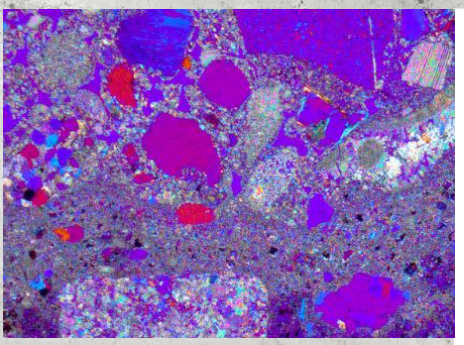
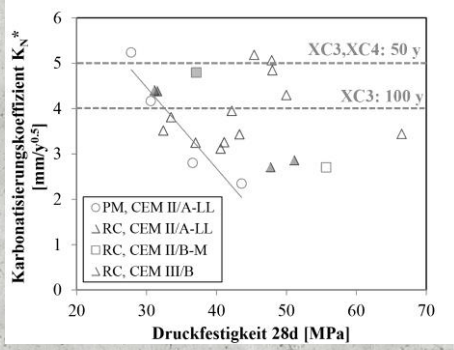




Karbonatisierungs-widerstand von Recyclingbeton

Empa

Dr. Andreas Leeman
Roman Loser

cemsuisse-Projekt 201405 – November 2016
Diese Forschungsarbeit wurde durch cemsuisse, Verband der Schweizerischen Cementindustrie mitfinanziert

Vorwort der Begleitgruppe

Die Nachfrage nach einem vermehrten Einsatz mineralischer Rückbaumaterialien ist weiterhin ansteigend: Einerseits um die Stoffkreisläufe zu schliessen und andererseits um die Menge an zu deponierenden Materialien zu reduzieren. Dabei spielt die Herstellung und die Verwendung von Recyclingbeton – insbesondere des Recyclingbetons mit Betongranulat (RC-C) – eine grosse Rolle.

Mit der Einführung der Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes für Beton im Jahre 2013 und den hierzu vorliegenden Prüfdaten stellt sich jedoch zunehmend die Frage, ob der Recyclingbeton zielsicher die Grenzwerte für den Karbonatisierungskoeffizienten KN erfüllt und die bisher definierten Einsatzgebiete weiterhin verantwortbar sind.

Diese derzeit vorhandene Unsicherheit hat die cemsuisse bewogen, eingehende Untersuchungen durchzuführen und gegebenenfalls Massnahmen zu definieren. Die Erkenntnisse der Untersuchungen zeigen unter anderem, dass bei der Karbonatisierungsfront sogenannte Karbonatisierungsspitzen auftreten, sodass der Karbonatisierungskoeffizient im Vergleich zum Beton aus natürlicher Gesteinskörnung entsprechend erhöht ist. Es wird empfohlen, den w/z-Wert bei RC-Beton der Sorten B und C im Vergleich zu Beton aus natürlicher Gesteinskrönung leicht zu reduzieren. Des Weiteren fliessen die Erkenntnisse in das Korrigendum für die Norm SIA 262/1 ein und sind bei der Überarbeitung des SIA Merkblattes 2030 "Recyclingbeton" zu berücksichtigen.

Cathleen Hoffmann, Holcim (Schweiz) AG

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 spezifischem 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

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung **5**

1. Einleitung **7**

2. Materialien und Methoden **8**

2.1 Materialien 8
2.2 Methoden 10

3. Resultate **10**

3.1 Übersicht 10
3.2 Druckfestigkeit 11
3.3 O_2-Diffusion 12
3.4 Karbonatisierungswiderstand 12
3.4.1 Schnellkarbonatisierung 12
3.4.2 Natürliche Karbonatisierung 13
3.5 Optische Mikroskopie 14

4. Diskussion **17**

4.1 Vergleich der natürlichen und der beschleunigten Karbonatisierung 17
4.2 Einfluss der Pufferkapazität 18
4.3 Einfluss des Sättigungsgrades der Gesteinskörnung 19
4.4 Einfluss der Berücksichtigung von Karbonatisierungsspitzen 20

5. Zusammenfassung **23**

6. Umsetzung und Ausblick **24**

7. Referenzen **25**

Anhang **26**

Für das cemsuisse-Projekt 201405:

Dübendorf, Abteilung Beton / Bauchemie, 14. November 2016

Dr. Andreas Leemann

Zusammenfassung

Projektdauer: Februar 2015 - November 2016

Autoren: Andreas Leemann, Roman Loser

Die Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes für Beton der Sorten B-E wird seit 2013 verlangt (SN EN 206:2013, SIA 262/1:2013). Das Ziel des beantragten Projekts ist die Abklärung, ob Recyclingbeton aus Betongranulat (RC-C) einen verminderten Karbonatisierungswiderstand im Vergleich zu einem Beton aus natürlicher Gesteinskörnung hergestellt mit identischer Druckfestigkeit aufweist, und wenn ja, wieso. Basierend auf den experimentellen Daten werden allfällige Massnahmen definiert. Damit sollen Unsicherheiten bei der Verwendung von RC-Beton bei den Sorten B und C vermieden werden.
Neben einer Serie aus vier Betonen aus natürlicher Gesteinskörnung, die als Referenz diente wurden 18 RC-Betone aus CEM II/A-LL, CEM II/B-M und CEM III/B mit unterschiedlichen Anteilen an Betongranulat hergestellt. Betongranulat wurde sowohl in trockenem als auch in gesättigtem Zustand verwendet.
Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Projekt können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei der Karbonatisierungsfront werden sogenannte Karbonatisierungsspitzen (lokal erhöhte Karbonatisierungstiefen) hauptsächlich durch poröse oder bereits karbonatisierte Betongranulat-Körner verursacht. Werden die Karbonatisierungsspitzen nicht berücksichtigt, liegt der Karbonatisierungskoeffizient K_N im gleichen Bereich wie bei Beton aus natürlicher Gesteinskörnung gleicher Druckfestigkeit. Bei einer Berücksichtigung der Karbonatisierungsspitzen ist eine Erhöhung des Karbonatisierungskoeffizienten um durchschnittlich 10% zu beobachten. Das heisst, dass der Karbonatisierungskoeffizient im Vergleich zum Beton aus natürlicher Gesteinskörnung entsprechend erhöht ist.
- In der SIA 262/1 (Anhang I) werden keine Angaben gemacht, ob Karbonatisierungsspitzen berücksichtigt werden sollen oder nicht. Durch eine Rückmeldung der aus diesem Projekt resultierenden Erkenntnisse an die SIA wird in einem aktuellen Korrigendum der SIA 262/1 verlangt, dass Karbonatisierungsspitzen zu berücksichtigen sind. Werden die Karbonatisierungsspitzen berücksichtigt, gibt es keine Vorbehalte RC-Beton für die Sorten B und C zu verwenden.
- Der Sättigungsgrad des Betongranulats wirkt sich weder auf die Druckfestigkeit nach 2 respektive 28 Tagen aus, noch wird der Karbonatisierungskoeffizient beeinflusst. Bei kurzen Mischzeiten im Betonwerk muss allerdings mit einer schnellen Verschlechterung der Verarbeitbarkeit bei der Verwendung von trockenem Betongranulat gerechnet werden.
- Der Karbonatisierungskoeffizient K_N (Schnellkarbonatisierung) weist eine gute Übersteinstimmung (R^2 = 0.80) mit dem Karbonatisierungskoeffizienten $K_{N,S}$ in unbewitterter Aussenlagerung auf. Die Korrelation mit dem Karbonatisierungskoeffizienten $K_{N,US}$ in der für die Bewehrungskorrosion wichtigen bewitterten Aussenlagerung ist schlechter (R^2 = 0.66). Der Grund dafür ist das zementspezifische Porensystem. Betone aus Zementarten mit silikatischen Zumahlstoffen, wie zum Beispiel CEM III/B, weisen feinere Poren auf als ein Betone aus CEM I. Bei einer hohen relativen Feuchte wie in der bewitterten Aussenlagerung führt die kapillare Kondensation dazu, dass ein feinporiger Beton einen höheren Anteil an wassergefüllten Poren aufweist als ein grobporiger Beton. Durch diesen höheren Anteil an wassergefüllten Poren wird die Karbonatisierung entsprechend stärker verlangsamt, weshalb sich die Korrelation mit der Schnellkarbonatisierung verschlechtert. Es ist zu erwarten, dass auch das kapillare Saugen bei Niederschlag und die nachfolgende Verdunstung zu dieser schlechteren Korrelation mit der Schnellkarbonatisierung in der bewitterten Aussenlagerung beitragen.
- Grundsätzlich sollte der w/z-Wert bei RC-Beton der Sorten B und C im Vergleich zu Beton aus natürlicher Gesteinskrönung leicht reduziert werden, um das mögliche Auftreten von Karbonatisierungsspitzen zu kompensieren. Um das Zementleimvolumen konstant zu halten,

ist dabei der Zementgehalt entsprechend leicht zu erhöhen. Bei einem Beton aus CEM II/B-M ist sowohl für RC-Beton als auch Beton aus natürlicher Gesteinskörnung gegenüber einem Beton aus CEM II/A-LL ein leicht reduzierter w/z-Wert anzustreben, um den Grenzwert für den Karbonatisierungswiderstand zu erfüllen. Die Verwendung eines CEM III/B erfordert zur Erfüllung des Grenzwertes unabhängig von der Gesteinskörnung einen deutlich reduzierten w/z-Wert und eine entsprechend erhöhte Zementmenge, damit das Zementleimvolumen konstant bleibt und ein gut verarbeitbarer Beton hergestellt werden kann. Dadurch resultiert eine relativ hohe Druckfestigkeit ("Überfestigkeit"). Dieser Umstand kann dazu führen, dass die Mindestbewehrung angepasst werden sollte. Es gibt auch Zweifel, ob sich die Verwendung von CEM III/B Zement im Hochbau ökologisch lohnt [Kaufmann 2016].

- Weil beim RC-Beton der für die Zementhydratation zur Verfügung stehende Wassergehalt weder mit dem Gesamtwasser noch mit dem nach SN EN 206:2013 unter Berücksichtigung der theoretischen Wasseraufnahme der Gesteinskörnung wirksamen Wassergehalt übereinstimmt, eignet sich der w/CaO nur bedingt für eine Abschätzung des Karbonatisierungswiderstandes.

Die Erkenntnisse bezüglich der Bestimmung der Karbonatisierungstiefe unter Berücksichtigung der Karbonatisierungsspitzen werden im Korrigendum für die SIA 262/1, das im Mai 2016 versandt wurde, bereits berücksichtigt.

Die Erkenntnisse aus dem Projekt sollten bei der 2017 anstehenden Überarbeitung des SIA Merkblattes 2030 "Recyclingbeton" berücksichtigt werden.

1. Einleitung

Seit 2013 wird die Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes für Beton der Sorten B-E verlangt (SN EN 206:2013, SIA 262/1:2013, Tabelle 1). Die Sorten D und E haben in der Regel keine Probleme, die Grenzwerte für den Karbonatisierungskoeffizienten K_N zu erfüllen. Bei den Sorten B und C gibt es aber immer wieder Betone, die den Grenzwert nicht erfüllen. Dies scheint insbesondere für Recyclingbeton zu gelten. Bei dem für die Sorten B und C eingesetzten Recyclingbeton handelt es sich um einen sogenannten Recyclingbeton RC-C (> 25 Masse-% Betongranulat R_c in der Gesteinskörnung, im Folgenden als RC-Beton bezeichnet). Diese Situation hinsichtlich des RC-Betons kann zu einer steigenden Unsicherheit sowohl bei den Betonproduzenten als auch bei den Bauherren bei der Verwendung dieses Betons führen. Dem gilt es baldmöglichst zu begegnen, damit ein Beton, dessen Verwendung hinsichtlich des Stoffkreislaufes sinnvoll ist und der sich auch auf dem Markt etabliert hat, nicht in Verruf gerät. Dafür braucht es gut abgestützte experimentelle Daten, die zeigen, ob RC-Beton generell einen tieferen Karbonatisierungswiderstand aufweist als Beton aus natürlicher Gesteinskörnung und wenn ja, warum. Würde der RC-Beton tatsächlich einen tieferen Karbonatisierungswiderstand aufweisen, müssten Empfehlungen formuliert werden, wie der Betonproduzent auf diese Situation reagieren kann.

Bezeichnung Anforderungen	**Sorte 0 (Null)**	**Sorte A**	**Sorte B**	**Sorte C**	**Sorte D (T1)**	**Sorte E (T2)**	**Sorte F (T3)**	**Sorte G (T4)**
Expositionsklasse (Kombination der aufgeführten Klassen)	X0(CH)	XC2(CH)	XC3(CH)	XC4(CH), XF1(CH)	XC4(CH), XD1(CH), XF2(CH)	XC4(CH), XD1(CH), XF4(CH)	XC4(CH), XD3(CH), XF2(CH)	XC4(CH), XD3(CH), XF4(CH)
Maximaler *w/z*-Wert bzw. *w/z*$_{eq}$-Wert [-]	–	0,65	0,60	0,50	0,50	0,50	0,45	0,45
Mindestzement-gehalt z_{min}, [kg/m³] [1,2]	–	280	280	300	300	300	320	320
Dauerhaftigkeits-prüfungen [3]	Keine	Keine	WL [4], KW	KW	KW, FT	KW, FT	CW, FT	CW, FT
Andere Anforderungen	SN EN 12620 enthält Anforderungen an die Gesteinskörnungen							
Frei gegebene Zementarten (Tabelle NA.1)	Bei der Kombination von Expositionsklassen gilt für die Wahl des Zementes jeweils die strengste Anforderung							

Tabelle 1: Anforderungen an die Zusammensetzung und Prüfung der üblichen Betonsorten (SN EN 206:2013). Rot eingerahmt sind die Betone, bei denen der Karbonatisierungswiderstand (KW) zu prüfen ist.

In der Literatur sind bisher wenige Daten über den Karbonatisierungswiderstand von RC-Beton vorhanden. Erschwert wird die Beurteilung dieser Daten durch verschiedene Faktoren. Einerseits wurde in einigen Studien keine systematische Versuchsmatrix umgesetzt, sodass sich der Einfluss des Betongranulats gar nicht beurteilen lässt [Zaharieva et al. 2003; Levy & Helene 2004; Corinaldesi & Moriconi 2009]. Anderseits weichen die verwendeten Methoden zur Schnellkarbonatisierung hinsichtlich Dauer der Feuchtlagerung, CO_2-Gehalt und Temperatur zum Teil erheblich von der in der SIA 262/1 definierten Methode ab. In vier Studien, bei denen Beton aus 100% Betongranulat mit Beton aus natürlicher Gesteinskörnung hergestellt mit identischem w/z verglichen wurde, konnte zum RC-Beton folgendes festgestellt werden:

- keine systematische Veränderung der Karbonatisierungstiefe [Sagoe-Crentsil et al. 2001]
- Anstieg der Karbonatisierungstiefe um 15-20% [Ryu 2002]
- Anstieg der Karbonatisierungstiefe um 30-150% [Katz 2003]
- Anstieg der Karbonatisierungstiefe um 6-65% [Otsuki et al. 2003]

In [Abbas et al., 2009] führte die Reduktion des Anteils an Betongranulat von 100 auf 65 Masse-% bei identischem w/z zu keiner Veränderung des Karbonatisierungswiderstandes. Der Hauptunterschied der in dieser Studie verwendeten Methode zur SIA 262/1 ist die mit 28 Tagen erheblich längere Feuchtlagerung. Wie gezeigt, gibt es in der Literatur keinen Konsens über den Karbonatisierungswiderstand von RC-Beton im Vergleich zu Beton aus natürlicher Gesteinskörnung. Der Grund dafür dürfte bei den unterschiedlichen Ansätzen für die Herstellung von RC-Beton und den gewählten Vergleichsparametern (w_{total}/z, w_{SN}/z, Festigkeit) liegen.
Der Einfluss der Nachbehandlung auf den Karbonatisierungswiderstand ist eindeutig: je länger die Feuchtlagerung nach der Betonherstellung dauert, um so grösser ist der Karbonatisierungswiderstand [Wierig 1984; Fatthudi 1988; Osborne 1989; Thomas 1992]. Der grösste betontechnologisch massgebende Unterschied zwischen natürlicher Gesteinskörnung und Betongranulat ist die höhere Porosität des Recyclingmaterials [Hoffmann & Huth 2006; Hoffmann & Leemann 2007; Hoffmann & Jacobs 2007]. Wie hoch der Feuchtigkeitsgehalt des Betongranulats ist, wenn es in den Betonmischer gelangt und wieviel Feuchtigkeit es während des Mischprozesses aufnimmt, beeinflusst die der Hydratation des Zementes zur Verfügung stehende Wassermenge. Nimmt das Betongranulat nach dem Einbau des Betons Wasser auf, sinkt die relative Feuchte im umgebenden Zementstein, was zu einer Verschlechterung der Zementhydratation [Tam et al. 2005; Li et al. 2009] und damit möglicherweise zu einer Abnahme des Karbonatisierungswiderstandes führt. Dünnschliffuntersuchungen weisen zudem darauf hin, dass die Wasseraufnahme von Betongranulat nach dem Einbau des Betons zu lokalen Volumenveränderungen und Ablösungen zwischen Gesteinskorn und Zementstein führen kann [Schubert & Hoffmann 2010]. Ist das Betongranulat hingegen gesättigt, kann es sogar Feuchtigkeit abgeben, was die Hydratation begünstigen [Barra 1996; Kohno et al. 1999; Tegguer 2012] und den Karbonatisierungswiderstand wahrscheinlich erhöhen kann.
Ein weiterer Punkt, der zu Problemen bei RC-Beton führen könnte, ist die Bestimmung der Karbonatisierungsfront. Sie könnte durch teilweise karbonatisiertes Betongranulat oder Betongranulat, das eine wesentlich tiefere oder auch höhere Dichte aufweist als der neu hergestellte RC-Beton, verfälscht werden.

Das Ziel des beantragten Projekts ist die Abklärung, ob RC-Beton einen verminderten Karbonatisierungswiderstand im Vergleich zu einem Beton aus natürlicher Gesteinskörnung mit identischer Druckfestigkeit aufweist. Basierend auf den experimentellen Daten werden allfällige Massnahmen definiert. Damit sollen Unsicherheiten bei der Verwendung von RC-Beton bei den Sorten B und C vermieden werden.

2. Materialien und Methoden

2.1 Materialien

Für die Betonherstellung wurden CEM II/A-LL 42.5 N, CEM II/B-M (T-LL) 42.5 N und CEM III/B 32.5 N verwendet (Tabelle 2). Als natürliche Gesteinskörnung wurden Alluvialsand und -kies aus dem Schweizer Mittelland eingesetzt. Dazu kam Betongranulat aus zwei verschiedenen Quellen zum Einsatz. Das Betongranulat RC-1 wurde in den Fraktionen 0-4 mm, 4-8 mm, 8-16 mm und 16-32 mm angeliefert, das Betongranulat RC-2 als Fraktion 0-16 mm. Die Eigenschaften der verwendeten Betongranulate sind im Anhang aufgeführt.

	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	Cr_2O_3	MnO	TiO_2	P_2O_5	CaO	MgO	K_2O	Na_2O	SO_3	LOI	TC
CEM II/A-LL	17.8	4.0	2.6	0.0	0.0	0.3	0.1	60.8	1.8	0.9	0.2	2.9	8.3	2.0
CEM II/B-M	19.8	4.9	3.1	0.0	0.0	0.3	0.2	56.9	1.8	1.1	0.2	3.2	8.3	2.0
CEM III/B	29.3	7.7	1.3	0.0	0.3	0.6	0.2	48.5	4.5	0.7	0.3	4.6	1.8	0.5

Tabelle 2: Chemische Zusammensetzung der verwendeten Zemente (LOI = Glühverlust, TC = Gesamtkohlenstoff).

Bei den Referenzbetonen wurde eine Kornabstufung von 35 Masse-% 0-4 mm, 16 Masse-% 4-8 mm, 17 Masse-% 8-16 mm und 32 Masse-% 16-32 mm gewählt. Bei allen Betonen mit Betongranulat wurde der Anteil an 0-4 mm und 16-32 mm auf 32 respektive 35 Masse-% geändert. Bei der partiellen Substitution von natürlicher Gesteinskörnung durch das Betongranulat RC-1 war der Substitutionsgrad in allen Fraktionen identisch (zum Beispiel 25 Masse-%). Obwohl das Betongranulat RC-2 keine Komponenten 16-32 mm aufwies, wurden bei der natürlichen Gesteinskörnung trotzdem alle vier Fraktionen um den gleichen Anteil reduziert (25 respektive 50 Masse-%). Dies hat entsprechend einen erhöhten Feinanteil in den Betonen mit Betongranulat RC-2 zur Folge. Die Zusammensetzung aller Betone ist in Tabelle 3 dargestellt.
Wie die weitreichenden Erfahrungen der Empa mit der Herstellung von Recyclingbeton an der Empa gezeigt haben, saugt die Gesteinskörnung während der Betonherstellung und während der Aushärtung nie den nach SN EN 1097-6 bestimmten und nach SN EN 206/1 anrechenbaren Anteil an Wasser. Bei der Berechnung der Betonrezepturen wurde davon ausgegangen, dass 30 Masse-% des theoretisch von der Gesteinskörnung absorbierten Wassers nicht aufgenommen wird. Bei diesem Vorgehen stimmt auch die berechnete Rohdichte gut mit der bei der Frischbetonkontrolle bestimmten Rohdichte überein. Dies ist nicht der Fall, wenn die Wasserabsorption durch die Gesteinskörnung nicht berücksichtigt wird oder wenn die Wasserabsorption mit dem nach SN EN 206/1 erlaubten Wert eingesetzt wird.
Bei der Betonherstellung wurde zuerst trocken gemischt, dann 90 Masse-% des Wassers und anschliessend das restliche Wasser zusammen mit dem Fliessmittel zugegeben. Die Nassmischzeit nach Zugabe aller Komponenten betrug 90 s.
Die Gesteinskörnung im trockenen Zustand entspricht der Feuchte, die sie während der Lagerung an der Empa aufwies. Diese betrug beim Betongranulat RC-1 1.7 % und beim Betongranulat RC-2 1.2 %. Bei Verwendung von gesättigter Gesteinskörnung wurde folgendermassen vorgegangen. Die Gesteinskörnung wurde im Betonmischer trocken gemischt. Dann wurde während des Mischens die Wassermenge zugegeben, die aufgrund der Wasseraufnahme der Gesteinskörnung (s. Anhang) zu einer Sättigung führt. Nach der Zugabe dieser Wassermenge wurde der Betonmischer für 5 min gestoppt, um der Gesteinskörnung die Wasseraufnahme zu ermöglichen. Eine visuelle Kontrolle zeigte, dass qualitativ beurteilt das Wasser homogen in der Gesteinskörnung verteilt war. Es war auch keine Wasseransammlung am Boden des Betonmischers vorhanden. Danach wurde der Zement zugegeben und der Betonmischer sofort angestellt. Unmittelbar danach wurden Wasser und Fliessmittel wie oben beschrieben hinzugegeben. Die Nassmischzeit betrug wiederum 90 s.

Beton	Zement	Zementgehalt [kg/m^3]	w_{total}/z	w_{SN}/z*	Fliess-mittel [kg/m^3]	Sorte	RC-C [Masse-%]	Zustand
REF-01	CEM II/A-LL	330	0.45	0.43	1.6	C	-	trocken
REF-02	CEM II/A-LL	310	0.50	0.48	0.6	C	-	trocken
REF-03	CEM II/A-LL	290	0.60	0.57	-	B	-	trocken
REF-04	CEM II/A-LL	280	0.65	0.62	-	A	-	trocken
RC-01	CEM II/A-LL	300	0.66	0.51	-	B	50 (RC-1)	trocken
RC-02	CEM II/A-LL	300	0.66	0.51	-	B	50 (RC-1)	gesättigt
RC-03	CEM II/B-M	300	0.66	0.51	-	B	50 (RC-1)	trocken
RC-04	CEM II/A-LL	325	0.53	0.44	0.7	C	25 (RC-1)	trocken
RC-05	CEM II/A-LL	325	0.53	0.44	0.7	C	25 (RC-1)	gesättigt
RC-06	CEM II/A-LL	325	0.57	0.43	1.3	C	50 (RC-1)	trocken
RC-07A	CEM II/A-LL	325	0.57	0.43	1.3	C	50 (RC-1)	gesättigt
RC-07B	CEM II/A-LL	325	0.57	0.43	1.3	C	50 (RC-1)	gesättigt
RC-08	CEM II/A-LL	300	0.64	0.52	1.2	B	50 (RC-2)	trocken
RC-09	CEM II/A-LL	300	0.64	0.52	1.2	B	50 (RC-2)	gesättigt
RC-10	CEM II/A-LL	325	0.54	0.42	3.4	C	50 (RC-2)	trocken
RC-11	CEM II/A-LL	325	0.54	0.42	3.9	C	50 (RC-2)	gesättigt
RC-12	CEM II/B-M	325	0.54	0.42	4.2	C	50 (RC-2)	trocken
RC-13	CEM III/B	325	0.51	0.42	1.6	C	25 (RC-1)	trocken
RC-14	CEM III/B	325	0.51	0.42	2.0	C	25 (RC-1)	gesättigt
RC-15	CEM III/B	325	0.55	0.41	2.0	C	50 (RC-1)	trocken
RC-16	CEM III/B	325	0.55	0.40	2.0	C	50 (RC-1)	gesättigt
RC-17	CEM III/B	410	0.48	0.38	6.2	C	50 (RC-1)	trocken

w_{total} = Gesamtwasser, w_{SN} = Gesamtwasser minus theoretische Wasseraufnahme der Gesteinskörnung

Tabelle 3: Zusammensetzung der untersuchten Betone.

2.2 Methoden

Die Druckfestigkeit des Betons wurde nach SN EN 12390-3 in einem Alter von 2 und 28 Tagen bestimmt.
Die Schnellkarbonatisierung wurde nach SIA 262/1, Anhang I, bei 4% CO_2 ermittelt.
Die Aussenlagerung für die Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes unter natürlichen Bedingungen erfolgte auf dem Dach eines Gebäudes auf dem Empa-Areal in Dübendorf ("bewittert") und in einem Unterstand von der Witterung geschützt ("unbewittert"). Die Karbonatisierungstiefe wurde nach einer Auslagerungszeit von einem Jahr bestimmt. In Dübendorf betragen die Jahresdurchschnittswerte der Temperatur, der relativen Feuchte und des Niederschlags 11.4 °C, 78 % und 1200 l/m^2.
Die Bestimmung des O_2-Diffusionskoeffizienten erfolgte an Bohrkernen (Ø 100 mm, H = 50 mm) aus Würfel mit 150 mm Kantenlänge. Im Alter von 28 Tagen wurden die Prüfkörper 7 Tage bei 20 °C und 35% relativer Feuchtigkeit und anschliessend weitere 7 Tage bei 50 °C im Ofen getrocknet. Im Anschluss an diese Konditionierung wurde die Prüfung durchgeführt. Die Prüfung erfolgte gemäss Beschrieb in [Buenfeld, 1998] und [Lawrence, 1984].
Für die Untersuchung im Polarisationslichtmikroskop (Zeiss Axioplan) wurden Scheiben des für die Karbonatisierungsprüfung abgespaltenen Betons verwendet. Die Proben wurden während 5 Tagen bei 50 °C im Ofen getrocknet, mit Epoxidharz druckimprägniert und anschliessend geschliffen. Danach erfolgte die Herstellung von Dünnschliffen (50x85 mm^2) mit einer Dicke von etwa 25 µm.

3. Resultate

3.1 Übersicht

Eine Übersicht der Resultate ist in Tabelle 4 dargestellt.

Beton	Zement	w_{total}/z	Sorte	LP [%]	ρ [kg/m^3]	AM [cm]	f_{c2d} [MPa]	f_{c28d} [MPa]	D_o [10^{-8} m/s^2]	K_N [mm/y$^{0.5}$]	K_{N*} [mm/y$^{0.5}$]	$K_{N,S}$ [mm/y$^{0.5}$]	$K_{N,US}$ [mm/y$^{0.5}$]
REF-01	CEM II/A-LL	0.45	C	2.6	2384	35	26.1	43.6	2.1	2.3	2.8	5.8	3.1
REF-02	CEM II/A-LL	0.50	C	3.0	2363	36	21.7	36.6	2.4	2.8	2.7	5.2	2.7
REF-03	CEM II/A-LL	0.60	B	1.3	2394	48	14.4	30.6	3.3	4.2	4.4	3.8	1.1
REF-04	CEM II/A-LL	0.65	A	1.0	2407	51	12.0	27.8	3.3	5.2	5.1	1.2	0.1
RC-01	CEM II/A-LL	0.66	B	1.7	2341	40	16.9	32.4	3.0	3.7	3.5	3.6	1.4
RC-02	CEM II/A-LL	0.66	B	1.9	2344	41	17.8	33.5	2.8	3.8	3.8	4.0	1.3
RC-03	CEM II/B-M	0.66	B	2.0	2319	40	20.1	37.1	3.0	4.4	4.8	4.6	2.2
RC-04	CEM II/A-LL	0.53	C	2.7	2368	38	21.7	37.0	2.6	2.6	3.2	3.2	1.0
RC-05	CEM II/A-LL	0.53	C	1.6	2410	39	22.9	40.6	2.2	2.8	3.1	3.1	0.9
RC-06	CEM II/A-LL	0.57	C	1.8	2366	39	22.3	43.3	2.0	2.9	3.4	3.4	0.8
RC-07A	CEM II/A-LL	0.57	C	1.5	2370	39	23.7	42.2	2.6	2.8	3.9	3.3	0.9
RC-07B	CEM II/A-LL	0.57	C	1.7	2329	42	22.7	41.1	2.2	2.9	3.3	3.2	1.2
RC-08	CEM II/A-LL	0.64	B	2.4	2286	47	14.6	31.1	4.4	3.8	4.4	5.0	2.8
RC-09	CEM II/A-LL	0.64	B	2.8	2308	36	15.1	31.5	4.2	4.2	4.4	4.7	2.3
RC-10	CEM II/A-LL	0.54	C	1.7	2366	30	29.1	47.7	2.0	2.4	2.7	2.5	0.5
RC-11	CEM II/A-LL	0.54	C	1.6	2375	35	30.6	51.1	1.7	2.3	2.9	2.1	0.5
RC-12	CEM II/B-M	0.54	C	2.0	2367	33	30.9	55.7	1.3	2.6	2.7	1.2	0.1
RC-13	CEM III/B	0.51	C	1.4	2379	46	13.0	50.0	0.6	4.4	4.3	6.3	2.0
RC-14	CEM III/B	0.51	C	1.4	2379	35	11.4	45.4	1.0	5.0	5.2	5.4	1.8
RC-15	CEM III/B	0.55	C	1.2	2364	35	11.7	47.9	0.5	4.6	5.1	5.2	1.5
RC-16	CEM III/B	0.55	C	1.5	2366	39	12.2	48.0	0.9	4.4	4.8	4.6	1.3
RC-17	CEM III/B	0.48	C	1.4	2373	56	17.0	66.5	0.8	3.0	3.4	2.1	0.3

AM = Ausbreitmass, f_c = Druckfestigkeit, D_O = O_2-Diffusionskoeffizient, K_N = Karbonatisierungskoeffizient aus der Schnellkarbonatisierung, K_N = Karbonatisierungskoeffizient aus der Schnellkarbonatisierung unter Berücksichtigung der Karbonatisierungsspitzen, $K_{N,S}$ = Karbonatisierungskoeffizient unbewittert, $K_{N,US}$ = Karbonatisierungskoeffizient bewittert*

Tabelle 4: Übersicht der Resultate.

3.2 Druckfestigkeit

Bei der Druckfestigkeit nach 2 Tagen zeigt sich deutlich, dass die Betone aus CEM III/B langsamer hydratisieren als die Betone aus CEM II/A-LL und CEM II/B-M (Abbildungen 1 und 2). Bei einem vergleichbaren w_{total}/z weisen die RC-Betone aus CEM II eine deutlich höhere Festigkeit nach 2 Tagen auf als die Referenzbetone und bei gleichem w_{SN}/z eine tendenziell tiefere. Eine Ausnahme sind die aus dem Betongranulat RC-2 hergestellten Betone der Sorte C, die höhere Druckfestigkeitswerte aufweisen als die Referenzbetone. Nach 28 Tagen ergibt sich bezüglich w_{total}/z und w_{SN}/z genau das gleiche Bild (Abbildungen 3 und 4).

Es ist offensichtlich, dass das poröse Betongranulat dem Zementstein Wasser entzieht, wodurch die der Hydratation zur Verfügung stehende Wassermenge reduziert wird. Es handelt sich also um eine Reduktion des w_{total}/z im Zementstein mit dadurch bedingten, höheren Festigkeiten im Vergleich zum Referenzbeton aus natürlicher Gesteinskörnung. Beim w_{SN}/z ist, wenn auch weniger ausgeprägt, genau das Gegenteil zu beobachten. Der Grund dafür ist, wie bereits unter Kapitel 2 erwähnt, dass die tatsächliche Wasseraufnahme der Gesteinskörnung kleiner ist als die potentielle, nach SN EN 1096-7 bestimmte. Die vergleichsweise hohe Festigkeit der RC-Betone der Sorte C, die aus dem Betongranulat RC-2 hergestellt wurden, ist mit grosser Wahrscheinlichkeit auf den deutlich höheren Feinanteil dieses Betongranulats im Vergleich zum Betongranulat RC-1 zurückzuführen (s. Anhang). Der Anteil < 1 mm beträgt im Betongranulat RC-1 12.5 Masse-% und im Betongranulat RC-2 22.4 Masse-% (s. Anhang). Wegen ihrer hohen spezifischen Oberfläche ist die Adsorption von Wasser bei den Feinanteilen hoch, wodurch das der Hydratation zur Verfügung stehende Wasser weiter reduziert wird und die Festigkeit ansteigt. Dieser Effekt ist zum Beispiel auch gut zu beobachten, wenn die Festigkeit von zwei Betonen, hergestellt mit identischem w/z aber einmal mit Gesteinskörnung der Fraktion 0-16 mm und einmal mit Gesteinskörnung der Fraktion 0-32 mm, verglichen wird: die Festigkeit des Betons aus Gesteinskörnung 0-16 mm fällt mehrere MPa höher aus.

Wegen der unterschiedlichen verwendeten Zemente und der unterschiedlichen Saugfähigkeit der verwendeten natürlichen Gesteinskörnung und Betongranulate macht es wenig Sinn, die weiteren bestimmten Betoneigenschaften mit dem w/z zu vergleichen. Als Vergleichsparameter wird deshalb im Folgenden die Druckfestigkeit nach 28 Tagen verwendet.

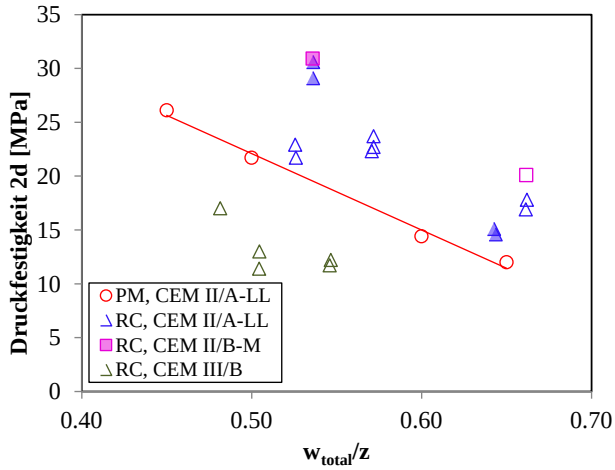


Abbildung 1: Druckfestigkeit nach 2 Tagen als Funktion des w_{total}/z (ausgefüllte Symbole: mit Betongranulat RC-2 hergestellte Betone).

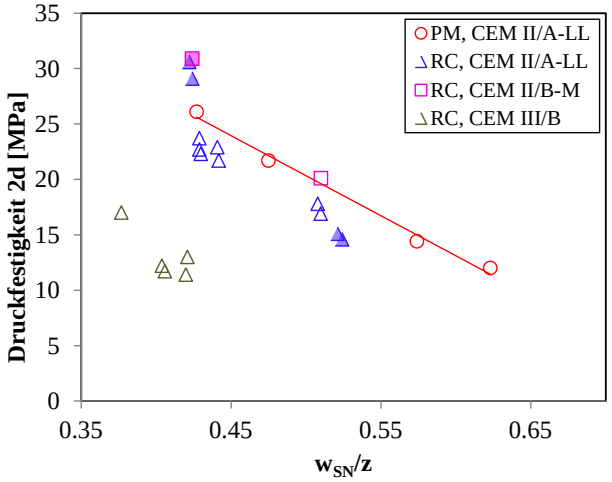


Abbildung 2: Druckfestigkeit nach 2 Tagen als Funktion des w_{SN}/z.

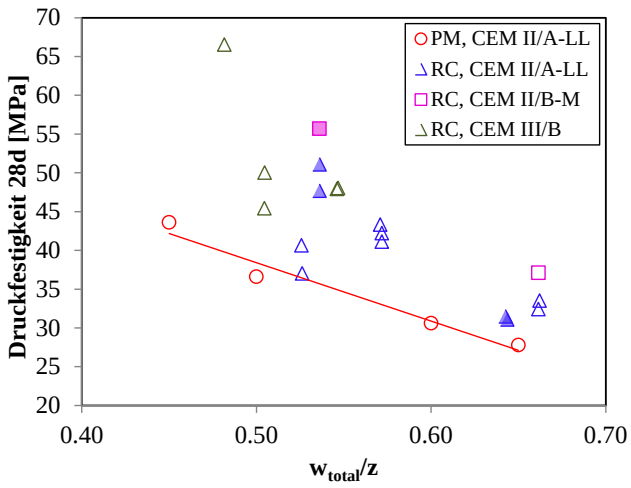


Abbildung 3: Druckfestigkeit nach 28 Tagen als Funktion des w_{total}/z.

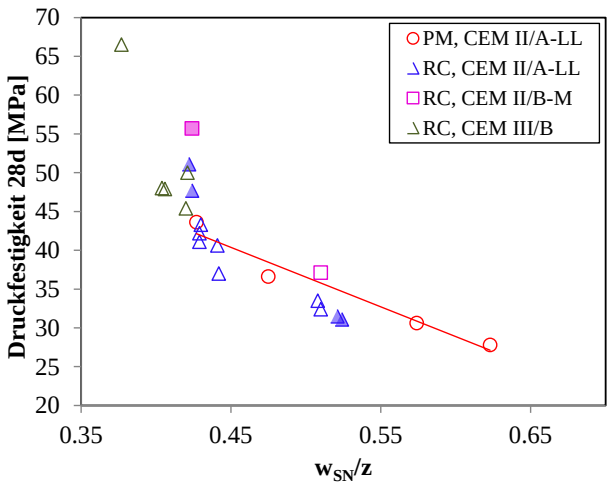


Abbildung 4: Druckfestigkeit nach 28 Tagen als Funktion des w_{SN}/z.

3.3 O_2-Diffusion

Die meisten RC-Betone hergestellt mit CEM II zeigen dieselbe lineare Abhängigkeit zwischen O_2-Diffusion und Druckfestigkeit wie die Betone aus natürlicher Gesteinskörnung (Abbildung 5). Allerdings verhalten sich die beiden Betone der Sorte B hergestellt mit dem Betongranulat RC-2 unterschiedlich. Ihr O_2-Diffusionskoeffizient ist verglichen zur Druckfestigkeit deutlich höher als bei den anderen RC-Betonen aus CEM II-Zementen. Der sehr tiefe O_2-Diffusionskoeffizient der Betone aus CEM III/B ist typisch für diese Zementart, die ein sehr feinporiges und dichtes Gefüge erzeugt.

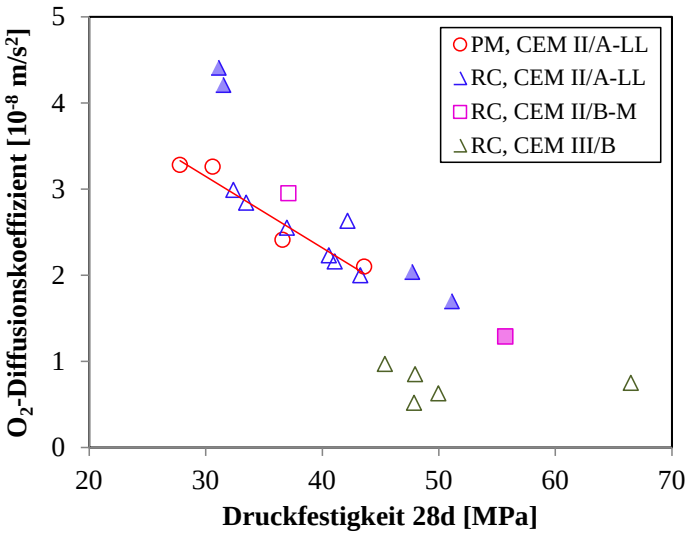


Abbildung 5: O_2-Diffusionskoeffizient als Funktion der Druckfestigkeit.

3.4 Karbonatisierungswiderstand

3.4.1 Schnellkarbonatisierung

Die mit CEM II/A-LL hergestellten Recyclingbetone weisen Karbonatisierungskoeffizienten auf, die im Bereich der Referenzbetone liegen (Abbildung 6). Einzig die beiden Betone der Sorte C hergestellt mit dem Betongranulat RC-2 weisen für ihre Druckfestigkeit einen relativ hohen Karbonatisierungskoeffizienten auf. Der Karbonatisierungskoeffizient K_N der RC-Betone aus CEM II/B-M ist für ihre Druckfestigkeit höher als bei den Betonen aus CEM II/A-LL. Noch höhere

Karbonatisierungskoeffizienten K_N bezogen auf ihre Druckfestigkeit sind bei den Betonen aus CEM III/B zu verzeichnen.
Diese Abhängigkeit des Karbonatisierungskoeffizienten von der Zementart wird in der Literatur oft beschrieben [Wierig, 1984; Hunkerler & Lamar, 2012] und ist in erster Linie auf die Pufferkapazität des Zementsteins für CO_2 zurückzuführen [Leemann et al., 2014; Leemann et al. 2015; Leemann & Moro, 2017]. Es wird auch klar, dass sich die Druckfestigkeit nicht dazu eignet, einen Karbonatisierungskoeffizienten abzuschätzen.

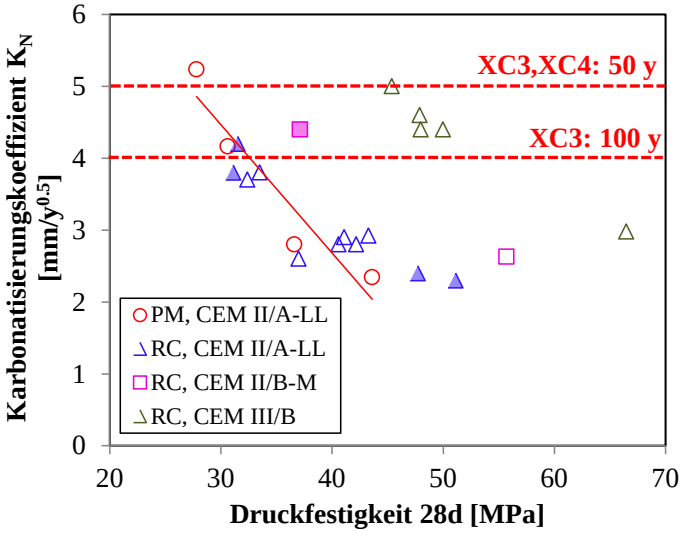


Abbildung 6: Karbonatisierungskoeffizient K_N als Funktion der Druckfestigkeit nach 28 Tagen.

3.4.2 Natürliche Karbonatisierung

Bei der Karbonatisierung in unbewitterter und bewitterter Aussenlagerung ist die Korrelation zur Druckfestigkeit schlechter als bei der Schnellkarbonatisierung (Abbildungen 7 und 8). Die Karbonatisierungskoeffizienten $K_{N,US}$ sind in der Grössenordnung eines Faktors 2-4 kleiner als die Karbonatisierungskoeffizienten $K_{N,S}$. Einerseits ist wiederum ein Einfluss der Zementart zu beobachten. Andererseits weist die Sorte C aus RC-Beton für ihre Druckfestigkeit einen relativ hohen Karbonatisierungskoeffizienten $K_{N;S}$ auf, wenn sie mit dem Beton aus natürlicher Gesteinskörnung verglichen wird. Wie im folgenden Kapitel 3.5 diskutiert, kann dieser Unterschied wahrscheinlich auf den Einfluss poröser Körner aus Betongranulat zurückgeführt werden. Warum dies aber vor allem bei der natürlichen Karbonatisierung zu beobachten ist und bei der Schnellkarbonatisierung weniger ausgeprägt auftritt, kann nicht erklärt werden.

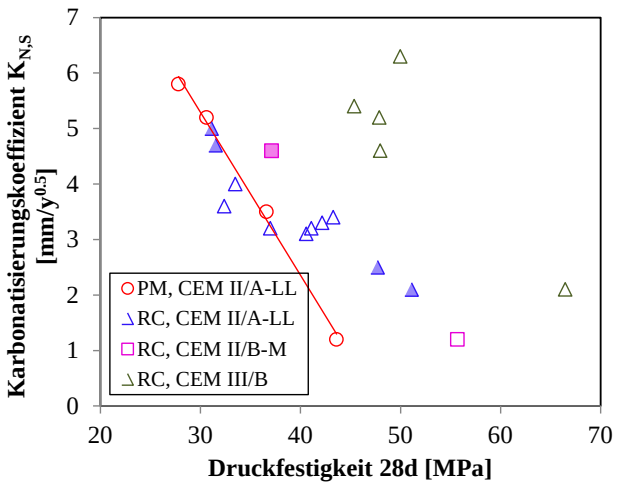


Abbildung 7: Karbonatisierungskoeffizient $K_{N,S}$ in unbewitterter Aussenlagerung als Funktion der Druckfestigkeit nach 28 Tagen.

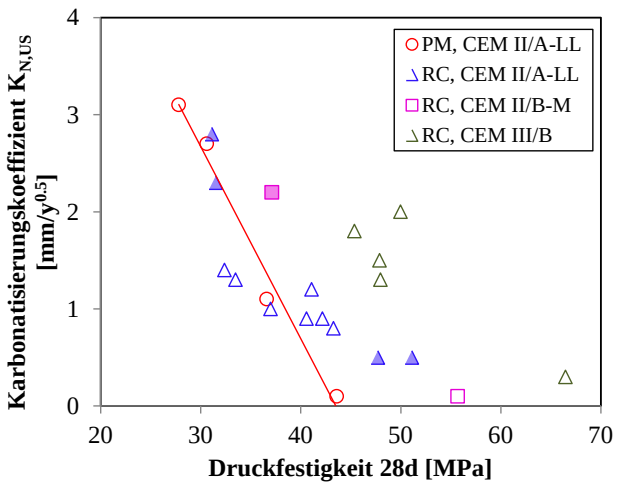


Abbildung 8: Karbonatisierungskoeffizient $K_{N,US}$ in bewitterter Aussenlagerung als Funktion der Druckfestigkeit nach 28 Tagen.

3.5 Optische Mikroskopie

Betongranulat-Körner lassen sich im Dünnschliff unterschiedlich gut erkennen. Zum Teil weisen die Körner eine randliche Karbonatisierung auf, was die Identifizierung erleichtert (Abbildung 9). Auch kann die Porosität höher/tiefer sein als im neuen Zementstein, was ebenfalls eine Identifizierung ermöglicht. Es sind auch Körner vorhanden, die gar nicht karbonatisiert sind (Abbildung 10). Ist ihre Porosität im Bereich der Porosität des neuen Zementsteins, wird eine Identifizierung sehr schwierig, bei Körnern mit einem Durchmesser < 1 mm gar verunmöglicht.
Vereinzelt treten Gefügestörungen im Interface zwischen Zementstein und Betongranulat auf. Diese Gefügestörungen äussern sich als Ablösungen. Solche Ablösungen können bei porösen Gesteinskörnern, die im Vergleich zu natürlicher Gesteinskörnung stark saugen, vermehrt auftreten. Des weiteren sind im Interface oder nah bei Betongranulat-Körnern manchmal unregelmässig geformte Poren vorhanden (Abbildung 11). Dies ist eine typische Erscheinung, wenn Luft aus saugenden, porösen Gesteinskörnern in den Zementstein entweicht. Entsprechend war dieses Phänomen auch nur bei Beton mit trockener, das heisst nicht vorgesättigter, Gesteinskörnung zu beobachten.

Betongranulat-Körner, die poröser sind als der neue Zementstein, karbonatisieren auch schneller. Sind solche Körner karbonatisiert, schreitet die Karbonatisierung im neuen Zementstein voran (Abbildung 12-14). Dies ist auch der Fall, wenn die Karbonatisierungsfront ein bereits karbonatisiertes Betongranulat-Korn erreicht. Weil das karbonatisierte Korn keinen Karbonatisierungswiderstand mehr bietet, diffundiert das CO_2 hindurch und beginnt den neuen Zementstein zu karbonatisieren. So kann die Karbonatisierungstiefe lokal stark erhöht werden, und es kann zur Bildung von Karbonatisierungsspitzen kommen. Bei Betongranulat-Körnern von einigen Millimetern Durchmesser kann der Effekt bereits karbonatisierter oder poröser Körner direkt beobachtet und abgeschätzt werden. Bei solchen Körnern im Feinanteil der Gesteinskörnung sind direkte Beobachtungen nicht mehr möglich. Grundsätzlich wird aber der Karbonatisierungswiderstand reduziert. Poröses Betongranulat wirkt sich dabei um so stärker aus, je höher die Qualität des neuen Betons ist, weil die Differenz im Karbonatisierungswiderstand zum neuen Zementstein grösser wird. Dies dürfte auch der Grund für die im Kapitel 3.4.2 beschriebenen, relativ hohen Karbonatisierungskoeffizienten des RC-Betons der Sorte C sein.
Karbonatisierungsspitzen wurden bei der Bestimmung der Karbonatisierungstiefe zuerst nicht berücksichtigt (Kapitel 3.4.1 und 3.4.2). Um ihren Einfluss auf den Karbonatisierungskoeffizienten abschätzen zu können, wurden die Karbonatisierungstiefen nochmals bestimmt, dieses Mal aber unter Berücksichtigung solcher Karbonatisierungsspitzen (s. Kapitel 4.4).

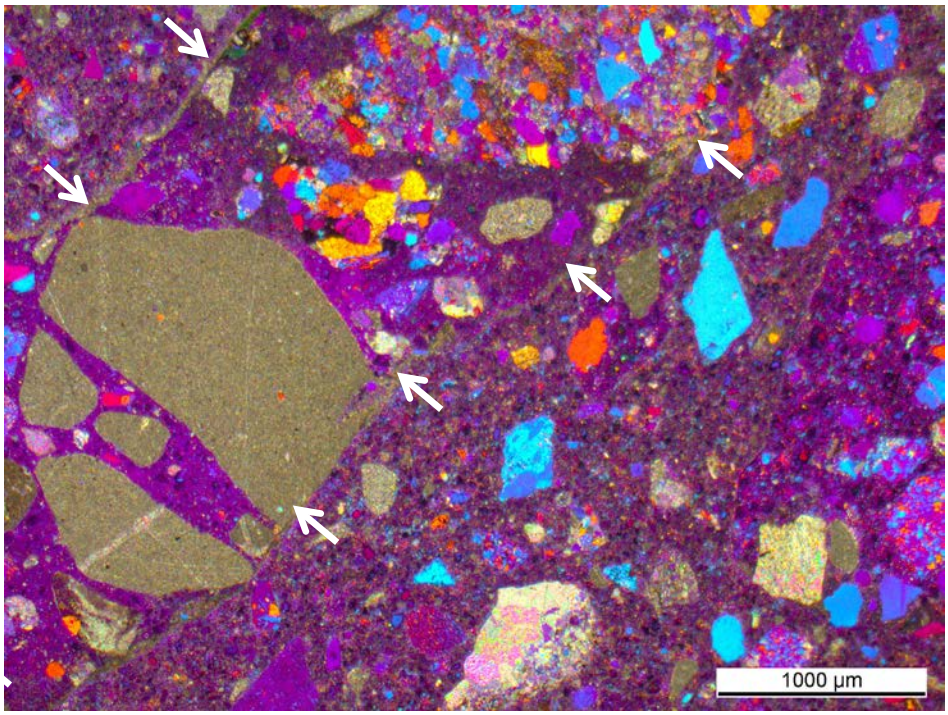


Abbildung 9: Randlich leicht karbonatisiertes Betongranulat-Korn aus CEM I ("eingekreist" mit weissen Pfeilen) umgeben von neuem Zementstein aus CEM II/A-LL.

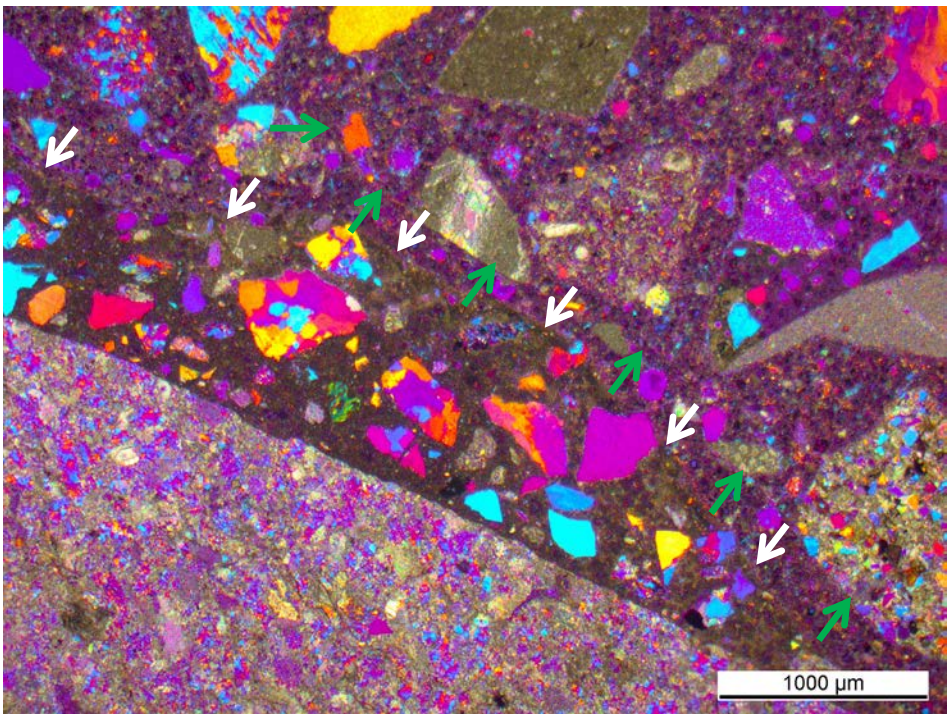


Abbildung 10: Vollständig karbonatisiertes Betongranulat-Korn (weisse Pfeile) neben Betongranulat-Korn ohne Karbonatisierungserscheinungen (grüne Pfeile).

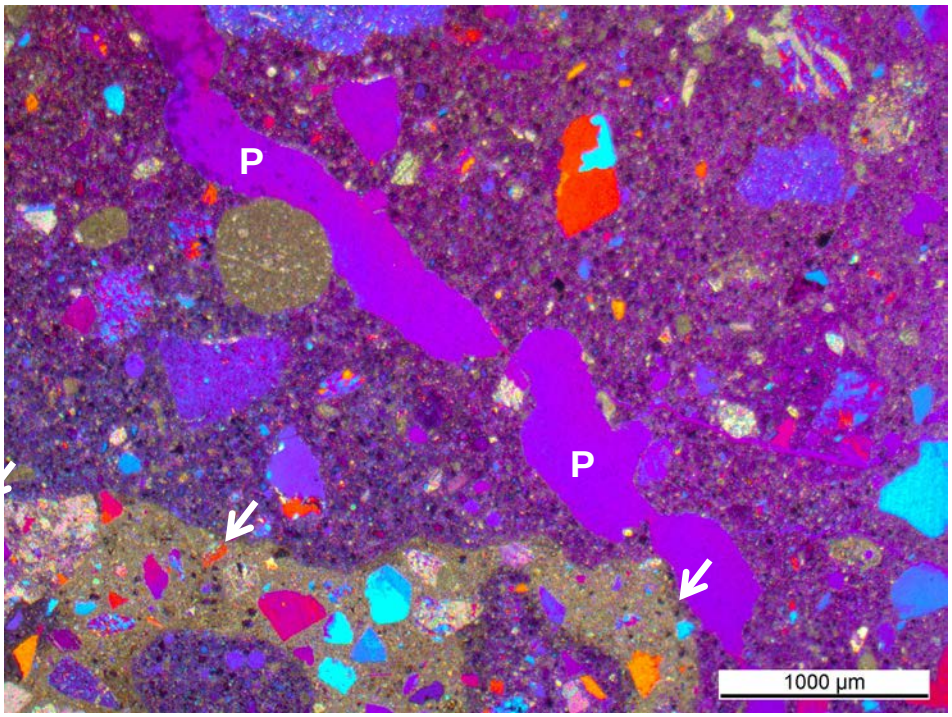


Abbildung 11: Poren (P) neben einem karbonatisierten Betongranulat-Korn (weisse Pfeile).

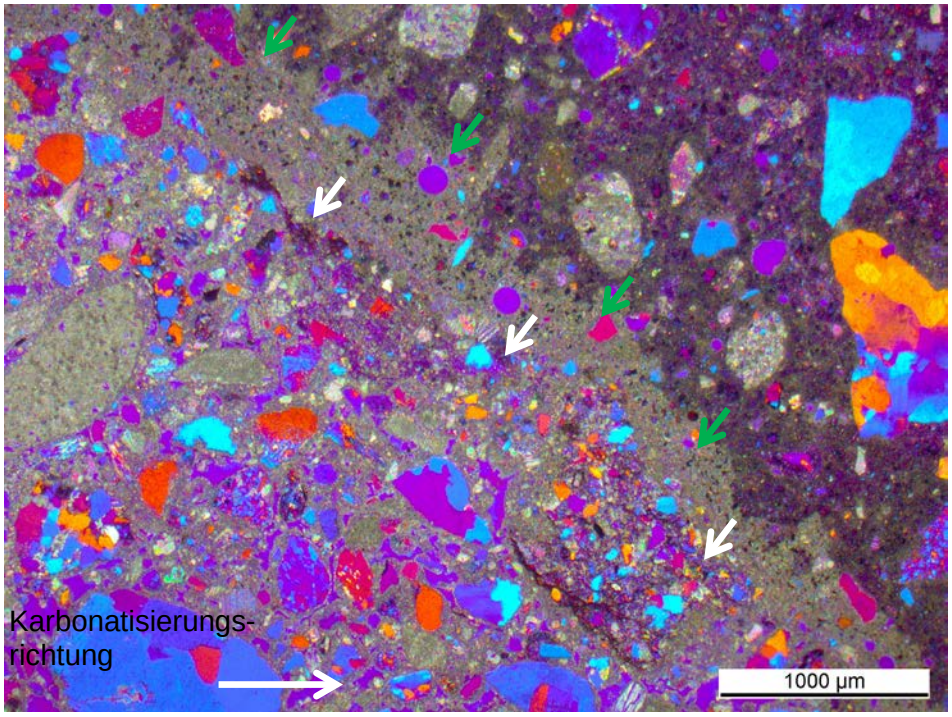


Abbildung 12: Karbonatisierung des neuen Zementsteins (grüne Pfeile) ausgehend von einem karbonatisierten Betongranulat-Korn (Korngrenze mit weissen Pfeilen markiert).

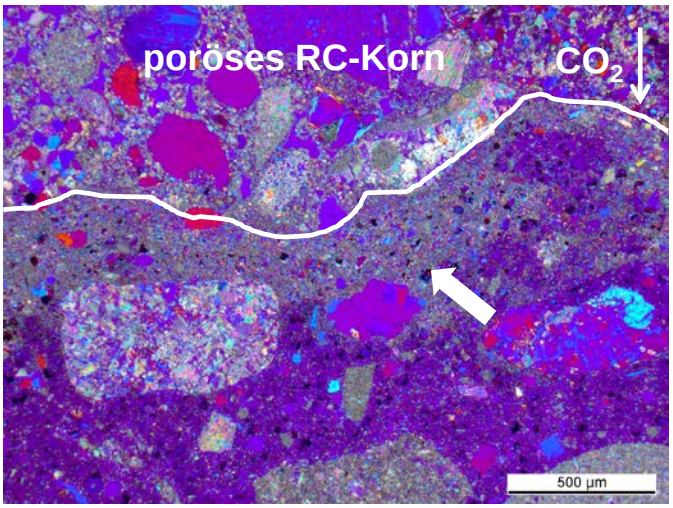


Abbildung 13: Karbonatisierung des neuen Zementsteins (weisser Pfeil) ausgehend von einem porösen, karbonatisierten Betongranulat-Korn (Korngrenze mit weisser Linie markiert).

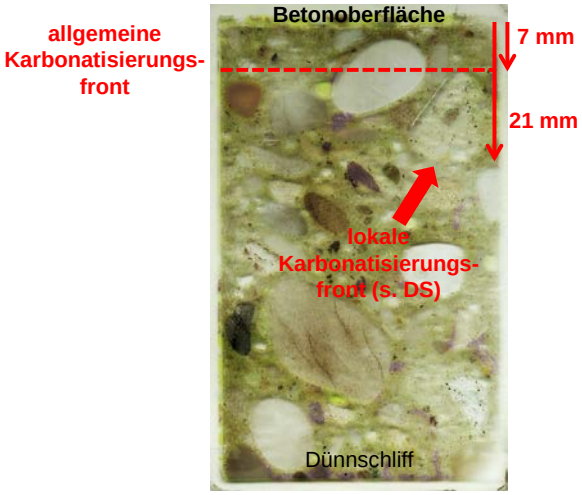


Abbildung 14: Position der lokal auf 21 mm erhöhten Karbonatisierungstiefe ("Karbonatisierungsspitze") durch das links in Abbildung 13 gezeigte poröse Betongranulat-Korn.

4. Diskussion

4.1 Vergleich der natürlichen und der beschleunigten Karbonatisierung

Der Referenzbeton aus natürlicher Gesteinskörnung und der RC-Beton hergestellt aus verschiedenen Zementen weisen bei der Schnellkarbonatisierung (Karbonatisierungskoeffizient K_N) und der natürlichen Karbonatisierung in unbewitterter Aussenlagerung (Karbonatisierungskoeffizient $K_{N,S}$) eine Korrelation (R^2 = 0.80) sowie vergleichbare Werte auf (Abbildung 15). Das heisst, dass die Werte der Schnellkarbonatisierung, die bei 57 % RF bestimmt wurden, vergleichbar sind mit den bei einer durchschnittlichen RF von 78 % erzielten Werten in natürlicher Karbonatisierung. Wie in Leemann & Moro [2017] gezeigt, hat eine Erhöhung von 57 % RF auf 70 % RF bei der Schnellkarbonatisierung keine grossen Auswirkungen auf den Karbonatisierungskoeffizienten K_N, eine Erhöhung auf 80 % RF allerdings schon. Die 78 % RF bei der Aussenlagerung liegen nahe bei 80 % RF. Hier muss berücksichtigt werden, dass in der Aussenlagerung die RF von etwa 30-100 % schwankt. Dies bedeutet, dass die Prüfkörper in der unbewitterten Aussenlagerung immer wieder einer für eine schnelle Karbonatisierung idealen relativen Feuchte im Bereich von 50-60 % ausgesetzt sind. In Anbetracht dieser Situation sind die vergleichbaren Werte beim Karbonatisierungskoeffizienten K_N respektive $K_{N,S}$ zu erklären. Dies zeigt auch, dass die von Hunkeler & Lamar [2012] empirisch ermittelte Umrechnung vom Karbonatisierungskoeffizienten K_S auf K_N in der SIA 262/1 in einem plausiblen Bereich liegt.

Die Korrelation zwischen der Schnellkarbonatisierung (Karbonatisierungskoeffizient K_N) und der natürlichen Karbonatisierung in bewitterter Aussenlagerung (Karbonatisierungskoeffizient $K_{N,US}$) ist schlechter (R^2 = 0.66 / Abbildung 16) als die Korrelation mit der Karbonatisierung in unbewitterten Aussenlagerung. Die Karbonatisierungskoeffizienten $K_{N,US}$, die einer für die Bewehrungskorrosion relevanten Exposition entsprechen, sind auch wesentlich tiefer als die Karbonatisierungskoeffizienten K_N ermittelt in der Schnellkarbonatisierung. Der Grund für die schlechtere Korrelation und die tieferen Werte ist, dass durch kapillare Kondensation, kapillares Saugen bei Niederschlag und anschliessendes Trocknen physikalische Prozesse eine Rolle spielen, während bei der Schnellkarbonatisierung hauptsächlich chemische Parameter wichtig sind [Leemann et al. 2015; Leemann & Moro 2017]. Da die Betone ein zementspezifisches Porensystem aufweisen, wirken sich diese Faktoren entsprechend unterschiedlich auf die Karbonatisierung aus. Es fällt vor allem auf, dass die Betone hergestellt aus CEM III/B einen tieferen Karbonatisierungskoeffizienten $K_{N,US}$ aufweisen, als es die Werte aus der Schnellkarbonatisierung

erwarten lassen würden. Dies wurde bereits in Leemann et al. [2015] beobachtet, ist aber in einer weiteren Studie nicht mehr so ausgeprägt aufgetreten [Leemann & Moro, 2017]. Die tiefen Karbonatisierungskoeffizienten $K_{N,US}$ lassen sich durch das deutlich feineres Porensystem bei einer Verwendung von CEM III/B erklären. Dadurch ist wegen der kapillaren Kondensation ein grösserer Anteil an Poren mit Wasser gefüllt und damit dem CO_2 nur erschwert zugänglich als bei einem grobporigeren Material.

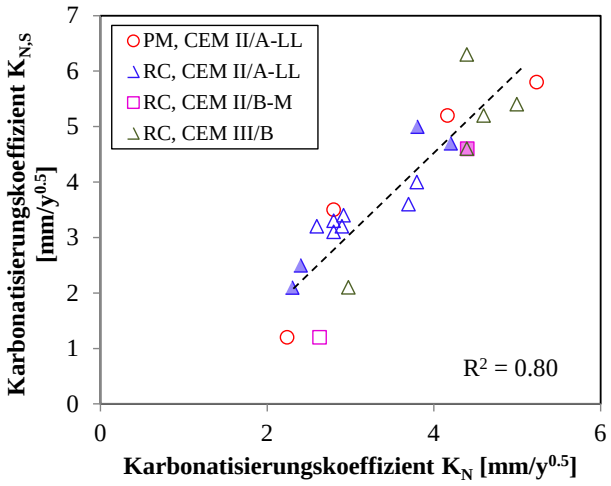


Abbildung 15: Karbonatisierungskoeffizient $K_{N,S}$ in unbewitterter Aussenlagerung als Funktion des Karbonatisierungskoeffizenten K_N ermittelt in der Karbonatisierungskammer.

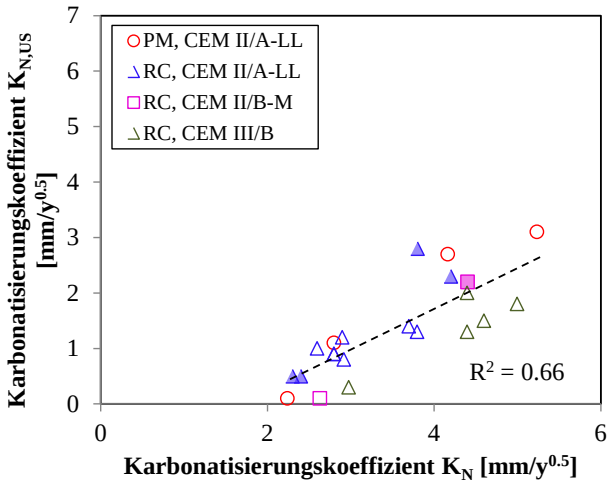


Abbildung 16: Karbonatisierungskoeffizient $K_{N,S}$ in bewitterter Aussenlagerung als Funktion des Karbonatisierungskoeffizenten K_N ermittelt in der Karbonatisierungskammer.

4.2 Einfluss der Pufferkapazität

Der w/CaO hat sich als geeigneter Parameter erwiesen, den Karbonatisierungswiderstand von Beton hergestellt aus unterschiedlichen Zementen abzuschätzen [Leemann et al. 2015; Leemann & Moro 2017]. Einerseits drückt dieser Parameter die Pufferkapazität des Zementsteins eines Betons für eindringendes CO_2 aus. Für seine Berechnung wird deswegen nur der Anteil des CaO im Zement berücksichtigt, der reagiert ($CaO_{reactive}$). Entsprechend wird zum Beispiel das CaO aus dem Kalksteinmehl nicht angerechnet. Andererseits handelt es sich beim w/CaO um ein Massenverhältnis zwischen Wasser und Feststoff, weshalb in untergeordneter Weise auch Informationen über Porosität und Mikrostruktur enthalten sind. Für seine Berechnung muss das Wasser, das der Hydratation zu Verfügung steht, bekannt sein. Dies ist beim RC-Beton nur bedingt der Fall. Wie bereits in Kapitel 3.2 gezeigt, liegt der wirksame Wassergehalt zwischen dem Gesamtwasser des Betons und dem nach SN EN 206-1:2013 berechneten Wassergehalt. Entsprechend streuen die Werte beim Vergleich des w/CaO und dem Karbonatisierungskoeffizienten K_N stark (Abbildungen 17 und 18). Bei der Berücksichtigung des Gesamtwassers liegt der Karbonatisierungskoeffizient K_N der RC-Betone entsprechend tiefer als bei den Betonen aus natürlicher Gesteinskörnung und bei der Berücksichtigung des wirksamen Wassergehalts nach SN EN 206:2013 höher. Da bei den Betonen aus CEM III/B ein tieferer Wassergehalt verwendet werden musste, um einen Karbonatisierungskoeffizienten unter dem Grenzwert zu erzielen, hat die Berücksichtigung des nach SN EN 206:2013 absorbierten Wasser einen stärkeren Einfluss auf den $w_{SN\ EN}/z$ als bei den anderen RC-Betonen.

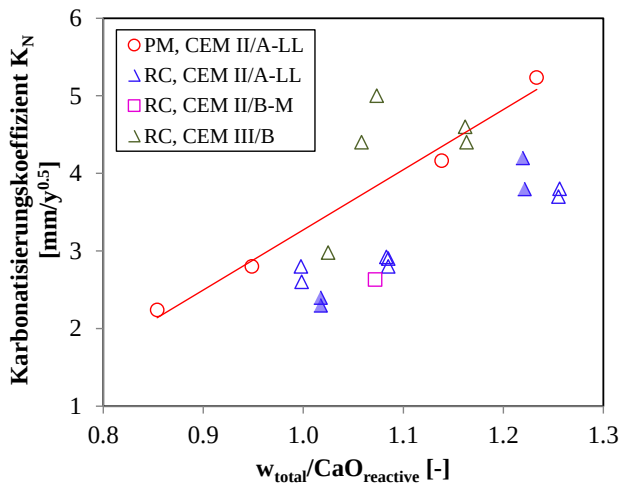


Abbildung 17: Karbonatisierungskoeffizient K_N als Funktion des $W_{total}/CaO_{reactive}$.

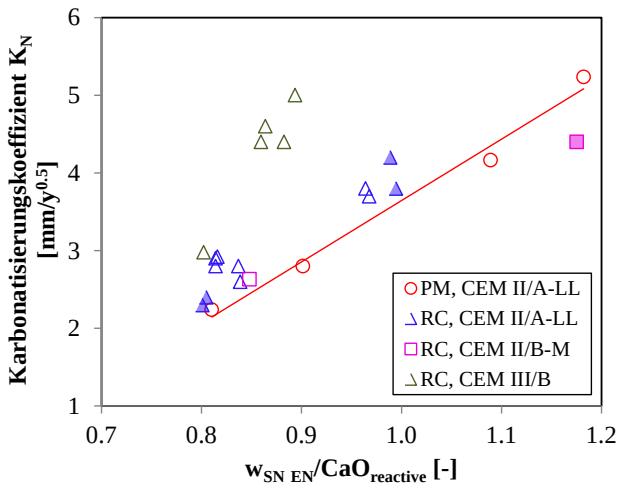


Abbildung 18: Karbonatisierungskoeffizient K_N als Funktion des $W_{SN\ EN}/CaO_{reactive}$.

4.3 Einfluss des Sättigungsgrades der Gesteinskörnung

Um den Einfluss des Sättigungsgrades der Gesteinskörnung auf die Betoneigenschaften abschätzen zu können, werden die Druckfestigkeiten der Betone nach 2 und 28 Tagen hergestellt mit trockener Gesteinskörnung mit denen der Betone aus vorgesättigter Gesteinskörnung verglichen. Wie aus Abbildung 19 ersichtlich ist, hat der Sättigungsgrad keinen erkennbaren Einfluss auf die Druckfestigkeit. Dies trifft auch auf die Karbonatisierungskoeffizienten K_N zu (Abbildung 20).

Es gilt allerdings zu berücksichtigen, dass die Nassmischzeit im Labor 90 s betrug. Wenn in einem Betonwerk bei der Verwendung von trockenem Betongranulat deutlich kürzere Mischzeiten verwendet werden, kann daraus eine schnelle Verschlechterung der Verarbeitbarkeit resultieren. Wird dies durch Wasserzugabe auf der Baustelle korrigiert, kann eine entsprechende Verschlechterung der Betonqualität und damit natürlich aus des Karbonatisierungswiderstandes auftreten.

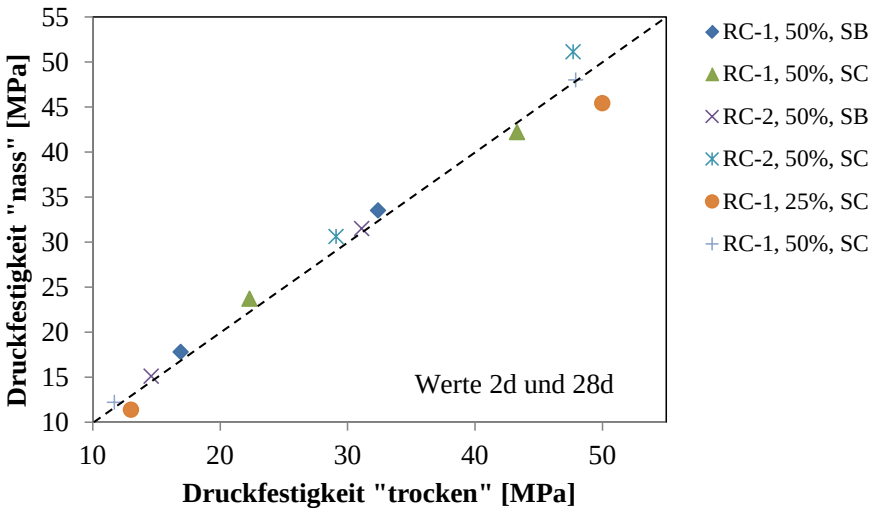


Abbildung 19: Druckfestigkeit der Betone aus vorgesättigter Gesteinskörnung als Funktion der Druckfestigkeit der Betone aus trockener Gesteinskörnung. Die Linie zeigt ein Verhältnis von 1:1 an.

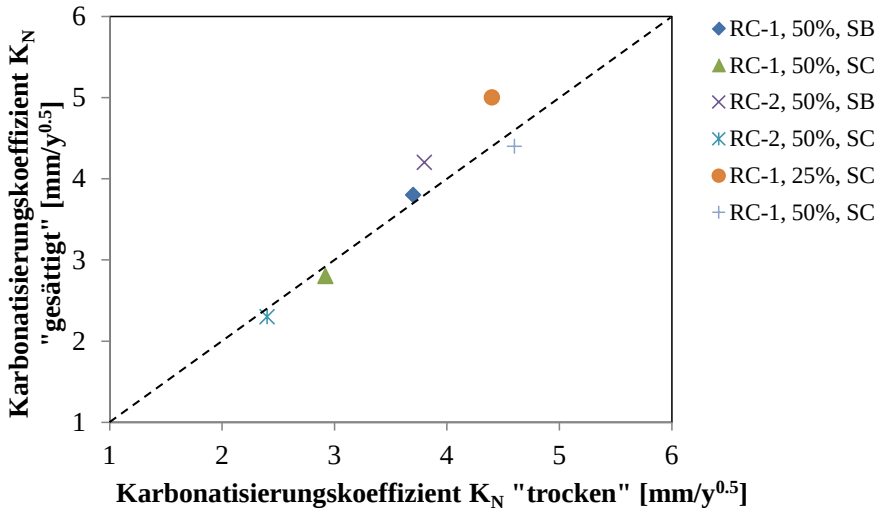


Abbildung 20: Karbonatisierungskoeffizient K_N der Betone aus vorgesättigter Gesteinskörnung als Funktion des Karbonatisierungskoeffizienten K_N der Betone aus trockener Gesteinskörnung. Die Linie zeigt ein Verhältnis von 1:1 an.

4.4 Einfluss der Berücksichtigung von Karbonatisierungsspitzen

Bei der Bestimmung der Karbonatisierungstiefe in RC-Beton wurde ein Problem festgestellt, das in der SIA 262/1 ungenügend abgedeckt ist. Es werden in der Norm keine Angaben gemacht wie mit lokal deutlich erhöhter Karbonatisierungstiefen, sogenannten Karbonatisierungsspitzen, umgegangen werden soll. Solche Karbonatisierungsspitzen können zum Beispiel entlang dem Kontakt zwischen Zementstein und Gesteinskörnern vorkommen. Im Fall der Verwendung von Betongranulat treten sie wie im Kapitel 3.5 beschrieben wegen poröser oder bereits karbonatisierter Betongranulat-Körner auf. Ein Beispiel für solche Karbonatisierungsspitzen wird in Abbildung 21 gezeigt. Selten kann es auch vorkommen, dass ein Betongranulat-Korn weniger schnell karbonatisiert als der Zementstein des neuen Betons (Abbildung 22).

Bei der Prüfung des Chloridwiderstandes in der SIA 262/1, Anhang B, wird zur Bestimmung der Chlorideindringfront die folgende Angabe gemacht:
"Wenn die Clorideindringfront durch grosse Gesteinskörner stark variiert, wird die Eindringtiefe der Chloride direkt neben den grossen Gesteinskörnern gemessen." Der Einfluss von Spitzen in der Chlorid-Eindringfront wird so berücksichtigt.

In der prEN 12390-10 ("Testing hardened concrete - Part 10: Determination of the carbonation resistance of concrete at atmospheric levels of carbon dioxide") werden Angaben gemacht, wie mit Karbonatisierungsspitzen umgegangen werden soll. Bei dichten Gesteinskörnern wird die Karbonatisierungsfront ähnlich wie die Chlorideindringtiefe in der SIA 262/1, Anhang B, beurteilt. Bei porösen Gesteinskörnern oder porösen Bereichen im Zementstein werden die dadurch verursachten Karbonatisierungsspitzen berücksichtigt, wenn die Abweichung von der "allgemeinen" Karbonatisierungsfront < 4 mm ist.

Sollen durch vorgängig karbonatisiertes Betongranulat verursachte Karbonatisierungsspitzen bei der Messung berücksichtigt werden oder nicht? Aus Sicht der Bewehrungskorrosion müssten sie berücksichtigt werden. Hier gilt es zu bemerken, dass gegen die Vorgabe der prEN 12390-10 auch Karbonatisierungsspitzen berücksichtigt werden sollten, die > 4 mm sind, weil sie für die Korrosion relevant sein können. Die bisher in diesem Bericht gezeigten Karbonatisierungskoeffizienten K_N wurden ohne Berücksichtigung der Karbonatisierungsspitzen bestimmt. Werden sie berücksichtigt, ergeben sich im Durchschnitt 10% höhere Karbonatisierungskoeffizienten beim RC-Beton (Abbildungen 21 und 22). Die Berücksichtigung der Karbonatisierungsspitzen ist beim RC-Beton

wichtig, weil sonst ein Vorhaltemass angewendet werden müsste, das der Möglichkeit einer Korrosionsinitiierung durch solche Karbonatisierungsspitzen Rechnung trägt.

Die bereits eingeleiteten Massnahmen auf normativer Ebene werden in Kapitel 5 beschrieben.

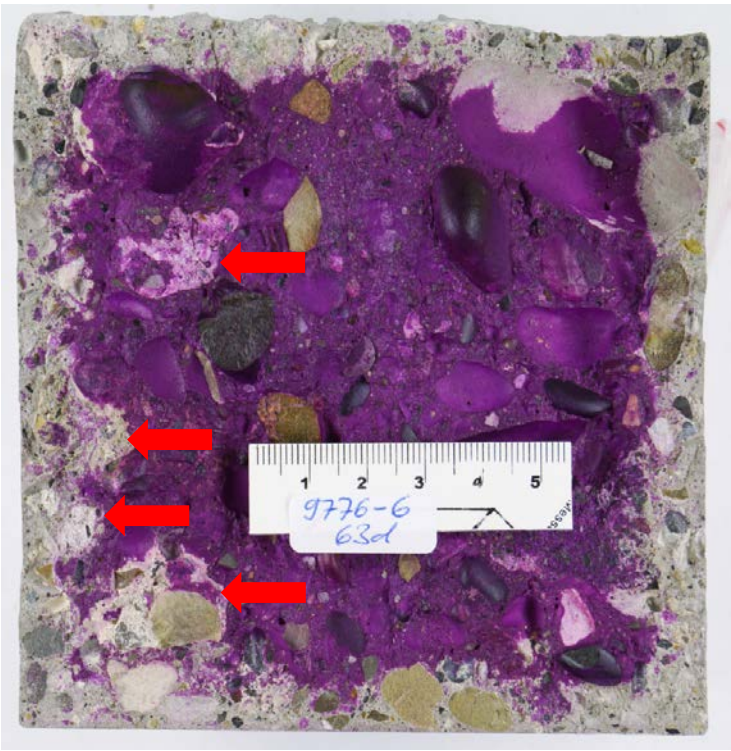


Abbildung 21: Durch Indikatorlösung eingefärbte Bruchfläche eines Prismas aus RC-Beton (RC-7A) zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe. Die Pfeile kennzeichnen bereits karbonatisiertes Betongranulat.

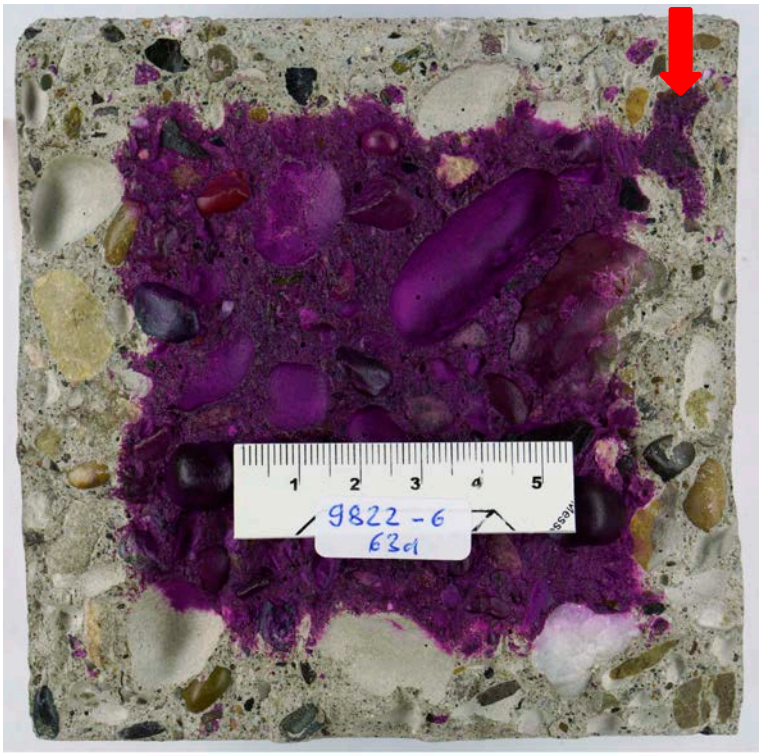


Abbildung 22: Durch Indikatorlösung eingefärbte Bruchfläche eines Prismas aus RC-Beton (RC-14) zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe. Der Pfeil kennzeichnet ein Betongranulat-Korn, das langsamer karbonatisiert als der Zementstein des neuen Betons.

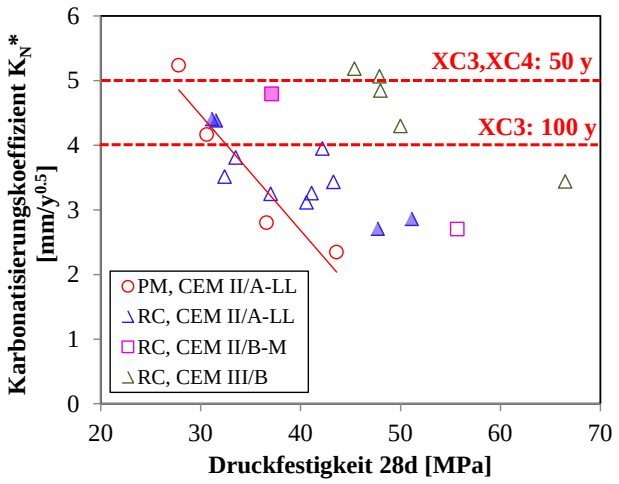


Abbildung 23: Karbonatisierungskoeffizient K_N (unter Berücksichtigung der Karbonatisierungs-spitzen) als Funktion der Druckfestigkeit nach 28 Tagen (zu vergleichen mit Abbildung 6)*

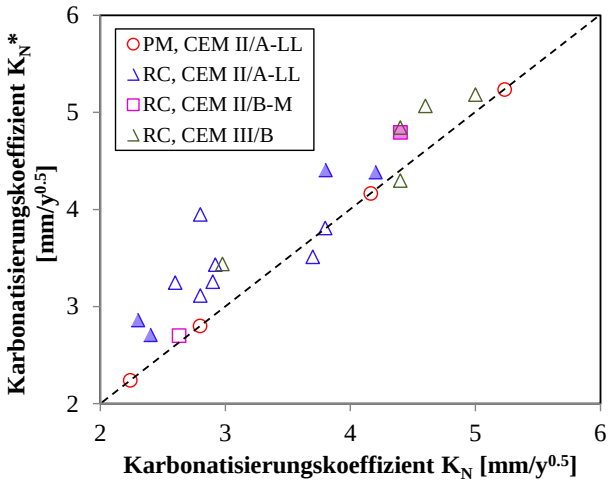


Abbildung 24: Karbonatisierungskoeffizient K_N (unter Berücksichtigung der Karbonatisierungs-spitzen) als Funktion des Karbonatisierungskoeffizienten K_N. Die Linie zeigt ein 1:1-Verhältnis an.*

5. Zusammenfassung

Die Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes für Beton der Sorten B-E wird seit 2013 verlangt (SN EN 206:2013, SIA 262/1:2013). Das Ziel des beantragten Projekts ist die Abklärung, ob Recyclingbeton aus Betongranulat (RC-C) einen verminderten Karbonatisierungswiderstand im Vergleich zu einem Beton aus natürlicher Gesteinskörnung hergestellt mit identischer Druckfestigkeit aufweist, und wenn ja, wieso. Basierend auf den experimentellen Daten werden allfällige Massnahmen definiert. Damit sollen Unsicherheiten bei der Verwendung von RC-Beton bei den Sorten B und C vermieden werden.
Neben einer Serie aus vier Betonen aus natürlicher Gesteinskörnung, die als Referenz diente wurden 18 RC-Betone aus CEM II/A-LL, CEM II/B-M und CEM III/B mit unterschiedlichen Anteilen an Betongranulat hergestellt. Betongranulat wurde sowohl in trockenem als auch in gesättigtem Zustand verwendet.
Die wichtigsten Erkenntnisse aus dem Projekt können wie folgt zusammengefasst werden:

- Bei der Karbonatisierungsfront werden sogenannte Karbonatisierungsspitzen (lokal erhöhte Karbonatisierungstiefen) hauptsächlich durch poröse oder bereits karbonatisierte Betongranulat-Körner verursacht. Werden die Karbonatisierungsspitzen nicht berücksichtigt, liegt der Karbonatisierungskoeffizient K_N im gleichen Bereich wie bei Beton aus natürlicher Gesteinskörnung gleicher Druckfestigkeit. Bei einer Berücksichtigung der Karbonatisierungsspitzen ist eine Erhöhung des Karbonatisierungskoeffizienten um durchschnittlich 10% zu beobachten. Das heisst, dass der Karbonatisierungskoeffizient im Vergleich zum Beton aus natürlicher Gesteinskörnung entsprechend erhöht ist.
- In der SIA 262/1 (Anhang I) werden keine Angaben gemacht, ob Karbonatisierungsspitzen berücksichtigt werden sollen oder nicht. Durch eine Rückmeldung der aus diesem Projekt resultierenden Erkenntnisse an die SIA wird in einem aktuellen Korrigendum der SIA 262/1 verlangt, dass Karbonatisierungsspitzen zu berücksichtigen sind. Werden die Karbonatisierungsspitzen berücksichtigt, gibt es keine Vorbehalte RC-Beton für die Sorten B und C zu verwenden.
- Der Sättigungsgrad des Betongranulats wirkt sich weder auf die Druckfestigkeit nach 2 respektive 28 Tagen aus, noch wird der Karbonatisierungskoeffizient beeinflusst. Bei kurzen Mischzeiten im Betonwerk muss allerdings mit einer schnellen Verschlechterung der Verarbeitbarkeit bei der Verwendung von trockenem Betongranulat gerechnet werden.
- Der Karbonatisierungskoeffizient K_N (Schnellkarbonatisierung) weist eine gute Übersteinstimmung (R^2 = 0.80) mit dem Karbonatisierungskoeffizienten $K_{N,S}$ in unbewitterter Aussenlagerung auf. Die Korrelation mit dem Karbonatisierungskoeffizienten $K_{N,US}$ in der für die Bewehrungskorrosion wichtigen bewitterten Aussenlagerung ist schlechter (R^2 = 0.66). Der Grund dafür ist das zementspezifische Porensystem. Betone aus Zementarten mit silikatischen Zumahlstoffen, wie zum Beispiel CEM III/B, weisen feinere Poren auf als ein Betone aus CEM I. Bei einer hohen relativen Feuchte wie in der bewitterten Aussenlagerung führt die kapillare Kondensation dazu, dass ein feinporiger Beton einen höheren Anteil an wassergefüllten Poren aufweist als ein grobporiger Beton. Durch diesen höheren Anteil an wassergefüllten Poren wird die Karbonatisierung entsprechend stärker verlangsamt, weshalb sich die Korrelation mit der Schnellkarbonatisierung verschlechtert. Es ist zu erwarten, dass auch das kapillare Saugen bei Niederschlag und die nachfolgende Verdunstung zu dieser schlechteren Korrelation mit der Schnellkarbonatisierung in der bewitterten Aussenlagerung beitragen.
- Grundsätzlich sollte der w/z-Wert bei RC-Beton der Sorten B und C im Vergleich zu Beton aus natürlicher Gesteinskrönung leicht reduziert werden, um das mögliche Auftreten von Karbonatisierungsspitzen zu kompensieren. Um das Zementleimvolumen konstant zu halten, ist dabei der Zementgehalt entsprechend leicht zu erhöhen. Bei einem Beton aus CEM II/B-M ist sowohl für RC-Beton als auch Beton aus natürlicher Gesteinskörnung gegenüber einem Beton aus CEM II/A-LL ein leicht reduzierter w/z-Wert anzustreben, um den Grenzwert für den Karbonatisierungswiderstand zu erfüllen. Die Verwendung eines CEM III/B erfordert zur Erfüllung des Grenzwertes unabhängig von der Gesteinskörnung einen deutlich reduzierten

w/z-Wert und eine entsprechend erhöhte Zementmenge, damit das Zementleimvolumen konstant bleibt und ein gut verarbeitbarer Beton hergestellt werden kann. Dadurch resultiert eine relativ hohe Druckfestigkeit ("Überfestigkeit"). Dieser Umstand kann dazu führen, dass die Mindestbewehrung angepasst werden sollte. Es gibt auch Zweifel, ob sich die Verwendung von CEM III/B Zement im Hochbau ökologisch lohnt [Kaufmann 2016].

- Weil beim RC-Beton der für die Zementhydratation zur Verfügung stehende Wassergehalt weder mit dem Gesamtwasser noch mit dem nach SN EN 206:2013 unter Berücksichtigung der theoretischen Wasseraufnahme der Gesteinskörnung wirksamen Wassergehalt übereinstimmt, eignet sich der w/CaO nur bedingt für eine Abschätzung des Karbonatisierungswiderstandes.

6. Umsetzung und Ausblick

Die Erkenntnisse bezüglich der Bestimmung der Karbonatisierungstiefe unter Berücksichtigung der Karbonatisierungsspitzen wurden bereits im März 2016 an die SIA weitergeleitet. Im Korrigendum für die SIA 262/1, das im Mai 2016 versandt wurde, ist dies bereits berücksichtigt worden. Die vorgeschlagene Revision umfasst den folgenden Wortlaut:

"Die Karbonatisierungstiefe wird an 3 bis 5 Stellen der vier Seitenflächen des Prismas auf 1 mm genau gemessen und daraus die mittlere Karbonatisierungstiefe pro Seite d_{KE} auf 0,1 mm genau berechnet und protokolliert. **Karbonatisierungsspitzen (z.B. wegen Poren, porösen oder bereits karbonatisierten Gesteinskörnern), auch jene > 4 mm, sind gemäss EN 12390-10 (bis zum Vorliegen dieser Norm gemäss CEN/TS 12390-10:2007) zu berücksichtigen.**"

Wie die Ergebnisse zeigen, können die Grenzwerte der SN EN 206:2013 für den Karbonatisierungswiderstand mit RC-Beton aus CEM II/A und CEM II/B-M Zementen erreicht werden, wenn der w/z-Wert leicht reduziert wird.

Um die Grenzwerte des Karbonatisierungskoeffizienten mit RC-Beton aus CEM III/B sicher zu erreichen, ist allerdings ein relativ tiefer w/z und ein relativ hoher Zementgehalt erforderlich. Dies führt zu einer deutlich höheren Druckfestigkeit, als für die Sorten B und C spezifiziert ist und entsprechend üblicherweise gefordert wird. Es ist zu berücksichtigen, dass bei höheren Festigkeiten die Mindestbewehrung angepasst werden muss. Deshalb ist der CEM III/B aus technischer Sicht für den Hochbau nicht zu empfehlen. Es gibt auch Zweifel, ob sich die Verwendung von CEM III/B Zement im Hochbau ökologisch lohnt [Kaufmann 2016].

Die Erkenntnisse aus dem Projekt sollten bei der 2017 anstehenden Überarbeitung des SIA Merkblattes 2030 "Recyclingbeton" berücksichtigt werden.

7. Referenzen

Abbas A., Fathifazl G., Isgor O.B., Razaqpur A.G., Fournier B., Foo S., Durability of recycled aggregate concrete designed with equivalent mortar volume method, Cement and Concrete Composites, 31 (2009) 555-563.

Barra M., Study of the durability of concrete recycled aggregate in concrete application as reinforced concrete (in Spanish). PhD Thesis, Polytechnic University of Cataluña, Barcelona, 1996.

Fatthudi N.I., Concrete carbonation as influenced by curing regime, Cement and Concrete Research 18 (1988) 426-430.

Hoffmann C., Huth O., Konstruktionsbeton aus recyclierter Gesteinskörnung (Beton- und Mischabbruchgranulat). Bericht 204'500, Dübendorf, Schweiz, 2006.

Hoffmann C., Jacobs F., Recyclingbeton aus Beton- und Mischabbruchgranulat: Sachstandsbericht. Projektnummer 205'670, Schweiz, 2007.

Hoffmann C., Leemann A., Recycled concrete and mixed rubble as aggregates: influence of variations in composition on the concrete properties. Sustainable Construction Materials and Technologies, Coventry, UK, (2007) 60-72.

Hunkeler F, Lamar L (2012): Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen, Forschungsauftrag AGB 2008/012, Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB), Bericht 649, Bern.

Katz A., Properties of concrete made with recycled aggregate from partially hydrated old concrete, Cement and Concrete Research 33 (2003) 703-711.

Kaufmann W (2016) Empfehlung der Normenkommission SIA 262: Zur Vorgabe der Zementart CEM III / B für Hochbaubetone. tec21 23:18.

Kohno K., Okamoto T., Isikawa Y., Effects of artificial lightweight aggregate on autogenous shrinkage of concrete, Cement and Concrete Research 29 (1999) 611-614.

Leemann A., Nygaard P., Zusammenhang zwischen Karbonatisierungswiderstand, CO_2-Pufferkapazität und Diffusivität von Mischzementen, Projekt 201'207, cemsuisse, Bern, 2014.

Leemann, A., Nygaard, P., Kaufmann, J., & Loser, R. (2015). Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete. Cement and Concrete Composites, 62, 33-43.

Leemann, A., & Moro, F. (2017). Carbonation of concrete: the role of CO_2 concentration, relative humidity and CO_2 buffer capacity. Materials and Structures, 50(1), 30.

Levy S.M., Helene P., Durability of recycled aggregates concrete: a safe way to sustainable development, Cement and Concrete Research 34 (2004)1975-1980.

Li J., Xiao H., Zhou Y., Influence of coating recycled aggregate surface with pozzolanic powder on properties of recycled aggregate concrete Construction and Building Materials 23 (2009) 1287-1291.

Osborne G.J., Carbonation and permeability of blastfurnace slag cement concretes from field structures, ACI Special Publication 114 (1989) 1209-1238.

Otsuki N., Miyazato S., Yodsudjai W., Influence of recycled aggregate on interfacial transition zone, strength, chloride penetration and carbonation of concrete, Journal of Materials in Civil Engineering 15 (2003) 443-451.

Ryu J.S., An experimental study on the effect of recycled aggregate on concrete properties, Magazine of Concrete Research 54 (2002) 7-12.

Sagoe-Crentsil K.K., Brown T., Taylor A.H., Performance of concrete made with commercially produced coarse recycled concrete aggregate, Cement and Concrete Research 31 (2001) 707-712.

Schubert S., Hoffmann C., Grundlagen für die Verwendung von Recyclingbeton aus Betongranulat. ASTRA Bericht 645, UVEK, Bern, 2010.

Tam V.W.Y., Gao X.F., Tam C.M., Microstructural analysis of recycled aggregate concrete produced from two-stage mixing approach, Cement and Concrete Research 35 (2005), 1195-1203.

Tegguer A.D., Determining the water absorption of recycled aggregates utilizing hydrostatic weighing approach. Construction and Building Materials. 2012; 27(1):112-6.

Thomas M.D.A., Matthews J.D., Haynes C.A., Carbonation of fly ash concrete, ACI Special Publication 19 (1992) 539-556.

Wierig H.J., Longtime studies on the carbonation of concrete under normal outdoor exposure, Proc. RILEM Seminar on the Durability of Concrete Structures under Normal Outdoor Exposure, 1984, 239-249.

Zaharieva R., Buyle-Bodin F., Skoczylas F., Wirquin E., Assessment of the surface permeation properties of recycled aggregate concrete, Cement and Concrete Composites 25 (2003) 223-232.

Anhang

A1. Betongranulat RC-1

Plattigkeitskennzahl

nach SN EN 933-3:1997

EMPA Kontroll-Nr.	9684	9685	9686
Fraktion	4/8	8/16	16/32
Plattigkeit-Index	6.3	4.5	2.8
Kategorie nach EN 12620	FI_{15}	FI_{15}	FI_{15}

Anforderung nach SN EN 12620:2002

Plattigkeitskennzahl	Kategorie
≤ 15	FI_{15}
≤ 20	FI_{20}
≤ 35	FI_{35}
≤ 50	FI_{50}
>50	$FI_{angeben}$
keine Anforderungen	FI_{NR}

Petrographie

EMPA-Kontroll Nr.	9684	9685	9686
Fraktionen	4/8	8/16	16/32
Petrographische Beschreibung	M-%	M-%	M-%
Körner mit > 20 Zementstein an Oberfläche	31.0	28.5	21.0
Körner mit < 20 Zementstein an Oberfläche	68.5	71.5	79.0
Diverses (Keramik, Holz, Backstein)	0.5	0.0	0.0
Summe	100.0	100.0	100.0

Rohdichte und Wasseraufnahme

nach SE N 1097-6:2000

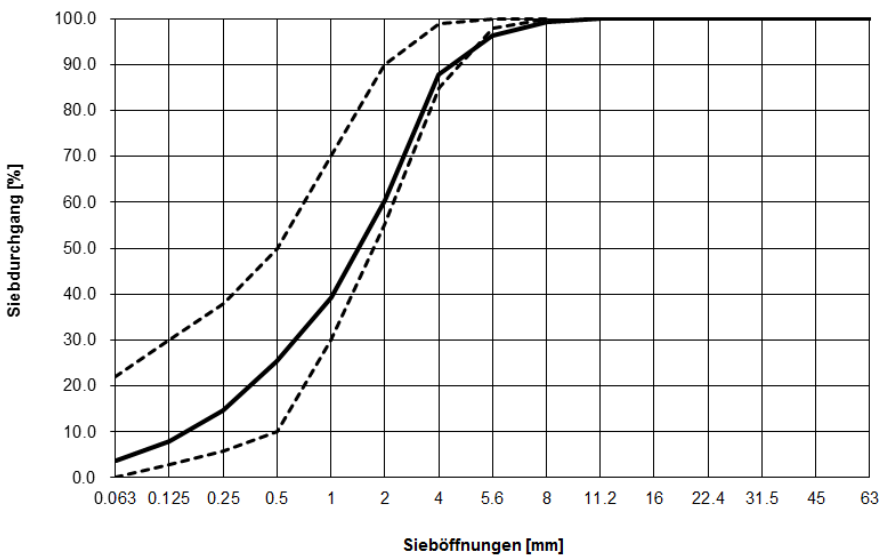
Eingangs-Nr.	9684	9685	9686
Fraktion [mm]	4/8	8/16	16/32
Scheinbare Rohdichte [Mg/m^3]	2.679	2.691	2.679
Rohdichte auf ofentrockener Basis [Mg/m^3]	2.397	2.369	2.427
RD auf wassergesättigter und oberflächentrockener Basis [Mg/m^3]	2.503	2.552	2.521
Wasseraufnahme [Vol-%]	4.38	3.35	3.86

Sieblinien
0-4 mm

Resultate - Korngrössenverteilung bei Siebverfahren

Siebeöffnung [mm]	Siebdurchgang [%]
63	***100.0***
45	***100.0***
31.5	***100.0***
22.4	***100.0***
16	***100.0***
11.2	***100.0***
8	***99.3***
5.6	***96.2***
4	***87.7***
2	***60.5***
1	***39.2***
0.5	***25.3***
0.25	***14.6***
0.125	***7.9***
0.063	***3.8***

Feinanteilen, *f*	***3.8 %***



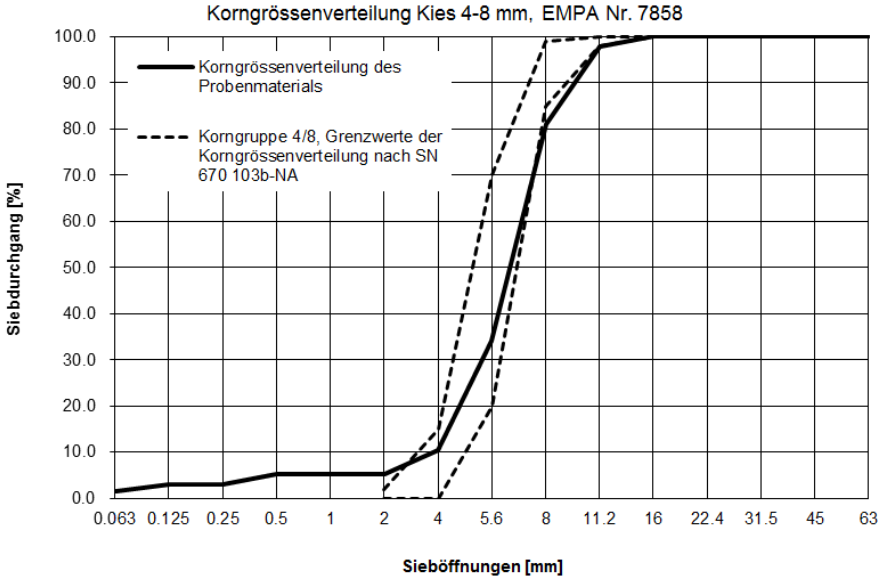
Version A.0: nyp 06-07-2011

4-8 mm

Resultate - Korngrössenverteilung bei Siebverfahren

Siebeöffnung [mm]	Siebdurchgang [%]
63	***100.0***
45	***100.0***
31.5	***100.0***
22.4	***100.0***
16	***100.0***
11.2	***97.9***
8	***81.2***
5.6	***34.1***
4	***10.5***
2	***5.2***
1	***5.2***
0.5	***5.2***
0.25	***3.0***
0.125	***3.0***
0.063	***1.5***

Feinanteilen, *f*	***1.5 %***



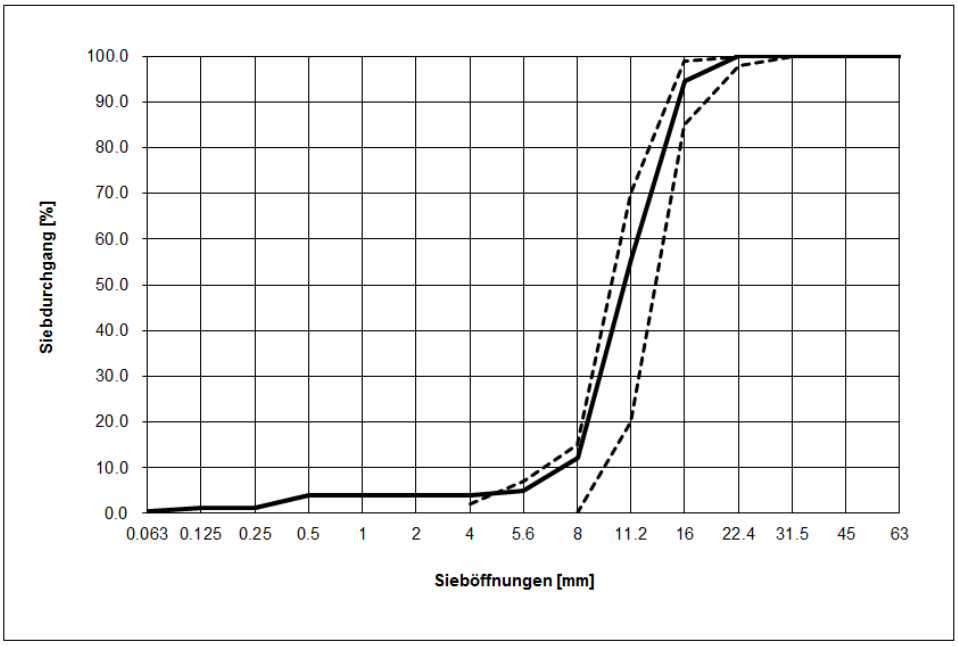
Version A.0: nyp 06-07-2011

8-16 mm

Resultate - Korngrössenverteilung bei Siebverfahren

Siebeöffnung [mm]	Siebdurchgang [%]
63	***100.0***
45	***100.0***
31.5	***100.0***
22.4	***100.0***
16	***94.6***
11.2	***55.8***
8	***12.2***
5.6	***5.1***
4	***4.0***
2	***4.0***
1	***4.0***
0.5	***4.0***
0.25	***1.3***
0.125	***1.3***
0.063	***0.5***

Feinanteilen, *f*	***0.5 %***



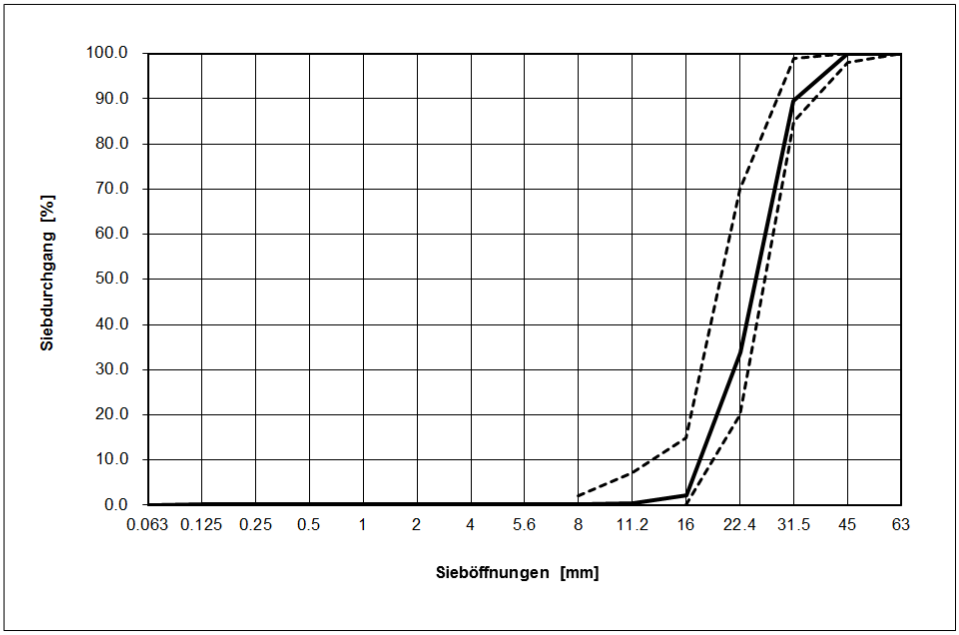
Version A.0: nyp 06-07-2011

16-32 mm

Resultate - Korngrössenverteilung bei Siebverfahren

Siebeöffnung [mm]	Siebdurchgang [%]
63	***100.0***
45	***100.0***
31.5	***89.5***
22.4	***33.8***
16	***2.2***
11.2	***0.5***
8	***0.3***
5.6	***0.3***
4	***0.3***
2	***0.3***
1	***0.3***
0.5	***0.3***
0.25	***0.3***
0.125	***0.3***
0.063	***0.1***

Feinanteilen, *f*	***0.1 %***



Version A.0: nyp 06-07-2011

A2. Betongranulat RC-2

Petrographie

EMPA-Kontroll Nr.	9628
Fraktionen	4/16
Petrographische Beschreibung	M-%
Körner mit > 20 Zementstein an Oberfläche	32.0
Körner mit < 20 Zementstein an Oberfläche	68.0
Diverses (Keramik, Holz, Backstein)	0.0
Summe	100.0

Rohdichte und Wasseraufnahme

nach SE N 1097-6:2000

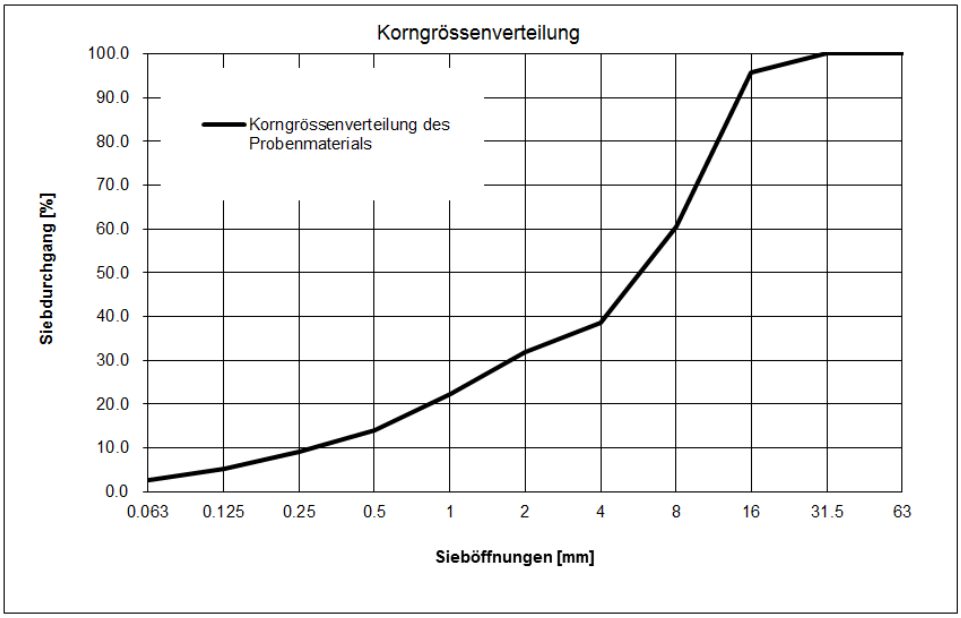
Eingangs-Nr.	9628
Fraktion [mm]	4/8
Scheinbare Rohdichte [Mg/m^3]	2.718
Rohdichte auf ofentrockener Basis [Mg/m^3]	2.517
RD auf wassergesättigter und oberflächentrockener Basis [Mg/m^3]	2.591
Wasseraufnahme [Vol-%]	2.94

Sieblinie

Resultate - Korngrössenverteilung bei Siebverfahren

Sieböffnung [mm]	Siebdurchgang [%]
63	***100.0***
31.5	***100.0***
16	***95.8***
8	***60.4***
4	***38.5***
2	***31.8***
1	***22.4***
0.5	***14.1***
0.25	***9.1***
0.125	***5.3***
0.063	***2.7***

Feinanteil, *f*	***2.7 %***



Version A.0: nyp 06-07-2011