



Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton mit Mischgranulat

EMPA, Abteilung Ingenieur-Strukturen

Dr. Sandy Schubert
Cathleen Hoffmann

cemsuisse-Projekt 200602 – September 2011
Diese Forschungsarbeit wurde durch cemsuisse, Verband
der Schweizerischen Zementindustrie mitfinanziert

Vorwort der Begleitgruppe

Im Rahmen der nachhaltigen Nutzung von Baustoffen gewinnt die Verwendung der Recycling-Gesteinskörnungen Beton- und Mischgranulat, im Betonbau stetig an Bedeutung.

Während die Verwendung von Betongranulat zur Herstellung von Konstruktionsbeton (RC-C) etabliert ist, wird aufbereitetes Mischgranulat hauptsächlich als Recycling-Gesteinskörnung für die Herstellung von so genanntem Magerbeton eingesetzt. Auf Grund dessen wird vermehrt der Wunsch von Seiten ökologisch motivierter Bauherren geäußert, Mischgranulat ebenfalls zur Herstellung von Konstruktionsbeton zu verwenden. Grundvoraussetzung dafür ist, dass die charakteristischen Festbetoneigenschaften und das Tragwerksverhalten dieses Recyclingbetontyps bekannt sind.

Im nachfolgenden Projekt wurde das Grundlagenwissen für die Verwendung von Mischgranulat zur Herstellung von Konstruktionsbeton für den allgemeinen Bereich des Hochbaus erarbeitet. Es bildet eine wesentliche Grundlage für das SIA-Merkblatt MB 2030 „Recyclingbeton“, welches die notwendigen Angaben für die Bemessung und die Einsatzmöglichkeiten von Recyclingbeton enthalten soll.

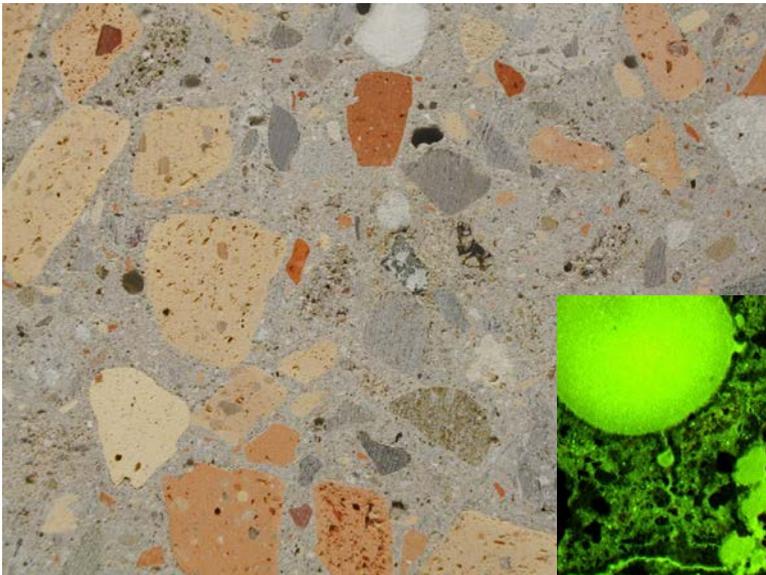
Dr. Peter Lunk, Holcim (Schweiz) AG, Vorsitzender der Begleitgruppe

Cemsuisse Forschungsförderung

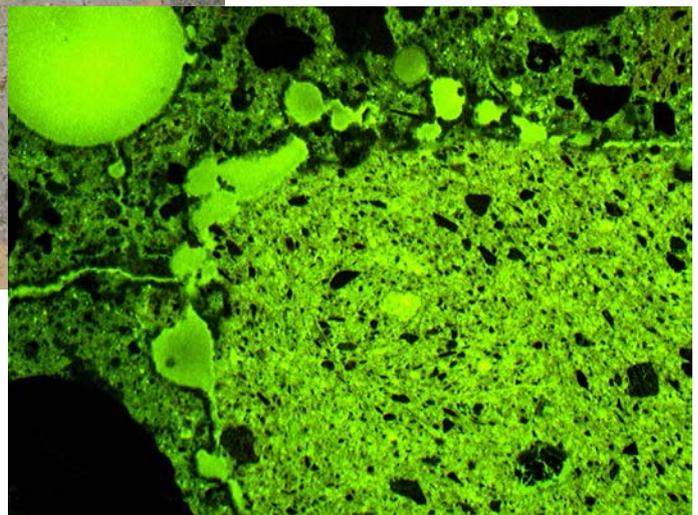
Die cemsuisse Forschungsförderung unterstützt Forschungsprojekte im Bereich der Betonanwendung, welche von kompetenten Forschergruppen an cemsuisse herangetragen werden. Mit der proaktiven Forschungsförderung definiert cemsuisse zudem Forschungsprojekte von Interesse und trägt diese an kompetente Forschergruppen heran oder schreibt sie öffentlich aus. Die Projektnehmer werden jeweils von einer Begleitgruppe aus cemsuisse – Vertretern fachlich unterstützt.

Dr. Heiner Widmer, Leiter Umwelt, Technik, Wissenschaft, cemsuisse

Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton mit Mischgranulat



Anschliff eines Recyclingbetons mit Mischgranulat



Mikrostruktur eines Recyclingbetons hergestellt mit Mischgranulat (Mauerwerksgranulat)

Impressum

Projektleitung: Empa
Abteilung Ingenieur-Strukturen
Überlandstasse 129
8600 Dübendorf

Projektbegleitung: Begleitgruppe cemsuisse

Autoren: Dr. Sandy Schubert Cathleen Hoffmann
Abteilung Ingenieur-Strukturen Abteilung Beton / Bauchemie

Laborarbeiten Empa: Abteilung Beton / Bauchemie Abteilung Ingenieur-Strukturen

Baustofflieferung: HASTAG (Zürich) in Zusammenarbeit mit:
Recycling und Entsorgung RZO AG, Recycling Züri Oberland
Urdorferstrasse Hardstrasse
8903 Birmensdorf 8604 Volketswil

Eberhard Bau AG
DienstleistungsZenter
Breitloostr. 7
8154 Oberglatt

Trägerschaft: cemsuisse
Verband der Schweizerischen Cementindustrie
Marktgasse 53
3011 Bern

unterstützt durch:
Amt für Hochbauten der Stadt Zürich
Fachstelle Ingenieurwesen
Lindenhofstrasse 21
8021 Zürich

Inhaltsverzeichnis

FACHAUSDRÜCKE	7
ABKÜRZUNGEN	8
1. MOTIVATION	10
2. ZIELSETZUNG	10
3. MATERIAL UND METHODEN.....	11
3.1 RECYCLING-GESTEINSKÖRNUNG	11
3.2 BETONHERSTELLUNG.....	14
3.3 FESTBETONPRÜFUNGEN	14
4. RESULTATE UND INTERPRETATION.....	16
4.1 FRISCHBETONEIGENSCHAFTEN	16
4.2 FESTBETONEIGENSCHAFTEN	16
4.3 TRAGWERKSVERHALTEN	22
5. EMPFEHLUNGEN FÜR DIE PRAXIS.....	24
5.1 BETONHERSTELLUNG/FRISCHBETONEIGENSCHAFTEN VON RC-M.....	24
5.2 FESTBETONEIGENSCHAFTEN VON RC-M.....	24
5.3 BEMESSUNG.....	25
5.4 EINSATZGEBIETE VON RECYCLINGBETON RC-M.....	25
6. ANMERKUNGEN ZUR HERSTELLUNG VON RC-M	27
7. WEITERER UNTERSUCHUNGSBEDARF.....	28
8. LITERATURVERZEICHNIS	29

Fachausdrücke

Beton	Aus Zement, Gesteinskörnung (Grösstkorn grösser als 4 mm) und Wasser, gegebenenfalls unter Zugabe von Zusatzstoffen und Zusatzmitteln, hergestellter Baustoff, der seine Eigenschaften durch die Hydratation des Zementes erhält gemäss SIA 262.
Betonabbruch	Durch Abbrechen oder Fräsen von bewehrten oder unbewehrten Betonkonstruktionen und –belägen gewonnenes Material gemäss BAFU-Richtlinie (UV-0631-D).
Betongranulat	Rezyklierte Gesteinskörnung aus aufbereitetem Betonabbruch
Gesteinskörnung	Körniges Material für die Verwendung im Bauwesen. Gesteinskörnungen können natürlich, industriell hergestellt oder rezykliert sein gemäss SN EN 12620.
Mauerwerksgranulat	Rezyklierte Gesteinskörnung aus Mauerziegel (d.h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandsteinen, nicht schwimmender Porenbeton, „R _b “ gemäss SN EN 933-11.
Mischabbruch	Gemisch von ausschliesslich mineralischen Bauabfällen von Massivbauteilen wie Beton-, Backstein-, Kalksandstein- und Natursteinmauerwerksabbruch gemäss BAFU- Richtlinie UV-0631-D.
Mischgranulat	Rezyklierte Gesteinskörnung aus aufbereitetem Mischabbruch.
Natürliche Gesteinskörnung	Gesteinskörnung aus mineralischen Vorkommen, die ausschliesslich einer mechanischen Aufbereitung unterzogen worden ist gemäss SN EN 12620.
Normalbeton	Beton mit einer Rohdichte (ofentrocken) von 2000 bis 2600 kg/m ³ gemäss SIA 262.
Recyclingbeton	Beton nach SN EN 206-1, dessen Gesteinskörnung grösser 4 mm zu mindestens 25 Massenprozent aus rezyklierter Gesteinskörnung besteht (siehe Recyclingbeton RC-C und RC-M).
Recyclingbeton RC-C	Beton nach SN EN 206-1, dessen Gesteinskörnung grösser 4 mm zu mindestens 25 Massenprozent aus R _c besteht.
Recyclingbeton RC-M	Beton nach SN EN 206-1, dessen Gesteinskörnung grösser 4 mm zu mindestens 25 Massenprozenten aus Mischgranulat besteht: R _b ≥ 5 Massenprozent und R _c + R _b ≥ 25 Massenprozent.
Recycling-Gesteinskörnung	Rezyklierte Gesteinskörnung aus anorganischem aufbereitetem Material, das zuvor als Baustoff eingesetzt war, gemäss SN EN 12620.

Abkürzungen

Lateinische Grossbuchstaben

AOX	adsorbierbare organisch gebundene Halogene (Fluor, Chlor, Brom, Jod)
C	Beton
D_{max}	Grösstkorn der Gesteinskörnung
DOC	gelöster organisch gebundener Kohlenstoff
E_c	Elastizitätsmodul von Beton
E_{rc}	Elastizitätsmodul von Recyclingbeton
GK	Gesteinskörnung gemäss SN EN 12620
M	Mischgranulat
M.-%	Massenprozent
POX	ungelöste, ausblasbare, organisch gebundene Halogene
R_a	Körner aus bitumenhaltigen Materialien gemäss SN EN 933-11
R_b	Körner aus Mauerziegel (d.h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandsteinen, nicht schwimmendem Porenbeton, gemäss SN EN 933-11
R_{b,T}	Körner ausschliesslich aus Mauersteinen und Ziegeln aus gebranntem Ton
R_c	Körner aus Beton, Betonprodukten, Mörtel und Mauersteinen aus Beton, gemäss SN EN 933-11
R_g	Glaskörner gemäss SN EN 933-11
R_u	Ungebundene Gesteinskörner, Naturstein und hydraulisch gebundene Gesteinskörner, gemäss SN EN 933-11
RC	Recyclingbeton
RC-C	Recyclingbeton aus einer Gesteinskörnung mit mindestens 25 Massenprozent R _c
RC-M	Recyclingbeton aus einer Gesteinskörnung mit mindestens 25 Massenprozent R _c + R _b und mindestens 5 Massenprozent R _b
V_R	Querkraftwiderstand eines Querschnittes
X	Körner aus sonstigen Materialien: bindige Materialien (Ton, Erde) und Körner aus verschiedenen sonstigen Materialien: Metalle, nicht schwimmendes Holz, Kunststoff, Gummi, Gips gemäss SN EN 933-11
X...(CH)	Expositionsklassen (X0, XC, XD, XF) gemäss SN EN 206-1

Lateinische Kleinbuchstaben

d	statische Höhe, mittlere statische Höhe bei mehreren Bewehrungslagen, gemäss SIA 262
f_b	Verbundspannung
f_c	Zylinderdruckfestigkeit von Beton
f_{c,cube}	Würfeldruckfestigkeit von Beton
f_{cm}	Mittelwert der Zylinderdruckfestigkeit gemäss SIA 262 (2003)
f_{ct}	Zugfestigkeit von Beton
f_{ct,bz}	Biegezugfestigkeit von Beton
f_{ck}	charakteristischer Wert der Zylinderdruckfestigkeit (5%-Fraktile) gemäss SIA 262
k_E	Beiwert zur Bestimmung des Elastizitätsmoduls von Beton gemäss SIA 262
k_d	Beiwert zur Bestimmung des Querkraftwiderstands von Platten gemäss SIA 262
k_{Dmax}	Beiwert zur Berücksichtigung des Grösstkorndurchmessers
k_v	Beiwert zur Berücksichtigung der Verformungen gemäss SIA 262 (2003)
l_b	Verankerungslänge des Bewehrungsstahls
m	Biegemoment pro Längeneinheit
m_d	Bemessungswert des Biegemomentes pro Längeneinheit gemäss SIA 262
m_R	Biegewiderstand pro Längeneinheit
v_R	Querkraftwiderstand pro Längeneinheit

Griechische Buchstaben

ε_c	Betonstauchung gemäss SIA 262
ε_{cs}	Schwindmass gemäss SIA 262
ε_{cs,∞}	Endschwindmass gemäss SIA 262
ε_{rCS,∞}	Endschwindmass von Recyclingbeton
η_r	Umrechnungsfaktor für die Eigenschaften von Recyclingbeton

1. Motivation

Im Rahmen der nachhaltigen Nutzung von Baustoffen gewinnt die Verwendung von Recycling-Gesteinskörnung im Betonbau stetig an Bedeutung. Der Verbrauch von natürlichen Gesteinskörnungen für Anwendungen mit geringeren Anforderungen und die Ablagerung von mineralischem Rückbaumaterial in Deponien werden damit vermindert. Die Vorkommen von natürlicher Gesteinskörnung können geschont werden.

Beton ist der zentrale Baustoff in der Schweiz [1]. Gemäss dem Bundesamt für Statistik [2] wurden im Jahr 2006 rund 50 Millionen Tonnen Kies und Sand verbaut, die primär für den Bau von Gebäuden, Strassen und anderen Infrastruktureinrichtungen verwendet wurden. Durch den Rückbau von Gebäuden fallen derzeit rund 11 Millionen Tonnen mineralische Bauabfälle (Ausbauasphalt, Strassenaufbruch, Betonabbruch, Mischabbruch) pro Jahr an [3]. Davon konnten im Jahre 2009 durch die Aufbereitung von Mischabbruch rund 1.3 Millionen Tonnen Mischgranulat in den Baustoffkreislauf zurückgeführt werden, wobei 70% des aufbereiteten Mischgranulats als Recycling-Gesteinskörnung zur Herstellung von Beton verwendet wurden [4]: Ca 80% wurde für die Herstellung von so genanntem Magerbeton eingesetzt; nur ca. 20% des Mischgranulats wurde für die Herstellung von Konstruktionsbeton genutzt. Die Suche nach weiteren Einsatzmöglichkeiten für Mischgranulat drängt sich auf, um der steigenden Menge an Mischabbruch auf Grund des Rückbaus von Gebäuden und Infrastrukturbauten aus den 60er Jahren und der damit verbundenen Verfügbarkeit von aufbereitetem Mischgranulat gerecht zu werden [5, 6].

Neben der Verwendung von Mischgranulat zur Herstellung von Magerbeton wird vermehrt der Wunsch von Seiten ökologisch motivierter Bauherren geäussert, Mischgranulat ebenfalls zur Herstellung von Konstruktionsbeton zu verwenden. Allerdings setzt die Verwendung von Mischgranulat im Konstruktionsbeton voraus, dass die charakteristischen Festbetoneigenschaften und das Tragwerksverhalten dieses Recyclingbetons bekannt sind.

Die Notwendigkeit, ingenieurtechnische Grundlagen für die Verwendung von Konstruktionsbeton mit Mischgranulat zu schaffen und damit die Wiederverwertung des Mischabbruchs zu fördern, führte zu diesem Projekt. Das Projekt bildet eine wesentliche Grundlage für das SIA-Merkblatt MB 2030 „Recyclingbeton“, welches die notwendigen Angaben für die Bemessung von Recyclingbeton enthalten soll.

2. Zielsetzung

Die Hauptziele dieses Projektes sind einerseits:

- 1) die Verwendungsmöglichkeit von Beton mit Mischgranulat im Hochbau als NPK-A-Beton zu prüfen und andererseits
- 2) das Tragwerksverhalten und die Festbetoneigenschaften von Beton mit Mischgranulat zu untersuchen und die Unterschiede zu Beton aus natürlicher Gesteinskörnung festzustellen.

Die Rahmenbedingungen für dieses Projekt sind wie folgt:

- Die Recyclingbetone sollen die Anforderungen an eine baupraktisch gute Verarbeitbarkeit des Frischbetons erfüllen.
- In der Praxis streut die stoffliche Zusammensetzung der Mischgranulate stark. Aus diesem Grund ist die stoffliche Zusammensetzung der im Projekt verwendeten Mischgranulate gezielt zu variieren (Anteil an Körnern aus Mauersteinen und Ziegeln aus gebranntem Ton ($R_{b,T}$) von 5 M.-%, 10 M.-%, 25 M.-% bzw. 35 M.-%).
- Es ist Mischgranulat einschliesslich der Korngruppe 0/4 (feine Gesteinskörnung) zu verwenden.

3. Material und Methoden

3.1 Recycling-Gesteinskörnung

In den Vorversuchen wurden zwei Recycling-Gesteinskörnungen aus Mischabbruch (M-V1 und M-V2) nach unterschiedlicher Aufbereitung der Firma X untersucht. Die Aufbereitung und die Zusammensetzung von M-V1 und M-V2 beziehungsweise die anteilmässige Verwendung dieser Mischgranulate im Beton (M-V1, M-V2, M-Vs und M-V50) sind in Abbildung 3.1 dargestellt.

Die Recycling-Gesteinskörnungen für die Betone der Hauptversuche sollten gemäss den oben genannten Rahmenbedingungen unterschiedliche Anteile an Körnern aus Mauerziegel (d.h. Mauersteine und Ziegel), Kalksandsteinen, nicht schwimmendem Porenbeton (R_b) gemäss SN EN 933-11 [7] enthalten. Deshalb war es in den Versuchen notwendig, den Anteil an R_b im Mischgranulat gezielt zu steuern. Da Backsteine in der Regel eine niedrigere Festigkeit haben als Kalksandsteine, wurde in diesem Projekt ausschliesslich mit Körnern aus Mauersteinen und Ziegeln aus gebranntem Ton ($R_{b,T}$) gearbeitet. Das verwendete Misch- und Betongranulat wurde von der Firma Y in einer mobilen Brecheranlage aus Mischabbruch bzw. Betonabbruch hergestellt. Das $R_{b,T}$ (nur Körner aus Mauersteinen und Ziegeln gebranntem Ton) wurde ebenfalls in dieser mobilen Brecheranlage hergestellt. Alle Recycling-Gesteinskörnungen wurden nach der Aufbereitung in die Korngruppen 0/4 und 4/25 aufgeteilt.

Die Recycling-Gesteinskörnungen der Hauptversuche (M-1 bis M-4) sollten die im Projektziel definierten Anteile an $R_{b,T}$ von 5 M.-%, 10 M.-%, 25 M.-% und 35 M.-% enthalten. Die gezielte Zusammenmischung dieser Mischgranulate aus den Ausgangsmaterialien (Mischgranulat M, Betongranulat C, natürliche Gesteinskörnung und $R_{b,T}$) ist in Abbildung 3.2 graphisch und in Masseprozent (M.-%) der jeweiligen Korngruppe angegeben. Die Überprüfung dieser Vorgaben für den Mauerwerksgranulatanteil durch die Bestimmung der stofflichen Zusammensetzung zeigte eine gute Übereinstimmung.

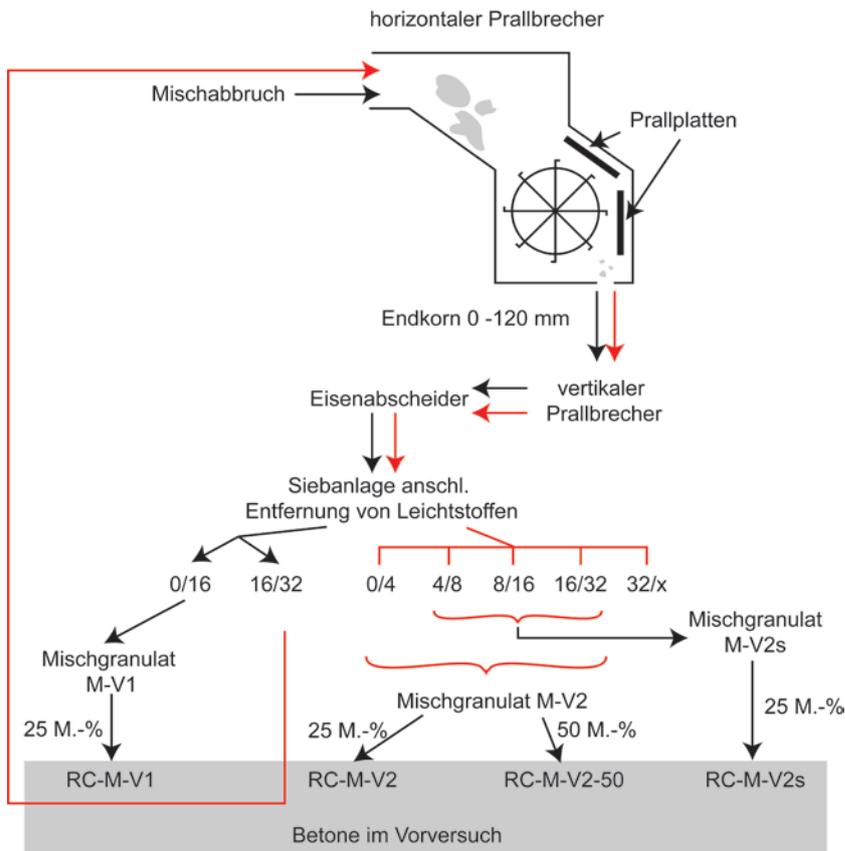


Abbildung 3.1 Schematische Darstellung der Aufbereitung und der stofflichen Zusammensetzung der Mischgranulate (M-V1, M-V2, M-V2s und M-V2-50) der Firma X für die Vorversuche

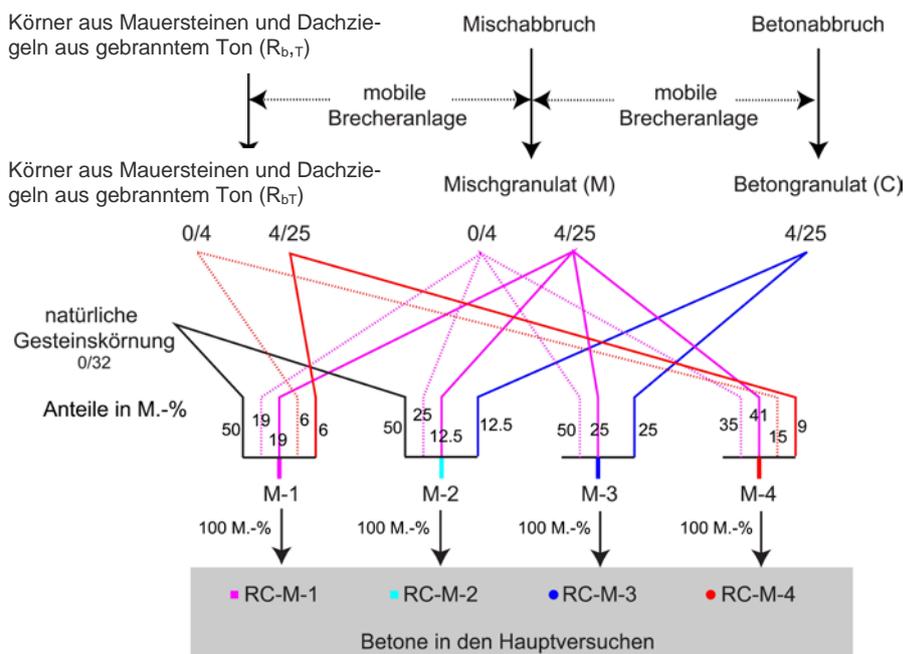


Abbildung 3.2 Schematische Darstellung der Aufbereitung und der stofflichen Zusammensetzung der Mischgranulate M1 bis M4 der Firma Y für die Hauptversuche

Tabelle 3-1 Stoffliche Zusammensetzung der Mischgranulate aus den Vorversuchen (M-V1, M-V2, M-V2s und M-V2-50), sowie aus den Hauptversuchen (M-1 bis M-4), bestimmt gemäss Norm SN EN 933-11 [7]

		M-V1	M-V2	M-V2s	M-V2-50	M-1	M-2	M-3	M-4
		[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
Mischgranulat		25	25	25	50	50	50	100	100
mit Anteil an	$R_{b,T}$	4	4	4	8	24	5	9	38
mit Anteil an	R_c	14.5	12.5	12.5	12.5	14	29	57	26
mit Anteil an	R_u	5.5	8	8	8	12	16	31	35
natürliche Ge- steinskörnung		75	75	75	50	50	50	0	0

Bei den Mischgranulaten für die Hauptversuche sowie bei der natürlichen Gesteinskörnung zur Herstellung des Referenzbetons wurden folgende charakteristischen Eigenschaften ermittelt: die Kornrohddichte und die Wasseraufnahme gemäss der Norm SN EN 1097-6 [8] sowie der Hohlraumgehalt des lose geschütteten Granulats gemäss SN EN 1097-3 [9]. Die Resultate sind exemplarisch für die Mischgranulate aus den Hauptversuchen (M1 bis M4) in Tabelle 3-2 aufgeführt.

Tabelle 3-2 Eigenschaften der verwendeten Mischgranulate aus den Hauptversuchen (M1 bis M4) sowie der natürlichen Gesteinskörnung (A) für die Herstellung des Referenzbetons

Eigenschaften		M-1	M-2	M-3	M-4	A
		[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]	[M.-%]
Kornrohddichte auf ofentrockener Basis ¹⁾	[kg/m ³]	2340	2551	2439	2160	2648
Wasseraufnahme	[M.-%] ²⁾	7.3	2.1	6.5	10.5	0.9
Hohlraumgehalt des lose geschütteten Granulats	[%]	33	35	40	42	24.6

¹⁾ getrocknet bei (110±5)°C

²⁾ nach dem 24 Stunden Aufsaugen, bezogen auf die Trockenmasse

Unter Berücksichtigung der stofflichen Zusammensetzung war zu erkennen, dass mit steigendem Anteil an $R_{b,T}$ die Wasseraufnahme des Mischgranulats infolge seiner vergleichsweise kleineren Kornrohddichte (vgl. R_c und R_u) zunahm. Der Hohlraumgehalt der Mischgranulate war auf Grund des hohen Anteils an gebrochener Gesteinskörnung (nicht kubische Kornform) und der rauen Oberfläche mit 33 - 42 Vol-% bedeutend höher als jener der verwendeten natürlichen Gesteinskörnung A (Aluvialkies-Sand, Schweizer Mittelland). Diese im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung abweichenden Eigenschaften waren bei der Betonherstellung zu berücksichtigen.

3.2 Betonherstellung

Der Entwurf der Mischungsrezepturen erfolgte einerseits mit dem Ziel, eine vergleichbar gute Verarbeitbarkeit der Betonmischungen zu gewährleisten. Andererseits sollten die Anforderungen an die Zusammensetzung eines NPK A-Betons aus natürlicher Gesteinskörnung (C25/30, Expositionsklassen XC1(CH), XC2(CH)) gemäss SN EN 206-1 [10], Tabelle NA 3) berücksichtigt werden: Mindestzementgehalt von 280 kg/m^3 , maximaler w/z-Wert von 0.65. Die Zementmenge von 320 kg/m^3 wurde auf Grund des vergleichsweise hohen Hohlraumgehalts (33 - 42 Vol.-%) des lose geschütteten Mischgranulats festgelegt. Es wurde ein Zement CEM II/A-LL 42.5 N sowie ein Fließmittel auf Basis von Polycarboxylaten verwendet. Um eine gute Verarbeitbarkeit des Betons zu erhalten, wurde der Konsistenzbereich wie folgt definiert: Ausbreitmass entsprechend der Klassen F2 und F3 (350 mm bis 480 mm), Verdichtungsmass der Klasse C3 (1.10 - 1.04) entsprechend SN EN 206-1 [10]. Die Frischbetonprüfungen wurden gemäss Norm SN EN 12350, Teil 4 bis Teil 7 [11-14] durchgeführt. Um die Festbetoneigenschaften wie auch das Tragwerksverhalten der Recyclingbetone (RC-M) mit einem Beton aus natürlicher Gesteinskörnung (C) vergleichen zu können, wurde ein solcher hergestellt und geprüft. Die Betonzusammensetzung ist in Tabelle 3-3 aufgeführt.

3.3 Festbetonprüfungen

Die Betondruckfestigkeit wurde sowohl an Würfeln ($f_{c,cube}$) wie auch an Zylindern (f_c) gemäss SN EN 12390-3 [15] bestimmt. Biegezugfestigkeit $f_{ct,bz}$ und E-Modul E_c wurden entsprechend der Norm SN EN 12390-5 [16] beziehungsweise SIA 262/1 [17], Anhang G ermittelt. Die Bestimmung des Schwindens und Kriechens erfolgte gemäss SIA 262/1 [18], Anhang F.

Die maximalen Stauchungen in der Betondruckzone wurden mit Hilfe von exzentrisch gedrückten Prismen simuliert (Prüfmethodik siehe Hauptbericht). Das Verbundverhalten wurde untersucht, indem einbetonierte Betonstähle aus dem Recyclingbeton ausgezogen wurden. Dabei wurde die benötigte Kraft sowie die Relativverschiebung zwischen Bewehrungsstahl und Beton am unbelasteten Stabende gemessen. Zur Ermittlung der Querkrafttragfähigkeit wurden 4-Punkt-Biegeversuche durchgeführt. Die Prüfkörper waren so dimensioniert, dass sich Schubbrüche ausbilden konnten und nicht wie bei solchen Versuchen üblich Biegebrüche eintraten. Des Weiteren wurden Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit (wie Dichtigkeit gegenüber Gasen, Wasserleitfähigkeit beziehungsweise mikroskopische Untersuchungen) vorgenommen. Diese sind im Hauptbericht aufgeführt.

Tabelle 3-3 Zusammensetzung der Recycling-Betone mit Mischgranulaten (RC-M) aus den Vorversuchen (M-V1, M-V2, M-V2s und M-V2-50) und aus den Hauptversuchen (M-1 bis M-4) inklusive des Referenzbetons (C)

		RC-M-V1	RC-M-V2	RC-M-V2s	RC-M-V2-50	RC-M-1	RC-M-2	RC-M-3	RC-M-4	C
Betonzusammensetzung										
Gesteinskörnung gesamt	[kg/m ³]	1808	1764	1842	1705	1628	1747	1602	1515	1950
Zement	[kg/m ³]	320	320	320	320	320	320	320	320	300
Wasser dosiert	[l/m ³]	158	160	143	165	200	200	250	280	150
Fliessmittel ¹⁾	[M.-%]	0.5	0.5	0.5	0.5	1.1	1.1	1.0	1.5	-

¹⁾ bezogen auf den Zementgehalt.

4. Resultate und Interpretation

4.1 Frischbetoneigenschaften

In Abhängigkeit von den charakteristischen Eigenschaften des verwendeten Mischgranulats zeigten die untersuchten Recyclingbetone eine tendenziell schnellere zeitliche Abnahme des Ausbreitmasses, und dementsprechend eine schnellere Abnahme der Verarbeitbarkeit als es für Beton aus natürlicher Gesteinskörnung im Mittelland üblich ist (Tabelle 4-1). Dies verdeutlicht, dass das Mischgranulat zwar hauptsächlich während der Betonherstellung Wasser aufnimmt, dass aber zusätzlich noch ein Nachsaugen nach der Betonherstellung stattfindet.

4.2 Festbetoneigenschaften

In Tabelle 4-2 sind die Mittelwerte der Festigkeiten $f_{c,cube}$ und f_c , der Rohdichte ρ und des E-Moduls E_{rc} für jede der verwendeten Betonzusammensetzungen angegeben. Für die in den Hauptversuchen verwendeten Betonzusammensetzungen (RC-M-1, RC-M-2, RC-M-3, RC-M-4) wurden die Mittelwerte der jeweils ersten Mischung angegeben.

Die Recyclingbetone mit 50% Mischgranulat und einem Anteil an $R_{b,T}$ von bis zu 24 M.-% (RC-M-1, RC-M-2) erreichten die geforderte Festigkeitsklasse C25/30 eines NPK A-Betons. Der Recyclingbeton hergestellt aus 100% Mischgranulat und einem Anteil an $R_{b,T}$ von 9 M.-% (RC-M-3) entsprach nicht der geforderten **Druckfestigkeitsklasse** C25/30 eines NPK A-Betons. Hingegen erfüllte der Recyclingbeton hergestellt aus 100% Mischgranulat und dem hohen Anteil an $R_{b,T}$ von bis zu 38 M.-% (RC-M-4) die geforderte Festigkeitsklasse C25/30 eines NPK A-Betons – wenn auch nur sehr knapp. Bezugnehmend auf die in der Norm SN EN 206-1 [10] aufgeführten Anforderungen an die Betonzusammensetzung eines NPK A-Betons basieren diese Betondruckfestigkeiten auf w/z -Werten (Tabelle 4-1), die bedeutend kleiner waren als der maximal zulässige ($w/z=0.65$). Des Weiteren war der dosierte Zementgehalt von 320 kg/m^3 wesentlich höher als der normativ für einen NPK A-Beton geforderte Mindestzementgehalt von 280 kg/m^3 .

In dieser Untersuchung hat sich nicht der Anteil an $R_{b,T}$, sondern v.a. der Anteil am verwendeten Mischgranulat auf die Druckfestigkeit ausgewirkt.

Tabelle 4-1 Frischbetoneigenschaften der Recycling-Betone mit Mischgranulaten (RC-M) aus den Vorversuchen (M-V1, M-V2, M-V2s und M-V2-50) und aus den Hauptversuchen (M-1 bis M-4) inklusive des Referenzbetons (C)

		RC-M-V1	RC-M-V2	RC-M-V2s	RC-M-V2-50	RC-M-1	RC-M-2	RC-M-3	RC-M-4	C
Frischbetoneigenschaften										
Wasser tot ¹⁾	[l/m ³]	181	173	175	202	235	204	288	297	157
Wasser wirk. ²⁾	[l/m ³]	173	164	168	168	173	188	183	137	150
w/z	[-]	0.54	0.52	0.53	0.53	0.54	0.59	0.58	0.44	0.50
w/zgesamt	[-]	0.57	0.54	0.55	0.63	0.73	0.64	0.90	0.97	0.53
Luftgehalt	[%]	0.8	1.0	1.9	1.6	2.7	2.6	2.8	3.1	1.1
Ausbreitmass	[mm]	510	570	400	480	540	530	460	380	390
Ausbreitmass, 30min	[mm]	390	540	340	400	490	510	340	300	370
Verdichtungsmass	[-]	n.b.	n.b.	n.b.	n.b.	1.04	1.03	1.07	1.09	1.09
Frischbeton-Rohdichte	[kg/m ³]	2360	2422	2392	2229	2275	2278	2170	2126	2450

¹⁾ Summe aus dem Zugabewasser, dem bereits in der Gesteinskörnung und auf dessen Oberfläche enthaltenen Wasser und dem Wasser in Zusatzmitteln und Zusatzstoffen gemäss SN EN 206-1 [10].

²⁾ wirksamer Wassergehalt berechnet aus dem Gesamtwassermenge und der Wassermenge, die vom ofentrockenen Mischgranulat M beim Pyknometerverfahren nach 24 h (WA₂₄) aufgenommen wird.

Tabelle 4-2 Mittelwerte für Druck-, Biegezug- und Zugfestigkeit, sowie E-Modul und Rohdichte

	Bezeichnung	% M / % R _b	f _{c,cube} [N/mm ²]	f _c [N/mm ²]	f _{ct,bz} [N/mm ²]	f _{ct} [N/mm ²]	E _{rc} [N/mm ²]	ρ [kg/m ³]	f _c / f _{c,cube} [-]
◁	RC-M-V1	25/4	44.4	-	5.8	2.9	32700	2341	-
▷	RC-M-V2	25/4	51.1	-	6.6	2.8	35100	2390	-
▽	RC-M-V2-s	25/4	49.3	-	6.1	2.9	34300	2337	-
□	RC-M-V2-50	50/8	50.7	-	5.6	2.4	31850	2280	-
■	RC-M-1	50/24	43.0	36.6	5.4	2.8	26750	2247	0.85
■	RC-M-2	50/5	39.0	34.0	5.1	2.4	27050	2281	0.87
●	RC-M-3	100/9	28.7	26.5	3.9	2.0	17600	2129	0.92
●	RC-M-4	100/38	34.4	29.5	4.2	2.1	18300	2060	0.86

*Angaben in Masseprozent der gesamten Gesteinskörnung

Sowohl die **Biegezugfestigkeit** als auch die zentrische **Zugfestigkeit** der Recyclingbetone nahmen mit steigender Betondruckfestigkeit zu (Abbildung 4.1). Damit wiesen die Recyclingbetone aus Mischgranulat ein gleiches Verhalten auf wie der Referenzbeton C und lagen in dem von Gröbl et al. [19] definierten Bereich für Betone aus natürlicher Gesteinskörnung (Gleichung 1):

$$f_{ct} = c \cdot f_c^{2/3} \quad \text{in N/mm}^2 \quad (1)$$

mit c = 0.35...0.55 für die Biegezug- und c = 0.17...0.32 für die zentrische Zugfestigkeit (Abbildung 4.1, grau hinterlegter Bereich).

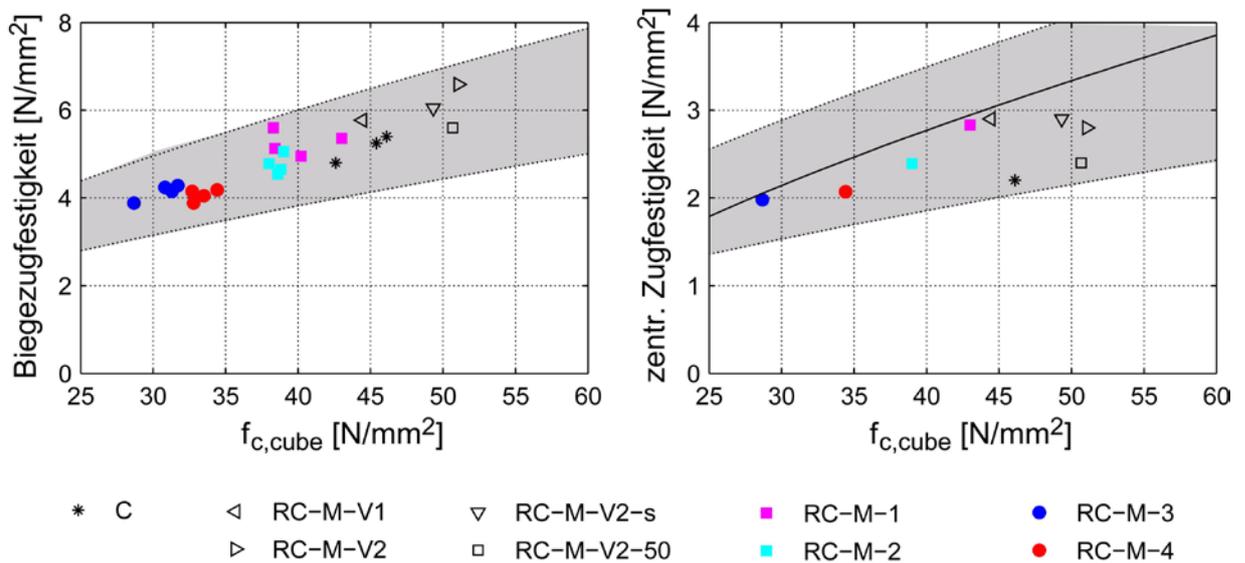


Abbildung 4.1 Linke Seite: Biegezugfestigkeit f_{ct,bz} der Recyclingbetone (RC-M) und des Referenzbetons (C). Der grau hinterlegte Bereich ist nach Gröbl et al. [19], der für Beton aus natürlicher Gesteinskörnung übliche Bereich für Biegezugfestigkeiten. Rechte Seite: Zentrische Zugfestigkeit f_{ct} der

Recyclingbetone (RC-M) und des Referenzbetons (C). Die ausgezogene Linie zeigt die mittlere Betonzugfestigkeit nach CEB-FIP Model Code (1993) [20].

Eine Beziehung zwischen der mittleren Zugfestigkeit und der charakteristischen Druckfestigkeit f_{ck} für Beton aus natürlicher Gesteinskörnung ist in CEB-FIP Model Code [20] gegeben (Gleichung 2):

$$f_{ctm} = 0.3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad \text{in N/mm}^2 \quad (2)$$

Unter Berücksichtigung der in der SIA 262 [21], Ziffer 3.1.2.2.3 aufgeführten Formel (Gleichung 3) kann der charakteristische Wert der zentrischen Zylinderdruckfestigkeit aus der mittleren Druckfestigkeit berechnet werden mit:

$$f_{ck} = f_m - 8 \quad \text{in N/mm}^2 \quad (3)$$

Basierend auf dieser Berechnung (3) wurde in Abbildung 4.1, rechts die Beziehung nach Gleichung 2 mit einer durchgezogenen Linie dargestellt. Aufgrund des geringen Unterschiedes zwischen den gemessenen und berechneten zentrischen Zugfestigkeiten kann die Zugfestigkeit f_{ct} des RC-M wie für Beton mit natürlicher Gesteinskörnung aus der Druckfestigkeit entsprechend CEB-FIB Model Code (1990) [20], Gleichung (2) abgeschätzt werden.

Der **Elastizitätsmodul** E_{rc} der untersuchten Recyclingbetone mit 50 M.-% Mischgranulat (RC-M-1, RC-M-2) lag an der unteren Grenze des in der SIA 262 [21], Ziffer 3.1.2.3.3 definierten Bereichs für gebrochenen Kalk (s. Abbildung 4.2) und bei den Recyclingbetonen mit 100 M.-% Mischgranulat (RC-M-3, RC-M-4) an der unteren Grenze des definierten Bereichs für glimmerhaltiges Gestein. Entsprechend den Untersuchungen zur Betondruckfestigkeit ist auch bei dieser Untersuchung zu erkennen, dass sich nicht der Anteil an $R_{b,T}$, sondern v.a. der Anteil am verwendeten Mischgranulat auf den E-Modul auswirkt.

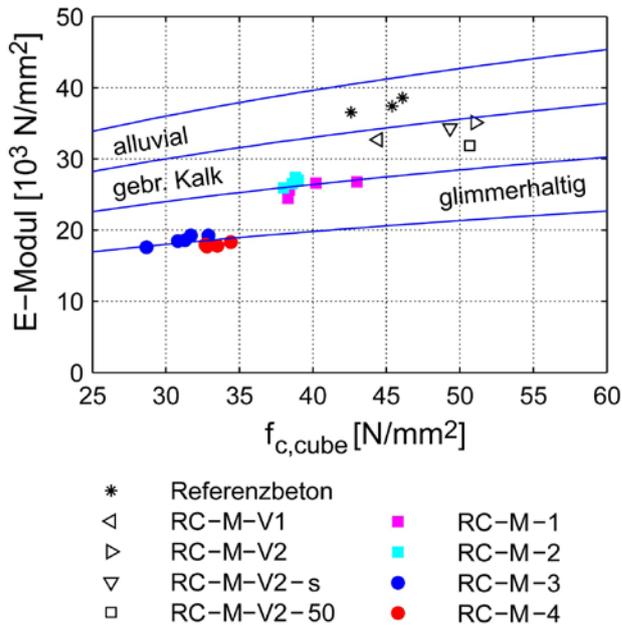


Abbildung 4. 2 Elastizitätsmodul (E-Modul) der Recyclingbetone (RC-M) und des Referenzbetons (C) aus natürlicher Gesteinskörnung versus Würfeldruckfestigkeit ($f_{c,cube}$). Die Bereiche zwischen den ausgezogenen Linien entsprechen den in der SIA 262 [21] angegebenen Anhaltswerten für Alluvialkies, Gesteinskörnung aus gebrochenem Kalk bzw. glimmerhaltigem Gestein.

Das **Schwindmass** des Recyclingbetons mit Mischgranulat ϵ_{rcs} war grösser als dasjenige des Betons mit natürlicher Gesteinskörnung ϵ_{cs} . Wie im Hauptbericht ausführlich dargestellt, weisen die bisherigen Daten darauf hin [22, 23, 24, 25], dass sich das Schwindmass bei Recyclingbeton mit Mischgranulat nicht allein aus der Druckfestigkeit ableiten lässt. Das Schwindmass kann für den Recyclingbeton wesentlich zuverlässiger über die Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul beschrieben werden (Abbildung 4.3). Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass das Schwindmass des Recyclingbetons mit Mischgranulat gemäss Gleichung 4 abgeschätzt werden kann.

$$\epsilon_{rcs,\infty} = \frac{\epsilon_{cs,\infty}}{\eta_r} \quad \text{mit} \quad \eta_r = \frac{E_{rcm}}{E_{cm}} \leq 1, \tag{4}$$

wobei E_{rcm} der Elastizitätsmodul des Recyclingbetons ist. Der mittlere Elastizitätsmodul E_{cm} wird nach SIA 262 [21], Ziffer 3.1.2.3.3 mit $k_E = 11'000$ für Gesteinskörnung aus Alluvialkies (Wert zwischen 10'000 bis 12'000), und mit f_{cm} der mittleren Druckfestigkeit des Normalbetons (Beton mit einer Rohdichte (ofentrocken) von 2000 bis 2600 kg/m^3) berechnet:

$$E_{cm} = k_E \cdot \sqrt[3]{f_{cm}} \tag{5}$$

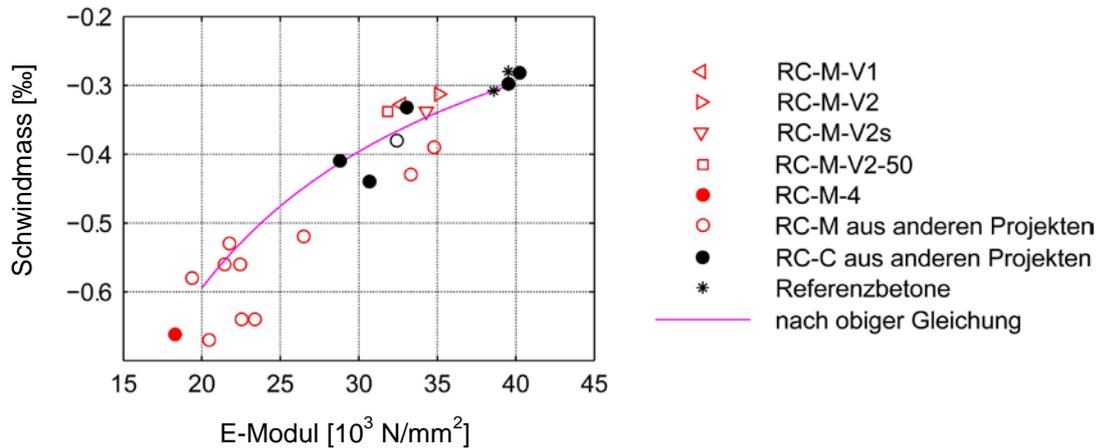


Abbildung 4.1 Schwindmass nach 91 Tagen gegenüber dem Elastizitätsmodul. (Vergleich mit Daten aus anderen Projekten an der Empa ([22], [23], [24], [25])

Kriechen: Im Vergleich zu der nach Norm SIA 262 [21], Ziffer 3.1.2.5.3 berechneten Kriechzahl φ (Abbildung 4.4, ausgezogene blaue Linie), wiesen die Recyclingbetone bei gleicher Druckfestigkeit eine erhöhte Kriechzahl auf (Abbildung 4.4).

Die Regressionsgerade der Kriechzahlen aus den experimentellen Daten verdeutlicht, dass die Kriechzahl der Recyclingbetone ca. 25% grösser ist als jene der nach Norm SIA 262 [21], Ziffer 3.1.2.5.3 berechneten. Auf Grund dessen wird für die Berechnung der Kriechverformung des Recyclingbetons die Multiplikation der Kriechzahl mit dem Faktor 1.25 empfohlen (Abbildung 4.4., gestrichelte rote Linie):

$$\varphi_{rc}(t, t_0) = 1.25 \cdot \varphi(t, t_0) \tag{5}$$

mit $\varphi(t, t_0)$, der Kriechzahl nach SIA 262 [21], Ziffer 3.1.2.5.3.

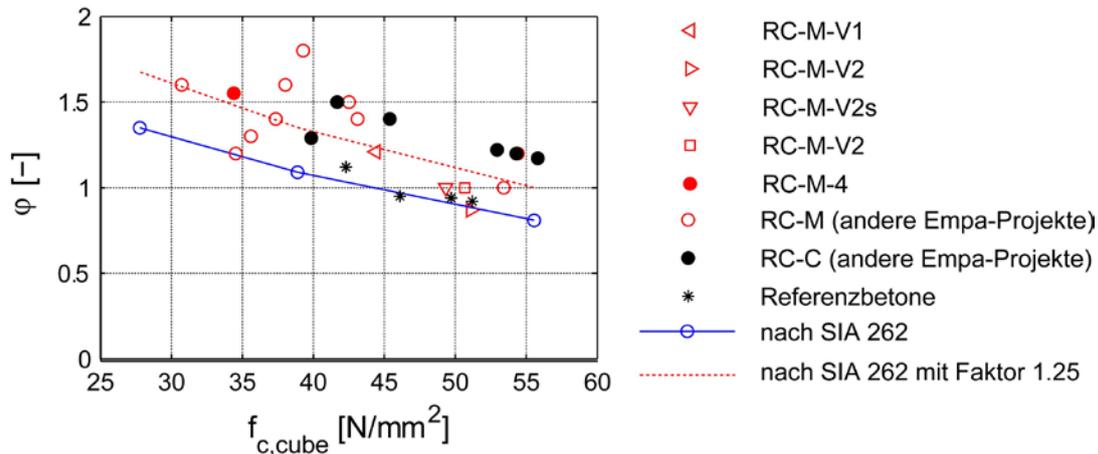


Abbildung 4.2 Kriechzahlen ϕ (91d,28d) verschiedener Betone in Abhängigkeit ihrer Würfeldruckfestigkeit (Vergleich mit Daten aus anderen Projekten an der Empa ([22], [23], [24], [25])).

4.3 Tragwerksverhalten

Bei der Untersuchung der Betondruckzone zeigten die zwei Recyclingbetone aus 100 M.-% Mischgranulat (RC-M-3 und RC-M-4) eine geringere Steifigkeit und zum Versagenszeitpunkt deutlich höhere **Betondruckstauchungen** als der Referenzbeton. Dieses Ergebnis wird durch andere Studien bestätigt, in denen ebenfalls der Einfluss von Mischgranulat auf die Ausbildung der Betondruckzone untersucht wurde [26]. Auf Grund dessen erscheint für Recyclingbeton eine Abminderung der Werte für die Betondruckstauchung in der SIA 262 [21], Ziffer 4.2.1 (wie für Leichtbeton vorgesehen) sinnvoll.

Die gemessenen **Verbundspannungs**-Beziehungen deuten darauf hin, dass das Verbundverhalten von Recyclingbeton mit Mischgranulat (RC-M) nicht grundsätzlich anders ist als das des Referenzbetons (C). Die normierte maximale Verbundspannung f_b war bei den Recyclingbetonen zwar bis zu 20% kleiner als beim Referenzbeton, lag aber noch im für Beton aus natürlicher Gesteinskörnung üblichen Bereich. Die Unterschiede zwischen Probekörpern mit gutem und mit mässigem Verbund waren bei den Recyclingbetonen mit niedrigem Anteil an $R_{b,T}$ (RC-M-2 und RC-M-3) ähnlich stark ausgeprägt wie beim Referenzbeton. Der Grund für das gute Verbundverhalten bei den Prüfkörpern hergestellt aus Beton mit hohem Anteil an $R_{b,T}$ (RC-M-1 und RC-M-4) und mit mässigem Verbund konnte nicht abschliessend geklärt werden.

Die **Querkrafttragfähigkeit** der Platten ohne Querkraftbewehrung aus Recyclingbeton mit Mischgranulat (RC-M-1 bis 4) lag im Mittel 5.4 % unterhalb der nach SIA 262 [21], Ziffer 4.3.3.2.1 (ohne Sicherheitsfaktoren) berechneten Tragfähigkeit. Bezieht man auch die Ergebnisse anderer Autoren ein, lag der Mittelwert der Reduktion der Querkrafttragfähigkeit bei 8.7 %. Ein möglicher Grund für das gute Querkrafttragverhalten des Recyclingbetons mit Mischgranulat (RC-M-1 bis RC-M-4) ist das duktile Verhalten des Recyclingbetons. Dadurch kann unter Umständen ein grösserer Anteil über die Bogen-Stützwirkung abgetragen werden. Die Projektergebnisse und die Auswertung der Literaturdaten deuten darauf hin, dass die Querkrafttragfähigkeit v_{Rd} nach SIA 262 [21] (Ziffer 4.3.3.2.1) mit $D_{max} = 32$ mm berechnet werden könnte und bei Verwendung von mehr als 25 M.-% Mischgranulat um 15 %

abzumindern ist. Diese Forschungsergebnisse gilt es jedoch durch weitere gezielte Untersuchungen zu verifizieren und die Datenmenge zu vergrössern, so dass zum jetzigen Zeitpunkt empfohlen wird, die Querkrafttragfähigkeit von Recyclingbeton mit Mischgranulat analog zum Leichtbeton über den Faktor $D_{\max} = 0$ zum abzumindern.

5. Empfehlungen für die Praxis

5.1 Betonherstellung/Frischbetoneigenschaften von RC-M

Bei der Betonherstellung ist die **Wasserzugabe** um die Saugwassermenge zu erhöhen oder die Recycling-Gesteinskörnung vorzunässen. Dadurch kann einer Abnahme der Verarbeitbarkeit des Recyclingbetons mit Mischgranulat infolge des Nachsaugens von Wasser durch die Recycling-Körner vorgebeugt werden. Die Betonherstellung eines RC-M sollte mit einem höheren Bindemittelleimgehalt und einer höheren Fließmitteldosierung erfolgen als wie sie für Normalbeton üblich ist, um der Anforderung an eine gute Verarbeitung entsprechen zu können.

5.2 Festbetoneigenschaften von RC-M

Die Herstellung eines gut verarbeitbaren RC-Hochbaubetons der Betonsorte **NPK A (Druckfestigkeitsklasse C25/30, XC1 (CH), XC2 (CH))** ist mit einem Anteil an Mischgranulat von maximal 50 M.-% und einem Anteil an $R_{b,T}$ bis 25 M.-% durch folgende betontechnologische Massnahmen realisierbar:

- Die Betonherstellung erfolgt mit einem höheren Zementgehalt (ca. 320 kg/m^3) als dem in der Norm SN EN 206-1 [10], Tabelle NA3 geforderten Mindestzementgehalt von 280 kg/m^3 .
- Der w/z-Wert ist kleiner als der in der Norm SN EN 206-1 [10], Tabelle NA3 geforderte maximale Wert von 0.65.

Bei Bauteilen aus Recyclingbeton mit Mischgranulat (RC-M) sollte berücksichtigt werden, dass folgende Festbetoneigenschaften von den Eigenschaften mit Beton aus natürlicher Gesteinskörnung abweichen können:

Der **Elastizitätsmodul** des RC-M ist deutlich kleiner und vom Betonhersteller als zusätzlicher Kennwert in entsprechenden Prüfungen zu ermitteln und anzugeben.

Das **Endschwindmass** des RC-M ist höher als jenes von Beton aus natürlicher Gesteinskörnung. Es kann zuverlässig über die Abhängigkeit vom Elastizitätsmodul beschrieben werden, so dass eine Abschätzung des Endschwindmasses mit der in diesem Bericht aufgeführten Gleichung 4 (Seite 21) vorgenommen werden kann.

Es hat sich gezeigt, dass die **Kriechverformungen** von RC-M auf Grund der höheren Kriechzahl und des niedrigeren Elastizitätsmoduls um ca. 25% grösser ist als bei Beton aus natürlicher Gesteinskörnung gleicher Druckfestigkeit. Eine Abschätzung der Kriechzahl für Recyclingbeton kann mit Gleichung 5 (Seite 21) erfolgen.

5.3 Bemessung

Die **Querkraftbemessung** (SIA 262 [21], Ziffer 4.3.3.2.1) von Bauteilen aus RC-M bedarf weiterer Abklärungen.

Das **Verbundverhalten** zwischen Stabbewehrung und RC-M unterscheidet sich nicht wesentlich von Beton aus natürlicher Gesteinskörnung. Die **Verankerungslänge** der Stabbewehrung kann somit ohne Abminderung gemäss SIA 262 [21], Ziffer 5.2.5.3, Formel (89) berechnet und die Grundwerte derselben der Tabelle 18 entnommen werden.

Es wird eine Abminderung der **Betondruckstauchung** (SIA 262 [21], Ziffer 4.2.1) für RC-M empfohlen.

5.4 Einsatzgebiete von Recyclingbeton RC-M

Basierend auf den Projektergebnissen und bis weitere Erfahrungen vorliegen, ist folgender Einsatz des Recyclingbetons mit Mischgranulat empfehlenswert:

Tabelle 5-1 Einsatzgebiete von Recyclingbeton RC-M

Recyclingbeton		Betonsorte nach Norm SIA 118/262			
		NPK A		NPK B ¹⁾	
		C25/30	C25/30	C25/30	
RC-M	Anteile $5 \text{ M.-%} \leq R_b \leq 25 \text{ M.-%}$ und $R_c + R_b \geq 25 \text{ M.-%}$	X0(CH)	XC1(CH) trocken XC2(CH)	XC1(CH) nass, XC2(CH)	XC1(CH) nass, XC2(CH), XC3 (CH)

¹⁾ Anmerkung: Der Einsatz als NPK B-Beton kann auf Grund der in diesem Projekt ermittelten Frisch- und Festbetoneigenschaften ebenfalls empfohlen werden, wenn entsprechende betontechnologische Vorkehrungen getroffen werden: Die Betonherstellung muss mit einem Zementgehalt $\geq 320 \text{ kg/m}^3$, einem w/z-Wert < 0.60 und dementsprechend mit einer höheren Fließmitteldosierung erfolgen als wie sie für Normalbeton üblich ist. Hinsichtlich der Expositionsklassen XC1 (CH) bis XC3 (CH) sind in der Norm SN EN 206-1 [10], Tabelle NA 3 beziehungsweise SN EN 206-1 [10], Ziffer 8.2.3.2, Tabelle N.5 weder Prüfungen noch Grenzwerte aufgeführt, die zu berücksichtigen wären.

In Abbildung 5.1 sind Beispiele für den Einsatz von Beton mit Mischgranulat grafisch dargestellt. Die Eigenschaften des Recyclingbeton RC-M (Elastizitätsmodul, Schwinden und Kriechen) unterscheiden

sich stärker als jene des Recyclingbeton RC-C von Beton mit natürlicher Gesteinskörnung. Deshalb ist ein Einsatz von Recyclingbeton RC-M vor allem bei Bauteilen mit niedrigen Anforderungen an das Schwindmass und das Kriechverhalten vorzusehen. In der planerischen Ausbildung von Decken ist bei der Festlegung der Spannweiten der im Vergleich zu Beton mit natürlicher Gesteinskörnung kleinere Elastizitätsmodul zu berücksichtigen, um zu grosse Durchbiegungen zu vermeiden.

Auf Grund der fehlenden Untersuchungen zum Verhalten von Recyclingbeton mit Vorspannung sowie zyklischen Lasten, darf für Spannbeton und ermüdungsgefährdete Bauteile RC-M nicht verwendet werden.

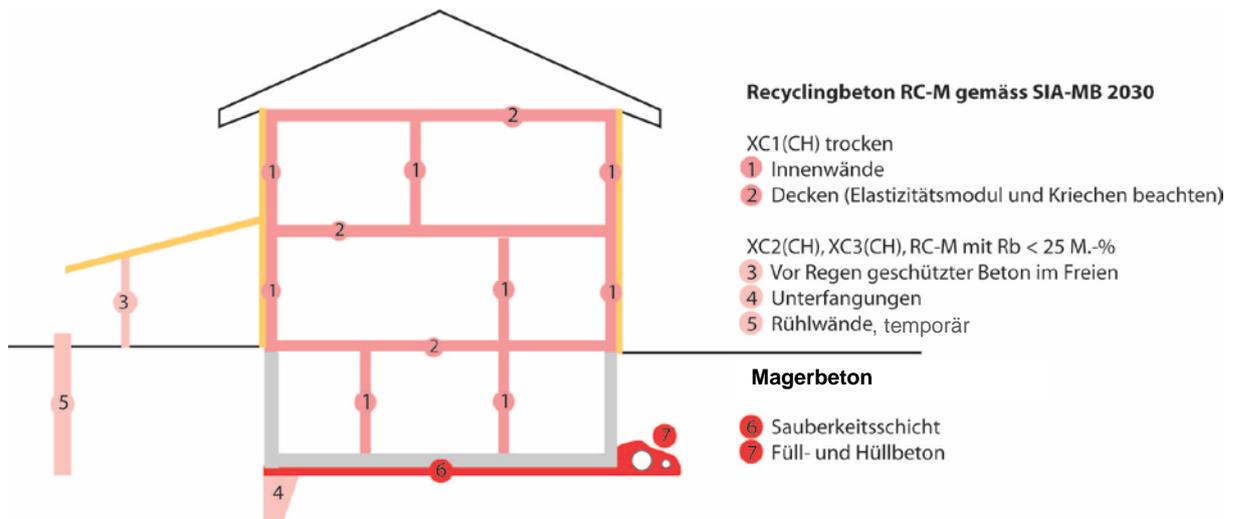


Abbildung 5.1: Beispiele für Einsatz von Beton mit Mischgranulat

Anmerkung: Mischgranulat M kann auch in loser Form eingesetzt werden. Für die Verwendung als Granulat mit Deckschicht muss das Mischgranulat M die Anforderungen der BAFU-Richtlinie UV-0631 [27] erfüllen (gemäss o.g. Richtlinie: in Grundwasserschutz-zonen nur mit Bewilligung, der direkte Kontakt mit Grundwasser ist auszuschliessen). Als Deckschicht gelten bindemittelgebundene Schichten (Asphaltbelag, Betonbelag), welche die Durchsickerung des gesamten Materials mit Niederschlägen verhindert.

6. Anmerkungen zur Herstellung von RC-M

- Bei der Herstellung von RC-M sind die in den Normen SN EN 206-1 [10] und SN EN 12620 [28] und die in der unten aufgeführten Tabelle formulierten Anforderungen an die Gesteinskörnung zu erfüllen:

Tabelle 6-1 Qualitätsanforderungen an Gesteinskörnungen für Recyclingbeton RC-M

Bezeichnung des Betons	Bezeichnung der Gesteinskörnung	Gesteinskörnungen nach SN EN 12620 ¹⁾				Fremdstoffe ²⁾	
		R _u und natürliche Gesteinskörnung	R _c	R _b	R _a	X + R _g	FL
C../.. ³⁾ RC-M	Mischgranulat ⁴⁾	< 95 M.-%		≥ 5 M.-%	≤ 1 M.-%	≤ 0.3 M.-%	≤ 2 cm ³ /kg

¹⁾ Anteile der Auszählung der Körner ≥ 4 mm nach SN EN 933-11 [7]

²⁾ Für besondere Anwendungen, die eine hochwertige Oberflächenbeschaffenheit fordern (z.B. Sichtbeton) gilt die Kategorie FL_{0,2} (≤ 0.2 cm³/kg).

³⁾ Beton gemäss SN EN 206-1, z.B. C25/30.

⁴⁾ Für die Gesteinskörnung der Recyclingbeton RC-M ist einzuhalten: R_c + R_b ≥ 25 M.-%.

- Neben der Druckfestigkeit für die Konformitätsprüfung ist bei jeder dritten Festigkeitsprüfung auch der Elastizitätsmodul des Recyclingbetons nach Norm SIA 262/1 [17] zu bestimmen. Die Bestimmung der deklarierten Mittelwerte erfordert mindestens fünf Prüfergebnisse.
- Um die Schwankungen der Frisch- und Festbetoneigenschaften infolge der Variation der stofflichen Zusammensetzungen des Mischgranulates M zu begrenzen, werden derzeit in der Praxis Massnahmen vorgenommen, wie:
 - o Selektiver Rückbau
 - o Waschen der Recycling-Gesteinskörnung während des Aufbereitungsprozesses
 - o Absieben der Korngruppe 0/8 vor dem Brechvorgang
 - o Begrenzen des prozentualen Anteils an Mischgranulat M bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung
 - o Austausch der Korngruppe 0/4 durch natürlichen Sand

7. Weiterer Untersuchungsbedarf

- I. Der Einfluss an verwendetem $R_{b,T}$ im Vergleich zum Anteil an verwendetem Mischgranulat auf die Festbetoneigenschaften und das Tragverhaltensverhalten konnte in diesem Projekt nicht eindeutig aufgezeigt werden. Untersuchungen zur Betondruckfestigkeit und zum E-Modul liessen erkennen, dass sich nicht der Anteil an $R_{b,T}$, sondern v.a. der Anteil an Mischgranulat auswirkt. Hingegen ist das gute Verbundverhalten (bei mässigem Verbund) der Recyclingbetone auf den hohen Anteil an $R_{b,T}$ zurückzuführen. Um eine eindeutige Aussage formulieren zu können, sind weitere Untersuchungen notwendig.
- II. Es wird der Wunsch von Seiten ökologisch motivierter Bauherren geäussert, Recyclingbeton mit Mischgranulat auch als NPK C-Beton einzusetzen. Für einen gesicherten Einsatz sind hierzu weiterführende Untersuchungen vorzunehmen, v.a. unter Berücksichtigung der unter Punkt III bis V aufgeführten Anmerkungen
- III. Es liegen derzeit nur sehr wenige bis gar keine (Langzeit-) Erfahrungen in Bezug auf die Dauerhaftigkeit von Recyclingbeton mit Mischgranulat vor. Es ist wichtig, die noch geringe Datenmenge der im Labor ermittelten Untersuchungsergebnisse zur Dauerhaftigkeit durch weitere Untersuchungen zu ergänzen. Des Weiteren sollten Qualitätskontrollen an Bauten, die bereits mit Recyclingbeton mit Mischgranulat realisiert wurden, in die Untersuchungen einbezogen werden.
- IV. Wie Untersuchungen zeigen [29] nimmt der Karbonatisierungswiderstand der Betone tendenziell ab und das Risiko für Korrosionsschäden zu, wenn Recycling-Gesteinskörnung aus Mischabbruch verwendet wird. Es ist zu untersuchen in wie weit Zemente mit reduziertem Portlandzementklinkergehalt für Recyclingbeton aus Mischgranulat eingesetzt werden können und ob in diesem Zusammenhang Vorkehrungen von Seiten Planung (z.B: Verwendung nichtrostenden Chromstahls, Erhöhung der Bewehrungsüberdeckung) zu treffen sind.
- V. In Bezug auf die derzeit zur Verfügung stehende Normprüfung zur Bestimmung der Wasserleitfähigkeit von Beton (Norm SIA 262/1 [30], Anhang A) besteht eine Unsicherheit darin, in wie weit diese für Recyclingbeton anwendbar ist. Erste Empa-interne Untersuchungen zeigten, dass bei der Wasserleitfähigkeitsprüfung nicht nur die Porosität des Zementsteins sondern auch jene der Recycling-Gesteinskörnung einen Einfluss hat. Dieser Aspekt wird in der derzeitigen Prüfung nicht berücksichtigt.
- VI. Die Querkrafttragfähigkeit der untersuchten Recyclingbetone RC-M-1 bis 4 lag im Bereich der Tragfähigkeit des Betons aus natürlicher Gesteinskörnung. Es wird vermutet, dass diese hohen Querkrafttragfähigkeiten erreicht werden konnten, weil durch das duktile Verhalten des Recyclingbetons die abzutragende Querkraft gut auf die Bogen-Stützwirkung umgelagert werden konnte. Ob dies tatsächlich der Fall ist, müsste durch gezielte Untersuchungen überprüft werden.
- VII. Der Widerstand gegen Durchstanzen ohne Durchstanzbewehrung von RC-M wird in vielen Modellvorstellungen vom Querkraftwiderstand abgeleitet [31]. Es ist deshalb sinnvoll zuerst in Querkraftversuchen den Mechanismus zu untersuchen und diesen anschliessend an einzelnen Durchstanzversuchen zu überprüfen.

8. Literaturverzeichnis

- [1] Kytzia, S. (2009), Ökobilanzen von Betonen, 15. Holcim Betontagung Zürich
- [2] BFS (2008), Materialaufwand der Schweiz, Umweltstatistik Schweiz Nr. 14. Neuchâtel
- [3] Energie- und Ressourcenmanagement GmbH (2010), mündliche Mitteilung durch Dr. S. Rubli einschliesslich zur Verfügung gestellten Datenmaterials
- [4] ARV (2009), mündliche Mitteilung durch Herrn B. Suter einschliesslich zur Verfügung gestellten Datenmaterials
- [5] Holcim (2010), Ökobilanzen rezyklierter Gesteinskörnung für Beton. Forschungsbericht der Holcim (Schweiz) AG, ISBN 978-3-9523727-0-8'
- [6] Stäubli, B. (2010), Bau- und Rückbaumengen 1900-2020. Modellierung der wichtigsten Materialflüsse rund um das Bauwerk Kanton Zürich. AWEL, Zürich
- [7] SN EN 933-11 (2008), Prüfverfahren für geometrische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 11: Einteilung der Bestandteile von recykliertem Grobkorn. SIA, Zürich
- [8] SN EN 1097-6 (1999), Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 6: Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme
- [9] SN EN 1097-3 (1999), Prüfverfahren für mechanische und physikalische Eigenschaften von Gesteinskörnungen – Teil 3: Bestimmung von Schüttdichte und Hohlraumgehalt
- [10] SN EN 206-1 (2003), Beton - Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. SIA Zürich
- [11] SN EN 12350-4 (1999), Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmass. SIA Zürich
- [12] SN EN 12350-5 (1999), Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmass. SIA Zürich
- [13] SN EN 12350-6 (1999), Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohddichte. SIA Zürich
- [14] SN EN 12350-7 (2000), Prüfung von Frischbeton - Teil 7: Luftgehalte – Druckverfahren. SIA Zürich
- [15] SN EN 12390-3 (2001), Prüfung von Festbeton - Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern. SIA Zürich

-
- [16] SN EN 12390-5 (2009), Prüfung von Festbeton – Teil 5: Biegezugfestigkeit von Probekörpern. SIA Zürich
- [17] SIA 262/1 (2003), Betonbau - Ergänzende Festlegungen, Anhang G: Elastizitätsmodul. SIA Zürich
- [18] SIA 262/1 (2003), Betonbau - Ergänzende Festlegungen, Anhang F: Schwinden und Kriechen. SIA Zürich
- [19] Grübl, P., Weigler, H. und Karl, S. (2001), Beton – Arten, Herstellung, Eigenschaften. Verlag Ernst & Sohn
- [20] CEB-FIP Model Code 1990 (1993), Bulletin d'information No 213/214, Comité Euro-International du Béton, Redwood Books, Trowbridge, Wiltshire
- [21] SIA 262 (2003), Betonbau. SIA Zürich
- [22] Hoffmann, C. und Huth, O. (2006), Konstruktionsbeton aus rezyklierter Gesteinskörnung. Empa. Dübendorf, ISBN-Nr. 10 3-905594-49-8
- [23] Hoffmann, C. (2005), Mischabbruchgranulat für spezifische Anwendungsgebiete. Bericht Nr. 204128, Empa, Dübendorf
- [24] Hoffmann, C. (2004), Materialkenngrößen von Beton aus Mischabbruch. Bericht-Nr. 203600, Empa, Dübendorf
- [25] Hoffmann, C. (2004), Recyclingbeton aus Mischabbruchgranulat, Bericht.Nr. 203929, Empa, Dübendorf
- [26] Meissner, M. (2000), Biegetragverhalten von Stahlbetonbauteilen mit rezyklierten Zuschlägen, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 505
- [27] BAFU - Richtlinie UV-0631-D (2006), Richtlinie für die Verwertung mineralischer Bauabfälle. Umwelt-Vollzug Nr. 0631. Bundesamt für Umwelt (BAFU), Bern
- [28] SN EN 12620:2002 (2004) Gesteinskörnungen für Beton, CEN, Brüssel
- [29] Hunkeler, F. und Bäurle (2010), Korrosionsbeständigkeit eines nichtrostenden Chromstahls in karbonatisiertem Normal-, leicht- und Recyclingbeton. Beton- und Stahlbetonbau 105, Heft 12
- [30] SIA 262/1 (2003), Betonbau-Ergänzende Festlegung, Anhang A: Wasserleitfähigkeit. SIA Zürich

- [31] Hegger, J. und Görtz, S. (2007), Querkrafttragfähigkeit von Stahlbeton- und Spannbetonbalken aus Normal- und Hochleistungsbeton. DAFStb Heft 557, Beuth Verlag, Berlin