

# Verwendung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen bei Verkehrswasserbauten

Dr.-Ing. Jörg Bödefeld, Dr.-Ing. Thorsten Reschke, Bundesanstalt für Wasserbau

## 1 Einführung

Im Zuge von Überlegungen zur Nachhaltigkeit im Bauwesen wurde bereits vor einigen Jahren die Wiederverwendung von Bauteilen und Baustoffen aus rückgebauten Anlagen diskutiert. Gerade beim Rückbau von massigen Betonbauteilen des Wasserbaus würde sich die Wiederverwendung von „altem“ Beton nach entsprechender Aufbereitung anbieten. Aktuelle universitäre Forschung behandelt den Einsatz von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen und schlägt diesen unter Einhaltung bestimmter Randbedingungen vor. Der Einsatz von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen bietet neben ökologischen Vorteilen (rohstoffsparend, müllvermeidend) auch wirtschaftliche Anreize. Grundlegende Forschungserkenntnisse liegen vor, eine Übertragung auf Verkehrswasserbauten mit entsprechend großen Abmessungen und hohen Anforderungen an die Dauerhaftigkeit (Frostbeständigkeit, Wasserundurchlässigkeit) fehlt bisher. Zusätzlich beschränken die bisherigen Regelungen den Anteil von rezyklierten Gesteinskörnungen für Außenbauteile auf 25 bis 35 %. Auf Grund der massigen Bauwerke der WSV verbleibt somit (bei annähernd gleicher Kubatur Altbau/Neubau) eine erhebliche Restmenge, während andererseits wegen der geringen statischen Anforderungen ein deutlich höherer Anteil rezyklierter Gesteinskörnungen z. B. im Kernbereich möglich sein sollte.

Ziel des Forschungs- und Entwicklungs-Vorhabens (FuE-Vorhabens) war es, die vorliegenden Erkenntnisse auf die Belange des Verkehrswasserbaus zu übertragen und Möglichkeiten und Grenzen aufzuzeigen. Prinzipiell sollte die Einsatzmöglichkeit von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen für Verkehrswasserbauwerke beschrieben und eingegrenzt werden.

## 2 Untersuchungsmethoden

Neben einem umfangreichen Literaturstudium wurden Laboruntersuchungen mit vorliegendem Abbruchmaterial durchgeführt, um die Eigenschaften des Werkstoffs zu bestimmen. Parallel sind statische Vergleichsbetrachtungen mit modifizierten, aus dem Literaturstudium gewonnenen Festigkeitsparametern gemacht worden.

## 3 Ergebnisse

### 3.1 Literaturstudium

Speziell im Rahmen eines groß angelegten Forschungsprojekts BIM (Baustoffkreislauf im Massivbau) wurden umfangreiche Erkenntnisse gewonnen (<http://www.b-i-m.de>).

Der Einsatz von Betonbrechsand (0-2 mm, teilweise 0-4 mm) wird allgemein kritisch gesehen. Die Festigkeitskennwerte sinken stark ab (bis zu 50 %), zudem nimmt die Streuung der Kennwerte erheblich zu, siehe [1], [2], [3]. Teilweise wird diese Kornfraktion direkt durch Natursand ersetzt, z. B. [4], [5], andere Forscher empfehlen aus Gründen der Gebrauchstauglichkeit (Frostwiderstand, Carbonatisierung) eine Beschränkung des Brechsandanteils auf 50 % (+50 % Natursand) [6], [2]. Die formelmäßigen Zusammenhänge zwischen Druckfestigkeit, Zugfestigkeit und E-Modul gelten bei 100 % Brechsandanteil nicht [7].

Die rezyklierten Gesteinskörnungen weisen durch ihre Beschädigung infolge der Aufbereitung sowie durch anhaftende Zementsteinanteile eine höhere Wasseraufnahme auf, die eine Vorab-Wässerung erfordern. Die Wichte ist mit ca. 2 t/m<sup>3</sup> kleiner als bei normalen Gesteinskörnungen aber größer als bei leichten Gesteinskörnungen. Die Druckfestigkeit der Gesteinskörnungen ist mit ca. 100 N/mm<sup>2</sup> kleiner als bei nor-

malen Gesteinskörnungen mit dichtem Gefüge, aber ebenfalls größer als bei leichten Gesteinskörnungen. Teilweise sind die Betone frostbeständig nach dem CIF-Verfahren, obwohl die Gesteinskörnungen keinen ausreichenden Frostwiderstand hatten [8], [6].

Der Einfluss der Festigkeit des Altbetons wird unterschiedlich beurteilt. Während [1] eine leichtere Aufbereitung von Beton mit geringerer Festigkeit feststellt, was weniger anhaftenden Zementstein bringt und damit qualitativ gute rezyklierte Gesteinskörnungen, weist [3] mit zwei speziell hergestellten Rezepturen mit unterschiedlichen Festigkeiten nach, dass Altbeton mit niedrigerer Festigkeit auch nach dem Recycling als Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen eine niedrigere Festigkeit bringt. Wahrscheinlich spielen hier der Unterschied in den Festigkeiten sowie das Aufbereitungsverfahren eine entscheidende Rolle. Die Verwertung von labormäßig hergestelltem Beton nach kurzer Zeit als Altbeton zur Gewinnung rezyklierter Gesteinskörnungen muss kritisch eingestuft werden in Bezug zur Übertragbarkeit auf reale Bauwerke. Die real bei alten Bauwerken u. U. vorhandenen, geringen Festigkeiten (z. B. alte Schleusen) sind planmäßig im Labor nicht mehr herstellbar.

Die Festigkeitseigenschaften können durch die Rezeptur und den w/z-Wert gesteuert werden. Bei den Untersuchungen wurde in der Regel zum Vergleich ein Beton mit natürlichen Gesteinskörnungen und gleicher Rezeptur erstellt.

### Druckfestigkeit

Kein Einfluss, wenn die DAfStb-Richtlinie berücksichtigt wird [9]; ansonsten Reduktion in Abhängigkeit der ersetzten Kornfraktionen:

- bei 100 % Ersatz > 4 mm:  
10-25 % [1], 10-30 % [4], 25-30 % [2], 23 % [6]
- bei 100 % Ersatz aller Fraktionen:  
50 % [2]

### Zugfestigkeit

Kein Einfluss, wenn die DAfStb-Richtlinie berücksichtigt wird [9]; ansonsten Reduktion in Abhängigkeit der ersetzten Kornfraktionen:

- bei 100 % Ersatz > 4 mm:  
Biegezugfestigkeit  
keine Reduktion gegenüber Normalbeton, siehe [1], [4],  
Spaltzugfestigkeit  
20 % [2], höher als bei Normalbeton [6], 0-60 % [10].
- bei 100 % Ersatz aller Fraktionen:  
Biegezugfestigkeit  
5-35 % [4], 35 % [1]  
Spaltzugfestigkeit  
20 % [1]

### E-Modul

Kein Einfluss, wenn die DAfStb-Richtlinie berücksichtigt wird [9]; ansonsten Reduktion in Abhängigkeit der ersetzten Kornfraktionen:

- bei 100% Ersatz > 4 mm:  
20 % [4], 10-30% [1], 25-35 % [2], 20 % [5], 12-20 % [10], 23 % [6]
- bei 100 % Ersatz > 4 mm und 50 % Ersatz < 4 mm  
33 % [6]
- bei 100 % Ersatz aller Fraktionen:  
43 % [6], erheblich nach [3]

### Weitere Eigenschaften

Reduzierung der Schubtragfähigkeit ca. 20 % [1]

- Zunahme Kriechen 50-60 % [4], 30 % [2], 30 % [3], 43 % [5]
- Reduzierung der Dauerstandfestigkeit: Faktor 0,8 (statt 0,85) [4]
- Schwindverformungen sind größer [7].

Die Ergebnisse sind in eine Richtlinie geflossen, DAfStb 1998 [9], die den Einsatz von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen regelt. Danach ist die Verwendung von rezyklierten Gesteinskörnungen > 2 mm sehr stark begrenzt und rezyklierte Gesteinskörnungen < 2 mm (Brechsand) dürfen überhaupt nicht verwendet werden. Damit sind die möglichen Einsatzmengen rezyklierter Gesteinskörnungen sehr begrenzt.

Unter diesen Randbedingungen weist der Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen annähernd gleiche Parameter auf wie Beton mit natürlichen Gesteinskörnungen und kann entsprechend konzipiert und bemessen werden. Mit dieser Richtlinie kann mit rezyklierten Gesteinskörnungen Beton nach DIN 1045 hergestellt werden inkl. wu-Beton, hoher Widerstand gegen schwachen chemischen Angriff und hohem

Frostwiderstand. Frost-Tausalz-widerstand kann nicht erreicht werden.

Im Rahmen einer Überarbeitung der DAfStb-Richtlinie [11], wurden die zulässigen Anteile an rezyklierten Gesteinskörnungen erhöht. Zum Entwurf dieser Richtlinie wurden im Jahr 2003 seitens der BAW zwei Einsprüche formuliert, die aber bei der Einspruchs-sitzung abgewiesen wurden:

- Mit der Verwendbarkeit von alkaliempfindlichen rezyklierten Gesteinskörnungen der Alkaliempfindlichkeitsklassen E II (bedingt brauchbar) und E III (bedenklich) unter feuchten Umgebungsbedingungen und bei massigen Bauteilen (Feuchtigkeitsklasse WA) ist die Anwendung deutlich erweitert worden. Inwieweit die vorbeugenden Maßnahmen gemäß Alkalirichtlinie für die Feuchtigkeitsklasse WF ausreichend sind, ist durch Erfahrungen nicht ausreichend abgesichert. Es bestehen Bedenken, dass durch an den Körnern anhaftende Mörtelbestandteile ggf. vorhandene Alkalianreicherungen aus dem Altbeton in den neuen Beton eingebracht werden. In diesem Fall würde der Alkaligehalt – ähnlich wie durch eine Alkalizufuhr von außen – unabhängig von den Betonausgangsstoffen erhöht. Wenn alkaliempfindliche rezyklierte Gesteinskörnungen eingesetzt werden, sollten daher zumindest die vorbeugenden Maßnahmen der Feuchtigkeitsklasse WA eingehalten werden.
- Die Höchstanteile der im Beton verwendbaren rezyklierten Gesteinskörnungen wurden erhöht. Der zulässige Anteil an Splitt > 2 mm beträgt jetzt in Abhängigkeit von der Expositions-kategorie für Betonsplitt (Typ 1) 25 bis zu 45 Vol.-% (früher 20 bis 25 Vol.-%), für den Bauwerkssplitt (Typ 2) 25 bis 35 Vol.-%. Im Gegensatz dazu ist Brechsand generell nicht mehr einsetzbar. Hinsichtlich der Dauerhaftigkeit (Widerstand gegen Carbonatisierung, Frostangriff und schwachen chemischen Angriff) bestehen auch mit den erhöhten Gehalten an rezyklierten Gesteinskörnungen keine Bedenken, sofern diese die Grundanforderungen gemäß DIN 4226-100 einhalten. Die detaillierte Aufteilung der zulässigen Anteile rezyklierter Gesteinskörnungen > 2 mm gemäß Tabelle 1 können mit der gesichteten Literatur (z. B. DAfStb Hefte 504, 505, 507, 513, 514 sowie www.b-i-m.de) nicht nachvollzogen werden. Die dort beschriebenen Untersuchungen wurden vielfach mit

0/50/100 % Betonsplitt bzw. Brechsand gemacht und weisen teilweise unterschiedliche Ergebnisse auf. So tritt auch eine Reduktion der Festigkeiten auf, die für die angegebenen Anteile bereits Bedeutung haben kann. Inwieweit die angegebenen Anteile gerechtfertigt sind, kann mit der Literatur nicht nachvollzogen werden.

Untersuchungen an Mischungen mit größeren Anteilen rezyklierter Gesteinskörnungen zeigen verminderte Festigkeiten sowie Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit. Zusätzlich sind bisher noch keine Untersuchungen zur Ermüdungsfestigkeit von Betonen mit rezyklierten Gesteinskörnungen durchgeführt worden, sodass ein Einsatz für Bauwerke mit ermüdungsrelevanter Belastung (z. B. Schleusen) nicht möglich ist.

### 3.2 Laboruntersuchungen an realem Material

Im Jahre 2004 wurden Materialproben des Betons der alten Schleuse in Sülzfeld gewonnen. Das Material wurde ordnungsgemäß mit einer Prallbrecheranlage als Hauptbrecher ohne vorgeschaltete Backenbrecher aufbereitet und vorgesiebt. Der Vorgang wird an Hand der Bilder 1 bis 6 verdeutlicht.

Für die Laboruntersuchungen standen folgende Gesteinskörnungen zur Untersuchung im Betonlabor der BAW Karlsruhe zur Verfügung:

• Recyclingsplitt 0/8	2000 kg
• Recyclingsplitt 8/16	900 kg
• Recyclingsplitt 16/32	300 kg

Es wurden umfangreiche Laboruntersuchungen im Baustofflabor der BAW durchgeführt mit dem Ziel, die Leistungsfähigkeit von Betonen mit größeren Anteilen rezyklierter Gesteinskörnungen zu bewerten. Daher wurden – exemplarisch für den Anwendungsbereich Schleusen-kammerwand – Betone mit gegenüber der DAfStb-Richtlinie erhöhten Anteilen an Recyclingmaterial (> 2 mm bis 75 %, zum Teil auch Brechsand bis 25 %) konzipiert und hergestellt.

Unter Verwendung von zwei Zementen mit unterschiedlicher Erhärtungscharakteristik (Portlandzement CEM I und Hochofenzement CEM III) ergaben sich bei Zementgehalten von jeweils 270 kg/m<sup>3</sup> und Zugabe von 30 kg/m<sup>3</sup> Flugasche die in der Tabelle 1 dargestellten Betonrezepturen.





Bild 1: Abbruch Schleuse Sülfeld-Süd



Bild 2: Grobaufbereitung des Betons



Bild 3: Prallbrecher zur Aufbereitung



Bild 4: Verschleißteile des Prallbrechers



Bild 5: Metallabscheidung



Bild 6: Aufbereitetes Material



Beton Nr.	Bauwerksbereich	Normanforderungen			Betonzusammensetzung			
		Expositionsklassen	Mindestfestigkeit	LP-Beton	w/z	Zement	Brechsand 0/2 mm	RC-Splitt 2/32 mm
<i>Normalbeton (Vergleichsbeton)</i>								
1	UW	XC4, XF1	C 25/30		0,60	CEM I	0 %	0 %
2	UW-OW	XC2, XF3, XM1		X	0,55			
<i>Recyclingbeton mit unterschiedlichen Anteilen an RC-Material</i>								
3	UW	XC4, XF1	C 25/30		0,60	CEM I	0 %	75 %
4	UW-OW	XC2, XF3, XM1		X	0,55			
5	UW	XC4, XF1		0,60	CEM III/A			
6	UW	XC4, XF1	C 25/30		0,60	CEM I	12,5 %	
7	UW-OW	XC2, XF3, XM1		X	0,55			
8	UW	XC4, XF1			0,60	CEM III/A		
9	UW	XC4, XF1	C 25/30		0,60	CEM I	25 %	
10	UW	XC4, XF1			0,60	CEM III/A		

Tabelle 1: Betonrezepturen der Laborversuche

Beton Nr.	Anteil RC-Material	Frischbeton		Festbeton				
		Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	Ausbreitmaß a <sub>10</sub> [mm]	Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ]			Spaltzugf. [N/mm <sup>2</sup> ]	E-Modul [N/mm <sup>2</sup> ]
				2 d	28 d	56 d		
<i>Normalbeton (Vergleichsbeton)</i>								
1	0 %	2,34	455	10,4	29,7	36,3	2,77	22600
2		2,26	365	10,8	25,2	34,1	2,64	24800
<i>Recyclingbeton mit unterschiedlichen RC-Anteilen</i>								
3	75 %	2,21	490	7,9	30,4	32,5	2,63	15600
4		2,06	450	4,4	18,5	21,4	1,30	15600
5		2,20	480	3,2	26,4	29,5	1,94	16967
6	87,5 %	2,16	455	7,8	28,0	29,5	2,22	13933
7		2,06	485	5,2	22,5	25,0	2,06	13900
8		2,14	465	2,4	20,0	23,0	2,15	12533
9	100 %	2,11	435	5,9	21,8	23,3	1,80	11933
10		2,13	380	3,2	20,4	22,4	2,61	11633

Tabelle 2: Versuchsergebnisse der Laboruntersuchungen

An den Betonen wurden die Frischbetoneigenschaften, die Festigkeitskennwerte (Druck- und Zugfestigkeit, E-Modul), die Wassereindringtiefe sowie das Schwindverhalten ermittelt. Tabelle 2 gibt einen Überblick der wichtigsten Betonkennwerte.

Es zeigte sich, dass bereits bei Recyclingbetonen ohne Brechsandanteil (bis 75 % RC-Material) die geforderte Festigkeitsklasse C25/30 bei Verwendung von Portlandzement (Beton 3) nach 28 Tagen nur knapp, bei Verwendung eines langsamer erhärtenden Hochofenzements (Beton 5) weder nach 28 noch nach 56 Tagen erreicht wird.

Bei gleichzeitiger Verwendung von Brechsand und Recycling-Splitt (Anteil RC-Material > 75 %, Betone 6 bis 10) sowie bei den Betonen mit erhöhtem Luftporengehalt (LP-Betone 4 und 7) werden die Festigkeiten für die geforderte Festigkeitsklasse C25/30 nicht erreicht. Der E-Modul aller Recyclingbetone weist sehr geringe Werte auf.

Auch die Prüfung der Schwindwerte zeigt mit zunehmendem Recyclinganteil deutlich stärkere Schwindmaße, wodurch die Reißneigung des Betons erhöht wird. Im den nachfolgenden Bildern ist das Schwindverhalten der Normalbetone (Bild 7) sowie der Luftporenbetone (Bild 8) dargestellt.

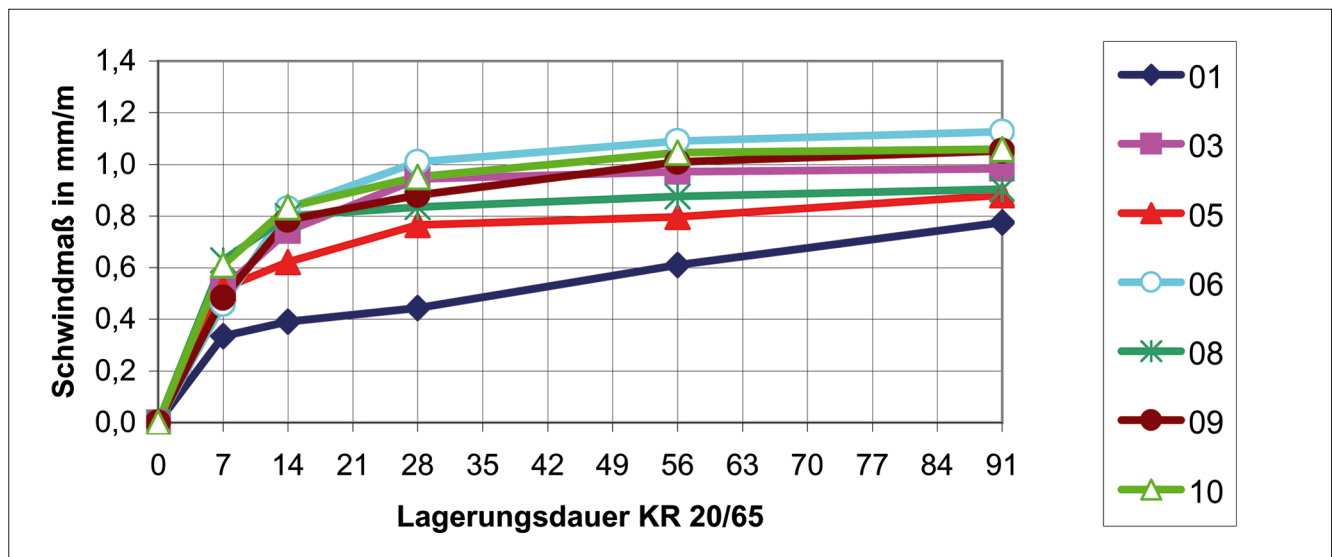


Bild 7: Schwindprüfung Normalbetone (Lagerung im Klimaraum 20/65)

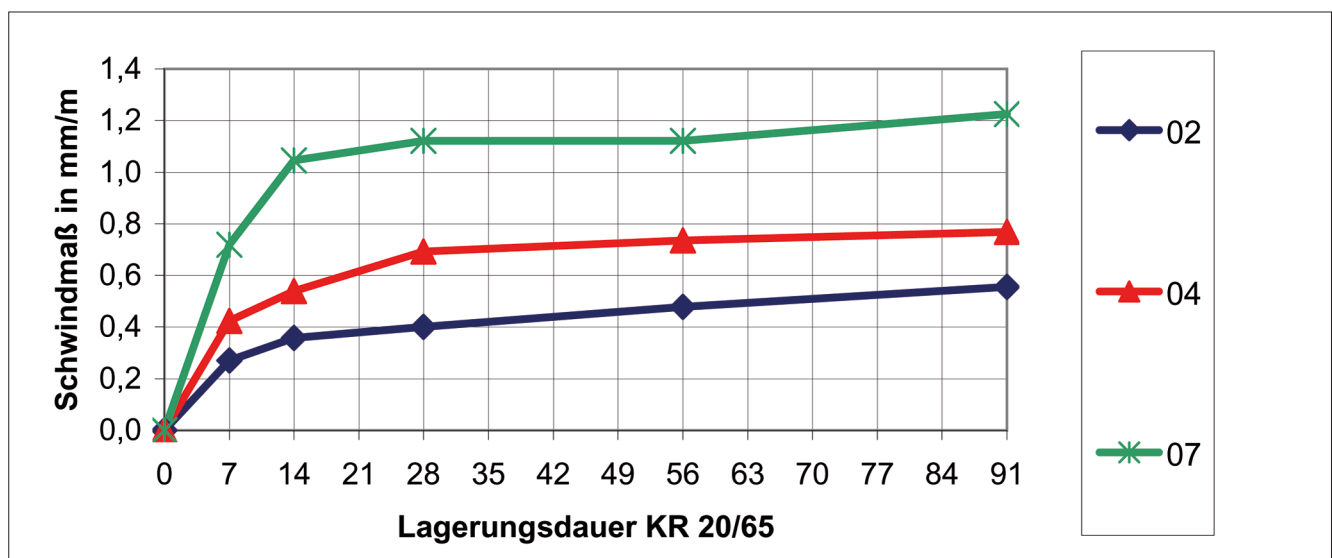


Bild 8: Schwindprüfung LP-Betone (Lagerung im Klimaraum 20/65)

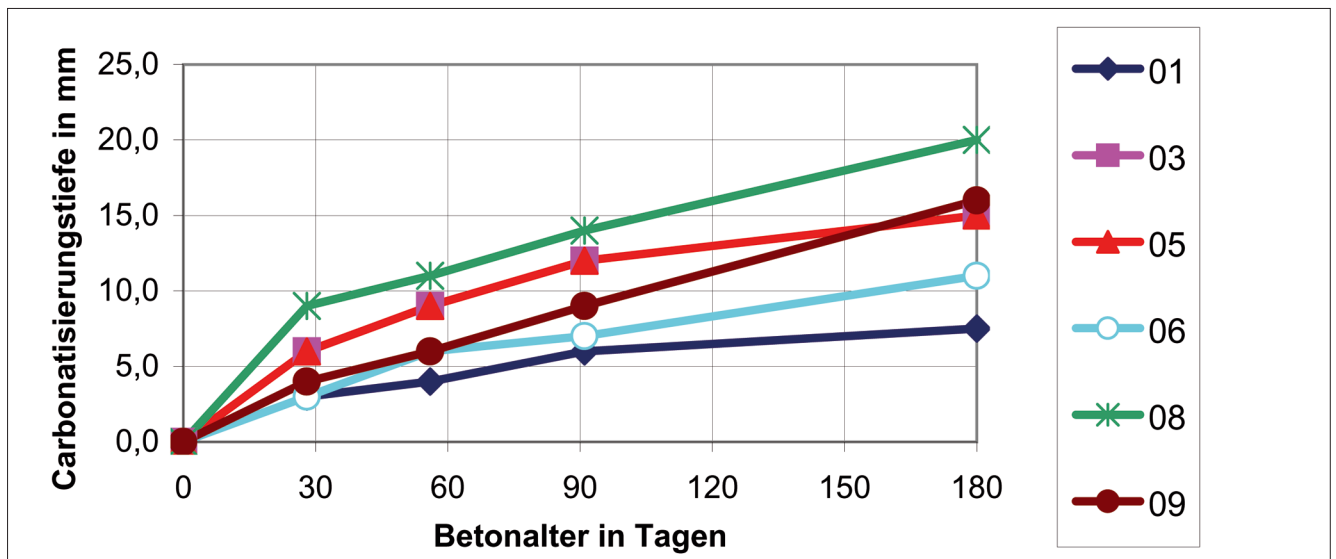


Bild 9: Carbonatisierungstiefe Normalbetone (Lagerung im Klimaraum 20/65)

Da Festigkeitseinbußen zu erwarten waren, wurden auch maßgebliche Dauerhaftigkeitseigenschaften untersucht, um die Leistungsfähigkeit der Betone bewerten zu können. Der Widerstand gegenüber Bewehrungskorrosion wurde bei den Betonen der Expositionsklasse XC4 durch die Prüfung der Carbonatisierungstiefe ermittelt. Die Lagerung der Proben erfolgte im Normalklima bei 20°C und 65 % relativer Luftfeuchte. Der Widerstand gegenüber Frostangriff wurde bei allen Portlandzementbetonen durch die Prüfung des Frostwiderstands im CIF-Test gemäß BAW-Merkblatt „Frostprüfung“ ermittelt.

Wie Bild 9 zeigt, wurden bei den Normalbetonen mit Recyclingmaterial bereits nach nur einem halben Jahr erhebliche Carbonatisierungstiefen von bis zu 2 cm festgestellt. Mit steigendem Anteil an Recyclingmaterial nimmt die Carbonatisierungstiefe auf z. T. mehr als das Doppelte des Vergleichsbetons zu. Bei den LP-Betonen wurde auf die Prüfung der Carbonatisierungstiefe verzichtet, da bei diesen in der Wasserwechselzone eingesetzten Betonen der Carbonatisierungsangriff nicht maßgeblich ist.

Auch die Untersuchungen zur Bewertung des Frostwiderstands zeigen, dass die Anforderungen bei den Betonen mit Recyclingmaterial nicht eingehalten werden können.

Obwohl die Abwitterungen (mit Ausnahme des Betons 9 mit 100 % Recyclingmaterial) im akzeptablen Bereich liegen, kommt es – insbesondere bei den Betonen ohne künstlich eingeführte Luftporen (Bild 10) – zu starken inneren Gefügeschäden, sodass der Grenzwert für den dynamischen E-Modul von 75 % nach 28 Frost-Tau-Wechseln deutlich unterschritten wird. Selbst bei Einführung künstlicher Luftporen kann der Grenzwert für innere Gefügeschäden bei den Recyclingbetonen nicht eingehalten werden (Bild 11).

Die Verwendung von Recyclingmaterial mit Anteilen > 35 % sowie insbesondere von Brechsand ist damit für Kammerwandbetone im Wasserwechselbereich mit Frostbeanspruchung (XF3) nicht möglich. Im Unterwasserbereich ist die Verwendung höherer Anteile denkbar, sofern die Festigkeitsanforderungen aus der Statik dies zulassen. Die Verwendung von Brechsand ist grundsätzlich nicht möglich.

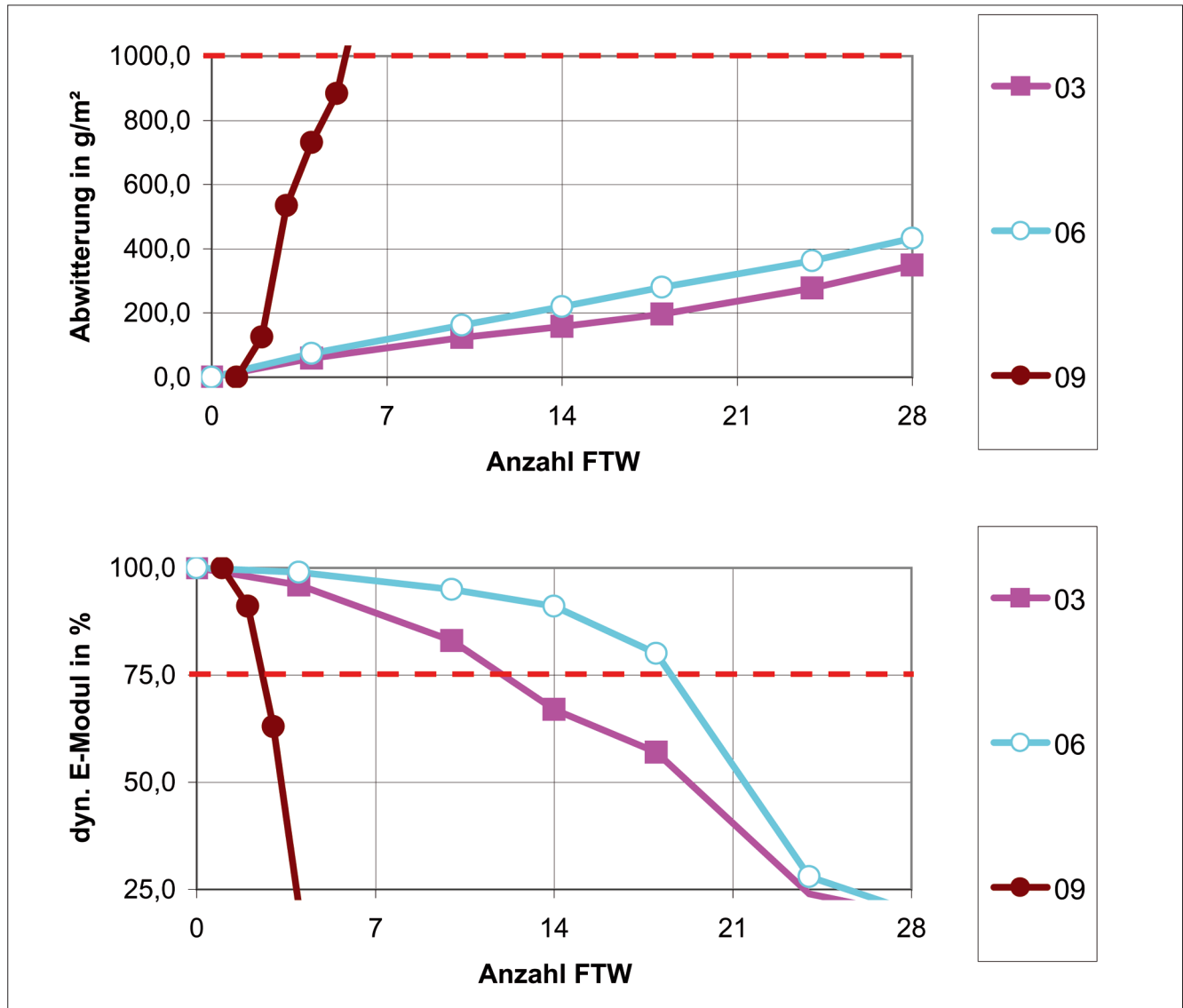


Bild 10: Frostprüfung Normalbetone mit CEM I nach CIF-Verfahren

### 3.3 Nachrechnung mit verminderten Festigkeitskennwerten

Um eine belastbare Aussage darüber treffen zu können, wie sich die Verwendung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen in Bezug auf Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit auswirkt, sollte am Beispiel des Querschnitts der neuen Schleuse in Sülfeld eine Bemessung für die Varianten Stahlbeton nach DIN 1045-1 (Nullvariante) und 100 % Ersatz des Grobkorns mit rezyklierter Gesteinskörnung aber Einsatz von Natursand (Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen) durchgeführt werden.

Im Rahmen der Vergleichsberechnung sollte das Augenmerk in erster Linie auf den erforderlichen Bewehrungsmengen die sich aus den Tragfähigkeitsnachweisen und den Nachweisen zur Gebrauchstauglichkeit ergeben liegen. Um die Ergebnisse später vergleichen zu können, wurde die Berechnung für beide Varianten mit einem Beton der Festigkeitsklasse C 20/25 durchgeführt. Als Bewehrungsstahl kam BSt 500 S zur Verwendung. Die Materialparameter für den in der Nullvariante verwendeten Beton können direkt aus Tabelle 9 der DIN 1045-1 entnommen werden, während für die Variante mit rezyklierten Gesteinskörnungen einzelne Werte entsprechend angepasst werden müssen.



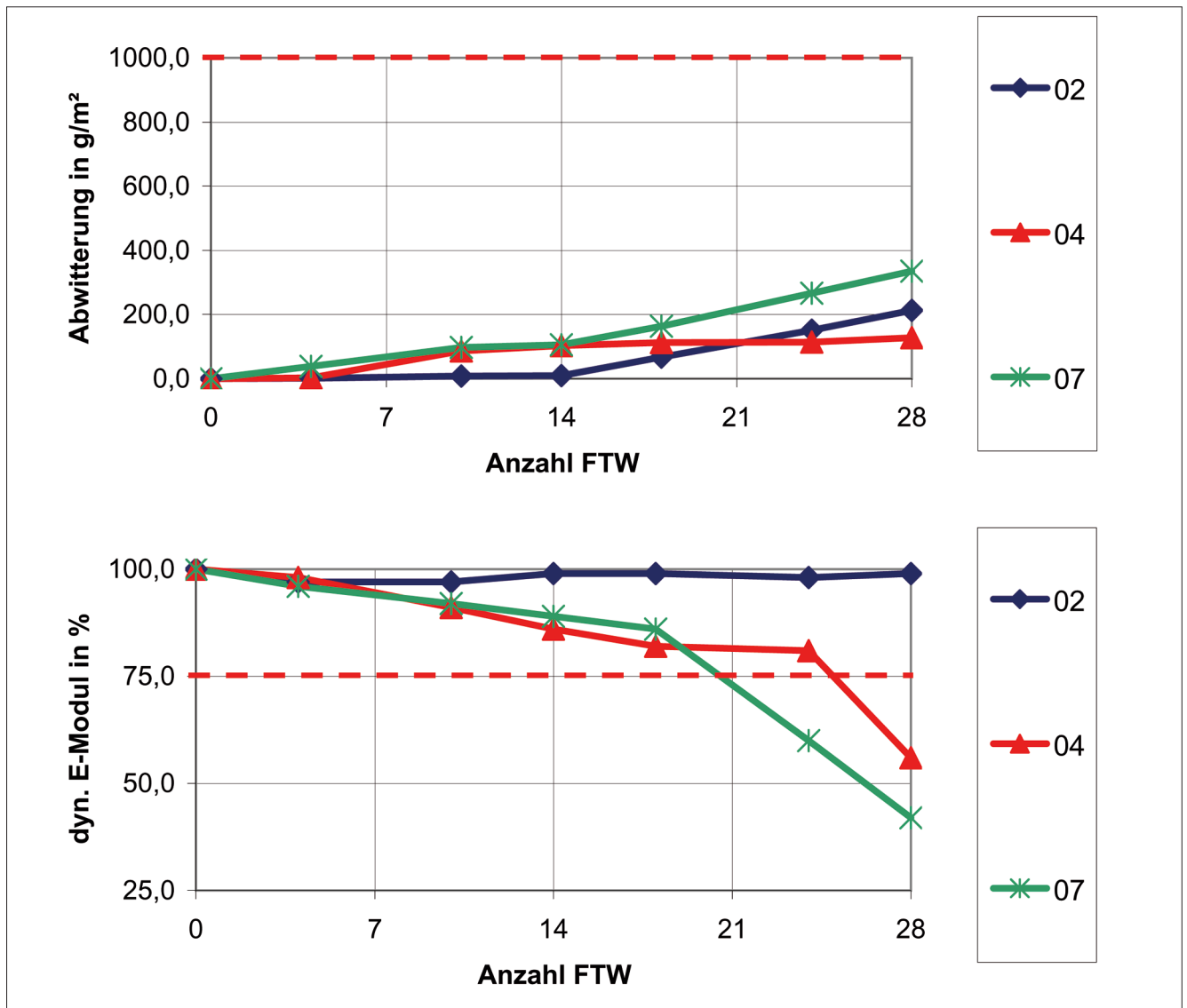


Bild 11: Frostprüfung Luftporenbetone mit CEM I nach CIF-Verfahren

Um für Beton mit Zuschlag aus rezyklierten Gesteinskörnungen eine Stahlbetonbemessung nach DIN 1045-1 zu ermöglichen, müssen die verwendeten Gesteinskörnungen den Anforderungen von DIN 4226-100 (Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel) genügen und weiterhin dürfen die dort angegebenen Anteile an rezykliertem Material nicht überschritten werden. Insgesamt wird zwischen vier Liefertypen entsprechend ihrer stofflichen Zusammensetzung unterschieden, siehe Tabelle 3:

- Typ 1: Betonsplitt / Betonbrechsand
- Typ 2: Bauwerksplitt / Bauwerbrechsand
- Typ 3: Mauerwerksplitt / Mauerwerbrechsand
- Typ 4: Mischsplitt / Mischbrechsand

Die eigentliche Herstellung und Klasseneinteilung ist in DIN 1045-2 geregelt.

Für die vorliegende Vergleichsberechnung ist es erforderlich, die Materialparameter anzupassen um eine Bemessung nach DIN 1045-1 zu ermöglichen. Für einen Beton C 20/25 unter der Annahme einer Rohdichte der Gesteinskörnungen von  $\rho = 2200\text{kg/m}^3$  ergeben sich folgende Betonkennwerte:

Bestandteile	Zusammensetzung Massenanteil in Prozent			
	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4
Beton und Gesteinskörnungen nach DIN 4226-1	≥ 90	≥ 70	≤ 20	≥ 80
Klinker, nicht porosierter Ziegel	≤ 10	≤ 30	≥ 80	
Kalksandstein			≤ 5	
Andere mineralische Bestandteile <sup>a</sup>	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 2
Asphalt	≤ 1	≤ 1	≤ 1	
Fremdbestandteile <sup>b</sup>	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,5	

<sup>a</sup> Andere mineralische Bestandteile sind zum Beispiel: porosierter Ziegel, Leichtbeton, Porenbeton, haufwerksporiger Beton, Putz, Mörtel, poröse Schlacken, Bimsstein.

<sup>b</sup> Fremdbestandteile sind zum Beispiel: Glas, Keramik, NE-Metallschlacke, Stückgips, Gummi; Kunststoff, Metall, Holz, Pflanzenreste, Papier, sonstige Stoffe

Tabelle 3: Stoffliche Zusammensetzung der Liefertypen

- mittlere Druckfestigkeit:

$$f_{cm} = 28 \frac{N}{mm^2}$$

- mittlere Zugfestigkeit:

$$f_{ctm} = 0,29 \cdot f_{cm}^{\frac{2}{3}} \cdot \left( \frac{\rho}{2400} \right)^3$$

$$= 0,29 \cdot 28^{\frac{2}{3}} \cdot \left( \frac{2200}{2400} \right)^3 \approx 2,0 \frac{N}{mm^2}$$

- Elastizitätsmodul:

$$E_{cm} = 9100 \cdot f_{cm}^{0,33} \cdot \left( \frac{\rho}{2400} \right)^2$$

$$= 9100 \cdot 28^{0,33} \cdot \left( \frac{2200}{2400} \right)^2 \approx 23000 \frac{N}{mm^2}$$

Unter der Voraussetzung, den Beiwert für die Dauerstandfestigkeit  $\alpha_t$  auf 0,8 zu reduzieren, kann das Parabel-Rechteck-Diagramm in seiner allgemeinen Form für die Bemessung angewandt werden. Die Abminderung begründet sich darin, dass das Verbundverhalten Gesteinskörnungen zu Zementsteinmatrix von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen dem eines Leichtbetons ähnelt.

Zusätzlich zur Berücksichtigung der Dauerstandfestigkeit mit dem Faktor  $\alpha = 0,80$  wurde der Einfluss der eingelegten Längsbewehrung für die Tragfähigkeit des Querschnitts ohne erforderliche Querkraftbewehrung auf 80 % reduziert.

Es zeigt sich, dass auf Grund der verminderten Festigkeitskennwerte allenfalls geringfügige Bewehrungserhöhungen erforderlich sind. Die Nachweise in den Grenzzuständen der Tragfähigkeit ergeben eine maximale Erhöhung um 5 % und die Nachweise in den Grenzzuständen der Gebrauchstauglichkeit eine Erhöhung um maximal 12 %.

Unzureichende Erkenntnisse gibt es bisher zum Ermüdungsverhalten von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen, sodass er nur für ruhende Beanspruchung eingesetzt werden kann.

## 4 Schlussfolgerungen

In den 90er Jahren des vergangenen Jahrhunderts wurde in der Verwendung von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen eine innovative, ökologische und zukunftsfähige Technologie gesehen. Mit entsprechendem Forschungsaufwand wurde das Thema eingehend untersucht, die Ergebnisse sind in zwei Richtlinien eingeflossen.

Als Ergebnis lässt sich Folgendes festhalten:

- Es ist möglich, mit rezyklierten Gesteinskörnungen einen Beton herzustellen, der nach DIN 1045-1 bemessen werden kann. Die selbst durchgeführten Laboruntersuchungen sehen die nach der neuen DAfStb-Richtlinie [11] zulässigen Anteile an rezyklierten Gesteinskörnungen kritisch. Es wird empfohlen, die Anteile gemäß DAfStb 1998 [9] zu beschränken. Nachteil ist dabei ein auf 20 bis 25 % begrenzter Anteil an rezyklierten Gesteinskörnungen. Der Beton darf nur bei nicht ermüdungswirksamer Belastung eingesetzt werden. Ein wirtschaftlicher Einsatz einer Aufbereitungsanlage vor Ort beim Ersatz eines bestehenden Bauwerks ist damit schwierig zu erreichen.
- Werden höhere Anteile an rezyklierten Gesteinskörnungen eingesetzt, ergeben sich Festigkeits- einbußen, die starken Streuungen unterliegen. Vergleichsberechnungen belegen, dass abgeschätzte Festigkeitsreduktionen nur zu geringen Bewehrungsmehrmengen führen. Allerdings konnte eine Frostbeständigkeit nicht nachgewiesen werden.

Für Verkehrswasserbauwerke reduziert sich ein wirtschaftlicher Einsatz nur für untergeordnete Bauwerke bzw. untergeordnete Bereiche in Bauwerken, wie z. B. Kernbetonzonen bei zweischaliger Bauweise.

Insgesamt scheint der wirtschaftliche Anreiz für den Einsatz von Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen nicht vorhanden zu sein, da außer einigen Pilotprojekten keine Bauwerke mit rezyklierten Gesteinskörnungen errichtet wurden. Unter Umständen ist dies auf einen zu geringen Preisvorteil gegenüber herkömmlichen Gesteinskörnungen zurück zu führen und auf anderweitige Verwendung des rezyklierten Materials beispielsweise im Straßenbau.

Parallel sind Untersuchungen veröffentlicht worden, die im Rahmen einer Ökobilanz darlegen, dass der Einsatz von rezyklierten Gesteinskörnungen für die Umwelt nur geringe Vorteile bringt, da der maßgebliche Einfluss der Ökobilanz für die Betonherstellung die Zementherstellung ist.

## 5 Literatur

### 5.1 Zitierte Literatur

- [1] LÜ, S.: Schubtragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit rezyklierten Zuschlägen. DAfStb Heft 504. Berlin: Beuth Verlag, 2000
- [2] MÜLLER, C.: Beton als kreislaufgerechter Baustoff. DAfStb Heft 513. Berlin: Beuth Verlag, 2001
- [3] KERKHOFF, B.: Einfluss von rezykliertem Zuschlag aus Betonbruch auf die Eigenschaften, insbesondere die Dauerhaftigkeit von Beton. DAfStb Heft 514. Berlin: Beuth Verlag, 2001
- [4] MEISSNER, M.: Biegetragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit rezyklierten Zuschlägen. DAfStb Heft 505. Berlin: Beuth Verlag, 2000
- [5] GRÜBL, P.: Der Einfluss von Recyclingzuschlägen aus Bauschutt auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften und die Bewertung hinsichtlich der Eignung für Baustellen- und Transportbeton nach DIN 1045. Zwischenbericht Teilprojekt E03, Darmstadt: www.b-i-m.de, 1998
- [6] DILLMANN, R.: Beton mit rezyklierten Zuschlägen. In: beton, Heft 2/99, S. 86–91
- [7] ZILCH, K.: Betonkennwerte für die Bemessung und das Verbundverhalten von Beton mit rezyklierten Zuschlägen. DAfStb Heft 507. Berlin: Beuth Verlag, 2000
- [8] WIES, S.: Frostwiderstand von rezykliertem Zuschlag aus Altbeton und mineralischen Baustoffgemischen (Bauschutt). DAfStb Heft 514. Berlin: Beuth Verlag, 2001
- [9] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie Beton mit rezykliertem Zuschlag. Teil 1: Betontechnik. Teil 2: Betonzuschlag aus Betonsplitt und Betonbrechsand. Ausgabe August 1998
- [10] Statusseminar BMBF-Vorhaben „Baustoffkreislauf im Massivbau“: Einfluss des Gehalts an Recyclingsplitt auf die Festbetoneigenschaften. www.b-i-m.de . 30.06.1998
- [11] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100. Ausgabe Dezember 2004

## 5.2 Literatur zur Vertiefung

BREITENBÜCHER, R.: Recycling von Frisch- und Festbeton. In: beton, Heft 9/94, S. 510-514

KRASS, K.: Bautechnische und ökologische Aspekte des Betonrecyclings. In: Betonwerk und Fertigteil-Technik, Heft 1/1994, S. 103-108

MÜLLER, C.: Verwertung von Brechsand und Bauschutt. DAFStb Heft 506. Berlin: Beuth Verlag, 2000

REINHARDT, H.-W.: BiM-Online – Das interaktive Informationssystem zu „Baustoffkreislauf im Massivbau“. DAFStb Heft 500. Berlin: Beuth Verlag, 2000

ROMMEL, T.: Leitfaden für die Erfassung und Bewertung der Materialien eines Abbruchobjektes. DAFStb Heft 493. Berlin: Beuth Verlag, 1999

WASSING, W.: Einfluss von Feinstoffen aus Betonbruch auf den Hydratationsfortschritt. DAFStb Heft 514. Berlin: Beuth Verlag, 2001

WÖHNEL, U.: Recyclingbeton für Bauteile im Hochbau. In: beton, Heft 9/94, S. 499-503

WÖRNER, J.-D.: Zulässige Toleranzen für die Abweichungen der mechanischen Kennwerte von Beton mit rezyklierten Zuschlägen. DAFStb Heft 508. Berlin: Beuth Verlag, 2000

.