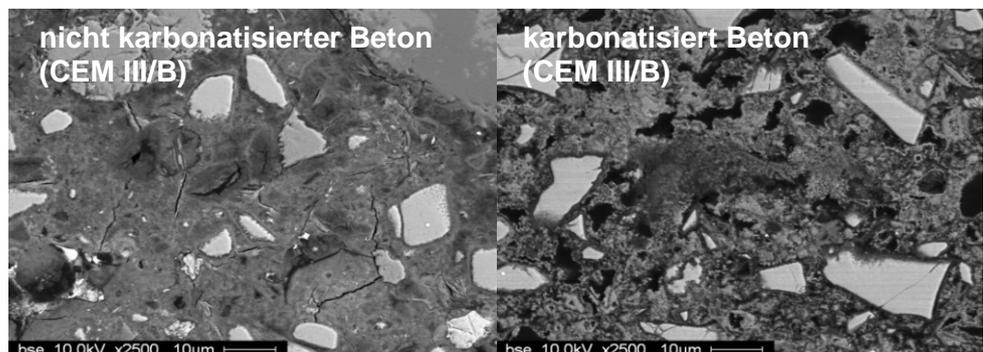
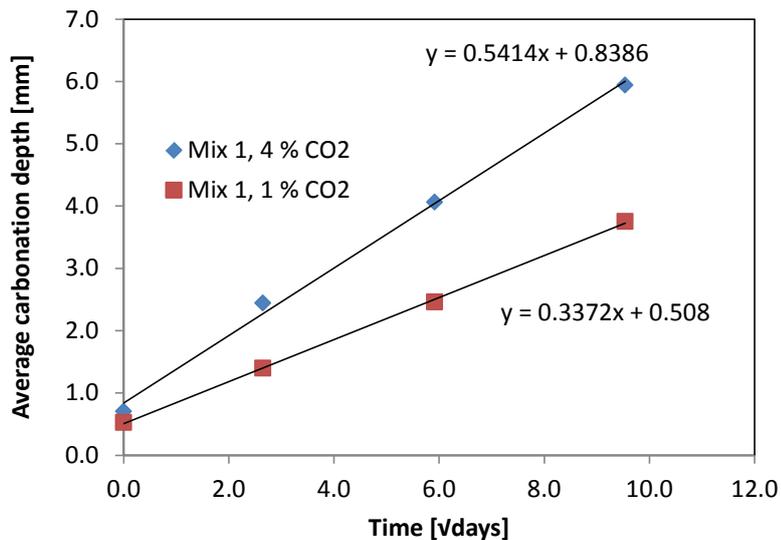


cemsuisse-Projekt 201207

Zusammenhang zwischen Karbonatisierungswiderstand,  
CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität und Diffusivität von Mischzementen





# Inhaltsverzeichnis

<b>1.</b>	<b>Einleitung .....</b>	<b>6</b>
<b>2.</b>	<b>Materialien und Methoden .....</b>	<b>7</b>
2.1	Materialien .....	7
2.2	Methoden.....	9
<b>3.</b>	<b>Resultate .....</b>	<b>11</b>
3.1	Mörtel.....	11
3.1.1	Festigkeiten .....	11
3.1.2	Wasserleitfähigkeit .....	12
3.1.3	O <sub>2</sub> -Diffusion .....	12
3.1.4	Karbonatisierungswiderstand .....	13
3.1.5	Hg-Druckporosimetrie .....	15
3.1.6	Elektronenmikroskopie .....	16
3.2	Beton .....	18
3.2.1	Festigkeiten .....	18
3.2.2	O <sub>2</sub> -Diffusion .....	18
3.2.3	Karbonatisierungswiderstand .....	18
<b>4.</b>	<b>Diskussion .....</b>	<b>19</b>
4.1	Schnellkarbonatisierung von Mörtel .....	19
4.2	Natürliche Karbonatisierung .....	22
4.2.1	Mörtel.....	22
4.2.2	Beton .....	23
<b>4.</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>27</b>
<b>5.</b>	<b>Umsetzung .....</b>	<b>29</b>
<b>6.</b>	<b>Erste Erfahrungen aus der Praxis .....</b>	<b>29</b>
<b>7.</b>	<b>Ausblick.....</b>	<b>29</b>
<b>8.</b>	<b>Referenzen .....</b>	<b>31</b>
	<b>Anhang.....</b>	<b>32</b>

Für das cemsuisse-Projekt 201207:

Dübendorf, Abteilung Beton / Bauchemie, 9. Juli 2014

A handwritten signature in black ink, reading "Andreas Leemann". The script is cursive and fluid, with the first name "Andreas" and the last name "Leemann" clearly distinguishable.

Dr. Andreas Leemann

# Zusammenfassung

Projektdauer: März 2013 - Juli 2014

Projektteam: A. Leemann, P. Nygaard

Die Zusammensetzung der zur Mörtelherstellung eingesetzten Bindemittel wurde systematisch variiert, um die CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität und Diffusivität zu verändern. Neben der Schnellkarbonatisierung bei 1 und 4% CO<sub>2</sub> sowie der natürlichen Karbonatisierung in unbewitterter und bewitterter Exposition wurden die Druckfestigkeit, die O<sub>2</sub>-Diffusivität und die Wasserleitfähigkeit bestimmt. Zusätzlich wurde an 20 Betonen der Karbonatisierungskoeffizient nach einer Aussenlagerung von 2.5 Jahren in unbewitterter und bewitterter Exposition bestimmt. Alle Prüfkörper wurden für 28 Tage nachbehandelt, um den Einfluss der Hydratation während der CO<sub>2</sub>-Exposition gering zu halten.

Die nach SIA 262/1 berechneten Karbonatisierungskoeffizienten bei 1 und 4% CO<sub>2</sub> ergeben praktisch identische Werte. Innerhalb derselben Zementart zeigt der Karbonatisierungskoeffizient bei der Schnellkarbonatisierung einen Zusammenhang mit dem w/z-Wert. Werden aber Mörtel hergestellt mit anderen Zementarten hinzugezogen, zeigt sich in der Gesamtheit der Daten keine Korrelation mit w/z oder anderen Mörtel Eigenschaften wie Druckfestigkeit, O<sub>2</sub>-Diffusion oder verschiedenen Porositätsparametern. Hingegen besteht eine gute Korrelation mit der CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität pro Volumen Zementstein. Die CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität kann als Verhältnis von Zugabewasser zu reaktivem oder reagiertem CaO im verwendeten Bindemittel, dem w/CaO<sub>reaktiv</sub> respektive w/CaO<sub>reagiert</sub>, ausgedrückt werden. Diese Grösse erweist sich als dominierender Faktor für den mit der Schnellprüfung ermittelten Karbonatisierungswiderstand. Der Anteil an reaktivem CaO kann über die Zementchemie abgeschätzt werden. Dabei muss beachtet werden, dass der Anteil des CaO, der aus dem inerten Kalksteinmehl stammt, nicht berücksichtigt werden darf.

In der unbewitterten Exposition ändert sich bei den Mörteln die Reihenfolge im Karbonatisierungswiderstand, wie er bei der Schnellkarbonatisierung ermittelt wurde. Der Grund dafür ist, dass die Mörtel mit Mikrosilika und deutlich ausgeprägter der Mörtel aus CEM III/B eine im Vergleich zu den anderen Mörteln überproportional starke Verringerung des Karbonatisierungskoeffizienten verzeichnen. Die Verringerung des Karbonatisierungskoeffizienten dieser Mörtel ist in der bewitterten Exposition noch signifikanter. Dadurch verschlechtert sich die Korrelation zu den in der Schnellkarbonatisierung bestimmten Karbonatisierungskoeffizienten. Beim Beton ist beim Vergleich von der unbewitterten zur bewitterten Exposition ebenfalls ein überproportional grosse Abnahme des Karbonatisierungskoeffizienten der Betone aus CEM III/B zu beobachten.

Diese Feststellung ist aus zwei Gründen von Bedeutung. Erstens steigt das Korrosionsrisiko infolge Karbonatisierung mit der Feuchte an und ist in erster Linie bei bewitterten Bauteilen ein potentielles Problem. Genau bei diesen Bedingungen ist die überproportional starke Abnahme der Karbonatisierungskoeffizienten der Mörtel mit Mikrosilika und der Mörtel und Betone aus CEM III/B zu verzeichnen. Zweitens verschlechtert sich die Korrelation zur CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität, weil neben den chemischen Parametern nun physikalische Parameter wie Feuchtigkeitsaufnahme und Verdunsten eine wichtige Rolle spielen.

Das Ziel der Schnellkarbonatisierung muss es sein, den Karbonatisierungswiderstand spezifischer Mörtel und Betone hinsichtlich ihres Karbonatisierungswiderstandes bei den für die Bewehrungskorrosion relevanten Verhältnissen, das heisst hoher Feuchtigkeit, zu klassieren. Der Korrelationskoeffizient zwischen den in der Schnellkarbonatisierung und der bewitterten Exposition bestimmten Karbonatisierungskoeffizienten ist relativ tief.

Die Schnellkarbonatisierungsprüfung hat sicher ihre Berechtigung und gibt auch wertvolle Hinweise auf den Karbonatisierungswiderstand von Mörtel und Beton. Es ist aber auch wichtig, sich der Grenzen der Schnellprüfung bewusst zu sein. Bei Mörtel und Beton aus Mischzementen, die silikatische Zusatzstoffe enthalten, kann es zu einem signifikanten Unterschätzen des Karbonatisierungswiderstandes in der bewitterten Exposition kommen.

# 1. Einleitung

Aufgrund der CO<sub>2</sub>-Problematik werden in der Schweiz heute überwiegend Mischzemente produziert. Nachdem der CEM II/A-LL den CEM I als Hauptsorte abgelöst hat, verläuft der Trend nun in die Richtung einer vermehrten Produktion von CEM II/B. Der weiter reduzierte Klinkergehalt hat den Vorteil, dass der CO<sub>2</sub>-Ausstoss pro Tonne produzierten Zement weiter verringert werden kann. Diese Strategie bringt Vorteile und Risiken mit sich, was die Dauerhaftigkeit der mit diesen Zementen hergestellten Mörtel und Betone betrifft. Das Risiko hinsichtlich einer schädigenden Alkali-Aggregat-Reaktion nimmt ab, weil durch den reduzierten Klinkergehalt der pH in der Porenlösung sinkt und je nach verwendetem Zusatzstoff aktiv noch weiter reduziert wird. Die Auswirkungen auf den Chlorid- und Sulfatwiderstand hängen von den verwendeten Zusatzstoffen ab: Kalksteinmehl wirkt sich negativ aus, puzzolanische und hydraulische Materialien wie Flugasche oder Hochofenschlacke positiv. Beim Frost-Tausalz-widerstand ist der Einfluss der Zusatzstoffe tendenziell negativ, kann aber über die Steuergrösse Luftgehalt kompensiert werden.

Ein Wissensdefizit besteht beim Karbonatisierungswiderstand. Durch die Karbonatisierung des Zementsteins sinkt der pH im Beton ab, wodurch die Passivierung des Bewehrungsstahls aufgehoben wird und es zur Korrosion mit massiven Betonschäden kommen kann. Die in der Literatur vorhandenen Daten zum Karbonatisierungswiderstand basieren überwiegend auf beschleunigten Laborprüfungen. Wie die Literaturrecherche für das cemsuisse-Projekt "Kohlendioxidaufnahme von Stahlbetonbauten durch Karbonatisierung" [Nygaard & Leemann, 2012] gezeigt hat, sind relativ wenig systematisch erfasste Karbonatisierungsdaten von Bauwerken oder unter natürlichen Bedingungen karbonatisierten Prüfkörpern vorhanden [z. Bsp. Wierig, 1984 / Wallbank & Maunsell, 1989 / Thomas et al., 1992 / Thomas & Matthews, 1993 / Alexander et al., 2007]. Über eine Validierung zwischen beschleunigten Prüfverfahren und natürlicher Karbonatisierung sind ebenfalls wenig Daten vorhanden, zumal die Bedingungen bei verschiedenen Methoden zur Schnellkarbonatisierung zum Teil erheblich differieren. Die vorhandenen Daten haben zudem den Nachteil, dass sie mehrheitlich auf Untersuchungen von Mörtel und Beton hergestellt mit CEM I und gelegentlich CEM III/B basieren. Trotz dieser Defizite lassen sich die entscheidenden Grössen für den Karbonatisierungswiderstand identifizieren. Es sind dies;

- die CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität des Zementes, die durch den Portlanditgehalt gesteuert zu sein scheint,
- die Diffusivität, die den Transport von CO<sub>2</sub> und Wasser steuert.

Wie diese beiden Grössen aber beim Karbonatisierungswiderstand gewichtet werden müssen, ist nicht klar. Es ist auch möglich, dass die Gewichtung vom verwendeten Zement, dem verwendeten w/z-Wert oder, noch wichtiger für die Interpretation von Resultaten der Schnellkarbonatisierung, vom CO<sub>2</sub>-Gehalt und der relativen Feuchte abhängt.

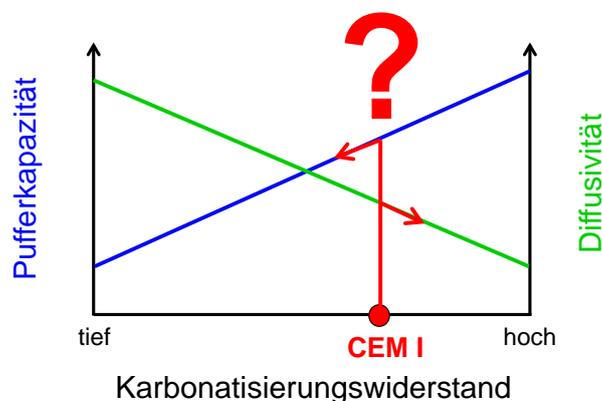


Abbildung 1: Schematische Darstellung des unklaren Einflusses einer Änderung der CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität und Diffusivität auf den Karbonatisierungswiderstand über die Verwendung eines silikatischen Zusatzstoffes wie Mikrosilika oder Flugasche.

Auf europäischer Ebene wurde die Prüfung zur Schnellkarbonatisierung abgelehnt, weil der CO<sub>2</sub>-Gehalt von 4% als zu hoch erachtet wurde. In der Schweiz wurde die Prüfung zur Schnellkarbonatisierung mit 4% CO<sub>2</sub> eingeführt [SIA 262/1, Anhang I]. In dem ASTRA- Projekt "Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen" wurde die Grundlage für die Einführung der Schnellkarbonatisierung in die SIA 262/1 gelegt [Hunkeler & Lammar, 2012]. In dem Projekt wurden verschiedene Aspekte der Schnellkarbonatisierung behandelt und Literaturdaten aufgearbeitet. Die geprüften, mit verschiedenen Zementen hergestellten Betone liessen die Definition eines Grenzwertes für diese Prüfung zu, geben aber keinen Aufschluss über den Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität, Diffusivität und Karbonatisierungswiderstand. Diesen Zusammenhang zu klären, ist für Beton aus Mischzementen wichtig. Es muss sich abschätzen lassen, wie sich der Karbonatisierungswiderstand verändert, wenn ein inerte Zumahlstoff (reduzierter Klinkergehalt, Erhöhung der Diffusivität), ein puzzolanischer Zumahlstoff (reduzierter Klinkergehalt, Verbrauch von Portlandit, Verringerung der Diffusivität) oder ein hydraulischer Zumahlstoff (reduzierter Klinkergehalt, Verringerung der Diffusivität) verwendet wird. Wenn der Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität, Diffusivität und Karbonatisierungswiderstand über eine Schnellkarbonatisierungsprüfung geklärt wird, bleibt aber immer noch eine Unsicherheit, weil nicht bekannt ist, ob die Gewichtung von CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität und Diffusivität bei einer natürlichen Karbonatisierung immer noch dieselbe ist. In der SIA 262/1 wird zum Beispiel ein empirischer Umrechnungsfaktor verwendet, um den bei der Schnellprüfung bestimmten Karbonatisierungskoeffizienten in einen Karbonatisierungskoeffizienten bei natürlichen Bedingungen umzurechnen. Um in der Zukunft Überraschungen durch karbonatisierungsbedingte Bewehrungskorrosion von Stahlbeton hergestellt aus Mischzementen ausschliessen zu können, ist eine Validierung der Schnellkarbonatisierungsprüfung mit den natürlichen Verhältnissen unumgänglich. Die Gefahr ist sonst zu gross, dass Betone so optimiert werden, dass sie den Grenzwert eines Prüfverfahrens erfüllen, der unter Umständen nicht den vermuteten Zusammenhang mit der natürlichen Karbonatisierung aufweist. Einerseits würden sich hohe Instandsetzungskosten in der Zukunft negativ auf den Ruf der Bauindustrie auswirken. Andererseits könnte aufgrund der Resultate der Schnellkarbonatisierung Betonen aus Mischzementen bestimmte Anwendungen fälschlicherweise verwehrt bleiben.

Im vorliegenden Projekt wird mit einem einfachen Versuchsmodul der Zusammenhang zwischen CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität, Diffusivität und Karbonatisierungswiderstand bei der Schnellkarbonatisierung mit einem CO<sub>2</sub>-Gehalt von 1 und 4% sowie bei einer natürlichen Karbonatisierung geklärt werden. Dies erlaubt einerseits eine Abschätzung des Einflusses von verschiedenen Zumahlstoffen auf den Karbonatisierungswiderstand und andererseits eine Validierung der nun über die revidierte Fassung der SIA 262/1 eingeführten Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes mit 4% CO<sub>2</sub>. Die Zementhersteller erhalten damit Informationen, ob der so bestimmte Karbonatisierungswiderstand von Mörtel und Beton aus Mischzementen für Bauwerke repräsentativ ist oder nicht, und ob weiterer Handlungsbedarf besteht. Zusätzlich wird noch der Karbonatisierungswiderstand von 20 Betonen unterschiedlicher Zusammensetzung nach einer natürlichen Exposition von 2.5 Jahren herangezogen, um eine betontechnologische Umsetzung der aus dem Projekt gewonnen Erkenntnisse zum Karbonatisierungswiderstand von Mischzementen zu gewährleisten.

## 2. Materialien und Methoden

### 2.1 Materialien

Als Zement wurde ein CEM I 52.5 R eingesetzt. Als Zumahlstoffe kamen Kalksteinmehl (Nekafill 15), Mikrosilika (Elkem 968) und Portlandit (Sigma Aldrich, Ca(OH)<sub>2</sub> ≥ 96 Masse-%) zum Einsatz. Als Eckpunkt für einen Zement mit einem hohen Klinkersubstitutionsgrad wurde ein CEM III/B 42.5 gewählt. Die chemische Zusammensetzung der Zemente und Mikrosilika kann der Tabelle 1 entnommen werden.

Material	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	L.O.I.
CEM I 52.5 R	20.2	5.29	3.25	0.01	0.06	0.29	0.22	62.7	1.65	0.90	<0,03	3.82	1.34
CEM III/B 42.5 L-LH HS	30.6	9.73	1.18	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	48.8	5.19	0.59	0.29	1.43	a.a.
Mikrosilika	92.8	0.94	0.13	n.a.	0.03	0.01	0.05	0.36	0.74	1.09	0.39	0.54	2.66

Tabelle 1: Chemische Zusammensetzung der beiden verwendeten Zemente und des verwendeten Mikrosilikas.

Die Wahl fiel auf einen schnell hydratisierenden Zement und einen schnell hydratisierenden silikatischen Zuschlagstoff, um den Hydratationseffekt und die sich damit verändernden Mörtel­eigenschaften während der Ermittlung des Karbonatisierungswiderstandes möglichst klein zu halten. Aus diesem Grund wurde auch erst in einem Alter von 56 Tagen mit der Ermittlung des Karbonatisierungswiderstandes begonnen (s. Kapitel 2.2). Als Gesteinskörnung wurde Normsand (0-2 mm) verwendet.

Die Zusammensetzung der Mörtel wird in der Tabelle 2 aufgeführt. Ausgangspunkt ist ein Mörtel hergestellt mit CEM I und einem w/z-Wert von 0.48. Die Zusammensetzung der Mörtel wurde über Zuschlagstoffe systematisch variiert, um den Einfluss auf den Karbonatisierungswiderstand abzuklären. Im Folgenden wird auch bei Mörtel aus CEM I einheitlich der Begriff der Wasser-Bindemittel-Wert (w/b) und nicht Wasser-Zement-Wert (w/z) verwendet.

Die Verringerung und die Erhöhung des w/b-Wertes beim Mörtel aus CEM I zeigt den Einfluss der Diffusivität bei ähnlichem Portlanditgehalt.

Die Verwendung von Kalksteinmehl zeigt den Einfluss von reduziertem Portlanditgehalt bei gleichzeitig erhöhter Diffusivität.

Die beiden Mörtel mit Mikrosilika zeigen den Einfluss einer reduzierten Diffusivität bei gleichzeitig reduziertem Portlanditgehalt. Mikrosilika hat zudem den Vorteil, dass die Reaktion innerhalb der ersten 28 Tage erfolgt, dadurch verändern sich die Diffusivität und der Portlanditgehalt nur noch geringfügig während der Schnellkarbonatisierung.

Die beiden Mörtel mit zusätzlichem Portlandit zeigen den Einfluss des Portlanditgehaltes bei ähnlicher Diffusivität.

Von jedem Mörtel wurden sechs Prismen 40 x 40 x 160 mm<sup>3</sup> und ein Würfel mit Kantenlänge 150 mm hergestellt. Die Prüfkörper wurden nach 24 Stunden ausgeschalt und danach bis zum Prüftermin respektive bis zum Beginn der prüfungsspezifischen Vorbereitung im Feuchtraum (> 95 % RF) gelagert. Die Prüfkörper für die Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes wurden von 29 bis 56 Tagen bei 20 °C und 57 % RF gelagert. Danach wurden sie auf der Einfüllfläche und der untenliegenden Schalfäche mit Epoxidharz imprägniert. Entsprechend waren nur die seitlichen Schalfächen für die Interaktion mit CO<sub>2</sub> zugänglich.

Mörtel	Zement		Zusatzstoff			w/b-Wert	Sand [kg/m <sup>3</sup> ]
	Art	Anteil [kg/m <sup>3</sup> ]	Art	[kg/m <sup>3</sup> ]	Anteil Masse bezogen auf Zement [%]		
1	CEM I	518	-	-	-	0.48	1448
2	CEM I	575	-	-	-	0.40	1449
3	CEM I	471	-	-	-	0.56	1448
4	CEM I	480	Kalksteinmehl	36.0	7.5	0.48	1447
5	CEM I	446	Kalksteinmehl	66.9	15.0	0.48	1450
6	CEM I	479	Mikrosilika	35.9	7.5	0.48	1448
7	CEM I	445	Mikrosilika	66.8	15.0	0.48	1449
8	CEM I	476	Portlandit	35.7	7.5	0.48	1449
9	CEM I	441	Portlandit	66.1	15.0	0.48	1448
10	CEM III/B	506	-	-	-	0.48	1448

*Tabelle 2: Rezeptur der verwendeten Mörtel.*

Bei den ausgelagerten Betonen (Tabelle 3) handelt es sich um Reservewürfel (150 mm<sup>3</sup>), die im Rahmen des ASTRA-Projektes " Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D" [Loser & Leemann, 2013] hergestellt wurden. Die Würfel wurden bis zum Alter von 28 Tagen im Feuchtraum (> 95 % RF) gelagert. Danach wurden sie vertikal mit der Säge geteilt. Die Einfüllfläche und die untenliegende Schalfäche sowie die Stirnseiten wurden mit Epoxidharz imprägniert. So fand die Karbonatisierung einerseits über eine seitliche Schalfäche und über die Schnittfläche statt.

Druckfestigkeit, Wasserleitfähigkeit, O<sub>2</sub>-Diffusionskoeffizient und Sulfatwiderstand dieser Betone sowie die chemische Zusammensetzung der Zemente können dem ASTRA-Bericht entnommen werden.

Zement		Gesteinsk.	S/K	Wasser	w/b	Zusatzmittel	
Art [-]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	[kg/m <sup>3</sup> ]	[-]	Art [-]	Menge [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM I HS	335	1'927	0.54	150	0.45	FM	1.3
CEM I HS	315	1'927	0.54	157	0.50	FM	0.6
CEM I HS	280	1'929	0.54	168	0.60	-	-
CEM I HS	450	1'678	1.00	200	0.45	FM+VMA	2.3 + 1.1
CEM I	335	1'929	0.54	150	0.45	FM	1.3
CEM I	315	1'929	0.54	157	0.50	FM	0.3
CEM I	280	1'931	0.54	168	0.60	-	-
CEM I	400	1'799	0.54	180	0.45	-	-
CEM I	450	1'680	1.00	200	0.45	FM+VMA	1.8 + 1.1
CEM III/B	325	1'928	0.54	146	0.45	FM	1.3
CEM III/B	305	1'930	0.54	152	0.50	FM	0.6
CEM III/B	275	1'925	0.54	165	0.60	-	-
CEM III/B	390	1'794	0.54	174	0.45	-	-
CEM III/B	440	1'672	1.00	195	0.45	FM+VMA	1.8 + 1.1
CEM II/B-M (V-LL)	325	1'924	0.54	146	0.45	FM	1.0
CEM II/B-M (V-LL)	305	1'927	0.54	152	0.50	FM	0.3
CEM II/B-M (V-LL)	275	1'922	0.54	165	0.60	-	-
CEM II/B-M (V-LL)	435	1'677	1.00	193	0.45	FM+VMA	2.2 + 1.1
CEM II/A-LL	330	1'930	0.54	148	0.45	FM	0.7
CEM II/A-LL	310	1'931	0.54	155	0.50	FM	0.3
CEM II/A-LL	280	1'923	0.54	168	0.60	-	-
CEM II/A-LL	450	1'923	0.54	168	0.60	-	-

S/K: Sand/Kies-Verhältnis (Masse)

FM: Fließmittel

VMA: Stabilisator

Tabelle 3: Zusammensetzung der für die natürliche Auslagerung verwendeten Betone.

## 2.2 Methoden

Die Druckfestigkeit der Mörtelprismen wurde nach SN EN 196-1:2005 in einem Alter von 2, 28 und 91 Tagen bestimmt.

Die Schnellkarbonatisierung wurde nach SIA 262/1, Anhang I, bei 4% CO<sub>2</sub> ermittelt (Abbildung 2). Nach 56 Tagen wurden die Mörtelprismen in die Karbonatisierungskammern überführt. Zusätzlich wurde der Karbonatisierungswiderstand auch bei einem CO<sub>2</sub>-Gehalt von 1% gemessen. Der CO<sub>2</sub>-Gehalt wurde bei der Umrechnung auf den Karbonatisierungskoeffizienten  $K_N$  entsprechend berücksichtigt (Faktor b). Abgesehen von CO<sub>2</sub>-Gehalt wurde die Prüfung analog zum CO<sub>2</sub>-Gehalt von 4% durchgeführt.

Aus den gemessenen mittleren Karbonatisierungstiefen  $d_{KM}$  nach 0, 7, 28 und 63 und ggf. weiteren Tagen werden mittels linearer Regression die Konstanten  $A$  und  $K_S$  der Gleichung I.1 berechnet.

$$d_{KM} = A + K_S \sqrt{t} \quad (I.1)$$

$d_{KM}$  Mittelwert der Karbonatisierungstiefe (pro Messtermin), [mm]  
 $A$  Konstante, [mm]  
 $K_S$  Karbonatisierungskoeffizient bei 4.0% CO<sub>2</sub>, [mm/Tag<sup>1/2</sup>]  
 $t$  [Tage]

Aus dem Wert für  $K_S$  wird gemäss Gleichung (I.2) der Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  unter natürlichen Bedingungen (Annahme 0.04 Vol. % CO<sub>2</sub>) berechnet.

$$K_N = a \cdot b \cdot c \cdot K_S = 2.6 \cdot K_S \quad (I.2)$$

$K_N$  Karbonatisierungskoeffizient unter natürlichen Bedingungen mit einem CO<sub>2</sub>-Gehalt von 0.04 Vol. % ,[mm/Jahr<sup>1/2</sup>]  
 $a$  Umrechnung von 1 Tag auf 1 Jahr:  $(365/1)^{1/2} = 19.10$   
 $b$  Umrechnung von 4.0 auf 0.04 Vol. % CO<sub>2</sub>  $(0.04/4.0)^{1/2} = 0.10$   
 $c$  Korrekturfaktor für die Schnellkarbonatisierung 1.36

Abbildung 2: Auszug aus der SIA 262/1. Bestimmung der Karbonatisierungskoeffizienten  $K_S$  und  $K_N$  aus den bestimmten Karbonatisierungstiefen.

Die Aussenlagerung für die Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes unter natürlichen Bedingungen erfolgte auf dem Dach eines Gebäudes auf dem Empa-Areal in Dübendorf ("bewittert") und von der Witterung geschützt in einem Unterstand ("unbewittert"). Bei den Mörteln wurde die Karbonatisierungstiefe nach einem Jahr und beim Beton nach einem Jahr und nochmals nach rund 2.5 Jahren bestimmt. Die Bestimmung der Karbonatisierungstiefe erfolgte nach SIA 262/1. Beim Beton wird nur die Karbonatisierungstiefe nach 2.5 Jahren zur Berechnung des Karbonatisierungskoeffizienten  $K_N$  verwendet, weil die Genauigkeit wegen der höheren Karbonatisierungstiefe im Vergleich zu den Werten nach einem Jahr besser ist.

Die klimatischen Daten während der Aussenlagerung der Mörtel und dem letzten Jahr der Auslagerung der Betone werden in der Abbildung 3 gezeigt. Sie wurden in Dübendorf an einer Messstation erfasst, die rund 50 m von der Lokalität entfernt ist, an der die Mörtel- und Betonproben für die natürliche Karbonatisierung gelagert wurden.

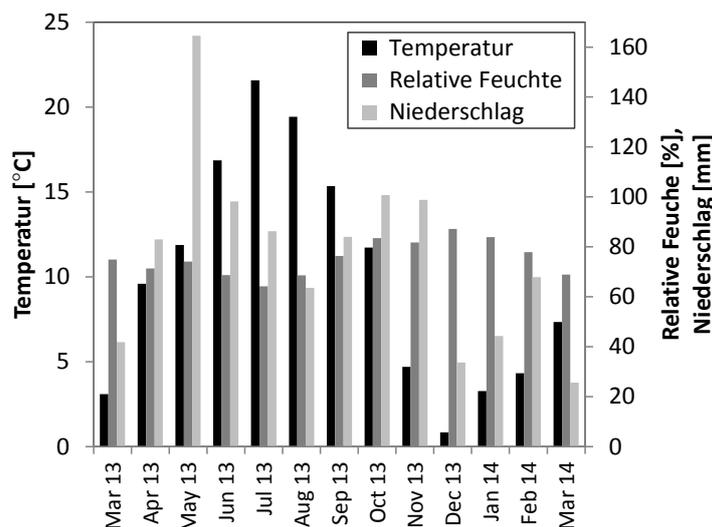


Abbildung 3: Monatliche Durchschnittswerte von Temperatur, relativer Feuchte und Niederschlag während der Auslagerung der Mörtelproben zur Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes unter natürlichen Bedingungen.

Das Saugverhalten und die Porenkennwerte der verschiedenen Mörtel wurde mittels Prüfung der Wasserleitfähigkeit  $q_w$  nach der Norm SIA 262/1, Anhang A, charakterisiert. Dabei wird der Wassergehalt der Mörtelprismen in verschiedenen Trocknungszuständen ermittelt. Aus dem Wassergehalt nach zweitägiger Trocknung bei 50° C ( $U_B$ ), dem Gesamtwassergehalt nach Wasserlagerung ( $U_E$ ) und der Steighöhe des

Wassers ( $h_{24}$ ) respektive der Wasseraufnahme der Bohrkern nach 24 Stunden ( $M_{24}$ ) wird die Wasserleitfähigkeit  $q_w$  berechnet.

Die Hg-Druckporosimetrie (MIP) wurde bei den Mörteln 1, 5, 7, 9 und 10 nach einer Lagerung der Mörtelprismen von 35 Tagen bei 4%  $CO_2$  bestimmt. Es wurde jeweils eine Probe aus dem karbonatisierten und dem nicht karbonatisierten Bereich entnommen. MIP wurde mit einem pascal 140/440 (Themo Fisher Scientific Inc.) gemessen. Dabei wurden zwei Intrusionen durchgeführt [Kaufmann et al., 2009]. Die Daten wurden mit der Washburn-Gleichung analysiert [Washburn, 1921]. Pro Probe wurden jeweils 2.5-3.0 g Mörtel für eine Messung verwendet. Vor der Messung wurden die Proben eine Woche in Isopropanol eingelegt und danach während einer Woche bei 50°C getrocknet.

Die Bestimmung des  $O_2$ -Diffusionskoeffizienten erfolgte an Bohrkernen ( $\varnothing$  100 mm, H = 30 mm) aus dem 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 Elektronenmikroskop (ESEM-FEG XL30) wurde eine Scheibe abgespaltener Mörtel aus der Karbonatisierungsprüfung verwendet. Die Proben wurden während 5 Tagen bei 50°C im Ofen getrocknet, mit Epoxidharz druckimprägniert und anschliessend poliert. Die Proben wurden bei einem Druck von  $2.0-6.0 \times 10^{-6}$  Torr, einer Beschleunigungsspannung von 10 kV und einem Strahlstrom von 190-230  $\mu A$  untersucht. Für die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung wurde energie-dispersive Röntgenspektroskopie (EDX) mit einem EDAX 194 UTW Detektor, einem Philips Digital Controller und Genesis Spectrum Software (Version 4.6.1) Mit Korrekturen für Ordnungszahl, Adsorption und Fluoreszenz (ZAF) verwendet.

### 3. Resultate

#### 3.1 Mörtel

##### 3.1.1 Festigkeiten

Die Druckfestigkeit der Mörtel aus CEM I steigt bei allen drei Prüfaltern mit abnehmendem w/z an (Abbildung 4).

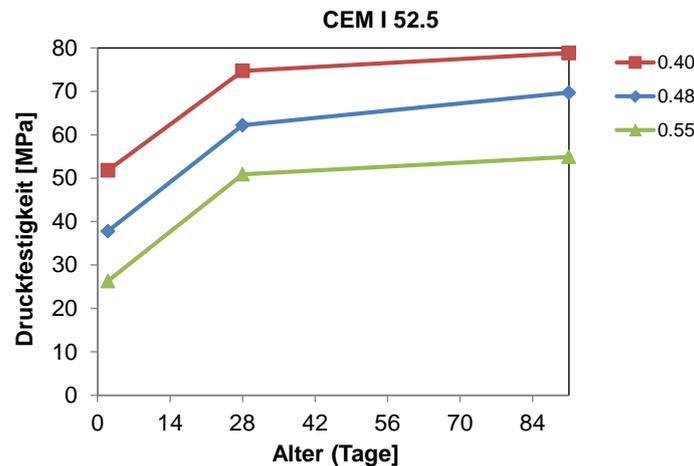


Abbildung 4: Druckfestigkeit als Funktion des Alter von Mörtel aus CEM I 52.5 mit drei unterschiedlichen w/z-Werten.

Ausser im Alter von 2 Tagen weisen beide Mörtel mit Mikrosilika-Zugabe eine höhere Druckfestigkeit auf als der Mörtel aus reinem CEM I (Abbildung 5). Durch die Zugabe von Kalksteinmehl und Portlandit wird die Druckfestigkeit in allen Altern reduziert. Während die Druckfestigkeit des Mörtels aus CEM III/B nach 2 Tagen sehr deutlich und nach 28 Tagen immer noch deutlich unter dem Wert des Mörtels aus CEM I liegt, erreicht er nach 91 Tagen einen praktisch identischen Wert.

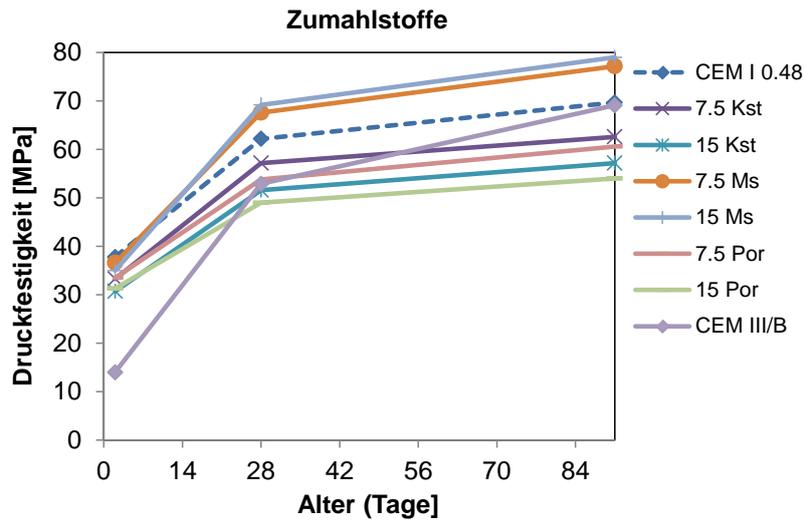


Abbildung 5: Druckfestigkeit als Funktion des Alters von Mörtel aus CEM I 52.5 (w/z-Wert = 0.48) mit unterschiedlichen Zumahlstoffen in Anteilen von 7.5 und 15 Masse-% (Kst = Kalksteinmehl, Ms = Mikrosilika, Por = Portlandit) sowie einem Mörtel aus CEM III/B.

### 3.1.2 Wasserleitfähigkeit

Bei den Mörteln aus CEM I nimmt die Wasserleitfähigkeit mit sinkendem w/z ab (Tabelle 4). Die Verwendung von Mikrosilika und CEM III/B führt zu einer tieferen Wasserleitfähigkeit als beim Mörtel mit entsprechendem w/b aus CEM I. Durch den Einsatz von Kalksteinmehl wird die Wasserleitfähigkeit leicht erhöht, beim Portlandit leicht verringert. Die Veränderungen bei der Kapillarporosität folgen grob den Veränderungen der Wasserleitfähigkeit.

	Wasserleitfähigkeit			
	[g/m <sup>2</sup> h]	U <sub>E</sub> [Vol-%]	U <sub>B</sub> [Vol-%]	U <sub>E</sub> -U <sub>B</sub> [Vol-%]
Mörtel 1 (0.48)	17	17	8.4	8.6
Mörtel 2 (0.40)	11	15.5	8.6	6.9
Mörtel 3 (0.55)	21	18.5	7.8	10.7
Mörtel 4 (7.5 Kst)	19	17.6	9.1	8.5
Mörtel 5 (15 Kst)	19	17.8	8.6	9.2
Mörtel 6 (7.5 Ms)	10	17.5	11.2	6.3
Mörtel 7 (15 Ms)	8	17.2	11.2	6
Mörtel 8 (7.5 Por)	14	17.6	8.8	8.8
Mörtel 9 (15 Por)	16	18.1	8.6	9.5
Mörtel 10 (CEM III/B)	9	16.7	11.9	4.8

Tabelle 4: Wasserleitfähigkeit und Porenkennwerte der verschiedenen Mörtel.

### 3.1.3 O<sub>2</sub>-Diffusion

Der O<sub>2</sub>-Diffusionskoeffizient nimmt bei den Mörteln aus CEM I mit sinkendem w/b ab (Tabelle 5). Die Zugaben von Kalksteinmehl und Portlandit erhöhen die Werte, die Zugabe von Mikrosilika verringert sie. Der tiefste O<sub>2</sub>-Diffusionskoeffizient wird durch den Mörtel aus CEM III/B erreicht.

	O <sub>2</sub> -Diffusionskoeffizient [10 <sup>-8</sup> m <sup>2</sup> /s]
--	---

Mörtel 1 (0.48)	1.92
Mörtel 2 (0.40)	1.24
Mörtel 3 (0.55)	2.02
Mörtel 4 (7.5 Kst)	2.39
Mörtel 5 (15 Kst)	3.00
Mörtel 6 (7.5 Ms)	0.72
Mörtel 7 (15 Ms)	0.50
Mörtel 8 (7.5 Por)	2.08
Mörtel 9 (15 Por)	2.45
Mörtel 10 (CEM III/B)	0.19

Tabelle 5: O<sub>2</sub>-Diffusionskoeffizient der verschiedenen Mörtel.

### 3.1.4 Karbonatisierungswiderstand

#### 3.1.4.1 Schnellkarbonatisierung

Die Karbonatisierung der Mörtel schreitet bei 4% CO<sub>2</sub> rund doppelt so schnell voran wie bei 1% CO<sub>2</sub> (Abbildung 6). Die bei 1 und 4% CO<sub>2</sub> bestimmten Karbonatisierungskoeffizienten weisen einen linearen Zusammenhang auf ( $R^2 = 0.96$ ). Bei der Berechnung des Karbonatisierungskoeffizienten  $K_N$  unter natürlichen Bedingungen wird der während der Schnellkarbonatisierung bestimmte Karbonatisierungskoeffizient  $K_S$  unter Verwendung verschiedener Faktoren umgerechnet, darunter auch einem Faktor für den CO<sub>2</sub>-Gehalt. Wie in Abbildung 7 zu sehen ist, ist diese Umrechnung mit einem gewissen Fehler behaftet: die Werte liegen nicht bei einem 1:1-Verhältnis.

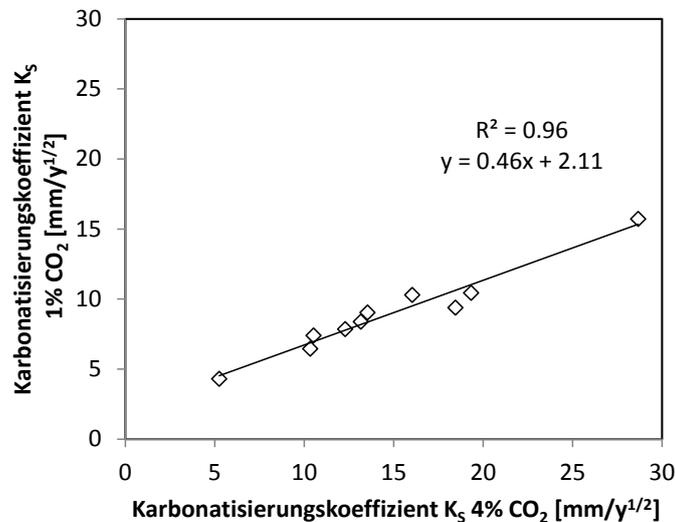


Abbildung 6: Karbonatisierungskoeffizient  $K_S$  der Mörtel bei einem CO<sub>2</sub>-Gehalt von 4 respektive 1 %.

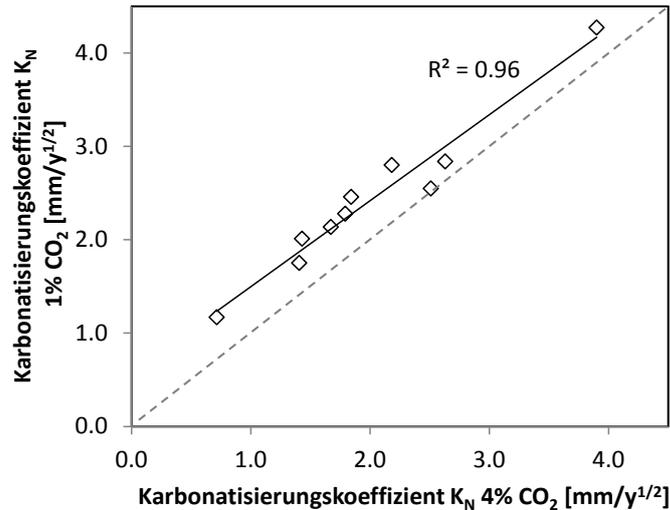


Abbildung 7: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der Mörtel bei einem CO<sub>2</sub>-Gehalt von 1 respektive 4 %.

### 3.1.4.2 Natürliche Karbonatisierung

Die in der unbewitterten und bewitterten Exposition bestimmten Karbonatisierungskoeffizienten führen zu einer unterschiedlichen Bewertung des Karbonatisierungswiderstandes der verschiedenen Mörtel (Abbildung 8). Während der Mörtel aus CEM III/B noch knapp den höchsten Karbonatisierungskoeffizienten aufweist, liegt er in der bewitterten Exposition im "Mittelfeld". Auch die beiden Mörtel mit Mikrosilika weisen im Vergleich zu den anderen Mörteln eine überproportional starke Reduktion des Karbonatisierungskoeffizienten in der bewitterten Exposition auf, wenn dieser Trend auch weniger stark ausgeprägt ist als beim Mörtel aus CEM III/B.

In der Klassierung des Karbonatisierungswiderstandes der verschiedenen Mörtel sowohl in der unbewitterten als auch in der bewitterten Exposition sind Unterschiede in der Reihenfolge im Vergleich zur Schnellkarbonatisierung vorhanden. Diese Unterschiede werden im Kapitel 4 diskutiert.

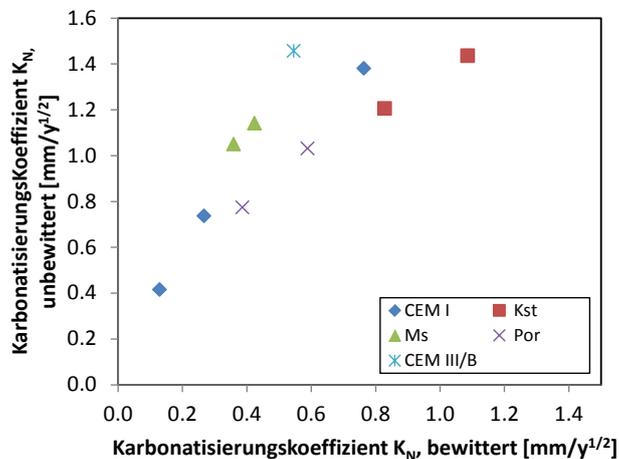


Abbildung 8: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der Mörtel in bewitterter und unbewitterter Exposition.

### 3.1.4.3 Einfluss des w/b-Wertes und der Zumahlstoffe bei der Schnellkarbonatisierung

Bei den Mörteln aus CEM I zeigt sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen w/b und Karbonatisierungswiderstand (Abbildung 9). Dass dieser Zusammenhang aber nicht gültig ist, wenn verschiedenen Zumahlstoffe verwendet werden, ist augenfällig. Die am stärksten ausgeprägte Erhöhung des Karbonatisierungskoeffizienten ist bei der Verwendung von CEM III/B zu verzeichnen.

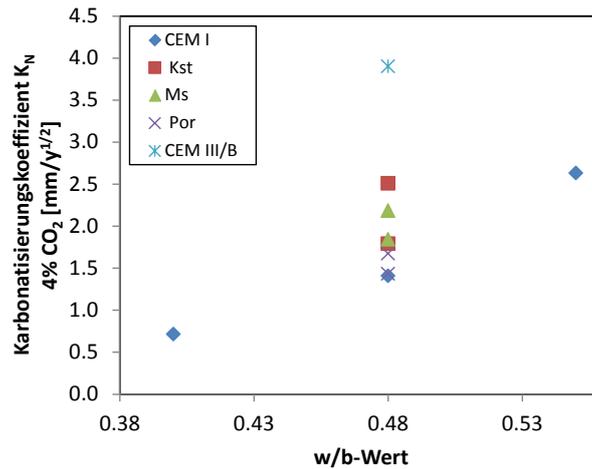


Abbildung 9: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der Mörtel als Funktion des w/b-Wertes.

### 3.1.5 Hg-Druckporosimetrie

Um die verschiedenen Mörtel miteinander zu vergleichen werden die Daten aus der 2. Intrusion verwendet. Im Gegensatz zur 1. Intrusion spielen dann die über "bottle necks" gefüllten grösseren Poren keine grosse Rolle mehr [Kaufmann et al., 2009]. So charakterisiert die 2. Intrusion das für den Transport massgebende Porennetzwerk besser als die 1. Intrusion. Es wurden nur die Mörtel mit dem höheren Anteil an Zusatzstoffen von 15 Masse-% analysiert.

Die Verwendung von Kalksteinmehl und Portlandit führt sowohl zu leicht grösseren Porenradien als auch einem erhöhten Porenvolumen verglichen zum Mörtel aus CEM I (Abbildung 10). Dagegen weisen die Mörtel mit Mikrosilika und Schlacke deutlich kleinere Porenradien wie auch ein kleineres Gesamtporenvolumen auf. Die Karbonatisierung führt bei allen Mörtel zu einer Erhöhung der Porenradien (Abbildung 11). Bei den Mörteln aus CEM I sowie den Mörteln mit Kalksteinmehl und Portlandit kommt es zu einer deutlichen Verringerung der Gesamtporosität. Die Gesamtporosität wird beim Mörtel aus Mikrosilika nur unwesentlich reduziert und beim Mörtel aus CEM III/B sogar deutlich erhöht.

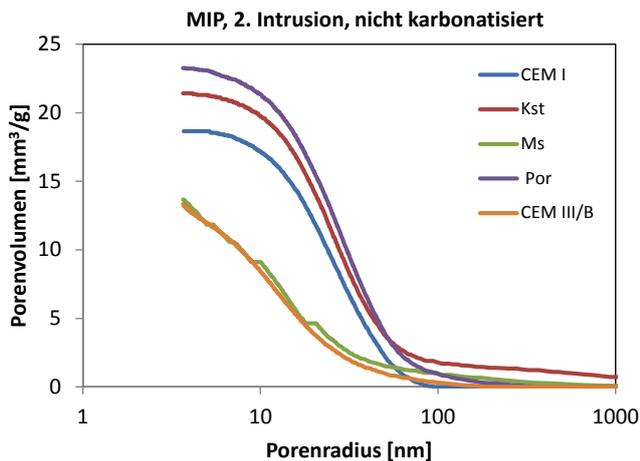


Abbildung 10: Porengrößenverteilung (Summationskurve) der Mörtel ( $w/b = 0.48$ ) im nicht karbonatisierten Bereich nach einer Exposition von 35 Tagen in der Schnellkarbonatisierungskammer bei 4%  $CO_2$ .

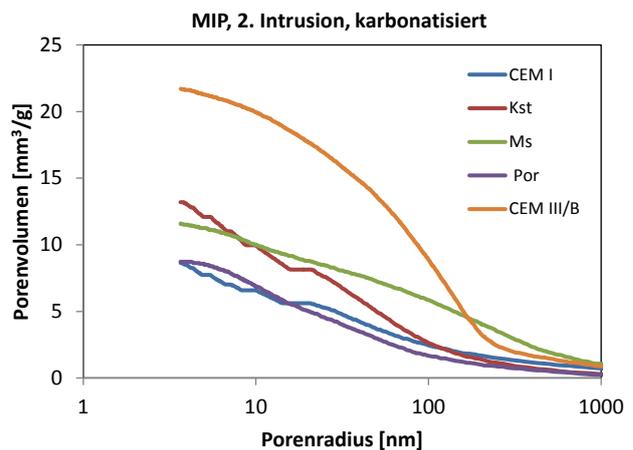


Abbildung 11: Porengrößenverteilung (Summationskurve) der Mörtel ( $w/b = 0.48$ ) im im karbonatisierten Bereich nach einer Exposition von 35 Tagen in der Schnellkarbonatisierungskammer bei 4%  $CO_2$ .

### 3.1.6 Elektronenmikroskopie

Alle Mörtel weisen im nicht-karbonatisierten und im karbonatisierten Bereich eine unterschiedliche Mikrostruktur auf (Abbildungen 12-17). Die Mörtel aus CEM I, CEM I und Kalksteinmehl sowie CEM I und Portlandit weisen im karbonatisierten Bereich eine Verdichtung der Struktur auf (Mörtel aus CEM I). Beim Mörtel aus CEM I mit Mikrosilika weisen einige Bereiche eine geringere Dichte und andere eine höhere Dichte auf als im nicht-karbonatisierten Mörtel. Beim Mörtel aus CEM III/B entsteht im karbonatisierten Bereich deutlich mehr Porosität. Diese beschriebenen Änderungen sind auch in den Daten der Hg-Druckporosimetrie sichtbar (s. Kap. 3.1.5).

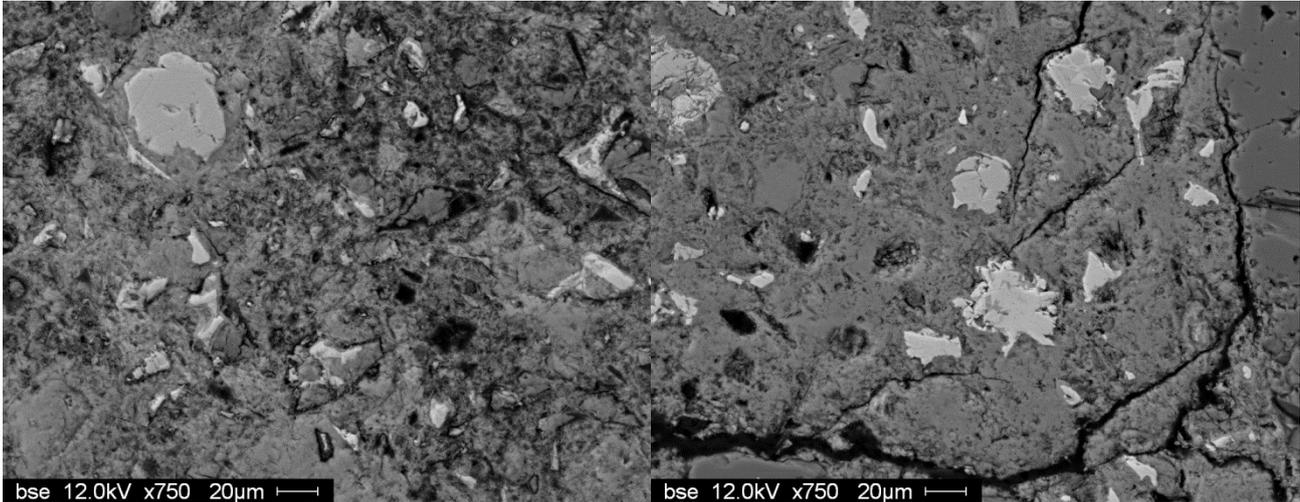


Abbildung 12: Mörtel aus CEM I im nicht-karbonatisierten Bereich.

Abbildung 13: Mörtel aus CEM I im karbonatisierten Bereich.

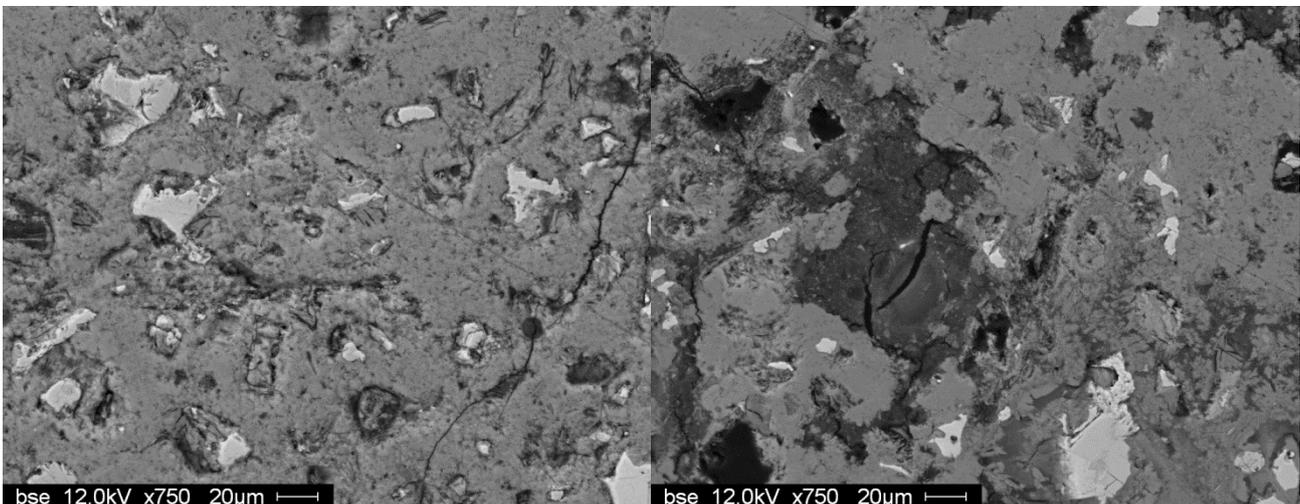


Abbildung 14: Mörtel aus CEM I mit 15 Masse-% Mikrosilika im nicht-karbonatisierten Bereich.

Abbildung 15: Mörtel aus CEM I mit 15 Masse-% Mikrosilika im karbonatisierten Bereich.

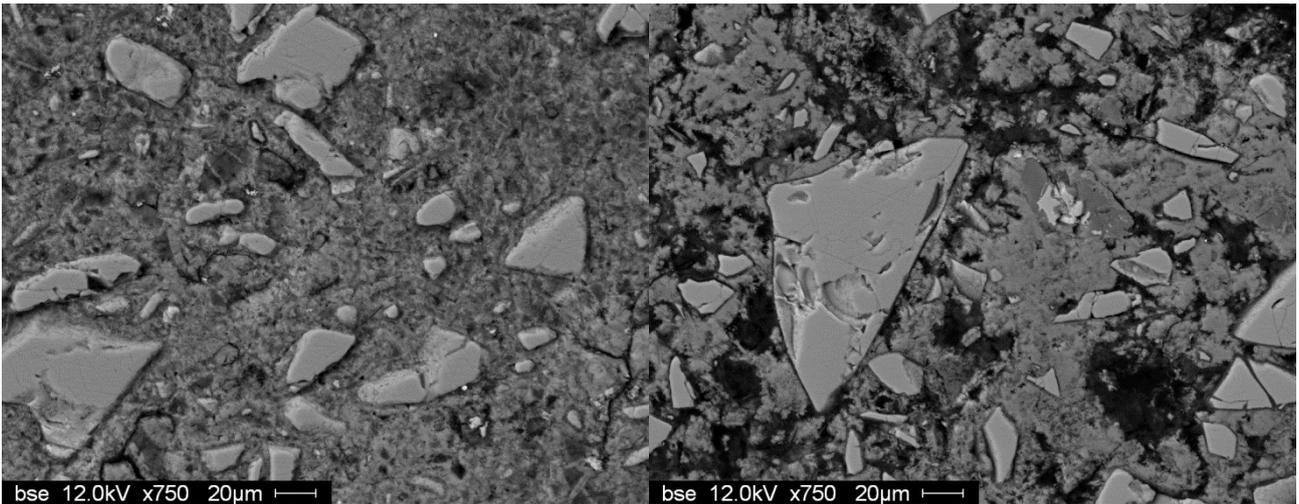


Abbildung 16: Mörtel aus CEM III/B im nicht-karbonatisierten Bereich.

Abbildung 17: Mörtel aus CEM III/B im nicht-karbonatisierten Bereich.

Neben der Änderung in der Porosität ist in den EDX-Punktanalysen auch eine Änderung in der chemischen Zusammensetzung der Hydratphasen ersichtlich. Im Mörtel aus CEM I weist das C-S-H als Haupthydratphase ein mittleres molares Si/Ca-Verhältnis von etwa 0.58 auf. Durch die Karbonatisierung verschieben sich die Punkte sowohl Richtung eines höheren als auch eines tieferen Si/Ca-Verhältnisses. Dies wird durch die Bildung von Calcit und einem siliziumreichen Gel verursacht. Diese Tendenz ist bei allen Mörteln zu beobachten, auch wenn das ursprüngliche Si/Ca-Verhältnis des C-S-H wegen der Verwendung von Zusatzstoffen leicht anders ist. Am Beispiel des Mörtels aus CEM I mit 15 Masse-% Mikrosilika lässt sich die Veränderung der Hydratphasen gut zeigen. Wird das molare Al/Ca-Verhältnis gegen das molare Si/Ca-Verhältnis aufgetragen, wird diese Umwandlung des C-S-H zu Calcit und beim siliziumreichen Gel gut durch den Trend der Punktanalysen in die entsprechende Richtung angezeigt (Abbildung 18). Zudem ist durch den Trend Richtung eines höherem Al/Ca-Verhältnisses auch sichtbar, dass die AFm- (Monokarbonat und Monosulfat) und AFt-Phasen (Ettringit) destabilisiert werden (Abbildung 19). Im Diagramm S/Ca zu Al/Ca zeigt sich durch den starken Anstieg des S/Ca-Verhältnisses einiger Punkte, dass die Destabilisierung der AFm- und AFt-Phasen in der Bildung von Gips resultiert. Diese Trends stimmen auch mit der thermodynamischen Modellierung überein, die durch die Karbonatisierung eine Bildung von Calcit, Silica-Gel und Gips voraussagt (pers. Komm. B. Lothenbach).

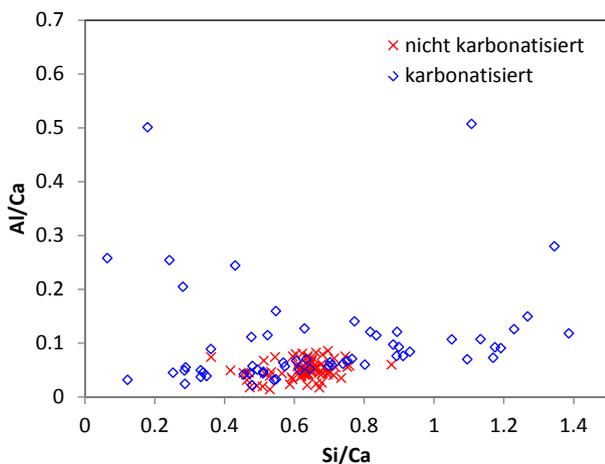


Abbildung 18: Mörtel aus CEM I mit 15 Masse-% Mikrosilika. Molares Al/Ca-Verhältnis als Funktion des molaren Si/Ca-Verhältnisses.

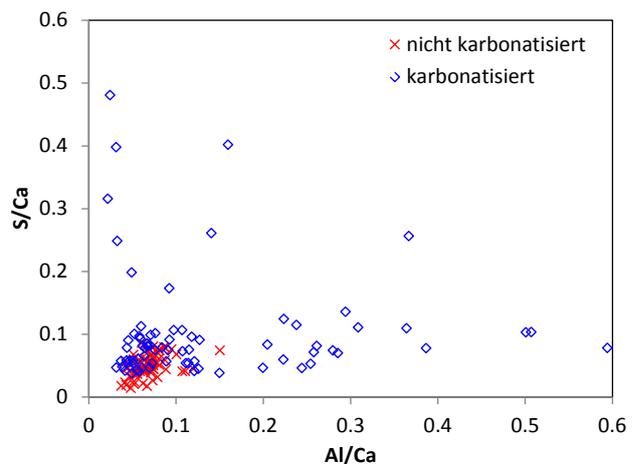


Abbildung 19: Mörtel aus CEM I mit 15 Masse-% Mikrosilika. Molares S/Ca-Verhältnis als Funktion des molaren Al/Ca-Verhältnisses.

## 3.2 Beton

### 3.2.1 Festigkeiten

Die Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen der verschiedenen Betone nimmt mit steigendem w/z-Wert ab (Abbildung 20). Jedoch zeigt sich ein zementspezifisches Verhalten. Die Betone hergestellt mit CEM II/B-M weisen die tiefsten Werte und die Betone hergestellt mit CEM I die höchsten Werte auf.

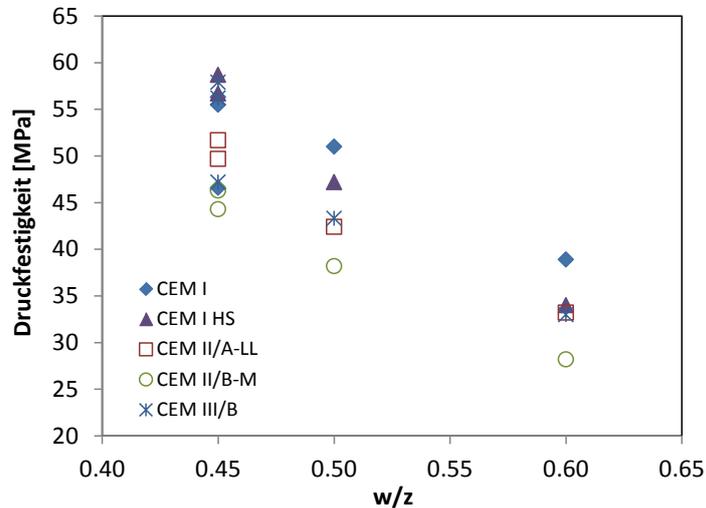


Abbildung 20: Druckfestigkeit der Betone als Funktion des w/z-Wertes.

### 3.2.2 O<sub>2</sub>-Diffusion

Der O<sub>2</sub>-Diffusionskoeffizient der verschiedenen Betone nimmt mit steigendem w/z-Wert zu (Abbildung 21). Jedoch zeigt sich ein zementspezifisches Verhalten. Die Betone hergestellt mit CEM III/B weisen die tiefsten Werte und die Betone hergestellt mit CEM I HS die höchsten Werte auf.

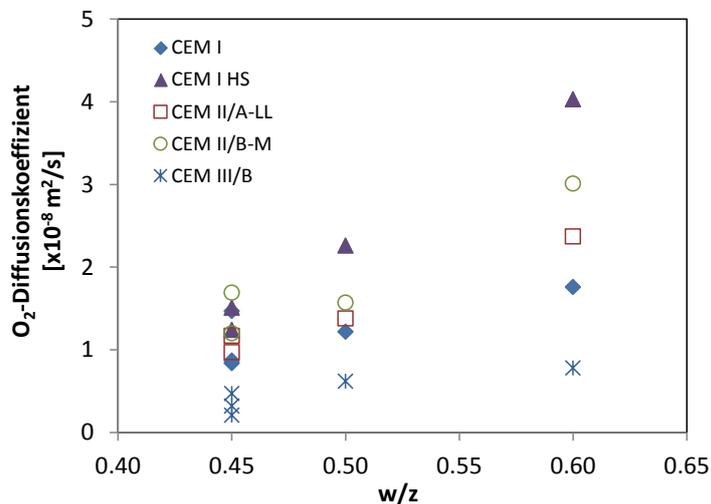


Abbildung 21: O<sub>2</sub>-Diffusionskoeffizient der Betone als Funktion des w/z-Wertes.

### 3.2.3 Karbonatisierungswiderstand

Der Karbonatisierungswiderstand in bewitterter und unbewitterter Exposition ist deutlich unterschiedlich. In der unbewitterten Exposition ist der Karbonatisierungskoeffizient um einen Faktor von etwa 2 höher als in der bewitterten Exposition (Abbildung 22 und 23). Dies ist eine Folge der Betonfeuchte. Die höchste Karbonatisierungsgeschwindigkeit ist bei einer relativen Feuchte von etwa 60 % zu beobachten. Bei höheren Feuchten nimmt sie ab, weil Betonporen durch kondensiertes Wasser blockiert werden und den Zugang von CO<sub>2</sub> erschweren.

Werden die Schal- und Schnittflächen der Prüfkörper miteinander verglichen, zeigt sich, dass der Karbonatisierungskoeffizient bei den Schnittflächen einen Faktor von etwa 1.5 tiefer ist als bei den Schalflächen. Dies kann mit der besseren Hydratation des Zementes im Bereich der Schnittflächen erklärt werden. Zudem ist die Wahrscheinlichkeit von Entmischungen und lokalen w/z-Veränderungen an den Schalflächen grösser. Aus diesem Grund werden in der Diskussion der Resultate jeweils die an den Schnittflächen ermittelten Karbonatisierungskoeffizienten verwendet.

Der Karbonatisierungswiderstand des Betons weist systematische Unterschiede in Abhängigkeit der verwendeten Zementart auf. Es ist folgende Reihenfolge in Richtung eines abnehmenden Karbonatisierungswiderstandes zu beobachten: CEM I, CEM I HS, gefolgt von der Gruppe CEM II/A-LL, CEM II/B-M und CEM III/B. Unter den letzten drei Zementarten sind keine systematischen Unterschiede mehr vorhanden.

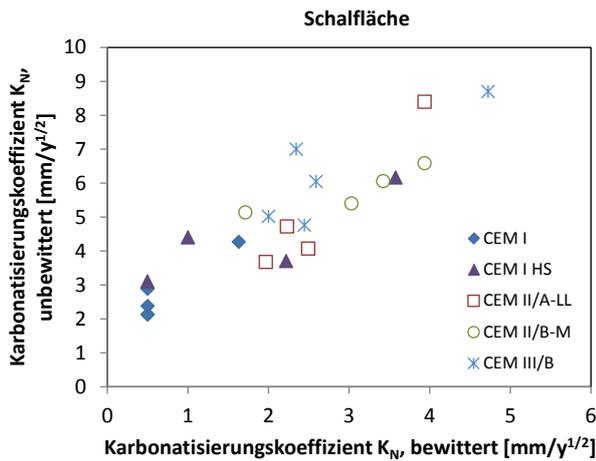


Abbildung 22: Vergleich der Karbonatisierungskoeffizienten  $K_N$  der Betone von Schalflächen, bewittert und unbewittert.

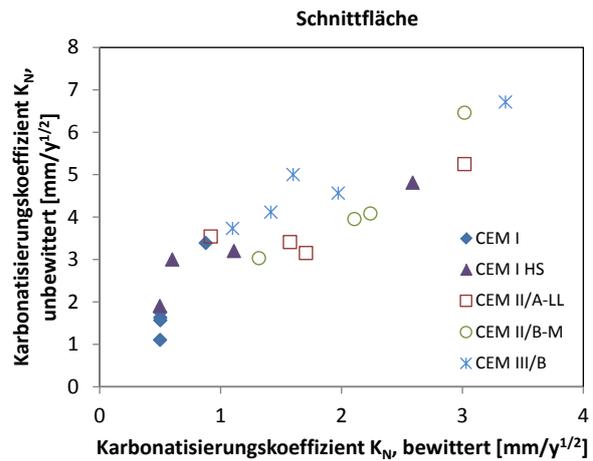


Abbildung 23: Vergleich der Karbonatisierungskoeffizienten  $K_N$  der Betone von Schnittflächen, bewittert und unbewittert.

## 4. Diskussion

### 4.1 Schnellkarbonatisierung von Mörtel

Wie sich auch schon beim Vergleich mit dem w/b angedeutet hat (Abbildung 9), ist kein Zusammenhang zwischen Karbonatisierungswiderstand und Druckfestigkeit vorhanden (Abbildung 24). Entsprechend macht auch das Vorschreiben einer Festigkeitsklasse beim Karbonatisierungswiderstand keinen Sinn.

Innerhalb derselben Zementart kann in einem Betonwerk der w/b als Steuergrösse für den Karbonatisierungswiderstand verwendet werden. Wird der w/b nicht geändert kann die Zementart als Steuergrösse eingesetzt werden. Hier muss betont werden, dass bei der Steuerung des Karbonatisierungswiderstandes in der Betonherstellung neben der Wirtschaftlichkeit auch die anderen Betoneigenschaften berücksichtigt werden müssen. Deren Steuergrössen sind nicht deckungsgleich mit denen des Karbonatisierungswiderstandes.

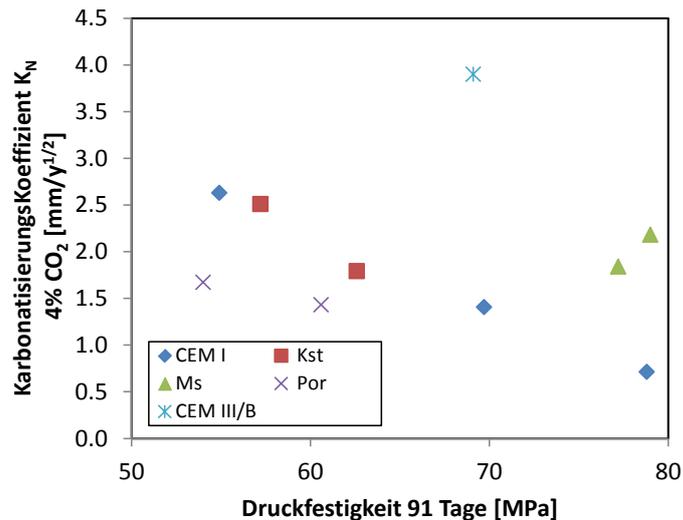


Abbildung 24: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der Mörtel als Funktion der Druckfestigkeit.

Die Kapillarporosität und der  $O_2$ -Diffusionskoeffizient sind Größen, die den Transport durch das Porensystem zementgebundener Baustoffe charakterisieren. Bei den Mörteln aus CEM I ergibt sich hier auch der erwartete Zusammenhang mit dem Karbonatisierungswiderstand (Abbildungen 25 und 26). Wird die Mörtelzusammensetzung aber über Zusatzstoffe verändert, wird offensichtlich, dass der Karbonatisierungswiderstand weder mit der Porosität noch mit der Diffusivität zusammenhängt.

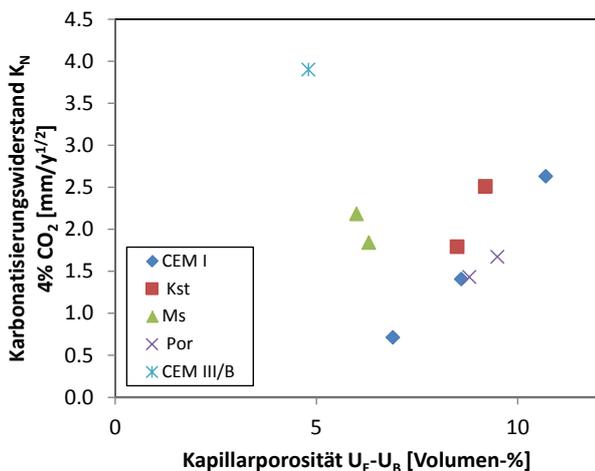


Abbildung 25: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der Mörtel als Funktion der Kapillarporosität.

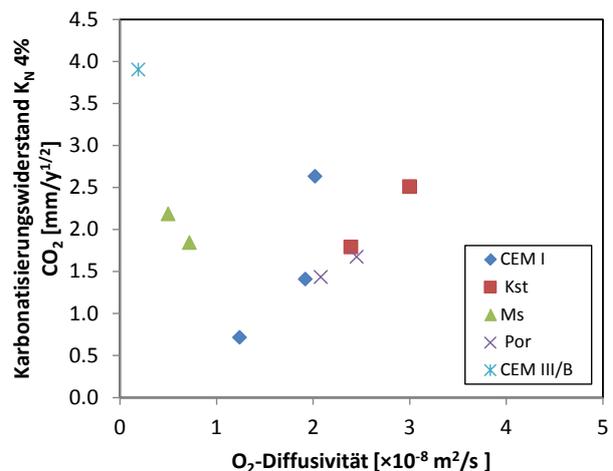


Abbildung 26: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der Mörtel als Funktion des  $O_2$ -Diffusionskoeffizienten.

Das Fehlen eines Zusammenhangs zwischen Karbonatisierungskoeffizient und  $O_2$ -Diffusivität wie auch Druckfestigkeit zeigt, dass chemische Parameter den in der Schnellprüfung ermittelten Karbonatisierungswiderstand dominieren. Bei der Karbonatisierung werden die vorliegenden Hydratphasen in Calcit und Silizium-Aluminium-Gele umgewandelt. Je höher der Anteil an reaktivem  $CaO$  ( $CaO_{\text{reaktiv}}$ ) pro Volumen Zementstein ist, umso mehr  $CO_2$  kann aufgenommen werden und umso langsamer dringt die Karbonatisierungsfront ein.

Der  $CaO_{\text{reaktiv}}$  pro Volumen Zementstein kann basierend auf der Zementchemie (Röntgenfluoreszenz-Daten) und dem w/b berechnet werden. Das  $CaO$ , das im Kalksteinmehl vorhanden ist, kann also nicht dazugerechnet werden. Folglich kann die  $CO_2$ -Pufferkapazität pro Volumen Zementstein mit dem Verhältnis von Wasser und  $CaO_{\text{reaktiv}}$  ( $w/CaO_{\text{reaktiv}}$ ) ausgedrückt werden. Allerdings gilt es zu beachten, dass nur das  $CaO$  mit  $CO_2$  zu Calcit reagieren kann, das tatsächlich in den Hydratphasen vorhanden ist. Liegt es in unhydratisierten Ausgangsstoffen vor, sei das Klinker oder zum Beispiel auch unhydratisierte Hochofenschlacke, trägt es nichts zum aktiven  $CO_2$ -Puffer bei. Der Anteil an reagiertem  $CaO$  kann allerdings

nur grob abgeschätzt werden, weil der genaue Hydratationsgrad  $\alpha$  der einzelnen Komponenten nicht bekannt ist. Diese Abschätzung ist entsprechend mit einer relativ grossen Unsicherheit behaftet. Trotz dieser Einschränkungen, wird versucht eine Abschätzung des Hydratationsgrades  $\alpha$  des Klinkers basierend auf Literaturdaten [Parrot & Killoh, 1984] unter Einbezug von w/z-Wert und Alter vorzunehmen (Tabelle 6). Bei der Hochofenschlacke wird von einem Hydratationsgrad  $\alpha$ , der um den Faktor 2.0 tiefer ist als der des Klinkers, ausgegangen [Lumley et al., 1996 / Feng et al., 2004]:

- $\alpha_{\text{Klinker}} = 0.75$  bei  $w/b = 0.40$
- $\alpha_{\text{Klinker}} = 0.82$  bei  $w/b = 0.48$
- $\alpha_{\text{Klinker}} = 0.86$  bei  $w/b = 0.55$
- $\alpha_{\text{Hochofenschlacke}} = 0.41$

Mörtel	reaktiver CaO-Gehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	reagierter CaO-Gehalt [kg/m <sup>3</sup> ]
1	316	246
2	351	250
3	287	235
4	293	228
5	272	212
6	292	228
7	271	211
8	317	253
9	319	260
10	238	144

Tabelle 6: Werte für die berechnete CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität der verschiedenen Mörtel. Die Berechnungen wurden aufgrund der chemischen Zusammensetzung der Zemente und Zusatzstoffe sowie einem angenommenen Hydratationsgrad  $\alpha$ , der auf Parrot & Killoh [1984] basiert, ausgeführt.

Werden der  $w/\text{CaO}_{\text{reaktiv}}$  und der  $w/\text{CaO}_{\text{reagiert}}$  gegen den Karbonatisierungskoeffizienten aufgetragen, beträgt der Korrelationskoeffizient bei den untersuchten Mörteln 0.91 und 0.85 (Abbildungen 27 und 28). Die CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität pro Volumen Zementstein erweist sich also als der massgebende Faktor, um den Karbonatisierungswiderstand von Mörtel abzuschätzen.

Die ausgezeichnete Korrelation des Karbonatisierungswiderstandes mit dem  $w/\text{CaO}_{\text{reaktiv}}$  zeigt auch, dass es für die CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität irrelevant ist, ob das CaO in Portlandit oder C-S-H vorliegt. Die Mörtel mit Mikrosilika weisen wegen der Reaktion zwischen den Mikrosilika-Partikeln und dem Portlandit einen hohen Anteil an C-S-H und einen tiefen an Portlandit auf. Bei den Mörteln mit Portlandit-Zugabe ist es genau umgekehrt. Trotzdem weisen sie verglichen mit den Mörtel aus CEM I und den Mörtel mit Kalksteinmehl-Zugabe keine Abweichung in der Beziehung zwischen Karbonatisierungswiderstand und  $w/\text{CaO}_{\text{reaktiv}}$  auf.

Die oben erläuterten Zusammenhänge treffen auf die Schnellkarbonatisierung mit 1 und 4 % CO<sub>2</sub> bei einer relativen Feuchte von 57 % zu. Der natürliche CO<sub>2</sub>-Gehalt sowie die in einem Betonbauwerk vorhandene Feuchte differieren von den Bedingungen bei der Schnellkarbonatisierung. Deshalb ist es wichtig, zu überprüfen, ob der relative Karbonatisierungswiderstand der verschiedenen Mörtel bei der natürlichen Karbonatisierung identisch zu demjenigen der Schnellkarbonatisierung ist (s. Kap. 4.2).

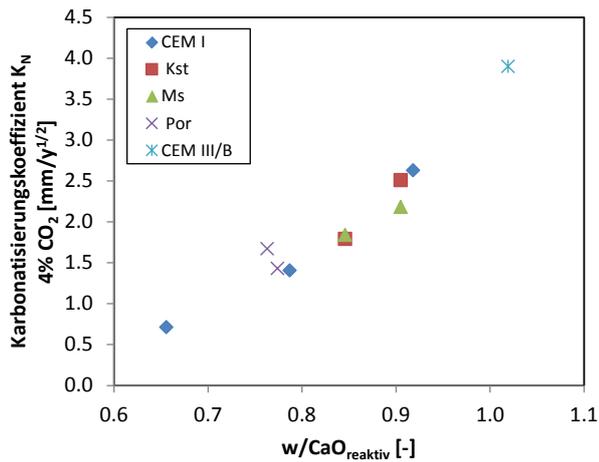


Abbildung 27: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der Mörtel als Funktion des  $w/\text{CaO}_{\text{reaktiv}}$  ( $R^2 = 0.91$ ).

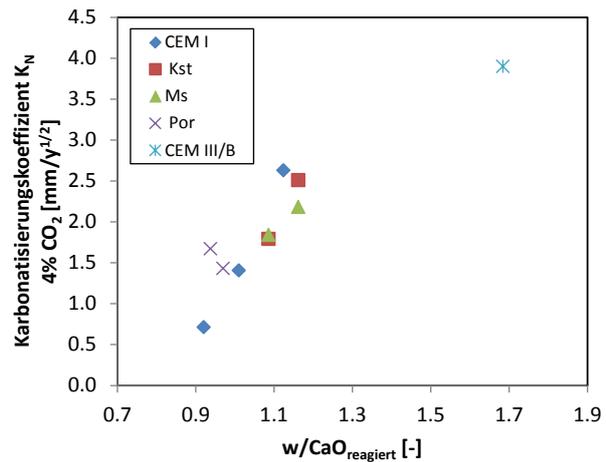


Abbildung 28: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der Mörtel als Funktion des  $w/\text{CaO}_{\text{reagiert}}$  ( $R^2 = 0.85$ ).

## 4.2 Natürliche Karbonatisierung

### 4.2.1 Mörtel

Zwischen dem Karbonatisierungswiderstand in der Schnellkarbonatisierungskammer bei 4%  $\text{CO}_2$  und demjenigen in der unbewitterten Exposition besteht ein Zusammenhang (Abbildung 31). Allerdings ändert sich die Rangierung der Mörtel hinsichtlich des Karbonatisierungswiderstandes. Der Karbonatisierungskoeffizient der Mörtel mit Mikrosilika ist in der unbewitterten Exposition tiefer als derjenige des Mörtels mit der tieferen Kalksteinmehldosierung. Bei der Schnellkarbonatisierung war die Reihenfolge noch umgekehrt. Allerdings betrifft die signifikanteste Änderung den Mörtel aus CEM III/B. In der Schnellkarbonatisierung war sein Karbonatisierungskoeffizient deutlich höher als die Werte der anderen Mörtel. Nun ist sein Karbonatisierungskoeffizient in der unbewitterten Exposition vergleichbar mit den Werten des Mörtels aus CEM I mit erhöhtem  $w/z$  und des Mörtels mit der höheren Kalksteinmahldosierung. Der Grund dafür kann theoretisch die tiefere  $\text{CO}_2$ -Konzentration oder die höhere relative Feuchte mit einem jährlichen Mittel von 76% sein (RF in Karbonatisierungskammer: 57%). Die Betrachtung der Daten ermittelt in der bewitterten Exposition zeigt, dass die relative Feuchte der Grund dafür ist. Wegen der Benetzung durch Regen und Schnee ist in den Mörteln der bewitterten Exposition ein deutlich höherer Feuchtigkeitsgehalt zu erwarten als in den Mörteln der unbewitterten Exposition. Entsprechend ist der Karbonatisierungskoeffizient in der bewitterten Exposition um einen Faktor von etwa 1.5 tiefer als in der unbewitterten (Abbildung 29). Von grösserer Wichtigkeit ist allerdings, dass sich die Reihenfolge der Mörtel hinsichtlich Karbonatisierungswiderstand weiter verändert. Die Mörtel mit Mikrosilika erreichen nun fast das Niveau des Mörtels aus CEM I mit identischem  $w/b$ . Wiederum verzeichnet der Mörtel aus CEM III/B die stärkste Veränderung. Sein Karbonatisierungskoeffizient liegt nun unter demjenigen der Mörtel mit Kalksteinmehl, des Mörtels aus CEM I mit erhöhtem  $w/z$  und des Mörtels mit der höheren Portlanditdosierung. Die bindemittelspezifische Reduktion des Karbonatisierungskoeffizienten durch den erhöhten Feuchtigkeitsgehalt der Mörtel führt zu einer Verschlechterung der Korrelation zwischen Schnellkarbonatisierung und Karbonatisierung in unbewitterter respektive bewitterter Exposition (Abbildungen 29 und 30). Die Korrelation zwischen dem  $w/\text{CaO}_{\text{reaktiv}}$  und der natürlichen Karbonatisierung verschlechtert sich ebenfalls von der unbewitterten zur bewitterten Exposition (Abbildungen 31 und 32).

Die möglichen Gründe des zementspezifischen Verhaltens auf Änderungen des Feuchtigkeitsgehalts werden in Kapitel 4.2.2 diskutiert, weil bei den Betonen mehr Daten vorhanden sind.

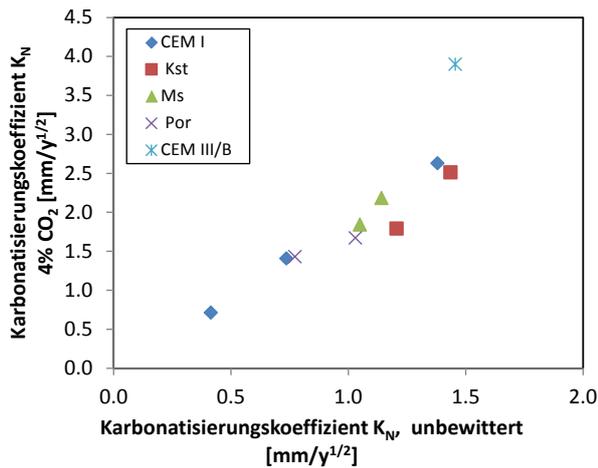


Abbildung 29: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der Mörtel bei 4%  $\text{CO}_2$  als Funktion des Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  in unbewitterter Exposition ( $R^2 = 0.75$ ).

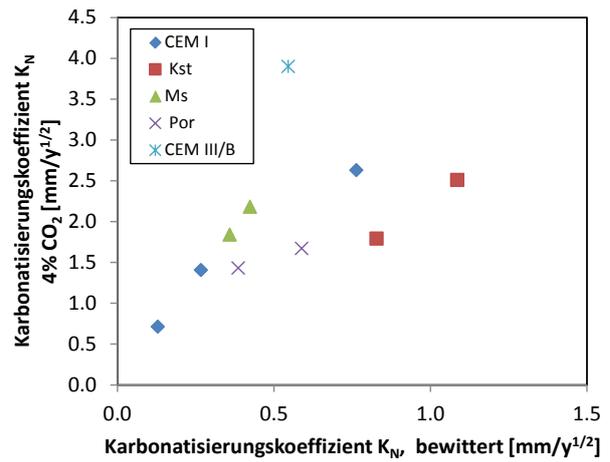


Abbildung 30: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der Mörtel bei 4%  $\text{CO}_2$  als Funktion des Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  in bewitterter Exposition ( $R^2 = 0.26$ ).

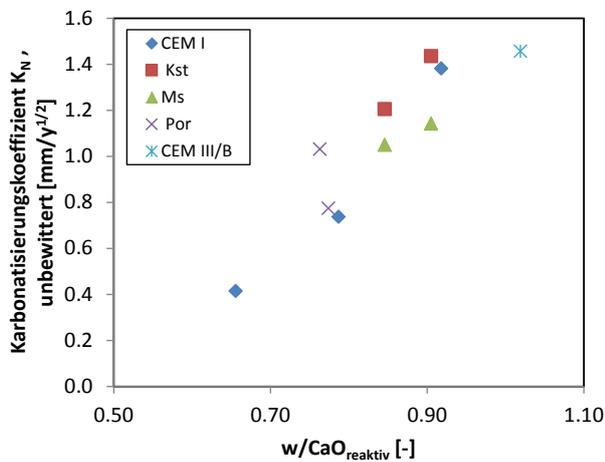


Abbildung 31:  $w/\text{CaO}_{\text{reaktiv}}$  der Mörtel als Funktion des Karbonatisierungskoeffizienten  $K_N$  in unbewitterter Exposition ( $R^2 = 0.83$ ).

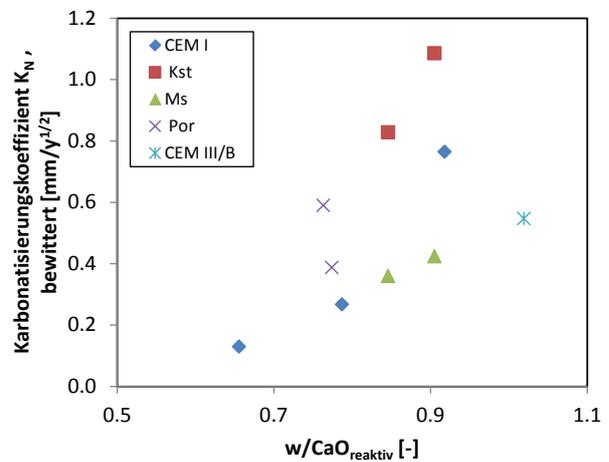


Abbildung 32:  $w/\text{CaO}_{\text{reaktiv}}$  der Mörtel als Funktion des Karbonatisierungskoeffizienten  $K_N$  in der bewitterten Exposition ( $R^2 = 0.29$ ).

#### 4.2.2 Beton

Innerhalb einer Zementart ist ein Zusammenhang zwischen dem Karbonatisierungskoeffizienten und der Druckfestigkeit der Betone zu erkennen (Abbildung 33). Aber als Gesamtheit zeigen die Betone einen schlechten Zusammenhang. Dies bestätigt die Ergebnisse der Schnellkarbonatisierung bei den Mörteln.

Innerhalb einer Zementart ist ebenfalls ein Zusammenhang zwischen dem Karbonatisierungskoeffizienten und der  $\text{O}_2$ -Diffusion der Betone zu erkennen (Abbildung 34). Aber auch hier zeigt die Gesamtheit der Werte einen schlechten Zusammenhang. Wiederum werden die Ergebnisse der Schnellkarbonatisierung bei den Mörteln bestätigt. Auffällig ist, dass die Betone aus CEM III/B trotz ihres sehr tiefen  $\text{O}_2$ -Diffusionskoeffizienten einen ebenfalls hohen Karbonatisierungskoeffizienten, das heisst tiefen Karbonatisierungswiderstand, aufweisen.

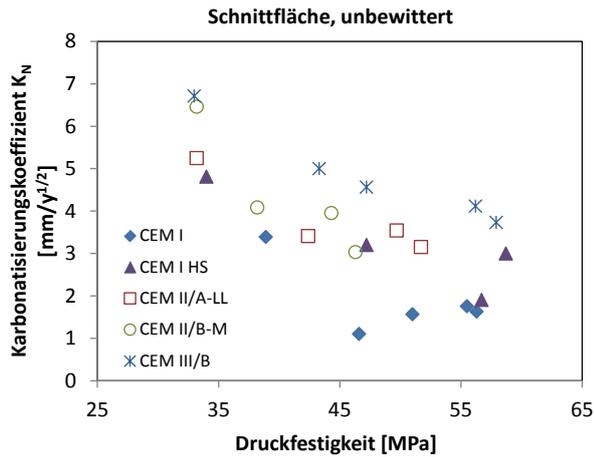


Abbildung 33: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der Betone als Funktion der Druckfestigkeit.

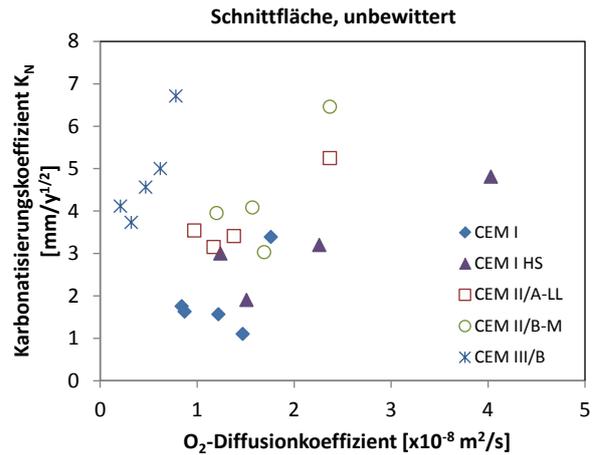


Abbildung 34: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der Betone als Funktion der  $O_2$ -Diffusionskoeffizienten

Wird der Karbonatisierungskoeffizient der unbewitterten Schnittflächen als Funktion des Klinkeranteils im Beton, respektive dem Wasser zu Klinkerverhältnis ( $w/Klinker$ ) dargestellt, wird deutlich, dass sich beide Parameter nicht dazu eignen, den Karbonatisierungswiderstand abzuschätzen (Abbildungen 35 und 36). Dafür gibt es zwei Gründe. Das Zementleimvolumen kann bei gleichem  $w/z$  variieren, ohne einen wesentlichen Einfluss auf den Karbonatisierungswiderstand zu haben. Der Einfluss von CaO-haltigen Zusatzstoffen wie Hochofenschlacke wird nicht berücksichtigt. Deshalb ist es sinnvoller, den Gehalt an reaktivem CaO pro Volumen Zementstein ( $w/CaO_{reaktiv}$ ) als massgebende Größe für das Abschätzen des Karbonatisierungswiderstandes zu verwenden.

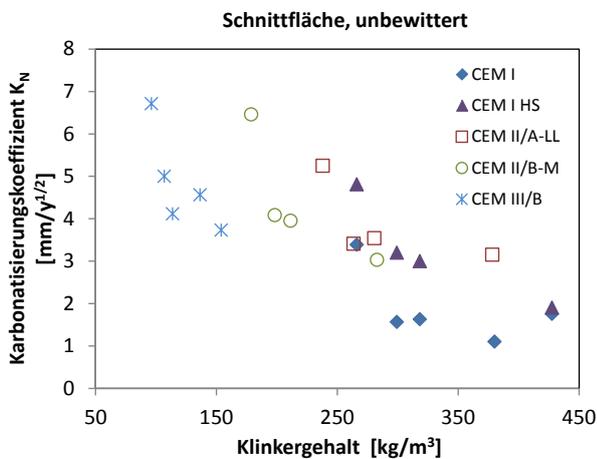


Abbildung 35: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der unbewitterten Schnittflächen als Funktion des Klinkergehalts ( $R^2 = 0.61$ ).

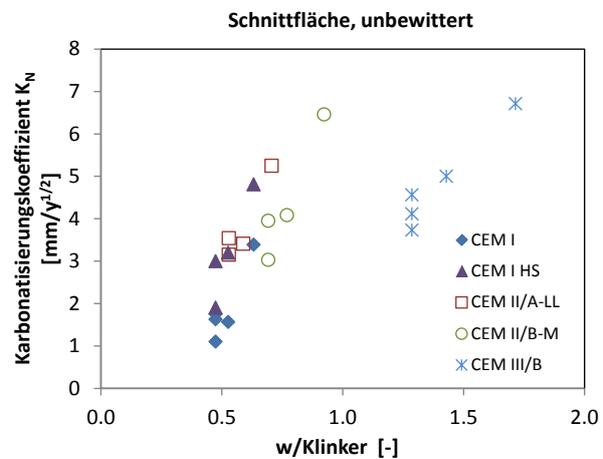


Abbildung 36: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der unbewitterten Schnittflächen als Funktion des  $w/Klinker$  ( $R^2 = 0.49$ ).

Der reaktive CaO-Gehalt im Zement wurde wie unter Tabelle 8 aufgeführt abgeschätzt. Um den reagierten Anteil an CaO zu berechnen wurden von dem folgenden Hydratationsgrad des Klinkers in den verschiedenen Zementen ausgegangen [Parrot & Killoh, 1984; Lumley et al., 1996; Feng et al., 2004]:

- $\alpha = 0.84$  bei einem  $w/z$  von 0.45
- $\alpha = 0.88$  bei einem  $w/z$  von 0.50
- $\alpha = 0.93$  bei einem  $w/z$  von 0.60

Bei der Hochofenschlacke wurde ein um den Faktor 1.4 tieferer Hydratationsgrad als beim Klinker angenommen. Wegen dem allgemein tiefen CaO-Gehalt von Steinkohleflugasche (ca. 5 Masse-%) wurde diese beim CEM II/B-M (V-LL) nicht berücksichtigt.

Zementart [-]	Zementgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	w/z [-]	CaO <sub>reaktiv</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]	CaO <sub>reagiert</sub> [kg/m <sup>3</sup> ]
CEM I	335	0.45	212	178
CEM I	315	0.50	199	175
CEM I	280	0.60	177	165
CEM I	400	0.45	253	212
CEM I	450	0.45	284	239
CEM I HS	335	0.45	189	159
CEM I HS	315	0.50	178	157
CEM I HS	280	0.60	158	147
CEM I HS	450	0.45	254	214
CEM II/A-LL	330	0.45	174	146
CEM II/A-LL	310	0.50	163	143
CEM II/A-LL	280	0.60	147	137
CEM II/A-LL	445	0.45	234	197
CEM II/B-M(V-LL)	325	0.45	143	120
CEM II/B-M(V-LL)	305	0.50	134	118
CEM II/B-M(V-LL)	275	0.60	212	112
CEM II/B-M(V-LL)	435	0.45	191	160
CEM III/B	325	0.45	151	107
CEM III/B	305	0.50	142	106
CEM III/B	275	0.60	128	101
CEM III/B	390	0.45	181	129
CEM III/B	440	0.45	204	145

Tabelle 8: Gehalt an reaktiven und reagierten CaO der Betone.

Bei den Schnittflächen in der unbewitterten Exposition ist ein klarer Zusammenhang zwischen dem Karbonatisierungskoeffizienten und dem  $w/\text{CaO}_{\text{reaktiv}}$  respektive dem  $w/\text{CaO}_{\text{reagiert}}$  vorhanden (Abbildungen 37 und 38). Der Grund für die Abnahme des Korrelationskoeffizienten beim  $w/\text{CaO}_{\text{reagiert}}$  liegt bei den Betonen aus CEM III/B, die für ihre CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität einen relativ hohen Karbonatisierungswiderstand aufweisen.

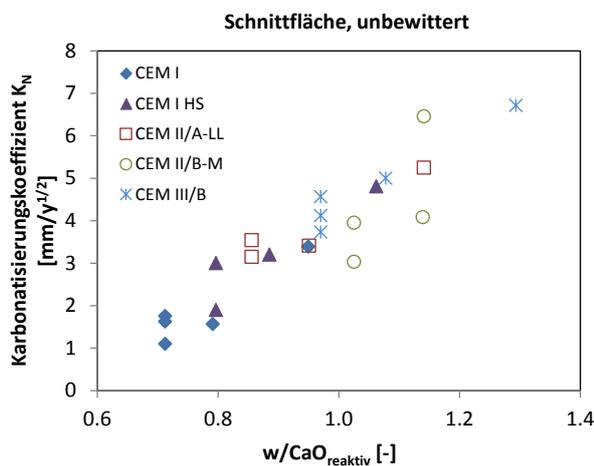


Abbildung 37: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der unbewitterten Schnittflächen der Betone als Funktion des  $w/\text{CaO}_{\text{reaktiv}}$  ( $R^2 = 0.87$ ).

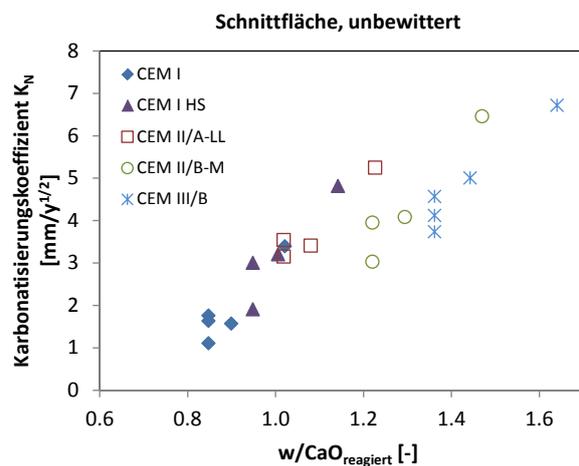


Abbildung 38: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der unbewitterten Schnittflächen der Betone als Funktion des  $w/\text{CaO}_{\text{reagiert}}$  ( $R^2 = 0.79$ ).

In der bewitterten Exposition korreliert der Karbonatisierungskoeffizient sowohl bei den Schal- als auch den Schnittflächen (Abbildung 39) mit dem  $w/\text{CaO}_{\text{reaktiv}}$  ( $R^2 = 0.88$  respektive 0.84). Wird der  $w/\text{CaO}_{\text{reagiert}}$  mit dem Karbonatisierungskoeffizienten verglichen, ergeben sich deutliche schlechtere Korrelationskoeffizienten von 0.64 und 0.61 (Abbildung 40). Wie auch in der unbewitterten Exposition ist der Grund dafür, dass die Betone aus CEM III/B für ihren  $w/\text{CaO}_{\text{reagiert}}$  einen hohen Karbonatisierungswiderstand aufweisen. Der Trend ist in der

bewitterten Exposition jedoch stärker ausgeprägt als in der unbewitterten. Dafür gibt es verschiedene mögliche Gründe.

- Der Hydratationsgrad des CEM III/B mit den verwendeten Werten wird unterschätzt und er liegt vor allem in der bewitterten Exposition wegen der höheren Feuchte entsprechend höher. Wie der Vergleich des Karbonatisierungskoeffizienten mit dem  $w/\text{CaO}_{\text{reaktiv}}$  zeigt, würde sich die Korrelation bei einem höheren geschätzten Hydratationsgrad deutlich verbessern.
- Die unterschiedliche Porenstruktur der Betone aus CEM III/B verglichen mit den anderen Betonen kann für den zementspezifischen Einfluss der Betonfeuchte verantwortlich sein. In Beton aus CEM III/B ist der durchschnittlichen Porenradius deutlich kleiner als bei der Verwendung anderer Zemente (s. Kapitel 3.1.5). Daraus resultiert auch die geringere  $\text{O}_2$ -Diffusivität der Betone aus CEM III/B (s. Abbildung 3.2.2). Einerseits kondensiert Wasser in kleineren Poren bei tieferer Feuchte als in grossen (Kelvin-Gleichung). Dies kann dazu führen, dass bei einem Beton mit einem hohen Anteil an kleinen Poren, ein höherer Anteil des Porenvolumens mit Wasser gefüllt ist als bei einem Beton mit einem hohen Anteil an größeren Poren. Entsprechend würde bei einem feinporigen Beton bei identischer relativer Feuchte die Karbonatisierung stärker verlangsamt als bei einem gröberporigen Beton. Des Weiteren ist es möglich, dass nach einer Periode mit hoher relativer Feuchte (z. Bsp. Nebel oder zusätzlich Regen in der bewitterten Exposition) Beton aus CEM III/B wegen seiner geringen Diffusivität langsamer austrocknet. Dadurch würde die Karbonatisierung ebenfalls entsprechend verlangsamt. Eine Kombination beider Effekt ist ebenfalls möglich.

Der eine Punkt der zweiten Hypothese scheint durch den Wasserverlust der Betone während der Konditionierung für die  $\text{O}_2$ -Diffusion bestätigt zu werden: die Betone aus CEM III/B verlieren deutlich weniger Wasser als die Betone aus den anderen Zementarten (Abbildungen 41 und 42). Untersuchungen von Parrot [1991, 1995] zeigen ebenfalls, dass Betone hergestellt mit einem Hochofenschlackenzement nach dem Ausschalen nach 28 Tagen langsamer austrocknen als entsprechende Betone aus CEM I. Diese Differenz dürfte wegen der langsamen Hydratation der Hochofenschlacke in einem höheren Alter noch stärker ausgeprägt sein, als dies aus den Messdaten nach 28 Tagen zum Ausdruck kommt.

Auch bei den natürlich karbonatisierten Betonen erweist sich die  $\text{CO}_2$ -Pufferkapazität als massgebender Faktor für das Abschätzen des Karbonatisierungswiderstandes von Beton.

Die Erkenntnisse aus den Mörtelversuchen werden wiederum bestätigt. Dort gilt es noch zu vermerken, dass der Karbonatisierungskoeffizient der Mörtel mit Mikrosilika im Vergleich zu den anderen Mörtel mit zunehmender Feuchte ebenfalls überproportional abnimmt, wenn auch weniger ausgeprägt als beim Mörtel und Beton aus CEM III/B. Der Grund kann auch hier die sehr feine Porenstruktur sein (Kapitel 3.1.5). Es ist zu erwarten, dass Mörtel und Beton mit anderen silikatischen Zusatzstoffen wie Flugasche oder Metakaolin ein vergleichbares Verhalten ausweisen. Beim Beton aus CEM II/B-M(V-LL) ist der Flugascheanteil aber offenbar zu klein, um diese Wirkung zu entfalten.

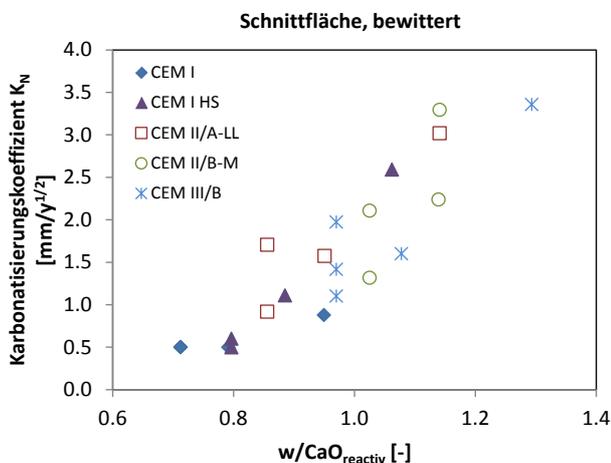


Abbildung 39: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der Betone als Funktion des  $w/\text{CaO}_{\text{reaktiv}}$  ( $R^2 = 0.84$ ) der bewitterten Schnittflächen.

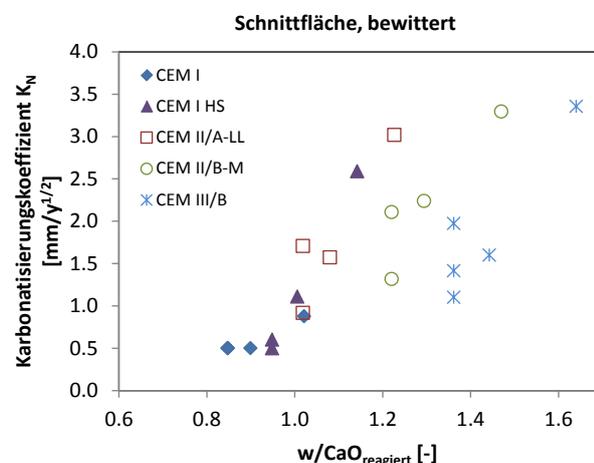


Abbildung 40: Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  der Betone als Funktion des  $w/\text{CaO}_{\text{reagiert}}$  ( $R^2 = 0.61$ ) der bewitterten Schnittflächen.

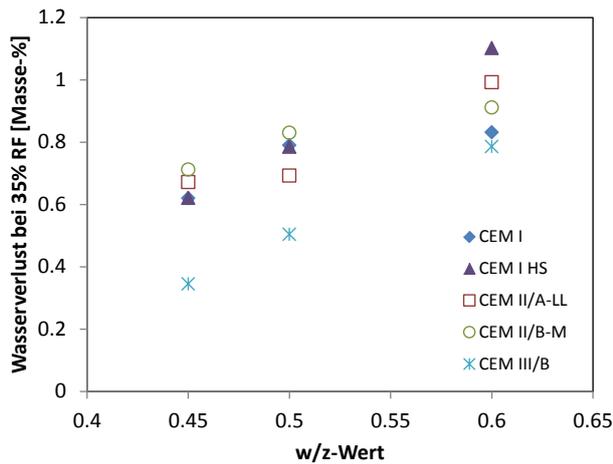


Abbildung 41: Wasserverlust der Betone mit identischem Zementsteinvolumen während der Konditionierung für die O<sub>2</sub>-Diffusion (nach Wasserlagerung bis 28 Tage für 7 Tage bei 35 % RF gelagert, s. Kap. 2.2).

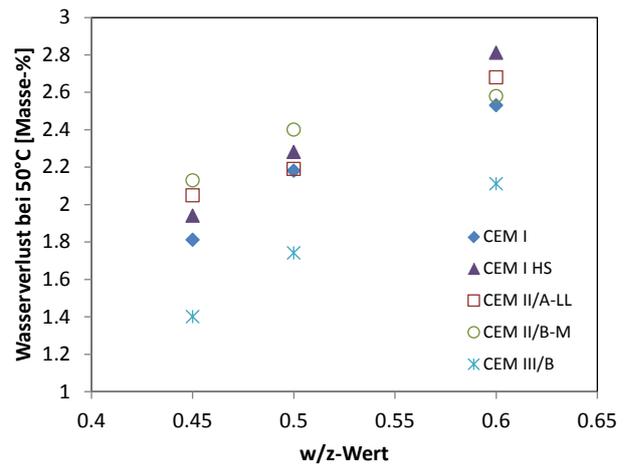


Abbildung 42: Wasserverlust der Betone mit identischem Zementsteinvolumen während der Konditionierung für die O<sub>2</sub>-Diffusion (nach Wasserlagerung bis 28 Tage für jeweils 7 Tage bei 35 % RF und nachträglich bei 50 °C getrocknet, s. Kap. 2.2).

## 4. Zusammenfassung

Die Zusammensetzung der zur Mörtelherstellung eingesetzten Bindemittel wurde systematisch variiert, um die CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität und Diffusivität zu verändern. Neben der Schnellkarbonatisierung bei 1 und 4% CO<sub>2</sub> sowie der natürlichen Karbonatisierung in unbewitterter und bewitterter Exposition wurden die Druckfestigkeit, die O<sub>2</sub>-Diffusivität und die Wasserleitfähigkeit bestimmt. Zusätzlich wurde an 20 Betonen der Karbonatisierungskoeffizient nach einer Aussenlagerung von 2.5 Jahren in unbewitterter und bewitterter Exposition bestimmt. Alle Prüfkörper wurden für 28 Tage nachbehandelt, um den Einfluss der Hydratation während der CO<sub>2</sub>-Exposition gering zu halten.

Die nach SIA 262/1 berechneten Karbonatisierungskoeffizienten bei 1 und 4% CO<sub>2</sub> ergeben praktisch identische Werte. Innerhalb derselben Zementart zeigt der Karbonatisierungskoeffizient bei der Schnellkarbonatisierung einen Zusammenhang mit dem w/z-Wert. Werden aber Mörtel hergestellt mit anderen Zementarten hinzugezogen, zeigt sich in der Gesamtheit der Daten keine Korrelation mit w/z oder anderen Mörtel Eigenschaften wie Druckfestigkeit, O<sub>2</sub>-Diffusion oder verschiedenen Porositätsparametern. Hingegen besteht eine gute Korrelation mit der CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität pro Volumen Zementstein. Die CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität kann als Verhältnis von Zugabewasser zu reaktivem oder reagiertem CaO im verwendeten Bindemittel, dem  $w/\text{CaO}_{\text{reaktiv}}$  respektive  $w/\text{CaO}_{\text{reagiert}}$ , ausgedrückt werden. Diese Grösse erweist sich als dominierender Faktor für den mit der Schnellprüfung ermittelten Karbonatisierungswiderstand. Wie die Experimente zeigen, spielt es dabei keine Rolle, ob das CaO in Form von Portlandit oder C-S-H vorliegt. Der Anteil an reaktivem CaO kann über die Zementchemie abgeschätzt werden. Dabei muss beachtet werden, dass der Anteil des CaO, der aus dem inerten Kalksteinmehl stammt, nicht berücksichtigt werden darf. Das reagierte CaO muss über die Annahme eines Hydratationsgrades der reaktiven Zementkomponenten Klinker, Gips, Hochofenschlacke, Flugasche oder gebrannter Schiefer abgeschätzt werden. Dies ist mit einer entsprechend grossen Unsicherheit verbunden. Es zeigt sich aber, dass eine Abschätzung des Karbonatisierungswiderstandes bereits über den  $w/\text{CaO}_{\text{reaktiv}}$  möglich ist.

In der unbewitterten Exposition ändert sich bei den Mörteln die Reihenfolge im Karbonatisierungswiderstand, wie er bei der Schnellkarbonatisierung ermittelt wurde. Der Grund dafür ist, dass die Mörtel mit Mikrosilika und deutlich ausgeprägter der Mörtel aus CEM III/B eine im Vergleich zu den anderen Mörteln überproportional starke Verringerung des Karbonatisierungskoeffizienten verzeichnen. Die Verringerung des Karbonatisierungskoeffizienten dieser Mörtel ist in der bewitterten Exposition noch signifikanter. Dadurch verschlechtert sich die Korrelation zu den in der Schnellkarbonatisierung bestimmten Karbonatisierungskoeffizienten. Beim Beton ist beim Vergleich von der unbewitterten zur bewitterten Exposition ebenfalls ein überproportional grosse Abnahme des Karbonatisierungskoeffizienten der Betone aus CEM III/B zu beobachten. Diese Feststellung ist aus zwei Gründen von Bedeutung. Erstens steigt das

Korrosionsrisiko infolge Karbonatisierung mit der Feuchte an und ist in erster Linie bei bewitterten Bauteilen ein potentielles Problem [Abbildung 43 / Tuutti, 1982 / Gonzales & Andrade, 1982]. Genau bei diesen Bedingungen ist die überproportional starke Abnahme der Karbonatisierungskoeffizienten der Mörtel mit Mikrosilika und der Mörtel und Betone aus CEM III/B zu verzeichnen. Zweitens verschlechtert sich die Korrelation zur CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität, weil neben den chemischen Parametern nun physikalische Parameter wie Feuchtigkeitsaufnahme durch kapillare Kondensation und/oder kapillares Saugen sowie Verdunsten eine wichtige Rolle spielen.

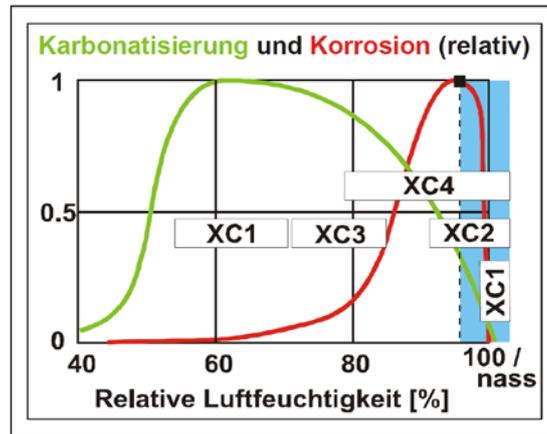


Abbildung 43: Zusammenhang zwischen der relativen Feuchte und der Karbonatisierungs- respektive Korrosionsgeschwindigkeit [Hunkeler & Lammar, 2012].

Das Ziel der Schnellkarbonatisierung muss es sein, den Karbonatisierungswiderstand spezifischer Mörtel und Betone hinsichtlich ihres Karbonatisierungswiderstandes bei den für die Bewehrungskorrosion relevanten Verhältnissen, das heisst hoher Feuchtigkeit, zu klassieren. Der Korrelationskoeffizient zwischen den in der Schnellkarbonatisierung und der bewitterten Exposition bestimmten Karbonatisierungskoeffizienten ist mit  $R_2 = 0.26$  relativ tief (Abbildung 30). Die relative Änderung der Karbonatisierungskoeffizienten bezüglich des Referenzmörtels aus CEM I zeigt das unterschiedliche Verhalten der Mörtel in den zwei verschiedenen Expositionen deutlich auf (Abbildung 44). Das Muster der relativen Änderungen unterscheidet sich deutlich. Die Schnellkarbonatisierungsprüfung hat sicher ihre Berechtigung und gibt auch wertvolle Hinweise auf den Karbonatisierungswiderstand von Mörtel und Beton. Es ist aber auch wichtig, sich der Grenzen der Schnellprüfung bewusst zu sein. Insbesondere bei Mörtel und Beton aus Mischzementen, die silikatische Zusatzstoffe enthalten, kann es zu einem signifikanten Unterschätzen des Karbonatisierungswiderstandes in der bewitterten Exposition kommen.

Diese Aussagen gelten für die im Projekt untersuchten Mörtel und Betone sowie eine Nachbehandlungsdauer von 28 Tagen. Wie in Kapitel 7 kurz diskutiert bestehen Wissenslücken zu den Zusammenhängen zwischen Karbonatisierungswiderstand, relativer Feuchte und Nachbehandlungsdauer von Mörtel und Beton aus Mischzementen.

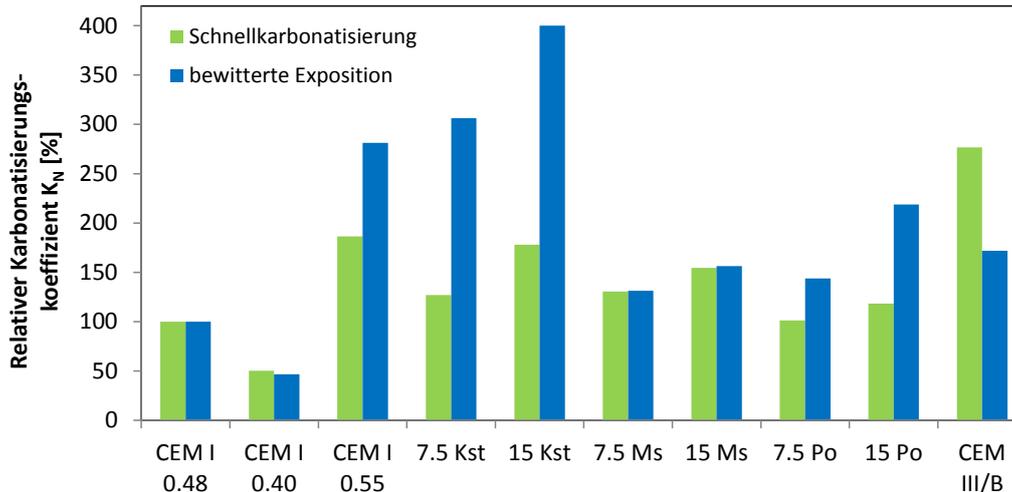


Abbildung 44: Relative Änderung des Karbonatisierungskoeffizienten in der Schnellkarbonatisierung und der bewitterten Exposition in Bezug auf den Referenzmörtel aus CEM I ( $w/z = 0.48$ ).

## 5. Umsetzung

Bei den Zementen ist der Karbonatisierungswiderstand vom Anteil an reaktivem CaO abhängig. Der Zementhersteller muss dies bei der Zemententwicklung entsprechend berücksichtigen.

Bei Mörtel und Beton ist der Karbonatisierungswiderstand vom Verhältnis zwischen Anmachwasser und reaktivem ( $w/\text{CaO}_{\text{reaktiv}}$ ) respektive reagiertem CaO ( $w/\text{CaO}_{\text{reagiert}}$ ) abhängig. Dem Betonhersteller stehen damit zwei Möglichkeiten offen, den Karbonatisierungswiderstand zu steuern. Einerseits kann er bei Beton hergestellt mit derselben Zementart den Karbonatisierungswiderstand über eine  $w/z$ -Variation steuern. Andererseits kann er bei Betonen mit vergleichbarem  $w/z$  den Karbonatisierungswiderstand über die Wahl der Zementart beeinflussen. Selbstverständlich sind auch Kombinationen der beiden Möglichkeiten umsetzbar. Ausschlaggebend für die gewählte Betonrezeptur wird der Einfluss auf die anderen Betoneigenschaften und die Wirtschaftlichkeit der betontechnologischen Massnahmen sein. Dem Betonhersteller muss dabei klar sein, dass die Steuergrößen beim Karbonatisierungswiderstand nicht deckungsgleich mit den Steuergrößen bei der Druckfestigkeit oder dem Chloridwiderstand sind.

## 6. Erste Erfahrungen aus der Praxis

Die Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes ist für die Sorten B-E im NA der SN EN 206-1 vorgeschrieben. Die Grenzwerte werden in derselben Norm und zusätzlich in den der SIA 262-1 (2013) definiert. Es hat sich gezeigt, dass in erster Linie Betone der Sorte B hergestellt mit CEM II/B-M über dem geforderten Grenzwert liegen können.

## 7. Ausblick

Wie die vorliegenden Daten zeigen, ist bei der bewitterten Exposition eine zementspezifische Abnahme des Karbonatisierungskoeffizienten aufgrund der steigenden Betonfeuchte zu verzeichnen. Da dies sowohl für die Aussagekraft der Schnellkarbonatisierungsprüfung als auch für die karbonatisierungsbedingte Bewehrungskorrosion von grosser Bedeutung ist, gilt es die Gründe dafür systematisch zu untersuchen. Dies ist umso mehr von Bedeutung, als dass der Karbonatisierungswiderstand von Mörtel und Beton aus Mischzementen mit silikatischen Zumahlstoffen in bewitterter Exposition unter Umständen aufgrund der Schnellkarbonatisierungsprüfung unterschätzt wird. Damit könnte die Entwicklung von Mischzementen mit silikatischen Zumahlstoffen und eine weitere Klinkerreduktion in solchen Zementen behindert oder verhindert werden. Es kann deshalb folgende Schlussfolgerung gezogen werden:

- Zukünftige Studien müssen sich auf den Zusammenhang zwischen Schnellkarbonatisierung und bewitterter Exposition konzentrieren, um die Aussagekraft der Schnellprüfung zu verbessern.

Es gilt zu vermerken, dass die im Projekt verwendete Nachbehandlungsdauer von 28 Tagen deutlich länger ist als die Nachbehandlungsdauer in der Praxis. Wie aus der Literatur bekannt ist [Wierig, 1984 / Fatthudi, 1988 / Osborne, 1989 / Thomas, 1992], können bereits relativ kleine Unterschiede in der Nachbehandlung in den ersten Tagen nach Betonherstellung wesentliche Differenzen im Karbonatisierungskoeffizienten verursachen. Dabei hat neben dem Ausschalzeitpunkt auch das Wetter nach dem Ausschalen einen Einfluss. Deshalb wird der Faktor der Nachbehandlung immer mit einer grossen Unsicherheit behaftet sein. Inwieweit bei einer kürzeren Nachbehandlungsdauer die aufgezeigte, zementspezifische Abnahme des Karbonatisierungskoeffizienten gleich stark ausgeprägt ist, wie im vorliegenden Fall, kann nicht beurteilt werden. Es ist offensichtlich, dass bei der Karbonatisierung noch wesentliche Wissenslücken bei der Verwendung von Mischzementen vorhanden sind.

In der Vereinigung Akkreditierter Baustoffprüflabors VAB ist ein Ringversuch geplant, um Werte für die Wiederholbarkeit und Vergleichbarkeit der Schnellkarbonatisierung nach SIA 262/1 zu erhalten und andererseits falls nötig noch genauere Prüfspezifikationen zu erlassen.

Bei Recyclingbetonen können ebenfalls Probleme entstehen, den Grenzwert einzuhalten. Hier besteht aber noch eine Wissenslücke bezüglich des Einflusses des verwendeten Recyclinggranulats auf den Karbonatisierungswiderstand. Einerseits kann nicht karbonatisiertes Betongranulat selbst  $\text{CO}_2$  adsorbieren. Andererseits können unter Umständen poröse und bereits karbonatisierte Betongranulatkörner den Karbonatisierungsfortschritt beschleunigen. Zudem ist nicht bekannt, welchen Einfluss die Kernfeuchte des verwendeten Betongranulates ausübt. Auch bezüglich der Bestimmung der Karbonatisierungstiefen bestehen Unsicherheiten, da bereits im Bauwerk oder während der Aufbereitung karbonatisierter Beton eine weiter fortgeschrittene Karbonatisierung als tatsächlich vorhanden vortäuschen kann.

## 8. Referenzen

- Alexander M.G., Mackechnie J.R., Yam W., Carbonation of concrete bridge structures in three South African localities, *Cem Concr Compos* 29 (2007) 750-759.
- Ben Haha M., De Weerd K., Lothenbach B., Quantification of the degree of reaction of fly ash, *Cem Concr Res* 40 (2010) 1620-1629.
- Buenfeld N.R., Okundi, E., Effect of cement content on transport in concrete, *Mag Concr Res* 50 (1998) 339-351.
- Deschner F., Winnefeld F., Lothenbach B., Seufert S., Schwesig P., Dittrich S., Goetz-Neunhoeffler F., Neubauer J., Hydration of Portland cement with high replacement by siliceous fly ash, *Cem Concr Res*, 42, (2012) 1389-1400.
- Fatthudi N.I., Concrete carbonation as influenced by curing regime, *Cem Concr Res* 18 (1988) 426-430.
- Feng X., Garboczi E.J., Bentz D.P., Stutzman P.E., Mason T.O., Estimation of the degree of hydration of blended cement pastes by a scanning electron microscope point-counting procedure, *Cem Concr Res* 34 (2004) 1787-1793.
- González J.A, Andrade C., Effect of carbonation, chlorides and relative ambient humidity on the corrosion of galvanized rebars embedded in concrete, *British Corrosion Journal* 17 (1982) 21-28.
- Haque M.N., Al-Khaiat H., Carbonation of concrete structures in hot dry coastal regions, *Cem Concr Compos* 19 (1997) 123-129.
- Hunkeler, F., Lammar, L., Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen. UVEK, Bundesamt für Strassen, Bericht Nr. 649, Bern, 2012.
- Kaufmann J., Loser R., Leemann A., Analysis of cement-bonded materials by multi-cycle mercury intrusion and nitrogen sorption, *Journal of Colloid and Interface Science* 336 2009 730-737.
- Kocaba V., Gallucci E., Scrivener K.L., Methods for determination of degree of reaction of slag in blended cement pastes, *Cem Concr Res* 42 (2012) 511-525.
- Lawrence C.D., Transport of oxygen through concrete, in: Glasser FP (Ed.), *The chemistry and chemically-related properties of cement*. British Ceramic Society Proceedings 35 (1984) 277-293.
- Loser R., Leemann A., Sulfatwiderstand von Beton: verbessertes Verfahren basierend auf der Prüfung nach SIA 262/1, Anhang D, UVEK, Bundesamt für Strassen, Bericht Nr. 1416, Bern, 2013.
- Lumley J.S., Gollop R.S., Moir G.K., Taylor H.F.W., Degrees of reaction of the slag in some blends with Portland cements, *Cem Concr Res*, 26 (1996) 139-151.
- Nygaard P.V., Leemann A., CO<sub>2</sub>-Aufnahme von Stahlbetonbauwerken infolge Karbonatisierung, *cemsuisse-Projekt Nr. 201106*, Bern, 2012.
- Osborne G.J., Carbonation and permeability of blastfurnace slag cement concretes from field structures, *ACI Spec Pub* 114 (1989) 1209-1238.
- Parrot L.J., Factors influencing relative humidity in concrete, *Mag Concr Res* 43 (1991) 45-52.
- Parrot L.J., Influence of cement type and curing on the drying and air permeability of cover concrete, *Mag Concr Res* 47 (1995) 103-111.
- Parrot L.J., Killoh D.C., Prediction of cement hydration, *Proc Br Ceram Proc* 35 (1984) 41-53.
- Thomas M.D.A., Matthews J.D., Carbonation of fly ash concrete, *Mag Concr Res* 44 (1992) 217-228.
- Thomas M.D.A., Matthews J.D., Haynes C.A., Carbonation of fly ash concrete, *ACI Special Publication* 19 (1992) 539-556.
- Thomas, M.D.A., Matthews, J.D., Performance of fly ash concrete in UK structures, *ACI Mat J* 90 (1993) 586-593.
- Tuutti K., Corrosion of steel in concrete, *Svenska Forskningsinstitutet för cement och betong*, Stockholm, 1982.
- Wallbank E.J., Maunsell G., *The performance of concrete in bridges: a survey of 200 highway bridges*. Transport Research Laboratory, UK, 1989.
- 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.

## Anhang

Mörtel		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$f_{c,7}$	[MPa]	37.8	51.8	26.3	33.3	30.7	36.6	35	33.5	31.3	14
$f_{c,28}$		62.2	74.7	50.9	57.2	51.6	67.6	69.2	53.8	49	52.9
$f_{c,91}$		69.7	78.8	54.9	62.6	57.2	77.2	79.0	60.6	54	69.1
$D_{O_2}$	[ $10^{-8}$ m/s <sup>2</sup> ]	1.92	1.24	2.02	2.39	3.00	0.72	0.50	2.08	2.45	0.19
$\Delta m$	[mass-%]	0.97	0.70	1.25	0.98	1.21	0.70	0.60	0.94	1.23	0.80
$K_{N,1\%}$	[mm/ $\sqrt{y}$ ]	1.75	1.17	2.84	2.28	2.55	2.46	2.80	2.01	2.14	4.27
$K_{N,4\%}$		1.41	0.71	2.63	1.79	2.51	1.84	2.18	1.43	1.67	3.90
$K_{N,B}$		0.32	0.15	0.90	0.98	1.28	0.42	0.50	0.46	0.70	0.55
$K_{N,UB}$		0.87	0.49	1.63	1.42	1.69	1.24	1.35	0.91	1.22	1.46

$f_{c,X}$  = Druckfestigkeit nach X Tagen

$D_{O_2}$  = Sauerstoff-Diffusionskoeffizient

$\Delta m$  = Massenverlust während der Prüfkörperkonditionierung während 7 Tagen bei 20 °C und 35% RF

$K_{N,X\%}$  = Karbonatisierungskoeffizient in der Karbonatisierungskammer mit X% CO<sub>2</sub>

$K_N$  = Karbonatisierungskoeffizient in der bewitterten (B) und der unbewitterten (UB) Exposition

Tabelle A1: Ausgewählte Resultate der Mörtel.

Zementart	w/z [-]	Zementstein [l/m <sup>3</sup> ]	$f_{c,28}$ [MPa]	$D_{O_2}$ [ $10^{-8}$ m/s <sup>2</sup> ]	$\Delta m$ [Mass- %]	$K_N$ [mm/ $\sqrt{y}$ ]			
						$K_{N,UB-CA}$	$K_{N,UB-CUT}$	$K_{N,B-CA}$	$K_{N,B-CUT}$
CEM I HS	0.45	257	58.7	1.24	0.62	4.4	3.0	1.0	0.6
CEM I HS	0.50	257	47.2	2.26	0.79	3.7	3.2	2.2	1.1
CEM I HS	0.60	257	34.0	4.03	1.10	6.2	4.8	3.6	2.6
CEM I HS	0.45	343	56.7	1.51	0.76	3.1	1.9	0.5	0.5
CEM I	0.45	257	56.3	0.87	0.6	2.1	1.1	0.5	0.5
CEM I	0.50	257	45.8	1.22	0.79	2.9	1.8	0.5	0.5
CEM I	0.60	257	38.9	1.76	0.83	2.1	1.6	0.5	0.5
CEM I	0.45	307	46.6	1.47	0.69	2.4	1.6	0.5	0.5
CEM I	0.45	343	55.5	0.84	0.67	4.3	3.4	1.6	0.9
CEM III/B	0.45	257	56.2	0.21	0.3	4.8	4.1	3.0	2.1
CEM III/B	0.50	257	43.3	0.62	0.50	5.0	3.7	2.0	1.1
CEM III/B	0.60	257	33.0	0.78	0.79	6.0	4.6	2.6	2.0
CEM III/B	0.45	307	47.2	0.47	0.51	8.1	6.0	2.3	1.5
CEM III/B	0.45	343	57.9	0.32	0.47	8.7	6.7	4.7	3.4
CEM II/B-M (V-LL)	0.45	257	44.3	1.20	0.71	5.4	4.0	2.4	1.4
CEM II/B-M (V-LL)	0.50	257	38.2	1.57	0.83	5.1	3.0	1.7	1.3
CEM II/B-M (V-LL)	0.60	257	28.2	3.01	0.91	6.1	4.1	3.4	2.2
CEM II/B-M (V-LL)	0.45	343	46.3	1.69	0.90	6.6	6.5	5.4	3.3
CEM II/A-LL	0.45	257	49.7	0.97	0.67	3.7	3.5	2.0	0.9
CEM II/A-LL	0.50	257	42.4	1.38	0.69	4.1	3.1	2.5	1.7
CEM II/A-LL	0.60	257	33.2	2.37	0.99	4.7	3.4	2.2	1.6
CEM II/A-LL	0.45	343	51.7	1.17	0.89	8.4	5.2	3.9	3.0

$f_{c,28}$  = Druckfestigkeit nach 28 Tagen

$D_{O_2}$  = Sauerstoff-Diffusionskoeffizient

$\Delta m$  = Massenverlust während der Prüfkörperkonditionierung während 7 Tagen bei 20 °C und 35% RF

$K_N$  = Karbonatisierungskoeffizient in der unbewitterten (UB) und der bewitterten (B) Exposition der Schal- (CA) und Schnittflächen (CUT)

Tabelle A2: Ausgewählte Resultate der Betone.