

Cathleen Hoffmann  
Frank Jacobs

## Überblick über Regelungen zu Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung

*Unter dem Aspekt der Nachhaltigkeit gewinnt die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung in der Betonindustrie zunehmend an Bedeutung, weshalb sowohl national als auch international Merkblätter und Normen geschaffen werden. Nachfolgend wird ein Überblick über diese Regelungen gegeben und Übereinstimmungen, Widersprüche und Wissenslücken aufgezeigt. Es wird vor allem auf europäische Länder eingegangen, da diese mehrheitlich die europäischen Normen (CEN) verwenden.*

### 1 Einleitung

Rezyklierte Gesteinskörnung soll vermehrt im Bauwesen verwendet werden, um einerseits die Deponierung von rückgebauten Baustoffen zu mindern und andererseits die Gewinnung natürlicher Gesteinskörnung zu reduzieren. International wird Recyclingbeton (Beton mit nennenswerten Anteilen an rezyklierter Gesteinskörnung) bisher kaum als Konstruktionsbeton verwendet. In der Schweiz lag die hergestellte Menge an Recyclingbeton (Beton mit mindestens 25 M.-% an rezyklierter Gesteinskörnung) in den letzten Jahren bei etwa 1,5 Millionen Tonnen/Jahr. Das entspricht etwa 5% der insgesamt produzierten Betonmenge. Beton mit weniger als 25 M.-% an rezyklierter Gesteinskörnung gilt in der Schweiz als Beton, für den die üblichen Regelungen u. a. bei der Bemessung gelten. Einem vermehrten Einsatz von Recyclingbeton steht jedoch die derzeit noch immer bestehende Unsicherheit im Umgang mit diesem Beton von Seiten der Bauherren, Planer und Betonproduzenten entgegen. Da sich Recyclingbeton in seinen Frisch-

und Festbetoneigenschaften von Beton mit natürlicher Gesteinskörnung unterscheiden kann, scheuen diese noch häufig seine Verwendung. Zu dieser Unsicherheit kommt hinzu, dass ein etwas größerer Aufwand (Einbau, Prüfung) beim Einsatz von Recyclingbeton vermutet wird, und dass Recyclingbeton – wenn überhaupt – nur geringfügig preiswerter als Beton mit natürlicher Gesteinskörnung verkauft wird. Zur Förderung der Anwendung von Recyclingbeton initiierte der Schweizerische Ingenieur- und Architektenverein (SIA) die Überarbeitung der 1994 herausgegebenen Empfehlung SIA 162/4 [1] zum Einsatz von Recyclingbeton. Das neue Merkblatt *SIA 2030 Recyclingbeton* [2] berücksichtigt die aktuellen Normen (u. a. SN EN 206-1 [3], SIA 262 [4]) und zeigt klar auf, bei welcher stofflichen Zusammensetzung Unterschiede zwischen Recyclingbeton und Beton mit natürlicher Gesteinskörnung zu erwarten sind und wo keine Besonderheiten bestehen. Zur Erarbeitung des im Februar 2010 erschienen Merkblattes wurde ein Überblick über die bestehenden europäischen Normen und Richtlinien erarbeitet [5]. Dabei zeigten sich Übereinstimmungen aber auch Unterschiede in den Regelungen für die Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung im Beton. Nachfolgend werden die verschiedenen nationalen Regelungen dargestellt und abschließend wird auf den Stand in der Schweiz eingegangen.

### 2 Anforderungen an die Gesteinskörnung

Tabelle 1 enthält eine nicht abschließende Zusammenstellung der Anfor-

derungen, die von verschiedenen Ländern an die Zusammensetzung rezyklierter Gesteinskörnung gestellt werden.

Es zeigt sich, dass einige Länder Anforderungen an die minimal zulässige Korngröße stellen. Minimale Korngrößen (2 beziehungsweise 4 mm) werden vorgeschrieben, da einerseits die Bestimmung der Art der Gesteinskörnung (Beton, Ziegel, natürlicher Sand, etc.) bei dieser Korngröße sehr aufwändig bis unmöglich ist und andererseits in der Feinfraktion höhere Gehalte an qualitätsmindernden Bestandteilen vermutet werden bzw. auftreten können. In der Schweiz hingegen werden keine Anforderungen an die minimale Korngröße gestellt, da nachweislich die Verwendung dieser Korngrößen nicht notwendigerweise zu Problemen führen muss (vgl. [6], [7]) und es dem Betonwerk überlassen bleiben soll, geeignete Betonrezepturen zu entwickeln. In der Schweiz erfolgt die Bestimmung der Anteile der rezyklierten Gesteinskörnung gemäß SN EN 933-11 [8]. Entsprechend dieser Norm wird die grobe Gesteinskörnung ausgezählt, da davon ausgegangen wird, dass sich die feine Gesteinskörnung davon nicht wesentlich unterscheidet.

Die aufgeführten Länder definieren unterschiedlich, mit welcher Art und mit welchem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung (Betongranulat, Kalksandstein, Klinker und andere mineralische Bestandteile) ein Recyclingbeton hergestellt werden darf. Die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung sind abhängig vom geplanten Einsatzgebiet des Recyclingbetons und dementsprechend den zu erzielenden Betoneigenschaften.

Tabelle 1. Anforderungen an die Zusammensetzungen der rezyklierten Gesteinskörnung

Land	Deutschland	Großbritannien	Niederlande	Österreich	Schweiz	Norwegen	Dänemark	Japan	USA	Belgien	RILEM
Normen/Regelungen/Richtlinien	DIN 4226-100, Baustoffkreislauf-Richtlinie DAStb [19, 20, 21]	BS 8500-2 [13]	NEN 8005 CUR-VB [14]	BV [30]	SIA-Merkblatt (MB 2030) [2]	NB 2003 [11]	Danish Concrete Association [16]	A 5021 [31]	C 33 C 350 [32, 33]	RILEM [12]	RILEM [12]
Korngröße [mm]	> 2	> 4	> 4				> 4		> 4,75 mm		> 4
Gesteinskörnung [M.-%] aus	Typ 1 ≥ 90	RCA keine Anforderung	≤ 20 <sup>2)</sup>	Typ I, II	C <sup>3)</sup>	1	M <sup>3)</sup>			Typ II	Typ II
Beton	≥ 70		≤ 20 <sup>2)</sup>		≥ 25	> 95	≥ 95			> 95	100 <sup>5)</sup>
natürl. Sand, Kies	≤ 10	≤ 5,0	≤ 10 <sup>2)</sup>		< 75						≥ 80
Klinker, nicht porosierter Ziegel	≤ 30	≤ 100			≤ 5		≤ 5		je nach Stoff und Anwendung < 2 bis < 5		≤ 10
Kalksandstein	≤ 5							≤ 2			
andere mineralische Bestandteile	≤ 2	≤ 0,5 <sup>1)</sup>		≤ 5-12							
Asphalt	≤ 1	≤ 5,0			≤ 1		≤ 3				
Fremdbestandteile [M.-%]	≤ 0,2	≤ 1,0		≤ 1	≤ 0,3	je nach Stoff < 0,5 bis < 5	je nach Stoff < 0,1 bis < 1	je nach Stoff < 0,1 bis < 5		nicht mineralische Stoffe: < 1 organische Stoffe < 0,5	
Trockenrohichte [kg/m <sup>3</sup> ]					≥ 2000 <sup>4)</sup>	> 1500	> 2000	≥ 2500		> 2100	≥ 2000
						> 2000					≥ 2400

<sup>1)</sup> Material mit Dichte < 1000 kg/m<sup>3</sup>; <sup>2)</sup> Vol.-%; <sup>3)</sup> C: Betongranulat; Bestimmung gemäß SN EN 933-11; <sup>4)</sup> Rohdichte; <sup>5)</sup> Gesteinskörnung als Betongranulat bezeichnet

Da die rezyklierte Gesteinskörnung nicht aus einem homogenen Vorkommen stammt, kann diese – im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung – größere Schwankungen in ihrer stofflichen Zusammensetzung aufweisen. Diese Schwankungen beeinflussen die Frischbetoneigenschaften. Je nach verwendeter Menge, Korngruppe und Art der rezyklierten Gesteinskörnung kann der Hohlraumgehalt des lose geschütteten Granulats wegen des höheren Anteils an nicht-kubischen Körnern und der Rauigkeit der Körner erhöht sein. Entsprechend kann ein erhöhter Gehalt an Zement- bzw. Bindemittelleim oder Fließmittel benötigt werden, um den Frischbeton gut verarbeiten zu können. Ein weiterer Unterschied zu natürlicher Gesteinskörnung kann die vergleichsweise höhere Porosität sein. Diese führt unter Umständen zu einer erheblichen Wasseraufnahme während des Mischvorgangs und teilweise auch während des anschließenden Transports. Ein tendenziell schnelleres Ansteifen des Recyclingbetons und dementsprechend eine schnellere Abnahme der Verarbeitbarkeit, als dies für Beton mit natürlicher Gesteinskörnung üblich ist, kann die Folge sein.

Die oben genannten charakteristischen Eigenschaften der rezyklierten Gesteinskörnung als auch der höhere Gehalt an Bindemittelleim beeinflussen bestimmte Festbetoneigenschaften, wie beispielsweise das Schwindmaß  $\epsilon_{cs}$  und den Elastizitätsmodul  $E_{cm}$  (siehe Abschnitt „Mechanische Eigenschaften und Bemessung“).

In der Schweiz soll mit den Regelungen zur stofflichen Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung einerseits eine weitgehende Wiederverwendung des jeweiligen Granulats erreicht werden. Andererseits soll eine Vermischung beim Rückbau von Betonabbruch mit anderem mineralischen Rückbaumaterial vermieden werden (BUWAL [9], BAFU [10]).

Insgesamt zeigen sich drei Typen rezyklierter Gesteinskörnung (vgl. Tabelle 1):

1. Gesteinskörnung mit mehr als 90 M.-% Betonabbruch (z. B. in Norwegen: NB 2003 [11], Belgien: RILEM [12])

2. Gesteinskörnung mit einem Gehalt an poröser, rezyklierter Gesteinskörnung von maximal 5–10 M.-% durch die Beschränkung des Anteils an porösen Bestandteilen wie Klinker, Kalksandstein (z. B. RCA in Großbritannien: BS 8500-2 [13], Niederlande: NEN 8005 CUR-VB [14])
3. Gesteinskörnung mit höheren Gehalten an poröser, rezyklierter Gesteinskörnung (z. B. Typ M in der Schweiz: SIA-Merkblatt MB 2030 [2])

In manchen Ländern werden zusätzlich (z. B. Norwegen: NB 2003 [11], Österreich: ÖNORM B 4710-1 [15]) oder alternativ (z. B. Dänemark: Danish Concrete Association [16]) zu den Anforderungen an die Bestandteile der rezyklierten Gesteinskörnung noch Anforderungen an die Eigenschaften der Gesteinskörnung gestellt. Diese Anforderungen betreffen z. B. die Rohdichte, den Zertrümmungswiderstand, die Frostbeständigkeit und die Wasseraufnahme. Hier ist zu beachten, dass jede zusätzliche Anforderung an Recyclingbeton bzw. an rezyklierte Gesteinskörnung dessen Herstellung verteuert und somit den Markteintritt erschwert.

Die zulässigen Gehalte an Fremdbestandteilen sind in den verschiedenen Ländern ähnlich geregelt und liegen im Bereich zwischen 0,2 und 5 M.-%. Die Unterschiede beruhen vor allem auf der jeweiligen Definition ihrer stofflichen Zusammensetzung.

In der EN 12620 [17] „Gesteinskörnungen für Beton“, Kapitel 1 „Anwendungsbereich“, wird explizit darauf verwiesen, dass eine Gesteinskörnung auch aus rezyklierten Materialien bestehen kann, wenn deren Kornrohichte mindestens  $1500 \text{ kg/m}^3$  beträgt. Rezyklierte Gesteinskörnung wird in der EN 12620 als Gesteinskörnung aus aufbereitetem anorganischem Material definiert, das zuvor als Baustoff eingesetzt war.

In der neuesten Fassung der EN 12620 „Gesteinskörnungen für Beton“ werden Klassen von grober Gesteinskörnung definiert (Tabelle 2). Feine, rezyklierte Gesteinskörnung ist zulässig, wird jedoch nicht in Kategorien eingeteilt (was visuell auch schwierig zu bestimmen wäre) und

Tabelle 2. Kategorien der Bestandteile von groben rezyklierten Gesteinskörnungen (Tabelle 20 der EN 12620 [17])

Bestandteil	Gehalt Massenanteil in %	Kategorie
Rc	≥ 90	Rc <sub>90</sub>
	≥ 80	Rc <sub>80</sub>
	≥ 70	Rc <sub>70</sub>
	≥ 50	Rc <sub>50</sub>
	< 50	Rc <sub>angegeben</sub>
	Keine Anforderung	Rc <sub>NR</sub>
Rc + Ru	≥ 95	Rcu <sub>95</sub>
	≥ 90	Rcu <sub>90</sub>
	≥ 70	Rcu <sub>70</sub>
	≥ 50	Rcu <sub>50</sub>
	< 50	Rcu <sub>angegeben</sub>
	Keine Anforderung	Rcu <sub>NR</sub>
Rb	≤ 10	Rb <sub>10-</sub>
	≤ 30	Rb <sub>30-</sub>
	≤ 50	Rb <sub>50-</sub>
	> 50	Rb <sub>angegeben</sub>
	Keine Anforderung	Rb <sub>NR</sub>
Ra	≤ 1	Ra <sub>1-</sub>
	≤ 5	Ra <sub>5-</sub>
	≤ 10	Ra <sub>10-</sub>
X + Rg	≤ 0,5	XRg <sub>0,5-</sub>
	≤ 1	XRg <sub>1-</sub>
	≤ 2	XRg <sub>2-</sub>
	<b>Gehalt</b> cm <sup>3</sup> /kg	
FL	≤ 0,2 <sup>a</sup>	FL <sub>0,2-</sub>
	≤ 2	FL <sub>2-</sub>
	≤ 5	FL <sub>5-</sub>

<sup>a</sup> Die Kategorie 0,2 gilt nur für besondere Anwendungen, die eine hochwertige Oberflächenbeschaffenheit erfordern.

Bestandteil	Beschreibung
Rc	Beton, Betonprodukte, Mörtel, Mauersteine aus Beton
Ru	Ungebundene Gesteinskörner, 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: (Eisenhaltige und nicht eisenhaltige) Metalle, nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi, Gips
Rg	Glas

muss die Anforderungen der EN 12620 erfüllen. Auf nationaler Ebene wäre zu definieren, welche Gehalte in welchen Gesteinskörnungsarten beziehungsweise Betonsorten zulässig sind. Eine Definition der in den Be-

tonsorten zulässigen Gehalte führt die Schweiz in ihrem Merkblatt MB 2030 auf (vgl. Tabelle 6). Sie beruht auf einer Auszählung der Körner nach SN EN 933-11 [8] und der Klassierung nach EN 12620.

Tabelle 3. Maximal zulässige Gehalte [M.-%] an rezyklierter Gesteinskörnung (da die verschiedenen Regelungen nicht alle auf den Expositionsclassen der EN 206-1 [18] basieren, waren diese in die Nomenklatur der EN 206-1 zu übersetzen)

Land	Deutschland		Großbritannien	Niederlande	Österreich	Schweiz	Norwegen		Dänemark	Japan	USA	Belgien		RILEM	
	Typ 1	Typ 2					Typ 1, 2, 3	Typ 1 (0/4 mm)				2 (4/32 mm)	M	Typ II	Typ III
Expositions-klassen	XC0								100			100			
	XC1 <sup>1)</sup>		100	20, Ziegel etc. max. 10	100	100	100	5-10	100	100		100	100	100	100
	XC1-3	45		keine Hinweise auf (un)zulässige Expositions-klassen	keine Hinweise auf (un)zulässige Expositions-klassen	100	≤ 25 <sup>3)</sup>	0	100	100	keine Hinweise auf (un)zulässige Expositions-klassen	100	100 <sup>2)</sup>	100	100
	XC4	35				> 25 nur nach Voruntersuchung	nicht zulässig		100	100					keine Hinweise auf (un)zulässige Expositions-klassen
	XF1	35							100	100					
	XF2	25													
	XF3	25													
	XF4	25													

<sup>1)</sup> trocken; <sup>2)</sup> in nicht aggressivem Boden und Wasser; <sup>3)</sup> mit Untersuchungen: 100 M.-%

In der EN 206-1 [18] wird kaum auf Recyclingbeton eingegangen. In einer Anmerkung in Abschnitt 5.1.3 heißt es: „Regeln für rezyklierte Gesteinskörnung sind in diesen Normen nicht angegeben. Bis Regeln für rezyklierte Gesteinskörnung in europäischen technischen Spezifikationen angegeben sind, sollte die Eignung nach der Anmerkung zu 5.1.1 nachgewiesen werden.“ Die Anmerkung in Absatz 5.1.1 verweist als mögliche Eignungsnachweise auf eine Europäische Technische Zulassung oder einschlägige nationale Normen oder Regeln.

### 3 Zulässige Betonzusammensetzungen

Die zulässigen Gehalte an rezyklierter Gesteinskörnung im Beton in den verschiedenen Regelungen zeigt Tabelle 3; je nach Regelung sind zusätzlich Prüfungen an der rezyklierten Gesteinskörnung und/oder dem Recyclingbeton gefordert. Länder wie Deutschland [19, 20, 21], Norwegen [11] oder Dänemark [16] definieren den Gehalt und die Zusammensetzung der rezyklierten Gesteinskörnung in Abhängigkeit von der zu erzielenden Festigkeitsklasse und/oder den zu gewährleistenden Expositions-klassen. So führt die deutsche Regelung (DIN 4226-100 [19], Baustoff-kreislaufrichtlinie des DAfStB, Teil 1 [20]) aus, dass Typ 1 der rezyklierten Gesteinskörnung (vgl. Tabelle 1) – wenn auch mengenmäßig beschränkt – in den meisten der aufgeführten Expositions-klassen zulässig ist. Demgegenüber ist Typ 3 nur bei den Expositions-klassen X0 und XC1 (trocken) zulässig. Andere Länder haben ähnliche Regelungen bzw. beschränken den Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung im Beton so stark (maximal 10 bzw. 20%), dass sich dieser von Beton mit natürlicher Gesteinskörnung kaum unterscheidet (z.B. Niederlande mit NEN 8005 [14]).

Hintergrund dieser teilweise restriktiv erscheinenden Regelungen ist vor allem, dass einerseits eine Beeinträchtigung der Frischbetonverarbeitung befürchtet wird. Andererseits bestehen Bedenken, dass in rezyklierter Gesteinskörnung enthaltene Bestandteile zu einer (Bewehrungs-)/Betonkorrosion führen können. Dadurch entstehende Schäden wären

bei Beton ohne Bewehrung (X0) eher akzeptabel, da hier zumeist nur untergeordnete Bauteile betroffen sind. Bei trockenen bis sehr trockenen Expositionsbedingungen (X0, XC1 trocken) besteht nur ein geringes Risiko einer (Bewehrungs-)/Betonkorrosion, da die eventuell vorhandenen schädlichen Bestandteile im trockenen Beton kaum transportiert werden und chemisch nur beschränkt reagieren können: Eine Bewehrungskorrosion ist dadurch kaum wahrscheinlich und auch andere schädliche Reaktionen wie die Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) (cemsuisse [22]) oder der Sulfatangriff können nur langsam ablaufen.

Eine AAR kann auftreten, wenn neben reaktiver Gesteinskörnung ausreichende Gehalte an Alkalien, z. B. aus dem Zement, sowie Wasser vorhanden sind. Durch AAR verursachte Schäden treten zumeist nach Inkubationszeiten von mehreren Jahrzehnten auf (Merz et al. [23]). Man kann das Risiko nicht ausschließen, dass für die Betonherstellung rezyklierte Gesteinskörnung aus einem zurück gebauten Betongebäude stammt, bei welchem die AAR bereits zu Schäden führte bzw. kurz davor ist. Bei dem mit diesem Granulat neu erstellten Bauwerk könnten dann AAR-bedingte Schäden in entsprechend feuchter Umgebung (XC 1, XC 3 und XC 4) in einigen Jahren auftreten.

Die Ursachen der Beschränkung der zulässigen Gehalte an rezyklierter Gesteinskörnung beruhen folglich vor allem auf dauerhaftigkeitsrelevanten Überlegungen. Diese Dauerhaftigkeitsüberlegungen werden unterschiedlich gewichtet. In Großbritannien kann rezyklierte Gesteinskörnung, die vor allem aus Beton besteht, ohne eine Untersuchung der rezyklierten Gesteinskörnung auf AAR eingesetzt werden, wenn der damit hergestellte Beton gewisse Anforderungen z. B. an den Alkaligehalt erfüllt (BRE Digest 330 [24]). Demgegenüber muss in Deutschland grundsätzlich die rezyklierte Gesteinskörnung bezüglich AAR untersucht werden, wenn damit Beton in feuchter Umgebung (z. B. XC1 nass, XC2, XC4) hergestellt wird ([19, 20, 21]). Auch Kanada weist eine ähnlich strenge Regelung auf (Shehata [25]). Diese geforderte Untersuchung ver-

Tabelle 4. Maximal zulässige Festigkeitsklassen und Bemessung von Recyclingbeton

Land	Deutschland	Großbritannien	Niederlande	Österreich	Schweiz	Norwegen	Dänemark	Japan	USA	Belgien	RILEM
maximale Gehalte [M.-%]	Typ 1 Typ 2 Typ 1, 2, 3	RCA			C M	1 2				Typ II	Typ II Typ III
Max. Druckfestigkeit	C50/37	C40/50				C20/25 C45/55	C40/50			C30/37	C50/60
Bemessung	analog DAfStb T1	analog		keine Regelung	z. T. abweichend (SIA-Merkblatt)	analog	unbekannt			z. T. abweichend	analog

teuert die rezyklierten Gesteinskörnungen erheblich. Die Prüfhäufigkeit muss relativ hoch sein, da die Eigenschaften von rezyklierter Gesteinskörnung (je nach Herkunft) beträchtlich variieren können. Allgemein wird durch diese strengen Regelungen der Einsatz rezyklierter Gesteinskörnung in neuen Bauwerken (notwendigerweise) behindert.

#### 4 Eigenschaften und Bemessung

Die Festbetoneigenschaften des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung werden sehr stark von der stofflichen Zusammensetzung und dem Gehalt der verwendeten Gesteinskörnung beeinflusst. In der Schweiz wird erst ab einem Anteil von mindestens 25 M.-% an rezyklierter Gesteinskörnung von Recyclingbeton gesprochen. Die Druckfestigkeit des Recyclingbetons ist – wie bei Beton mit natürlicher Gesteinskörnung – abhängig vom jeweiligen Wasserzementwert ( $w/z$ -Wert,  $w$ : wirksamer Wassergehalt): Bei vergleichbaren  $w/z$ -Werten ist die Druckfestigkeit von Recyclingbeton gleich bis etwas niedriger. Der Unterschied ist unter anderem auf die Berechnung des  $w/z$ -Wertes gemäß EN 206-1 [18] unter Berücksichtigung der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung (EN 1097-6 [26]) und

auf die teilweise geringere Druckfestigkeit der rezyklierten Gesteinskörnung (vor allem Ziegel) zurückzuführen. Der Elastizitätsmodul  $E_{cm}$  kann – wie bei Beton mit natürlicher Gesteinskörnung – in Beziehung zur Zylinderdruckfestigkeit  $f_{cm}$  gesetzt werden. Mit steigendem Anteil an rezyklierten Körnern aus  $R_c$  und  $R_b$  (Tabelle 2) wird hingegen der Elastizitätsmodul bei vergleichbarer Druckfestigkeit deutlich kleiner (Bild 1). Dies ist auf den geringeren Elastizitätsmodul der rezyklierten Gesteinskörnung im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung und auf das höhere Zementsteinvolumen zurückzuführen. Je kleiner der Elastizitätsmodul ist, desto größer wird die durch die Belastung hervorgerufene Verformung eines Bauteils (z. B. Durchbiegung einer Decke). Schwinden und Kriechen hängen hauptsächlich von der Betonzusammensetzung, der Umgebungfeuchte, den Bauteilabmessungen und der Belastung ab. Sowohl das Schwinden als auch das Kriechen von Recyclingbeton sind mit steigendem Anteil an rezyklierter Gesteinskörnung höher als dasjenige von Beton mit 100 M.-% natürlicher Gesteinskörnung bei gleicher Druckfestigkeit. Dies ist auf den geringeren Elastizitätsmodul der rezyklierten Gesteinskörnung und den höheren

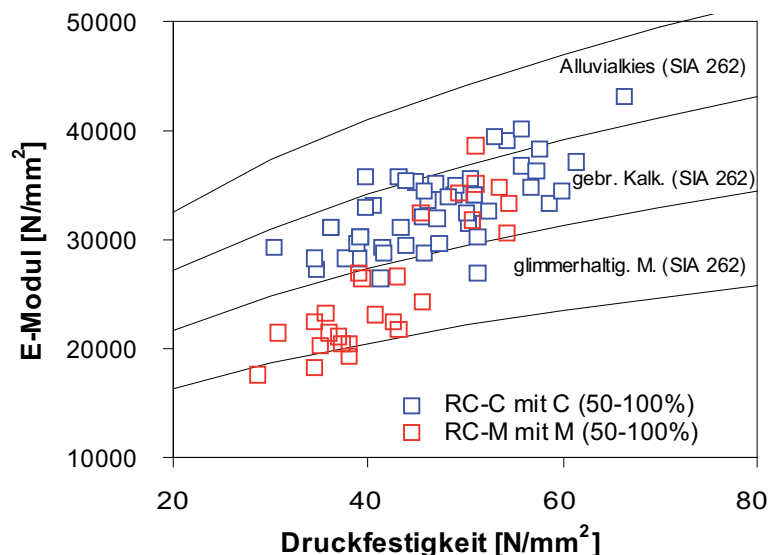


Bild 1. Elastizitätsmodul von Recyclingbeton [34] im Vergleich zur Berechnung des Elastizitätsmoduls mit der Formel  $E_{cm} = k_E \sqrt{f_{cm}}$  nach SIA 262, Ziffer 3.1.2.3.4 für Beton mit Gesteinskörnung aus Alluvialkies ( $k_E = 10'000-12'000$ ), gebrochenem Kalk ( $k_E = 8000-10'000$ ) beziehungsweise glimmerhaltigem Gestein ( $k_E = 6000-8000$ ), RC-C: Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung, vor allem aus Betongranulat, RC-M: Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung, vor allem aus Mischgranulat

**Tabelle 5. Abschätzung der Eigenschaften von Recyclingbeton nach SIA-Merkblatt 2030 „Recyclingbeton“ [2]**

Elastizitätsmodul		ohne deklarierte Werte	bei deklarierter Rohdichte ( $\rho_{cm} = 2'450 \text{ kg/m}^3$ )
RC-C	$R_c \leq 50 \text{ M.-%}$	$E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0.9$	$E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0.9 \cdot \frac{\rho_{rcm}}{\rho_{cm}}$
	$R_c > 50 \text{ M.-%}$	$E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0.8$	
RC-M		$E_{rcm} \geq 19'000 \text{ N/mm}^2$ $\rho_{cm} \geq 2'000 \text{ kg/m}^3$	$E_{rcm} \approx E_{cm} \cdot 0.8 \cdot \frac{\rho_{rcm}}{\rho_{cm}}$
Endschwindmaß		$\epsilon_{rcm,\infty} = \epsilon_{cm,\infty} \cdot E_{cm}/E_{rcm}$	
Kriechzahl		$\varphi_r(t, t_0) = 1.25 \cdot \varphi(t, t_0)$	

mit:

- $E_{rcm}$  Mittelwert des Elastizitätsmoduls von Recyclingbeton
- $E_{cm}$  Mittelwert des Elastizitätsmodul von Beton aus natürlicher Gesteinskörnung
- $\rho_{rcm}$  Mittelwert der Rohdichte von Recyclingbeton
- $\rho_{cm}$  Mittelwert der Rohdichte von Beton aus natürlicher Gesteinskörnung
- $\epsilon_{rcm,\infty}$  Endschwindmaß von Recyclingbeton
- $\epsilon_{cm,\infty}$  Endschwindmaß von Beton aus natürlicher Gesteinskörnung
- $\varphi_r(t, t_0)$  Kriechzahl von Recyclingbeton
- $\varphi(t, t_0)$  Kriechzahl von Beton aus natürlicher Gesteinskörnung

Zementsteinanteil zurückzuführen. Dieser Effekt ist ggf. bei der Bemessung eines Bauteils, speziell bei der Abschätzung des Schwindmaßes und der Kriechzahl, zu berücksichtigen.

Wie bereits erwähnt, sind die im Vergleich zu Beton mit natürlicher Gesteinskörnung und gleicher Druckfestigkeit besonderen Festbetoneigenschaften, wie tendenziell niedrigerer Elastizitätsmodul, tendenziell höheres Schwindmaß und tendenziell höhere Kriechzahl, auf die Betonzusammensetzung und vor allem Art und Menge der rezyklierten Gesteinskörnung zurückzuführen. Da jedoch die genaue Zusammensetzung eines Betons mit rezyklierter

Gesteinskörnung vor dessen Herstellung nicht bekannt ist, benötigt der Planer Vorgaben zur Bemessung des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung.

Um dem Planer (konservative) Angaben zum Elastizitätsmodul, Schwinden und Kriechen zur Verfügung zu stellen, wurden in dem vom Schweizerischen Architekten- und Ingenieurverein veröffentlichten SIA-Merkblatt 2030 „Recyclingbeton“ die in Tabelle 5 aufgeführten Regeln erstellt (SIA-Merkblatt [2]). Dabei basiert die Beurteilung der ausgewählten Recyclingbetoneigenschaften auf dem mittleren Elastizitätsmodul  $E_{rcm}$  und der mittleren Rohdichte  $\rho_{rcm}$ .

**Tabelle 6. Einsatzgebiete von Recyclingbeton nach SIA-Merkblatt 2030 „Recyclingbeton“ [2]**

Recyclingbeton		Expositionsklasse				
	Anteile	X0	XC1(CH) trocken	XC1(CH) nass XC2(CH) XC3(CH)	XC4(CH)	XD(CH), XF(CH), XA
RC-C	$R_c \geq 25 \text{ M.-%}$ $R_b < 5 \text{ M.-%}$	zulässig				①
RC-M	$5 \text{ M.-%} \leq R_b \leq 25 \text{ M.-%}$ und $R_c + R_b \geq 25 \text{ M.-%}$	zulässig			①	nicht zulässig
	$R_b > 25 \text{ M.-%}$	zulässig		①	①	

① Nach entsprechenden Voruntersuchungen zulässig  
M.-%: Massenprozent

Des Weiteren wurde im SIA-Merkblatt 2030 festgelegt, dass die Betonhersteller den Elastizitätsmodul für den Recyclingbeton RC-M bei jeder dritten und für RC-C bei jeder sechsten Druckfestigkeitsprüfung nach SIA 262/1 [27] zu ermitteln und in der Produktdeklaration anzugeben haben.

### 5 Zulässige Einsatzgebiete in der Schweiz

Infolge der eher geringen Erfahrungen zu dauerhaftigkeitsrelevanten Aspekten wie Frost-Tausalz widerstand, Chloridwiderstand (hinsichtlich Bewehrungskorrosion), Gaspermeabilität (hinsichtlich Karbonatisierung des Betons), und Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) ist eine – eventuell restriktiv erscheinende – Beschränkung für die Verwendung von Recyclingbeton auf bestimmte Expositionsklassen als sinnvoll erachtet worden. Bis weitere Erfahrungen vorliegen, sind gemäß SIA-Merkblatt die in Tabelle 6 aufgeführten Expositionen für Recyclingbeton empfehlenswert. Beton mit weniger als 25 M.-% an rezyklierter Gesteinskörnung unterliegt keinen Beschränkungen bei den Einsatzgebieten, sofern die rezyklierte Gesteinskörnung normenkonform (SN EN 12620 [28]) ist. Untersuchungen von Jacobs [29] an einer ca. 20 Jahre alten Betonfahrbahn einer Autobahn mit bis zu 100% Recyclinggesteinskörnung zeigten, dass Recyclingbeton in Einsatzgebieten außerhalb des zulässigen Bereiches des SIA Merkblattes nicht zwangsläufig zu nennenswerten Schäden führen muss.

In der Schweiz wird zwischen zwei Arten von Recyclingbeton unterschieden: Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung, vor allem aus Betongranulat (RC-C) wird üblicherweise für Expositionsklassen XC1(CH) bis XC4(CH) mit einer maximaler Festigkeitsklasse C30/37 angeboten. Einsatzmöglichkeiten von Recyclingbeton RC-C im Hochbau als Konstruktionsbeton sind sowohl Innen- als auch Außenwände und Decken. Bei aufgezwungenen und behinderten Verformungen führt der geringere Elastizitätsmodul zu geringeren Spannungen im Bauteil, so dass der Effekt der Zwängung zum Teil kompensiert wird. Beim Einsatz von

RC-C in Geschossdecken sind bei der Berechnung der Durchbiegungen die niedrigeren Elastizitätsmodule und die größeren Kriechverformungen des Recyclingbetons zu berücksichtigen. Die Bemessung erfolgt bei Recyclingbeton wie bei Beton mit natürlicher Gesteinskörnung nach SIA 262 [4].

Recyclingbeton mit Mischgranulat (RC-M) mit einem Gehalt von 5 bis 25 M.-%  $R_b$  kann entsprechend Tabelle 6 für die Expositionsclassen XC1(CH), XC2(CH) und XC3(CH) verwendet werden. Ein RC-M mit einem Gehalt von mehr als 25 M.-%  $R_b$  ist ohne entsprechende Voruntersuchungen nur für die Expositionsclassen XC1(CH, trocken) zu verwenden. Beim Einsatz von RC-M in Decken ist außerdem zu beachten, dass die Querkraftbemessung und der Durchstanznachweis der SIA 262 [4] mit  $D_{\max} = 0$  wie für Leichtbeton zu führen sind. Die Eigenschaften des RC-M (Elastizitätsmodul, Schwinden und Kriechen) unterscheiden sich tendenziell stärker als jene des RC-C von Beton mit natürlicher Gesteinskörnung. Deshalb ist ein Einsatz von RC-M in Bauteilen vorzuziehen, bei denen ein erhöhtes Schwinden und Kriechen unproblematisch ist. Für die Expositionsclassen XD(CH), XF(CH) und XA, sowie generell für Spannbeton und ermüdungsgefährdete Bauteile, darf RC-M nicht und RC-C nur nach entsprechenden Voruntersuchungen, verwendet werden.

## 6 Zusammenfassung und Folgerungen

Bei den betrachteten Regelungen zeigen sich Gemeinsamkeiten und Unterschiede. Gemeinsam ist den Regelungen, dass Recyclingbeton, der mit aufbereitetem Betonabbruch hergestellt wird, gleich bzw. ähnlich dem Beton mit natürlicher Gesteinskörnung gehandhabt wird. Mit zunehmendem Gehalt an porösen Bestandteilen wie Ziegeln und Kalksandstein wird eine restriktivere Verwendung empfohlen. So bestehen teilweise starke Einschränkungen bei dessen Einsatzgebieten, was u. a. auch auf die geringen (Langzeit-)Erfahrungen mit Recyclingbeton zurückzuführen ist. Hauptsächlich bei der Dauerhaftigkeit von Recyclingbeton besteht ein Forschungsbedarf. Dabei sollte

man sich in einem ersten Schritt auf die Anforderungen beschränken, die in den Bereichen mit einem großen Betonvolumen (Hochbau) gefordert werden.

Da das Re-Recycling von Beton in nicht zu ferner Zukunft beginnen wird, sollten diesbezügliche Untersuchungen ebenfalls an die Hand genommen werden, da dies Konsequenzen für Anforderungen an Recyclingbeton haben kann.

## Literatur

- [1] SIA 162/4: Recyclingbeton – Empfehlung. SIA Zürich (1994).
- [2] SIA 2030: Merkblatt 2030 Recyclingbeton. SIA Zürich (2010).
- [3] SN EN 206-1: Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. SIA Zürich (2003).
- [4] SIA 262: Betonbau (2003).
- [5] Hoffmann, C. und Jacobs, F.: Recyclingbeton aus Beton- und Mischabbruchgranulat – Sachstandsbericht. Empa, TFB (2007).
- [6] EMPA: Verwendung von Mischabbruch als Betongesteinskörnung (Bericht-Nr.: 201004), Dübendorf (2000).
- [7] Maultzsch, M., Mellmann, G. und Meinhold, U.: Eigenschaften hochwertiger Betone aus aufbereitetem Bauschutt, 15, Int. Baustofftagung ibausil, Weimar, Seite I-0033-I-0047 (2003).
- [8] SN EN 933-11: Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 11: Einteilung der Bestandteile in grober rezyklierter Gesteinskörnung (2008).
- [9] BUWAL: Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle (1997).
- [10] BAFU: Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle (2006).
- [11] NB 2003: Recycling of concrete and masonry for production of concrete. – Norsk Betongforening (Norwegische Betonvereinigung) Oslo (2003).
- [12] RILEM: Specifications for concrete with recycled aggregates – Recommendations. – Materials & Structures, Vol. 27, 557–559 (1994).
- [13] BS 8500-2: Concrete – Complementary British Standard to BS EN 206-1: Specification for constituent materials and concrete. – British standard organisation, London (2006).
- [14] NEN 8005 CUR-VB: Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. NEN (2004).
- [15] ÖNORM b 4710-1, 2002: Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Regeln zur Umsetzung der ÖNORM EN 206-1. –

Österreichisches Normeninstitut, Wien.

- [16] Roos, F.: Ein Beitrag zur Bemessung von Beton mit Gesteinskörnung aus rezyklierter Gesteinskörnung nach DIN 1045-1. Dissertation Lehrstuhl Massivbau, TU München (www.mb.bv.tum.de/index-d/forschung/promo/Diss%20Roos.PDF) (2002).
- [17] EN 12620:2002+A1:2008: Gesteinskörnung für Beton (2008).
- [18] EN 206-1: Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität (2000).
- [19] DIN 4226-100, 2002: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel, Teil 100: Rezyklierte Gesteinskörnungen. – DIN, Berlin.
- [20] Baustoffkreislauf-Richtlinie des DAfStB: 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 1045-1. – Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin (2004).
- [21] Baustoffkreislauf-Richtlinie des DAfStB: Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN 4226-100, Teil 2: Änderungen und Ergänzungen zu DIN 1045-1, DIN 1045-2, DIN EN 206-1 für Beton mit höheren Anteilen rezyklierter Gesteinskörnungen als nach Teil 1, DIN. – Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, Entwurf (2005).
- [22] cemsuisse: Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) in der Schweiz. Bern (2005).
- [23] Merz, Chr, Hunkeler, F. und A. Griesser (2006), Schäden durch Alkali-Aggregat-Reaktion an Betonbauten in der Schweiz, VSS-Bericht 599.
- [24] BRE Digest 330: 2004.
- [25] Shehata, M.: persönliche Mitteilung (2008).
- [26] EN 1097-6: Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme (1999).
- [27] SIA 262/1: Betonbau – Ergänzende Festlegungen (2003).
- [28] SN EN 12620:2002+A1:2008: Gesteinskörnung für Beton (2008).
- [29] Jacobs, F.: Materialtechnologische Aspekte von Recyclingbeton. – in: TFB Kurs Recyclingbeton (2010).
- [30] BV: Richtlinie für Recycling-Baustoffe. – Österreichischer Baustoff Recycling Verband, 7. Auflage (2007).
- [31] JSCE, 2007: Concrete Committee, Newsletter, Nr. 8, Japan Society of Civil Engineers (JSCE).

[32] C 33: Standard Specifications for Concrete Aggregates – ASTM C 33-02a (2002).

[33] C 330: Standard Specification for Lightweight Aggregates for Structural Concrete. – ASTM C 330-00 (2000).

[34] *Hoffmann, C.*: Recyclingbeton – aktuelle Erfahrungen und neuste technische Erkenntnisse, Holcim-Beton-tagung 2009, Referat (2010).



Dipl.-Ing. Cathleen Hoffmann  
Empa Dübendorf  
Überlandstrasse 129  
8600 Dübendorf, Schweiz  
cathleen.hoffmann@empa.ch



Dr. Frank Jacobs  
Lindenstrasse 10  
5103 Wildegg, Schweiz  
jacobs@tfb.ch