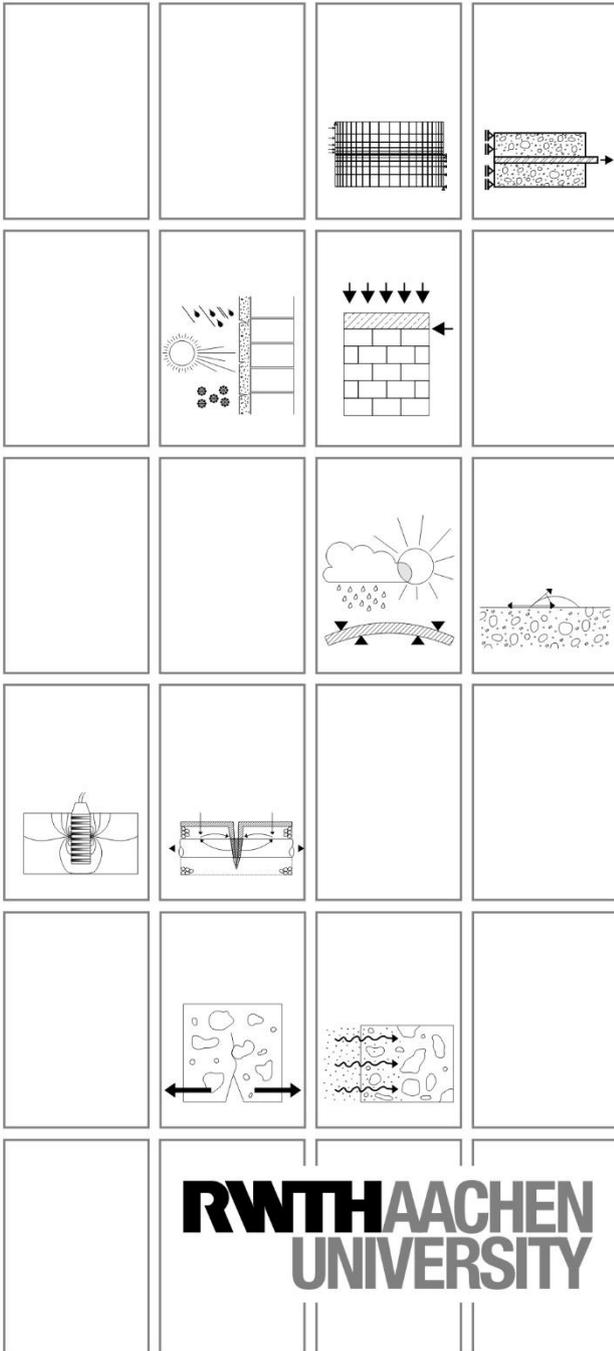


INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG AACHEN

FORSCHUNG · ENTWICKLUNG
ÜBERWACHUNG
PRÜFUNG · BERATUNG



Forschungsbericht F 7099

Verwendung von Recyclingmaterial in
der Betonproduktion - Sachstand

RWTHAACHEN
UNIVERSITY

No/Sc

2. Ausfertigung

THEMA

Verwendung von Recyclingmaterial in der Betonproduktion - Sachstand

Forschungsbericht Nr.

F 7099
vom 16.04.2015

Projektbearbeitung

Dipl.-Ing. Christina Nobis

Prof. Dr.-Ing. Anya Vollpracht

Auftraggeber/Förderer

Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V.
(FTB)
Kochstraße 6–7
10969 Berlin

Vertragsdatum/Auftragsbestätigung 15.03.2013

Ihr Aktenzeichen

-

Dieser Bericht umfasst 94 Seiten, davon 92 Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet. Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung. Die auszugsweise Veröffentlichung dieses Berichtes, seine Verwendung für Werbezwecke sowie die inhaltliche Übernahme in Literaturdatenbanken bedürfen der Genehmigung des ibac.

1	EINLEITUNG	1
1.1	Allgemeine Ausgangssituation	1
1.2	Begriffsbestimmungen	2
1.3	Vorgaben aus dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)	4
1.4	Normung	6
1.5	DAfStb-Richtlinie Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen	6
2	AUFBEREITUNG VON RC-GESTEINSKÖRNUNG.....	10
2.1	Aufbereitung von Baurestmassen	10
2.1.1	Allgemeines	10
2.1.2	Zerkleinerung	11
2.1.2.1	Mechanische Zerkleinerung von Bauschutt oder Straßenaufbruch	11
2.1.2.2	Thermisch-mechanische Zerkleinerung von Betonbruch	14
2.1.2.3	Impulszerkleinerung von Betonbruch.....	16
2.1.3	Klassierung	18
2.1.4	Sortierung	18
2.1.5	Nachbehandlung.....	22
2.2	Aufbereitung von Restbeton	26
2.3	Sonstige Aufbereitungsmethoden	29
3	REZYKLIERTE GESTEINSKÖRNUNG FÜR DIE BETONHERSTELLUNG	30
3.1	Verwendung von Brechsand	30
3.1.1	Allgemeines	30
3.1.2	Ausgangsstoff für hydraulische Bindemittel	31
3.1.3	Ausgangsstoff für autoklavierte Bauprodukte	32
3.1.4	Zementherstellung	34
3.1.5	Betonherstellung	36
3.2	Verwendung von grober rezyklierter Gesteinskörnung	40
3.2.1	Allgemeines	40
3.2.2	Straßen- und Wegebau.....	40
3.2.3	Betonsteine	41
3.2.4	Konstruktiver Betonbau.....	42
3.3	Eigenschaften grober rezyklierter Gesteinskörnung	43
3.3.1	Allgemeines	43
3.3.2	Kornrohichte	43

3.3.3	Wasseraufnahme.....	47
3.3.4	Kornform und -oberfläche	50
3.3.5	Mechanische Eigenschaften	51
4	EIGENSCHAFTEN VON BETON MIT REZYKLIERTER GESTEINSKÖRNING	54
4.1	Allgemeines	54
4.2	Herstellung.....	54
4.3	Frischbetoneigenschaften.....	57
4.3.1	Allgemeines	57
4.3.2	Verarbeitbarkeit	57
4.3.3	Dichte.....	59
4.3.4	Luftgehalt	59
4.3.5	Blutneigung.....	59
4.4	Mechanische Eigenschaften des Festbetons.....	61
4.4.1	Allgemeines	61
4.4.2	Druckfestigkeit	62
4.4.3	Biegezugfestigkeit und Spaltzugfestigkeit.....	64
4.4.4	Elastizitätsmodul	64
4.4.5	Schwinden und Kriechen	65
4.5	Dauerhaftigkeitseigenschaften.....	65
4.5.1	Allgemeines	65
4.5.2	Karbonatisierungsgeschwindigkeit.....	65
4.5.3	Frost-Tau bzw. Frost-Tausalz-Widerstand.....	66
4.5.4	Alkali-Kieselsäure-Reaktion.....	67
4.6	Umweltverträglichkeit.....	68
5	BEISPIELE AUS EUROPA	71
5.1	Allgemeines	71
5.2	Deutschland.....	72
5.3	Niederlande	73
5.4	Schweiz	75
6	ZUSAMMENFASSUNG.....	75
7	LITERATUR	77

1 EINLEITUNG

1.1 Allgemeine Ausgangssituation

In Deutschland wurden im Jahr 2011 insgesamt 386,7 Millionen Tonnen Abfälle erzeugt. Bei etwa der Hälfte handelte es sich um Bau- und Abbruchabfälle /Sta13/. Das Recycling dieser mineralischen Baurestmassen hat seit Beginn der Umweltbewegung in den 70er Jahren des 20. Jahrhunderts und dem Inkrafttreten des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) im Jahr 1996 immer mehr an Bedeutung gewonnen. Während 1998 die Recyclingquote von Baurestmassen noch bei rund 70 % lag, betrug diese 15 Jahre später bereits 90 % /KWT00, Sta13/. Nach aktuellen Angaben liegt die Verwertungsquote für mineralische Bauabbruchabfälle, d. h. Bauschutt, Straßenaufbruch, Bauabfälle auf Gipsbasis und Baustellenabfälle, bei 96,4 % /KWT13/. Eine weitere Erhöhung dieser Quote wird aufgrund von unvermeidbaren Verunreinigungen der Baurestmassen durch umweltgefährdende Stoffe, die auch bei der Aufbereitung nicht beseitigt werden können, aller Voraussicht nach nicht möglich sein /KWT13/.

Baurestmassen enthalten einen hohen Anteil an inertem Material, das für den Einsatz als Gesteinskörnung verwendet werden kann. Bild 1 zeigt die Verwertung von Recycling-Baustoffen während der letzten Jahre /KWT00, KWT01, KWT02, KWT03, KWT07, KWT11a, KWT11b, KWT13/. Das typische Einsatzgebiet von rezyklierter Gesteinskörnung (RC-Gesteinskörnung) ist der Straßen- und Erdbau, wo sie in untergeordneten Bauteilen mit geringen Anforderungen eingesetzt wird. Eine Anwendung als Gesteinskörnung für die Betonherstellung findet in Deutschland lediglich in vernachlässigbarer Menge statt. Eine Ursache hierfür sind die im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen für den Betonbau etwas ungünstigeren Materialkenngrößen. Die Unterschiede hängen in erster Linie von der Art und Qualität der eingesetzten RC-Gesteinskörnung ab. Insbesondere die im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung i. d. R. erhöhte Porosität und die damit größere Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung muss beim Einsatz in Beton berücksichtigt werden. Die unterschiedlichen Eigenschaften von RC-Gesteinskörnung beeinflussen darüber hinaus die mechanischen Eigenschaften und die Dauerhaftigkeit des damit hergestellten Betons. Auf diese Punkte wird in Kapitel 3.2 detailliert eingegangen. Für die meisten in der Praxis eingesetzten Betone könnte RC-Gesteinskörnung trotz dieser Nachteile gut eingesetzt werden. Einer Erhöhung des Anteils von RC-Gesteinskörnung bei der Betonherstellung stehen in Deutschland zudem restriktive Regelungen in technischen Regelwerken und im Zulassungsverfahren entgegen. Die derzeitige Verwertung wird dem Potential des Baustoffs nicht gerecht.

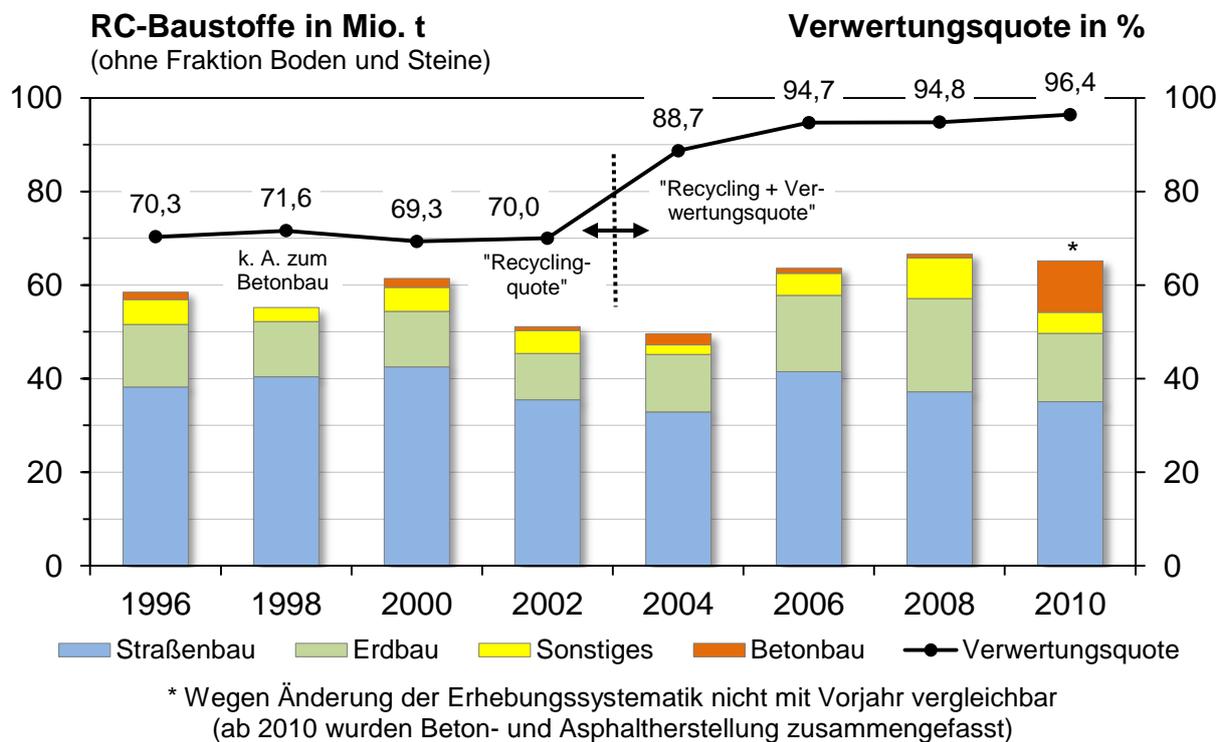


Bild 1: Verwertung von Recycling-Baustoffen /KWT00, KWT01, KWT02, KWT03, KWT07, KWT11a, KWT11b, KWT13/

1.2 Begriffsbestimmungen

In der Literatur werden für Materialien, die bei Baumaßnahmen oder Abbrucharbeiten anfallen, z. T. unterschiedliche Begriffe verwendet. Zum besseren Verständnis werden daher die in diesem Bericht verwendeten Begriffe erläutert. Bild 2 zeigt die Zuordnung verschiedener Materialien zu den Abfallströmen Erdaushub, Straßenaufbruch, Bauschutt und Baustellenabfälle nach /Bil13/.

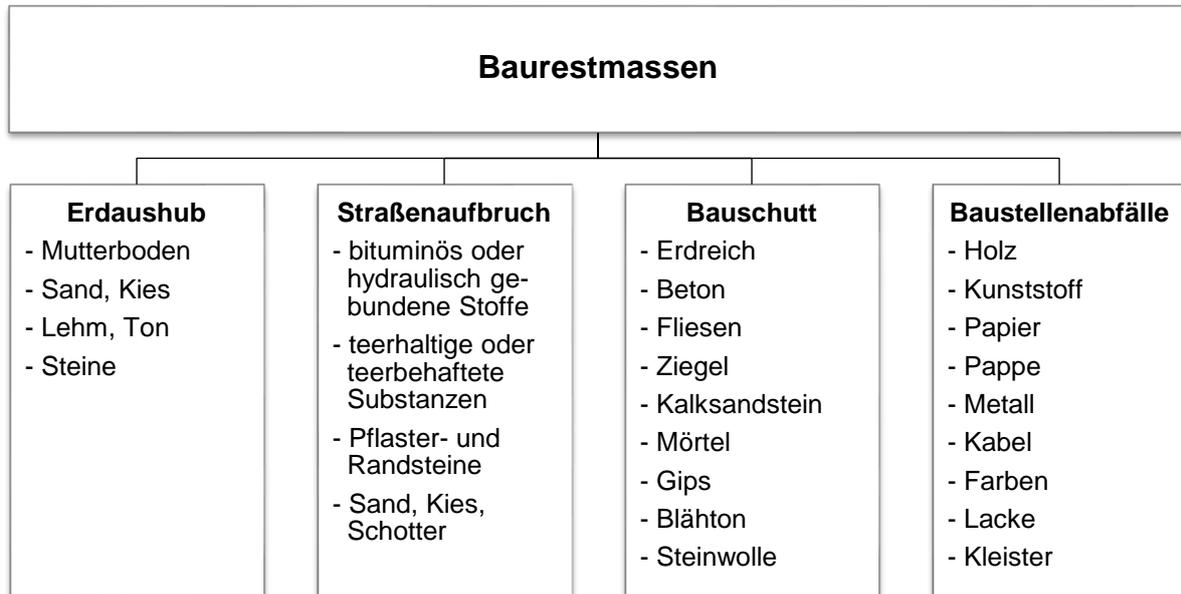


Bild 2: Unterteilung von Baurestmassen nach /Bil13/

Erdaushub

Erdaushub fällt bei fast allen Bautätigkeiten an. Er besteht aus natürlich anstehendem oder umgelagertem Locker- und Felsgestein sowie Kies, Ton und Mutterboden /Mar11/. Am gesamten Aufkommen der Bau- und Abbruchabfälle macht er aktuell einen Anteil von etwa 56 % aus /Sta13/. Für den Einsatz als Gesteinskörnung für die Betonherstellung eignet er sich i. d. R. nicht.

Straßenaufbruch

Im Straßenbau können die Baumaterialien in ungebundener Form, z. B. als Frostschutz-, Kies- und Schotterschicht, oder gebundener Form, z. B. als Tragschichten mit hydraulischen oder bituminösen Bindemitteln, vorliegen. Bei Straßenaufbruch, der bei Abbruch- und Instandsetzungsmaßnahmen anfällt, wird daher zwischen mineralischem, bitumenhaltigem und teerhaltigem Aufbruch unterschieden. Darüber hinaus zählen auch bei Abbruchmaßnahmen anfallende Rand- und Pflastersteine zum Straßenaufbruch /Bil13, Mar11/. Je nach stofflicher Zusammensetzung sind diese Abfälle zur Wiederverwertung als RC-Gesteinskörnung geeignet.

Bauschutt

Bei baulichen Maßnahmen des Hoch- und Tiefbaus fällt Bauschutt an. Dabei handelt es sich meist um mineralische Baurestmassen, wie Beton, Stahlbeton, Ziegel, Kalksandstein, Dachsteine, Gips, Fliesen, Keramik, Mörtel, Naturstein usw. /Mar11/. Diese können je nach Entstehungsort und Art der Baumaßnahme unterschiedliche Verunreinigungen aufweisen. Prinzipiell wird zwischen unbelastetem, belastetem und schadstoffverunreinigtem Bauschutt unterschieden. Unbelasteter Bauschutt fällt durch systematischen Rückbau an und ist nur in geringem Maße verunreinigt. Im Gegensatz dazu ist Bauschutt, der ohne systematischen Rückbau gewonnen wird, stärker mit Stör- und Fremdstoffen durchsetzt, die aussortiert werden müssen. Schadstoffverunreinigter Bauschutt enthält umwelt- oder gesundheitsgefährdende Stoffe und muss gesondert beseitigt werden /Bil13/. Aufbereiteter Bauschutt eignet sich je nach stofflicher Zusammensetzung und dem Anteil an Stör- und Fremdstoffen gut für die Betonherstellung.

Baustellenabfälle

Baustellenabfälle sind ein Sammelbegriff für alle während einer Bau- bzw. Abbruchmaßnahme anfallenden Reste von Baustoffen, Bauhilfsstoffen, Bauzubehör sowie Verpackungsmaterial /Bil13/. Baustellenabfälle sind für die Herstellung von RC-Gesteinskörnung nicht geeignet.

1.3 Vorgaben aus dem Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)

In Deutschland liegen Regelungen zu RC-Gesteinskörnung vom Deutschen Institut für Normung e. V. (DIN), Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) sowie der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) vor. Den Rahmen für den Umgang mit Bauabfällen liefert in Deutschland das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG).

Das neue KrWG /KrWG12/ trat 2012 in Kraft und setzt die seit 2008 geltende EG-Abfallrahmenrichtlinie /EG08/ um. Die Bundesregierung legte dabei das Ziel fest, die Quote zur Wiederverwendung, das Recycling und die sonstige stoffliche Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen bis zum Jahr 2020 auf 70 % zu erhöhen. Eine Überprüfung dieser Zielvorgabe vor dem Hintergrund der bauwirtschaftlichen Entwicklung und der Rahmenbedingungen für die Verwertung von Bauabfällen soll nach KrWG

bis zum 31. Dezember 2016 erfolgen /KrWG12/. Die Maßnahmen zur Behandlung von Abfällen sollen einer fünfstufigen Prioritätenfolge genügen: Vermeidung - Wiederverwendung - Recycling - sonstige Verwertung - Beseitigung /KrWG12/.

Unter Recycling (Prioritätsstufe 3) versteht der Gesetzgeber jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle zu Erzeugnissen, Materialien oder Stoffen entweder für den ursprünglichen Zweck oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Die in dem Recycling vorzuziehenden Verfahren zur Wiederverwendung (Prioritätsstufe 2) bereiten Abfälle so vor, dass diese wieder für denselben Zweck verwendet werden können, für den sie ursprünglich bestimmt waren /KrWG12/. Nach diesen Vorgaben müsste RC-Gesteinskörnung, die aus Betonbruch- oder Frischbetonrecycling gewonnen wurde und für die Anforderungen nach DIN EN 12620:2008-08 „Gesteinskörnungen für Beton“ gelten, vorrangig wieder im Betonbau eingesetzt werden. RC-Gesteinskörnungen aus Baustoffen, die in Bauwerken eingesetzt waren, die den Anforderungen nach den Technischen Lieferbedingungen für Gesteinskörnung im Straßenbau, TL Gestein-StB /TLG04/, bzw. den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton, ZTV Beton-StB /ZTV07/, entsprechen, müssten wieder im Straßenbau Verwendung finden. In Deutschland wird jedoch fast die gesamte aufbereitete RC-Gesteinskörnung im Erd- und Straßenbau, z. B. als hydraulisch gebundene Tragschicht, verbaut /KWT00, KWT01, KWT02, KWT03, KWT07, KWT11a, KWT11b, KWT13/.

In diesem Zusammenhang wird in der Literatur häufig von „Downcycling“ gesprochen, z. B. /Mey09, Mül11a/. Die in Deutschland aktuell üblichen Verwertungswege der RC-Gesteinskörnung werden als Downcycling verstanden, da das im Recycling-Material enthaltene Wertstoffpotential nicht ausgeschöpft wird /Wei08/. Die Verwendung der RC-Gesteinskörnung findet auf niedrigerem Niveau statt, was zu keinem geschlossenen Baustoffkreislauf führt /Roo02/. Nach Vorgabe des Gesetzgebers hat diejenige Maßnahme Vorrang, die den Schutz von Mensch und Umwelt bei der Erzeugung und Bewirtschaftung von Abfällen unter Berücksichtigung des Vorsorge- und Nachhaltigkeitsprinzips am besten gewährleistet. Darüber hinaus ist der gesamte Lebenszyklus des Abfalls für die Betrachtung der Auswirkungen auf Mensch und Umwelt zugrunde zulegen /KrWG12/.

1.4 Normung

Bis 2004 regelten DIN 4226-1:2001-07 „Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel - Teil 1: Normale und schwere Gesteinskörnungen“ und DIN 4226-2:2002-02 „Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel - Teil 2: Leichte Gesteinskörnungen“ in Deutschland Anforderungen an Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel. Sie wurden im Juni 2004 durch die bauaufsichtliche Einführung der DIN EN 12620:2003-04 „Gesteinskörnungen für Beton“ für die Anwendung im Beton sowie DIN EN 13139:2002-08 „Gesteinskörnungen für Mörtel“ bzw. DIN EN 13055-1:2002-08 „Leichte Gesteinskörnungen - Teil 1: Leichte Gesteinskörnungen für Beton, Mörtel und Einpressmörtel“ für die Anwendung im Mörtel abgelöst. In der aktuellen Fassung der DIN EN 12620:2008-07 „Gesteinskörnungen für Beton“ werden die Eigenschaften von natürlicher, industriell hergestellter als auch RC-Gesteinskörnungen festgelegt. Die DIN 4226-100:2002-02 „Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel – Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen“ ist zurzeit noch nicht zurückgezogen, aber wird in der Bauregelliste nicht mehr geführt.

In der DIN EN 12620:2008-07 „Gesteinskörnungen für Beton“ werden die Bestandteile von groben RC-Gesteinskörnungen klassifiziert (siehe Tabelle A1, S. A1).

Für den Einsatz als Konstruktionsbeton sind nach DIN EN 206-1:2001-07 „Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität“ und DIN 1045-2:2008-08 „Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1“ nur RC-Gesteinskörnungen des Typs 1 und 2 nach DAfStb-Richtlinie "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620" /DAf10a/ vorgesehen.

1.5 DAfStb-Richtlinie Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen

Die DAfStb-Richtlinie "Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierter Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100" /DAf10a/ wurde im September 2010 veröffentlicht. Die Grundlage für die Richtlinie bildete das Forschungsvorhaben "Baustoffkreislauf im Massivbau" (BIM), das bundesweit an Hochschulen, Forschungsinstituten und Industriefirmen durchgeführt wurde.

Entsprechend der stofflichen Zusammensetzung unterscheidet die Richtlinie zwei Typen der RC-Gesteinskörnung:

Typ 1: Betonsplitt

Typ 2: Bauwerkssplitt

Gesteinskörnungen des ersten Typs bestehen in erster Linie aus Betonbruch (≥ 90 M.-%). Im Typ 2 sind größere Anteile an Klinker und nicht porosiertem Ziegel bzw. Kalkstein erlaubt. Die Typenklassifizierung erfolgt dabei durch manuelles Sortieren nach Augenschein und Wägen der Bestandteile.

Tabelle 1: Stoffliche Zusammensetzung von Gesteinskörnungskategorien /DAf10a/

Bestandteile	Kategorie	
	Typ 1	Typ 2
-	M.-%	
1	2	3
Rc + Ru	Rcu ₉₀	Rcu ₇₀
Rb	Rb ₁₀₋	Rb ₃₀₋
Ra	Ra ₁₋	Ra ₁₋
X + Rg	XRg ₁₋	XRg ₂₋
FL	FL ₂₋	FL ₂₋

Rc: Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton

Ru: Ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörnung

Rb: Mauerziegel (d. h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandsteine, nicht schwimmender Porenbeton

Ra: Bitumenhaltige Materialien

Rg: Glas

X: Sonstige Materialien: bindige Materialien (d. h. Ton und Boden), verschiedene sonstige Materialien: Metalle (Eisen- und Nichteisenmetalle), nicht schwimmendes Holz, Kunststoff und Gummi, Gips

FL: Schwimmendes Material im Volumen

Tabelle 2 zeigt die Anforderungen an die Kornrohddichte auf ofentrockener Basis nach DIN EN 1097-6:2013-06 sowie deren Schwankungsbreite und die maximale Wasseraufnahme. Die Kornrohddichte RC- Gesteinskörnung ist aufgrund von anhaftenden Zementsteinanteilen bei Betonbruch und porösen Splitt bei Mauerwerksbruch i. d. R. niedriger als die von natürlicher Gesteinskörnung (vgl. Kapitel 3.3.2). Je nach Zusammensetzung der Ausgangsstoffe und der Höhe des anhaftenden Zementsteinanteils weisen RC-Gesteinskörnungen stark unterschiedliche Kornrohddichten auf. Bei RC-Gesteinskörnungen des Typs 1 und 2 sind Kornrohddichten auf ofentrockener Basis von mindestens 2.000 kg/m^3 erlaubt.

RC-Gesteinskörnung weist i. d. R. eine im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung erhöhte Wasseraufnahme auf (vgl. Kapitel 3.3.3). Die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung ist bei der Betonherstellung ein nicht zu vernachlässigender Parameter, daher werden Anforderungen an die maximale Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung gestellt. Da im Allgemeinen die Wasseraufnahme von Gesteinskörnungen nach wenigen Minuten fast vollständig abgeschlossen ist (vgl. /Vie11/), wird zur Charakterisierung der die Wasseraufnahme nach 10 Minuten Wasserlagerung herangezogen. Hier wird der stofflichen Zusammensetzung der Liefertypen Rechnung getragen. Weil bei Betonbruch mit einer im Vergleich zum Mauerwerksbruch niedrigeren Wasseraufnahme zu rechnen ist, wird für Typ 1 ein niedriger Wert angesetzt wie bei Typ 2. Weitere Anforderungen an die Gesteinskörnung zeigt die Tabelle A2 im Anhang, Seite A1.

Tabelle 2: Kornrohddichte und Wasseraufnahme der Gesteinskörnungskategorien /DAf10a/

Kornrohddichte und Wasseraufnahme	Einheit	Kategorie	
		Typ 1	Typ 2
1	2	3	4
Min. Kornrohddichte auf ofentrockener Basis ¹⁾	kg/m ³	2.000	
Schwankungsbreite Kornrohddichte		± 150	
Max. Wasseraufnahme nach 10 min ²⁾	M.-%	10	15

k. A. Keine Angabe

- 1) Nach DIN EN 1097-6:2013-06
- 2) Nach Anhang B der /DAf10a/

Wird mit der RC-Gesteinskörnung Beton nach DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2008-08 hergestellt, so darf diese mit den in Tabelle 3 angegebenen Höchstwerten und bis zur Druckfestigkeitsklasse C30/37 eingesetzt werden. Für die verbleibenden Anteile ist natürliche Gesteinskörnung zu verwenden. Die Betonbauteile dürfen dann nach DIN EN 1992-1-1:2011-01 bemessen werden. Erlaubt ist der Einsatz in bewehrten und unbewehrten Bauteilen der Expositionsklassen X0, XC 1 bis XC 4, XF 1, XF 3, XA 1. Die Verwendung RC-Gesteinskörnung für Spann- und Leichtbeton nach DIN EN 206-1:2001-07 ist nicht zulässig.

Tabelle 3: Zulässige Anteile RC-Gesteinskörnungen > 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung nach /DAf10a/

Anwendungsbereich		Kategorie	
Alkalirichtlinie	DIN EN 206-1:2001-07 u. DIN 1045-2:2008-08	Typ 1	Typ 2
-		M.-%	
1	2	3	4
WO (trocken)	Karbonatisierung: XC1	≤ 45	≤ 35
WF (feucht) ¹⁾	Kein Korrosionsrisiko: X0, Karbonatisierung: XC1-XC4		
	Frost ohne Taumittleinwirkung: XF1 ¹⁾ , XF3 ¹⁾ Beton mit hohem Wassereindringwiderstand	≤ 35	≤ 25
	Chemischer Widerstand: XA1	≤ 25	

- 1) Nachweis der Unbedenklichkeit bei bekannter Herkunft der RC-Gesteinskörnung: Es müssen keine Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden Alkalikieselsäurereaktion getroffen werden.

Einstufung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E III-S bei unbekannter Herkunft der RC-Gesteinskörnung: Es gilt Teil 3 der Alkalirichtlinie /DAf07/, es sei denn, dass durch ein Gutachten ein Nachweis der Unbedenklichkeit erbracht werden kann oder der Beton aus der Produktion des Betonherstellers stammt und ohne vorherigen Gebrauch wieder aufbereitet wurde.

Für die Betonherstellung ist nach /DAf10a/ die Verwendung von RC-GK, die aus der Produktion des Betonproduzenten stammt und ohne vorherigen Gebrauch wieder aufbereitet worden ist, bis zu 5 M.-% der im Beton eingesetzten Gesteinskörnung ohne Einschränkungen hinsichtlich der Exposition möglich.

2 AUFBEREITUNG VON RC-GESTEINSKÖRNUNG

2.1 Aufbereitung von Baurestmassen

2.1.1 Allgemeines

Um aus den Baurestmassen RC-Gesteinskörnung mit definierten Eigenschaften hinsichtlich Korngrößenverteilung und stofflicher Zusammensetzung zu erzeugen, muss dieser aufbereitet werden. Die Wahl der Aufbereitungstechnik richtet sich nach wirtschaftlichen Gesichtspunkten. RC-Gesteinskörnung, die für eine Verwertung auf einem geringen Niveau vorgesehen ist, wird i. d. R. weniger aufwendig aufbereitet als RC-Gesteinskörnungen für die Betonherstellung.

Die Aufbereitung von Bauschutt oder Straßenaufbruch im Wesentlichen in die folgenden Verfahrensstufen unterteilt werden:

- (1) (Systematischer) Rückbau
- (2) Vorsortierung
- (3) Zerkleinerung und Aufschluss
- (4) Klassierung
- (5) ggf. Sortierung
- (6) ggf. Nachbehandlung

Die Aufbereitung von Baurestmassen beginnt i. d. R. bereits bei Abbruch des Bauwerks. Durch systematischen Rückbau und Vorsortierung der Baumischabfälle können möglichst sortenreine Materialien für die Aufbereitung bereitgestellt werden.

Die Zerkleinerung dient dazu bestimmte Korngrößen zu erzeugen und/oder Einzelkomponenten aus einem Verbundstoff, wie dem Betonbruch, aufzuschließen. Bei der anschließenden Klassierung wird das aufbereitete Material in die gewünschten Kornfraktionen getrennt. Ein weiterer wesentlicher Bestandteil der Aufbereitung ist die Sortierung. Dabei werden unerwünschte Nebenbestandteilen, wie z. B. Kunststoff, Metall, Holz, Glas oder gipshaltige Baustoffe, die die Eigenschaften von Beton negativ beeinflussen können, entfernt. Methoden zur Nachbehandlung von RC-Gesteinskörnung, die der Qualitätssteigerung dienen, werden derzeit erprobt.

2.1.2 Zerkleinerung

2.1.2.1 Mechanische Zerkleinerung von Bauschutt oder Straßenaufbruch

Die Aufbereitung von Bauschutt oder Straßenaufbruch kann entweder in mobilen oder stationären bzw. semimobilen Anlagen erfolgen. Im ersten Schritt erfolgt eine Zerkleinerung durch mechanisches Brechen des Bauschutts oder Straßenaufbruchs. Bild 3 zeigt schematisch die Aufbereitungsschritte in einer mehrstufigen stationären Anlage /Wei08/.

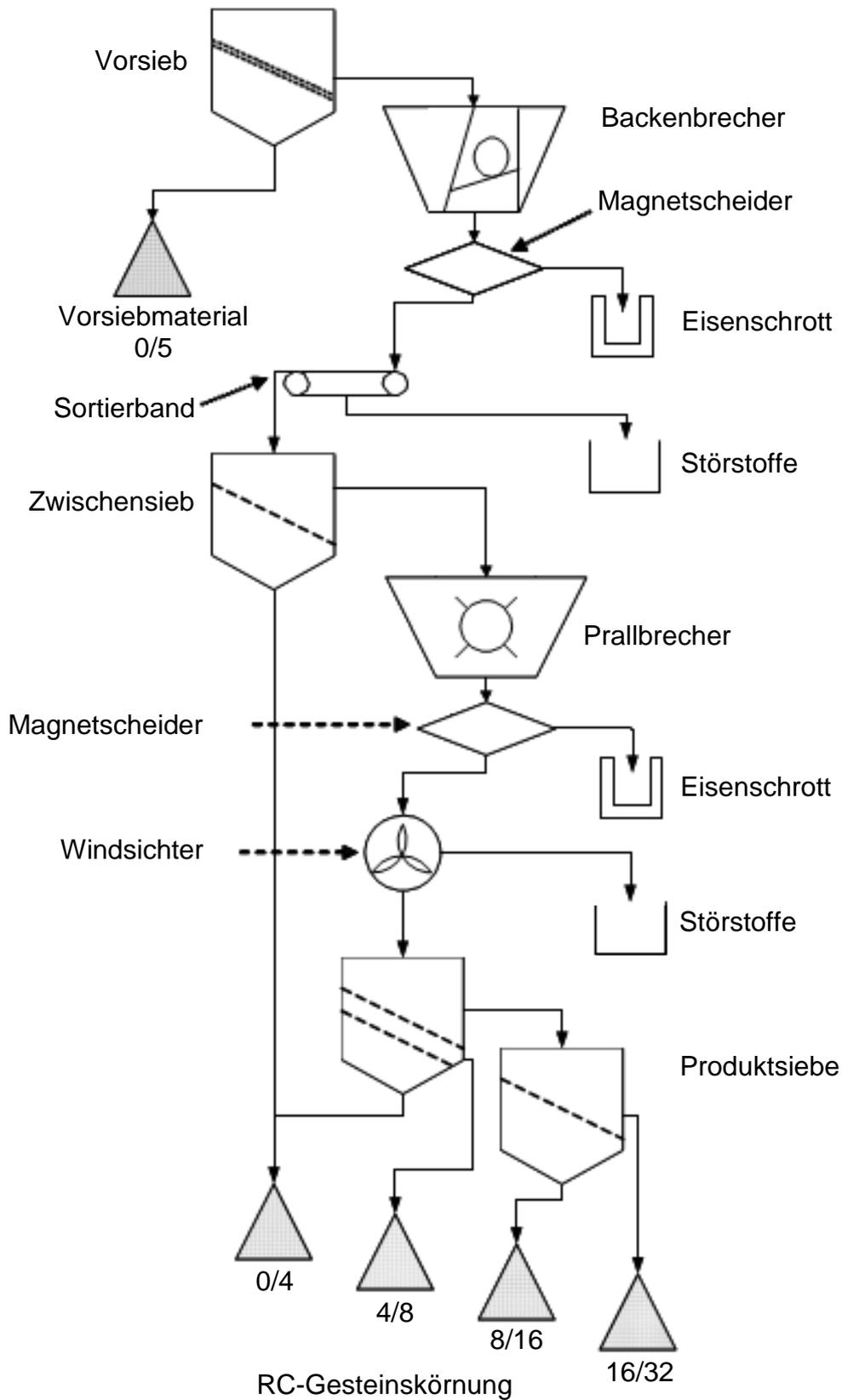


Bild 3: Schematische Darstellung der Baurestmassenaufbereitung einer stationären Anlage /Wei08/

Im Jahr 2010 betrug der Bestand an mobilen Aufbereitungsanlagen in Deutschland 1.327 und für stationäre bzw. semimobile Aufbereitungsanlagen 746 /BGR13/. Dieses Verhältnis spiegelt wieder, dass RC-Gesteinskörnung hauptsächlich im Straßen- und Erdbau eingesetzt wird. Die mobilen Aufbereitungsanlagen ermöglichen es, den Straßenaufbruch vor Ort direkt wiederzuverwerten. Die so aufbereitete RC-Gesteinskörnung wird vorwiegend in die ungebundenen Tragschichten, z. B. die Frostschutz- oder Schottertragschicht, und im Unterbau eingebaut. Auch begleitende Erdbaumaßnahmen wie Dämme und Lärmschutzwälle eignen sich zur Verwertung der RC-Gesteinskörnung /KWT00, KWT01, KWT02, KWT03, KWT07, KWT11a, KWT11b, KWT13/. So können Transportkosten und der damit verbundene Energieeinsatz eingespart werden.

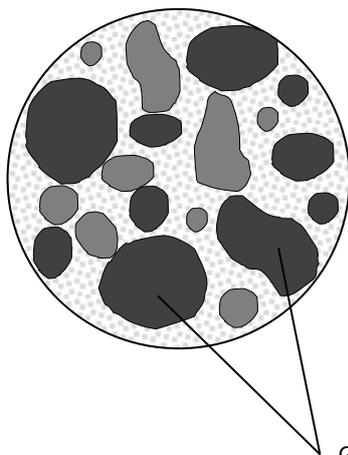
Als Brecheraggregate werden in Deutschland für die Aufbereitung von Bauschutt oder Straßenaufbruch hauptsächlich Backen- und Prallbrecher eingesetzt /Wei08/. Für die Betonherstellung ist ein möglichst geringer Brechsandanteil in der RC-Gesteinskörnung vorteilhaft (vgl. Kap. 3.1). Bei Backenbrechern wird das Material zwischen einer beweglichen und einer festen Brechbacke periodisch auf Druck und Schub beansprucht /Stie97/. Der Brechsandanfall ist vergleichsweise gering, da das Material nur grob zerkleinert wird. RC-Gesteinskörnung mit einer brauchbaren Sieblinie kann mit Backenbrechern daher meist nur in einem mehrstufigen Prozess hergestellt werden /Wei13/. In mobilen Anlagen werden üblicherweise Prallbrecher eingesetzt /Mül03/. Bei Prallbrechern handelt es sich um Schlagrotormühlen. Das Material wird in der Mühle von rotierenden Schlagleisten erfasst und entweder direkt zerkleinert oder in den Prallraum zurückgeschleudert, wo es auf Pralleisten bzw. anderes Mahlgut trifft. Prallbrecher können das Brechgut feiner aufschließen, so dass eine direkt einsetzbare Körnung erzeugt werden kann. Der Brechsandanteil in der RC-Gesteinskörnung ist bei dieser Aufbereitungsmethode allerdings vergleichsweise hoch. Im Vergleich zum Backenbrecher ist der Prallbrecher weniger robust /Wei08/. Hinsichtlich der Qualität der mit unterschiedlichen Brechaggregaten hergestellten RC-Gesteinskörnung hat sich ein zweistufiger Zerkleinerungsprozess als vorteilhaft erwiesen. Die Wasseraufnahmen und die Schlagzertrümmerungswerte von RC-Gesteinskörnung, die in der Reihenfolge „Backenbrecher → Prallbrecher“ aufbereitet wurden, waren niedriger als bei einstufiger Aufbereitung mit einem einzelnen Brechaggregat /Mül03/.

Bei zerkleinertem Betonbruch liegen die RC-Gesteinskörnungen in einem Verbund aus Gesteinskörnung des Altbetons und einer anhaftenden Zementsteinmatrix vor. Ziel der Zerkleinerung ist es den Zementstein möglichst vollständig zu entfernen

(Aufschluss). Die unterschiedlichen Aufschlussgrade von Betonbruch (kein Aufschluss - teilweiser Aufschluss - vollständiger Aufschluss) zeigt Bild 4.

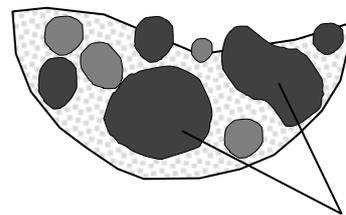
Beton vor der Zerkleinerung

kein Aufschluss

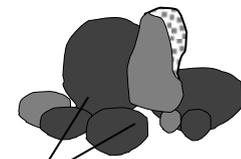


Beton nach der Zerkleinerung

Teilweiser Aufschluss



Teilweiser bis vollständiger Aufschluss



Gesteinskörner

Gesteinskörner

Zementstein

Bild 4: Schematische Darstellung der verschiedenen Aufschlussgrade von Beton während der Aufbereitung nach /Wei08/

Bei einem vor allem in Japan angewendeten Aufschlussverfahren wird der Zementstein durch mechanische Abrasion mit einer exzentrisch gelagerten und vibrierenden Rotoreinheit fast vollständig gelöst und abgeseibt. Alternativ können zur Abrasionsbehandlung der RC-Gesteinskörnung Kugelmöhlen eingesetzt werden /Akb11/. Die so aufbereitete RC-Gesteinskörnung (> 5 mm) weist eine Kornrohichte von 2,52 g/cm³ bei einer Wasseraufnahme von 3 M.-% auf /Wei08/.

2.1.2.2 Thermisch-mechanische Zerkleinerung von Betonbruch

In Japan und in den Niederlanden existieren Pilotversuche, bei denen die mechanische Aufbereitung für Betonbruch teilweise mit einer thermischen Vorbehandlung kombiniert wurde /Mul07, Sui11, Sui12/. Bei dem Verfahren wird der Betonbruch in einem Ofen mit vorgewärmter Luft (300 °C in Japan, 700 °C in den Niederlanden) durchströmt. Der Zementstein, der den Gesteinskörnern anhaftet, wird dadurch z. T. dehydriert und verliert an Festigkeit. In nachgeschalteten Mühlen /Shi05/ oder

Sieben /Mul07/ kann der Zementstein durch mechanische Beanspruchung effektiv entfernt werden (siehe Bild 5). Die so gewonnene RC-Gesteinskörnung unterscheidet sich nicht wesentlich von natürlicher Gesteinskörnung /Mül10, Shi05/. Mit dieser Methode können bis zu 94 M.-% der ursprünglichen Gesteinskörnung wiedergewonnen werden. Eine mobile Testanlage mit einem Durchsatz von 5 t pro Stunde wurde in Japan bereits erprobt /Shi05/. In den Niederlanden ist das Verfahren noch in der Versuchsphase /Mul07/.

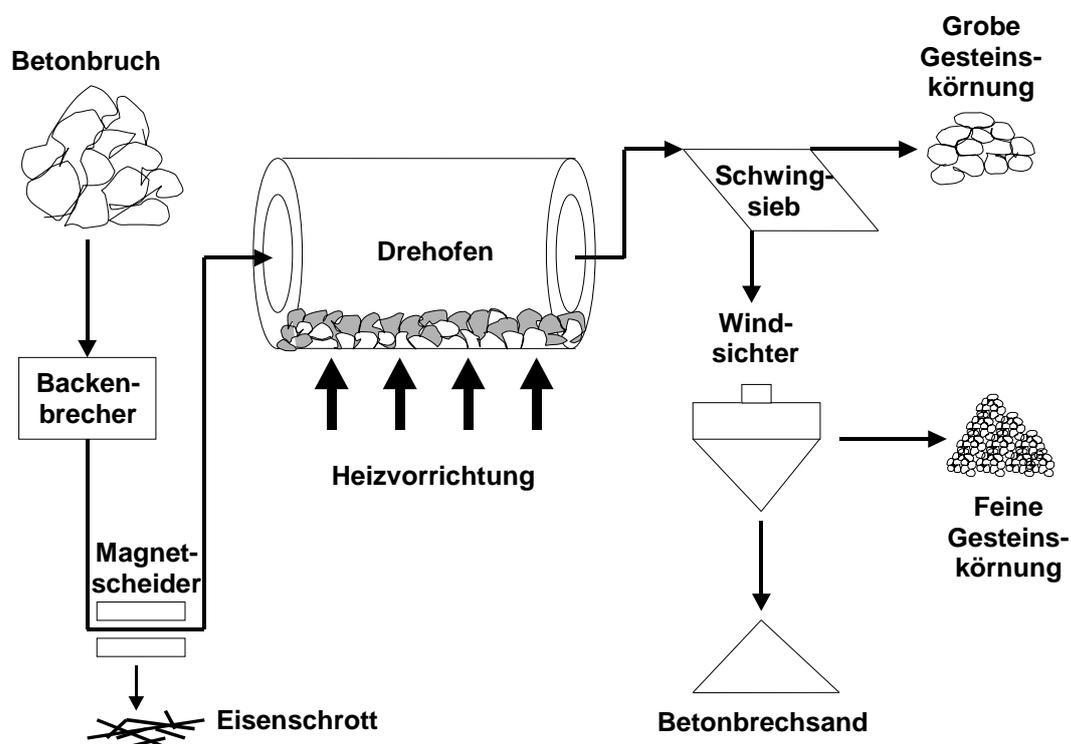


Bild 5: Schematische Darstellung der thermischen Vorbehandlung von Betonbruch mit nachgeschalteter Siebung /Mul07/

Ein ähnliches Verfahren nutzt Mikrowellenstrahlung zur thermischen Vorbehandlung des Betonbruchs /Akb11, Bru14, Cho14, Nog09/. Bei hochfestem Beton ist die Wirksamkeit dieser Methode aufgrund der dichten Kontaktzone geringer. Bei den Einsatzmöglichkeiten dieser Technologie spielt das Vorhandensein von Bewehrungsseisen im Beton womöglich eine Rolle. Moderne Industrie-Magnetrone, die die Mikrowellenstrahlung erzeugen, sind prinzipiell vor reflektierter Strahlung geschützt. Die Bewehrung könnte allerdings die Wärmeverteilung im Betonbruch während der thermischen Behandlung stören /Bru14/. Der Energieeinsatz bei dieser Methode ist vergleichsweise hoch. Er liegt in einer Größenordnung von 10 bis 40 kWh/t /Men13/.

2.1.2.3 Impulszerkleinerung von Betonbruch

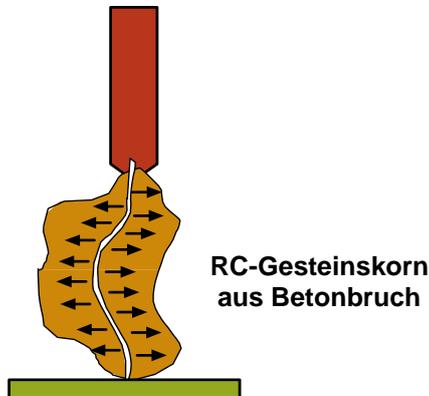
Alternative Methoden zur Aufbereitung von Betonbruch sind die "elektrodynamische Fragmentierung" /Kar14/ bzw. "elektrohydraulische Zerkleinerung" /Lin08, Mül03/. Mit diesen Verfahren kann die Gesteinskörnung des Festbetons nahezu vollständig von der Bindemittelmatrix getrennt werden (siehe Bild 6) /Kar14, Tho12/.



Bild 6: Altbeton vor und nach einer Fragmentierung /Tho12/

Bei der elektrodynamischen Fragmentierung werden Festkörper unter Wasser mit elektrischen Impulsen < 500 ns beaufschlagt. Durch eine kurzzeitige elektrische Entladung im Festkörper, die bevorzugt in der Kontaktzone zwischen Gesteinskorn und Bindemittelmatrix verläuft, werden Druckwellen erzeugt, die die beiden Phasen voneinander trennen (siehe Bild 7, Zerstörung durch Explosion) /Mül11b, Sei13a/.

Zerstörung durch Explosion (Elektrodynamischer Effekt)



Zerstörung durch Kompression (Elektrohydraulischer Effekt)

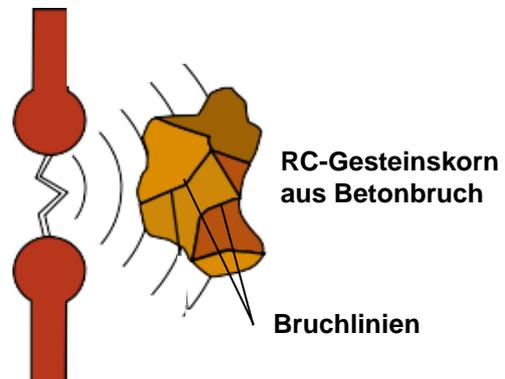


Bild 7: Prinzip der elektrodynamischen und -hydraulischen Fragmentierung eines Verbundwerkstoffes /Mül11b/

Das Verfahren wird in der Industrie bereits eingesetzt, um z. B. Lithium-Mineralen aus einer Gesteinsmatrix zu lösen oder um hochreines Silizium zu zerkleinern /Kar14, Tho12/. In einer großtechnischen Pilotanlage können ca. 3 t Altbeton pro Stunde bei einem Energieeinsatz von 3 bis 4 kWh/t aufbereitet werden /Tho12/. Ein Prallbrecher verbraucht in etwa halb so Energie um die gleiche Menge Betonbruch aufzubereiten /Bud97/. In einem aktuellen Projekt wird zurzeit eine Fragmentierungsanlage mit einer Wasseraufbereitungsanlage kombiniert. In dieser Anlage soll im kontinuierlichen Verfahren die Aufbereitung von Altbeton getestet werden. Die so gewonnene Gesteinskörnung und die Bindemittelmatrix werden zudem auf ihre Wiederverwertbarkeit für die Beton- bzw. Zementherstellung untersucht /Kar14/.

Bei der elektrohydraulischen Zerkleinerung wird prinzipiell die gleiche Methode wie bei der elektrodynamischen Fragmentierung eingesetzt. Der Impuls wird so eingestellt, dass die elektrische Entladung nicht direkt im Beton erfolgt, sondern in dem den Beton umgebenden Wasser. Die dabei entstehenden Druckwellen zerstören das Betongefüge (Zerstörung durch Kompression) /Mül10, Mül11b/. Nach Untersuchungen von /Men13/ wird bei dieser Methode etwas weniger Energie verbraucht als bei der elektrodynamischen Fragmentierung. Der Energieeinsatz liegt bei etwa 1 bis 3 kWh/t. Aktuell sind keine großtechnischen Anlagen zur elektrohydraulischen Zerkleinerung von Betonbruch im Einsatz.

2.1.3 Klassierung

Nach der Zerkleinerung des Abbruchmaterials erfolgt die Klassierung durch Siebanlagen und/oder Sichter in die gewünschten Kornfraktionen. Eine der Zerkleinerung vorgeschaltete Klassierung der Baurestmassen in eine Mittelkörnung (z. B. 8/32-56 mm) kann helfen den Brecherverschleiß zu verringern und den Durchsatz zu erhöhen /Bil13/. Die Siebung, die die RC-Gesteinskörnung in die marktüblichen Kornfraktionen trennt, wird Produktsiebung genannt /Bil13/. Typische Kornfraktionen sind 0/4, 4/8, 8/16, 16/32 und 32/45 mm /Wei13/.

2.1.4 Sortierung

Nach dem Zerkleinern und Klassieren der aufbereiteten Baurestmassen schließt i. d. R. die Abtrennung von Störstoffen an. Bei RC-Gesteinskörnungen, für die lediglich eine Verwertung auf niedrigem Niveau vorgesehen ist, kann der Sortierungsschritt entfallen, wenn Fremdfractionen in einem gewissen Umfang toleriert werden können.

Prinzipiell können bei der Sortierung trocken oder nass arbeitende Techniken eingesetzt werden. Tabelle 4 zeigt eine Übersicht von ausgewählten Sortiertechniken, die bei der Aufbereitung von Baurestmassen eingesetzt werden. Bei allen aufgeführten Verfahren, mit Ausnahme der optischen und magnetischen Sortierung handelt es sich um Sortierverfahren, die Dichteunterschiede der Bestandteile ausnutzen.

Tabelle 4: Sortiertechniken bei der Aufbereitung von Baurestmassen nach /Wei13/

Sortiertechnik		
Trockensortierung	Dichtesortierung	Windsichtung
	Optische Sortierung	Klauben
		Optoelektronische Sortierung
Magnetische Sortierung	Magnetscheidung	
Nasssortierung	Dichtesortierung	Schwimm-Sink-Sortierung
		Schwerkraftsortierung
		Filmschichtsortierung
		Aufstromsortierung
		Setzsortierung

In der Praxis werden i. d. R. trockene Sortiertechniken eingesetzt /Wei13/. Es können hierbei unterschiedliche Technologien eingesetzt werden: Mit einem Windsichter werden leichte Störstoffe, wie Holz, Dämmmaterial, Folien, Papier, in einem Luftstrom von der RC-Gesteinskörnung getrennt (Aerosortierung). Hierzu muss ein ausreichender Dichteunterschied zwischen RC-Gesteinskörnung und Störstoff vorliegen /Sch03a/. Die Windsichtung kann im Gegenstrom oder im Querstrom erfolgen (siehe Bild 8). Luft strömt dabei von unten oder seitlich in das Sichterrohr. Die leichten Störstoffe werden mit dem Luftstrom ausgetragen, während die schweren Gesteinskörner unten aus dem Sichterrohr abgezogen werden /Sch97/.

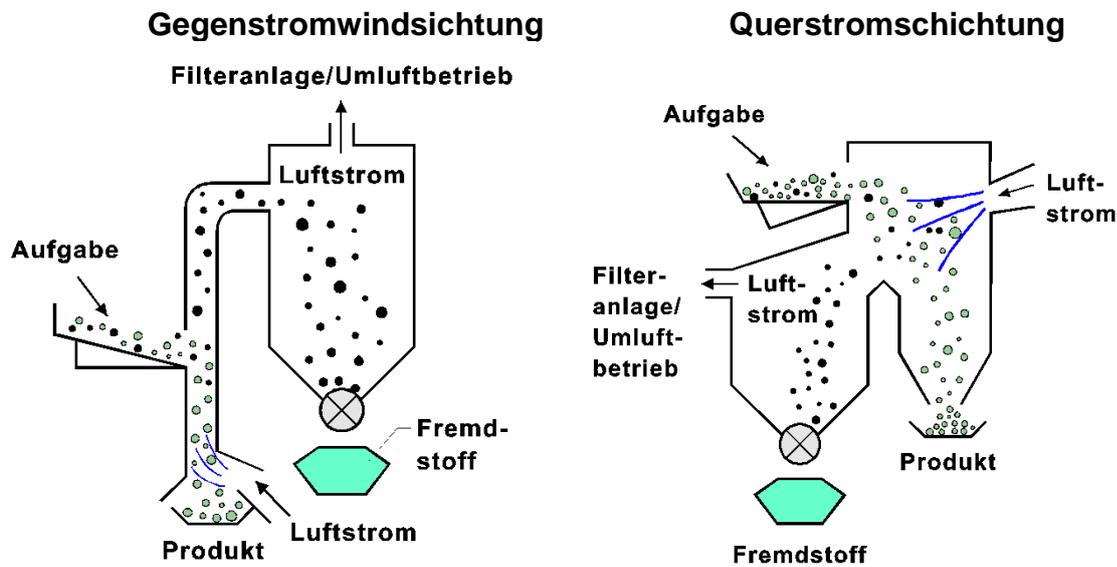


Bild 8: Prinzip der Windsichtung im Gegen- und Querstrom /Sch97/

Die Sortierung kann auch manuell oder sensorgestützt nach optischen Merkmalen erfolgen, wenn die Störstoffe sich z. B. farblich von der RC-Gesteinskörnung absetzen /Sch03a/. Magnetische Verfahren werden eingesetzt, um ferromagnetische Bestandteile, wie z. B. Bewehrungsseisen auszusortieren, die so ebenfalls der Wiederverwertung zugeführt werden können /Sch03a/.

Nasse Sortiertechniken erzeugen i. d. R. qualitativ höherwertigere Produkte, da Störstoffe bis nahezu 100 % entfernt werden können. Allerdings ist der hierzu notwendige Wasserkreislauf mit Prozesswasser- und Schlammaufbereitung kostenaufwendig, so dass Nasssortiertechniken nur in Ausnahmefällen eingesetzt werden /Kur98/. Vorteilhaft bei der Nasssortierung ist, dass auswaschbare Störstoffe ohne Staubentwicklung entfernt werden können /Hen04, Wei08/.

Die Schwimm-Sinksortierung nutzt, wie auch die Windsichtung, Dichtedifferenzen zwischen RC-Gesteinskörnung und Störstoffen zur Trennung in einem Trennfluid aus. Die leichten Bestandteile schwimmen auf dem Trennfluid und können von den schwereren Bestandteilen getrennt werden, die absinken. Bei dem Trennfluid handelt es sich i. d. R. um Wasser. Es wird eingesetzt, wenn Kunststoff- oder Holzreste entfernt werden sollen. Die Schwimm-Sinksortierung erfolgt prinzipiell in einer stehenden Flüssigkeit, wobei der Trennvorgang durch Bewegungen der Gesteinskörner in der Flüssigkeit gefördert wird. Alle andern nassen Sortierverfahren nutzen Flüssig-

keitsströme. Damit können i. d. R. nur sehr feine Partikel sortiert werden /Sch03a, Wei08/.

Für den Feinanteil der RC-Gesteinskörnung ist die Schwerkraftsortierung geeignet, um leichte Störstoffe abzutrennen. Das Verfahren nutzt Dichtedifferenzen von Feststoffen, die sich in einem Flüssigkeitsstrom im Verhältnis zur Schwerkraft unterschiedlich bewegen /Wei08/. Maschinen zur Schwerkraftsortierung sind z. B. Hydro- rinnen.

Bei der Aufstromsortierung wird die Gesteinskörnung in einem aufsteigenden Wasserstrom aufgewirbelt. Das Verfahren nutzt die unterschiedlichen Endfallgeschwindigkeiten der Gesteinskörner unterschiedlicher Dichte aber mit gleicher Korngröße. Die Aufstromsortierung kann daher nur innerhalb eines engen Kornspektrums erfolgen /Wei08/. Am häufigsten wird der Schnecken-Aufstrom-Sortierer eingesetzt (siehe Bild 9).

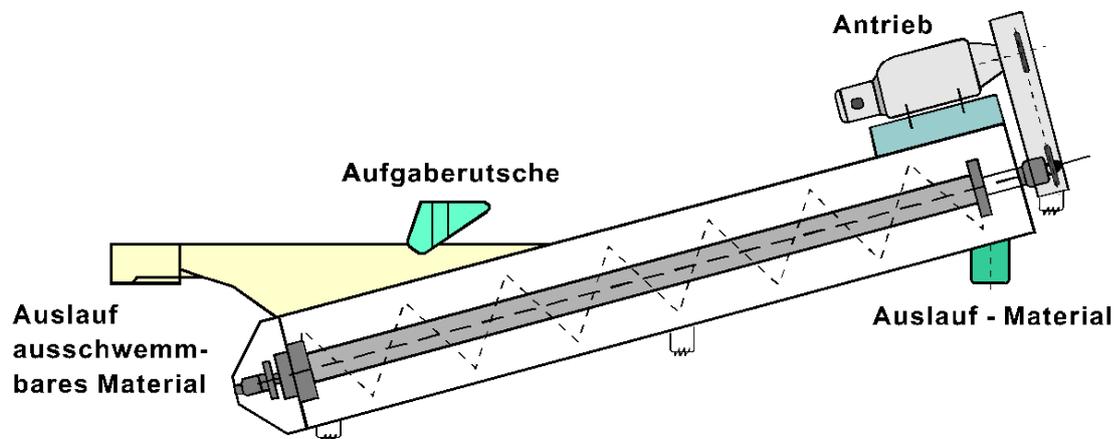


Bild 9: Prinzip der Aufstromsortierung (Schnecken-Aufstrom-Sortierer) /Sch97/

Bei der Filmschichtsortierung wird derselbe Effekt genutzt wie bei dem Sedimentationsvorgang in Flüssen. Die Trennung erfolgt infolge von Dichtedifferenzen von Gesteinskörnungen, die eine ähnliche Korngröße aufweisen, durch einen Flüssigkeitsstrom. Die leichteren Anteile werden mit der Strömung im Fluid transportiert und so von den schwereren Körnern getrennt /Wei08/. Zur Unterstützung der Abtrennung der leichten Störstoffe werden Brauserohre eingesetzt (siehe Bild 10)

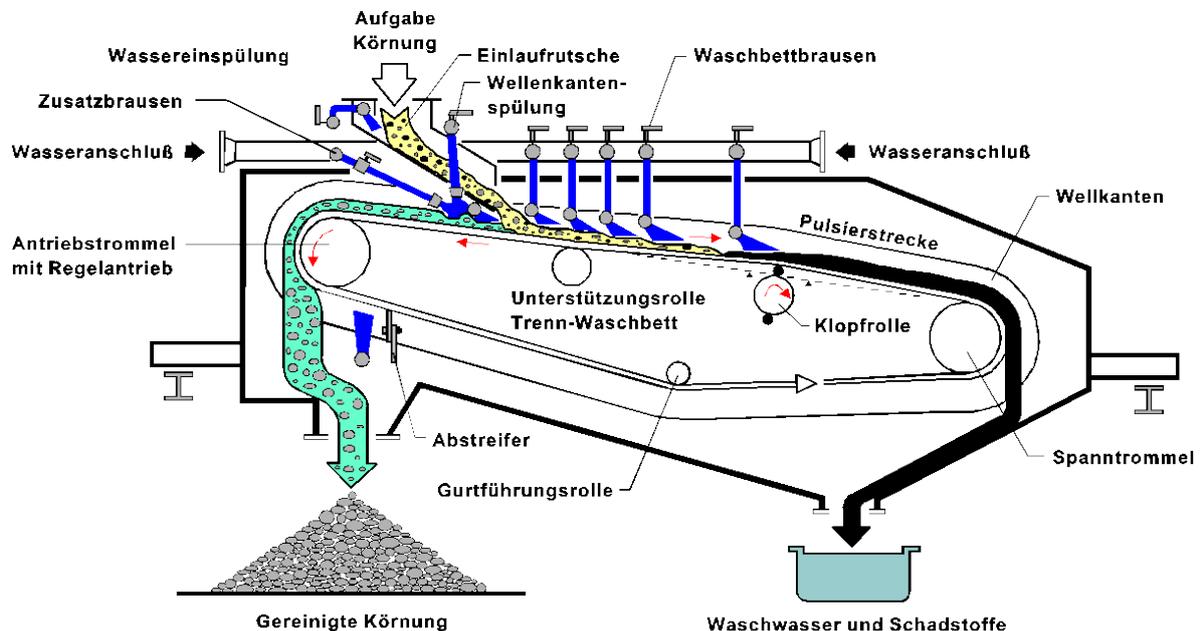


Bild 10: Prinzip der Filmschichtsortierung (Hydrobandabscheider) /Sch97/

Der Einsatz der Setzmaschinenteknik für die Trennung von verschiedenen Stoffen im Bauschutt wurde in /Kur03/ großtechnisch untersucht. Durch die Dichtentrennung können heterogene Ausgangsgemische in homogenere Gemische umgewandelt werden. In /Wei08/ wurde nachgewiesen, dass die Setzmaschinenteknik prinzipiell zur Aufbereitung von Betonbrechsanden geeignet ist. Das Prinzip der Setztechnik beruht darauf, dass ein Materialgemisch mithilfe eines pulsierenden Wasserstroms in schwere und leichte Endprodukte getrennt werden kann. In den Niederlanden wird die Setztechnik zur Aufbereitung von Bauschutt und Straßenaufbruch bereits eingesetzt.

2.1.5 Nachbehandlung

Die Nachbehandlungsmethoden von RC-Gesteinskörnung zielen darauf den Zementsteinanteil und damit die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung zu verringern.

Im Verbundforschungsvorhaben " Baustoffkreislauf im Massivbau" wurde untersucht, ob eine Nasssiegung zu einer sauberen Kornoberfläche und einer damit verbesserten Kontaktzone im Beton mit RC-Gesteinskörnung (RC-Beton) führt. Trotz Verringerung des Anteils der abschlämmbaren Bestandteile der RC-Gesteinskörnung konnte keine Verbesserung der Betondruckfestigkeit beobachtet werden /Rei03/. Eine Reinigung der RC-Gesteinskörnung mittels Ultraschall unter Wasser, um loses Ge-

steinsmehl von der Oberfläche der Gesteinskörnung zu lösen, bewirkt nach /Kat04/ eine Verbesserung der Druckfestigkeit von ca. 7 % nach 7 bzw. 28 Tagen. Vorteilhaft an dieser Methode ist, dass sie sich evtl. in eine bestehende Nassaufbereitung von Bauschutt oder Straßenaufbruch integrieren lässt.

Eine leichte Qualitätssteigerung von RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch kann durch eine Säurebehandlung, z. B. mit 0,1 molarer Salzsäure (HCl), Schwefelsäure (H₂SO₄) oder Phosphorsäure (H₃PO₄) erzielt werden /Tam07a/. Die Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung war nach einer 24 stündigen Beaufschlagung mit den Säuren um 7 bis 12 % reduziert. Nachteilig ist bei diesem Ansatz die mit der Beaufschlagung einhergehende Erhöhung des Chlorid- und Sulfatgehaltes in der RC-Gesteinskörnung, die im RC-Beton zu Dauerhaftigkeitsproblemen führen könnte.

Ein weiterer Vorschlag zur Verbesserung der RC-Gesteinskörnungsqualität ist es diese mit Microsilica /Kat04/ zu imprägnieren, um so die die Kontaktzone zu verbessern. Durch die Nachbehandlung mit Microsilica konnte die Druckfestigkeit von RC-Betonen gegenüber dem Referenzbeton um 23 bis 33 % nach 7 Tagen und 15 % nach 28 Tagen gesteigert werden. In /Spä13/ wurde die RC-Gesteinskörnung mit einer hydrophobierenden Schicht aus Polymeren beschichtet, um die Wasseraufnahme zu reduzieren. Eine Alternative ist die Behandlung mit Bindemittelleim. In /Zhi13/ wurde untersucht, ob eine Beschichtung der RC-Gesteinskörnung mit Portlandzement- oder Sulfoaluminatzementleim in Kombination mit Flugasche, Hütensand oder Silicastaub zu einer Verbesserung der Betonqualität führt (siehe Bild 11). Die Dicke der Beschichtung kann dabei einfach über den Wasser-Zement-Wert eingestellt werden. Sie lag in einem Bereich von 0,035 bis 0,20 mm. Die Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung wurde bei allen Beschichtungssystemen deutlich verringert. Durch die Beschichtung wurde die 7 und 28 Tage-Druckfestigkeit von Betonen, die mit der RC-Gesteinskörnung hergestellt wurden, bei allen Bindemittelleimkombinationen im Vergleich zum Beton mit der unbehandelten RC-Gesteinskörnung leicht gesteigert. Bei der 56 Tage-Druckfestigkeit konnte allerdings kein signifikanter Unterschied festgestellt werden. Diese Methoden sind jedoch kritisch zu betrachten, da sie mit hohen Kosten und Aufwand verbunden sind und den Verbund zwischen RC-Gesteinskörnung und Bindemittelmatrix im Beton stören können.



Bild 11: RC-Gesteinskörnung ohne (links) und mit einer Bindemittelleimbeschichtung (rechts) /Zhi13/

In einem aktuellen Forschungsvorhaben wird untersucht, ob mit einer gezielten Karbonatisierung von RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch die Qualität der Gesteinskörnung verbessert werden kann /Sei12, Sei13b/. Hintergrund für diesen Forschungsansatz ist, dass karbonatisierter Zementstein i. d. R. ein dichteres Porengefüge aufweist als unkarbonatisierter Zementstein. Dieser Zusammenhang gilt allerdings nicht für hüttensand- oder flugaschehaltigen Zementstein. Hier wird das Porengefüge durch die Karbonatisierung gröber /Lud96/. In den Versuchen nach /Sei13b/ wurde die Wasseraufnahme grober RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch mit und ohne Hüttensandanteil im Zement untersucht. Zur Bewitterung mit CO₂ wurde eine Konzentration von 20 Vol.-% gewählt, die einem realen Abgasstrom eines Zementwerkes entspricht. Die Beaufschlagungsdauer wurde zwischen 3 und 6 Stunden, die Temperatur zwischen 25 und 200 °C variiert. Bild 12 zeigt die Ergebnisse. Die optimale Temperatur lag in den Versuchen bei 100 °C. Hier wurde die Wasseraufnahme von RC-Gesteinskörnung sowohl bei Betonbruch aus Portlandzement als auch aus Hochofenzement deutlich verringert.

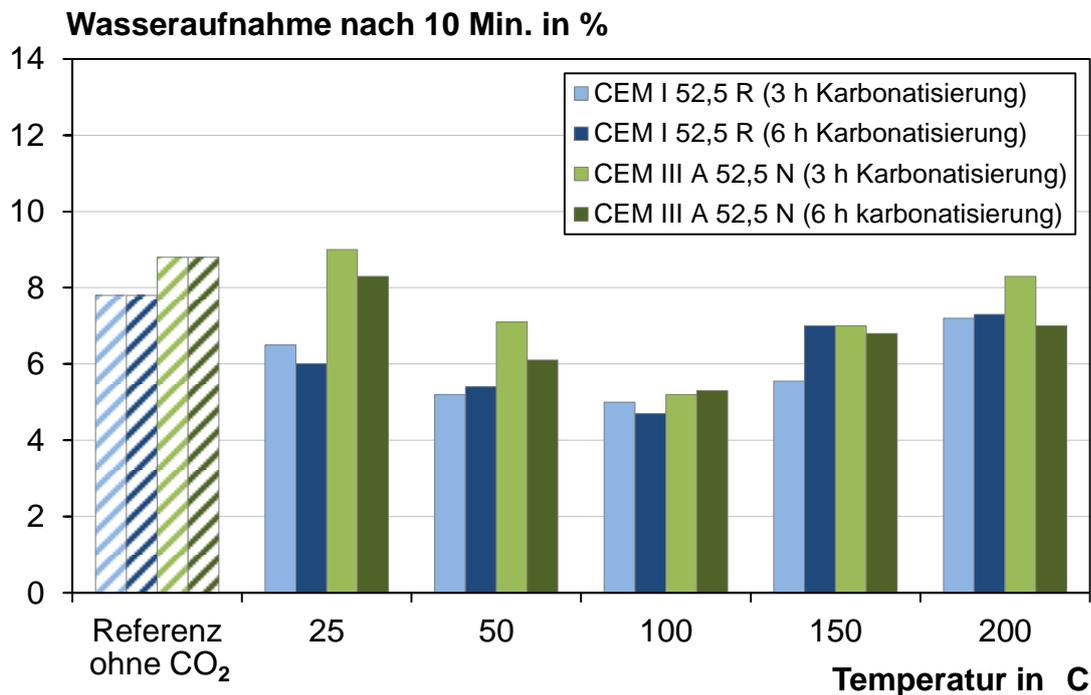


Bild 12: Wasseraufnahme von RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch mit und ohne hüttensandhaltigen Zement vor und nach der Karbonatisierung mit 20 Vol.-% CO₂ /Sei13b/

Die Reduktion der Wasseraufnahme und der Porosität nach einer CO₂-Behandlung wurde auch von /Zha14/ beobachtet. Feinere Kornbereiche lassen sich dabei aufgrund ihrer größeren Oberfläche effektiver karbonatisieren als grobe Gesteinskörnung. Zu beachten ist der Einfluss der Feuchte der RC-Gesteinskörnung. Bei zu geringen oder zu hohen Feuchtegehalten ist die Karbonatisierung gehemmt. Hierzu wurde die RC-Gesteinskörnung für 2 Stunden bei 105 °C ofengetrocknet und alternativ wassergesättigt. Der höchste Karbonatisierungsgehalt wurde bei der unbehandelten RC-Gesteinskörnung beobachtet, die einen Feuchtegehalt von ca. 3,4 M.-% aufwies. Ein Vorteil dieses Verfahrens ist es, dass große Mengen an CO₂ dauerhaft in den Zementstein eingebunden werden und so die CO₂-Bilanz des damit hergestellten Betons verbessert /Sei12/.

Eine alternative Methode zur beschleunigten Karbonatisierung von Beton ist der Einsatz von Bakterien (z. B. *Sporosarcina pasteurii* /Gra12, Qui14/ oder *Bacillus sphaericus* /Bel08/), die in bestimmten Nährmedien Calciumcarbonat ablagern. Von /Bel08/ wurde gezeigt, dass mithilfe von diesen Bakterien die Rissheilung in Beton durch Bildung von Karbonaten gefördert wird. Dieser Effekt wurde u. a. von /Gra12, Qui14/ ausgenutzt, um die Wasseraufnahme von RC-Gesteinskörnung zu reduzie-

ren. Die RC-Gesteinskörnung wurde für 48 bzw. 72 Stunden in unterschiedlichen Nährlösungen aus u. a. Harnstoff und Calciumchlorid (CaCl_2) bei einer Temperatur von bis zu $37\text{ }^\circ\text{C}$ gelagert /Gra12, Qui14/. Die Bildung von Karbonaten auf der RC-Gesteinskörnungsoberfläche führte dazu, dass die Wasseraufnahme reduziert wurde. Allerdings reagieren die Bakterien sehr empfindlich auf pH-Wert-Schwankungen /Qui14/. Die besten Karbonatisierungsraten wurden erzielt, wenn das Nährmedium einen pH-Wert von 9,5 aufwies und die Umgebungstemperatur $35\text{ }^\circ\text{C}$ betrug. Problematisch ist bei diesen Untersuchungen der u. a. Einsatz von CaCl_2 . Die Chloridionen könnten die Dauerhaftigkeit eines mit der behandelten RC-Gesteinskörnung hergestellten Stahlbetons negativ beeinflussen. Nach /Gra12/ kommen allerdings auch andere Calciumsalze, wie z. B. Acetate und Nitrate, als Nährmedium in Frage, die für den Einsatz im Stahlbeton besser geeignet sind. CaCl_2 wurde in den Untersuchungen lediglich eingesetzt, da es leichter lösbar ist als andere Salze.

2.2 Aufbereitung von Restbeton

Das Recycling von Frischbeton ist ebenfalls eine Möglichkeit RC-Gesteinskörnung zu gewinnen. In Deutschland wurden im Jahr 2012 ca. 46 Mio. m^3 Transportbeton hergestellt /BTB13/. Geht man von davon aus, dass ca. 3 % /Ric01/ nicht verbraucht werden können, betrug die Gesamtmenge des dabei angefallenen Restbetons 1,4 Mio m^3 . Beim Recycling von Frischbetonresten wird im Vergleich zu der Aufbereitung von Bauschutt oder Straßenaufbruch i. d. R. wesentlich homogenere RC-Gesteinskörnung gewonnen, da das Ausgangsmaterial sortenrein vorliegt. Eine z. T. in den Niederlanden genutzte Möglichkeit die Restbetonmassen wiederzuverwerten ist es, Beton auf einer Lagerfläche er härten zu lassen und diesen in regelmäßigen Abständen mechanisch zu Betonbruch aufzuarbeiten. Der Beton kann nur mit schwerem Gerät unter hohem Kostenaufwand aufbereitet werden.

Eine Alternative ist die unmittelbare Aufbereitung des noch nicht erstarrten Frischbetons. In Deutschland werden üblicherweise Frischbetonreste in Gesteinskörnung und Restwasser - eine wässrige Suspension von Zement und Feinststoffen bis zu einer Korngröße von 0,25 mm - getrennt. Hierzu wird der Restbeton einer Auswaschanlage zugeführt. Unter Zufuhr von Frischwasser und/oder Brauchwasser (d.h. rückgewonnenes Wasser aus der Recyclinganlage) werden die Feinteile aufgeschwemmt und so von der groben Gesteinskörnung getrennt (siehe Verfahren 1 in Bild 13). Die wiedergewonnene Gesteinskörnung darf keine Kornbindung aufweisen (vgl. DIN 1045-2:2008-08). Das dabei anfallende Restwasser darf nach dem Wasserhaushaltsge-

setz /WHG09/ nicht in Gewässer eingeleitet werden. Eine Einspeisung von Flüssigkeiten mit einem pH-Wert von mehr als 9,5 in die Kanalisation ist generell nicht zulässig, so dass zusätzliche Anlagen zur pH-Wert-Neutralisierung bereitgestellt werden müssen, wenn das Restwasser entsorgt werden soll. Die Wiederverwendung von Restwasser für die Betonherstellung ist hierbei aus ökologischen und ökonomischen Gründen zu bevorzugen. Das Restwasser kann unter Berücksichtigung der Richtlinie „für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton /DAf95/ als Zuga-bewasser für die Betonherstellung wiederverwendet werden. Die Qualität der damit hergestellten Betone wird dabei i. d. R. nicht gemindert /Son02/. Allerdings ist diese Recyclingmethode kostenintensiv und erfordert einen hohen Wassereinsatz.

In einem anderen gebräuchlichen Verfahren wird dem Waschwasser bei der Reinigung eines leeren, aber verschmutzten Betonmischers Recyclinghilfe zudosiert, das den Hydratationsprozess der Zementreste verzögert (siehe Verfahren 2 in Bild 13). Das Waschwasser verbleibt dabei im Transportbetonfahrzeug. Das Fahrzeug mit dem verzögerten Restwasser wird anschließend mit einer Betonmischung bestückt, bei der die Restwassermenge im Fahrzeug berücksichtigt wurde.

Die direkte Wiederverwendung von Restbeton kann nach /Ött00/ ebenfalls mit einer Recyclinghilfe realisiert werden (siehe Verfahren 3 in Bild 13). Hierbei wird der Restbeton insgesamt um bis zu drei Tage verzögert. Er kann zu einem späteren Zeitpunkt wieder aktiviert und mit frisch hergestelltem Beton, der mindestens die vierfache Menge des Restbetons aufweist, im Transportbetonfahrzeug vermengt werden /Ric04/. Dieser Beton ist nach /Ött00/ in seinen Frisch- und Festbetoneigenschaften gleichwertig mit einem Beton ohne Recyclinghilfe. Die Recyclinghilfe lässt sich zudem zur Reinigung der Mischtrommeln der Transportbetonfahrzeuge nutzen. Für dieses Verfahren ist eine bauaufsichtliche Zulassung erforderlich.

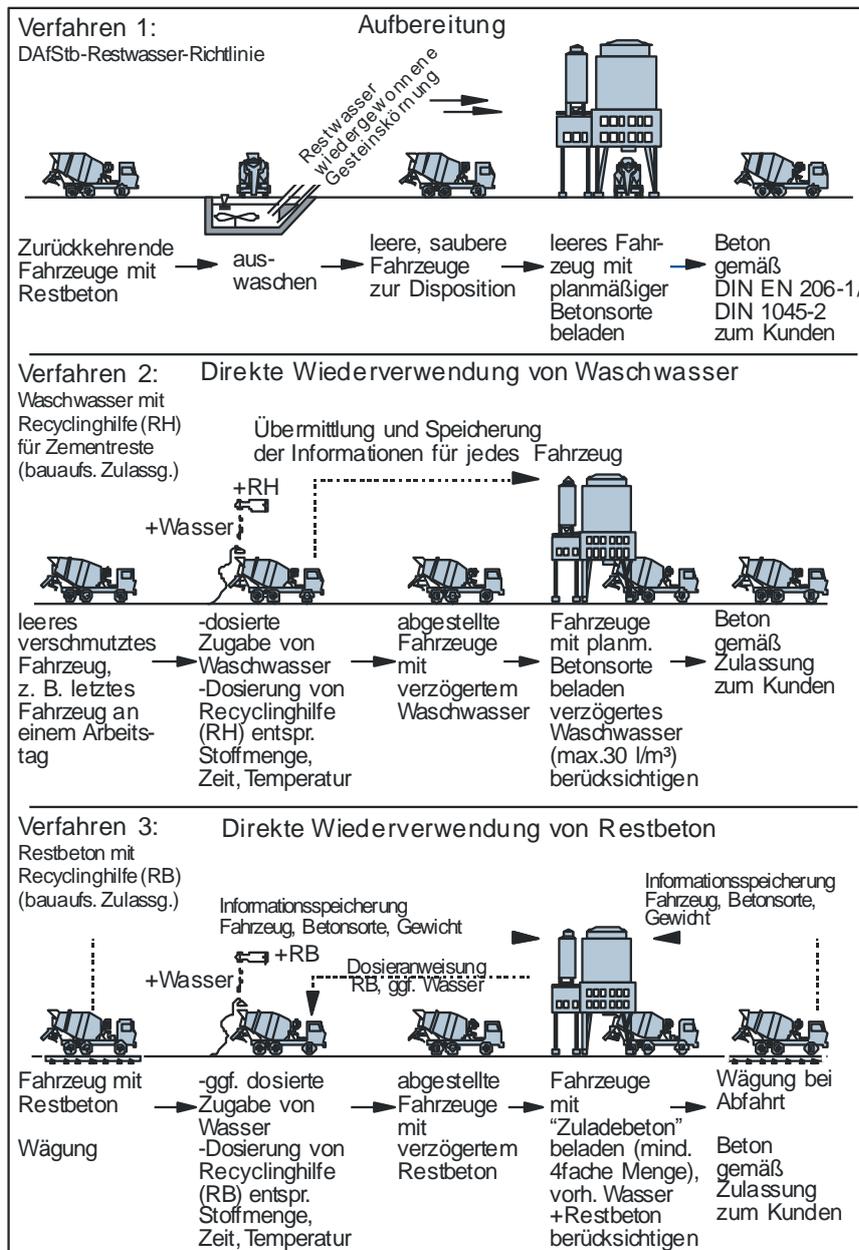


Bild 13: Aufbereitungs- und Wiederverwendungsverfahren von Waschwasser und Restbeton /Ric04/

Bei einer alternativen Methode, die 2010 von der italienischen Firma Mapei S.p.A. zum Patent angemeldet worden ist, wird der Restbeton direkt im Fahrmischer zu Granulaten aus Gesteinskörnung und Zementstein aufbereitet /Fer10/ (siehe Bild 14).



Bild 14: Betongranulat, mechanisch aufgebrochen (ibac)

Zwei pulverförmige Zusatzmittel werden nacheinander im Fahrmischer zugegeben. Bei der ersten Komponente handelt es sich um ein superabsorbierendes Polymer, das dem Frischbeton das freie Wasser entzieht. Nachdem der Frischbeton in der Trommel für wenige Minuten gemischt wurde, wird die zweite Komponente dazugegeben. Dabei handelt es sich um einen Beschleuniger auf Basis von Aluminiumsulfat. Der so granulierten Beton wird nach einem weiteren Mischvorgang entladen. Das Betongranulat erhärtet wie ein normaler Beton, wobei das Material während der nächsten 24 Stunden ein- bis zweimal bewegt werden soll, um eine Agglomeration der Granulate zu verhindern /Fer14/. Für dieses System wird derzeit eine bauaufsichtliche Zulassung angestrebt.

2.3 Sonstige Aufbereitungsmethoden

In diesem Abschnitt werden Ideen vorgestellt, bei denen die Gesteinskörnung vor dem Einsatz im Beton speziell für ein späteres Recycling präpariert wird. Die Oberfläche der einzusetzenden Gesteinskörnung wird dabei mit einer dünnen Schicht versehen. Dadurch wird die Bildung von Hydratphasen auf der Gesteinskornoberfläche behindert. Die Kontaktzone zwischen Gesteinskörnung und Bindemittelmatrix ist geschwächt. Als Materialien für die Beschichtung wurden Mineralöl oder Kunstharzdispersionen eingesetzt /Nog10/. Hierdurch wird die Rauigkeit der Gesteinskörnung herabgesetzt und die Verzahnung der Gesteinskörner untereinander gemindert. Bei einem so präparierten Beton konnten ca. 50 % mehr Gesteinskörnung zementstein-

frei rezykliert werden als ohne Behandlung /Nog10/. Bei dem in Kapitel 2.1.2.2 beschriebenen thermisch-mechanischen Aufbereitungsverfahren mittels Mikrowellenstrahlung wird zurzeit ein Einsatz einer Beschichtung der Gesteinskörnung mit Eisenoxid untersucht. Die Mikrowellen erhitzen das Eisenoxid in der Beschichtung. Hierdurch kann eine stärkere Separierung von Zementstein und Gesteinskörnung erzielt werden /Cho14, Nog09/. Diese Methoden eignen sich offensichtlich nur für die Herstellung von Betonen, bei denen geringe Anforderungen gestellt werden, da durch den Einsatz der Behandlungsstoffe die Festigkeit und Dauerhaftigkeit des Betons negativ beeinflusst wird. Durch die zusätzlichen Kosten der Behandlung ist ein wirtschaftlicher Einsatz der Verfahren unwahrscheinlich.

3 REZYKLIERTE GESTEINSKÖRNUNG FÜR DIE BETONHERSTELLUNG

3.1 Verwendung von Brechsand

3.1.1 Allgemeines

Bei der Aufbereitung von Bauschutt oder Straßenaufbruch zu RC-Gesteinskörnung fallen große Mengen feines Material an. Der Anteil mit einem Größtkorn < 4 mm wird als Brechsand bezeichnet. Prinzipiell lassen sich Brechsande nach ihren Hauptbestandteilen klassieren: z. B. Betonbrechsand, Ziegelbrechsand oder Kalksteinbrechsand. Daneben sind auch Brechsandgemische möglich.

Nach /Wei06/ liegt der Brechsandanteil, bei der Aufbereitung von Betonbruch in einem Bereich von 20 bis 50 M.-%. Die Wasseraufnahme und Porosität von Betonbrechsand ist meistens gegenüber natürlichen Sanden deutlich erhöht (vgl. Kapitel 3.2). Dies darauf zurückzuführen, dass bei der Aufbereitung von Betonabbruch aufgrund der Festigkeitsunterschiede zwischen der weichen Bindemittelmatrix und der harten Gesteinskörnung die Bindemittelmatrix bevorzugt zerkleinert wird. Nach einer japanischen Studie ist ein Einsatz von Betonbrechsand gerade aufgrund seiner hohen Wasseraufnahme als Bodenstabilisierer geeignet /Shi05/. Aus Sicht der Umweltverträglichkeit ist Betonbrechsand problematischer als grobe RC-Gesteinskörnung, da schädliche Stoffe mit höherer Wahrscheinlichkeit in der Bindemittelmatrix aufzufinden sind als in der natürlichen Gesteinskörnung eines Betons. Die Hauptanwendungsgebiete von Betonbrechsanden sind nach /Dor01/ Lärmschutzwälle, Frostschutzschichten, hydraulische gebundene Tragschichten, Pflastersande und Pflasterunterbauten sowie Bankettverfestigungen.

Ziegelbrechsande werden hauptsächlich als rote Wegbeläge für Park- und Grünanlagen, Substrate für Dachbegrünungen und Intensivkulturen, Tragschichten und Hartbeläge im Sportplatzbau, Zusätze für die Färbung in der Kunststoffindustrie sowie als Ausgangsmaterial für die Ziegelherstellung eingesetzt /Dor01/.

Nach /Ede04, Ede09/ kann Kalksandsteinbrechsand für die Herstellung neuer Kalksandsteine eingesetzt werden. Der Anteil an anhaftenden Mörtelresten sollte möglichst gering gehalten werden, da die Steinzug- und Steinbiegezugfestigkeit infolge der Verunreinigungen deutlich reduziert werden. Es ist allerdings fraglich, wie dies umzusetzen ist.

Seit der zweiten Fassung der DAfStb-Richtlinie für RC-Beton /DAf04/ im Jahr 2004 ist der Einsatz von Brechsand < 2 mm für den Einsatz im Beton nach DIN 1045-2:2008-08 und DIN EN 206-1:2001-07 nicht mehr zulässig. Die Regelung wurde auch in die aktuell gültige Fassung der DAfStb-Richtlinie /DAf10a/ übernommen. Als Begründung für diese Regelung sind nach /DAf04/ die negativen Einflüsse des Brechsandes auf die Frischbetoneigenschaften und auf die Dauerhaftigkeit des Festbetons aufgeführt. Hintergrund war zu diesem Zeitpunkt die Aufnahme des Gesteinskörnungstyps 2 in die DIN 4226-100:2002-02, bei der bis zu 33 M.-% der RC-Gesteinskörnung aus der Aufbereitung von Mauerwerk stammen konnten. Der Brechsand aus Mauerwerksbruch weist gegenüber dem Betonbrechsand aufgrund seiner Porosität ein wesentlich höheres Saugvermögen auf und führt so zu einer Verschlechterung der Frisch- und Festbetoneigenschaften /Beh02, Bre96, DAf04/. Nach /Bre96/ liegt die Wasseraufnahme von Betonbrechsand der Fraktion 0-4 mm bei ca. 10 M.-%. Durch das stärkere Wassersaugen ist ein Beton mit Brechsand aus Mauerwerks- und/oder Betonbruch im Vergleich zu einem Beton mit natürlicher Gesteinskörnung i. d. R. schlechter zu verarbeiten. Nach /Luk94/ wirkt sich der Einsatz von Betonbrechsand im Beton zudem festigkeitsmindernd aus.

3.1.2 Ausgangsstoff für hydraulische Bindemittel

Betonbrechsand besteht vorwiegend aus feiner pulverförmiger Bindemittelmatrix, d. h. hydratisierten Zementphasen, Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) sowie Calciumcarbonat (CaCO_3), und je nach Herkunft der verwendeten Gesteinskörnung aus quarzitischen bzw. carbonatischen Gesteinsmehl und Sand.

In /Dor01/ wurde untersucht, inwieweit durch eine Temperaturbehandlung bei etwa 700 °C Betonbrechsand für eine Wiederverwendung als Bindemittel hydraulisch reaktiviert werden kann. Hintergrund für die Untersuchungen ist, dass durch eine Temperaturbehandlung ab 300 °C die Hydratphasen im Zementstein dehydriert und ab 650 °C zersetzt werden. Aus den Dekompositionsprodukten bildet sich zum Teil hydraulisch reaktives Belit (C_2S). Allerdings wird bei diesen Temperaturen das Calciumcarbonat in Betonbrechsand calciniert, so dass Freikalk (CaO_{frei}) nach der Temperaturbehandlung zurückbleibt. Ein zu hoher Freikalkgehalt kann bei relativ grober Gesteinskörnung dazu führen dass das Bindemittel nicht raumbeständig ist. Aufgrund der im Vergleich zur Klinkerproduktion wesentlich geringeren Brenntemperatur ist die Rückführung von Brechsand mit mehr als 50 M.-% Betonbrechsandanteil in den Baustoffkreislauf ökologisch günstig /Dor01/. Brechsande mit geringerem Betonbrechsandanteil können nach der Temperaturbehandlung durch eine Autoklavierung zu beispielsweise Mauersteinen weiterverarbeitet werden (siehe Kapitel 3.1.3).

3.1.3 Ausgangsstoff für autoklavierte Bauprodukte

Brechsande eignen sich nach /Ede09/ grundsätzlich als Ausgangsmaterial zur Herstellung von Recycling-Mauersteinen unter Anwendung der Kalksandstein-Produktionstechnologie. Zur Herstellung von Kalksandsteinen werden üblicherweise natürliche Rohstoffe (Kalk, Sand, Wasser) verwendet, die mechanisch verpresst und bei einer Temperatur von 200 °C autoklaviert werden. Untersucht wurden verschiedene Ausgangsstoffzusammensetzungen und -körnungen (0/2 und 2/4 mm) aus aufbereiteten Baurestmassen. Dabei wurden 25, 50 und 75 M.-% einer Kalksandstein-Rohmischung mit dem Bruchmaterial substituiert und aus dem Gemisch Mauersteine im Autoklaven bei einer Härtetemperatur von 203 °C und 16 bar Härtedruck hergestellt (siehe Bild 15).



Referenzprüfkörper aus
Kalksandstein-Rohmischung



50 M.-% Beton-Recycling-Material (0/2 mm)
minimale Oberflächenverschlechterung und
leichte Verfärbungen



50 M.-% Beton-Recycling-Material (2/4 mm),
stark raue Oberfläche und deutliche
Verfärbungen

Bild 15: Kalksandstein ohne Zugabe von Recycling-Material (links), mit 50 M.-% aufbereitetem Beton-Recycling-Material der Fraktion 0/2 mm (oben rechts), mit 50 M.-% aufbereitetem Beton-Recycling-Material der Fraktion 2/4 mm (unten rechts) /Ede09/

Es wurde gezeigt, dass Bruchmaterialien aus Kalksandstein-, Ziegel-, Beton- und Naturstein-Bruchmaterial zur Herstellung von Recycling-Mauersteinen verwendet werden können. Eine Zugabe von Porenbeton-Bruchmaterial hat sich als nicht praktikabel erwiesen. Bei allen eingesetzten Bruchmaterialien werden i. d. R. Qualitätseinbußen beobachtet, wie z. B. eine gegenüber der Referenzmischung (ohne Bruchmaterial) verringerte Steindruckfestigkeit oder -rohichte. Die Einbußen nehmen i. A. mit zunehmendem Anteil des Bruchmaterials zu. Bei Verwendung der gröberen Körnung 2/4 mm sind die Beeinträchtigungen höher als bei der Verwendung von feinen Brechsanden (0/2 mm). Durch produktionstechnische Maßnahmen, wie Steigerung des Verdichtungsdrucks, Erhöhung der Kalk-Dosis oder Verlängerung der Härtezeiten kann diesen Qualitätseinbußen entgegengewirkt werden /Ede09/. Nach /Hla06, Hla07/ sind Betonbrechsande besonders gut zur Herstellung von autoklavierten

Formsteinen geeignet. Der im Betonbruch vorhandene Portlanditgehalt leistet einen Beitrag zur Festigkeitsentwicklung des Baustoffs.

In einem Verbundforschungsprojekt wurden sowohl hydrothermale als auch thermische Verfahren zur Herstellung von Granulaten aus heterogenem Bauschutt untersucht /For12, Mül12a, Mül13, Sch10/. Aufbaukörnungen aus Mauerwerksbrechsanden werden bei Temperaturen bis ca. 1.200 °C autoklaviert und erreichen durch die Zugabe des Blähmittels Siliciumcarbid Kornrohddichten im Bereich von 600 bis 1.000 kg/m³ /For12/. Die so hergestellten Bauprodukte können als leichte Gesteinskörnung für Leichtbeton oder -mörtel eingesetzt werden (siehe Bild 16).

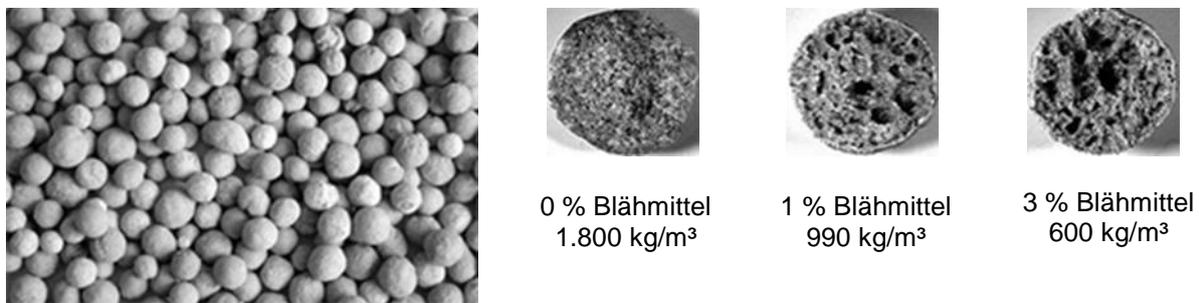


Bild 16: Künstliche, leichte Gesteinskörnung aus Mauerwerksbrechsand unter Zugabe unterschiedlicher Mengen an Blähmittel /Mül13, FIB15/

Die Kornfestigkeiten und Rohdichten der hergestellten Granulate sind vergleichbar mit denen von handelsüblichen Blähtonen. Gleichzeitig erzielen die Granulate deutlich niedrigere Wasseraufnahmen als die Vergleichsblähtone /Mül13, Sch10/. Hinsichtlich der Umweltverträglichkeit konnten keine Parameterüberschreitungen beobachtet werden. Vielmehr bietet der Herstellungsprozess die Möglichkeit Verunreinigungen des Brechsandes durch Gips zu beseitigen. Der Gips zerfällt bei der Temperaturbehandlung und kann aus dem Rauchgas zurückgewonnen werden /Mül13/.

3.1.4 Zementherstellung

Nach /San98/ besteht Brechsand chemisch hauptsächlich aus den vier Hauptoxiden Fe₂O₃, Al₂O₃, CaO und SiO₂, d. h. den Hydraulefaktoren, die für die Klinkerherstellung prinzipiell notwendig sind. In /Mül10/ wurde die Oxidzusammensetzung von RC-Gesteinskörnungen aus Mauerwerks- und Betonbruch im Dreistoff-Diagramm SiO₂-CaO-Al₂O₃ den Hauptkomponenten von Portlandzement gegenübergestellt. Es ist

ersichtlich, dass die RC-Materialien gewisse Defizite an Aluminat und Calcium gegenüber dem optimalen Zementrohstoff-Gemisch aufweisen. Brechsande sind also nur bis zu einem gewissen Grad zum Einsatz als Rohstoffkomponente in der Klinkerproduktion oder als Zumahlstoff bei der Zementherstellung geeignet. Nach /Mül14/ beträgt der Sekundärrohstoffanteil im größten Zementwerk Deutschlands nur 15,8 %. Der Einsatz von Brechsanden könnten also helfen den Recyclinganteil bei der Zementherstellung zu erhöhen.

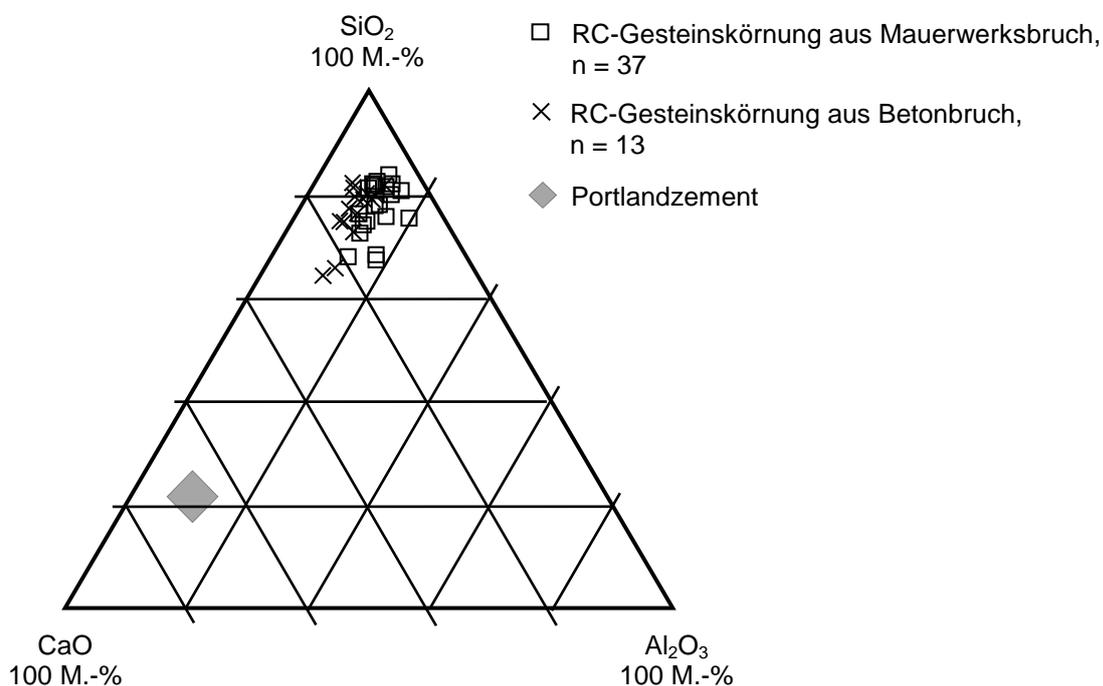


Bild 17: Lage von RC-Gesteinskörnungen aus Mauerwerks- bzw. Betonbruch im Zement-Dreistoffsystem SiO_2 - CaO - Al_2O_3 /Mül10/

Als Rohstoffkomponente können Betonbrechsande natürliche Silizium- und/oder Calciumträger in der Klinkerproduktion ersetzen. Die Überprüfung der technischen Umsetzbarkeit wurde in einem Verbundforschungsvorhaben in den Jahren 2005 bis 2010 überprüft /Bra11/. Untersucht wurde, wie der Einsatz von Betonbrechsand die Klinkerqualität beeinflusst, wenn er im Ofeneinlauf zugegeben (Substitution von 1 M.-%) oder dem Rohmehl direkt zugemischt wurde (Substitution von 4 M.-%). Alle aus dem Klinker hergestellten Portlandzemente waren unabhängig von der Verwendung von Brechsand als Rohstoffkomponente normkonform und wiesen praxisübliche Kennwerte für Raumbeständigkeit, Erstarrungsbeginn, Wasseranspruch und Druckfestigkeit auf. Bei der Zugabe des Brechsandes im Ofeneinlauf wurden im Klin-

ker allerdings zum Teil größere Freikalknester, tlw. mit Periklas, beobachtet. Bei dem Klinker, das aus dem Rohmehl-Brechsand-Gemisch hergestellt wurde, wurden ebenfalls Freikalk- bzw. Periklasnester erfasst; diese waren allerdings deutlich kleiner. In den Klinkerproben, die ohne Brechsand hergestellt wurden, wurden fast keine Freikalk- bzw. Periklasnester beobachtet. Hervorgerufen wurden die Nester durch grobe Calcit- oder Dolomitmörner im Brechsand, die zu lokalen CaO- bzw. MgO-Anreicherungen im Brenngut führen. Das CaO kann an diesen Stellen nicht mit C_2S zu C_3S reagieren und bleibt als Freikalk (CaO_{frei}) zurück. Beim MgO führen die Anreicherungen dazu, dass dieses nicht vollständig in die Klinkerphasen eingebaut werden kann und als Periklas (MgO_{frei}) lokal auskristallisiert. Die aus dem Klinker hergestellten Portlandzemente wiesen bei Verwendung von Brechsand geringere Festigkeiten auf als der Portlandzement, der aus dem Referenzklinker ohne Brechsand hergestellt wurde. Aufgrund der Ergebnisse wurde empfohlen bei Zugabe des Brechsandes im Ofeneinlauf möglichst feine Körnung zu verwenden oder dieses möglichst dem Rohmehl vor dem Brennen unterzumischen /Bra11/.

Von Sanchez et al. /San98/ wurden sogenannte Recyclingzemente untersucht, bei denen als Rohstoffkomponente Brechsand eingesetzt wurde. Zur genauen Zusammensetzung und dem Herstellprozess wurden keine Angaben gemacht. Bei den Zementen handelte es sich um einen CEM I 52,5 R, einen CEM II/A-V 42,5 R, einem CEM II/A-LL 32,5 und einem CEM III/A 42,5 SR. Alle Zemente waren in ihren Druckfestigkeiten sowie ihrem Erstarrungsverhalten normkonform mit den entsprechenden landesspezifischen Regelungen /San98/.

3.1.5 Betonherstellung

Aufgrund der in Abschnitt 3.1.1 beschriebenen negativen Auswirkungen von Brechsand auf die Betonqualität ist die Verwertung im Beton nicht üblich. Ein mögliches Einsatzgebiet für Brechsand sind jedoch sandreiche Betone. Entwickelt wurden diese Betone als Alternative zu normalem Beton in Regionen mit geologisch begrenzten Vorkommen an Kies und Splitt (siehe Bild 18) /Beh02, Spe05/. Sandreiche Betone weisen einen Sandanteil von bis zu 80 M.-% auf. Für solche Betone ist aufgrund des nicht normgerechten Mehlkornanteils nach DIN 1045-2:2008-08 eine bauaufsichtliche Zulassung erforderlich /Beh02/. Aufgrund des hohen Feinkornanteils, weist sandreicher Beton einen höheren Wasseranspruch auf als Beton mit normal abgestufter Gesteinskörnung. Durch den Einsatz von Fließmitteln bzw. Betonverflüssigern, können sandreiche Betone jedoch wirtschaftlich hergestellt werden. Zurzeit

findet der Einsatz von sandreichen Betonen nur in Einzelfällen statt, da Erfahrungen über die Frisch- und Festbetoneigenschaften fehlen /Spe05/. Ein Einsatz von Brechsand in der Betonherstellung ist ökologisch nur in den Regionen sinnvoll, in denen natürliche Sande nicht in entsprechender Menge verfügbar sind (siehe Bild 18).

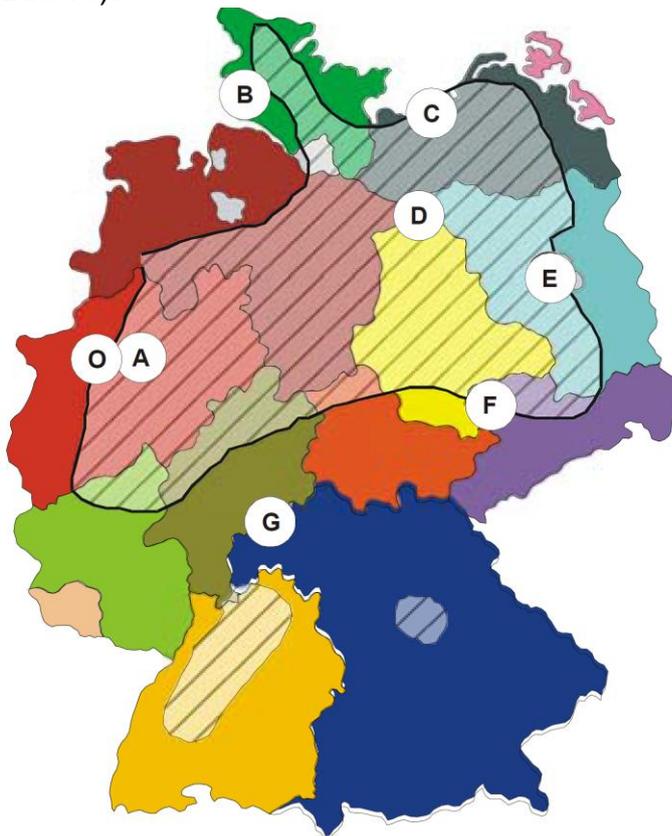


Bild 18: Regionen in Deutschland mit einem Überschuss an natürlichen Sanden (schraffierte Flächen) /Spe05/

Nach /Ost11/ können Brechsande in selbstverdichtenden Betonen (SVB) oder Mörteln (SVM), die konzeptionell einen hohen Mehlkornanteil aufweisen, eingesetzt werden. Als Füller werden bei SVB und SVM vorrangig Flugaschen und Kalksteinmehl eingesetzt. Wesentlich für die späteren Verarbeitungseigenschaften ist die Kornform, Korngrößenverteilung, Rauigkeit und Packungsdichte der eingesetzten Gesteinskörnung. Erste Ergebnisse zeigen, dass ein Einsatz von Brechsandmehl zu einem starken Anstieg der Fließgrenze bei relativ gleichbleibender plastischer Viskosität oder einem starken Anstieg der plastischen Viskosität bei gering erhöhter Fließgrenze führt /Ost13/. Nach Untersuchungen von /Cor04/ neigt SVB mit grober RC-Gesteinskörnung und Betonbrechsand weniger zum Entmischen als ein vergleichba-

rer Beton mit natürlichen Gesteinskörnungen. Der Austausch von ca. 50 Vol.-% der natürlichen Kies- und 12 Vol.-% der Sandfraktion mit Recycling-Material bewirkte allerdings eine Verringerung der Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen um rund 20 %.

In /Eva04/ sind Untersuchungen zum Einfluss der Austauschrate (0, 10, 20, 30, 50 und 100 Vol.-%) der natürlichen Sandfraktion durch Betonbrechsand auf die Betondruckfestigkeit beschrieben. Der Wasser-Zement-Wert der RC-Betone wurde mit ansteigender Austauschrate erhöht, um die erhöhte Wasseraufnahme des Betonbrechsandes (13,1 statt 0,8 M.-%) sowie die Konsistenzverringern infolge der höheren Kornrauigkeit, auszugleichen.

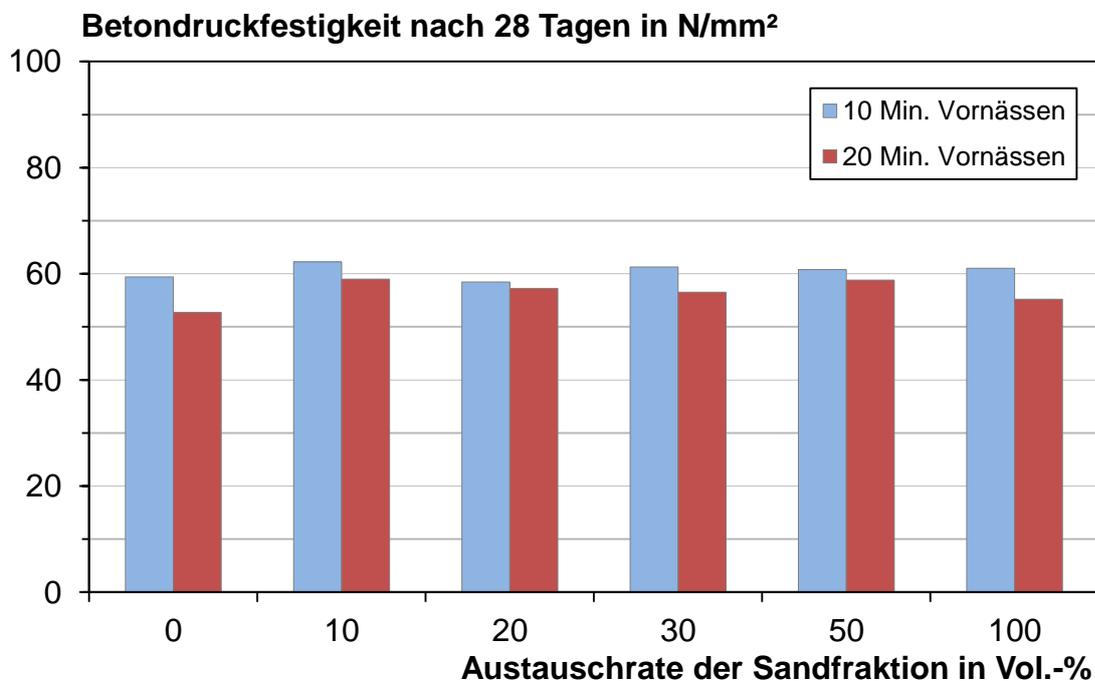


Bild 19: 28 Tage Betondruckfestigkeit in Abhängigkeit der Austauschrate von der natürlichen Sandfraktion durch Betonbrechsand und der Vorbehandlungsdauer des Betonbrechsands /Eva04/

Bild 19 zeigt, dass durch die Variation der Austauschrate keine signifikanten Unterschiede in der Betondruckfestigkeit festgestellt wurden. Die Autoren führen dies auf das Vorhandensein von unhydratisiertem Zement im Betonbrechsand zurück. Der Brechsand (Fraktion 0,074/1,19 mm) wurde in einem Probenalter von 35 Tagen aus im Labor hergestellten Beton durch Brechen gewonnen. Durch den unhydratisierten Zement in der RC-Gesteinskörnung wird der effektive Wasser-Zement-Wert des RC-Betons mit steigender Austauschrate insgesamt verringert und so werden mögliche

nachteilige Effekte des Betonbrechsandes auf die Druckfestigkeit ausgeglichen. Eine leichte Verschlechterung der Betondruckfestigkeit stellte sich bei einer zweiten Versuchsserie ein, in der der Brechsand länger vorgegast wurde. Dies könnte auf das Abreagieren des unhydratisierten Zements zurückzuführen sein. Es ist allerdings zu beachten, dass RC-Gesteinskörnung unabhängig vom Hydratationsgrad nicht zu stark vorgegast werden sollte, da Wasserablagerungen um die RC-Gesteinskörnung die Kontaktzone schwächen und so die Betondruckfestigkeit herabsetzen können /Poo04/. In weiteren Untersuchungen von Evangelista et al. wurde bis zu einer Austauschrate von 30 Vol.-% nur eine geringe Minderung der 28 Tage-Betondruckfestigkeit (3,7 %) und Biegezugfestigkeit (5,2 %) sowie des E-Moduls (3,7 %) im Vergleich zu einem Referenzbeton ohne Brechsand beobachtet /Eva07/. Ein kompletter Austausch der natürlichen Sandfraktion durch Brechsand führte allerdings zu einer starken Verschlechterung der genannten Kennwerte (10,2 %, 30,5 % und 18,5 %). Diese Tendenz ist vor allem der höheren Porosität und der geringeren Steifigkeit des Brechsandes geschuldet. Der Abrieb mittels Verschleißprüfung mit der Schleifscheibe nach Böhme (DIN 52108:2010-05) wurde im Vergleich zur Referenz deutlich vermindert (5,1 % bei einer Austauschrate von 30 Vol.-% und 30,1 % bei 100 Vol.-%). Dies ist darauf zurückzuführen, dass Brechsande weniger fest sind als natürliche Sande. Die Dauerhaftigkeitseigenschaften dieser Betone wurden von denselben Autoren in /Eva10/ beschrieben. Die Wasseraufnahmen, Chlorideindringtiefen und Karbonatisierungstiefen der Betone nahmen deutlich mit steigendem Brechsandanteil zu. Bei der für die Untersuchungen verwendeten RC-Gesteinskörnung handelte es sich um speziell im Labor hergestellte RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch. Industrieller Brechsand mit einem gewissen Anteil an Störstoffen wird tendenziell schlechtere Ergebnisse erzielen. Die Dauerhaftigkeitsprobleme beim Einsatz von Brechsand als Ersatz für natürliche Sande stehen einer möglichen Erhöhung des Recyclinganteils bei der Betonherstellung entgegen. Nach /Eva07, Eva10/ sind bei einer Austauschrate von 30 Vol.-% die Qualitätseinbußen bei der Dauerhaftigkeit vertretbar. Die Ergebnisse zeigen aber auch, dass der pauschale Ausschluss der feinen RC-Gesteinskörnung bei der Betonherstellung gemäß /DAf10a/ nicht gerechtfertigt wird.

In /Mül12b, Mül12c/ wurde untersucht, ob Betonbrechsande, die speziell aufgemahlen wurden, als Zementersatz bzw. Betonzusatzstoff eingesetzt werden können. Beim Einsatz als Zementersatz wurde ein Teil des Zementes durch den Betonbrechmehl ausgetauscht. Der Wassergehalt wurde nicht angepasst. Als inertes Material beteiligt sich Betonbrechmehl nicht an der Festigkeitsentwicklung von Beton oder

Mörteln. Die Festigkeitsabnahme ist dabei proportional zur Austauschrate (Verdünnungseffekt), wenn das Brechmehl eine ähnliche Korngröße wie der Zement aufweist. Beim Einsatz als Betonzusatzstoff wurde nicht der Zement, sondern feine Gesteinskörnung ausgetauscht. Der Wasser-Zement-Wert bleibt also konstant. In diesem Fall konnte eine Festigkeitssteigerung gegenüber der Referenz beobachtet werden. Die Festigkeitssteigerung wird vom den Autoren auf eine verbesserte Packungsdichte zurückgeführt. Ob eine Festigkeitssteigerung mit Brechmehl als Betonzusatzstoff erreicht werden kann ist abhängig von der Granulometrie des Brechsandes und der restlichen eingesetzten Gesteinskörnung. Das feine Brechmehl füllt dabei die Zwicker der gröberen Gesteinskörnung aus (Füllereffekt). Durch den Einsatz von Brechmehl kann nach Angaben von /Mül12b, Mül12c/ eine Zementersparung in einer Größenordnung von 10 bis 12 M.-% erreicht werden. Das Brechmehl zeigt dabei ein nahezu gleichwertiges Verhalten wie Quarzmehl.

In den Untersuchungen zum Einsatz von Brechsanden in der Betonherstellung wurde nicht geklärt, ob ein Einsatz von Brechsanden ökologisch und ökonomisch sinnvoll ist. Durch zusätzliche Aufbereitungsschritte erhöhen sich die Kosten für das Bauprodukt Brechsand.

3.2 Verwendung von grober rezyklierter Gesteinskörnung

3.2.1 Allgemeines

In Deutschland wird RC-Gesteinskörnung zur Betonherstellung lediglich in vernachlässigbarer Menge eingesetzt /KWT00, KWT01, KWT02, KWT03, KWT07, KWT11a, KWT11b, KWT13/. Mit Ausnahme weniger Demonstrationsbauvorhaben werden nur RC-Betone mit geringen Anforderungen hergestellt, wie z. B. Rückenstützbetone oder Sauberkeitsschichten.

3.2.2 Straßen- und Wegebau

Das klassische Einsatzgebiet von RC-Gesteinskörnung ist der Straßen- und Erdbau. Hier wird diese i. d. R. als ungebundenes Material für Frostschutz- und Schottertragschicht eingesetzt. RC-Beton wird zudem als Rückenstützbeton für die Verlegung von Bord- und Rinnsteinen sowie anderen Randeinfassungen eingesetzt. Rückenstützbetone sind i. d. R. erdfeuchte Normalbetone der Festigkeitsklasse C12/15 oder C16/20, die durch Klopfen und Schlagen verdichtet werden. In /Sch03b/ wurde nach-

gewiesen, dass zur Herstellung dieser Betone grundsätzlich auch RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch mit und ohne Ziegelanteilen verwendet werden kann. Je nach Art, Kornfestigkeit und Anteil der RC-Gesteinskörnung sind zum Erreichen der gleichen Druckfestigkeit allerdings bis zu 20 M.-% mehr Zement erforderlich

Allerdings ist die Akzeptanz von Kommunen und Straßenbauverwaltungen hinsichtlich des Einsatzes von RC-Gesteinskörnungen regional unterschiedlich. Nach /Kna14/ gibt es Kommunen, die aufgrund von positiven Erfahrungen mit RC-Baustoffen die Anwendung befürworten, während andere Kommunen bei Ausschreibungen von Leistungsverzeichnissen den Einsatz von RC-Gesteinskörnungen ausschließen. Die neueren Entwicklungen in der Aufbereitungstechnik als auch in der Qualitätssicherung sind vielen Kommunen nicht bekannt /Kna14/. Preisvorteile von RC-Gesteinskörnungen gegenüber natürlich gewonnener Gesteinskörnung sind die primäre Motivation für den Einsatz von RC-Baustoffen. Aufgrund der aufwändigen Aufbereitung von RC-Gesteinskörnung kann dieser Preisvorteil nicht immer realisiert werden. Das Beispiel aus den Niederlanden zeigt, dass der dort verhältnismäßig hohe Recyclinganteil beim Einsatz von Gesteinskörnungen primär auf gesetzliche Vorgaben und nicht auf ökonomische Vorteile zurückzuführen ist (siehe Kapitel 5).

3.2.3 Betonsteine

Ein anderes Beispiel für den Einsatz von RC-Gesteinskörnung für Beton mit geringen Anforderungen sind sogenannte Beton-Systemsteine (auch: Beton-Legosteine, Blocksteine, Legioblock®). Dabei handelt es sich um Betonblöcke in einer Größe von ca. $0,40 \cdot 0,40 \cdot 0,40 \text{ m}^3$ bis $1,60 \cdot 0,80 \cdot 0,80 \text{ m}^3$, die sich ohne zusätzliche Verbindungselemente für provisorische oder permanente Konstruktionen verbauen lassen (siehe Bild 20). Die Steine weisen auf der Oberseite Ausbuchtungen und auf der Unterseite entsprechende Einbuchtungen auf und werden im Verbund mittels einer Steinzange und passendem Baugerät aufeinander gestapelt. Typische Anwendungsgebiete sind Schüttgutboxen, Trennwände, Brandschutzwände oder Fahrsilos /Van13/.

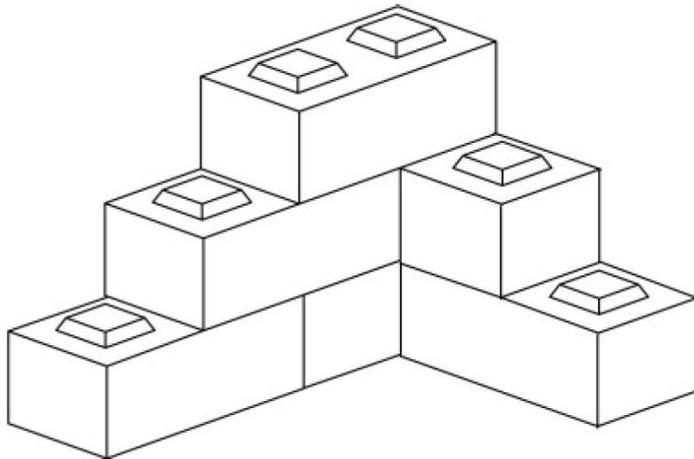


Bild 20: Systemskizze eines Verbundes von Beton-Systemsteinen /Van13/

3.2.4 Konstruktiver Betonbau

Aktuell produzieren nach /Kna14/ mehrere Betonwerke vor allem in Südwestdeutschland RC-Betone für den konstruktiven Ingenieurbau (z. B. Heinrich Krieger KG /Kri14/, Heinrich Feeß GmbH & Co. KG /Fee14/ und Scherer & Kohl GmbH & Co. KG /Sch14/). In Baden-Württemberg hat das Umweltministerium in Zusammenarbeit mit den Unternehmen Krieger und Feeß eine Mischungszusammensetzung zur Herstellung von Transportbetonen unter Verwendung von Gesteinskörnungen nach Typ 2 der DAfStb-Richtlinie für RC-Beton /DAf10a/ für verschiedene Anwendungsfälle entwickelt /Kna13a, Kna14/. Die Eignungsprüfungen zeigten, dass sowohl die Frisch- als auch die Festbetoneigenschaften alle Anforderungen der entsprechenden Normen und Regelwerke der zugelassenen Betonsorten erfüllen. Die entwickelten Betonrezepturen sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Exemplarische Betonrezepturen zur Herstellung von Transportbetonen unter Verwendung von Gesteinskörnungen nach Typ 2 /Kna13a/

Bestandteil	Einheit	C30/37	C25/30	C20/25	C12/15	C8/10
Expositionsklasse	-	XC4, XF1, XA1		XC3	X0	
Konsistenzbereich		F3 - F4			F3	
Zement	kg/m ³	360	290	260	190	180
Flugasche		-	70	50	70	40
Kalksteinmehl		-	20		30	
Gesamtwasser		172	188	180		176
w/z-Wert	-	0,48	0,59	0,64	0,84	0,90
Zusatzmittel		FM	BV / FM		-	
Zulässiger Anteil an RC-Gesteinskörnung	M.-%	35 / 25 ¹⁾			35	

1) 35 M.-% bei XC4, 25 M.-% bei XF1 und/oder XA1

FM: Fließmittel

BV: Betonverflüssiger

3.3 Eigenschaften grober rezyklierter Gesteinskörnung

3.3.1 Allgemeines

Die Eigenschaften von grober RC-Gesteinskörnung hängen stark von der Art der aufbereiteten Ausgangsstoffe ab. Sie werden anhand ihrer baustofftechnologischen Parameter und ihrer Umweltverträglichkeit bewertet. Kornrohddichte und Wasseraufnahme sowie die Gehalte an Chlorid und Sulfat sind dabei für die Betontechnologie die wichtigsten Kennwerte.

3.3.2 Kornrohddichte

Die Kornrohddichte von RC-Gesteinskörnung ist nach der DAfStb-Richtlinie für RC-Beton /DAf10a/ gemäß DIN EN 1097-6:2013-06 auf ofentrockener Basis zu bestimmen. Sie beschreibt das Verhältnis der trockenen Masse der Gesteinskörnung zum Gesteinskornvolumen unter Einschluss der Korneigenporen. Untersuchungen von /Dah96/ haben gezeigt, dass das Zylinderverfahren nach DIN 4226-3:1983-04 (heute DIN EN 1097-6:2013-06) aufgrund von anhaftenden Luftporen nicht geeignet ist die

Kornrohddichte von RC-Gesteinskörnung > 2 mm in ausreichender Genauigkeit zu bestimmen. Gut reproduzierbare Ergebnisse erzielt man bei RC-Gesteinskörnung mit dem Pyknometerverfahren nach DIN 4226-3:1983-04 (heute DIN EN 1097-6:2013-06) oder auch der Unterwasserwägung /Dah96/.

Die DAfStb-Richtlinie für RC-Beton /DAf10a/ schreibt für RC-Gesteinskörnungen des Typs 1 und 2 (siehe Kapitel 1.5) eine Kornrohddichte auf ofentrockener Basis von mindestens 2.000 kg/m^3 vor (siehe Tabelle 2, S. 9). Sie liegen damit im Grenzbereich von leichter und normaler Gesteinskörnung nach DIN EN 13055-1:2002-08 bzw. DIN 1045-2:2008-08 sowie unterhalb der üblichen Rohddichte von Beton.

Die Kornrohddichte von RC-Gesteinskörnung ist i. d. R. niedriger als die von quarzitischer oder kalksteinhaltiger Gesteinskörnung. Dies ist in erster Linie auf die geringere Dichte des Zementsteins im Vergleich zu gefügedichteter natürlicher Gesteinskörnung zurückzuführen. Geringeren Einfluss hat die Beschädigung der Gesteinskörner und/oder der Bindemittelmatrix infolge der Aufbereitung (siehe Bild 21) /Wei08/. Bei aufbereitendem Mischabbruch ist die geringe Kornrohddichte auf poröse Bestandteile, wie. z. B. Ziegelsplitt, zurückzuführen.

Bild 21 zeigt eine Environmental Scanning Electron Microscope-Aufnahme eines in Epoxidharz eingebetteten RC-Gesteinskorn aus Betonbruch /Wei08/. Im RC-Gesteinskorn sind natürliche Gesteinskörner zu erkennen, die von einer Bindemittelmatrix mit Sandanteilen nahezu komplett eingehüllt sind.

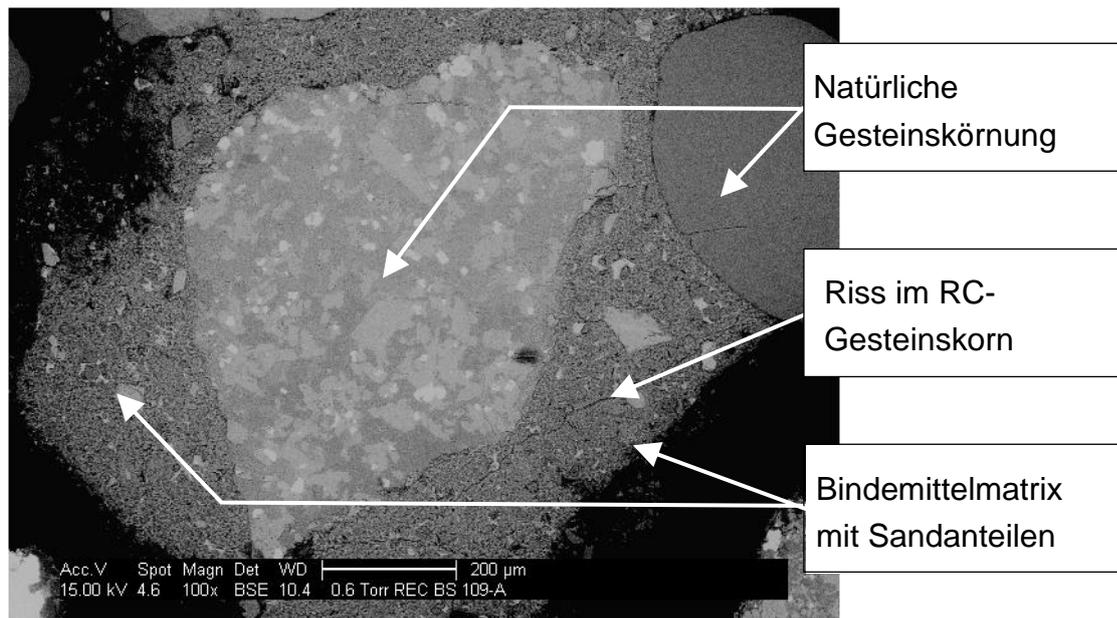


Bild 21: ESEM-Aufnahme eines Dünnschliffes von RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch /Wei08/

Der Zementsteinanteil von RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch liegt nach Untersuchungen von /San09/ in Abhängigkeit von der Korngröße in einem Bereich von 23 bis 64 M.-% (siehe Bild 22). Untersucht wurden unterschiedliche kommerzielle RC-Gesteinskörnungsproben einer stationären Recyclinganlage, die in einem Zeitraum von einem Jahr gesammelt wurden. Die dargestellten Bandbreiten sind auf unterschiedliche Untersuchungsmethoden zurückzuführen. Bei den Untersuchungen aus /San09/ wurde zur Ermittlung des anhaftenden Zementsteins die wassergesättigte Probe bei 500 °C getrocknet und in kaltem Wasser abgeschreckt. Durch die dabei entstehenden Zwangsspannungen löste sich der Zementstein von der Gesteinskörnung (Temperaturbehandlung). Bei den anderen Untersuchungen wurde i. d. R. der Zementsteinanteil mittels selektiven Lösens durch Salzsäure ermittelt. Dieses Verfahren eignet sich allerdings nicht bei kalksteinhaltiger Gesteinskörnung /San09/.

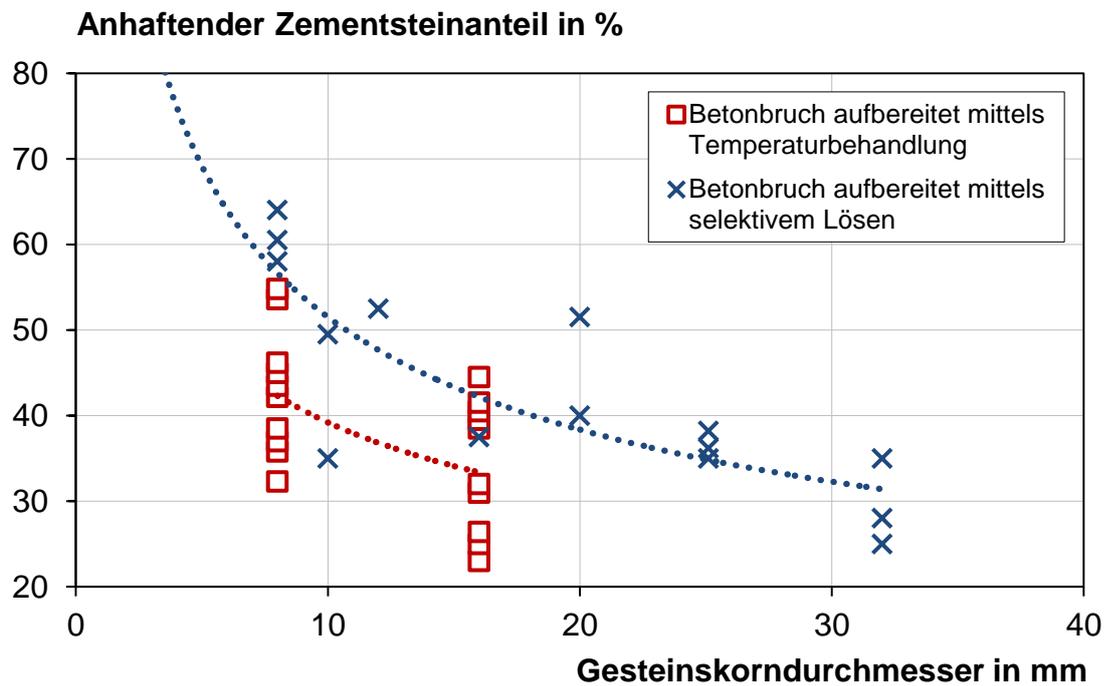


Bild 22: Anhaftender Zementsteinanteil in Abhängigkeit vom Korndurchmesser des Betonsplitts /San09/

RC-Sande aus Betonbruch weisen aufgrund des beschriebenen Zusammenhangs zwischen Korngröße und Zementsteinanteil üblicherweise eine geringere Kornroh-dichte auf als die RC-Splittfraktionen aus Betonbruch. Tabelle 6 zeigt eine Literaturauswertung der Kornroh-dichte von Sand- und Splittfraktionen aus Laboruntersuchungen bzw. industrieller Herkunft /Mül03/.

Tabelle 6: Kornrohddichten von quarzitischer RC-Gesteinskörnung und Betonbruch /Bri13, Mü103/

Parameter	Einheit	Kornrohddichte natürl. GK ¹⁾	Kornrohddichte RC-GK aus Betonbruch		
			RC-GK ¹⁾	RC-Splitte ²⁾	RC-Sande ²⁾
1	2	3	4	5	6
Probenanzahl	-	5	18	108	12
Korngröße	mm	4 - 31,5		> 5	0 - 5
Mittelwert	kg/dm ³	2,57	2,36	2,26	2,11
Minimum		2,54	1,91	1,86	1,81
Maximum		2,62	2,67	2,59	2,31
Standardabweichung		0,042	0,171	0,127	0,187

1) Angaben nach /Bri13/ (Kornrohddichte auf trockener bzw. ofentrockener Basis)

2) Angaben nach /Mü103/

3.3.3 Wasseraufnahme

Bei gefügedichten natürlichen Gesteinskörnungen ist die Wasseraufnahme bei der Betonherstellung meist vernachlässigbar. Bei den porösen RC-Gesteinskörnungen ist sie allerdings von Bedeutung. Idealerweise muss die RC-Gesteinskörnung bei der Betonherstellung so vorgegast werden, dass diese sich im Beton wie eine gefügedichte, natürliche Gesteinskörnung verhält und dem Bindemittelleim kein Wasser entzieht /Mü198/.

Je nach Art der RC-Gesteinskörnung kann die Wasseraufnahme unterschiedlich stark ausfallen. RC-Gesteinskörnung aus Mischabbruch sind i. A. saugfähiger als solche aus Betonbruch (siehe Bild 23). Die Gesteinskornrohddichte steht in direkter Beziehung zu seiner Wasseraufnahme. Je kleiner die Kornrohddichte, desto höher ist die Wasseraufnahme.

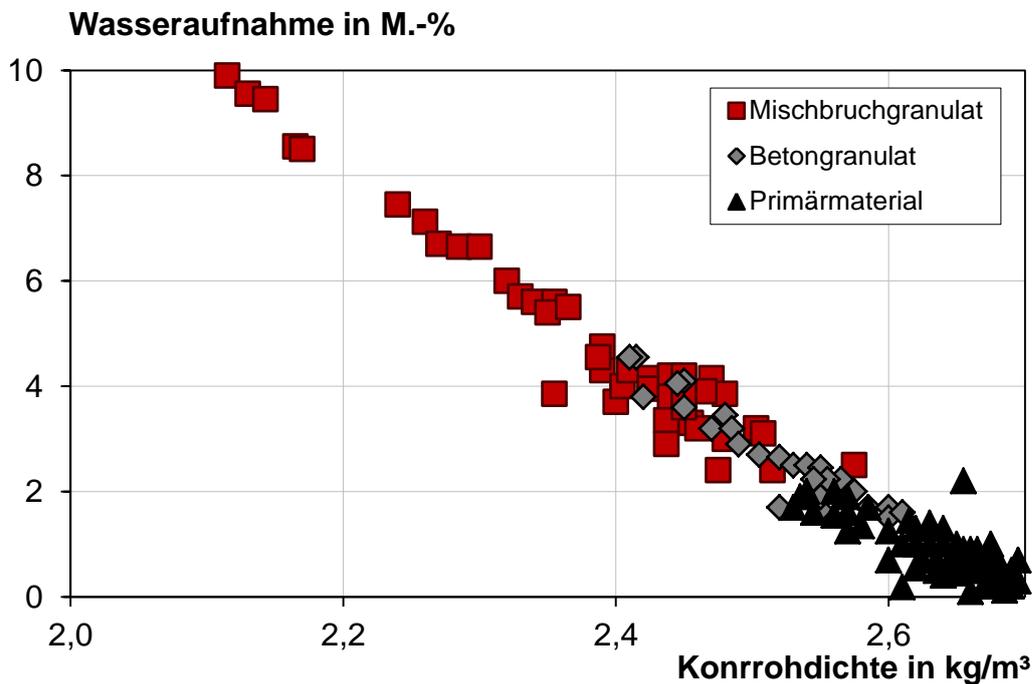


Bild 23: Vergleich der Wasseraufnahme von natürlicher Gesteinskörnung und RC-Gesteinskörnung /Hof07/

Nach der DAfStb-Richtlinie für RC-Beton /DAf10a/ ist für Betonsplitt eine maximale Wasseraufnahme von 10, für Bauwerkssplitt 15 M.-% erlaubt. RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch weist mit steigendem Zementsteinanteil eine höhere Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6:2013-06 auf (siehe Bild 24). Dies ist, wie auch bei der Kornrohdichte, auf die höhere Porosität des Zementsteins zurückzuführen.

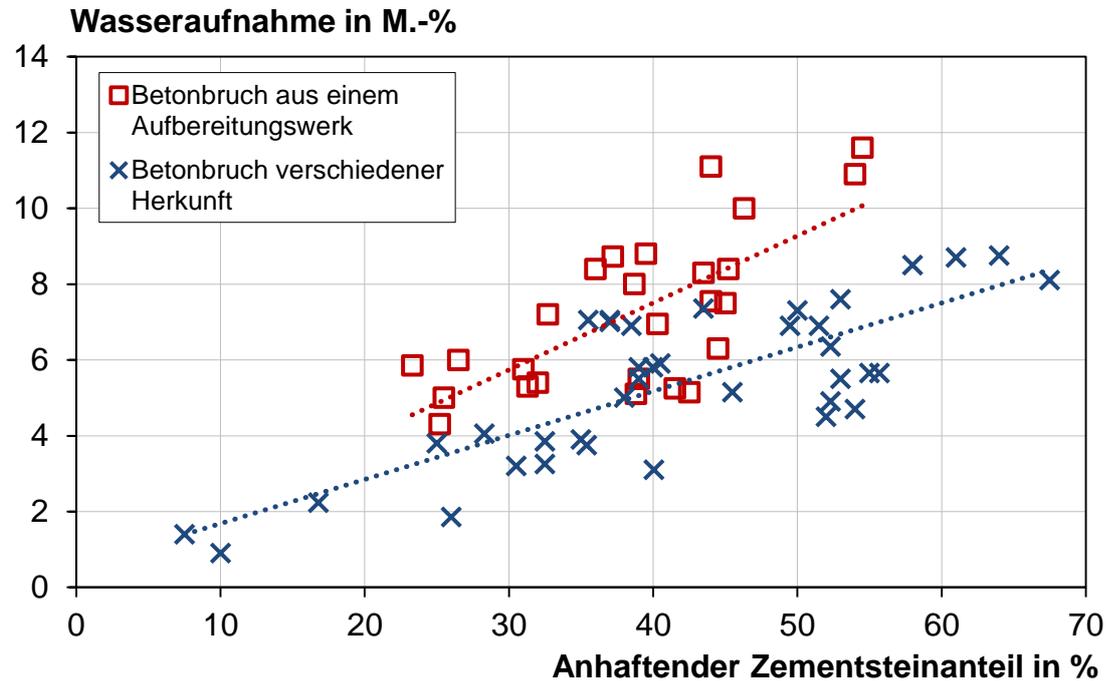


Bild 24: Vergleich der Wasseraufnahme nach DIN EN 1097-6:2013-06 von RC-Gesteinskörnung und dem anhaftenden Zementsteinanteil /San09/

In Tabelle 7 ist eine Auswertung verschiedener Literaturquellen nach /Bri13/ aufgeführt, die die hohe Spannweite der Wasseraufnahme von RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch aufzeigt. Die Bestimmung der Wasseraufnahme erfolgte dabei in einem Zeitrahmen von 1 bis 28 Tagen.

Tabelle 7: Wasseraufnahmen von natürlicher und RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch /Bri13/

Parameter	Einheit	Wasseraufnahme	
		natürl. GK	RC-GK aus Betonbruch
1	2	3	4
Probenanzahl	-	8	20
Korngröße	mm	4 - 31,5	
Mittelwert	kg/dm ³	1,13	7,06
Minimum		0,57	1,65
Maximum		2,29	16,90
Standardabweichung		0,52	3,43

Bei der Bewertung der Wasseraufnahme sind in der Literatur unterschiedliche Meinungen zu finden. Z. B. spielt nach Vieira et al. der Zeitrahmen der Wasseraufnahme bei RC-Gesteinskörnungen keine Rolle, da diese i. A. nach wenigen Minuten fast vollständig abgeschlossen ist /Vie11/. Untersuchungen von /Mül98/ zur Wasseraufnahme von an RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch und Ziegelsplitt sowie Gemischen dieser Materialien, zeigten ebenfalls, dass alle Materialien innerhalb der ersten 10 Minuten den größten Teils des Wassers aufnehmen. Die spätere Wasseraufnahme spielt für den effektiven Wasser-Zement-Wert des RC-Betons allerdings dennoch eine Rolle. Reiner Ziegelsplitt zeigt innerhalb der ersten 24 Stunden ein deutlich stärkeres Nachsaugverhalten gegenüber RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch auf. Bezogen auf die in 24 Stunden aufnehmbare Wassermenge nimmt die RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch nach 10 Minuten 89 % und der Ziegelsplitt 76 % des Wassers auf. Bei einer Betonmischung mit einem Anteil von 70 Vol.-% und einem Wasser-Zement-Wert von 0,5 entspricht dies im Falle der RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch ca. 7 l/m³ und beim Ziegelsplitt ca. 32 l/m³ /Mül98/. Dieses Verhalten führt bei der Betonherstellung dazu, dass Betone mit RC-Gesteinskörnung ein tendenziell stärkeres Ansteifverhalten aufweisen als Beton mit natürlicher Gesteinskörnung.

3.3.4 Kornform und -oberfläche

Bei der Betonherstellung ist eine gedrungene Kornform, d. h. möglichst kugelig oder würfelig, der eingesetzten Gesteinskörnung von Vorteil, da sich der Beton besser

verarbeiten lässt als bei überwiegend plattigen oder länglichen Gesteinskörnern. Bei einem Verhältnis von Gesteinskornlänge zu -dicke größer als 3:1 wird die Kornform nach DIN EN 933-4:2008-06 als ungünstig bezeichnet. Der Massenanteil an ungünstig geformten Körnern (Kornformkennzahl SI, englisch: Shape Index) sollte im Beton möglichst niedrig sein um eine gute Verarbeitbarkeit zu gewährleisten. Alternativ kann die Kornform nach DIN EN 933-3:2012-04 beurteilt werden. Hierbei wird die Gesteinskörnung zunächst in Analysesiebe in die verschiedenen Kornklassen aufgeteilt. Durch Absieben der Kornklassen mithilfe von Stabsieben wird der Gewichtsanteil ungünstig geformter Körner (Plattigkeitskennzahl FI, englisch: Flakiness Index) bestimmt. Infolge der meist mechanischen Aufbereitung der RC-Gesteinskörnung mittels Brechern ist der Anteil an ungünstig geformten Körnern meist hoch. Nach der DAfStb-Richtlinie für RC-Beton /DAf10a/ ist bei RC-Gesteinskörnung für die Betonherstellung eine Kornformkennzahl $SI \leq 55$ und eine Plattigkeitskennzahl $FI \leq 50$ M.-% einzuhalten (Kategorie SI_{55} bzw. FI_{50} , siehe Tabelle A1, Seite A1).

Die Kornoberfläche von RC-Gesteinskörnung ist im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung weniger glatt. Dadurch ist der Zementbedarf bei der Betonherstellung im Vergleich zu einem Beton mit natürlicher Gesteinskörnung erhöht. Der Zementleim wird von den Kapillarporen sowie Rissen in der RC-Gesteinskörnung aufgesaugt. Allerdings ist aufgrund der besseren mechanischen Verkantung der rauen RC-Gesteinskörnung die Betonzugfestigkeit höher als bei Beton aus natürlichen Gesteinskörnern.

3.3.5 Mechanische Eigenschaften

Bei Gesteinskörnung für die Betonherstellung wird nach DIN EN 1097-2:2010-07 der Widerstand gegen Zertrümmerung bestimmt. Die Bestimmung des Widerstandes gegen Zertrümmerung erfolgt nach DIN EN 12620:2008-07 über das Los-Angeles-Verfahren als Referenzprüfverfahren oder alternativ über das Schlagzertrümmerungsverfahren. Der Widerstand gegen Verschleiß wird an Gesteinskörnungen gemäß DIN EN 1097-1:2011-04 bzw. DIN EN 1097-9:2014-03, der Polier und- und Abriebwiderstand gemäß DIN EN 1097-8:2009-10 bestimmt. Hohe Widerstände sind insbesondere bei Betonbauteilen wichtig, die einer Schlag- und Verschleißbeanspruchung ausgesetzt sind wie z. B. Betonfahrbahndecken. In Deutschland werden allerdings mit Ausnahme von Straßen- und Sonderbetonen i. d R. keine Anforderungen an die Widerstände von Gesteinskörnungen gegen Zertrümmerung, Verschleiß, Polieren und Abrieb für die Betonherstellung gestellt. Diese Regelung gilt gemäß

DAfStb-Richtlinie für RC-Beton /DAf10a/ auch für RC-Gesteinskörnungen (siehe Tabelle A1, S. A1).

Generell weist RC-Gesteinskörnung einen geringeren Widerstand gegenüber mechanischer Beanspruchung auf. Bei Betonbruch ist dies darauf zurückzuführen, dass der anhaftende weichere Zementstein in den Zertrümmerungs- oder Verschleißversuchen leichter abgetragen wird. Bei Abbruch aus Mauerwerk hat das Ausgangsmaterial eine relativ geringe Festigkeit und kann leicht zertrümmert werden. Der Los-Angeles-Koeffizient beschreibt den Masseanteil, der nach der Zertrümmerungsprüfung gemäß DIN EN 1097-2:2010-07 durch ein feines Analysesieb mit einer Maschenweite von 1,6 mm hindurchgeht. Bei der Prüfung an RC-Gesteinskörnung wird bei der Zertrümmerungsprüfung neben dem zertrümmerten Material der natürlichen Gesteinskörnung im RC-Material der gesamte anhaftende Zementstein abgetragen und pulverisiert /San09/. Daher werden bei RC-Gesteinskörnungen im Vergleich zu natürlichen Gesteinskörnungen in den Zertrümmerungsversuchen immer ungünstigere Werte erzielt. Nach einer Literaturlauswertung von /Bri13/ liegt der mittlere Los-Angeles-Koeffizient von natürlicher Gesteinskörnung bei 29,1 M.-% und die von RC-Gesteinskörnung unterschiedlicher Herkunft bei 35,5 M.-%, wobei im RC-Material höhere Streuungen gemessen wurden.

Tabelle 8: Los-Angeles-Koeffizient von natürlicher und RC-Gesteinskörnung /Bri13/

Parameter	Einheit	Los-Angeles-Koeffizient	
		natürl. GK	RC-GK
1	2	3	4
Probenanzahl	-	8	13
Korngröße	mm	4 - 40	
Mittelwert	M.-%	26,3	35,5
Minimum		21,6	20,0
Maximum		32,0	65,5
Standardabweichung		2,11	10,68

Sánchez de Juan und Gutiérrez bestimmten den Los-Angeles-Koeffizienten an unterschiedlichen RC-Gesteinskörnungen aus Betonbruch und verglich diesen mit dem Zementsteinanteil /San09/. Die Ergebnisse zeigten eine leichte Tendenz hinsichtlich

steigendem Los-Angeles-Koeffizienten mit zunehmenden Anteil an anhaftenden Zementstein (siehe Bild 25).

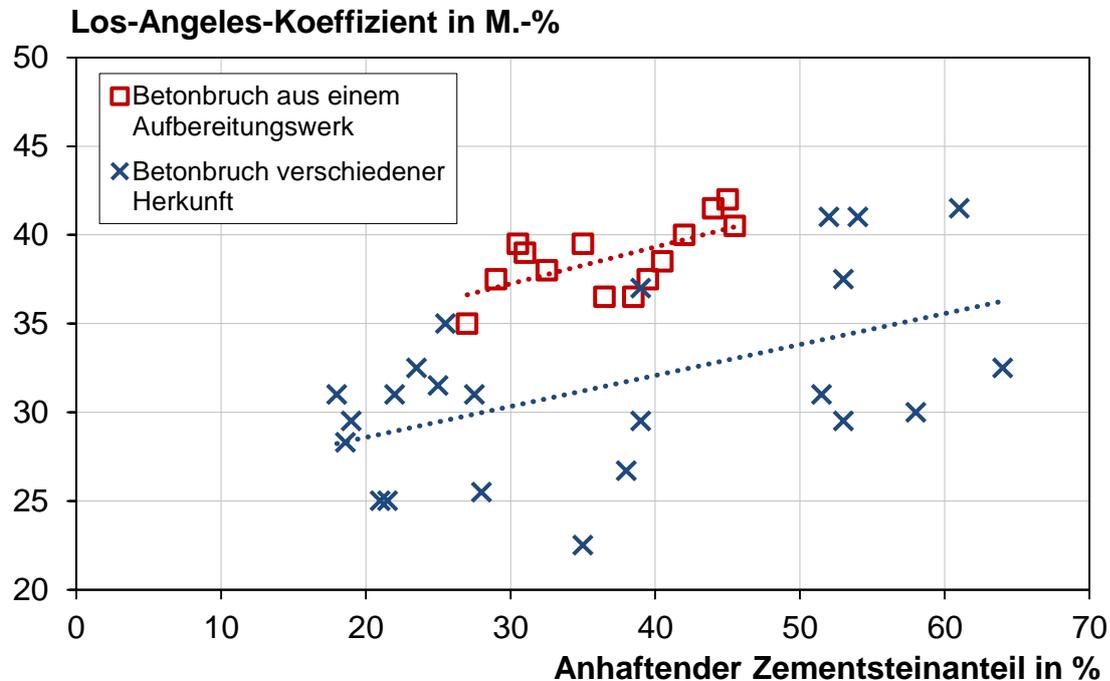


Bild 25: Vergleich des Los-Angeles-Koeffizienten DIN EN 1097-2: 2010-07 von RC-Gesteinskörnung und dem anhaftenden Zementsteinanteil /San09/

Der Zertrümmerungswiderstand von RC-Gesteinskörnung steht im Zusammenhang mit der Betondruckfestigkeit. Nach /San09, Top97/ wird mit steigendem Los-Angeles-Koeffizienten tendenziell eine geringere Betondruckfestigkeit gemessen, wobei die Einzelwerte stark streuen.

Zu den anderen Kennwerten zum Verschleiß, Polieren und Abrieb wurden keine Untersuchungen gefunden. Hier sind aber ähnliche Tendenzen wie beim Zertrümmerungswiderstand zu erwarten.

4 EIGENSCHAFTEN VON BETON MIT REZYKLIERTER GESTEINSKÖRNING

4.1 Allgemeines

Beton muss seinem Einsatzort entsprechend gut verarbeitbar sein, die Festigkeitsanforderungen erfüllen und gutmütige Verformungseigenschaften aufweisen. Zugleich ist die Gewährleistung einer ausreichenden Beständigkeit gegenüber Umwelteinflüssen von wesentlicher Bedeutung für die Dauerhaftigkeit des Betons. Die Qualität der Gesteinskörnung, welche in Beton einen Anteil von etwa 60 bis 70 M.-% einnimmt, ist dabei von wesentlicher Bedeutung. Mit steigendem Gehalt an RC-Gesteinskörnung können sich die Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie die Dauerhaftigkeit verändern.

Der Einfluss von RC-Gesteinskörnungen auf die Eigenschaften des Betons wird unterschiedlich beurteilt. Dies ist in den Forschungsarbeiten vor allem auf vollkommen unterschiedliche Konzeptionen bei der Mischungserstellung zurückzuführen: bei manchen Arbeiten wird z. B. die Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung berücksichtigt, bei anderen nicht. Zum Teil werden nur bestimmte Fraktionen der natürlichen Gesteinskörnung ausgetauscht oder auch die gesamte Gesteinskörnung ersetzt. Ein anderer Ansatz ist es RC-Beton mit Betonen gleicher Druckfestigkeit zu vergleichen, die sich natürlich in ihrem Wasser-Zement-Wert und/oder dem Bindemittelgehalt unterscheiden. Eine Vergleichbarkeit der Kennwerte von RC-Beton und Standard-Beton ist dabei nicht immer gegeben, da sich der effektive Wasser-Zement-Wert und/oder das Korngerüst im Beton unterscheiden.

4.2 Herstellung

Nach /Oli96/ korrespondiert die Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung im Laborversuch, z. B. nach der DAfStb-Richtlinie für RC-Beton /DAf10a/, möglicherweise nicht mit der Wasseraufnahme während der Betonherstellung. Die Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung wird durch den Zementleim, der die Poren der RC-Gesteinskörner ausfüllt, verringert. Das überschüssige Wasser erhöht so den effektiven Wasser-Zement-Wert des Betons. Um die Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung während der Betonherstellung zu berücksichtigen, werden von verschiedenen Autoren unterschiedliche Vorschläge unterbreitet.

Nach /Poo04/, der den Einfluss des Wassergehaltes von grober RC-Gesteinskörnung auf die Betonqualität untersuchte, sollte RC-Gesteinskörnung generell nicht zu stark vorgehässelt werden, da Wasserablagerungen um die RC-Gesteinskörnung (Bluten) die Kontaktzone schwächen und so die Betondruckfestigkeit herabsetzen (vgl. auch Bild 19, Seite 38). Ein teilweises Vornässen wird allerdings von der Mehrheit der Autoren befürwortet. In /Fer11/ wird beispielsweise vorgeschlagen, die RC-Gesteinskörnung mit dem Anmachwasser zuzüglich der Wassermenge, die die RC-Gesteinskörnung während des Mischens voraussichtlich aufnehmen wird, für 5 Minuten vorzunässen. Bild 26 zeigt schematisch das Vorgehen während des Mischvorgangs.

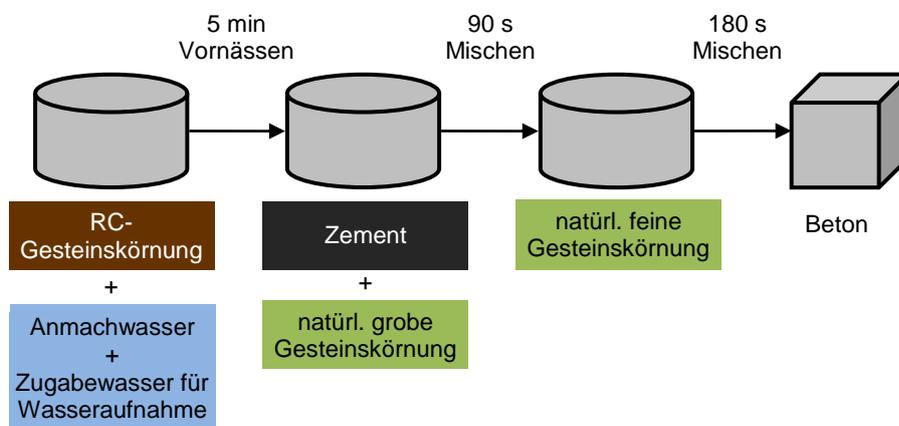


Bild 26: Exemplarische Mischprozedur von Beton mit RC-Gesteinskörnung nach /Fer11/

Nach Empfehlungen des Arbeitskreises „Prüfverfahren“ des Verbundforschungsvorhabens "Baustoffkreislauf im Massivbau" /BIM01, Rei03/ sollte bei der Mischungsherstellung die Wasserzugabe in zwei Schritten erfolgen (siehe Bild 27).

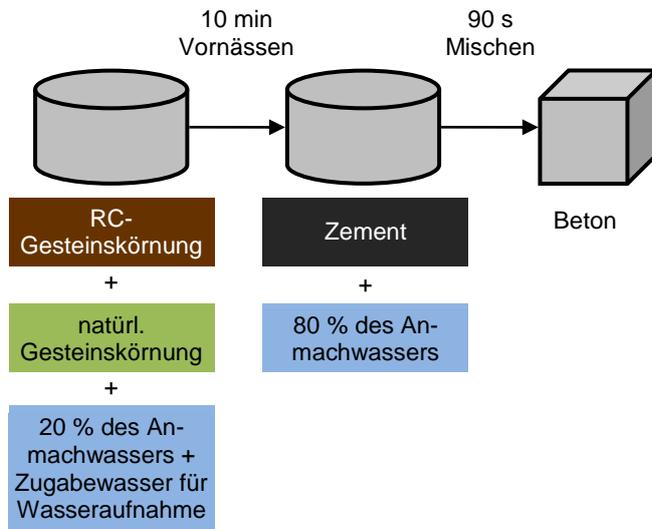


Bild 27: Mischprozedur von Beton mit RC-Gesteinskörnung nach /Rei03/

In einer von /Tam07b/ vorgeschlagenen Mischprozedur, wird jeweils die Hälfte des benötigten Wassers in zwei Schritten mit den Ausgangsstoffen vermischt (siehe Bild 28). Auf der Oberfläche der RC-Gesteinskörner bildet sich so nach der ersten Wasserzugabe eine Zementleimschicht, die Poren und mögliche Risse in den Körnern füllt. Die weitere Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörner wird im zweiten Mischvorgang reduziert. Diese Mischprozedur wird von vielen Autoren, die Beton mit RC-Gesteinskörnung herstellen, angewendet und positiv bewertet.

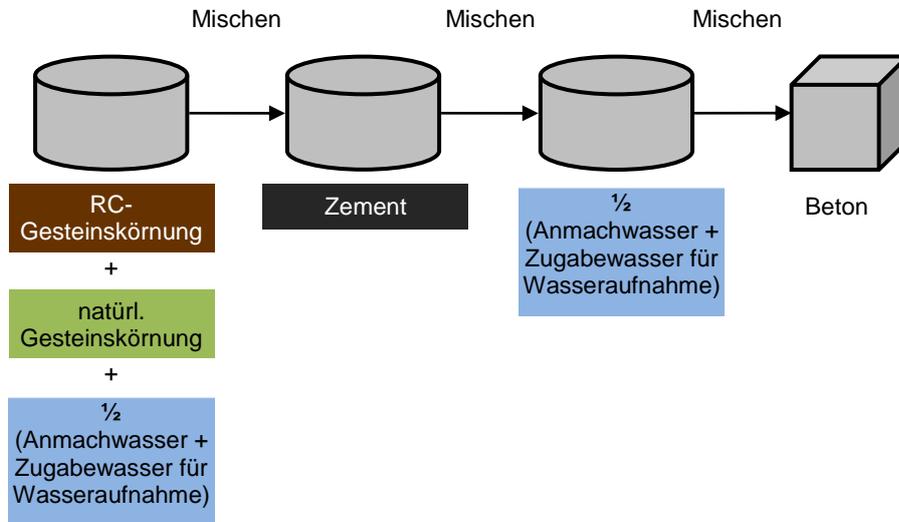


Bild 28: Mischprozedur von Beton mit RC-Gesteinskörnung nach /Tam07b/

4.3 Frischbetoneigenschaften

4.3.1 Allgemeines

Durch die höhere Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung steht für die Hydratation des Zementes im Beton nicht die gesamte Wassermenge zur Verfügung. Dieser Wasseranteil muss beim Herstellen des Betons zudosiert werden und bei der Bestimmung des wirksamen Wasser-Zement-Wertes berücksichtigt werden. Der tatsächlich im Beton wirksame Wassergehalt ist dabei der Gesamtwassergehalt (Anmachwasser und Eigenfeuchte der Gesteinskörnung) abzüglich der Wassermenge, welche die RC-Gesteinskörnung nach der DAfStb-Richtlinie für RC-Beton /DAf10a/, Anhang B, innerhalb von 10 Minuten aufnimmt. Die höhere Wasseraufnahme ist darüber hinaus auch bei dem Einsatz und der Dosierung von Betonzusatzmitteln, die Fließmittel oder Luftporenbildner, zu berücksichtigen. Diese Mittel werden durch die Kapillarporen der RC-Gesteinskörnung z. T. aufgesaugt und können so nicht mehr ihre volle Wirksamkeit erreichen.

4.3.2 Verarbeitbarkeit

Bei RC-Beton ist mit einem erhöhten Verdichtungsaufwand gegenüber rundkörnigen Gesteinskörnungen zu rechnen. Nach Beobachtungen von Poon et al. nimmt der Zu-

sammenhalt ("Klebigkeit") des Betons ab einem Anteil von mehr als 50 M.-% RC-Gesteinskörnung bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung ab. Der Beton entmischt sich beim Einbringen in die Schalung /Poo04/.

Nach /Dil99, Ker01a/ weist ein RC-Beton aufgrund der Rauigkeit und des Wasser-saugens eine schlechtere Verarbeitbarkeit auf als Beton mit natürlichen Gesteinskörnungen. Dies ist insbesondere der Fall, wenn Brechsand verwendet wird. Nach /Top97/ zeigten insbesondere Betone mit mehr als 50 % RC-Gesteinskörnung eine deutliche Verschlechterung der Verarbeitbarkeit. Die Konsistenz kann allerdings über höhere Fließmittelmengen Zementgehalte oder über den Einsatz von z. B. Flugasche eingestellt werden /Dil99, Grü01, Ker01a/.

Den Einfluss unterschiedlicher Gehalte an RC-Gesteinskörnung auf das Setzmaß nach ASTM C143 / C143M-12 /AST05/ wurde von Poon et al. bestimmt /Poo07/. Als Referenz diente ein Beton mit gebrochener natürlicher Gesteinskörnung aus Granit. Das Setzmaß erhöht sich mit steigendem Anteil an RC-Gesteinskörnung. Die Ergebnisse sind vermutlich auf die günstigere Kornform der RC-Gesteinskörnung im Vergleich zur gebrochenen natürlichen Gesteinskörnung zurückzuführen. Bei Einsatz von trockener RC-Gesteinskörnung wurde das Setzmaß im Vergleich zu einem Beton mit gebrochener Gesteinskörnung aus Granit über die Zeit stärker vermindert /Poo04/. Dies ist auf die hohe Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung zurückzuführen. Wenn die RC-Gesteinskörnung vorgemischt wurde, war dieser Effekt vermindert.

Laut einer Umfrage bei Schweizer Betonhersteller wird bei ca. 60 % der Befragten die RC-Gesteinskörnung nicht vorgemischt, sondern die Verarbeitbarkeit über die Betonzusammensetzung oder Betonzusatzmittel gesteuert /Hof07/. Wiederum 60 % erhöhen bei RC-Betonen im Vergleich zu den konventionellen Rezepturen den Zement- und Wassergehalt. 50% verwenden Fließmittel zur Konsistenzsteigerung und 30 % dosieren Wasser zu.

In /Bri13/ werden die Maßnahmen zur Verbesserung der Verarbeitbarkeit verschiedener Autoren zusammengefasst:

- (1) Erhöhen des Wassergehaltes in der Betonrezeptur bei Einsatz von trockener RC-Gesteinskörnung
- (2) Vornässen der RC-Gesteinskörnung für 10 bis 20 Min. oder 24 Std. vor dem Mischen

- (3) Einstellen eines Wassergehaltes der RC-Gesteinskörnung von 70 bis 80 % des Sättigungsgrades 24 Stunden vor dem Mischen; Schutz der Gesteinskörnung vor Austrocknen bis zum Mischen
- (4) Erhöhen des Gehalts an Fließmitteln bzw. Betonverflüssigern in der Betonrezeptur
- (5) Erhöhen des Zementgehaltes in der Betonrezeptur

4.3.3 Dichte

Die Dichte von RC-Beton ist i. d. R. geringer als die von Beton mit natürlicher Gesteinskörnung, da die Kornrohddichte von RC-Gesteinskörnung üblicherweise niedriger ist als die von natürlicher Gesteinskörnung (siehe Kapitel 3.3.2). Nach /Lop09/ beträgt die Verringerung der Rohddichte eines RC-Betons rund 5 %, wenn die gesamte Gesteinskörnung ersetzt wird. Eine einfache Abschätzung der Rohddichte über die Stoffraumrechnung typischer Betonrezepturen ($w/z = 0,50$ bis $0,60$) zeigt, dass bei einer Kornrohddichte der natürlichen Gesteinskörnung von $2,65 \text{ kg/m}^3$ und $2,36 \text{ kg/m}^3$ der RC-Gesteinskörnung die Frischbetonrohddichte um ca. 10 % verringert wird.

4.3.4 Luftgehalt

Der Luftgehalt von RC-Betonen ist gegenüber Beton mit natürlicher Gesteinskörnung i. d. R. erhöht, wenn die RC-Gesteinskörnung eingesetzt wird /San04/. Dies ist auf Lufteinschlüsse zurückzuführen, die beim Verdichten nicht entfernt werden können. Dieser Effekt ist insbesondere deutlich, wenn die Gesteinskörnung ohne Vornässen eingesetzt wird /San04/.

4.3.5 Blutneigung

Das Bluten von Frischbeton bezeichnet das Absondern von Wasser auf der Oberfläche oder auch im Inneren eines verdichteten Betons. Verantwortlich sind Sedimentation von Gesteinskörnung und/oder Zement im Anmachwasser des Frischbetons. Zur Blutneigung von RC-Beton gibt es wenige Literaturquellen, die unterschiedliche Aussagen treffen.

Die der RC-Gesteinskörnung anhaftende Zementsteinmatrix ist in der Lage das Anmachwasser im Frischbeton teilweise aufzunehmen. Bei Einsatz von feiner RC-Gesteinskörnung wird die Blutneigung von RC-Beton nach Untersuchungen von /Yan08/ vermindert. Das Bluten von RC-Beton mit feiner RC-Gesteinskörnung ist dabei geringer als das von RC-Beton mit grober RC-Gesteinskörnung.

Die Blutneigung von RC-Beton, der mit lufttrockener grober RC-Gesteinskörnung hergestellt wurde, wurde von /Poo07/ nach der amerikanischen Norm ASTM C232 /AST92/ untersucht. Untersucht wurde RC-Gesteinskörnung mit einer Wasseraufnahme von ca. 3,9 M.-% im Vergleich zu gebrochenen Granit mit 1,1 M.-%. Der Zement- und Wassergehalt wurde bei allen Mischungen bei variierender Austauschrate (0, 20, 50, 80 und 100 Vol.-%) gleich gehalten. Bild 29 zeigt die Ergebnisse bei unterschiedlichen Startzeitpunkten der Wasserentnahme. Die Wassermenge, die sich während der ersten 60 Minuten auf der Oberfläche des Frischbetons bildet (Blutrate in ml/cm²·s), nimmt dabei mit zunehmender Austauschrate der natürlichen Gesteinskörnung durch RC-Gesteinskörnung zu. Ebenfalls nimmt die Wassermenge, die während der gesamten Versuchsdauer gewonnen werden konnte (Blutkapazität in ml/ml bezogen auf das Anmachwasser), mit steigendem Anteil an RC-Gesteinskörnung zu. Bei einer Austauschrate von 100 % betrug die Zunahme der Blutrate 26 %, die der Blutkapazität 22 %. Die Ergebnisse sind allerdings kritisch zu hinterfragen, da aufgrund der relativ hohen Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung eigentlich mit einem verringerten Bluten zu rechnen wäre.

Blutkapazität in 10^{-3} ml/ml

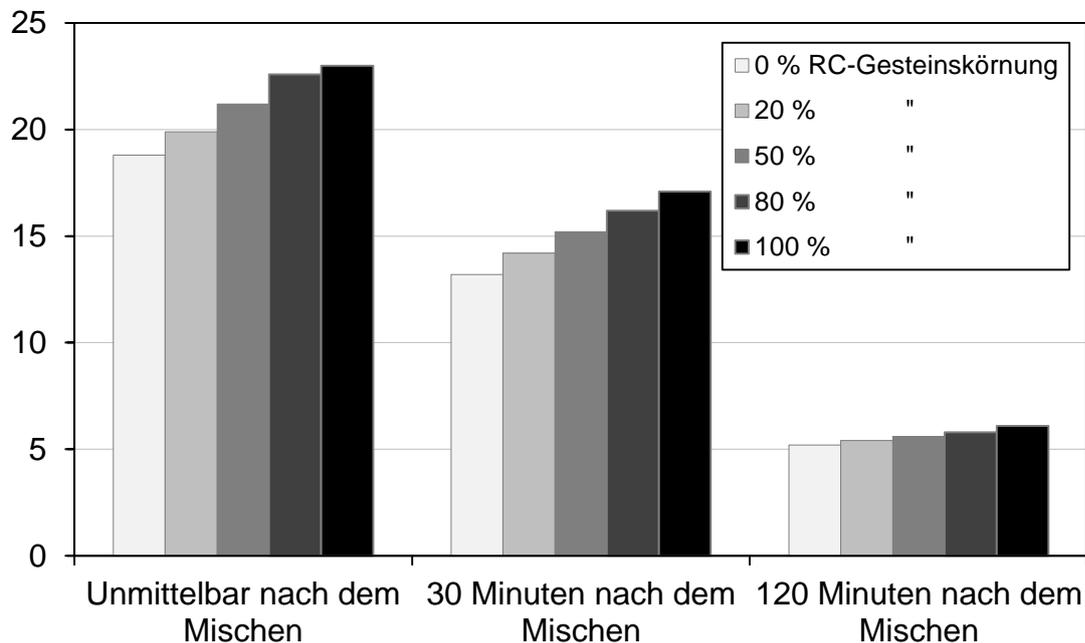


Bild 29: Blutkapazität (Blutwassermenge bezogen auf das Anmachwasser) von RC-Beton mit trockener RC-Gesteinskörnung in Abhängigkeit von Anteil an RC-Gesteinskörnung und Startzeitpunkt der Wasserentnahme /Poo07/

Das innere Bluten kann nicht quantitativ erfasst werden. Nach /Poo04/ ist ein zu starkes Vornässen der RC-Gesteinskörnung ungünstig, da sich Wasserablagerungen um die RC-Gesteinskörnung bilden.

4.4 Mechanische Eigenschaften des Festbetons

4.4.1 Allgemeines

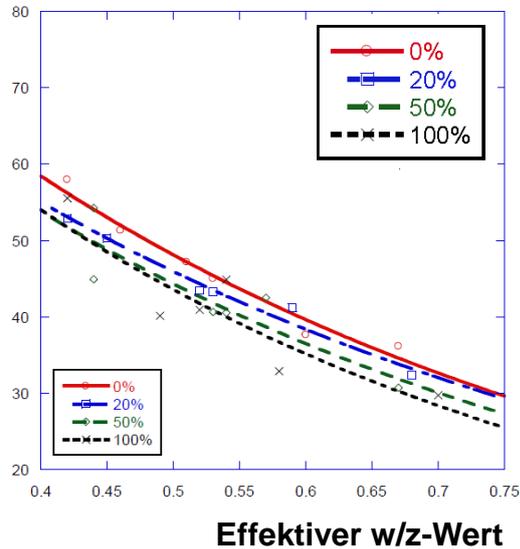
Prinzipiell verhält sich ein RC-Beton, wie ein Beton, bei dem eine leichte Gesteinskörnung verwendet wurde. Die RC-Gesteinskörnung Korn weist eine geringere Festigkeit auf und entzieht dem Frischbeton Wasser. Beim Einsatz von vorgehängter RC-Gesteinskörnung ist es nach /Hof07/ denkbar, dass durch die innere Nachbehandlung die Betonqualität verbessert wird. Der Großteil der Forschungsarbeiten zeigt allerdings, dass bei Einsatz von RC-Gesteinskörnung eher mit Qualitätseinbußen bei den Festbetonkennwerten zu rechnen ist.

4.4.2 Druckfestigkeit

Die Betondruckfestigkeit hängt in erster Linie von dem Wasser-Zement-Wert des Betons ab. Da die Wasseraufnahme bei RC-Gesteinskörnung nicht zu vernachlässigen ist, muss der effektive Wasser-Zement-Wert bestimmt werden. Auch unter Berücksichtigung des effektiven Wasser-Zement-Wertes weist ein RC-Beton i. d. R. niedrigere Festigkeiten auf als ein gleichwertiger Beton. Der Abfall wird auf die verringerte Festigkeit der RC-Gesteinskörnung zurückgeführt. Auch der Zertrümmerungswiderstand von RC-Gesteinskörnung steht im Zusammenhang mit der Betondruckfestigkeit. Nach /San09, Top97/ wird mit steigendem Los-Angeles-Koeffizienten tendenziell eine geringere Betondruckfestigkeit gemessen, wobei die Einzelwerte stark streuen.

Nach Thomas et al. sinkt mit steigender Austauschrate der groben natürlichen Gesteinskörnung durch grobe RC-Gesteinskörnung die Druckfestigkeit des RC-Betons /Tho13/. In Bild 30 sind die Druckfestigkeitsverläufe nach 28 und 180 Tagen der RC-Betone bei einer Austauschrate von 0, 20, 50 und 100 Vol.-% dargestellt. Die Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung wurde bei der Betonzusammensetzung über den effektiven Wasser-Zement-Wert berücksichtigt. Die bekannte Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit mit dem Wasser-Zement-Wert ändert sich nicht durch den Einsatz von RC-Gesteinskörnung. Zahlreiche andere Forschungsarbeiten zeigen den gleichen ähnlichen Trend. Nach Untersuchungen von Topcu beträgt der Druckfestigkeitsverlust eines RC-Betons mit 100 Vol.-% RC-Gesteinskörnung im Vergleich zu einem beton mit natürlicher Gesteinskörnung 33 % bei niedrig festen Betonen (16 N/mm² nach 28 Tagen) und 24 % bei etwas höherfesten Betonen (20 N/mm² nach 28 Tagen) /Top04/. nach Untersuchungen von Wesche et al. wird die Betondruckfestigkeit durch den Einsatz von RC-Gesteinskörnung > 4 mm um ca. 25 % bei niedrigen und ca. 10 % bei höheren Festigkeiten reduziert /Wes81/. Dies ist auf das höhere Gesamtzementsteinvolumen von RC-Betonen zurückzuführen.

Druckfestigkeit nach 28 Tagen in N/mm²



Druckfestigkeit nach 180 Tagen in N/mm²

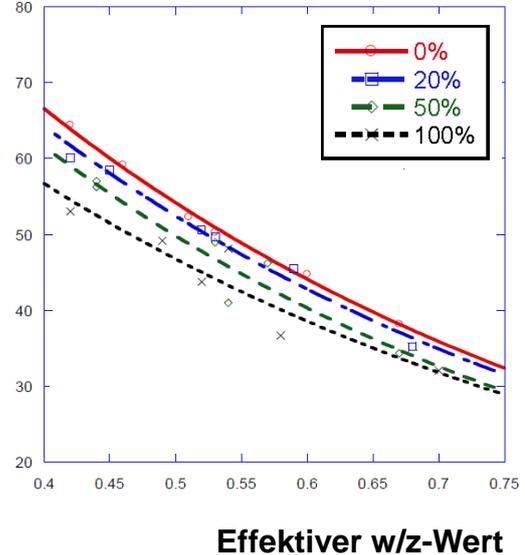


Bild 30: Druckfestigkeiten von RC-Betonen in Abhängigkeit vom Wasser-Zement-Wert nach 28 (links) und 180 Tagen (rechts) /Tho13/

Untersuchungen von Evangelista et al. über den Einfluss von Brechsand auf die Betondruckfestigkeit zeigten, dass bis zu einer Austauschrate von ca. 30 Vol.-% kein signifikanter Einfluss auf die Druckfestigkeit festgestellt werden konnte /Eva07/. Bei der Betonzusammensetzung wurde ebenfalls die Wasseraufnahme beim Wasser-Zement-Wert berücksichtigt. Bei höheren Austauschraten war die Druckfestigkeit des RC-Betons im Vergleich zur Referenz deutlich gemindert (10,2 %) /Eva07/. Kerkhoff hingegen konnte keine signifikante Beeinflussung der Druckfestigkeit durch unterschiedlich hohe Anteile an Betonbrechsand feststellen /Ker01b/.

Nach einer Literaturlauswertung von Hoffmann et al. kann die Verminderung der Betondruckfestigkeit z. B. durch eine Erhöhung des Zementgehaltes bei gleichem Wassergehalt ausgleichend werden. Hier ist ein Mehreinsatz von 7 bis 20 M.-% erforderlich /Hof07/.

In erster Linie sind die Druckfestigkeitsminderungen auf die geringere Festigkeit der RC-Gesteinskörnung zurückzuführen, aber auch die Kornform kann eine Rolle spielen. Die Kantigkeit der RC-Gesteinskörner führt zu einem besseren Verbund im Betongefüge und kann in Ausnahmefällen die Betondruckfestigkeit erhöhen. Allerdings ist aufgrund der Kantigkeit der RC-Gesteinskörner die Verarbeitbarkeit herabgesetzt, so

dass Druckfestigkeitsminderungen auch auf mangelhafte Verdichtung zurückzuführen sein können /Hof07/.

4.4.3 Biegezugfestigkeit und Spaltzugfestigkeit

Bei den in /Mei00/ durchgeführten Untersuchungen wurde beobachtet, dass die Spaltzugfestigkeit von RC-Betonen etwa 12 % unter der Referenz lag. Zudem wiesen die Messergebnisse höhere Streuungen auf. Auch Müller konnte die gleiche Tendenz beobachten. Die Spaltzugfestigkeiten der untersuchten RC-Betone waren durchweg geringer als die der ansonsten identisch zusammengesetzten Betone mit Rheinkesssand /Mül01/. Der stärkste Abfall wurde bei einer Austauschrate von 100 Vol.-% der groben Gesteinskörnung in einer Höhe von 20 % gemessen. Von Kerkhoff wurde keine Reduzierung der Spaltzugfestigkeit durch den Einsatz von Brechsand beobachtet /Ker01b/.

In /Eva07/ wurde bis zu einer Austauschrate der Sandfraktion von 30 Vol.-% eine geringe Minderung (5,2 %) der Biegezugfestigkeit nach 28 Tagen im Vergleich zu einem Referenzbeton ohne Brechsand beobachtet. Bei 100 Vol.-% Brechsand im RC-Beton war die Biegezugfestigkeit um 30,5 % reduziert.

4.4.4 Elastizitätsmodul

Das Verformungsverhalten von RC-Betonen ist aufgrund des höheren Gesamtzementsteinanteils verändert. Betone gleicher Druckfestigkeit weisen bei steigendem Zementsteinvolumen einen geringeren E-Modul auf /Man71, Mei00/. Der E-Modul von RC-Betonen ist damit niedriger als der von Beton mit natürlicher Gesteinskörnung und vergleichbarer Druckfestigkeit. Nach /Hof07/ unterliegt der E-Modul von RC-Beton größeren Streuungen als die Druckfestigkeit.

In /Mei00/ wurde das Biegetragverhalten von Stahlbetonbalken aus RC-Beton untersucht. Obgleich die RC-Betone eine um ca. 10 % höhere Druckfestigkeit aufwiesen, war der E-Modul im Mittel um 6 % reduziert. Nach Untersuchungen von Wesche et al. liegt die Reduzierung des E-Moduls von RC-Betonen in einer Größenordnung von ca. 30 % bei niedrigen und 18 % bei höherfesten Betonen /Wes81/. In den Untersuchungen von Müller wurde der E-Modul der RC-Betone im Vergleich zu Beton mit

natürlicher Gesteinskörnung unabhängig vom Wasserzementwert um bis zu 50 % reduziert /Mül01/.

4.4.5 Schwinden und Kriechen

Unter Schwinden versteht man die Volumenverringerung von Zementstein. Volumenveränderungen unter Lasteinwirkung werden als Kriechen bezeichnet. Das Kriechen und Schwinden von RC-Betonen ist wie auch beim E-Modul aufgrund des i. d. R. höheren Gesamtzementsteinanteils verändert. Nach /Böd11/ steigen mit zunehmendem Recyclinganteil die Schwindmaße von RC-Betonen, wodurch die Reißneigung des Betons erhöht wird. Bei den Untersuchungen von Wesche et al. wurde das Schwindmaß von RC-Betonen im Vergleich zu Betonem mit natürlicher Gesteinskörnung bei einer Versuchsdauer von 1000 Tagen um 20 % bis 40 % erhöht. Das Kriechmaß war um 50 % erhöht /Wes81/.

4.5 Dauerhaftigkeitseigenschaften

4.5.1 Allgemeines

Die Dauerhaftigkeitseigenschaften von Beton mit RC-Gesteinskörnung sind i. d. R. ungünstiger als die von Beton mit natürlicher Gesteinskörnung /Tho13/. Laut anderen Quellen wurden die Dauerhaftigkeitseigenschaften von Beton durch den Einsatz von RC-Gesteinskörnung nur unwesentlich beeinflusst /Ker01a/.]

4.5.2 Karbonatisierungsgeschwindigkeit

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit von Betonem hängt stark von der Porosität der Bindemittelmatrix und der Umgebungsfeuchte, aber auch von dem Gehalt an Calciumhydroxid im Zementsteingefüge ab. Levy et al. bestimmte die Karbonatisierungstiefen an RC-Betonem mit unterschiedlichen Druckfestigkeiten unter dem beschleunigten Karbonatisierungstest nach RILEM CPC 18 /RIL88, Lev04/. Die Betone wurden so konzipiert, dass sie eine ähnliche Druckfestigkeit aufwiesen, um so den Einfluss der Porosität der RC-Gesteinskörnung auf die Karbonatisierung besser beurteilen zu können. Hierzu wurde der Zementgehalt bei den RC-Betonem erhöht. Bei den RC-Betonem wurde in diesen Untersuchungen eine Reduzierung der Karbonatisierungstiefe bei einer Austauschrate von 20 oder 50 Vol.-% beobachtet (siehe Bild 31). Dies ist auf den erhöhten Zementgehalt zurückzuführen, der den Alkalitäts-

puffer im RC-Beton erhöht. Bei höheren Gehalten überwiegen dann wieder die negativen Einflüsse der hohen Porosität der RC-Gesteinskörnung.

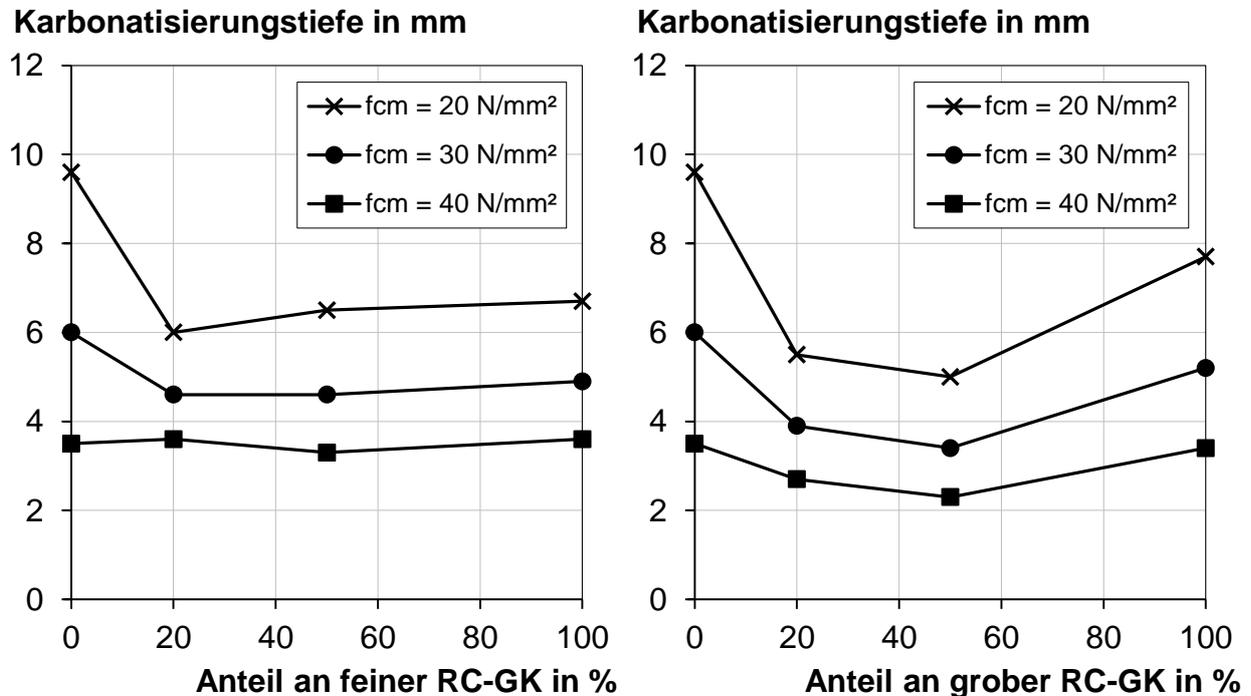


Bild 31: Verlauf der Karbonatisierungstiefen von RC-Beton mit feiner (links) und grober (rechts) RC-Gesteinskörnung in Abhängigkeit von Anteil an RC-Gesteinskörnung /Lev04/

4.5.3 Frost-Tau bzw. Frost-Tausalz-Widerstand

Der Frost-Tau- oder Frost-Tausalz-Widerstand von RC-Betonen ist im Vergleich zu Beton mit natürlichen Gesteinskörnungen häufig etwas niedriger. Das Verhalten von RC-Betonen unter Frostbeanspruchung ähnelt dem von Beton mit Leichtzuschlägen, die sich ebenfalls bei Frostprüfungen ungünstiger verhalten. Die porösen RC-Gesteinskörnungen können schnell Wasser aufnehmen.

Der Einfluss von RC-Gesteinskörnung auf Beton mit Luftporenbildner (LP-Bildner) wurde von /Gok04/ untersucht. Verwendet wurde zum einen RC-Gesteinskörnung aus Beton, der ursprünglich keinen Luftporenbildner enthielt und zum anderen zu RC-Gesteinskörnung aufbereiteten Beton mit Luftborenbildner (LP-Beton). Die hergestellten LP-Betone wurden gemäß dem Verfahren A der amerikanischen Norm ASTM C666 „Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing

and Thawing“ über 500 Frost-Tauwechseln in Leitungswasser ausgesetzt. LP-Beton mit RC-Gesteinskörnung aus „luftporenfreien“ Betonbruch, war unabhängig vom Anteil an RC- Gesteinskörnung nicht dauerhaft. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die der RC-Gesteinskörnung anhaftende Zementsteinmatrix im RC-Beton ein zusammenhängendes Gefüge bildet. Das eindringende Wasser kann über diese Vernetzung tief in den RC-Beton eindringen und bei Frosteinwirkung Schäden erzeugen. Der relativ dynamische E-Modul ist ein Maß für die den Verlauf der inneren Schädigung und wird über die Veränderung der Ultraschall-Laufzeit bestimmt. Die RC-Gesteinskörnung aus LP- Beton, hingegen zeigte im Vergleich zum Referenz-Beton ohne RC-Gesteinskörnung einen geringeren Abfall im relativ dynamischen E-Modul (siehe Bild 32).

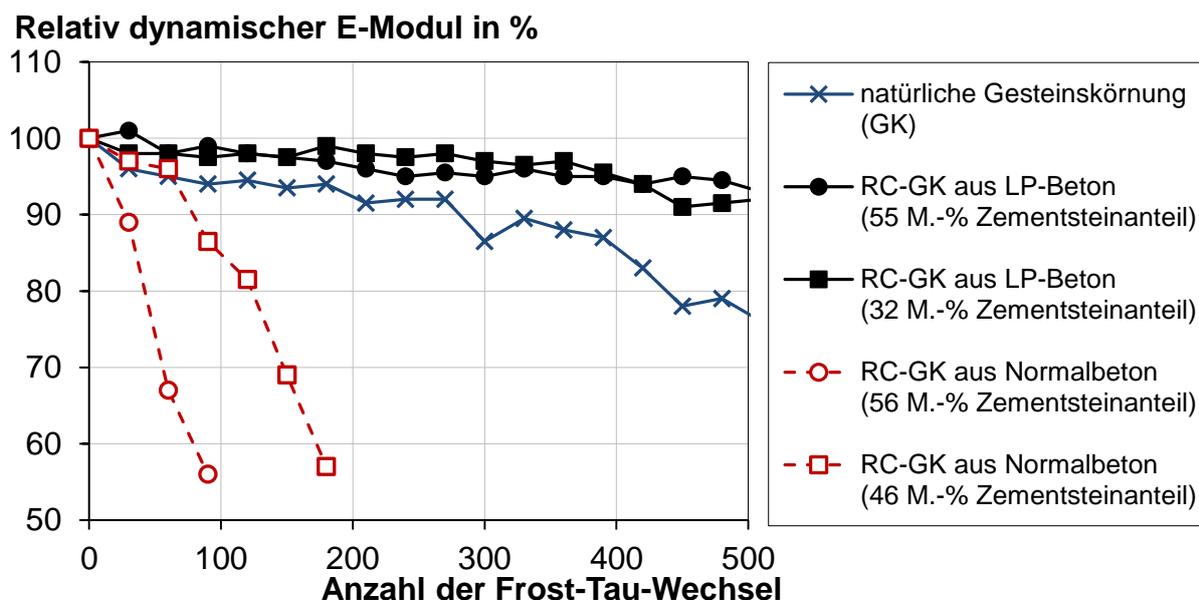


Bild 32: Abfall des relativ dynamischen E-Moduls im Frost-Tau-Test gemäß ASTM C666 Verfahren A an LP-Betonen mit RC-Gesteinskörnung aus Betonbruch mit und ohne LP-Bildner /Gok04/

4.5.4 Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Bei Betonbruch muss immer mit der Möglichkeit gerechnet werden, dass alkaliempfindliche Gesteinskörnungen eingesetzt wurden. Bei der Aufbereitung und einer ungünstig hohen Alkalizufuhr im RC-Beton kann eine schädigende Alkalireaktion auftreten.

4.6 Umweltverträglichkeit

Beton wird für Bauteile eingesetzt, die mit Wasser und/oder Boden in Kontakt stehen. Dabei dürfen keine schädlichen Mengen an Spurenelemente oder organischen Schadstoffen eluiert werden. Eine Umweltverträglichkeitsprüfung ist für Beton, der nach DIN EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2008-08 hergestellt worden ist, nicht erforderlich. Für RC-Beton, muss die die Umweltverträglichkeit dagegen gesondert nachgewiesen werden, wenn der Beton in einem Außenbauteil eingesetzt werden soll.

Bis 2013 galten für den Nachweis der Umweltverträglichkeit die Bewertungskriterien der mittlerweile zurückgezogenen DIN 4226-100:2002-02. Hier wurden prinzipiell die Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) angewendet /LAG03/. Die Inhaltsstoffe von RC-Gesteinskörnung sowie Eluat, das in einem Schütteltest (DIN 38414-4:1984-10, modifiziert) gewonnen wurde, mussten festgelegte Höchstwerte einhalten. In der aktuell gültigen Norm für RC-Gesteinskörnung DIN EN 12620:2008-07 werden keine Anforderungen an die Inhaltsstoffe und Eluate von RC-Gesteinskörnung gestellt. Die aktuelle Regelung sieht vor, dass der Nachweis der Umweltverträglichkeit im Rahmen einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) durch das Deutsche Institut für Bautechnik erfolgt (Bauregelliste B, Teil 1) /DAf10a, DAf10b, DIB14/.

Die Erteilung der abZ erfolgt auf Basis von Zulassungsgrundsätzen /DIB09, DIB11/. Bei dem Zulassungsverfahren muss nachgewiesen werden, dass die Schadstofffreisetzung von RC-Beton in Boden und Grundwasser innerhalb festgelegter Grenzwerte liegt. Desweiteren wird geprüft, ob beim Einsatz von RC-Gesteinskörnung in Bauprodukten, wie z. B. in der Betonherstellung, das Risiko einer Schadstoffanreicherung im Wertstoffkreislauf nach § 7 des Kreislaufwirtschaftsgesetz /KrW12/ besteht /Str14/.

Im Bewertungskonzept, dass das Deutsche Institut für Bautechnik vorsieht, werden alle Inhaltsstoffe der RC-Gesteinskörnung sowie die mobilisierbaren Inhaltsstoffe gemäß den LAGA Mitteilungen M 20 /LAG03/ bestimmt und bewertet. Die Beurteilung der Inhaltsstoffe der RC-Gesteinskörnung erfolgt gemäß der Eckpunkte (EP) der LAGA für eine Verordnung über die Verwertung von mineralischen Abfällen in technischen Bauwerken /LAG04/. Die mobilisierbaren Bestandteile werden zunächst im Schütteltest (in Anlehnung an den DEV-S4 Test) an der Gesteinskörnung ermittelt. Für die Schadstoffkonzentrationen im Eluat gelten die jeweiligen abfallspezifischen Zuordnungswerte Z2. Die Eluatwerte werden vom zuständigen Sachverständigen-

ausschuss des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) geprüft. Bei erhöhten Konzentrationen, ist ein RC-Beton herzustellen, der im Langzeitstandtest gemäß der Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton "Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen" /DAf05/ eluiert wird. Gemäß dem Kapitel „Betonausgangsstoffe und Beton“ aus /DIB11/ können die im Versuch ermittelten Freisetzungen mit zulässigen Freisetzungen verglichen werden. Die Einhaltung der zulässigen Freisetzungen stellt sicher, dass die Konzentrationen der mobilisierbaren Inhaltsstoffe am Ort der Beurteilung die Geringfügigkeitsschwellen der der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAWA) /LAW04/ einhalten.

Für die Freisetzung von organischen Schadstoffen sind keine Bewertungskriterien vorgegeben. Zur Untersuchung und Bewertung von organischen Stoffen wird daher der zuständige Sachverständigenausschuss des DIBt einbezogen. Die Umweltverträglichkeit dieser Stoffe ist ggf. über ökotoxikologische Tests gesondert nachzuweisen.

Bild 33 zeigt ein Ablaufschema zur Bewertung von Abfällen als Betonausgangsstoff in der allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung durch das DIBt dargestellt /Str14/.

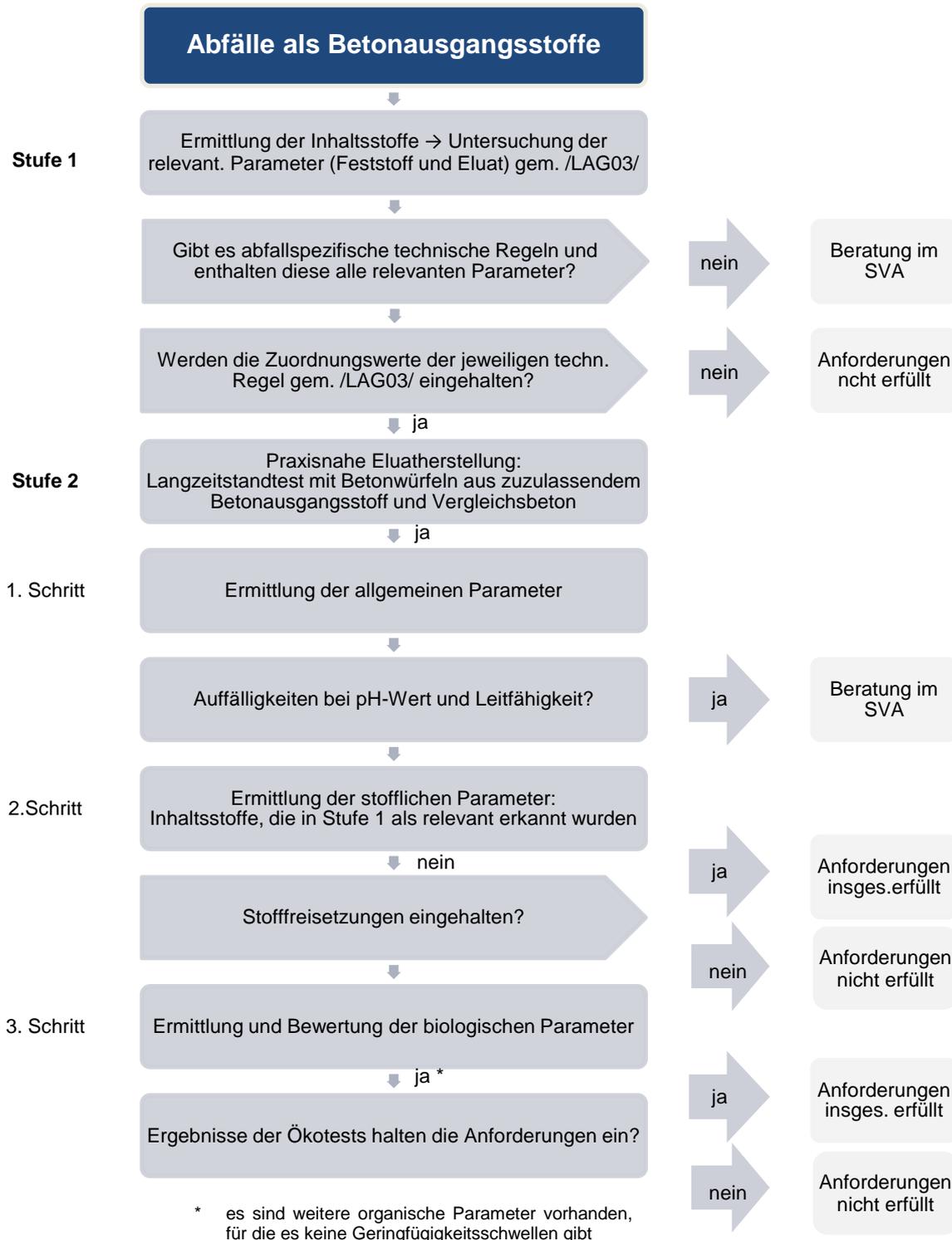


Bild 33: Ablaufschema zur Bewertung von Abfällen als Betonausgangsstoff /Str14/

Im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens „Nachhaltig bauen mit Beton“ wurden aus verschiedenen Forschungsarbeiten Daten zu den Spurenelementgehalten in RC-

Gesteinskörnungen zusammengestellt /Bra07/. Tabelle 9 zeigt die Auswertung der Gesamtgehalte. Die RC-Gesteinskörnungen waren dabei unterschiedlich zusammengesetzt (Betonbruch oder gemischter Bauschutt), was sich in den z. T. hohen Spannweiten der Gesamtgehalte widerspiegelt. Die Gesamtgehalte geben allerdings keinen direkten Aufschluss über die Umweltverträglichkeit der RC-Gesteinskörnung, da die Mobilität der Spurenelemente sehr unterschiedlich sein kann /Bra07/.

Tabelle 9: Gesamtgehalte in RC-Gesteinskörnungen /Bra07/

Parameter	Probenzahl	Spannweite	Mittelwert
-	-	mg/kg	
1	2	3	4
Antimon	5	< 5	<5
Arsen	6	5-14	9
Barium	6	84-445	362
Blei	8	22-265	115
Cadmium	7	< 2-4	2,4
Chrom	8	15-67	38
Kobalt	8	10-58	35
Kupfer	8	10-44	25
Nickel	7	13-284	82
Quecksilber	5	< 0,005-0,11	0,07
Thallium	5	0,05-0,11	0,09
Vanadium	1	23	23
Zink	8	73-155	103

Molybdän und Selen wurden nicht gemessen

5 BEISPIELE AUS EUROPA

5.1 Allgemeines

In den Nachbarländern Niederlande, Schweiz und Belgien sowie außerhalb Europas, wie z. B. China, Australien oder Japan, wird häufiger RC-Beton eingesetzt als in Deutschland. Im Folgenden werden Beispiele der Anwendungssituation von RC-

Gesteinskörnung für die Betonherstellung aus Deutschland, den Niederlanden und der Schweiz behandelt.

5.2 Deutschland

Systematische Untersuchungen zu RC-Gesteinskörnung in der Betonherstellung wurden in den 90er Jahren im Verbundforschungsvorhaben "Baustoffkreislauf im Massivbau" /BIM01/ durchgeführt. Bestandteil des Forschungsvorhabens war auch die Produktion und Anwendung von RC-Beton bei Demonstrationsbauvorhaben, wie dem Hundertwasserhaus in Darmstadt oder dem Hauptsitz der deutschen Bundesstiftung Umwelt in Osnabrück /BIM01/. Neuere Pilotprojekte mit RC-Beton werden in Südwestdeutschland durchgeführt. Gebaut werden bzw. wurden mehrere Einfamilienhäuser und Bürogebäude. Zudem soll der RC-Beton hinsichtlich seiner Dauerhaftigkeit im Einwirkungsbereich von Frost und Tausalz unter üblichen Umwelteinflüssen erprobt werden /RCB14/.

In der gängigen Praxis hat sich der Einsatz von RC-Beton in Deutschland bislang nicht durchgesetzt. Exemplarisch werden hier die Erfahrungen der Firma FBH Frischbeton Hamburg GmbH dargestellt, die in Kooperation mit der TBH Transportbeton Hamburg GmbH & Co. KG aktuell RC-Baustoffe für den Tief-, Straßen- und Hochbau herstellen. Die FBH Frischbeton wurde aufgrund von Erfahrungen der ETH Umwelttechnik GmbH im Umgang der Entsorgung von Klärschlamm, Flugaschen, Müllverbrennungsaschen und anderen Biomassen als eigenständiger Vertrieb gegründet. Zu Beginn stellte die FBH Frischbeton Sonderbetone, wie Leicht- und Schwerbeton aus RC-Gesteinskörnung verschiedener Herkunft her; die Produktion von RC-Beton für den konstruktiven Ingenieurbau wurde allerdings nach ein paar Jahren eingestellt. Heute produziert die FBH Frischbeton vornehmlich Rückenstützbetone, Füllbetone oder Sauberkeitsschichten für den Straßenbau. Jährlich werden von der FBH Hamburg und der TBH Transportbeton ca. 250.000 m³ Beton produziert. Davon entfallen 15.000 bis 30.000 m³ auf RC-Betone. Ein weiteres Produkt ist das Schlackegranulat „emvau-mix“ für hydraulisch gebundene Tragschichten oder Sandvermörtelungen. Hiervon werden pro Jahr ca. 10.000 bis 15.000 m³ Material verbaut.

Die Aufbereitung des RC-Materials erfolgt dabei nicht durch die FBH Frischbeton, sondern die RC-Gesteinskörnung wird von externen Anbietern angeliefert und auf ihre Verwendbarkeit als RC-Gesteinskörnung für die aktuelle Projektlage geprüft. Im

Allgemein wird an der Lieferkörnung eine Siebanalyse durchgeführt und der Wasseranspruch ermittelt. Teilweise werden auch Probestonagen durchgeführt, um die Qualität der RC-Betone zu überprüfen. Die Lagerung der RC-Gesteinskörnung erfolgt unabgedeckt. Bei der Betonherstellung wird mit Ausnahme von pumpfähigem Beton die RC-Gesteinskörnung nicht vorgegast. Die Betonrezeptur wird bei schlechter Verarbeitbarkeit über einen höheren Zement- und Wassergehalt angepasst. Aufgrund der geringen Anforderungen bei den üblichen Einsatzgebieten der RC-Betone ist eine gesonderte Nachbehandlung i. d. R. nicht erforderlich.

Die wesentlichen Probleme bei der Herstellung von RC-Betonen sind nach Angaben der FBH Frischbeton restriktive Normenvorgaben. Zwar haben nach Vorgaben der Stadt Hamburg RC-Baustoffe in der Ausschreibung Vorrang vor konventionellen Baustoffen, faktisch erhält jedoch das günstigste Angebot den Zuschlag. Die RC-Gesteinskörnungen können aufgrund der kosten- und zeitintensiven Aufbereitung nicht günstiger als natürliche Gesteinskörnung angeboten werden und haben so einen Wettbewerbsnachteil. Hier fehlen politische Vorgaben, die wie z. B. in den Niederlanden einen bestimmten Recyclinganteil bei der Herstellung von Bauprodukten vorschreiben. Die Regelungen nach der aktuellen Fassung der DAfStb-Richtlinie für RC-Beton /DAf10a/ sind laut der FBH Frischbeton GmbH unpraktisch. Aufgrund der Vorgabe des partiellen Austauschs der Gesteinskörnung müssen die verschiedenen Fraktionen sowohl natürliche als auch als RC-Gesteinskörnung vorgehalten werden. Der zusätzliche Lagerraum, der hierfür vonnöten wäre, erfordert eine hohe Anfangsinvestition, die bei der aktuellen Nachfrage an RC-Beton nicht zu tragen ist.

5.3 Niederlande

Die Niederlande verfügt über ein begrenztes Vorkommen an natürlichen Gesteinskörnungen. Zum Schutz der Natur und Landschaft wurde die niederländische Sand- und Kiesgewinnung eingeschränkt. Zudem gibt es nur eine geringe Anzahl an Depo- nien. Zurzeit werden aus Nachbarländern, wie z. B. Deutschland, Baukiese importiert. Die Bauindustrie ist auf den Einsatz von Recycling-Baustoffen angewiesen. Die abfallpolitischen Ziele wurden von der niederländischen Regierung im „National Waste Management Plan“ (LAP 2) festgelegt /LAP14/. Politisch vorgesehen ist die Förderung des Recyclings z. B. durch festgelegte Recyclingquoten und finanzieller Subvention. Die Verwertungsquoten der niederländischen Bau- und Abbruchabfälle ist ähnlich wie die in Deutschland (siehe Bild 1 und 34), allerdings werden deutlich höhere Anteile der RC-Gesteinskörnung in der Betonherstellung eingesetzt.

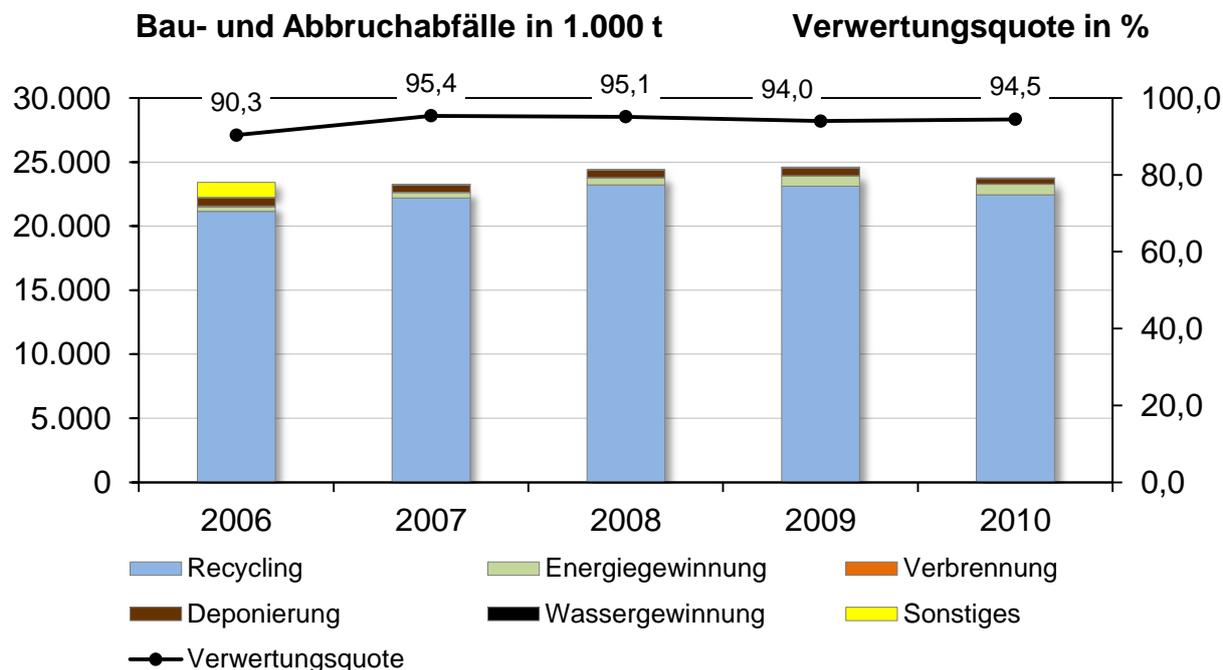


Bild 34: Bau- und Abbruchabfälle in den Jahren 2006 bis 2010 in den Niederlanden /Rji13/

Die technischen und rechtlichen Vorgaben für RC-Gesteinskörnung und RC-Beton sind im Vergleich zu den deutschen Regelwerken deutlich moderater. Wird weniger als 20 Vol.-% RC-Gesteinskörnung im Beton eingesetzt, gelten dieselben Regelungen wie bei konventionellen Beton. Ein Austausch der gesamten Gesteinskörnung durch RC-Material ist prinzipiell möglich, so dass Lagerplatz bei den Betonherstellern für verschiedene Gesteinskörnungen eingespart werden kann. Fraktionen mit einem Korndurchmesser von weniger als 4 mm dürfen ebenfalls eingesetzt werden. RC-Beton darf für unbewehrten, bewehrten Beton und auch für Spannbeton verwendet werden. Die Wasseraufnahme der RC-Gesteinskörnung wird i. d. R. durch das Vor-nässen gemindert. Hier gibt der Gesetzesgeber konkrete Vorschläge zum Mischungsprozess. Um die Qualitätseinbußen beim E-Modul und dem Kriechen abzufangen, kann das Bauteil einfach mit einer etwas größeren Bauteildicke hergestellt werden /Bri13/.

Durch die Kombination von festen Vorgaben hinsichtlich des Recyclinganteils bei der Betonherstellung und vergleichsweise großen Freiheiten bei der Betonzusammensetzung haben die Niederlande RC-Beton auf dem Markt etablieren können.

5.4 Schweiz

Die Schweiz hat aufgrund der geringen natürlichen Kiesvorkommen und des knappen Deponieraums traditionell ein Interesse an einer funktionierenden Kreislaufwirtschaft. Dabei zeigte eine in der Schweiz durchgeführte Studie, dass das Recycling von Gesteinskörnung aus Baurestmassen nicht unbedingt ökologischer ist als die Gewinnung von primären Rohstoff. Allerdings können durch den Einsatz von RC-Gesteinskörnungen die natürlichen Lagerstätten geschont werden.

In der Schweiz beträgt der Anteil an RC-Beton am Gesamtbetonvolumen derzeit 7% /Hof12/. Zur sicheren Anwendung von RC-Beton wurde 2010 das SIA-Merkblatt MB 2030 „Recyclingbeton“ eingeführt, das die wesentlichen mechanischen Eigenschaften und Bemessungsgrundlagen regelt /Hof10/. Ziel des Merkblattes war es den Einsatz von RC-Beton zu fördern, indem aufgezeigt wird bei welcher stofflichen Zusammensetzung der RC-Gesteinskörnung Unterschiede im Vergleich zu Normalbeton zu erwarten sind und wo keine Besonderheiten bestehen /Hof09/.

Die Stadt Zürich fordert bei Baumaßnahmen vom Bauherrn die Einhaltung einer gewissen Recyclingquote. Zum Einsatz kommen hauptsächlich RC-Gesteinskörnungen aus Betonbruch für Betone der Expositionsclassen XC1 und XC2 sowie tlw. auch XC4 /Hof09/. Die Erfahrungen der Schweiz zeigen, dass sich der Großteil der Betonachfrage bei klassischen Baumaßnahmen grundsätzlich durch RC-Beton abdecken lassen /Kna14/.

6 ZUSAMMENFASSUNG

Zur Schonung der natürlichen Ressourcen ist eine sinnvolle Kreislaufwirtschaft notwendig. Die in Deutschland anfallenden Bauabbruchmassen werden derzeit fast vollständig aufbereitet und wiederverwendet. Recycling, im Sinne der Zurückführung der Rohstoffe zu ihrem ursprünglichen Zweck, findet bei der Aufbereitung von Beton- oder Strassenaufbruch nur in geringen Umfang statt. In Deutschland werden RC-Gesteinskörnungen in der Betonherstellung für den konstruktiven Ingenieurbau nur im sehr geringen Umfang eingesetzt. Die Beispiele aus dem benachbarten Ausland zeigen, dass höhere Recyclinganteile in der Betonherstellung realisierbar sind. Zudem zeigt die Fülle an Forschungsprojekten mit RC-Gesteinskörnung und RC-Beton, dass die betontechnologischen Fragestellungen bereits behandelt wurden und konkrete Lösungswege existieren. In Deutschland führt die fehlende Nachfrage nach Recyc-

lingbeton und die mangelnde Verfügbarkeit geeigneter RC-Gesteinskörnung dazu, dass bislang nur wenige einzelne Pilotprojekte mit RC-Beton realisiert werden konnten.

Um RC-Gesteinskörnung für die Betonherstellung zu produzieren ist es notwendig, dass die Baurestmassen so sortenrein wie möglich rückgebaut werden, um kosten- und arbeitsintensive Aufbereitungsschritte zu vermeiden. Darüber hinaus kann durch einen selektiven Rückbau auch eine Kontamination mit Schad- und Störstoffen, wie z.B. gipshaltige Materialien oder Leichtbaustoffe, schon früh vermieden werden. Neben den bewährten Methoden der Aufbereitung der Baurestmassen wird an neuen Technologien geforscht. Diese ermöglichen eine höhere Reinheit des aufbereiteten Materials.

Die charakteristischen Eigenschaften von RC-Gesteinskörnungen sind i. d. R. auf die höhere Porosität und die damit einhergehende erhöhte Wasseraufnahme zurückzuführen. Mit abnehmender Korngröße werden die Kennwerte i. A. ungünstiger, was dazu geführt hat, dass feine RC-Gesteinskörnung bei der Betonherstellung in Deutschland nicht verwendet werden darf. Für Brechsande wurden in Forschungsarbeiten alternative Verwertungsmöglichkeiten, wie z. B. als Rohstoffkomponenten bei der Zementherstellung, aufgezeigt.

Beton, der mit RC-Gesteinskörnung hergestellt wurde, weist in vielen Eigenschaften qualitative Einschränkungen gegenüber Beton mit natürlicher Gesteinskörnung auf. Dies ist insbesondere auf die erhöhte Wasseraufnahme und die ungünstigere Kornform der RC-Gesteinskörnung zurückzuführen. Die Nachteile können allerdings mit einem höherem Zementgehalt oder Zusatzmitteldosierung betontechnologisch ausgesteuert werden.

Es muss geprüft werden, ob durch die Erhöhung des Recyclinganteils bei der Betonherstellung, dem Straßen und Wegebau RC-Baustoffe fehlen, die nur durch primäre Rohstoffe ersetzt werden können. Daraus folgt, dass die angestrebte Verwendung von RC-Gesteinskörnung im Beton nicht die alleinige Grundlage für die Verwertung von Sekundärrohstoffen sein kann.

7 LITERATUR

- /Akb11/ Akbarnezhad, A.; Ong, K. C. G.; Zhang, M. H.; Tam, C. T.; Foo, T. W. J.: Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates. In: Construction and Building Materials 25 (2011), S. 3469-3479
- /AST05/ American Society for Testing and Materials: ASTM C143 / C143M-12, Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2005
- /AST92/ American Society for Testing and Materials: ASTM C232-92 (1992). Standard test methods for bleeding of concrete. ASTM International, West Conshohocken, PA, 1998
- /Beh02/ Behler, K.: Betonbrechsand in sandreichen Betonen. In: Baustoff-Recycling + Deponietechnik 18 (2002). Nr. 6, S. 25-28
- /Bel08/ De Belie, N.; De Muynck, W.: Crack repair in concrete using biodeposition. In: Proceedings of the Second International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting, ICCRRR-2, (Alexander, M. G.; Beushausen, H.-D.; Dehn, F.; Moyo, P. (Hrsg.)), 24.-26. November 2008, Cape Town, Südafrika, S. 291-292
- /BGR13/ Bundesgütegemeinschaft Recyclingbaustoffe e. V. (BGRB): Sachbericht zum BMBF-Verbundvorhaben „Steigerung der Ressourceneffizienz im Bauwesen durch die Entwicklung innovativer Technologien für die Herstellung hochwertiger Aufbaukörperungen aus sekundären Rohstoffen auf der Basis von heterogenen Bau- und Abbruchabfällen“ im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahme „Innovative Technologien für Ressourceneffizienz - Rohstoffintensive Produktionsprozesse r²“. Verbundantrag 033R015. Teilprojekt 033R015 B. Berlin, 2013
- /Bil13/ Bilitewski, B.; Härdtle G.: Abfallwirtschaft. Handbuch für Praxis und Lehre. 4. Aufl., Berlin, Heidelberg: Springer, 2013
- /BIM01/ <http://www.b-i-m.de> (Abruf: September 2014)
- /Bra07/ Brameshuber, W.; Vollpracht, A.: Effiziente Sicherstellung der Umweltverträglichkeit von Beton - Teilprojekt B2: Securing of the Environmental Compatibility of Concrete. Berlin: Beuth, 2007. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2007), Nr. 572, S. 223-273
- /Bra11/ Brameshuber, W.; Hannawald, J.; Hauer, B.; Herbst, T.; Meng, B.; Nebel, H.; Pierkes, R.; Rübner, K.; Schäfer, S.; Seidel, M.; Vollpracht, A.: DAfStb-Heft 584 - Potenziale des Sekundärstoffeinsatzes im Betonbau - Teilprojekt B. Effiziente Sicherstellung der Umweltverträglichkeit von Beton - Teilprojekt E. (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (Hrsg.)), Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2011

- /Bre96/ Breitenbücher, R.; Buchnik, J.; Eibl, J.; Grübl, P.; Kohler, G.; Kurkowski, H.; Hora, M.; Penzel, U.; Rahlwes, K.; Walther, H.-J.: Umweltgerechter Rückbau und Wiederverwertung mineralischer Baustoffe. Sachstandsbericht. Heft 462 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (Hrsg.)), Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1996
- /Bri13/ de Brito, J.; Saikia, N.: Recycled Aggregate in Concrete. Use of Industrial, Construction and Demolition Waste. London: Springer, 2013
- /Bru14/ Bru, K.; Touzé, S.; Bourgeois, F.; Lippiatt, N.; Ménard, Y.: Assessment of a microwave-assisted recycling process for the recovery of high-quality aggregates from concrete waste. In: International Journal of Mineral Processing 126 (2014), S. 90-98
- /BTB13/ Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e. V. (BTB): Jahresbericht 2012/2013. Gute Investitionen - langfristiger Erfolg. Berlin, 2013
- /Bud97/ Budelmann, H.: Baustoffe im Kreislauf: Zum nachhaltigen, kreislaufgerechten Einsatz von mineralischen Baustoffen. Braunschweig: iBMB. - In: Mitteilungen Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (1997), Nr. 128. Festschrift zum 65. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. F. S. Rostasy, Baustoffe in Praxis, Lehre und Forschung, S. 37-50
- /Cho14/ Choi, H.; Lim, M.; Choi, H.; Kitagaki, R.; Noguchi, T.: Using Microwave Heating to Completely Recycle Concrete. In: Journal of Environmental Protection (2014), Nr. 5, S. 583-596
- /Cor04/ Corinaldesi, V.; Moriconi, G.: Self-compacting Concrete: a Great Opportunity for Recycling Materials. In: Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures (Vazquez, E.; Hendriks, C. F.; Janssen, G. M. T. (Hrsg.)), 8.-11. November 2004, Barcelona, Spanien, S. 600-609
- /DAf04/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.: DAfStb-Richtlinie: Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100, Ausgabe Dezember 2004. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2004
- /DAf05/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.: DAfStb-Richtlinie: Bestimmung der Freisetzung anorganischer Stoffe durch Auslaugung aus zementgebundenen Baustoffen. Teil 1: Grundlagenversuch zur Charakterisierung des Langzeitauslaugverhaltens. Ausgabe Mai 2005. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2005
- /DAf07/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.: DAfStb-Richtlinie: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton, Ausgabe Februar 2007. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2007

- /DAf10a/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.: DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100. Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN EN 1992-1-1, Ausgabe September 2010. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2010
- /DAf10b/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.: Erläuterung des DAfStb zum aktuellen Regelungsstand der Umweltverträglichkeit von Beton, Stand 14. Dezember 2010. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2010
- /DAf95/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.: DAfStb-Richtlinie für die Herstellung von Beton unter Verwendung von Restwasser, Restbeton und Restmörtel. Ausgabe August 1995. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1995
- /DAf98/ Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.: DAfStb-Richtlinie Beton mit rezykliertem Zuschlag, Teil 1: Betontechnik. Teil 2: Betonzuschlag aus Betonsplitt und Betonbrechsand. Ausgabe August 1998. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 1998
- /Dah96/ Dahms, J.; Brune, G.: Wasseraufnahme und Rohdichte von Betonbruch. In: Beton 46 (1996), Nr. 8, S. 480-486
- /DIB09/ Deutsches Institut für Bauforschung: Anwendung der "Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser" im Rahmen der Erteilung allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen. Berlin, 2009
- /DIB11/ Deutsches Institut für Bauforschung: Grundsätze zur Bewertung der Auswirkungen von Bauprodukten auf Boden und Grundwasser. Berlin, 2011
- /DIB14/ Deutsches Institut für Bauforschung: Bauregelliste A, Bauregelliste B und Liste C. Ausgabe 2014/1. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2014
- /Dil99/ Dillmann, R.: Beton mit rezyklierten Zuschlägen. In: Beton 49 (1999), Nr. 2, S. 86-91
- /Dor01/ Dora, B.: Hydraulisch erhärtende Baustoffe aus Betonbrechsand - Phasenveränderungen durch Temperaturbehandlung und Einsatzmöglichkeit. Braunschweig: iBMB. - In: Schriftenreihe des Instituts für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz der Technischen Universität Braunschweig (2001), Nr. 161, Technische Universität, Diss., 2001
- /Ede04/ Eden, W.: Wiederverwertung von Kalksandsteinen aus Abbruch von Bauwerken bzw. aus fehlerhaften Steinen aus dem Produktionsprozeß. Hannover: Forschungsvereinigung Kalk-Sand e.V., 1994. - Forschungsbericht Nr. 80
- /Ede09/ Eden, W.; Middendorf, B.: Entwicklung eines Recycling-Mauersteins unter Verwendung von Abbruchmaterial und Baurestmassen und Anwendung der Kalksandstein-Technologie. Stuttgart: Fraunhofer-IRB-Verlag, 2009

- /EG08/ Richtlinie 2008/98/EG des europäischen Parlaments und des Rates vom 19. November 2008 über Abfälle und zur Aufhebung bestimmter Richtlinien
- /Eva04/ Evangelista, L. R.; de Brito, J.: Criteria for the use of fine recycled concrete aggregates in concrete production. In: Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures (Vazquez, E.; Hendriks, C. F.; Janssen, G. M. T. (Hrsg.)), 8.-11. November 2004, Barcelona, Spanien, S. 503-510
- /Eva07/ Evangelista, L. R.; de Brito, J.: Mechanical behaviour of concrete made with fine recycled concrete aggregates. In: Cement and Concrete Composites 29 (2007), Nr. 5, S. 397-401
- /Eva10/ Evangelista, L. R.; de Brito, J.: Durability performance of concrete made with fine recycled concrete aggregates. In: Cement and Concrete Composites 32 (2010), Nr. 1, S. 9-14
- /Fee14/ www.feess.de (Abruf: September 2014)
- /Fer10/ Ferrari, G.; Surico, F.; Brocchi, A.; Banfi, E.; Maltese, C.; Squinzi, M.: Method for recycling concrete - European Patent Office - EP 2468695 A1. Angemeldet durch Mapei S.p.A.
- /Fer11/ Ferreira, L., de Brito, J.; Barra, M.: Influence of pre-saturation of recycled coarse concrete aggregates on structural concretes properties. In: Magazine of Concrete Research 63 (2011), Nr. 8, S. 617-627
- /Fer14/ Ferrari, G; Miyamoto, M.; Ferrari, A.: New sustainable technology for recycling returned concrete. In: Construction Building Materials (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.01.008> (noch nicht veröffentlicht)
- /FIB15/ <http://www.aufbaukoernungen.de/> (Abruf: Januar 2015)
- /For12/ Forberger, J.; Hartmann, A.; Müller, A.; Woidasky, J.: Hydrothermale Erhärtung - Ein Lösungsweg für die Steigerung der Ressourcenproduktivität von feinkörnigem mineralischen Bauabfall. In: Chemie Ingenieur Technik 84 (2012), Nr. 10, S. 1806-1811
- /Gra12/ Grabiec, A. M.; Klama, J.; Zawal, D.; Krupa, D.: Modification of recycled concrete aggregate by calcium carbonate biodeposition. In: Construction and Building Materials 34 (2012), S. 145-150
- /Hen04/ Hendriks, C. F.; Xing, W.: Suitable separation treatment of stony components in construction and demolition waste. In: Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Building and Structures (Vazquez, E.; Hendriks, C. F.; Janssen, G. M. T. (Hrsg.)), 8.-11. November 2004, Barcelona, Spanien, S. 166-172

- /Hla06/ Hlawatsch, F.; Berger, M.; Schlütter, F.; Kropp, J.: Autoklaves Härtungspotenzial und hydrothermale Reaktionsprozesse von Betonbrechsand. Weimar: Bauhaus-Universität, 2006. - In: 16. Internationale Baustofftagung, 20.-22. September 2006, Weimar, S. 2-1325-2-1332
- /Hla07/ Hlawatsch, F.; Kropp, J.; Schlütter, F.; Berger, M.: Autoklav gehärtete RC-Formsteine. In: Baustoff Recycling + Deponietechnik (2007), Nr. 6, S. 24-28
- /Hof07/ Hoffmann, C.; Jacobs, F.: Recyclingbeton aus Beton- und Mischabbruchgranulat. Sachstandsbericht. Eidgenössische Materialprüfungs- und Forschungsanstalt (EMPA), Abteilung Beton/Bauchemie und Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton (TFB), Dübendorf, Wildegg: 2007
- /Hof09/ Hoffmann, C.; Jacobs, F.: Regelungen zu Recyclingbeton. In: Die Baustellen (2009), Nr. 6, S. 70-74
- /Hof10/ Hoffmann, C.; Moser, K.: Anwendung von Recyclingbeton in der Schweiz: SIA-Merkblatt MB 2030. In: Beton- und Stahlbetonbau 105 (2010), Nr. 11, S. 725-728
- /Hof12/ Hoffmann, C.; Bischof, S.; Lunk, P.: Recyclingbeton - Erkenntnisse aus Forschung und Praxis in der Schweiz. Weimar: F.A. Finger Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität, 2012. - In: 18. Internationale Baustofftage, Weimar, 12.-15. September 2012, (Ludwig, H.-M. (Hrsg.)), S. 2 1107-2 1114
- /Kar14/ Karlstetter, C.: Elektrodynamische Fragmentierung. Echtes Recycling von Beton. In: BFT International 80 (2014), Nr. 2, S. 98-99
- /Kat04/ Katz, A.: Treatments for the Improvement of Recycled Aggregate. In: Journal of Materials in Civil Engineering (2004), S. 597- 603.
- /Ker01a/ Kerkhoff, B.; Siebel, E.: Eigenschaften von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen (Teil 1). In: Beton 51 (2001), Nr. 1, S. 47-50
- /Ker01b/ Kerkhoff, B.; Siebel, E.: Eigenschaften von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen (Teil 2). In: Beton 51 (2001), Nr. 2, S. 105-108
- /Kna13a/ Knappe, F.; Theis, S.; Feeß, W.; Fritz, E.; Weiß, H.-J.; Dziadek, B.; Lieber, R.: Stoffkreisläufe von RC-Beton. Informationsbroschüre für die Herstellung von Transportbeton unter Verwendung von Gesteinskörnungen nach Typ 2., Heidelberg: Ministerium für Umwelt, Klima und Energiewirtschaft Baden-Württemberg, 2013
- /Kna13b/ Knaack, A. M.; Kurama, Y. C.: Design of concrete mixtures with recycled concrete aggregates. In: ACI Materials Journals (2013), S. 483-494

- /Kna14/ Knappe, F.: Einsatz von Recycling-Baustoffen. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle - Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen (Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.)), Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 457-464
- /Kri14/ www.kies-krieger.de (Abruf: September 2014)
- /KrW12/ Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das durch § 44 Absatz 4 des Gesetzes vom 22. Mai 2013 (BGBl. I S. 1324) geändert worden ist. Stand: Geändert durch Art.3 G v. 8.4.2013 I 734
- /Kur03/ Kurkowski, H.; Mesters, K.: Großtechnische Versuche zur Nassaufbereitung von Recycling-Baustoffen mit der Setzmaschine. Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2013. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2003), Nr. 531, S. 1-91
- /Kur98/ Kurkowski, H.; Penzel, U.: Einfluss der Aufbereitungstechnologie auf Eigenschaften des rezyklierten Zuschlags. (1998); Website: www.b-i-m.de (Abruf: Januar 2015)
- /KWT00/ Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau: Monitoring-Bericht Bauabfälle. Berlin/Düsseldorf/Duisburg: Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau, 2000
- /KWT01/ Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau: Monitoring-Bericht Bauabfälle (Folgebericht, Teil 2 - Erhebung: 1998). Berlin/Düsseldorf/Duisburg: Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau, 2001
- /KWT02/ Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau: Monitoring-Bericht Bauabfälle. Erhebung 2002. Berlin: Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau, 2005
- /KWT03/ Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau: Monitoring-Bericht Bauabfälle (Erhebung 2000). Teil 1 - Nachhaltige Bauwirtschaft. Teil 2 - Statistische Daten. Berlin/Düsseldorf/Duisburg: Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau, 2003
- /KWT07/ Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau: Monitoring-Bericht Bauabfälle. Erhebung 2004). Berlin: Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau, 2007
- /KWT11a/ Kreislaufwirtschaft Bau c/o Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V.: Mineralische Bauabfälle. Monitoring 2006. Daten zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2006. Berlin: Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V., 2011
- /KWT11b/ Kreislaufwirtschaft Bau c/o Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V.: Mineralische Bauabfälle. Monitoring 2008. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2008. Berlin: Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V., 2011

- /KWT13/ Kreislaufwirtschaft Bau c/o Bundesverband Baustoffe - Steine und Erden e. V.: Mineralische Bauabfälle. Monitoring 2008. Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälleim Jahr 2010. Berlin: Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V., 2013
- /LAG03/ Länderarbeitsgemeinschaft Abfall: Anforderungen an die stoffliche Verwertung von mineralischen Abfällen. Technische Regeln. Allgemeiner Teil. Überarbeitung. Endfassung vom 06.11.2003. Mainz, 2003
- /LAG04/ Länderarbeitsgemeinschaft Abfall: Eckpunkte (EP) der LAGA für eine „Verordnung über die Verwertung von mineralischen Abfällen in technischen Bauwerken“. Mainz, 2004
- /LAP14/ www.lap2.nl (Abruf: September 2014)
- /LAW04/ Länderarbeitsgemeinschaft Wasser: Ableitung von Geringfügigkeits-schwellenwerten für das Grundwasser, Kiel, 2004
- /Lev04/ Levy, S. M.; Helene, P.: Durability of Recycled Aggregates Concrete: A Safe Way Sustainable Development. In: Cement and Concrete Research 34 (2004), Nr. 11, S. 1975-1980
- /Lin08/ Linß, E.: Untersuchungen zur Leistungsschallimpulszerkleinerung für die selektive Aufbereitung von Beton. Weimar, Bauhaus-Universität, Fakultät Bauingenieurwesen, Diss., 2008
- /Lop09/ López-Gayarre, F.; Serna, P.; Domingo-Cabo, A.; Serrano-López, M. A.; López-Colina, C.: Influence of recycled aggregate quality and proportioning criteria on recycled concrete properties. In: Waste Management 29 (2009), Nr. 12, S. 3022-3028
- /Lud96/ Ludwig, H.-M.: Zur Rolle von Phasenumwandlungen bei der Frost- und Frost-Tausalz-Belastung von Beton. Weimar, Hochschule für Architektur und Bauwesen, Fakultät für Bauingenieurwesen, Diss., 1996
- /Luk94/ Lukas, W.: Konzept für die Herstellung von Recycling-Beton aus Baurestmassen-Zuschlägen. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 10 (1994), S. 68-75
- /Man71/ Manns, W.: Über den Einfluß der elastischen Eigenschaften von Zementstein und Zuschlag auf die elastischen Eigenschaften von Mörtel und Beton. Opladen: Westdeutscher Verlag. - In: Forschungsberichte des Landes Nordrhein- Westfalen (1971), Nr. 2112
- /Mar11/ Martens, H.: Recyclingtechnik. Fachbuch für Lehre und Praxis. Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2011
- /Mei00/ Meißner, M.: Biegetragverhalten von Stahlbetonteilen mit rezyklierten Zuschlägen. Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2000), Nr. 505

- /Men13/ Menard, Y.; Bru, K.; Touze, S.; Lemoign, A.; Poirier, J. E.; Ruffie, G.; Bonnaudin, F.; von der Weid, F.: Innovative process routes for a high-quality concrete recycling. In: Waste Management 33 (2013), Nr. 6, S. 1561-1565
- /Mey09/ Meyer, C.: The greening of the concrete industry. In: Cement and Concrete Composites 31 (2009), Nr. 8, S. 601-605
- /Mül01/ Müller, C.: Beton als kreislaufgerechter Baustoff. In: Beton 51 (2001), Nr. 6, S. 341-346
- /Mül03/ Müller, A.: Baustoffkreisläufe - Stand und Entwicklung. Weimar: Bauhaus-Universität, 2003. - In: 15. Internationale Baustofftagung, 24.-27. September 2003, Weimar, S. 1-1289-1-1308
- /Mul07/ Mulder, E.; de Jong, T. P.; Feenstra, L.: Closed cycle construction: An integrated process for the separation and reuse of C&D waste. In: Waste Management 27 (2007), Nr. 10, S. 1408-1415
- /Mül10/ Müller, A.; Rübner, K.; Schnell, A.: Das Rohstoffpotenzial von Bauabfällen. In: Chemie Ingenieur Technik 82 (2010), Nr. 11, S. 1861-1870
- /Mül11a/ Müller, A.; Weiß, A.; Schnell, A.: Up-Cycling von Mauerwerkbruch. In: Recycling Magazin (2011), Nr. 4, S. 30-33
- /Mül11b/ Müller, A.: Rohstoffe und Technologien für das Baustoffrecycling. In: Recycling und Rohstoffe. Band 4. (Thomé-Kozmiensky, K. J.; Goldmann, D. (Hrsg.)) Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2011
- /Mül12a/ Müller, A.; Schnell, A.; Rübner, K.: Aufbaurückstände aus Mauerwerkbruch. In: Chemie Ingenieur Technik 84 (2012), Nr. 10, S. 1780-1791
- /Mül12b/ Müller, A.; Liebezeit, S.; Badstübner, A.: Überschusssande als Zusatz im Beton. In: Die Schweizer Baustoff-Industrie (2012), Nr. 4, S. 38-41
- /Mül12c/ Müller, A.; Liebezeit, S.; Badstübner, A.: Verwertung von Überschusssanden als Zusatz im Beton. In: Steinbruch und Sandgrube105 (2012), Nr. 5, S. 46-49
- /Mül13/ Müller, A.; Palzer, U.; Rübner, K.; Schnell, A.: Aufbaurückstände - Eine neue thermisch gebundene leichte Gesteinskörnung mit hoher Ressourceneffizienz. In: BFT International 79 (2013), Nr. 2, S. 124-126
- /Mül14/ Müller, J.; Mayer, W. A.: Branchen- und technologieübergreifende Ansätze im Strategiebereich Ressourceneffizienz. Endbericht zum Teilprojekt der TUM im Rahmen des Integrations- und Transferprojekts der BMBF-Fördermaßnahme r² „Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – rohstoffintensive Produktionsprozesse“, Straubing, 2014

- /Mül98/ Müller, C.; Wiens, U.: Verwertung mineralischer Bauabfälle im Beton. Aachen: Institut für Bauforschung der RWTH Aachen, 1998 - In: 20. Aachener Baustofftag, 3. März 1998, Aachen
- /Nog09/ Noguchi, T.; Kitagaki, R.; Nagai, H.; Tsujino, M.; Completely recyclable concrete of aggregate recovery type by using Microwave heating technology. In: Proceedings of the 2nd International RILEM Conference on Progress of Recycling in the Built Environment (John, V. M.; Vazquez, E.; Angulo, S. C.; Ulsen, C. (Hrsg.)), 2.-4. Dezember 2009, São Paulo, Brasilien, S. 333-343
- /Nog10/ Noguchi, T.: Toward Sustainable Resource Recycling in Concrete Society. In: Proceedings of the 2nd International Conference on Sustainable Construction Materials and Technology (Naik, T. R.; Canpolat, F.; Claisse, P.; Ganjian, E. (Hrsg.)), 28.-30. Juni 2010, Alcona, Italien, S. 321-334
- /Oli96/ de Oliveira, M. B., Vázquez, E.: The influence of retained moisture in aggregates from recycling on the properties of new hardened concrete. In: Waste Management 16 (1996), Nr. 1-3, S. 113-117
- /Ost11/ Ostheeren, K., Stark, U.; Müller, A.: Die Zukunft der Brechsande? In: AT Aufbereitungstechnik - Mineral Processing 52 (2001), S. 52-59
- /Ost13/ Ostheeren, K.; Ludwig, H.-M.: Kornformeinflüsse des Mehlkorns auf die rheologischen Eigenschaften selbstverdichtender Mörtel. Weimar: Bauhaus-Universität Weimar, 2013. - In: Fachtagung Recycling R'13, 19.-20. September 2013, Weimar
- /Ött00/ Öttl, C.: Reuse of fresh concrete by adding a recycling aid. In: Otto Graf Journal. Annual journal on research and testing of materials (2000), Nr. 11, S. 181-190
- /Poo04/ Poon, C. S.; Shui, Z. H.; Lam, L.; Fok, H.; Kou, S. C.: Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. In: Cement and Concrete Research 34 (2004), Nr. 1, S. 31-36
- /Poo07/ Poon, C. S.; Kou, S. C.; Lam, L.: Influence of recycled aggregate on slump and bleeding of fresh concrete. In: Materials and Structures 40 (2007), Nr. 9, S. 981-986
- /Qui14/ Qui, J.; Tng, D. Q. S.; Yang, E.-H.: Surface treatment of recycled concrete aggregates through microbial carbonate precipitation. In: Construction and Building Materials 57 (2014), S. 144-150
- /RCB14/ <http://www.rc-beton.de> (Abruf: September 2014)
- /Rei03/ Reichel, W.; Heldt, P.: Einflüsse der Aufbereitung von Bauschutt für eine Verwendung als Betonzuschlag. Heft 531 (Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (Hrsg.)), Berlin: Beuth-Verlag GmbH, 2003, S. 93-131

- /Ric01/ Rickert, J.; Grube, H.: Analyse von Restwasserinhaltsstoffen. In: *Beton-technische Berichte (1998-2000)* (Thielen G. (Hrsg.)), Düsseldorf: Verlag Bau + Technik, 2001
- /Ric04/ Rickert, J.: Zum Einfluß von Langzeitverzögerern auf der Basis von Phosphorsäure auf die Hydratation einzelner Klinkerphasen, Portlandzementklinker und Portlandzemente. Düsseldorf: Verlag Bau + Technik. - In: *Schriftenreihe der Zementindustrie (2004)*, Nr. 65
- /RIL88/ RILEM CPC 18: Measurement of hardened concrete carbonation depth, *Materials and Structures (1988)* 21, Nr. 126, S. 453-455
- /Rji13/ Rijkswaterstaat - Ministerie van Infrastructuur en Milieu: *Nederlands afval in cijfers, gegevens 2006-2010 / Rijkswaterstaat Leefomgeving*. Utrecht : Rijkswaterstaat Leefomgeving, 2013
- /Roo02/ Roos, F.: Ein Beitrag zur Bemessung von Beton mit Zuschlag aus rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN 1045-1. München, Technische Universität, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Diss., 2002
- /San04/ Sánchez de Juan, M., Gutiérrez, P. A.: Influence of recycled aggregate quality on concrete properties. Barcelona, Spanien, 2004. In: *Proceedings of the International RILEM Conference on the Use of Recycled Materials in Buildings and Structures*, Barcelona, Spanien, 8. - 11. November 2004 (Vázquez, E.; Hendriks, C. F.; Janssen, G. M. T. (Hrsg.)), S. 545-553
- /San09/ Sánchez de Juan, M., Gutiérrez, P. A.: Study on the influence of attached mortar content on the properties of recycled concrete aggregate. In: *Construction and Building Materials* 23 (2009), S. 872-877
- /San98/ Sanchez, J. A.; Tudanca, S.: Reuse of Building Rubble in Cement Manufacturing. London, Großbritannien, 1998. - In: *Sustainable Construction: Use of Recycled Concrete Aggregate*. Proceedings of the International Symposium, London, Großbritannien, 11. - 13. November 1998 (Dhir, R. K.; Henderson, N. A.; et al (Hrsg.)), S. 481-491
- /Sch03a/ Schubert, H. (Hrsg.): *Handbuch der mechanischen Verfahrenstechnik*. Weinheim: WILEY-VCH Verlag, 2003.
- /Sch03b/ Schmidt, M.; Kurdowski, H.: Rückenstützbeton mit rezyklierten Gesteinskörnungen. In: *Tiefbau Ingenieurbau Straßenbau* 45 (2003), Nr. 4, S. 18-23
- /Sch10/ Schnell, A.; Müller, A.: Thermische und hydrothermale Erhärtung von Granulaten aus Beton- und Abbruchabfällen. In: *Chemie Ingenieur Technik* 82 (2010), Nr. 11, S. 1999-2004
- /Sch14/ www.scherer-kohl.de (Abruf: September 2014)

- /Sch97/ Schießl, P.; Müller, C.: Baustoffkreislauf im Massivbau (BiM). Bewertung der bei der Aufbereitung von Bauschutt anfallenden Recyclingzuschläge hinsichtlich der Eignung als Betonzuschlag. <http://www.b-i-m.de/berichte/d03/d03z0197.htm>
- /Sei12/ Seidemann, M.; Müller, A.; Ludwig, H.-M.: Verbesserung der Performance von Betonrezyklaten durch CO₂-Speicherung in der Zementsteinmatrix. Weimar: F.A. Finger Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität, 2012. - In: 18. Internationale Baustofftage, Weimar, 12.-15. September 2012, (Ludwig, H.-M. (Hrsg.)), S. 2-1050 - 2-1057
- /Sei13a/ Seifert, S.; Thome, V.; Karlstetter, M.; Maier, M.: Elektrodynamische Fragmentierung von MVA-Schlacken - Zerlegung der Schlacken und Abscheidung von Chloriden und Sulfaten. In: Asche-Schlacke-Stäube aus Metallurgie und Abfallverbrennung (Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.)), Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2013, S. 353 – 366
- /Sei13b/ Seidemann, M.; Müller, A.; Ludwig, H.-M.: CO₂-Einbindung in Betonrezyklaten. Weimar: F.A. Finger Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität und Bundesgütegemeinschaft Recycling-Baustoffe e. V., 2013. - In: Fachtagung Recycling R`13, Weimar, 19.-20. September 2013, S. 1-10
- /Shi05/ Shima, H.; Tateyashiki, H.; Matsushashi, R.; Yoshida, Y.: An Advanced Concrete Recycling Technology and its Applicability Assessment through Input-Output Analysis. In: Journal of Advanced Concrete Technology 3 (2005), Nr. 1, S. 53-67
- /Son02/ Sonnenberg, R.: Recycling von Frischbeton-Restmengen. In: Beton 52 (2002), Nr. 6, S. 292-295
- /Spä13/ Späth, V.; Tegger, A. D.: Improvement of recycled concrete aggregate properties by polymer treatments. - In: International Journal of Sustainable Built Environment (2013), Nr. 2, S. 143-152
- /Spe05/ Spengler, A.: Technologie sandreicher Betone. München, Technische Universität München, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Diss., 2005
- /Sta13/ Statistisches Bundesamt: Statistisches Jahrbuch 2013. Umwelt. Abfallbilanz 2011. Wiesbaden Juli 2012. Deutschland und Internationales. Wiesbaden, 2013
- /Stie97/ Stieß, M.: Mechanische Verfahrenstechnik. Berlin, Heidelberg: Springer, 1997
- /Str14/ Strathmann, B.: Qualitätssicherung und ökologische Bewertung von Recyclingbaustoffen. In: Mineralische Nebenprodukte und Abfälle. Aschen, Schlacken, Stäube und Baurestmassen (Thomé-Kozmiensky, K. J. (Hrsg.)), Neuruppin: TK Verlag Karl Thomé-Kozmiensky, 2014, S. 465-478

- /Sui11/ Sui, Y.; Müller, A.: Thermisch-mechanische Behandlung. In: AT Aufbereitungstechnik - Mineral Processing 52 (2011), S. 60-69
- /Sui12/ Sui, Y.; Müller, A.: Development of thermo-mechanical treatment for recycling of used concrete. In: Materials and Structures 45 (2012), Nr. 10, S. 1487-1495
- /Tam07a/ Tam, V. W. Y.; Tam, C. M.; Lea, K. N.: Removal of cement mortar remains from recycled aggregate using pre-soaking approaches. In: Resources, Conservation and Recycling 50 (2007), S. 82-101
- /Tam07b/ Tam, V. W. Y.; Tam, C. M.; Wang, Y.: Optimization on proportion for recycled aggregate in concrete using two-stage mixing approach. In: Construction and Building Materials 21 (2007), S. 1928-1939
- /Tho12/ Thome, V.: Elektrodynamische Fragmentierung von Abfallstoffen am Beispiel von Altbeton und Müllverbrennungsschlacken. Karlsruhe: ZKM, 2012. - In: Landeskongress Ressourceneffizienz, 27.-28. September 2012, Karlsruhe
- /Tho13/ Thomas, C., Setién, J., Polanco, J. A., Alaejos, P., Sánchez De Juan, M. Durability of recycled aggregate concrete. In: Construction and Building Materials 40 (2013), S. 1054-1065
- /TLG04/ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Technische Lieferbedingungen für Gesteinskörnungen im Straßenbau. Ausgabe 2004 (TL Gestein-StB)
- /Top04/ Topcu, I. B.; Sengel, S.: Properties of Concretes Produced with Waste Concrete Aggregate. In: Cement and Concrete Research 34 (2004), Nr. 8, S. 1307-1312
- /Top97/ Topcu, I. B.: Physical and mechanical properties of concretes produced with waste concrete. In: Cement and Concrete Research 27 (1997), Nr. 12, S. 1817-1823
- /Van13/ Vandenbroucke, M.; Debacker, W.; De Temmerman, N.: Transformability of conventional and dynamic load bearing building nodes. In: Proceedings of the first Central Europe towards Sustainable Building Conference, Prag, Tschechische Republik, 16.-18. Juni 2013 (Hájek, P.; Tywoniak, J.; Lu-písek, A.; Sojková, K. (Hrsg.)), S. 603-606
- /Vie11/ Vieira, J. P. B, Correia, J. R., de Brito, J.: Post-fire residual mechanical properties of concrete made with recycled concrete coarse aggregates. In: Cement and Concrete Research 41 (2011), Nr. 5, S. 533-541

- /Wei06/ Weimann, K.; Müller, A.: Baustoffeigenschaften von nass aufbereiteten Betonbrechsanden. Weimar: F. A. Finger Institut für Baustoffkunde, Bauhaus-Universität, 2006. - In: 16. Internationale Baustofftagung, ibausil, 20. - 23. September 2006, Weimar, Tagungsbände, Band 2, S. 2-1365 - 2-1372
- /Wei08/ Weimann, K.: Untersuchungen zur Nassaufbereitung von Betonbrechsand unter Verwendung der Setzmaschinenteknik. Weimar, Bauhaus-Universität, Fakultät Bauingenieurwesen, Diss., 2008
- /Wei13/ Weimann, K.; Matyschik, J.; Adam, C.; Schulz, T.; Linß, E.; Müller, A.: Optimierung des Rückbaus/Abbaus von Gebäuden zur Rückgewinnung und Aufbereitung von Baustoffen unter Schadstoffentfrachtung (insbes. Sulfat) des RC-Materials sowie ökobilanzieller Vergleich von Primär- und Sekundärrohstoffeinsatz inkl. Wiederverwertung. Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt, 2013
- /Wes81/ Wesche, K. H.; Schulz, R.-R. ; Wischers, G.: Beton aus aufbereitetem Altbeton Technologie und Eigenschaften. Düsseldorf: Beton-Verlag, 1984. - In: Betontechnische Berichte 1982/83, S. 17-40
- /WHG09/ Wasserhaushaltsgesetz vom 31. Juli 2009 (BGBl. I S. 2585), das zuletzt durch Artikel 2 des Gesetzes vom 15. November 2014 (BGBl. I S. 1724) geändert worden ist. Stand: Geändert durch Art. 2 G v. 15.11.2014 I 1724
- /Yan08/ Yang, J.; Chung, H.; Ashour, A. F.: Influence of type and replacement level of recycled aggregates on concrete properties. ACI Materials Journal 105 (2008), Nr. 3, S. 289-296
- /Zha14/ Zhan, B.; Poon, C. S.; Liu, Q.; Kou, S.; Shi, C.: Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties. In: Construction and Building Materials 67 (2014), S. 3-7
- /Zhi13/ Zhihui, Z.; Shoude, W.; Lingchao, L.; Chenchen, G.: Evaluation of pre-coated recycled aggregate for concrete and mortar. In: Construction and Building Materials 43 (2013), S. 191-196
- /ZTV07/ Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Trag-schichten mit hydraulischen Bindemitteln und Fahrbahndecken aus Beton (ZTV Beton-StB)

Tabelle A1: Kategorien der Bestandteile von groben RC-Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620:2008-07

Bestandteile	Gehalt		Kategorie
	M.-%	cm ³ /kg	
1	2	3	4
Rc	≥ 90 ≥ 80 ≥ 70 ≥ 50 < 50	-	RC ₉₀ RC ₈₀ RC ₇₀ RC ₅₀ RC _{angegeben}
	Keine Anforderung	-	RC _{NR}
Rc + Ru	≥ 95 ≥ 90 ≥ 70 ≥ 50 < 50	-	RCU ₉₅ RCU ₉₀ RCU ₇₀ RCU ₅₀ RCU _{angegeben}
	Keine Anforderung	-	RCU _{NR}
Rb	≤ 10 ≤ 30 ≤ 50 > 50	-	Rb ₁₀₋ Rb ₃₀₋ Rb ₅₀₋ Rb _{angegeben}
	Keine Anforderung	-	Rb _{NR}
Ra	≤ 1 ≤ 5 ≤ 10	-	Ra ₁₋ Ra ₅₋ Ra ₁₀₋
X + Rg	≤ 0,5 ≤ 1 ≤ 2	-	XRg _{0,5-} XRg ₁₋ XRg ₂₋
FL	-	≤ 0,2 ¹⁾ ≤ 2 ≤ 5	

1) Die Kategorie ≤ 0,2 gilt nur für besondere Anwendungen, die eine hochwertige Oberflächenbeschaffenheit erfordern.

Rc: Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton

Ru: Ungebundene Gesteinskörnung, Naturstein, hydraulisch gebundene Gesteinskörner

Rb: Mauer- und Dachziegel aus gebranntem Ton, Kalksandsteine, Gasbetonsteine (nicht schwimmend)

Ra: Bitumenhaltige Materialien

FL: Schwimmendes Material im Volumen

X: sonstige Materialien: Bindige Materialien (d. h. Ton, Erde); Verschiedene sonstige Materialien: (Eisen- und nicht Eisenmetalle) Metalle, nicht schwimmendes Holz, Kunststoff und Gummi, Gips

Rg: Glas

Tabelle A2: Regelanforderungen für RC-Gesteinskörnung nach DIN EN 12620: 2008-07 und DAfStb-Richtlinie für RC-Beton /DAf10a/

Eigenschaft	DIN EN 12620: 2008-07	Kategorie	
		Typ 1	Typ2
1	2	3	4
Kornzusammensetzung	4.3		
Grobe Gesteinskörnungen mit $D/d \leq 2$ od. $D \leq 11,2$	4.3.2	G _C 85/20	G _C 80/20
Korngemische	4.3.5	G _A 90	G _A 85
Kornform	4.4	F _{I50} oder S _{I55}	
Muschelschalengehalt für aus dem Meer gewonnene grobe Gesteinskörnung	4.5	S _{CNR}	
Feinanteile			
Grobe Gesteinskörnung	4.6	f ₄	
Kornrohichte	5.5	≥ 2 000 kg/m ³	
Schwankungsbreite bezogen auf den vom Hersteller deklarierten Mittelwert der Kornrohichte	5.5	± 150 kg/m ³	
Widerstand gegen Zertrümmerung	5.2	L _{ANR} oder S _{ZNR}	
Widerstand gegen Verschleiß von groben Gesteinskörnungen	5.3	M _{DENR}	
Widerstand gegen Polieren	5.4.1	P _{SVNR}	
Widerstand gegen Oberflächenabrieb	5.4.2	A _{AVNR}	
Widerstand gegen Abrieb durch Spike-Reifen	5.4.3	A _{NNR}	
Frost-Tau-Widerstand ¹⁾	5.7.1	F ₄	
Magnesiumsulfat-Widerstandsfähigkeit	5.7.1	M _{SNR}	
Säurelösliches Chlorid	6.2	≤ 0,04 M.-%	
Säurelösliches Sulfat für alle Gesteinskörnungen außer Hochofenstüchschlacken	6.3.1	A _{S0,8}	
Gesamtschwefel für alle Gesteinskörnungen außer Hochofenstüchschlacken	6.3.2	≤ 1 M.-%	
Leichtgewichtige organische Verunreinigungen von grober Gesteinskörnung, natürlich zusammengesetzter Gesteinskörnung 0/8 u. von Korngemischen	6.4.1 und G.4	≤ 0,1 M.-%	

- 1) Alternativ kann der Frost-Tau-Widerstand rezyklierter Gesteinskörnungen auch mittels Betonprüfung nach Anhang A dieser Richtlinie nachgewiesen werden.