung > 2 mm beschränkt. Insofern dürfen Betonbrechsande und Bauwerkbrechsande nur dann im Beton verarbeitet werden, wenn sie die Körnung > 2 mm aufweisen.

Die Verwendung feinerer rezyklierter Gesteinskörnungen ≤ 2 mm ist in der DAfStb-Richtlinie ausgeschlossen und daher zur Herstellung von Konstruktionsbeton nicht erlaubt. Grund hierfür sind die – im Vergleich zu gröberer Körnungen sowie zu natürlichen Sanden – zum Teil ungünstigeren Eigenschaften von Brechsand, vorrangig aufgrund der Anhaftungen (z. B. Zementstein) am natürlichen Gesteinskorn.

Alternativer Verwertungsweg:

Brechsand als Zementhauptbestandteil

Im Hinblick auf die Frage alternativer Verwertungswege kann grundsätzlich die Verwendung von Brechsanden bei der Herstellung von Zement – z. B. als Zementhauptbestandteil – in Betracht gezogen werden. An Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen, für die es noch keine Langzeiterfahrungen gibt, werden hohe Anforderungen bzgl. der Nachweisführung ihrer Eignung gestellt. Zunächst sind Nachweise zur Umweltverträglichkeit der Brechsande zu erbringen. Neben der technischen Leistungsfähigkeit der Zemente müssen insbesondere die mit diesen Zementen herzustellenden Betone zulassungsrelevante Dauerhaftigkeitskriterien einhalten und bauaufsichtliche Anforderungen, z. B. an den Frostwiderstand, den Chlorideindringwiderstand oder den Carbonatisierungswiderstand erfüllen.

Die Herstellung und Anwendung eines Zements, der Brechsand als Hauptbestandteil beinhaltet, ist derzeit in Deutschland ohne einen bauordnungsrechtlichen Verwendbarkeitsnachweis (Zulassung/Zustimmung) nicht möglich.

Tabelle 1 Brechsande aus dem Projekt „R-Beton“

Abbruchmaterial	Beschreibung der Bestandteile
Gleisschotter	natürliche, gebrochene Gesteinskörnung, nicht gebunden
Bahnschwellen	bewehrter Beton, hydraulisch gebunden
Betonbruch	Mischung z. B. aus Betonbauteilen, Betonsteinen, Betonestrichen, Mauerwerk, Zementmörtel; überwiegend hydraulisch, z. T. keramisch oder sulfatisch gebunden
Mauerwerksbruch	ziegelreiche Mischung aus überwiegend niedrig gebrannten Tonprodukten, wie z. B. Mauerziegel; außerdem Dachziegel, Klinker-, Kalksandstein-, Betonsteinmauerwerk, Fliesen, Mauer- und Putzmörtel; überwiegend keramisch, z. T. hydraulisch oder sulfatisch gebunden
Mauerwerksmischbruch	ziegelarme Mischung, z. B. aus Klinker-, Kalksandstein-, Betonsteinmauerwerk, niedrig und hoch gebrannte Mauerziegel und Dachziegel, Fliesen, Mauer- und Putzmörtel; überwiegend keramisch, z. T. hydraulisch oder sulfatisch gebunden
Dachziegelbruch	Mischung aus gebrannten Ziegeln, keramisch gebunden

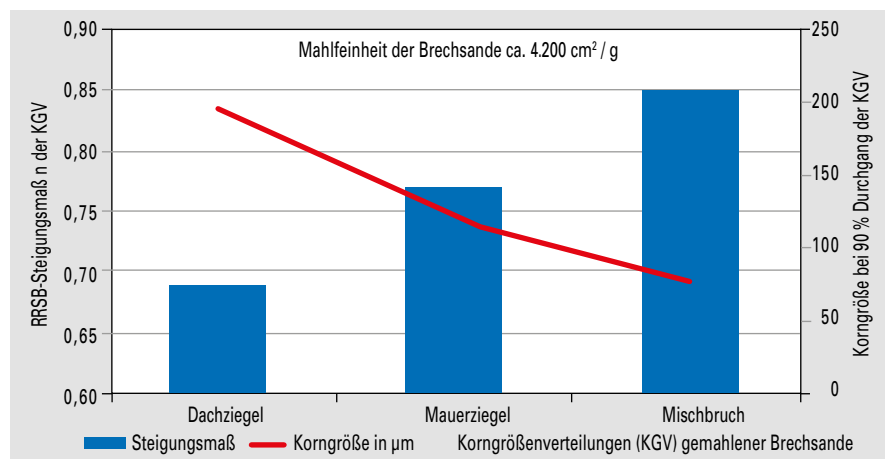


Bild 1 Parameter der RRSB-Korngrößenverteilungen gemahlener, ziegelhaltiger Brechsande unterschiedlicher Zusammensetzung

Mit Untersuchungen der VDZ gGmbH wurden die Potenziale der Verwendung von Brechsanden als Zementhaupt- oder -nebenbestandteil ausgelotet. Die in dem BMBF-geförderten Verbundforschungsvorhaben „R-Beton“ (Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation) gewonnenen Erkenntnisse werden im Folgenden zusammengefasst.

Einordnung der Brechsande nach Herkunft der Abbruchmaterialien

In Abhängigkeit regionaler Lager- und Produktionsstätten wurden in Deutschland bereits über Jahrhunderte mineralische Baustoffe hergestellt, verarbeitet und eingebaut. Entsprechend differenziert sind die in der heutigen Zeit aufbereiteten Bauabfälle aus Abbruch und selektivem Rückbau einzuordnen. Für die Weiterverwendung eines Brechsandes sind die Kenntnisse, aus welchem Abbruchma-

terial ein Brechsand gewonnen wurde, wesentlich. Anhand dieser Kenntnisse lassen sich bereits vorab erste Aussagen zur chemisch-mineralogischen Zusammensetzung der Brechsandbestandteile ableiten. Im Projekt „R-Beton“ wurden Brechsande aus unterschiedlichen Abbruchmaterialien (Tabelle 1) gewonnen.

Die Abbruchmaterialien stammten aus dem Großraum Rhein-Main-Neckar. In einem Recyclingwerk in Ludwigshafen wurden die RC-Gesteinskörnungen trocken, d. h. ohne Waschverfahren aufbereitet. Das Größtkorn der Brechsande lag bei einem äquivalenten Durchmesser von ca. 4 mm. Der Feuchtegehalt der Brechsande variierte zwischen 4 und 14 M.-%. An den betonhaltigen Brechsanden wurden vergleichsweise geringe, an den ziegelhaltigen Brechsanden entsprechend höhere Feuchtegehalte ermittelt. Brechsande, die als Hauptbestandteil

2

eines Zementes eingesetzt werden sollen, können separat oder gemeinsam mit anderen Zementbestandteilen gemahlen werden. In Laborversuchen wurden die Brechsande (Tabelle 1) zunächst getrocknet und anschließend auf diskontinuierlich arbeitenden Kugelmöhlen (Batchmöhlen) gemahlen. Die Mahldauer zum Erreichen einer vergleichbaren Mahlfeinheit von ca. 4.200 cm²/g (Blaine) variierte – je nach Beschaffenheit und Mahlbarkeit des Mahlgutes – in weiten Grenzen. Bild 1 zeigt beispielhaft die granulometrische Auswertung laborseitig gemahlener, ziegelhaltiger Brechsande.

Aus Bild 1 geht hervor, dass die leicht mahlbaren, ziegelreichen Brechsande (Dachziegel) nach der Mahlung auf vergleichbare Feinheit (Blaine) eine breitere Korngrößenverteilung mit geringerer Steigung (Steigungsmaß n) aufwiesen als die ziegelarmen Brechsande aus gemischtem, schwer mahlbarem Bruch. Am Mischbruch wurde nach der Mahlung eine engere Korngrößenverteilung mit höherem Steigungsmaß n ermittelt.

Für den großtechnischen Mahlanlagenbetrieb stellen die granulometrische und stoffliche Zusammensetzung der Brechsande sowie ihre Mahlbarkeit wesentliche Eingangsparameter dar. Insofern wirken sich die Homogenität der Brechsande (z. B. aus sortenreinem Abbruch oder gemischtem Abbruch) wie auch die Beschaffenheit der Brechsandbestandteile (z. B. Ziegel, Zementsteinmatrix oder natürliche Gesteinskörnung) auf die Mahlbarkeit und somit auf den Mahlbetrieb aus. Sortenreine Brechsande, wie sie z. B. aus selektivem Rückbau mit anschließender separater Aufbereitung stammen, werden sich für Mühle und Mahlbetrieb besser eignen, da sie geringe, kalkulierbare Schwankungen in der stofflichen Zusammensetzung aufweisen und ein stabiler Betriebszustand erzielt werden kann. Dagegen können Brechsande aus nicht homogenisiertem

Abbruch variabler Herkunft deutlich größeren Schwankungen unterliegen und den Mahlbetrieb ggf. ungünstig beeinflussen.

Beurteilung umweltrelevanter Brechsandeigenschaften

Sollen Brechsande als Zementhauptbestandteil eingesetzt werden, ist ein kontinuierlicher, gleichmäßiger Stoffstrom von entsprechender Qualität zwischen Aufbereichern und Zementwerk zu gewährleisten. Die Qualitätsanforderungen richten sich insbesondere an die umweltrelevante bzw. chemisch-mineralogische Zusammensetzung der Brechsande. Im Vordergrund stehen dabei zunächst die Auswirkungen auf Boden und Gewässer sowie im Weiteren auf zementtechnische und dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften.

Derzeit sind Brechsande in DIN EN 197-1 nicht als Hauptbestandteil definiert. Zemente unter Verwendung von gemahlenem Brechsand als Hauptbestandteil bedürfen daher eines bauordnungsrechtlichen Verwendbarkeitsnachweises, d. h. einer Zulassung/Zustimmung.

Das umweltanalytische Konzept

Im Projekt „R-Beton“ wurde ein Konzept zur Durchführung und Auswertung umweltanalytischer Untersuchungen an Brechsanden erarbeitet. Dieses Konzept sowie die Ergebnisse der Brechsandanalysen sollten die Basis für künftige, bauordnungsrechtliche Bewertungskriterien bilden und einen möglichen Einsatz unterschiedlicher Brechsande als Haupt- und Nebenbestandteil im Zement beschreiben. Das umweltanalytische Konzept ist in Tabelle 2 zusammengefasst.

Zur Orientierung wurden zunächst Anforderungen aus den Mitteilungen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) sowie des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) herangezogen. Seit August 2017 wurden darüber hinaus die Höchst-

werte der Eluat- und Feststoffparameter aus Tabelle 2 der DIN 4226-101 berücksichtigt (Rezyklierte Gesteinskörnungen für Beton nach DIN EN 12620, Typen und geregelte gefährliche Substanzen).

Vor ihrer labortechnischen Verwendung als Zementbestandteil wurden die Brechsande stufenweise analysiert und mit Blick auf die jeweils nächste, ggf. erforderliche Stufe bewertet. Stufe 1 und Stufe 2 wurden auf alle Brechsande angewendet. Stufe 3 wurde nicht in Ansatz gebracht.

Ergebnisse aus Stufe 1:

Untersuchung der Feststoffwerte

Die Feststoffwerte der Brechsande wurden nach dem LAGA-Eckpunktepapier beurteilt. Folgende Parameter wurden am Feststoff bestimmt:

- EOX, LHKW, PAK₁₆, PCB₆
- Arsen, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei, Vanadium, Zink, Quecksilber.

Die im LAGA-Eckpunktepapier formulierten Anforderungen an die Feststoffwerte wurden eingehalten. Darüber hinaus wurden die in DIN 4226-101 aufgeführten Anforderungen erfüllt.

Ergebnisse aus Stufe 2:

Untersuchungen der Eluate

Die Brechsandproben aus Bahnschwellen, Betonbruch, Gleisschotter, Mauerwerk und Dachziegel (Körnung 0/4) wurden vor Herstellung entsprechender Eluate auf eine Korngröße < 125 µm gemahlen. Der Mauerwerksmischbruch wurde vor Herstellung des Eluats auf eine Körnung < 2 mm gebrochen. Es wurde das Deutsche Einheitsverfahren DEV S4 (DIN 38414-4, Schütteltest) durchgeführt.

Folgende Parameter wurden am Eluat bestimmt:

- Arsen, Cadmium, Chrom, Kupfer, Nickel, Blei, Vanadium, Zink, Quecksilber

Tabelle 2 Umweltanalytisches Konzept aus dem Projekt „R-Beton“

Stufe	Beschreibung der Untersuchungen, Bewertung der Ergebnisse
1	Untersuchungen zur Bestimmung der Feststoffwerte, Anwendung eines DIBt-Prüfplans für RC-Gesteinskörnungen, Bewertung der Analyseergebnisse nach LAGA-Eckpunktepapier bzw. Gesamtgehalt nach DIN 4226-101:2017-08
2	Untersuchungen von Eluaten nach dem DEV S4-Verfahren, Anwendung eines DIBt-Prüfplans für RC-Gesteinskörnungen, Einstufung/Zuordnung der Analyseergebnisse nach LAGA M 20 bzw. Gesamtgehalt nach DIN 4226-101:2017-08
3	Untersuchungen gemäß DAfStb-Richtlinie „Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen“, Langzeitstandtest am Beton, Anwendung eines DIBt-Prüfplans

- Chlorid, Sulfat, Phenolindex, pH-Wert, Leitfähigkeit.

Die Analyseergebnisse der Brechsandeluate wurden den Zuordnungswerten Eluat (Recyclingbaustoffe/nicht aufbereiteter Bauschutt) nach LAGA-Mitteilung 20 (LAGA M 20) gegenübergestellt und bewertet. Die Eluatparameter wurden wie folgt eingestuft:

- Die Z0-Zuordnungen nach LAGA M 20 wurden überwiegend eingehalten und nur in wenigen Fällen geringfügig überschritten.
- Die Eluate mit bis zu maximal zwei Z0-Überschreitungen haben für die Parameter Chlorid, Chrom, Sulfat bzw. Phenolindex die Zuordnung Z 1.1 bzw. Z 1.2 nach LAGA M 20 erfüllt. Das Eluat Dachziegelbruch hat die

Z0-Zuordnungen nach LAGA M 20 dreimal überschritten und wurde in den Parametern Chlorid, Arsen und Kupfer ebenfalls mit Z 1.1 bzw. mit Z 1.2 eingestuft.

- Die Z 2-Zuordnungen nach LAGA M 20 wurden von allen Eluaten eingehalten.

Die in DIN 4226-101 aufgeführten Anforderungen wurden von allen Eluaten erfüllt. Überschreitungen des pH-Wertes und der Leitfähigkeit stellen gemäß DIN 4226-101 kein Ausschlusskriterium dar.

Ausblick: Aktuelle umweltanalytische Aspekte der Bauordnung

Für Gegenstände oder Stoffe, die im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes § 5 Abs. 1 noch kein Verwertungsverfahren durchlaufen haben, gelten die sog. Abfalleigenschaft und die damit einher-

gehenden abfallbezogenen Rechtspflichten. Sollen Recyclingbrechsande aus der Aufbereitung mineralischer Bauabfälle technisch angewendet und in Bauprodukten eingesetzt werden, gilt zudem die Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen mit den entsprechenden Verweisen auf die Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich der Auswirkungen auf Boden und Gewässer (ABuG) und die LAGA-Mitteilung 20. Insofern sind die umwelanalytischen Aspekte zunächst an den Verwertungswegen der Brechsande auszurichten. Im ersten Schritt ist daher grundsätzlich zu unterscheiden,

- ob die Verwertung des Brechsandes als feine rezyklierte *Gesteinskörnung* < 4 mm vorgesehen ist,

Tabelle 3 Vorschlag zur Beurteilung umweltrelevanter Brechsandeigenschaften sowie der Auswirkungen auf Boden und Gewässer

Zustand nach Aufbereitung	A) Brechsand als Gesteinskörnung	B) Brechsand als Mahlprodukt	
Verwendung	als ungemahlener Brechsand, z. B. zum Verfüllen im Straßenbau, z. B. als Gesteinskörnung im Beton	als gemahlener Brechsand bzw. Brechsandmehl, z. B. als Hauptbestandteil im R-Zement	
Gegenstand der Untersuchungen	- Brechsand - Brechsand als Gesteinskörnung im Beton - Referenzbeton	- Brechsand - brechsandhaltiger Zement (R-Zement) als Bindemittel im Beton - Referenzzement (CEM I) im Beton	
Umfang und Ablauf der Untersuchungen	1. Bestimmung der <i>Feststoffwerte am Brechsand</i> : Parameterumfang und Bewertung gemäß LAGA-Eckpunktepapier, s. DIBt-Grundsätze/DIBt-Mitteilungen ¹⁾	1. Bestimmung der <i>Feststoffwerte am Brechsand</i> : Kohlenwasserstoffe, PAK, PCB sowie Anorganik, Parameterumfang in Anlehnung an DIN 4226-101, Bewertung gemäß LAGA-Eckpunktepapier	
	2. Bestimmung der <i>Eluatwerte am Brechsand</i> : nach DEV S4 (DIN 38414-4, Schütteltest am Brechsand), Parameterumfang und Bewertung gemäß Zuordnungen aus LAGA-Mitteilung 20 s. DIBt-Grundsätze/DIBt-Mitteilungen ¹⁾	2. <i>Elutionsversuch am Festbeton</i> : Herstellung der Betone und Prüfkörper - mit R-Zement - mit Referenzzement gleicher Klinkerbasis sowie ähnlicher Festigkeitsklasse, Untersuchung der Oberflächenauslaugung nach DSLT (Dynamic Surface Leaching Test, DIN CEN/TS 16637-2); Parameterumfang gemäß DIN 4226-101, Bewertung entsprechend DIBt-Modell	
	3. <i>Elutionsversuch am Festbeton</i> : Herstellung der Betone und Prüfkörper - mit Brechsand als Gesteinskörnung - mit Referenzgesteinskörnung Untersuchung des zeitabhängigen Auslaugverhaltens im Langzeitstandtest gemäß DAfStb-Richtlinie ²⁾ Festlegung des Parameterumfangs nach Auswertung der Brechsandeluate durch das DIBt, Bewertung entsprechend DIBt-Modell		
Ziel der Untersuchungen	Nachweis der Umweltverträglichkeit:	Nachweis der Umweltverträglichkeit:	
	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für Brechsand (in Anlehnung an AbZ für Flugasche) DIBt-Prüfplan erforderlich	Zustimmung im Einzelfall (z. B. bezogen auf <i>einen</i> R-Zement aus <i>einem</i> Zementwerk) länderspezifisch	Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung, DIBt-Prüfplan erforderlich

¹⁾ DIBt-Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser, DIBt-Mitteilung zur Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen (Ausgabe 2017/1) Anhang 10: Anforderungen an bauliche Anlagen bezüglich der Auswirkungen auf Boden und Gewässer (ABuG): 2017-07

²⁾ DAfStb-Richtlinie zur Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen, Teil 1



■ ob ein Verwertungsweg als *Brechsandmehl* für die Anwendung als Hauptbestandteil in R-Zementen angestrebt wird.

Im zweiten Schritt ist der Nachweis der Umweltverträglichkeit zu erbringen. Aus Sicht der Bauordnung sind an den ungemahlene bzw. gemahlene Brechsanden (Gesteinskörnung vs. Mahlprodukt) entsprechend unterschiedliche umweltanalytische Untersuchungen durchzuführen.

Der in Tabelle 3 dargestellte Vorschlag greift Erkenntnisse aus dem Verbundprojekt „R-Beton“ auf, er orientiert sich zugleich an aktuellen normativen Entwicklungen und berücksichtigt bauordnungsrechtliche Empfehlungen:

- Soll ein Brechsand als Gesteinskörnung im Beton eingesetzt werden (vgl. Tabelle 3 Spalte A), bleibt er bis zur Verarbeitung in seinem granulometrischen Zustand und wird nicht zerkleinert.
- Soll ein Brechsand als Hauptbestandteil im Zement eingesetzt werden (vgl. Tabelle 3, Spalte B), ist eine Mahlung des Brechsandes auf Zementfeinheit erforderlich. Das Brechsandmehl kann in getrennter Mahlung oder in gemeinsamer Mahlung mit anderen Zementbestandteilen hergestellt werden.

Herstellung brechsandhaltiger Versuchszemente

Zur Herstellung der Versuchszemente kamen überwiegend Brechsande aus trockener Aufbereitung zur Anwendung. Die brechsandhaltigen Zemente wurden laborseitig durch getrenntes Mahlen der Brechsande und anschließendes Mischen mit Portlandzement hergestellt. In großtechnischen Betriebsversuchen wurden die R-Zemente gemeinsam gemahlen.

Laborzemente

Vor ihrer Verwendung als Haupt- bzw. Nebenbestandteil wurden die Brechsande bis zum Erreichen der Massekonstanz getrocknet, homogenisiert und schließlich in Chargenmühlen (z. B. Kugelmühle) auf Zementfeinheit gemahlen. Da mineralische Bauabfälle, aus denen Brechsande gewonnen werden, i. d. R. inhomogene Zusammensetzungen haben und zum Teil sehr schwer mahlbare Bestandteile aufweisen können, wurde in besonderen Fällen – um sog. Spritzkorn im Mahlgut zu vermeiden – ein mehrstufiges Labormahlverfahren gewählt. Die

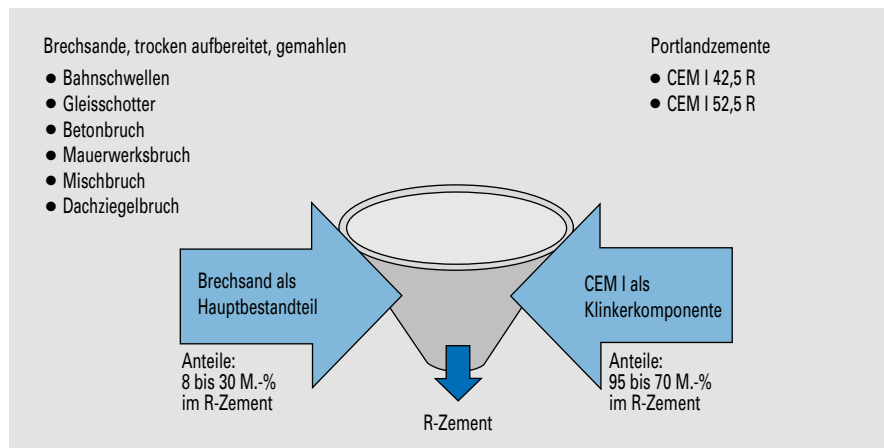


Bild 2 Grafische Darstellung zur Herstellung der R-Zemente durch Mischen der mehlfeinen Ausgangsstoffe im Labor, Beispiel für die Verwendung trocken aufbereiteter Brechsande als Hauptbestandteil

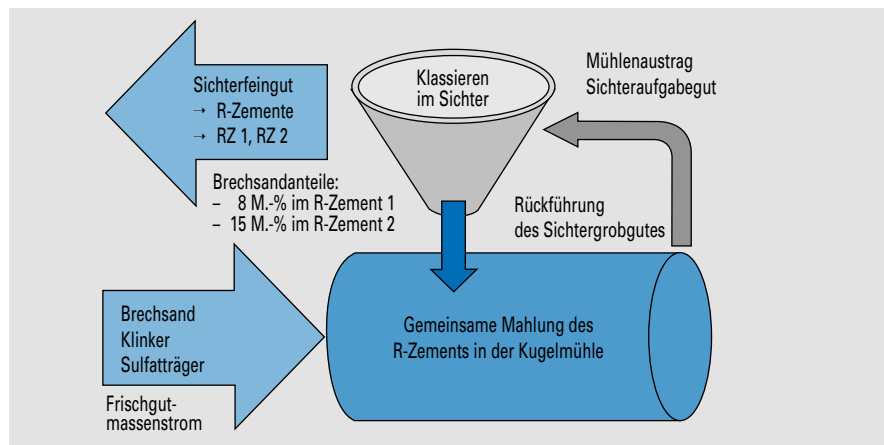


Bild 3 Grafische Darstellung zur Herstellung der R-Zemente RZ 1 und RZ 2 durch gemeinsames Mahlen des Brechsandes aus Mauerwerksmischbruch, des Klinkers und der Sulfatträger auf einer großtechnischen Betriebsmahlanlage

Brechsandmehle wiesen am Ende des Mahlverfahrens Feinheiten von 3.950 bis 4.250 cm²/g (Blaine) auf.

In den Laborversuchen wurden R-Zemente mit Brechsandanteilen von 5 M.-% (Nebenbestandteil), 8 M.-%, 10 M.-%, 15 M.-% bzw. 30 M.-% (Hauptbestandteil) hergestellt. Als Klinkerkomponenten wurden Portlandzemente CEM I 52,5 R und CEM I 42,5 R – jeweils mit entsprechenden Anteilen von 95 M.-% bis 70 M.-% – verwendet.

Die labortechnische Herstellung und Zusammensetzung der Zemente mit Brechsand als Hauptbestandteil gehen aus Bild 2 hervor.

Werkzemente

In großtechnischen Betriebsversuchen in einem Zementwerk wurden R-Zemente durch gemeinsames Mahlen von Klinker, Sulfatträger und Brechsand in einer Umlaufmahlanlage mit Kugelmühle und Sichter her-

gestellt. In den Betriebsversuchen wurde Mauerwerksmischbruch eingesetzt.

In den Werkzementen (RZ 1 und RZ 2) wurden Anteile von 8 M.-% Brechsand für RZ 1 bzw. 15 M.-% Brechsand für RZ 2 eingestellt. Es wurden Mahlfeinheiten von 5.400 cm²/g bis 5.600 cm²/g (Blaine) erzielt. Das Prinzip der Herstellung der brechsandhaltigen Werkzemente geht aus Bild 3 hervor.

Zementeigenschaften

Zemente unter Verwendung von gemahlendem Brechsand als Hauptbestandteil müssen die technische Nachweise nach DIN EN 197-1 erbringen und entsprechende Mindestanforderungen (z. B. nach DIN EN 196-1, DIN EN 196-3) erfüllen.

Eigenschaften der R-Zemente nach DIN EN 196-3

An den Laborzementen mit bis zu 10 M.-% Brechsand sowie an den Werkzementen wurden der Wasseranspruch

für die Normsteife sowie das Erstarrungsverhalten nach DIN EN 196-3 überprüft. Die R-Zemente auf Basis des CEM I 42,5 R wiesen einen Wasseranspruch von 26 M.-% bis 27 M.-% auf. Ein Referenzzement CEM II/A-LL mit 10 M.-% Kalkstein, ebenfalls auf Basis des CEM I 42,5 R hergestellt, hatte einen Wasseranspruch von 26 M.-%. Wurde der CEM I 42,5 R durch CEM I 52,5 R ersetzt, erhöhte sich der Wasseranspruch der R-Zemente auf 30 M.-% bis 32 M.-%.

Der Erstarrungsbeginn des Referenzzements lag bei 160 Minuten, das Erstarrungsende bei 195 Minuten. Bei den R-Zementen mit CEM I 42,5 R als Klinkerkomponente lagen die Werte des Erstarrungsbeginns zwischen 175 und 240 Minuten, die Werte des Erstarrungsendes zwischen 210 und 285 Minuten. Bei Verwendung des CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente im R-Zement verkürzten sich die Erstarrungszeiten auf ca. 140 Minuten (Erstarrungsbeginn) bzw. ca. 180 Minuten (Erstarrungsende).

Druckfestigkeit der R-Zemente nach DIN EN 196-1

An den R-Zementen wurde vorrangig die Druckfestigkeit im Alter von 2 bzw. 28 Tagen (DIN EN 196-1) geprüft und ausgewertet. Insbesondere sollte dabei der Einfluss des Brechsandtyps und des Brechsandgehaltes auf die Normfestigkeiten der Laborzemente untersucht werden. Alle im Projekt „R-Beton“ untersuchten Zemente aus den Labor- und Betriebsversuchen entsprachen – je nach stofflicher bzw. granulometrischer Zusammensetzung – den Festigkeitsklassen 32,5 R bis 52,5 R.

Die folgenden Abschnitte zeigen beispielhaft einige Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung im Alter von 28 Tagen (Normfestigkeiten).

Einfluss des Brechsandgehaltes

Wie aus Bild 4 hervorgeht, haben fast alle R-Zemente mit 10 M.-% Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R Werte > 52,5 MPa im Prüfalalter von 28 Tagen erreicht und könnten somit nach DIN EN 197-1 der Druckfestigkeitsklasse 52,5 N zugeordnet werden. Der Zement mit 10 M.-% Brechsand aus Mauerwerksbruch lag im Bereich der Festigkeitsklasse 42,5 R. Ein signifikanter Einfluss des Brechsandtyps wurde nicht ermittelt.

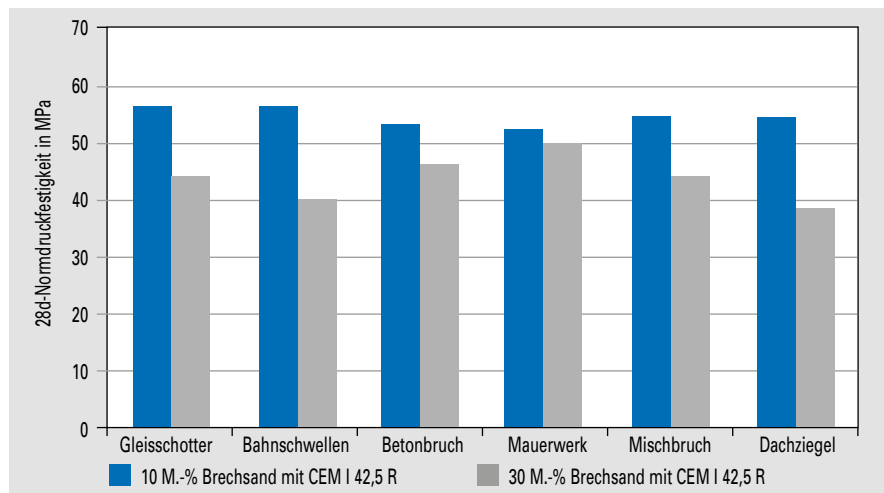


Bild 4 Druckfestigkeit der R-Zemente mit 10 M.-% bzw. 30 M.-% Brechsand im Prüfalalter von 28 Tagen, CEM I 42,5 R als Klinkerkomponente im R-Zement

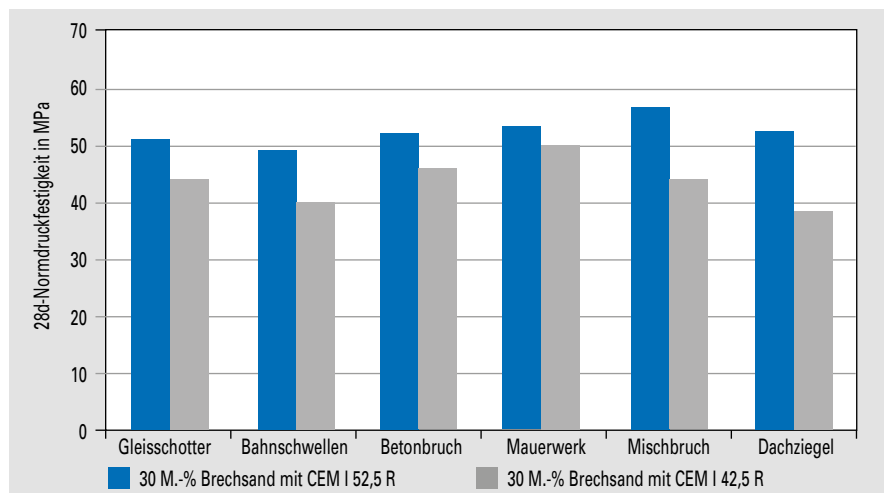


Bild 5 Druckfestigkeit der R-Zemente mit 30 M.-% Brechsand im Prüfalalter von 28 Tagen, CEM I 42,5 R und CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente im R-Zement

Wurde im R-Zement – bei identischer Klinkerkomponente – ein Brechsandgehalt von 30 M.-% eingestellt (vgl. Bild 4), verringerten sich die Normfestigkeiten. Im Prüfalalter von 28 Tagen lagen die Ergebnisse der Prüfungen zwischen rd. 38 MPa und 50 MPa. Infolge der Erhöhung des Brechsandgehaltes von 10 M.-% auf 30 M.-% stellte sich heraus, dass die Abnahme der Normfestigkeit in Abhängigkeit des Ausgangsmaterials unterschiedlich stark ausgeprägt war. Es wurden Festigkeitsdifferenzen von bis zu 16 MPa (z. B. bei Anwendung der Brechsande aus Gleisschotter oder Dachziegel) ermittelt. Dagegen verringerte sich die 28d-Druckfestigkeit von 52,5 MPa auf nur 50,0 MPa, wenn Brechsand aus Mauerwerksbruch zur Anwendung kam.

Die hier untersuchten R-Zemente mit 30 M.-% Brechsand erreichten die Anfor-

derungen der Festigkeitsklasse 32,5 R, zum Teil bis zur Festigkeitsklasse 42,5 R der DIN EN 197-1.

Einfluss der Klinkerkomponente

Bild 5 zeigt die Normfestigkeit der R-Zemente mit 30 M.-% Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R bzw. mit CEM I 52,5 R.

Der Wechsel der Klinkerkomponente von CEM I 42,5 R auf CEM I 52,5 R – jeweils mit einem Anteil von 70 M.-% im R-Zement – hatte unterschiedliche Auswirkungen in Abhängigkeit von der Herkunft des im R-Zement verwendeten Brechsandes. So konnte die Normfestigkeit des R-Zementes mit Dachziegelbruch von einem vergleichsweise geringem Festigkeitsniveau bei etwa 39 MPa (mit CEM I 42,5 R) auf etwa 53 MPa (mit CEM I 52,5 R) deutlich

angehoben werden. Dagegen wurde die Normfestigkeit des R-Zements mit Mauerwerksbruch nur wenig beeinflusst, wenn die Festigkeitsklasse des CEM I erhöht wurde.

Die R-Zemente mit 30 M.-% Brechsand in Kombination mit CEM I 52,5 R erreichten die Anforderungen an die Festigkeitsklassen 42,5 R, zum Teil bis zur Festigkeitsklasse 52,5 R nach DIN EN 197-1, sowohl in der Anfangsfestigkeit als auch in der Normfestigkeit.

Einfluss des ziegelhaltigen Mauerwerksbruchs

Der Einfluss der Brechsandeigenschaften zeigt sich insbesondere im Vergleich ziegelhaltiger R-Zemente mit Brechsandgehalten von 8 M.-%, 15 M.-% bzw. 30 M.-%. Die separat gemahlene Brechsande aus Mauerwerksbruch bzw. aus Mauerwerksmischbruch wurden – wie der Großteil der Laborzemente – mit CEM I 42,5 R kombiniert.

Aus Bild 6 geht hervor, dass die Druckfestigkeit der Zemente gesteigert werden konnte, wenn der Brechsandgehalt von 30 M.-% auf 15 M.-% bzw. auf 8 M.-% reduziert wurde. Im Prüfalalter von 28 Tagen zeigte sich, dass die Einstellung eines geringen Brechsandgehaltes (8 M.-%) zu vergleichbaren Druckfestigkeiten führte.

Wurde der Brechsandgehalt von 8 M.-% auf das fast Vierfache (30 M.-%) erhöht, nahmen die Festigkeiten bei Verwendung von ziegelarmem Mauerwerksmischbruch infolge des Verdünnungseffektes deutlich ab. Bei Verwendung des ziegelreichen Mauerwerksbruchs

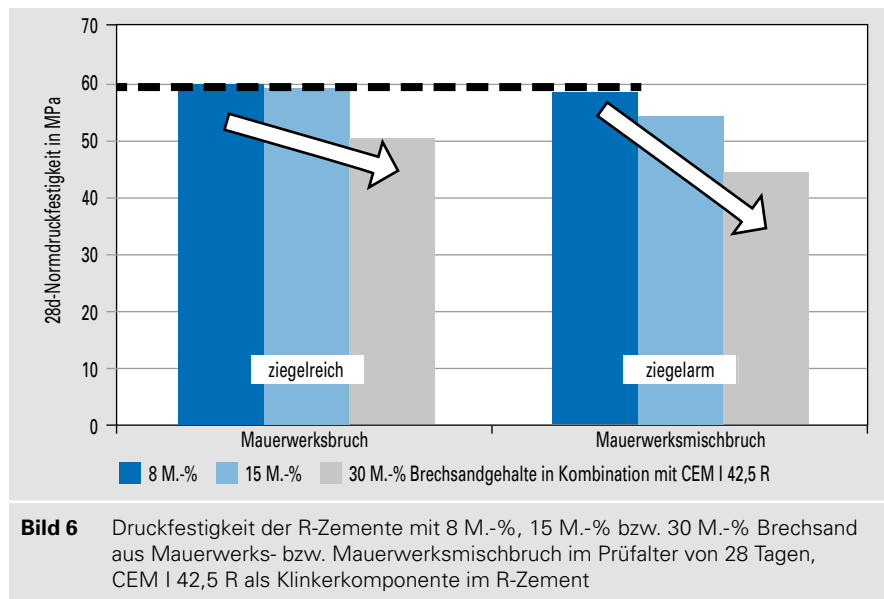


Bild 6 Druckfestigkeit der R-Zemente mit 8 M.-%, 15 M.-% bzw. 30 M.-% Brechsand aus Mauerwerks- bzw. Mauerwerksmischbruch im Prüfalalter von 28 Tagen, CEM I 42,5 R als Klinkerkomponente im R-Zement

war der Verdünnungseffekt weniger signifikant. Hier zeigt sich der Einfluss der Brechsandreaktivität auf die Zementeigenschaften. Die chemische Analyse der Brechsande (insbesondere der reaktionsfähigen Kieselsäure) lässt Rückschlüsse auf die Reaktivität der Brechsande zu. Die Verwendung von ziegelreichem Mauerwerksbruch mit rd. 26 M.-% reaktionsfähiger Kieselsäure führte in jedem Prüfalalter zu höheren Druckfestigkeiten als die Verwendung von ziegelarmem Mischbruch mit rd. 16 M.-% reaktionsfähiger Kieselsäure.

Damit erreichte der Brechsand aus ziegelreichem Mauerwerksbruch mit einem Massenanteil von mindestens 25 M.-% an reaktionsfähigem Siliciumdioxid das wesentliche Kriterium der in DIN EN 197-1, Abschnitt 5.2.3.1 bzw. 5.2.3.3 geforderten Eigenschaften für natürliche ge-

temperte Puzzolane. Die technischen Voraussetzungen für die Herstellung eines R-Zements als Portlandpuzzolanzement (CEM II/A-Q, CEM II/B-Q) nach DIN EN 197-1 wurden erfüllt.

Dauerhaftigkeitsrelevante Betoneigenschaften

Prüfverfahren und Beurteilungskriterien
Der Nachweis der Leistungsfähigkeit neuer Zemente sollte sich möglichst unmittelbar an den bauordnungsrechtlichen Verfahren orientieren. Daher wurden die Prüfverfahren und Betonzusammensetzungen verwendet, die in bauaufsichtlichen Anwendungszulassungen durch das DIBt relevant sind. Die eingesetzten Verfahren haben auch Eingang gefunden in das Europäische Bewertungsdokument EAD 150001-00-0301 sowie in die Verfahrensgrundsätze CEN TR 16563 Anhang B.

Tabelle 4 Bauordnungsrechtliche Verfahren zur Durchführung von dauerhaftigkeitsrelevanten Zulassungsprüfungen

Betoneigenschaft	Prüfverfahren	EAD-Nr. Verfahren	w/z-Wert	Zementgehalt	Beurteilungskriterium
Frostwiderstand (Abwitterungen)	Wüfelverfahren Methode FT _{cube}	150001-00-0301, lfd. Nr. 17	0,60	300 kg/m ³	gemäß DIBt: Abwitterungen < 10 M.-% nach 100 FTW ³⁾
Frostwiderstand (Relativer dynamischer E-Modul, RDEM)	CIF-Test Methode FT _{CF}	150001-00-0301, lfd. Nr. 17	0,50	320 kg/m ³	gemäß BAW-Merkblatt: RDEM > 75% nach 28 FTW ³⁾
Frost-Tausalz-Widerstand	CDF-Test Methode FTS _{CDF}	150001-00-0301, lfd. Nr. 18	Luftporenbeton 0,50	320 kg/m ³	gemäß BAW-Merkblatt: Abwitterungen < 1,5 kg/m ² nach 28 FTW ³⁾
Chlorideindringwiderstand	Migrationsschnelltest Methode D _{mig}	150001-00-0301, lfd. Nr. 16	0,50	320 kg/m ³	gemäß DIBt: Chloridmigrationskoeffizient D _{mig} ≤ 25 · 10 ⁻¹² m ² /s
Carbonatisierungswiderstand	Carbonatisierungstiefe Methode C _{dr}	150001-00-0301, lfd. Nr. 15	Feinbetonprismen 0,50	450 g	gemäß DIBt-Bewertungshintergrund in Abhängigkeit der Druckfestigkeit

³⁾ FTW: Frost-Tau-Wechsel

Das Dauerhaftigkeitspotenzial im Beton wurde jeweils in zulassungsrelevanten Grenzrezepturen geprüft. Dazu zählen die Untersuchungen des Frostwiderstandes, des Frost-Tausalz-Widerstandes, des Chloridmigrationswiderstandes und des Carbonatisierungswiderstandes. Tabelle 4 fasst die Verfahren und Beurteilungskriterien zusammen.

Die folgenden Abschnitte zeigen beispielhaft die Ergebnisse der dauerhaftigkeitsrelevanten Untersuchungen an Betonen unter Verwendung von R-Zementen.

Der ausführliche Untersuchungsbericht ist unter <https://www.tib.eu/de> abrufbar: *Verbundvorhaben: R-Beton, Ressourcenschonender Beton – Werkstoff der nächsten Generation; Teilvorhaben 5: RC-Gesteinskörnung – Anwendung im Zement, Ökobilanzierung der Zement- und Betonherstellung, Bewertung der Alkaliempfindlichkeit.*

Untersuchungsergebnisse

Die Übersicht in Tabelle 5 orientiert sich an den Verfahren und Beurteilungskriterien aus Tabelle 4. Es geht daraus hervor, welche Dauerhaftigkeitsprüfungen im Projekt „R-Beton“ bestanden wurden und mit welchen R-Zementen die Beurteilungskriterien eingehalten werden konnten.

Prüfung des Frostwiderstandes und der inneren Gefügeschädigung

Die Prüfungen zur Bestimmung des Frostwiderstandes wurden nach dem Würfelverfahren durchgeführt. Die Untersuchung der Betone erfolgte bis zu 100 Frost-Tau-Wechseln mit einem Wechsel pro Tag. Bei Anwendung der R-Zemente mit bis zu 30 M.-% Brech-sand wurde der in den Zulassungsprüfungen des DIBt verwendete Grenzwert für Abwitterungen von 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln sicher eingehalten.

Zur Untersuchung der inneren Gefügeschädigung (CIF-Test) wurden die Betone anhand des relativen dynamischen E-Moduls bewertet. Die Prüfungen wurden über 56 Frost-Tau-Wechsel durchgeführt. Die Betone unter Verwendung der R-Zemente mit Mauerwerksbruch haben das Beurteilungskriterium für den CIF-Test nach dem Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) durchweg eingehalten und nach 28 Frost-Tau-Wechseln einen relativen dynamischen E-Modul von > 75 % erzielt. Bei Verwendung anderer R-Zemente wurde das Kriterium in sieben von 13 Betonprüfungen nicht erfüllt.

Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes

Das CDF-Verfahren zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes kam an Betonen mit künstlichen Luftporen zur Anwendung. Die Betone wurden mit einem Luftgehalt im Frischbeton von ca. 4,5 bis 6,0 Vol.-% hergestellt.

Tabelle 5 Ergebnisübersicht der Dauerhaftigkeitsprüfungen an Betonen unter Verwendung von R-Zementen mit bis zu 30 M.-% Brechsand unterschiedlicher Herkunft (X: Prüfung bestanden; 0: Prüfung nicht bestanden, n. g.: nicht geprüft)

Brechsand	Brechsandgehalt im R-Zement [M.-%]	Klinkerkomponente CEM I	Würfelverfahren	CIF-Test	CDF-Test	Chloridmigration	Carbonatisierung
Bahnschwellen	10	42,5 R	x	0	x	x	x
	30	42,5 R	x	n. g.	n. g.	0	n. g.
	30	52,5 R	n. g.	x	n. g.	0	n. g.
Betonbruch	10	42,5 R	x	0	x	x	x
	30	42,5 R	x	n. g.	n. g.	0	n. g.
	30	52,5 R	n. g.	x	n. g.	0	n. g.
Mauerwerksbruch	10	42,5 R	x	x	x	x	x
	30	42,5 R	x	x	n. g.	x	n. g.
	30	52,5 R	n. g.	x	n. g.	x	n. g.
Dachziegelbruch	10	42,5 R	n. g.	0	x	n. g.	x
	30	42,5 R	x	x	n. g.	x	n. g.
	30	52,5 R	n. g.	0	n. g.	x	n. g.
Gleisschotter	10	42,5 R	x	0	x	x	x
	30	42,5 R	x	n. g.	n. g.	0	n. g.
	30	52,5 R	n. g.	0	n. g.	0	n. g.
Mauerwerksmischbruch	10	42,5 R	n. g.	n. g.	x	n. g.	x
	30	42,5 R	x	x	n. g.	0	n. g.
	30	52,5 R	n. g.	x	n. g.	x	n. g.
	8 ⁴⁾		x	x	n. g.	x	x
	15 ⁴⁾		x	0	x	x	x

⁴⁾ Werkzement aus gemeinsamer Mahlung

Die Prüfungen wurden über 28 Frost-Tau-Wechsel durchgeführt. Dem Beispiel der Laborzemente mit 10 M.-% Brechsand in Kombination mit CEM I 42,5 R ist zu entnehmen, dass das im BAW-Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ angegebene Kriterium von maximal 1,50 kg/m² nach 28 Frost-Tau-Wechseln eingehalten wurde. Es zeigte sich, dass die Betone Abwitterungen von maximal 0,63 kg/m² erzielten.

Prüfung des Chloridmigrationswiderstandes

Der Widerstand der Betone gegenüber eindringenden Chloriden wurde mit Hilfe des Migrationstests untersucht. Die Prüfkörper wurden bis zum Prüfalter von 35 bzw. 98 Tagen wassergelagert. Wurde der Brechsandanteil der im Beton verwendeten R-Zemente auf 10 M.-% eingestellt, erreichten die Migrationskoeffizienten im Prüfalter von 35 Tagen Werte unterhalb des Zulassungskriteriums des DIBt ($D_{\text{mig}} \leq 25 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$). Auch die Betone mit den Werkzementen haben dieses Kriterium erfüllt. Die Anforderungen an den Chlorideindringwiderstand für Anwendungen im Wasserbau ($\leq 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ für XS1-2, XD1-2 bzw. $\leq 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ für XS3, XD3) wurden nicht erreicht.

Die R-Zemente mit höherem Brechsandgehalt wurden unter Verwendung des CEM I 52,5 R sowie des CEM I 42,5 R hergestellt und im Beton untersucht. Aus Bild 7 geht hervor, dass die Zemente mit 30 M.-% ziegelhaltigem Brechsand (Mauerwerk, Mischbruch, Dachziegel) im Prüfalter von 35 Tagen das Zulassungskriterium des DIBt ebenfalls erfüllten. Das puzzolanische Potenzial der ziegelhaltigen R-Zemente (mit entsprechendem Anteil reaktionsfähiger Kieselsäure > 25 M.-% im Brechsand) zeigte sich insbesondere darin, dass der Migrationskoeffizient der Betone bis zum Prüfalter von 98 Tagen deutlich abnahm.

Prüfung des Carbonatisierungsverhaltens

Zur Beurteilung des Carbonatisierungswiderstandes wurden unter Verwendung von R-Zementen mit 10 M.-% Brechsand Feinbetonprismen mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ hergestellt und anschließend 7 Tage bzw. 28 Tage unter

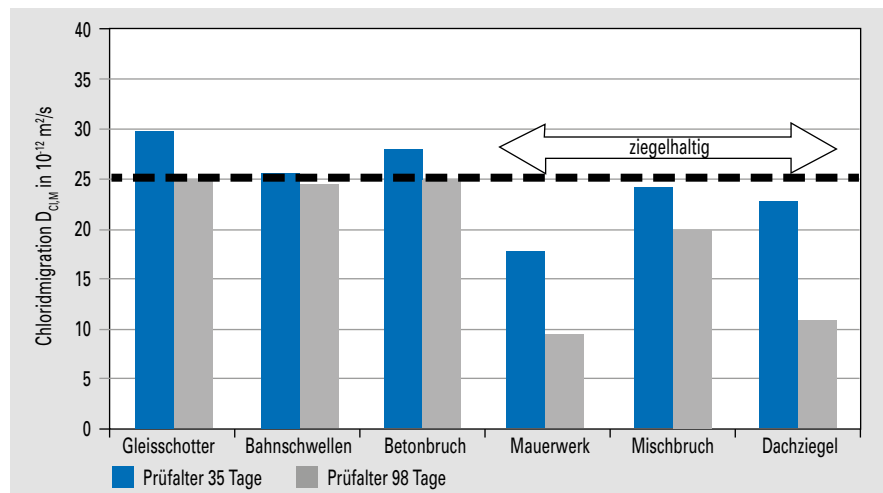


Bild 7 Chloridmigrationskoeffizienten der Betone unter Verwendung der R-Zemente mit 30 M.-% Brechsand in Kombination mit CEM I 52,5 R in Betonen mit $w/z = 0,50$ und $z = 320 \text{ kg/m}^3$, Prüfalter 35 und 98 Tage

Wasser vorgelagert. Zur Einordnung der Ergebnisse wurden die Carbonatisierungstiefen in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit der Feinbetone ausgewertet und mit dem DIBt-Bewertungshintergrund verglichen. Die Ergebnisse im Alter von 169 Tagen (Vorlagerung 28 Tage) lagen innerhalb des zulässigen Wertebereiches für den Carbonatisierungswiderstand von Feinbeton.

Zusammenfassung

Die Herstellung klinkereffizienter Zemente mit Recyclingbrechsand als Hauptbestandteil trägt dazu bei, Stoffkreisläufe weiter zu schließen, CO₂-Emissionen zu senken und Ressourcen zu schonen. Voraussetzung dafür wäre ein kontinuierlicher, gleichmäßiger Stoffstrom von entsprechender Qualität zwischen Aufbereitern und Zementwerk.

Brechsande sind derzeit in DIN EN 197-1 nicht als Hauptbestandteil definiert. Zemente unter Verwendung von gemahlenem Brechsand als Hauptbestandteil bedürfen einer Zulassung/Zustimmung. Ihre technischen Nachweise zu Eigenschaften nach DIN EN 197-1 müssen ebenso erbracht werden wie Dauerhaftigkeitsprüfungen im Beton. Die im Projekt „R-Beton“ untersuchten R-Zemente mit bis zu 30 M.-% Brechsand entsprachen – je nach stofflicher bzw. granulometrischer Zusammensetzung – den Festigkeitsklassen 32,5 R bis 52,5 R.

Zulassungsrelevante Bewertungskriterien der Dauerhaftigkeit von Betonen, z. B. für den Carbonatisierungswiderstand, für den Chlorideindringwiderstand oder für den Frost-Tausalz-Widerstand, wurden unter Verwendung von R-Zementen mit bis zu 10 M.-% Brechsand eingehalten. Die Bewertungskriterien für den Frostwiderstand von Betonen im Würfelverfahren wurden unter Verwendung von R-Zementen auch mit bis zu 30 M.-% Brechsand erfüllt. Die R-Zemente mit 10 M.-% bzw. 30 M.-% Mauerwerksbruch haben – im Vergleich zu Zementen mit Brechsanden anderer Herkunft – alle Dauerhaftigkeitsprüfungen sicher bestanden.

Betrachtet man die im Projekt erzielten Ergebnisse insgesamt, ist festzustellen, dass diese Zemente mit bis zu 30 M.-% Brechsand mindestens in Innenbauteilbetonen eingesetzt werden könnten. Auch Außenbauteile des Hochbaus erscheinen möglich. Voraussetzung ihrer Anwendung wären die notwendigen bauordnungsrechtlichen Nachweise. Hierzu zählen auch umweltspezifische Anforderungen, wie z. B. die Bewertung der Auswirkungen auf Boden und Gewässer. Sofern Recyclingbrechsande aus der Aufbereitung mineralischer Bauabfälle technisch angewendet und in Bauprodukten (z. B. Zementen) eingesetzt werden sollen, gilt die Muster-Verwaltungsvorschrift Technische Baubestimmungen mit den entsprechenden Verweisen auf die ABuG, die LAGA-Mitteilung 20 und die DIN 4226-101.