

## Karbonatisierungswiderstand von österreichischen Trans- portbetonen

D-6-137/2017



**Philipp HEINRICH**

Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie  
mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung  
Technische Universität Graz



# MASTERARBEIT

## **KARBONATISIERUNGSWIDERSTAND VON ÖSTERREICHISCHEN TRANSPORTBETONEN**

Philipp HEINRICH

Vorgelegt am  
Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie  
mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung

Betreuer  
Dipl. Ing. Dr. techn. Joachim JUHART  
Dipl.-Ing. Ing. Gheorghe Alexandru DAVID

Graz am 20. Jänner 2018



## EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....  
.....  
(Unterschrift)

## STATUTORY DECLARATION

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, .....  
date .....  
(signature)

### Anmerkung

In der vorliegenden Masterarbeit wird auf eine Aufzählung beider Geschlechter oder die Verbindung beider Geschlechter in einem Wort zugunsten einer leichteren Lesbarkeit des Textes verzichtet. Es soll an dieser Stelle jedoch ausdrücklich festgehalten werden, dass allgemeine Personenbezeichnungen für beide Geschlechter gleichermaßen zu verstehen sind.

## Danksagung

An dieser Stelle möchte ich allen Personen danken, die mir während meiner Diplomarbeit mit Rat und Tat zur Seite standen.

Für die Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich bei Herrn Dipl. Ing. Dr. techn. Joachim Juhart und Frau Dipl.-Ing. Dr.mont. Elke Krschey-Stoiser.

Besonderer Dank gebührt meiner Familie, die mich die gesamte Ausbildungszeit hindurch unterstützte.

Graz, am 20.01.2018

---

Philipp HEINRICH

## Kurzfassung

Ziel der Masterarbeit war die Erfassung des Karbonatisierungswiderstands von typischen österreichischen Transportbetonen und die Gegenüberstellung und Diskussion von einschlägigen Prüfverfahren. „Typisch“ meint, dass 8 Standardfälle von Betonzusammensetzungen geprüft wurden (zusammengestellt vom Güteverband Transportbeton).

Letztlich wurde die „performance“ der unterschiedlichen Betone abhängig von ihrer Zusammensetzung beurteilt und zudem die beschleunigten Prüfverfahren hinsichtlich ihrer Eignung zur Abbildung des potenziellen Karbonatisierungswiderstandes eingeschätzt. Korrelationen zwischen Karbonatisierung und Stoffkennwerten sowie des Mischungsentwurfs wurden ausgewertet.

Der Karbonatisierungskoeffizient  $K$  (i.e. Karbonatisierungsgeschwindigkeit) von typischen Transportbetonen der Expositionsklassen XC1 ( $W/B=0,7$ ) und XC3 ( $W/B=0,6$ ) in jeweils 4 Sorten (mit hohem und geringem Leimvolumen in je 2 unterschiedlichen Bindemittelzusammensetzungen) wurde anhand einer Karbonatisierungsprüfung mit einem beschleunigten Verfahren (Klimakammer mit 2 V.-%  $CO_2$ ,  $20^\circ C$  und 65 % r.F.) ermittelt.

Die Ergebnisse der Untersuchung lassen sich wie folgt zusammenfassen:

Von fünf in der Literatur gefundenen Verfahren zur Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes wurde das im model code for service life design bzw. in dem Entwurf der ONR CEN/TR 12390-12:2010 beschriebene Verfahren zur Schnellkarbonatisierung ausgewählt. Des Weiteren wurde gezeigt, wie Ergebnisse von Prüfungen mit einem bestimmten  $CO_2$ -Gehalt auf eine andere  $CO_2$ -Konzentration umzurechnen sind (bis zu 4%  $CO_2$ ) und wie eine Lebensdauerabschätzung bei natürlicher Karbonatisierung möglich ist.

Der Einfluss der Zusammensetzung auf den Karbonatisierungswiderstand wurde ausgewertet. Eine hohe Korrelation von  $K$  wurde mit dem Verhältnis  $W/B$  in Zusammenhang mit  $W/CaO_{\text{reactive}}$  (Wasser/„reaktives Calciumoxid“ nach *Leemann*) gefunden. Hingegen zeigte sich keine ausgeprägte Korrelation von  $K$  mit dem Leimvolumen, der Wassereindringtiefe und den leicht unterschiedlichen Bindemittelzusammensetzungen.

## Abstract

The aim of this thesis is the measurement of the carbonation resistance of typical Austrian ready-mix concrete and the comparison and discussion of relevant test methods. 8 standard compositions were tested (defined by the "Güteverband Transportbeton").

Finally, the performance of these different concretes was assessed related to their composition. The accelerated test methods were evaluated related to their ability to define the carbonation resistance. Correlations between carbonation and material as well as mix design parameters were analyzed.

The carbonation coefficient  $K$  of typical ready-mix concretes of the exposure class XC1 ( $W/B=0,7$ ) and XC3 ( $W/B=0,6$ ) of 4 types each (high/low paste volume with 2 types of binders) was tested by an accelerated test method ( $\text{CO}_2$  chamber with 2-V.-%  $\text{CO}_2$ ,  $20^\circ\text{C}$  and 65 % RH).

The results can be summed up as follows: According to a literature review the test method of the model code for service life design in combination with the draft of ONR CEN/TR 12390-12:2010 were chosen for the accelerated carbonation test. In addition, a method of converting test results from one  $\text{CO}_2$  concentration to another (from 2% to 4%) was applied. A simple assessment of life-time of concrete due to natural carbonation was described.

The impact of the composition on the carbonation resistance was evaluated. A high correlation between  $K$  and the water-binder-ratio and the water-reactive calcium oxide-ratio ( $W/\text{CaO}_{\text{reactive}}$  by Leemann) was found. On the other hand there were no distinctive correlations between carbonation and paste volume or the depth of penetration of water under pressure or the different types of binder

## Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Karbonatisierung von Beton</b>	<b>2</b>
2.1	Prinzip .....	3
2.1.1	Diffusion von CO <sub>2</sub> und Lösen des Portlandit .....	4
2.1.2	Reaktion des CO <sub>2</sub> im Feuchtigkeitsfilm .....	4
2.1.3	Neutralisation .....	4
2.2	Auswirkung auf den Beton .....	4
2.3	Zeitgesetz der Karbonatisierung .....	5
2.4	Einflussfaktoren .....	6
2.4.1	CO <sub>2</sub> -Konzentration .....	6
2.4.2	Umgebungsbedingungen .....	8
2.4.3	Betonzusammensetzung & Betonqualität .....	9
2.4.4	Zusammenfassung .....	12
<b>3</b>	<b>Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes</b>	<b>14</b>
3.1	Design-Konzepte .....	14
3.2	Einteilung laut ÖNORM .....	14
3.3	Definition des Karbonatisierungswiderstandes .....	16
3.4	Prüfverfahren .....	17
3.4.1	ONR CEN/TS 12390-12:2010 Entwurf .....	17
3.4.2	ÖNORM EN 13295:2004 .....	19
3.4.3	fib Model Code for Service Life Design 2006 .....	20
3.4.4	SIA 262/1:2013 Anhang I .....	23
3.4.5	Cementbulletin August 1988 .....	25
3.5	Unterschiede der Prüfverfahren .....	26
3.5.1	Prüfungsparameter .....	26
3.5.2	Nullmessung .....	30
3.5.3	Ergebnis der Prüfverfahren/Vergleichbarkeit .....	31
3.6	Diskussion der Prüfverfahren .....	32
3.6.1	Vorlagerung/Nachbehandlung .....	32
3.6.2	Klima während der Prüfung .....	33
3.6.3	Auswertung .....	34
3.6.4	Umrechnung auf die geplante Nutzungsdauer/Einteilung in Expositionsklassen .....	35
3.6.5	Zusammenfassung & Diskussion .....	35
<b>4</b>	<b>Prüfungen an typischen Transportbetonen</b>	<b>38</b>
4.1	Zusammensetzung der Betonsorten .....	38
4.1.1	Chemische Analyse .....	40
4.1.2	Unterschiede in der Betonzusammensetzung .....	43
4.2	Durchgeführte Prüfungen .....	46
4.2.1	Frischbeton .....	46
4.2.2	Festbeton .....	47
4.3	Ergebnisse .....	49
4.3.1	Frischbeton: Zusammensetzung und Prüfungsergebnisse .....	49
4.3.2	Festbetonergebnisse .....	55
<b>5</b>	<b>Performance-Beurteilung</b>	<b>69</b>
5.1	Karbonisierungstiefe – Karbonisierungskoeffizient beschleunigt .	69
5.1.1	Vergleich mit anderen Betonen .....	70

5.2	Karbonatisierung – Druckfestigkeit.....	72
5.3	Karbonatisierung – Offene Porosität .....	72
5.4	Karbonatisierung – Wasseraufnahmemenge .....	73
5.5	Karbonatisierung – WU.....	74
5.6	Karbonatisierung – W/B-Wert .....	74
5.7	Karbonatisierung – Leimvolumen.....	75
5.8	Karbonatisierung – Innerer Widerstand.....	76
5.8.1	W/Klinker.....	76
5.8.2	W/CaO.....	76
5.9	Karbonatisierungskoeffizient natürlich nach SIA 262/1.....	80
<b>6</b>	<b>Zusammenfassung, Schlussfolgerung &amp; Ausblick</b>	<b>82</b>
6.1	Korrelationen des Karbonatisierungswiderstandes mit Kenngrößen der Betone .....	82
6.1.1	Vergleich der Bindemittel.....	82
6.1.2	W/CaO.....	83
6.2	Karbonatisierungswiderstand mit einem beschleunigten Verfahren... 83	
6.2.1	Vergleichbarkeit der Verfahren .....	83
6.2.2	Umrechnung beschleunigte/natürliche Karbonatisierung .....	83
6.2.3	Beispielabschätzung der Lebensdauer.....	84
6.3	Empfehlungen für weiterführende Versuche .....	86
6.4	Ausblick.....	87
	<b>Glossar</b>	<b>88</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>89</b>
	<b>Normenverzeichnis</b>	<b>91</b>

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1	Karbonatisierungstiefe einer Probe zu unterschiedlichen Zeiten mit unterschiedlicher CO <sub>2</sub> -Konzentrationsbeanspruchung (aus (Cui <i>et al.</i> , 2015))	7
Abbildung 2	Zusammenhang: Temperatur - Karbonatisierungstiefe (aus (ISHIDA and LI, 2007))	8
Abbildung 3	Einfluss der Nachbehandlungsdauer bei unterschiedlich langer Wasserlagerungsdauer (Hainer, Proske and Graubner, 2015)	12
Abbildung 4	Prüfverfahren: Temperatur	27
Abbildung 5	Prüfverfahren: relative Luftfeuchtigkeit	28
Abbildung 6	Prüfverfahren: CO <sub>2</sub> -Konzentration	28
Abbildung 7	Prüfverfahren: Vorlagerung	30
Abbildung 8	Sieblinie: Kantkorn - HW	39
Abbildung 9	Sieblinie: Rundkorn - NW	40
Abbildung 10	Sieblinien: Kant- & Rundkorn	40
Abbildung 11	Unterschiede Betonvarianten	44
Abbildung 12	Frischbetonprüfergebnis: Ausbreitmaß: 10min & 90min nach Wasserzugabe	51
Abbildung 13	Betonzusatzmittel	51
Abbildung 14	Frischbetonprüfergebnis: Luftgehalt	53
Abbildung 15	Frischbetonprüfergebnis: Frischbetonrohichte	53
Abbildung 16	Frischbetonprüfergebnis: Frischbetontemperatur	54
Abbildung 17	Frischbetonprüfergebnis: Klima bei der Herstellung	54
Abbildung 18	Karbonatisierungstiefe mit Angabe der einfachen Standardabweichung	55
Abbildung 19	Karbonatisierungsverlauf	57
Abbildung 20	Karbonatisierungsverlauf (v(Tage))	58
Abbildung 21	Druckfestigkeit	59
Abbildung 22	Einteilung Festigkeitsklassen	60
Abbildung 23	Korrelation: Druckfestigkeit - W/B	61
Abbildung 24	Korrelation: Druckfestigkeit - W/Klinker	62
Abbildung 25	Korrelation: Druckfestigkeit - W/CaO <sub>reactive</sub>	62
Abbildung 26	Rohdichte (28d & 190d)	63
Abbildung 27	Wasseraufnahme (28d & 190d)	64
Abbildung 28	Offene Porosität (28d & 190d)	64
Abbildung 29	Ergebnis: Wassereindringtiefe	68
Abbildung 30	Karbonatisierungskoeffizient beschleunigt K <sub>ACC,2%</sub>	70
Abbildung 31	K <sub>ACC</sub> – Druckfestigkeit	72
Abbildung 32	K <sub>ACC</sub> - Offene Porosität	73
Abbildung 33	K <sub>ACC</sub> – Wasseraufnahmemenge nach 4h	73
Abbildung 34	K <sub>ACC</sub> - Wassereindringtiefe	74

Abbildung 35 $K_{ACC}$ - W/B-Wert.....	75
Abbildung 36 $K_{ACC}$ - Leimvolumen .....	75
Abbildung 37 Karbonatisierung - W/Klinker .....	76
Abbildung 38 Karbonatisierung - $W/CaO_{reactive}$ .....	77
Abbildung 39 Karbonatisierung - $W/CaO_{reactive}$ Variante RDA.....	78
Abbildung 40 $W/CaO_{reactive}$ Variante ONR 29196-4 (Analyse 2).....	80

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Expositionsklasse XC (ÖNORM EN 206:2014).....	2
Tabelle 2 Expositionsklasse XC (ÖNORM B 4710-1:2007) .....	2
Tabelle 3 Expositionsklasse XC (ÖNORM B 4710-1:2018) .....	3
Tabelle 4 Expositionsklasse XW (ÖNORM B 4710-1:2018) .....	3
Tabelle 5 Auszug aus Tabelle NAD 10 (ÖNORM B 4710-1:2007): Grenzwerte für die Zusammensetzung .....	15
Tabelle 6 Auszug aus Tabelle 23 (ÖNORM B 4710-1:2018): Grenzwerte für die Zusammensetzung (XC).....	15
Tabelle 7 Auszug aus Tabelle 23 (ÖNORM B 4710-1:2018): Grenzwerte für die Zusammensetzung (XW).....	15
Tabelle 8 Auszug aus Tabelle 2 (ÖNORM B 1992-1-1): Anforderungen für die Mindestbetondeckung im Rahmen der Dauerhaftigkeit für Betonstahl .....	16
Tabelle 9 Auszug aus Tabelle 7 (ÖNORM B 1992-1-1:2011): Werte für $w_{\max}$ (Rissbreite).....	16
Tabelle 10 Auszug aus Tabelle 17 (ÖNORM B 1992-1-1:2011): Indikative Mindestfestigkeitsklassen.....	16
Tabelle 11 Zusammenfassung ONR CEN/TS 12390-12:2010.....	19
Tabelle 12 Zusammenfassung ÖNORM EN 13295:2004 .....	20
Tabelle 13 Auszug aus Tabelle B1-1 (fib): Geplante Nutzungsdauer .....	21
Tabelle 14 Zusammenfassung fib Model Code for Service Life Design 2006.....	23
Tabelle 15 Zusammenfassung SIA 262/1 Anhang I.....	25
Tabelle 16 Zusammenfassung Cementbulletin August 1988.....	26
Tabelle 17 Prüfverfahren: Lagerungsdauer .....	29
Tabelle 18 Prüfverfahren: Vorlagerung .....	29
Tabelle 19 Prüfverfahren: Nullmessung.....	31
Tabelle 20 Prüfverfahren: Ergebnis .....	31
Tabelle 21 Grenzwerte für $K_{NAC}$ nach SIA 262/1:2013.....	35
Tabelle 22 Betonzusammensetzung SOLL.....	38
Tabelle 23 Chemische Analyse: RDA (Analyse 1) .....	41
Tabelle 24 Chemische Analyse: RFA (Analyse 1) .....	42
Tabelle 25 Chemische Analyse nach ONR 29196-4 (Analyse 2).....	42
Tabelle 26 Unterschiede Betonvarianten .....	45
Tabelle 27 Frischbeton: Prüfungsergebnisse.....	49
Tabelle 28 Beton: Rezepturkennwerte .....	50
Tabelle 29 Mittlere Karbonatisierungstiefen und Standardabweichung der Betonsorten .....	55
Tabelle 30 Karbonatisierungstiefe mit Standardabweichung .....	56
Tabelle 31 Ergebnis: Druckfestigkeit.....	59
Tabelle 32 Einteilung: Festigkeitsklassen .....	60
Tabelle 33 Ergebnisse: Porosität 28d .....	65

Tabelle 34 Ergebnisse: Porosität 190d .....	65
Tabelle 35 Wasseraufnahmeverlauf .....	66
Tabelle 36 Mittlere Wassereindringtiefe .....	66
Tabelle 37 Überprüfung WU von XC1-CEMA .....	67
Tabelle 38 Karbonatisierungskoeffizient beschleunigt $K_{ACC,2\%}$ .....	69
Tabelle 39 Karbonatisierungskoeffizient beschleunigt: Vergleich .....	71
Tabelle 40 Atomare Masse: Elemente .....	77
Tabelle 41 Klinkerminerale .....	77
Tabelle 42 $w/CaO_{reactive}$ Variante RDA .....	78
Tabelle 43 $W/CaO_{reactive}$ Variante ONR 29196-4 (Analyse 2) .....	79
Tabelle 44 $K_{NAC}$ Mittelwerte & Standardabweichung mit hochgerechneten Karbonisierungstiefen .....	81
Tabelle 45 $K_{NAC,max}$ mit hochgerechneten Karbonisierungstiefen .....	81
Tabelle 46 Berechnete Karbonisierungstiefen abhängig von der Einwirkungsdauer .....	84
Tabelle 47 Mindestbetonüberdeckung (Auszug aus Eurocode 2 & SIA 262:2013) .....	85
Tabelle 48 Berechnete mittlere Karbonisierungstiefen ( $\gamma_f=1,5$ ) .....	86
Tabelle 49 Berechnete mittler Karbonisierungstiefen ( $\gamma_f=1,25$ ) .....	86

## 1 Einleitung

Alle Bauwerke werden für eine bestimmte Nutzungsdauer ausgelegt: diese reichen von einer Nutzungsdauer von zehn Jahren bei Tragwerken mit befristeter Standzeit bis zu 200 Jahren bei z. B. Infrastrukturprojekten (ÖNORM EN 1990:2013). Damit die verwendeten Baustoffe diese Dauer überstehen, müssen sie ihrem Verwendungszweck entsprechend ausgewählt werden.

Im Falle von Beton muss eine Sorte bzw. Zusammensetzung so gewählt werden, dass die festgelegten Anforderungen an Frischbeton und Festbeton einschließlich Dauerhaftigkeit erfüllt werden. Bisher wurden die Anforderungen auch an die Dauerhaftigkeit erreicht, indem per Definition Kennwerte der Betonzusammensetzung in der gültigen Norm (in Österreich: ÖNORM B 4710-1:2007)<sup>1</sup> wie der Mindestbindemittelgehalt, maximaler W/B-Wert (Verhältnis Wasser/anrechenbarer Bindemittelgehalt) u.a. eingehalten werden müssen. Aus der langjährigen Erfahrung wird davon ausgegangen, dass so eine ausreichende Dauerhaftigkeit bei fachgerechter Ausführung und Nachbehandlung sichergestellt werden kann. Dem gegenüber steht das performance-based-design Konzept. Dabei werden klar definierte Eigenschaften oder „Leistungsmerkmale“ in Bezug auf alle wesentlichen Eigenschaften (auch im Hinblick auf Dauerhaftigkeit) eines Betons definiert und geprüft. Auf Grund der Ergebnisse wird die Betonmischung klassifiziert.

Ziel der Masterarbeit ist die Gegenüberstellung und Diskussion von Prüfverfahren bzw. Vorschriften zur Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes. Weiters die Durchführung von Prüfungen an typischen Transportbetonen. „Typisch“ meint, dass 8 Standardfälle von Betonzusammensetzungen in Österreich unterschieden werden (zusammengestellt vom Güteverband Transportbeton).

Letztlich soll die „Performance“ der unterschiedlichen Betone abhängig von ihrer Zusammensetzung beurteilt werden und zudem sollen die Prüfverfahren hinsichtlich ihrer Eignung zur Abbildung des potenziellen Karbonatisierungswiderstandes eingeschätzt werden. Korrelationen zwischen Karbonatisierung und Gefüge-Kennwerten sollen gesucht werden.

---

<sup>1</sup> Bzw. ÖNORM B 4710-1:2018 Normen Neuausgabe ist seit 1.1.2018 gültig. Da die Arbeit aber im Jahr 2017 erstellt wurde, wird die damals gültige ÖNORM B 4710-1:2007 verwendet.

## 2 Karbonatisierung von Beton

Um die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit des Betons zu definieren, werden die Einwirkungen aus der Umgebung in Expositionsklassen eingeteilt. Eine dieser Expositionsklassen beschreibt die Bewehrungskorrosion, ausgelöst durch Karbonatisierung (aus ÖNORM EN 206:2014):

Tabelle 1 Expositionsklasse XC (ÖNORM EN 206:2014)

Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, Luft und Feuchtigkeit ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:		
Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Zuordnung von Expositionsklassen
XC1	Trocken oder ständig nass	Beton in Gebäuden mit geringer Luftfeuchte, der ständig in Wasser getaucht ist
XC2	Nass, selten trocken,	Langzeitig wasserbenetzte Betonoberflächen; vielfach bei Gründungen
XC3	Mäßige Feuchte	Beton in Gebäuden mit mäßiger oder hoher Luftfeuchte; vor Regen geschützter Beton im Freien
XC4	Wechselnd nass und trocken	Wasserbenetzte Betonoberflächen, die nicht der Klasse XC2 zuzuordnen sind

In Österreich sind die Anforderungen nach Tabelle 2 gültig.

Tabelle 2 Expositionsklasse XC (ÖNORM B 4710-1:2007)

Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, Luft und Feuchtigkeit ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:			
Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung		Zuordnung von Expositionsklassen
	Luftfeuchte	Wasserandrang	
XC1	Trocken oder ständig nass	-	Beton in Gebäuden im Wohn- und Bürobereich (einschließlich Küche, Bad und Waschküche in Wohngebäuden); permanent dem Wasser ausgesetzte Bauteile, z. B. Fundamente ständig im Grundwasser
XC2	Nass, selten trocken, mäßige Feuchte, wechselnd nass und trocken	nicht drückendes Wasser oder wechselnder Grundwasserspiegel 0 m bis 2 m	Innenräume mit hoher Luftfeuchtigkeit, z. B. in gewerblichen Küchen, Bädern, Wäschereien, in Feuchträumen von Hallenbädern, in Viehställen; Fundamente; Bauwerke in nicht drückendem Grundwasser (ohne Anforderungen an die Undurchlässigkeit); sonstige Bauteile im Freien
XC3	in Österreich Zuordnung nach Wasserandrang (Luftfeuchte nicht relevant)	Wasserdruckhöhe bis 10 m (ÖNORM B 3303): 50 mm Eindringtiefe	Wasserbauten und dichte Betonbauwerke, die mäßigem Wasserdruck ausgesetzt sind
XC4	in Österreich Zuordnung nach Wasserandrang (Luftfeuchte nicht relevant)	Wasserdruckhöhe über 10 m (ÖNORM B 3303): 25 mm Eindringtiefe	Wasserbauten und dichte Betonbauwerke, die hohem Wasserdruck ausgesetzt sind

In der ÖNORM B 4710-1:2018 werden die Betonklassen abgeändert und der Europäischen Norm (EN 206:2014) angeglichen:

Tabelle 3 Expositionsklasse XC (ÖNORM B 4710-1:2018)

Wenn Beton, der Bewehrung oder anderes eingebettetes Metall enthält, Luft und Feuchtigkeit ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:		
Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Zuordnung von Expositionsklassen
XC1	Trocken oder ständig nass	Beton in Gebäuden mit geringer Luftfeuchte (Wohn- und Bürobereich (einschließlich Küche, Bad und Waschküche in Wohngebäuden)): Beton der ständig in Wasser getaucht ist, z. B.: Fundamente ständig im Grundwasser
XC2	Nass, selten trocken,	Langzeitig wasserbenetzte Betonoberflächen; vielfach bei Gründungen, zB Fundamente im Grundwasserwechselbereich
XC3	Mäßige Feuchte	Beton in Gebäuden mit mäßiger oder hoher Luftfeuchte, zB gewerbliche Küchen, Bäder, Wäschereien, Viehställen, offene Hallen und Feuchträume; vor Regen geschützter Beton im Freien
XC4	Wechselnd nass und trocken	Wasserbenetzte Betonoberflächen, die nicht der Klasse XC2 zuzuordnen sind, z. B. Außenbauteile mit direkter Beregnung

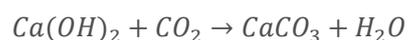
Für Wasserundurchlässigkeit (XC3, XC4 laut ÖNORM B 4710-1:2007) wird eine eigene Expositionsklasse XW erstellt:

Tabelle 4 Expositionsklasse XW (ÖNORM B 4710-1:2018)

Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Zuordnung von Expositionsklassen
XW1	Wasserdruckhöhe bis 10m	Wasserbauten und dichte Betonbauwerke, die mäßigem Wasserdruck ausgesetzt sind
XW2	Wasserdruckhöhe über 10m	Wasserbauten und dichte Betonbauwerke, die hohem Wasserdruck ausgesetzt sind

## 2.1 Prinzip

Bei der Karbonatisierung handelt es sich um eine chemische Reaktion des Portlandit (kristallines  $\text{Ca(OH)}_2$ , das in Lösung geht als  $\text{Ca}^{2+}$  und  $2 \text{OH}^-$ ) und der Alkalihydroxide des Betons mit dem Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) der Luft:



Laut (Stark and Wicht, 2013) besteht dieser Vorgang aus mehreren Zwischenstufen. Die drei wichtigsten Phasen werden anschließend erläutert.

### 2.1.1 Diffusion von CO<sub>2</sub> und Lösen des Portlandit

In dieser Phase laufen zwei Prozesse gleichzeitig ab: einerseits diffundiert das CO<sub>2</sub> der Luft durch die Poren in den Beton und zeitgleich löst sich das Calciumhydroxid im Wasserfilm in Kalzium- und Hydroxid-Ionen:



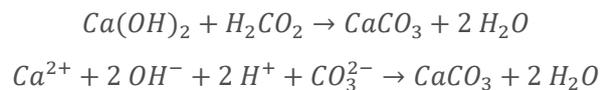
### 2.1.2 Reaktion des CO<sub>2</sub> im Feuchtfilm

Danach löst sich auch das diffundierte Kohlendioxid im Wasserfilm und reagiert zum Teil mit dem Wasser zu Kohlensäure, welches sich im Wasserfilm wiederum zu Wasserstoff- und Karbonat-Ionen dissoziiert:

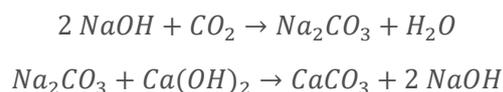


### 2.1.3 Neutralisation

Durch die Reaktion der in den vorigen Phasen entstandenen Stoffe entsteht nun das Kalziumkarbonat CaCO<sub>3</sub>:



Zeitgleich reagieren die Alkalihydroxide mit dem Kohlendioxid zu Alkalkarbonaten und diese in weiterer Folge mit dem gelösten Kalziumhydroxid zu Kalziumkarbonat und Alkalihydroxid:



## 2.2 Auswirkung auf den Beton

Durch die Karbonatisierung des Betons finden drei wesentliche Veränderungen statt (Stark and Wicht, 2013):

- Erhöhung der Dichtigkeit: Durch die Entstehung des Kalziumkarbonats ( $\Delta V=+11\%$ ) verringert sich das Gesamtporenvolumen lokal um 20 – 28% und die Festigkeit kann um 20 – 50 % zunehmen
- Senkung des pH-Wertes: Vor der Karbonatisierung hat die Porenlösung des Betons einen pH-Wert von etwa 13 danach senkt sich dieser auf ungefähr 9.
- Karbonatisierungsschwinden: bei der Karbonatisierungsreaktion wird zuvor gebundenes Wasser frei, was zu einer Volumsverringering führt (Schwinden)

Die Dichtigkeitszunahme ist ein positiver Nebeneffekt der Karbonatisierung.

Das Problem liegt in der Abnahme des pH-Wertes im Stahlbeton, da die passivierende Deckschicht des Betonstahls verloren geht und so der Stahl anfällig für Korrosion ist.

### 2.3 Zeitgesetz der Karbonatisierung

Der Karbonatisierungsverlauf lässt sich in allgemeiner Form wie folgt darstellen (Hunkeler, 2012a):

$$d_K = a + \sqrt{[CO_2]} K^* t^b$$

$d_K$	Karbonatisierungstiefe, mm
$a$	Konstante (Nullwert: Karbonatisierungstiefe zum Zeitpunkt $t=0$ ), mm
$K^*$	Karbonatisierungskoeffizient, mm/Tag <sup>b</sup> oder mm/Jahr <sup>b</sup> [Anm.: ohne $CO_2$ -Berücksichtigung – „reiner“ Karbonatisierungskoeffizient]
$t$	Zeit, Tage oder Jahre
$b$	Zeitexponent
$CO_2$	Kohlendioxidgehalt; Vol.-%

Der Zeitexponent  $b$  kann, je nach Umgebungsbedingung, folgende Werte annehmen:

$b = 0,5$	konstante Bedingung (Labor-, Innenlagerung) mit Teilsättigung der Poren
$b < 0,5$	wechselnd trocken feucht/nass (unbewitterte, d. h. vor Regen geschützter Außenlagerung)
$b \rightarrow 0$	feucht/nass (bewitterte Außenlagerung)
$b \rightarrow 0$	sehr trocken (Wassermangel)

Bei feuchten/nassen und sehr trockenen Bedingungen findet kaum der Karbonatisierungsprozess statt, da bei zu viel Feuchtigkeit der  $CO_2$ -Transport sehr stark behindert wird und bei zu trockenen Bedingungen die Lösung des Portlandit (1. Phase) nicht stattfindet

Mit Hilfe des Karbonatisierungskoeffizienten kann man das Karbonatisierungsverhalten eines Betons über die Zeit bzw. die Karbonatisierungsgeschwindigkeit beschreiben (je größer, desto schneller karbonatisiert der Beton).

In weiterer Folge wird, der Einfachheit halber, der Konstante CO<sub>2</sub>-Gehalt in den Karbonatisierungskoeffizient reingerechnet:

$$d_K = a + K t^b$$

## 2.4 Einflussfaktoren

Eine grobe Einteilung der Einflussfaktoren der Karbonatisierung von Beton kann wie folgt vorgenommen werden (Stark and Wicht, 2013):

- CO<sub>2</sub>-Konzentration
- Umgebungsbedingungen:
  - ◆ Feuchtigkeit
  - ◆ Temperatur und thermodynamische Aspekte
- Betonzusammensetzung & Betonqualität:
  - ◆ w/z-Wert
  - ◆ Zementart
  - ◆ Gesteinskörnung
  - ◆ Einbau & Nachbehandlung
  - ◆ Art und Gehalt der Zusatzstoffe

### 2.4.1 CO<sub>2</sub>-Konzentration

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration spielt laut (Hunkeler, 2012a) eine große Rolle, die dort mit diesem theoretischen Beispiel erklärt wird:

Auf Grundlage des Zeitgesetzes der Karbonatisierung werden zwei Gleichungen, eine mit natürlichem CO<sub>2</sub>-Gehalt, die andere mit erhöhtem CO<sub>2</sub>-Gehalt erstellt (Annahme: a = 0 (keine Anfangskarbonatisierung)):

$$d_N = K_N \sqrt{t_N} \quad \text{natürlicher CO}_2\text{-Gehalt} \quad (\text{Glg. 1})$$

$$d_S = K_S \sqrt{t_S} \quad \text{erhöhter CO}_2\text{-Gehalt} \quad (\text{Glg. 2})$$

d<sub>N</sub>, d<sub>S</sub> Karbonisierungstiefe unter natürlichen bzw. beschleunigten Bedingung, mm

K<sub>N</sub> Karbonisierungskoeffizient unter natürlichen Bedingungen, mm/Tag<sup>1/2</sup> oder mm/Jahr<sup>1/2</sup>; mit  $K_N = K \sqrt{[CO_2]_N}$

$K_S$  Karbonatisierungskoeffizient unter beschleunigten Bedingungen, mm/Tag<sup>1/2</sup> oder mm/Jahr<sup>1/2</sup>; mit  $K_S = K \sqrt{[CO_2]_S}$

$t_N, t_S$  Zeit für die normale bzw. beschleunigte Karbonatisierung, Tage oder Jahre

Für  $t_N = t_S$  gilt:

$$B_{K,theor} = \frac{d_S}{d_N} = \frac{K_S}{K_N} = \sqrt{\frac{[CO_2]_S}{[CO_2]_N}}$$

$B_{K,theor}$ : theoretischer Beschleunigungsfaktor für den Karbonatisierungskoeffizienten

Durch Gleichsetzen der Gleichungen (Glg. 1) & (Glg. 2) kann ein Beschleunigungsfaktor ermittelt werden. Dieser Einfluss wird bei Prüfungen des Karbonatisierungswiderstandes mit einem beschleunigten Verfahren zu Nutzen gemacht. Anhand von Experimenten wurde der Einfluss der CO<sub>2</sub>-Konzentration z. B. in (Hunkeler, 2012a; Cui *et al.*, 2015; Leemann and Moro, 2017) überprüft. Siehe auch Kapitel 3.6.2.

Bei (Cui *et al.*, 2015) wurde festgestellt, dass die Karbonatisierungstiefe bei niedrigen CO<sub>2</sub>-Gehalten (bis 20%) größer wird, je höher die CO<sub>2</sub>-Konzentration ist.

Erhöhungen ab 20% führen zu kaum merkbar Unterschieden (siehe Abbildung 1). Gleichzeitig wirkt sich die hohe CO<sub>2</sub>-Konzentration auch auf die Mikrostruktur im Beton aus, womit sich der Karbonatisierungswiderstand bei natürlichem CO<sub>2</sub>-Gehalt nicht mehr herleiten lässt.

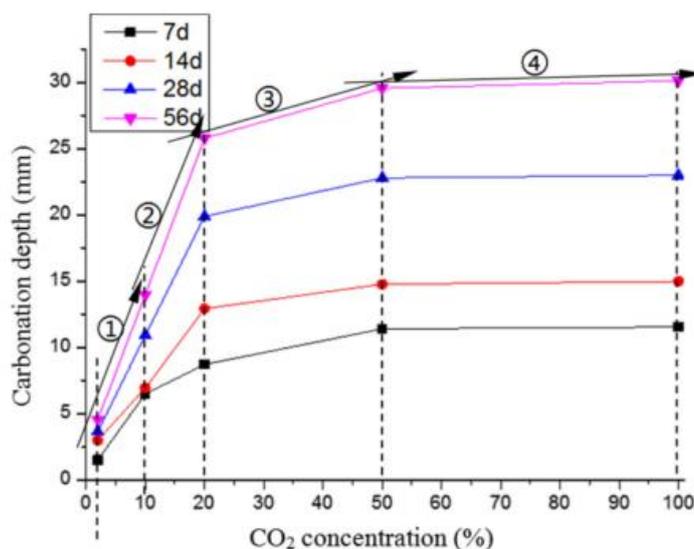


Abbildung 1 Karbonatisierungstiefe einer Probe zu unterschiedlichen Zeiten mit unterschiedlicher CO<sub>2</sub>-Konzentrationsbeanspruchung (aus (Cui *et al.*, 2015))

Laut (Hunkeler, 2012a; Leemann and Moro, 2017) sind bei Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes Erhöhungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration bis 4% geeignet, um noch den natürlichen Bedingungen (ca. 0,04% CO<sub>2</sub> in der Umgebungsluft) zu entsprechen. Siehe auch Kapitel 3.6.2.

Der Model Code for Service Life Design (fib, 2006) erlaubt maximal 2% CO<sub>2</sub>, damit bei beschleunigter Prüfung keine Mineralbildungen entstehen, die nicht unter natürlichen Bedingungen entstehen, z.B.: kein Vaterit gebildet wird.

### 2.4.2 Umgebungsbedingungen

Die Einflüsse der Temperatur auf die Karbonatisierung sind laut (Stark and Wicht, 2013) gegensätzlich: einerseits nimmt die Löslichkeit des Portlandit und die thermodynamische Wahrscheinlichkeit für die Karbonatisierungsreaktion bei niedrigen Temperaturen zu, andererseits wird die CO<sub>2</sub>-Diffusion bei niedrigen Temperaturen durch weniger Molekularbewegung und erhöhter relativer Feuchtigkeit in den Poren verschlechtert. Bei (ISHIDA and LI, 2007) wurde festgestellt, dass die Karbonatisierung bei ca. 30°C am schnellsten fortschreitet (siehe Abbildung 2).

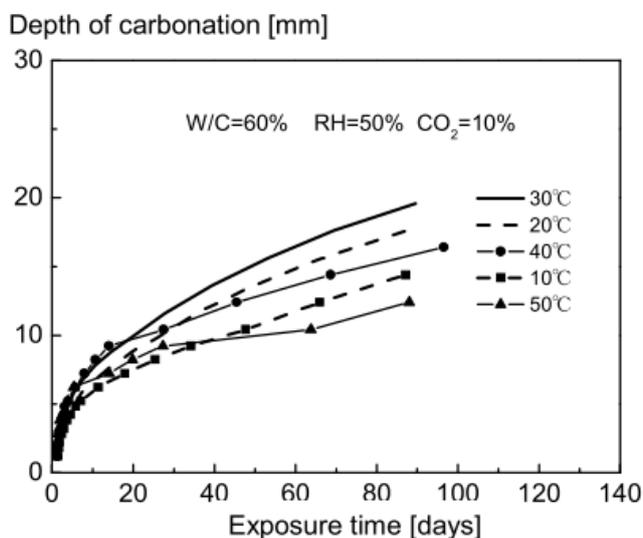


Abbildung 2 Zusammenhang: Temperatur - Karbonatisierungstiefe (aus (ISHIDA and LI, 2007))

Ein weiterer Faktor ist die Feuchtigkeit (Stark and Wicht, 2013): Ist kein Wasser vorhanden, kann der Karbonatisierungsprozess nicht ablaufen, ist zu viel Feuchtigkeit vorhanden, wird der Diffusionsprozess durch die Flüssigkeit behindert (Diffusionskoeffizient von CO<sub>2</sub>:  $1,5 \cdot 10^{-8} \text{ m}^2/\text{s}$  (Gas) zu  $0,8 \text{ bis } 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  (Wasser)). (Basheer *et al.*, 2001) stellte fest, dass der Karbonatisierungsprozess bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 55 bis 65% ein Maximum erreicht.

Wie man an dem Zeitgesetz der Karbonatisierung sehen kann, ist auch die Lagerungsart entscheidend (konstante Bedingungen, bewitterte/unbewitterte Außenlagerung), da nur für konstante Bedingungen das  $\sqrt{t}$ -Gesetz gilt.

### 2.4.3 Betonzusammensetzung & Betonqualität

Betonzusammensetzung und Betonqualität werden im Karbonatisierungskoeffizient widerspiegelt. Die maßgebenden Faktoren werden anschließend erläutert:

#### 2.4.3.1 W/Z-Wert & W/B-Wert

Der Wasser/Zement-Wert oder in weiterer Folge der Wasser/Bindemittel-Wert ist ein guter erster Anhaltspunkt, da durch ihn Rückschlüsse über die Gefügedichte gemacht werden können.

Der W/Z-Wert beschreibt das Massenverhältnis des anrechenbaren Wassergehalts zum Zementgehalt (ÖNORM B 4710-1:2007). Ein Beton mit  $380 \text{ kg/m}^3$  Zement und  $190 \text{ kg/m}^3$  anrechenbaren Wasser hat somit einen W/Z-Wert von 0,5 ( $380/190 = 0,5$ )

Werden nicht nur der Zement, sondern auch Zumahlstoffe des Typs II (puzzolanische oder latent hydraulische Zusatzstoffe) im Beton verwendet, spricht man vom Bindemittel. Für die Berechnung des Bindemittelgehalts ist der k-Wert-Ansatz notwendig (aus prÖNORM B 4710-1:2017):

*„Der k-Wert-Ansatz ist ein deskriptives Konzept. Er basiert auf dem Vergleich der Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Dauerhaftigkeit (oder, sofern zutreffend, auf dem Vergleich der Festigkeiten als Näherungskriterium für die Dauerhaftigkeit) eines Referenzbetons mit Zement „A“ und eines Prüfbetons, in dem der Zement „A“ teilweise durch einen Betonzusatzstoff in Abhängigkeit vom Wasserzementwert und dem Gehalt an Zusatzstoffen ersetzt wird.“*

Je nach Zumahlstoff, darf dieser also in die Berechnung des Bindemittelgehalts einfließen, wobei die maximale Zugabemenge begrenzt ist. Nach ÖNORM B 4710-1:2007 sind z. B. folgende k-Werte anzusetzen:

- $k = 0,2$  oder  $0,4$  für Flugasche nach ÖNORM EN 450 (alle Teile)
- $k = 0,8$  für hydraulisch wirksame aufbereitete Zusatzstoffe nach ÖNORM B 3309

Der anrechenbare Bindemittelgehalt setzt sich wie folgt zusammen:

$$\text{Bindemittel } (B_a) = \text{Zement} + k \cdot \text{Zusatzstoff}$$

Der gesamte Bindemittelgehalt hingegen ist die Summe aus Zement und Zumahlstoffen ( $k = 1,0$ ).

Bei W/B-Werten kleiner 0,4 bleiben keine mit Wasser oder Luft gefüllten Kapillarporen im Bindemittelstein, das laut (Stark and Wicht, 2013) praktisch keine Karbonatisierung bedeutet. Des Weiteren ist bei einem geringeren W/B-Wert auch mehr Zement im Beton vorhanden, das zu mehr Portlandit und C-S-H-Phasen führt, welches umgesetzt werden kann.

Bei größer werdenden W/B-Werten nimmt der Karbonatisierungskoeffizient zu, weil der Beton einerseits durch das überschüssig vorhandene Wasser poröser wird und andererseits weniger  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  gebildet wird.

#### 2.4.3.2 Zementart

In Österreich gibt es eine Vielzahl von unterschiedlichen Zementarten, die in ÖNORM EN197-1:2011 definiert sind. Hauptunterscheidungsmerkmal ist dabei der Anteil an Portlandzementklinker im Zement: So dürfen CEM I Zemente nur 5% andere Bestandteile als Portlandzementklinker enthalten, wobei hingegen CEM II Zemente bis 20% (CEM II/A) oder sogar 35% (CEM II/B) andere Bestandteile enthalten dürfen. Wenn mehr Klinker im Zement vorhanden ist, führt dies zu mehr Portlandit und somit im Allgemeinen zu einer besseren Widerstandsfähigkeit gegen Karbonatisierung.

Ein weiteres Unterscheidungsmerkmal ist, welche Zusatzstoffe im Zement – oder bezogen auf den Beton, welche Zusatzstoffe – enthalten sind: (Stark and Wicht, 2013) unterscheiden folgende drei Arten:

- latent hydraulische Stoffe, z. B.:
  - ◆ Hüttensand
- puzzolanische Stoffe, z.B.:
  - ◆ Flugasche
  - ◆ Silikastaub
- inerte Stoffe, z.B.:
  - ◆ Kalksteinmehl

Je nach Art des Zusatzstoffs kommt es zur Bildung von Hydratationsprodukten, die Festigkeitsbildend wirken bzw. die Porenstruktur im Beton verändern. (Stark and Wicht, 2013)

#### 2.4.3.3 Gesteinskörnung

Bei der Gesteinskörnung wird laut ÖNORM B 4710-1:2007 unterschieden in Normal- und Schwergesteinskörnung bzw. Leichtgesteinskörnung. Leichtgesteinskörnung ist auf Grund der Porosität des Materials anfälliger

für Karbonatisierung als Normal- und Schwergesteinskörnung (Stark and Wicht, 2013)

Bei Normalgesteinskörnung muss auch die Verwendung von Rundkorn oder Kantkorn beachtet werden, da dies Einfluss auf den Wasserbedarf bei der Herstellung hat und sich in weiterer Folge auf das Leimvolumen auswirkt. Betone mit Rundkorn benötigen auf Grund ihrer gedrungenen Form und meist glatten Oberfläche weniger Wasser als Kantkorn mit meist rauer Oberfläche und führen somit zu weniger Leimvolumen im Beton. Da Normalgesteinskörnung eine Barriere für den Karbonatisierungsprozess darstellt, führt somit weniger Leimvolumen zu einer erhöhten Widerstandsfähigkeit gegen Karbonatisierung.

Ein weiterer Einflussfaktor ist die Sieblinie der Gesteinskörnung. Diese wirkt sich wieder auf den Wasserbedarf bei der Betonherstellung aus und somit in weiterer Folge auf das Leimvolumen.

#### 2.4.3.4 Einbau & Nachbehandlung

Einbau und Nachbehandlung sind entscheidende Faktoren für die Karbonatisierung, sowie für den Betonbau allgemein. Beim Einbau ist insbesondere auf eine ausreichende Verdichtung zu achten, da zu wenig Verdichtung zu mehr Porosität im Beton führt. Laut (Gonen and Yazicioglu, 2007) nimmt damit auch die Karbonatisierung zu.

Eine ausreichende Nachbehandlung erhöht auch den Karbonatisierungswiderstand (Greve-Dierfeld, 2015; Hainer, Proske and Graubner, 2015), da dadurch einerseits der Beton in den Randbereichen dichter wird und andererseits die Hydratation besser abläuft, das zu mehr umsetzbaren Portlandit und C-S-H-Phasen führt. Eine ausreichende Nachbehandlung bedeutet, dass der junge Beton vor z.B. frühzeitiger Austrocknung oder anderen, den Hydratationsprozess störenden Faktoren, geschützt wird. Dies ist z.B. durch Abdecken mit Folien, in der Schalung belassen, mit Wasser besprühen oder ähnlichem möglich.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft den Einfluss der Nachbehandlungsdauer bei unterschiedlich langer Wasserlagerungsdauer bei Laborklima (20°C, 65% rel. Feuchte, 0,04 % CO<sub>2</sub>). Sämtliche Betone wurden wie folgt hergestellt:

- Größtkorndurchmesser: 8mm (Feinbeton)
- Zementleimgehalt: 42 Vol.-%

Die Zementarten wurden bei den Betonen abgeändert: B1 (CEM I 42,5 N, W/Z = 0,50), B3 (CEM II/B M (V-LL) 32,5 R, W/Z = 0,50), B4 (CEM III/B 42,5 N, W/Z = 0,50), B6 (CEM (50LL), W/Z = 0,35)

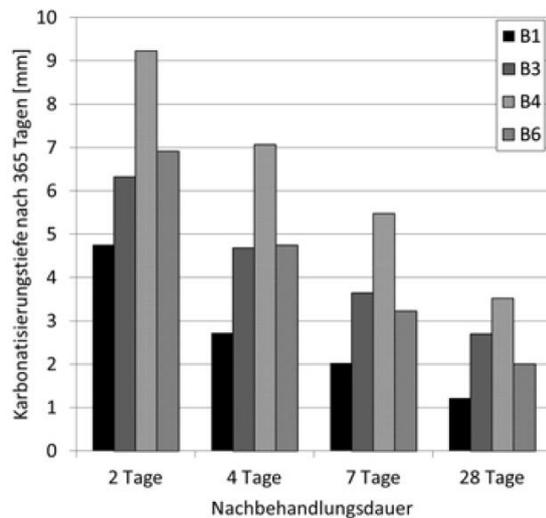


Abbildung 3 Einfluss der Nachbehandlungsdauer bei unterschiedlich langer Wasserlagerungsdauer (Hainer, Proske and Graubner, 2015)

#### 2.4.3.5 CaO-Gehalt und CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität

Bei (Leemann and Nygaard, 2014) wird der Begriff CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität eingeführt. Dieser wird durch das Verhältnis Wasser zu reaktivem oder reagiertem CaO im Bindemittel definiert, wobei es nicht von Bedeutung ist, ob das CaO im Portlandit oder in den C-S-H-Phasen vorkommt.

Der CaO-Anteil kann über eine RFA-Analyse bestimmt werden. Das gebundene CaO von inerten Kalksteinmehlen (CaCO<sub>3</sub>) darf dabei nicht berücksichtigt werden. Das reagierte CaO ist abhängig vom Hydratationsgrad  $\alpha$  des Betons, welcher aber nur schwer zu ermitteln ist. In (Leemann and Nygaard, 2014) wird der Hydratationsgrad mit  $\alpha = 0,84$  (w/z von 0,45) bis  $\alpha = 0,93$  (w/z von 0,60) nach 28 Tagen angenommen.

#### 2.4.4 Zusammenfassung

Wie in diesem Kapitel ersichtlich ist Karbonatisierung von Beton ein sehr komplexes Thema mit einer Vielzahl an Einflussfaktoren. Um den Beton nun ausreichend widerstandsfähig gegen Karbonatisierung zu machen, sind folgende Punkte ausschlaggebend:

- Dichtigkeit des Gefüges: Je dichter das Betongefüge ist, desto schwieriger ist es für das CO<sub>2</sub> in den Beton einzudringen
- Erhöhung des inneren Widerstandes: Damit ist die Menge an vorhandenem CaO im Beton gemeint. Je mehr Ca(OH)<sub>2</sub> oder C-S-H-Phasen vorhanden sind, desto mehr Kohlendioxid kann gebunden werden, desto langsamer verschiebt sich die Karbonatisierungsfront in den Beton.

- Verlängerung des Weges: Damit ist der Weg vom Rand bis zum Betonstahl gemeint (=Überdeckung). Je größer die Überdeckung, desto länger braucht die Karbonatisierungsfront bis sie beim Betonstahl angekommen ist.

### 3 Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes

#### 3.1 Design-Konzepte

Damit ein Stahlbetonbauteil ausreichend widerstandsfähig gegen Karbonatisierung wird, wird zurzeit das deskriptive design Konzept angewendet. Dies bedeutet, dass zur Erreichung der definierten Expositionsklasse verschiedene Parameter in der Rezeptur bzw. Zusammensetzung eingehalten werden müssen (z.B. maximaler W/B-Wert). Durch die Einhaltung dieser, aus Erfahrung festgelegten, Parameter wird normgemäß die Dauerhaftigkeit sichergestellt.

Neben dem deskriptiven design Konzept gibt es noch das performance-based design Konzept. Dabei wird ein Beton auf eine eindeutig nachweisbare Eigenschaft geprüft und damit eine bestimmte Dauerhaftigkeit festgestellt. Dies kann auf zwei unterschiedliche Arten erfolgen:

- Die Ergebnisse der Prüfung werden mit einem Referenzbeton, der mit dem deskriptiven design Konzept zusammengesetzt ist, verglichen (Equivalent concrete performance concept (ECPC) wie in ÖNORM EN 206-1:2013)
- Ausgehend von einem chemisch-physikalischen Modell wird eine bestimmte Lebensdauer des Beton oder Stahlbetonbauteils abgeschätzt.

Beispiele für das Performance-based design Konzept sind in (fib, 2006; Greve-Dierfeld, 2015) oder der SIA 262/1:2013.

#### 3.2 Einteilung laut ÖNORM

Wie in Kapitel 2 bereits erwähnt gibt es vier Expositionsklassen XC1 bis XC4 in Bezug auf die Bewehrungskorrosion zufolge Karbonatisierung, wobei in Österreich die Klassen XC3 und XC4 die Wasserundurchlässigkeit abdecken (ÖNORM B 4710-1:2007). Dafür wird es jedoch in der Ausgabe 2018 eine eigene Expositionsklasse (XW) geben (ÖNORM B 4710-1:2018). Um den Beton für die geforderte Expositionsklasse herzustellen, wird zurzeit ein deskriptives design Konzept angewendet. In Österreich sind insbesondere folgende Normen einzuhalten: ÖNORM B 4710-1:2007 und ÖNORM B 1992-1-1:2011. Seit 1.1.2018 gilt nun die ÖNORM B 4710-1:2018.

In ÖNORM B 4710-1:2018 sind Anforderungen an die Betonzusammensetzung aufgelistet. Um einen Beton mit einer bestimmten Expositionsklasse herzustellen, sind folgende Vorgaben einzuhalten:

- Der W/B-Wert des Betons darf eine gewisse Grenze nicht überschreiten

- Minimalwerte für den anrechenbaren Bindemittelgehalt dürfen nicht unterschritten werden
- Die Gesteinskörnung muss den Eigenschaften des NAD 6 entsprechen

In Tabelle 5 sind diese zusammengefasst.

Tabelle 5 Auszug aus Tabelle NAD 10 (ÖNORM B 4710-1:2007): Grenzwerte für die Zusammensetzung

	XC1	XC2	XC3	XC4
Max. W/B-Wert	0,70	0,65	0,60	0,50
Anrechenbarer Bindemittelgehalt min. (GK22)	260 kg/m <sup>3</sup>	260 kg/m <sup>3</sup>	280 kg/m <sup>3</sup>	300 kg/m <sup>3</sup>
Gesteinskörnung	Siehe Tab NAD 6			
Zement	Sämtliche CEM I, CEM II, CEM III Zemente verwendbar (bei CEM II/B-L, CEM III/A, CEM III/B ist der anrechenbare Mindest-Bindemittelgehalt um 20 kg/m <sup>3</sup> zu erhöhen)			

In der ÖNORM B 4710-1:2018 haben sich die Anforderungen wie in Tabelle 6 (XC) und Tabelle 7 ersichtlich geändert

Tabelle 6 Auszug aus Tabelle 23 (ÖNORM B 4710-1:2018): Grenzwerte für die Zusammensetzung (XC)

	XC1	XC2	XC3	XC4
Max. W/B-Wert	0,70	0,65	0,60	0,55
Anrechenbarer Bindemittelgehalt min. (GK22)	260 kg/m <sup>3</sup>	260 kg/m <sup>3</sup>	280 kg/m <sup>3</sup>	300 kg/m <sup>3</sup>
Gesteinskörnung	Siehe [ÖNORM B 4710-1:2018] Tabelle 14			
Zement	Sämtliche CEM I, CEM II, CEM III Zemente verwendbar (bei CEM II/B-L, CEM II/B-LL, CEM III/A, CEM III/B ist der anrechenbare Mindest-Bindemittelgehalt um 20 kg/m <sup>3</sup> zu erhöhen; bei CEM II/B-M für XC3 und XC4 B ist der anrechenbare Mindest-Bindemittelgehalt um 20 kg/m <sup>3</sup> zu erhöhen, wenn der CO <sub>2</sub> -Gehalt des Zements >10% ist)			

Tabelle 7 Auszug aus Tabelle 23 (ÖNORM B 4710-1:2018): Grenzwerte für die Zusammensetzung (XW)

	XW1	XW2
Max. W/B-Wert	0,60	0,50
Anrechenbarer Bindemittelgehalt min. (GK22)	280	300
Gesteinskörnung	Siehe [ÖNORM B 4710-1:2018] Tabelle 14	

In ÖNORM B 1992-1-1:2011 sind Anforderungen betreffend der Bemessung und konstruktiven Ausbildung von Betonbauteilen vorhanden. In Tabelle 8, Tabelle 9 und Tabelle 10 sind die Anforderungen aufgelistet.

Tabelle 8 Auszug aus Tabelle 2 (ÖNORM B 1992-1-1): Anforderungen für die Mindestbetondeckung im Rahmen der Dauerhaftigkeit für Betonstahl

	XC1	XC2/XC3/XC3
$c_{min,dur}$	15 mm	25 mm

Tabelle 9 Auszug aus Tabelle 7 (ÖNORM B 1992-1-1:2011): Werte für  $w_{max}$  (Rissbreite)

Bauteile aus Stahlbetonbau – Quasi-Ständige Einwirkungskombination	
XC1	0,4 <sup>a</sup>
XC2, XC3, XC4	0,3

<sup>a</sup> Bei den Expositionsklassen X0 und XC1 hat die Rissbreite keinen Einfluss auf die Dauerhaftigkeit und dieser Grenzwert wird zur Wahrung eines akzeptablen Erscheinungsbildes gesetzt. Fehlen entsprechende Anforderungen an das Erscheinungsbild, darf dieser Grenzwert erhöht werden.

Tabelle 10 Auszug aus Tabelle 17 (ÖNORM B 1992-1-1:2011): Indikative Mindestfestigkeitsklassen

	XC1	XC2	XC3	XC4
Beständigkeit: W/B	0,70	0,65	0,60	0,50
Beständigkeit LP	-	-	-	-
Indikative Festigkeitsklasse	16/20	20/25	25/30	30/37

Anmerkung: Bei Kombinationen mehrerer Expositionsklassen gilt jene Festigkeitsklasse, die sich bei dem höchsten Luftgehalt und dem geringsten W/B-Wert ergibt.

Wenn nun die geforderten Parameter eingehalten werden, ist der Beton für die jeweilige Expositionsklasse geeignet.

### 3.3 Definition des Karbonatisierungswiderstandes

Exakt beschrieben oder definiert wird der Karbonatisierungswiderstand in keiner ÖNORM, es wird immer nur die Vorgehensweise zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe erläutert. Dies ist insofern nicht ausreichend, da die Karbonatisierungstiefe nur eine Momentaufnahme darstellt und so Vergleiche erschwert werden. Einen Schritt weiter ist z. B. die SIA 262/1 Anhang I. In der Schweizer Norm wird aus der Karbonatisierungstiefe der beschleunigten und natürliche Karbonatisierungskoeffizient berechnet, wodurch Vergleiche und Einteilungen durchgeführt werden können.

Frau Greve-Dierfeld (Greve-Dierfeld, 2015) definiert den Begriff Karbonatisierungswiderstand wie folgt:

*„Der Carbonatisierungswiderstand repräsentiert sowohl den CO<sub>2</sub>-Diffusionswiderstand des carbonatisierten und teilcarbonatisierten Betons als auch seine CO<sub>2</sub>-Bindekapazität. [...] Der Carbonatisierungswiderstand wird ermittelt, indem Betone bei definierten Lagerungsbedingungen mit einer definierten CO<sub>2</sub>-Konzentration beaufschlagt, die Carbonisierungstiefe zu spezifischen Zeitpunkten gemessen, und daraus der Carbonatisierungswiderstand mit Gl. (7) [Anm.: Gl. (7) entspricht dem Zeitgesetz der Karbonatisierung in der Arbeit von Frau Greve-Dierfeld] berechnet wird.“<sup>2</sup>*

In dieser Definition sind alle wichtigen äußeren, umgebungsbedingten Einflussfaktoren zur Ermittlung des Karbonatisierungswiderstandes genannt:

- Lagerungsbedingungen = Vorlagerung, Nachbehandlung, Temperatur & relative Luftfeuchtigkeit
- CO<sub>2</sub>-Konzentration
- Zeitpunkte = Lagerungs- bzw. Prüfungsdauer

### 3.4 Prüfverfahren

In diesem Kapitel werden vorhandene Prüfverfahren zur Bestimmung der Karbonisierungstiefe und des Karbonatisierungswiderstandes aufgezählt und der Ablauf erklärt.

Anmerkung: Prüfverfahren für Bohrkerne werden nicht betrachtet (z.B.: SIA 262/1:2013 Prüfungsart TT-2 und TT-3)

#### 3.4.1 ONR CEN/TS 12390-12:2010 Entwurf

Die ONR CEN/TS 12390-12:2010 „Prüfung von Festbeton – Teil 12: Bestimmung des potentiellen Karbonatisierungswiderstandes von Beton: Beschleunigtes Karbonisierungsverfahren“ befindet sich noch im Entwurfstadium. In dieser Normenregel ist einerseits der Ablauf für Prüfungen am Würfel (einmalige Prüfung) und andererseits für Prismen (Prüfung zu mehreren Zeitpunkten) definiert:

---

<sup>2</sup> (Greve-Dierfeld, 2015), S. 23

### Betonwürfel:

*„Es werden zwei Betonwürfel nach EN 12390-2 gegossen und für eine Dauer von 28 Tagen nachbehandelt [Anm.: siehe Tabelle 11]. Anschließend werden die beiden Betonwürfel 14 Tage lang in einer Labor[luft]umgebung klimatisiert, worauf die Oberseite, die Unterseite und zwei einander gegenüberliegende Seitenflächen versiegelt werden. Nachdem bis auf zwei Seiten alle Seiten versiegelt wurden, werden die Würfel für eine Dauer von mindestens 70 Tagen in eine Lagerungskammer gegeben, in der die Luft einen Kohlenstoffdioxidgehalt von  $(4,0 \pm 0,5)$  %, eine Temperatur von  $(20 \pm 2)$  °C und eine relative Luftfeuchte von  $(55 \pm 5)$  % hat. Nach einer Beanspruchung von 70 Tagen werden die Würfel senkrecht zu den freiliegenden Seiten in zwei Hälften geteilt, und die Tiefe der Karbonatisierungsfront wird nach dem in der vorliegenden Technischen Spezifikation angegebenen und aus RILEM CPC-18 entnommenen Verfahren gemessen, woraus sich ein Einzelwert für die Karbonatisierungstiefe bei beschleunigter Karbonatisierung ergibt.“<sup>3</sup>*

### Betonprismen:

*„Falls Probekörper unterschiedlichen Alters zu prüfen sind, müssen Betonprismen verwendet werden. In diesem Falle werden zwei Prismen nach EN 12390-2 gegossen und für eine Dauer von 28 Tagen nachbehandelt [Anm.: siehe Tabelle 11]. Danach werden die Prismen 14-tage lang in einer Laborluftumgebung klimatisiert, worauf die Oberseite, die Unterseite und die beiden Stirnflächen versiegelt werden. Nachdem bis auf zwei Längsseiten alle Seiten versiegelt wurden, werden die Prismen für eine Gesamtdauer von mindestens 70 Tagen in eine Lagerungskammer gegeben, in der die Luft einen Kohlenstoffdioxidgehalt von  $(4,0 \pm 0,5)$  %, eine Temperatur von  $(20 \pm 2)$  °C und eine relative Luftfeuchte von  $(55 \pm 5)$  % hat. Nach jeder Beanspruchungsphase wird von jedem Prisma ein 50 mm dickes scheibenförmiges Stück abgebrochen und auf seine Karbonatisierungstiefe hin geprüft. Nach der Abspaltung einer Schreibe werden die abgespaltenen Stirnflächen der Prismen versiegelt und die verbleibenden Prismenteile wieder in die Lagerungskammer gegeben.“<sup>4</sup>*

---

<sup>3</sup> ONR CEN/TS 12390-12:2010 Entwurf Kapitel 4 Kurzbeschreibung

<sup>4</sup> ONR CEN/TS 12390-12:2010 Entwurf Kapitel 4 Kurzbeschreibung

Tabelle 11 Zusammenfassung ONR CEN/TS 12390-12:2010

Probekörper	2 Prismen: mind. 70x70x280 mm oder 2 Würfel: Kantenlänge mind. 100 mm
Vorlagerung	20 ± 4 h abgedeckt h in Form belassen 27 d Wasserlagerung 20 ± 2 °C 14 d Laborklima bei 18°-25°C, 50-65 % rel. LF
Vorlagerungsdauer	42 d
Temperatur KK	20 ± 2 °C
Rel. Luftfeuchtigkeit KK	55 ± 5 %
CO <sub>2</sub> -Konzentration KK	4,0 ± 0,5 %
Prüfzeitpunkte, -dauer	Prismen: 56d, 63d, 70d nach Einlagerung Würfel: 70d nach Einlagerung
Messung	Prismen: 5cm Scheibe abbrechen, Staub entfernen, mit Phenolphthaleinlösung besprühen und nach 1 h ± 15 min Messung beginnen: je Seite 5 Messungen
Karbonatisierungstiefe	Mittel aus 5 Messungen → Tiefe der Karbonatisierungsfront Mittel aus 2 Karbonatisierungsfronten → Tiefe des Probekörpers Mittel aus 2 Probekörper → Mittlere Karbonatisierungstiefe des Betongemischs
Lösung	1g Phenolphthalein-Pulver gelöst in Lösung aus 70ml Ethanol und 30ml entionisiertem Wasser
Anmerkung	Um den Kanteneffekt zu vermeiden werden 2 Längsseiten und die Stirnseiten mit Paraffinwachs abgedichtet (vor CO <sub>2</sub> -Lagerung)

### 3.4.2 ÖNORM EN 13295:2004

In ÖNORM EN 13295:2004 „Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken – Prüfverfahren – Bestimmung des Karbonatisierungswiderstands“ ist der Ablauf wie folgt definiert:

*„Der Karbonatisierungswiderstand eines Produkts oder Systems für die Instandsetzung wird mit einer beschleunigten Laborprüfung gemessen, bei der die Proben einer Umgebung mit einem Gehalt an CO<sub>2</sub> von 1 %, einer Temperatur von (21 ± 2) °C und einer relativen Luftfeuchte von (60 ± 10) % ausgesetzt werden.“*

[...]

*Die Karbonatisierungstiefe wird durch Aufbringen einer Phenolphthalein-Indikatorlösung auf ein frisch gebrochenes Stück des Probekörpers nach dem in 4.2 von prEN 14630:2003 angegebenen Verfahren gemessen. Derselbe Probekörper darf mehrmals zur Messung der zeitlichen Zunahme der Karbonatisierungstiefe verwendet werden, wobei für jede Messung jeweils eine dünne Scheibe abzutragen ist.“<sup>5</sup>*

<sup>5</sup> ÖNORM EN 13295:2004: Kapitel 4 Kurzbeschreibung

Tabelle 12 Zusammenfassung ÖNORM EN 13295:2004

Probekörper	2 Prismen: mind. 100x100x500 mm und 2 Kontrollbetone
Vorlagerung	Normallaborlima bei $21 \pm 2$ °C, $60 \pm 10$ % rel. LF
Vorlagerungsdauer	Solange, bis die Änderung des Gewichts innerhalb von 24 h weniger als 0,2 % beträgt, jedoch mind. 14 d
Temperatur KK	$21 \pm 2$ °C
Rel. Luftfeuchtigkeit KK	$60 \pm 10$ %
CO <sub>2</sub> -Konzentration KK	1,0 %
Prüfzeitpunkte, -dauer	0d, 56d nach Einlagerung
Messung	1,5 cm Scheibe abbrechen, Staub entfernen, mit Phenolphthaleinlösung besprühen und nach 1 h $\pm$ 5 min Messung beginnen: je Seite 5 (bzw. 3) Messungen
Karbonatisierungstiefe	Mittel aus 5 Messungen $\rightarrow$ Tiefe der Karbonatisierung (Seite) Mittel aus 4 Karbonatisierungstiefen (Seite) $\rightarrow$ Karbonatisierungstiefe des Probekörpers Mittel aus 2 Probekörper (wenn Differenz der Proben < 20%) $\rightarrow$ Mittlere Karbonatisierungstiefe des Betongemischs
Lösung	1g Phenolphthalein-Pulver gelöst in Lösung aus 70ml Ethanol und 30ml entionisiertem Wasser

### 3.4.3 fib Model Code for Service Life Design 2006

Der fib Model Code for Service Life Design beruht auf dem DuraCrete<sup>6</sup> und DARTS<sup>7</sup> Modell. Dabei wurde ein Ganz-Probabilistisches-Design Konzept entwickelt, dass die Betonüberdeckung der Bewehrung mit der Karbonatisierungstiefe zu einem bestimmten Betrachtungszeitpunkt vergleicht:

$$g(a, x_c(t)) = a - x_c(t)$$

$$g(a, x_c(t)) = a - \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_c \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot C_s \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)}$$

<sup>6</sup> DuraCrete – Probabilistic Performance Based Durability Design of Concrete Structures: Statistical Quantification of the Variables in the Limit State Functions. Report No.: BE 95-1347, pp. 62-63, 2000.

<sup>7</sup> DARTS – Durable and Reliable Tunnel Structures, European Commission, Growths 200, 2004.

$g(a, x_c(t))$	Differenz: Betonüberdeckung – Karbonatisierungstiefe zum Zeitpunkt t [mm]
$a$	Betonüberdeckung [mm]
$X_c(t)$	Karbonatisierungstiefe zum Zeitpunkt t [mm]
$t$	Zeit [Jahr]
$k_e$	Umweltfunktion [-]
$k_c$	Ausführungstransferparameter [-]
$k_t$	Regressionsparameter [-]
$R_{ACC,0}^{-1}$	Inverser effektiver Karbonatisierungswiderstand des Betons [(m <sup>2</sup> /s)/(kg/m <sup>3</sup> )]
$\epsilon_t$	Fehlerterm
$C_s$	CO <sub>2</sub> -Konzentration [kg/m <sup>3</sup> ]
$W(t)$	Wetterfunktion

Ziel ist es, dass die gewählte Betonüberdeckung für die gewählte Bemessungsdauer größer ist als die Karbonatisierungstiefe, damit keine Bewehrungskorrosion auftreten kann. Die Betonüberdeckung wird dabei als statistische Größe gesehen (MW = nominelle a [mm], STABW = 8-10 [mm])

Für die geplante Nutzungsdauer werden folgende Werte angegeben:

Tabelle 13 Auszug aus Tabelle B1-1 (fib): Geplante Nutzungsdauer

Geplante Nutzungsdauer	Beispiel
10	Temporäre Bauwerke
10-25	Austauschbare Tragwerksteile
15-30	Landwirtschaftlich genutzte und ähnliche Tragwerke
50	Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke
100	Monumentale Gebäude, Brücken und andere Ingenieurbauwerke

Die Umweltfunktion ist durch folgende Gleichung definiert:

$$k_e = \left( \frac{1 - \left( \frac{RH_{real}}{100} \right)^{f_e}}{1 - \left( \frac{RH_{ref}}{100} \right)^{f_e}} \right)^{g_e}$$

$RH_{real}$	Relative Luftfeuchtigkeit am Bauteil [%]; aus der nächsten Wetterstation
$RH_{ref}$	Referenz relative Luftfeuchtigkeit [%]; konstant: 65
$f_e$	Anpassungsparameter [-]; konstant: 5,0
$g_e$	Anpassungsparameter [-]; konstant: 2,5

Der Ausführungstransferparameter wird durch die Nachbehandlungsdauer bestimmt und durch folgende Gleichung beschrieben:

$$k_c = \left(\frac{t_c}{7}\right)^{b_c}$$

$t_c$	Nachbehandlungsdauer [Tage]
$b_c$	Parameter, Normalverteilt: MW = -0,567, STABW = 0,024

Der Ablauf zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe ist in fib Model Code for Service Life Design Kapitel B1.2.5.2 wie folgt beschrieben:

Es werden Probekörper mit den Maßen 100x100x500 mm hergestellt. Nach dem Ausschalen werden die Proben bis zum 7. Tag wassergelagert ( $T = 20 \text{ °C}$ ). Anschließend an die Wasserlagerung werden die Proben bei Normallaborlima ( $T = 20 \text{ °C}$ , 65 % rel. LF) für 21 weitere Tage gelagert. Ab dem Alter von 28 Tagen werden die Probekörper in einen  $\text{CO}_2$ -Schrank ( $T = 20 \text{ °C}$ , 65 % rel. LF, 2,0 %  $\text{CO}_2$ ) für 28 Tage gelagert. Nach dem Entfernen der Probekörper aus der  $\text{CO}_2$ -Kammer werden diese geteilt. Die Eindringtiefe wird mit einer Phenolphthaleinlösung bestimmt.

Mit Hilfe der Eindringtiefe und der folgenden Formel kann dann der inverse effektive Karbonatisierungswiderstand berechnet werden:

$$R_{ACC,0}^{-1} = \left(\frac{x_c}{\tau}\right)^2$$

$R_{ACC,0}^{-1}$	Inverser effektiver Karbonatisierungswiderstand des Betons [(m <sup>2</sup> /s)/(kg/m <sup>3</sup> )]
$\tau$	Zeitkonstante in [(s/kg/m <sup>3</sup> ) <sup>0.5</sup> ] für die beschriebenen Testbedingungen: $\tau = 420$
$x_c$	Gemessene Karbonatisierungstiefe [m]

Um die beschleunigte Karbonatisierung auf die natürliche Karbonatisierung umzurechnen wird folgende Formel benötigt:

$$R_{NAC,0}^{-1} = k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t$$

$R_{ACC,0}^{-1}$	Inverser effektiver Karbonatisierungswiderstand des Betons, beschleunigt [(m <sup>2</sup> /s)/(kg/m <sup>3</sup> )]
$R_{NAC,0}^{-1}$	Inverser effektiver Karbonatisierungswiderstand des Betons, natürlich [(m <sup>2</sup> /s)/(kg/m <sup>3</sup> )]
$k_t$	Regressionsparameter [-]: MW = 1,25; STABW = 0,35
$\varepsilon_t$	Fehlerterm [(mm <sup>2</sup> /Jahre)/(kg/m <sup>3</sup> )]: MW = 315,5; STABW = 48

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration lässt sich wie folgt berechnen:

$$C_S = C_{S,atm} + C_{S,emi}$$

C <sub>S</sub>	CO <sub>2</sub> -Konzentration [kg/m <sup>3</sup> ]
C <sub>S,atm</sub>	CO <sub>2</sub> -Konzentration der Atmosphäre [kg/m <sup>3</sup> ]: MW = 0,00082, STABW = 0,0001
C <sub>S,emi</sub>	Zusätzliche CO <sub>2</sub> -Konzentration wegen Emissionen [kg/m <sup>3</sup> ]: Für normale Gebäude: C <sub>S,emi</sub> = 0

Die Wetterfunktion spiegelt den Einfluss der direkten Befeuchtung wieder, dabei wird folgende Formel angewendet:

$$W = \left( \frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}}$$

t <sub>0</sub>	Referenzzeit [Jahre], konstant: 0,07676
ToW	Time of Wetness (Befeuchtungszeitraum) [-]
p <sub>SR</sub>	Schlagregenwahrscheinlichkeit [-]
b <sub>w</sub>	Regressionsexponent [-] MW = 0,446; STABW = 0,163

In Tabelle 14 werden die vorher beschriebenen Parameter zusammengefasst:

Tabelle 14 Zusammenfassung fib Model Code for Service Life Design 2006

Probekörper	Prisma: 100x100x500 mm
Vorlagerung	7d Wasserlagerung: 20°C 21d Laborklima: 20°C, 65% rel LF
Voralgerungsdauer	7+21= 28d
Temperatur KK	20°C
Rel. Luftfeuchtigkeit KK	65%
CO <sub>2</sub> -Konzentration KK	2,0%
Prüfzeitpunkte, -dauer	28d nach Einlagerung
Messung	Proben teilen, Bruchfläche mit Lösung besprühen, Eindringtiefe messen
Lösung	1g Phenolphthalein/Liter

### 3.4.4 SIA 262/1:2013 Anhang I

In SIA 262/1:2013 Anhang I „Prüfvorschrift für die Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes“ wird der Ablauf zur Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes wie folgt beschrieben:

Es wird ein Probekörper mit den Maßen 120x120x360 mm gemäß SN EN 12390-2 hergestellt. Nach dem Ausschalen werden die Proben bis zum 3. Tag ( $72 \pm 4$  h) wassergelagert. Anschließend an die Wasserlagerung können die Proben bis zum 10. Tag in einem geschützten, trockenen Innenraum zwischengelagert werden. Danach werden sie in einer Klimakammer bis zum 28. Tag vorgelagert (siehe Tabelle 15). Im Alter von 28 Tagen wird die Nullmessung durchgeführt, dann werden die Probekörper in einen CO<sub>2</sub>-Schrank gelagert. Nach 7, 28 und 63 werden die Probekörper aus der CO<sub>2</sub>-Kammer entfernt und die Eindringtiefe gemessen. Dazu wird eine ca. 5,0 cm dicke Scheibe abgespalten, diese wird von Staub und Resten gesäubert und mit einer Phenolphthaleinlösung gemäß SN EN 14630 besprüht. Nach dem Abtrocknen der Lösung wird die Karbonatisierungstiefe an 3 bis 5 Stellen je Seite gemessen. Aus den 3 bis 5 Messungen ergibt sich die mittlere Karbonatisierungstiefe je Seite. Aus den 4 Karbonatisierungstiefen je Seite wird die mittlere Karbonatisierungstiefe berechnet.

Mit Hilfe der Messungen und der folgenden Formel kann durch Regression der Karbonatisierungskoeffizient bei 4,0 % CO<sub>2</sub> berechnet werden:

$$d_{KM} = A + K_S \sqrt{t}$$

$d_{KM}$	Mittelwert der Karbonatisierungstiefe (pro Messtermin), [mm]
A	Konstante, [mm] [Anm.: Karbonatisierungstiefe bei Einlagerungsbeginn in CO <sub>2</sub> -Kammer]
$K_S$	Karbonatisierungskoeffizient bei 4,0 % CO <sub>2</sub> , [mm/Tag <sup>1/2</sup> ]
t	[Tage]

Aus dem Wert für  $K_S$  wird gemäß der folgenden Gleichung der Karbonatisierungskoeffizient  $K_N$  unter natürlichen Bedingungen (Annahme 0,04 % CO<sub>2</sub>) berechnet:

$$K_N = a \cdot b \cdot c \cdot K_S = 2,6 \cdot K_S$$

$K_N$	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

Mit dem ermittelten  $K_N$  kann die Betonmischung nun einer Expositions-kategorie zugeordnet werden

Tabelle 15 Zusammenfassung SIA 262/1 Anhang I

Probekörper	Prisma: 120x120x360 mm
Vorlagerung	Bis 72 ± 4h Wasserlagerung lt. SN EN 12390-2 Optional: für maximal 7 Tage Zwischenlagerung in einem geschützten trockenen Innenraum Spätestens ab dem 10. Tag bis zum 28.: Vorlagerung: 20 ± 2 °C, 57 ± 3 % rel. LF, mittlerer natürlicher CO <sub>2</sub> -Gehalt ≤ 0,15 Vol%
Vorlagerungsdauer	28d
Temperatur KK	20 ± 2 °C
Rel. Luftfeuchtigkeit KK	57 ± 3 %
CO <sub>2</sub> -Konzentration KK	4,0 ± 0,1 Vol%
Prüfzeitpunkte, -dauer	0d, 7d, 28d, 63d
Messung	5,0 cm Scheibe abbrechen, Staub entfernen, innerhalb einer Stunde mit Phenolphthaleinlösung besprühen und nach dem Trocknen der Lösung (einige Minuten) Messung beginnen: je Seite 3 bis 5 Messungen
Karbonatisierungstiefe	Mittel aus 3-5 Messungen → Tiefe der Karbonatisierung (Seite) Mittel aus 4 Karbonatisierungstiefen (Seite) → Karbonatisierungstiefe
Lösung	Gemäß SN EN 14630: 1 g Phenolphthalein in 70 ml Ethylalkohol gelöst und mit entionisiertem Wasser auf 100 ml verdünnt

### 3.4.5 Cementbulletin August 1988

Im Cementbulletin August 1988 wurde ein Schnellverfahren zur Beurteilung der Betonkarbonatisierung vorgestellt:

Die Form und Maße der Probekörper ist nicht beschränkt. Des Weiteren können die Oberflächen mit Paraffinwachs versiegelt werden, um unerwünschte Kanteneffekte zu minimieren. Nullmessungen können gemacht werden. Im Laborversuch wird die normale Atmosphäre durch reine Kohlendioxid mit einer relativen Feuchtigkeit von 75% ersetzt. Die Temperatur entspricht Zimmertemperatur. Die Lagerungsdauer beträgt 36 Tage. Danach werden die Probekörper mit einer Diamantscheibe aufgeschnitten und sofort mit Pressluft getrocknet. Anschließend kann mit dem Phenolphthaleintest die Eindringtiefe bestimmt werden.

Mit Hilfe der Eindringtiefe und der folgenden Gleichung kann der Karbonatisierungskoeffizient berechnet werden:

$$K = \frac{Y}{\sqrt{t}}$$

K	Karbonatisierungskoeffizient des Probestücks im Laborversuch (in mm · Jahr <sup>-0,5</sup> )
Y	Karbonatisierungstiefe (mm)
$\sqrt{t}$	= $(C_1/c_1 \cdot T)^{0,5} = 17,3 \text{ Jahre}^{0,5}$ für Versuchsanordnung
$C_1$	CO <sub>2</sub> -Gehalt im Laborversuch (g/m <sup>3</sup> )
$c_1$	CO <sub>2</sub> -Gehalt der Atmosphäre (g/m <sup>3</sup> )

Tabelle 16 Zusammenfassung Cementbulletin August 1988

Probekörper	Nicht beschränkt
Vorlagerung	Keine
Vorlagerungsdauer	0
Temperatur KK	Zimmertemperatur
Rel. Luftfeuchtigkeit KK	75%
CO <sub>2</sub> -Konzentration KK	100%
Prüfzeitpunkte, -dauer	36 Tage
Messung	Aufschneiden mit Diamantscheibe, sofortiges Trocknen mit Pressluft Ermittlung der Eindringtiefe mit Phenolphthaleintest

### 3.5 Unterschiede der Prüfverfahren

Im folgenden Kapitel werden die Unterschiede der einzelnen Prüfverfahren genannt und erläutert.

#### 3.5.1 Prüfungsparameter

##### 3.5.1.1 Temperatur

Die verwendeten Prüfungstemperaturen sind in Abbildung 4 ersichtlich. In vier von fünf Fällen wird 20°C als Prüftemperatur vorgegeben. Bei (ISHIDA and LI, 2007) wurde festgestellt, dass bei 30°C die Karbonatisierung schneller abläuft. 20°C kann aber als guter Wert angenommen werden.

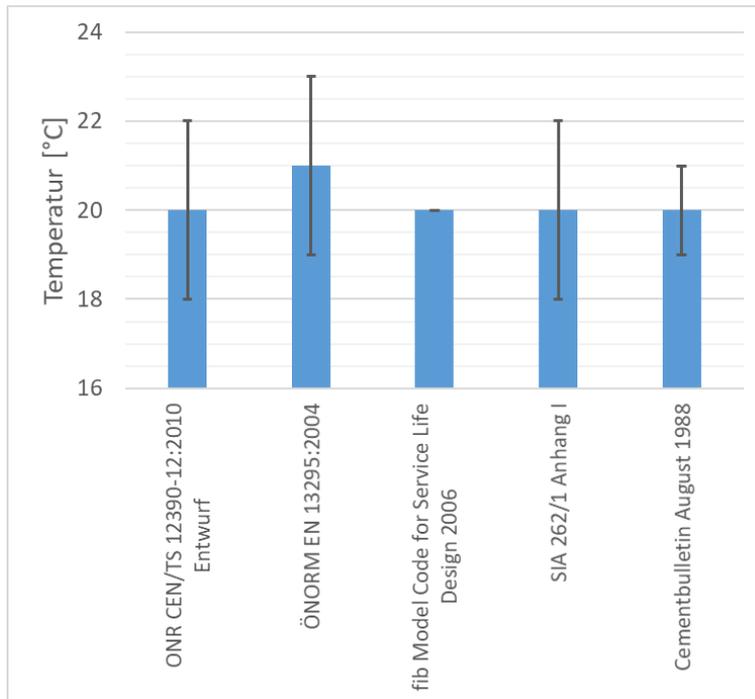


Abbildung 4 Prüfverfahren: Temperatur

### 3.5.1.2 Relative Luftfeuchtigkeit

Die verwendeten relativen Luftfeuchtigkeiten sind in Abbildung 5 ersichtlich. Vier von fünf Verfahren sind im optimalen Bereich von 55 – 65 % rel. LF (nach (Basheer *et al.*, 2001) angesiedelt. Das Verfahren nach Cementbulletin August 1988 ist mit 75 % rel. LF zu hoch.

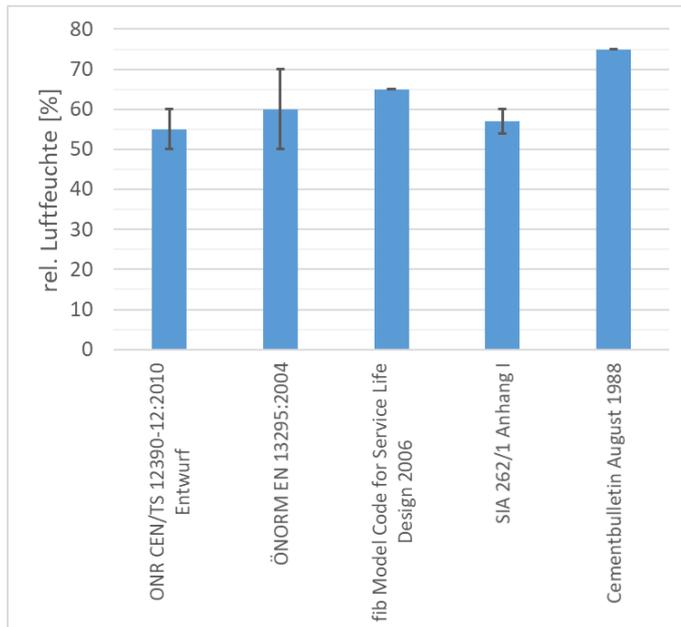


Abbildung 5 Prüfverfahren: relative Luftfeuchtigkeit

### 3.5.1.3 CO<sub>2</sub>-Konzentration

Die verwendeten CO<sub>2</sub>-Konzentrationen sind in Abbildung 6 ersichtlich. Das Verfahren nach Cementbulletin August 1988 ist mit 100 % CO<sub>2</sub> eindeutig zu hoch, wie in 2.4.1 angeführt bzw. begründet wurde.

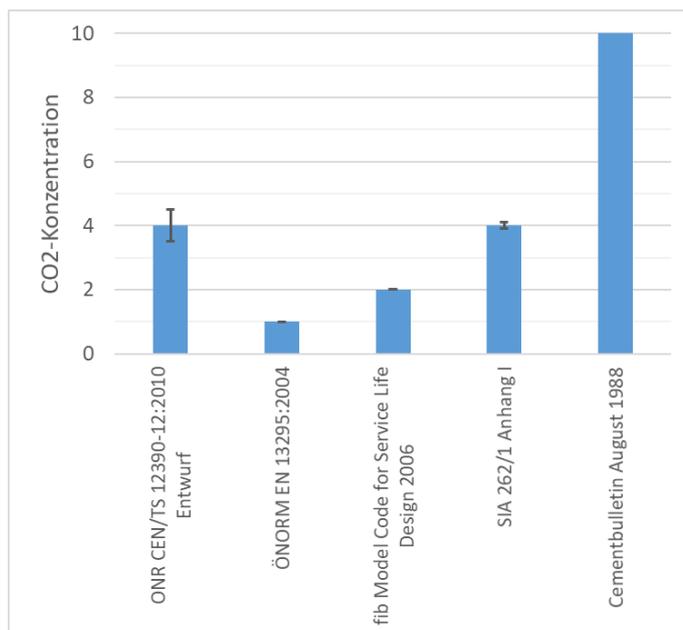


Abbildung 6 Prüfverfahren: CO<sub>2</sub>-Konzentration

### 3.5.1.4 Lagerungsdauer

Die Lagerungsdauer ist in Tabelle 17 ersichtlich.

Tabelle 17 Prüfverfahren: Lagerungsdauer

Prüfverfahren	Lagerungsdauer
ONR CEN/TS 12390-12:2010 Entwurf	Prismen: 56d, 63d, 70d Würfel: 70d
ÖNORM EN 13295:2004	0d, 56d
fib MC SLD 2006	28d
SIA 262/1 Anhang I	0d, 7d, 28d, 63d
Cementbulletin August 1988	36d

Grundsätzlich kann man zwischen Einzelmessung und Mehrfachmessung unterscheiden, wobei die Mehrfachmessung nach Meinung des Autors zu bevorzugen ist, da so der Karbonatisierungsverlauf ersichtlich wird und gegebenenfalls Abweichungen bzw. Ausreißer erkannt werden können. Des Weiteren sollten zu kurze Lagerungsdauern vermieden werden, da bei zu kleinen Eindringtiefen die Messwerte schwer erfassbar und nicht genau ablesbar sind (Eindringtiefen kleiner als Unregelmäßigkeiten des Verlaufs der Karbonatisierungsfront durch das inhomogene Betongefüge).

### 3.5.1.5 Vorlagerung

Die unterschiedlichen Vorlagerungsarten sind in Tabelle 18 und Abbildung 7 ersichtlich:

Tabelle 18 Prüfverfahren: Vorlagerung

Prüfverfahren	Vorlagerung
ONR CEN/TS 12390-12:2010 Entwurf	20 ± 4 h abgedeckt h in Form belassen 27 d Wasserlagerung 20 ± 2 °C 14 d Laborklima bei 18°-25°C, 50-65 % rel. LF
ÖNORM EN 13295:2004	Min. 14d Normallaborklima bei 21 ± 2 °C, 60 ± 10 % rel. LF
fib MC SLD 2006	7d Wasserlagerung: 20°C 21d Laborklima: 20°C, 65% rel LF
SIA 262/1 Anhang I	Bis 72 ± 4h Wasserlagerung lt. SN EN 12390-2 Optional: für maximal 7 Tage Zwischenlagerung in einem geschützten trockenen Innenraum Spätestens ab dem 10. Tag bis zum 28.: Vorlagerung: 20 ± 2 °C, 57 ± 3 % rel. LF, mittlerer natürlicher CO <sub>2</sub> -Gehalt ≤ 0,15 Vol%
Cementbulletin August 1988	Keine

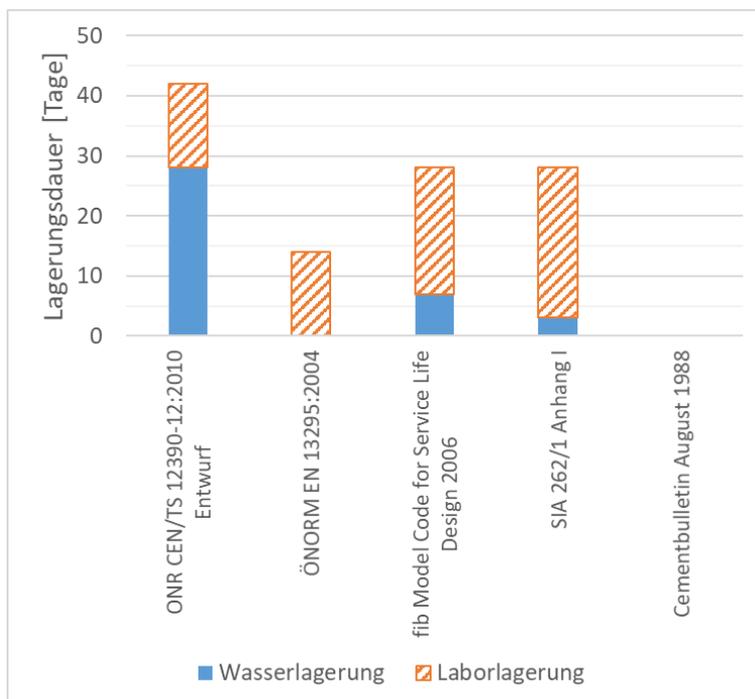


Abbildung 7 Prüfverfahren: Vorlagerung

Wie schon in 2.4.3.4 erwähnt beeinflusst die Nachbehandlungsdauer die Oberflächenbeschaffenheit und vor allem den Sättigungsgrad der Poren (Karbonatisierung findet nur bei Teilsättigung der Poren statt) und somit den Karbonatisierungswiderstand. Letztendlich darf aber nicht der Karbonatisierungswiderstand überschätzt (Hunkeler, 2012b; Leemann and Moro, 2017) und es muss auch die Praxis widerspiegelt werden. Somit ist die 28d Wasserlagerung bei ONR CEN/TS 12390-12:2010 zu lange.

### 3.5.2 Nullmessung

Die Nullmessung (Messung der Karbonatisierungstiefe vor Lagerung in CO<sub>2</sub>-Kammer) dient dazu den Karbonatisierungskoeffizient genauer zu bestimmen:

Der Karbonatisierungsverlauf aufgetragen über die  $\sqrt{\text{Zeit}}$  verhält sich bei Lagerung in der CO<sub>2</sub>-Kammer wie eine Gerade-Funktion. Wenn nun keine Nullmessung durchgeführt wird (die Gerade hat ihren Ursprung im Nullpunkt), dann kann der Karbonatisierungswiderstand unterschätzt werden.

Tabelle 19 Prüfverfahren: Nullmessung

Prüfverfahren	Nullmessung
ONR CEN/TS 12390-12:2010 Entwurf	Nein
ÖNORM EN 13295:2004	Ja
fib MC SLD 2006	Nein
SIA 262/1 Anhang I	Ja
Cementbulletin August 1988	Nein

### 3.5.3 Ergebnis der Prüfverfahren/Vergleichbarkeit

In Tabelle 20 sind die Ergebnisse der Prüfverfahren ersichtlich. Wichtig ist, ob diese Ergebnisse nur Vergleichswerte darstellen, oder ob damit eine Einteilung in eine Expositionsklasse z. B. über Hochrechnungen der Karbonatisierungstiefen für einen bestimmten Zeitpunkt gemacht werden können.

Tabelle 20 Prüfverfahren: Ergebnis

Prüfverfahren	Ergebnis
ONR CEN/TS 12390-12:2010 Entwurf	Karbonatisierungstiefe, Berechnung von $K_{NAC}$ möglich
ÖNORM EN 13295:2004	Karbonatisierungstiefe, Vergleich mit Kontrollprismen, Berechnung von $K_{NAC}$ möglich
fib MC SLD 2006	Karbonatisierungstiefe zum festgelegten Zeitpunkt, notwendige Betondeckung, Karbonatisierungskoeffizient beschleunigt $K_{ACC,2\%}$ , Berechnung von Karbonatisierungskoeffizient natürlich $K_{NAC,2\%}$
SIA 262/1 Anhang I	Karbonatisierungskoeffizient beschleunigt $K_{ACC,4\%}$ , Berechnung von Karbonatisierungskoeffizient natürlich $K_{NAC,4\%}$
Cementbulletin August 1988	Karbonatisierungskoeffizient beschleunigt

Mit dem Verfahren nach Cementbulletin August 1988 wird zwar ein beschleunigter Karbonatisierungskoeffizient ermittelt, dieser ist aber auf Grund der 100%  $CO_2$ -Konzentration nicht zur Berechnung eines natürlichen Karbonatisierungskoeffizienten geeignet.

Das Verfahren gemäß in Österreich gültigen Normen bzw. Normenentwürfen und dem Model Code ergeben nur Karbonatisierungstiefen, in Anlehnung an die SIA 262/1 können daraus Karbonatisierungskoeffizienten berechnet werden.

Mit der SIA 262/1 kann der natürliche Karbonatisierungskoeffizient berechnet werden und dann der Beton je nach definierter Nutzungsdauer in Expositionsklassen eingeteilt werden:

Mit dem Verfahren nach (fib, 2006) kann die Karbonatisierungstiefe zum festgelegten Zeitpunkt und in weiterer Folge so die nötige Betonüberdeckung berechnet werden.

Zurzeit sind Einteilungen in Expositionsklassen nur durch den natürlichen Karbonatisierungskoeffizienten in der SIA 262/1 vorgegeben. Andere Einteilungsversuche wurden z. B. bei (Greve-Dierfeld, 2015; von Greve-Dierfeld and Gehlen, 2016) gemacht.

### **3.6 Diskussion der Prüfverfahren**

Das Ziel sämtlicher Prüfverfahren ist immer dasselbe: Ermittlung der Karbonatisierungstiefe einer Probe mit einem beschleunigten Verfahren. Darauf aufbauend können in weiterer Folge ein beschleunigter und ein natürlicher Karbonatisierungskoeffizient berechnet werden, welche letztendlich Rückschlüsse auf die Karbonatisierungstiefe für einen bestimmten Zeitpunkt (in der Regel die geplante Nutzungsdauer) zulassen.

Damit dies geschehen kann, müssen folgende Parameter optimiert werden:

- Vorlagerung (Art und Dauer)
- Klima während der Prüfung (CO<sub>2</sub>-Gehalt, relative Luftfeuchtigkeit, Temperatur)
- Auswertung (Prüfungsdauer, Messungsanzahl, Probekörperanzahl)
- Umrechnung auf die geplante Nutzungsdauer/Einteilung in Expositionsklassen

#### **3.6.1 Vorlagerung/Nachbehandlung**

Die Nachbehandlung der Probekörper ist ein wesentlicher Faktor bei der Ermittlung des Karbonatisierungskoeffizienten. Wie in Kapitel 2 bereits erwähnt wurde, kann bei längerer Nachbehandlungsdauer die Hydratation länger ungestört ablaufen, was zu mehr umsetzbaren Portlandit und C-S-H-Phasen führt. Dies führt in Folge zu niedrigeren Karbonatisierungskoeffizienten. Bei zu kurzer Nachbehandlungszeit hingegen, trocknet der Beton frühzeitig aus und der Karbonatisierungswiderstand wird unterschätzt, was zu unwirtschaftlichen Bemessungen führt.

Ein weiterer Punkt bei der Nachbehandlung ist das Erreichen eines Teilsättigungszustandes im Beton, da nur dann Karbonatisierung stattfinden kann. Wenn nun Proben direkt aus der Wasserlagerung in den CO<sub>2</sub>-Schrank gelegt werden, muss zuerst überschüssiges Wasser verdampfen bevor der Karbonatisierungsprozess beginnen kann. Da dies von Beton

zu Beton unterschiedlich ist, werden so die Ergebnisse der Prüfung abgefälscht.

Die Vorlagerung soll daher aus einer Wasserlagerung und einer Laborlagerung (bei 55-65 % relativer Luftfeuchtigkeit) bestehen. Bei (Hunkeler, 2012a) und in weiterer Folge in der SIA 261/1:2013 wird der Vorschlag mit 3 Tagen Wasserlagerung und anschließend bis zum 28. Tag Laborlagerung gemacht, was vom Autor unterstützt wird.

In der eigenen Arbeit wurde wie in (fib, 2006) beschrieben und in Anlehnung an die Normenlagerung für Druckfestigkeitsproben die Proben 7 Tage unter Wasser und anschließend 21 Tage bei 65% relativer Luftfeuchtigkeit und 20°C gelagert.

### 3.6.2 Klima während der Prüfung

Das Klima während der Prüfung besteht aus den Einflussfaktoren CO<sub>2</sub>-Gehalt, Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit.

Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit regeln wieder das Erreichen eines Teilsättigungszustandes im Beton, wobei hingegen der CO<sub>2</sub>-Gehalt für die Beschleunigung der Karbonatisierungsprüfung verantwortlich ist.

Wie bereits in 3.5.1.1 & 3.5.1.2 erwähnt, liegt der optimale Bereich, um einen Teilsättigungszustand im Beton zu erreichen, bei 55 – 65 % rel. Luftfeuchtigkeit und 30°C. Da die 30°C für die Praxis aber zu hoch angesetzt sind, werden 20°C als empfohlene Temperatur und 65 % rel. Luftfeuchtigkeit vorgeschlagen.

Eine Steigerung des CO<sub>2</sub>-Gehalts ist nur so lange möglich, solange die grundlegende Beurteilung gleich bleibt. Dies ist, wie in Kapitel 2 erwähnt, bis ca. 4% möglich.

Unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Konzentrationen können, aufbauend auf dem Karbonatisierungsgesetz, wie folgt vereinfacht umgerechnet werden:

$$\frac{K_{S,1}}{K_{S,2}} = \sqrt{\frac{[CO_2]_{S,1}}{[CO_2]_{S,2}}} \rightarrow K_{S,1} = \sqrt{\frac{[CO_2]_{S,1}}{[CO_2]_{S,2}}} \cdot K_{S,2}$$

Laut (Hunkeler, 2012b) nimmt aber mit höheren CO<sub>2</sub>-Gehalt die Karbonatisierungsgeschwindigkeit ab, wodurch dieser Term um eine weitere Variable f ergänzt werden muss.

$$K_{S,1} = \sqrt{\frac{[CO_2]_{S,1}}{[CO_2]_{S,2}}} \cdot K_{S,2} \cdot f$$

mit  $f = \frac{f_2}{f_1}$

$f_1$  und  $f_2$  von 1,13 [1%] bis 1,31 [4%]CO<sub>2</sub> (Zwischenwerte linear interpoliert)

$f_1$	Faktor zur Berücksichtigung der verlangsamten Karbonatisierungsgeschwindigkeit ( $f_1=1$ bei natürlichem CO <sub>2</sub> -Gehalt)
$f_2$	Faktor zur Berücksichtigung der verlangsamten Karbonatisierungsgeschwindigkeit ( $f_2=1$ bei natürlichem CO <sub>2</sub> -Gehalt)

Mit dieser Gleichung können Proben, die mit unterschiedlichen CO<sub>2</sub>-Konzentrationen geprüft wurden, umgerechnet werden

### 3.6.3 Auswertung

Prüfungsdauer, Messungsanzahl und Probekörperanzahl beeinflussen den Karbonatisierungswiderstandes des Betons nicht, sondern erleichtern das Auswerten und Vergleichen der Ergebnisse.

Bei kurzer Prüfungsdauer, was zu geringer Karbonatisierungstiefe führt, wird die Messung der Eindringtiefe erschwert. Eine zu lange Prüfdauer widerspricht dem Sinn eines beschleunigten Verfahrens.

Um Ausreißer und Anomalien auszuschließen, ist es vorteilhaft mehrere Messungen (zu unterschiedlichen Zeitpunkten) an einem Probekörper durchzuführen.

Mehrere Probekörper ermöglichen es Fehler während Herstellung (z.B. Entmischung, Verdichtung) festzustellen.

Des Weiteren sind die Prüfverfahren selbst mit einer Ungenauigkeit versehen. Z.B.:

SIA 262/1:2013:

*„Bei Wiederholprüfungen mit zwei Betonen mit einem Karbonatisierungskoeffizienten von etwa 3 mm/Jahr<sup>0,5</sup> wurde eine Wiederholstandardabweichung < 0,1 mm/Jahr<sup>0,5</sup> gefunden. Bei Parallelprüfungen von mehreren Prismen und Bohrkernen des gleichen Betons, aber von verschiedenen Betonierterminen wurden Abweichungen zwischen den Karbonatisierungskoeffizienten unter 10% gefunden.“*

ONR CEN/TS 12390-12:2010:

*„Die Wiederholpräzision (r) der Messungen der Karbonatisierung beträgt 2,0 mm (mit einem Vertrauensniveau von 95%), wobei für die Wiederholpräzision eine Standardabweichung von 1,0mm gilt“*

Für die beiden erwähnten Verfahren stehen noch keine Daten zur Vergleichspräzision der Prüfung in ihrer Gesamtheit zur Verfügung.

### 3.6.4 Umrechnung auf die geplante Nutzungsdauer/Einteilung in Expositionsklassen

Nachbehandlung, Umgebungsbedingungen und Prüfungsdauer beeinflussen sowohl einzeln, als auch im Zusammenspiel die Umrechnung. Hier gilt es einen geeigneten Konsens zu finden, der eine Umrechnung ermöglicht, welche den geprüften Beton weder überschätzt (Bewehrungskorrosion), aber auch nicht unterschätzt (Wirtschaftlichkeit).

Leemann hat in (Leemann and Nygaard, 2014) folgendes angemerkt:

*„Wie aus der Literatur bekannt ist [Wierig, 1984 / Fatthudi, 1988 / Osborne, 1989 / Thomas, 1992, Hunkeler & Lamar, 2012], können bereits relativ kleine Unterschiede in der Nachbehandlung in den ersten Tagen nach Betonherstellung wesentliche Differenzen im Karbonatisierungskoeffizienten verursachen. Dabei hat in der Baupraxis neben dem Ausschalzeitpunkt auch das Wetter nach dem Ausschalen einen Einfluss. Deshalb wird der Faktor Nachbehandlung in der Realität immer mit einer grossen Unsicherheit behaftet sein.“<sup>8</sup>*

Diese Unsicherheiten gilt es zu beseitigen.

Von Nachteil ist auch, dass es noch keine verbindlichen internationalen Grenzwerte gibt. Es laufen aber Arbeiten, die diese definieren z.B. von Hunkeler („Untersuchungen zu langfristigen Karbonatisierung unter unbewitterten Aussenlagerungsbedingungen“)

Zurzeit werden in SIA 262/1:2013 folgende Grenzwerte definiert:

Tabelle 21 Grenzwerte für  $K_{NAC}$  nach SIA 262/1:2013

Nutzungsdauer	XC3	XC4
50 Jahre	5,0 mm/Jahr <sup>0.5</sup>	5,0 mm/Jahr <sup>0.5</sup>
100 Jahre	4,0 mm/Jahr <sup>0.5</sup>	4,5 mm/Jahr <sup>0.5</sup>

Bei (Greve-Dierfeld, 2015) und (fib, 2006) werden probabilistische Systeme angewendet.

### 3.6.5 Zusammenfassung & Diskussion

Im folgenden Kapitel werden die möglichen Verfahren diskutiert.

#### 3.6.5.1 ONR CEN/TS 12390-12:2010

Die 28 Tage Wasserlagerung bei ONR CEN/TS 12390-12:2010 sind zu lang, da einerseits die lange Nachbehandlungsdauer die Praxis nicht dar-

<sup>8</sup> (Leemann and Nygaard, 2014) S. 30.

stellt und andererseits womöglich die geprüften Betone überschätzt werden. Die anschließende Lagerung bei Laborbedingung ist empfehlenswert, da so eine Teilsättigung im Beton entstehen kann.

Der CO<sub>2</sub>-Gehalt mit 4% ist, sowie die Temperatur (20°C) und die relative Luftfeuchtigkeit (55%) passend.

Bei der Prüfung von Prismen sind 3 Messzeitpunkte vorgesehen, was eigentlich ein guter Wert ist, jedoch sind die Zeitpunkte, nach Sicht des Autors, zu nah, sodass kein Verlauf, sondern letztendlich wieder ein Punkt entsteht.

Bei diesem Verfahren werden zwei Probekörper empfohlen, was Fehler bei der Herstellung bemerkbar machen kann.

#### **3.6.5.2 ÖNORM EN 13295:2004**

Bei diesem Verfahren wird keine Wasserlagerung vorgeschrieben, was den Karbonatisierungswiderstandes des Betons unterschätzen kann. Des Weiteren ist die Dauer der Vorlagerung abhängig vom Massenverlust innerhalb 24 h, was die Vergleichbarkeit erschwert.

Die Umgebungsbedingungen sind in einem passenden Bereich, die CO<sub>2</sub>-Konzentration mit 1,0% kann höher ausfallen, wodurch die Prüfung beschleunigt werden kann.

Bei diesem Verfahren werden zwei Probekörper vorgeschrieben, was Fehler bei der Herstellung bemerkbar machen kann.

#### **3.6.5.3 fib Model Code for Service Life Design 2006**

Die Nachbehandlung, bestehend aus 7 Tage Wasserlagerung und 21 Tage Laborlagerung, ist sehr gut geeignet, um die benötigte Teilsättigung im Beton zu erreichen. Womöglich wird der Karbonatisierungswiderstand des Betons auf Grund der 7-tägigen Wasserlagerung überschätzt.

Die Umgebungsbedingungen sind in einem passenden Bereich, die CO<sub>2</sub>-Konzentration mit 2,0% kann höher ausfallen, wodurch die Prüfung beschleunigt werden kann.

Da nur eine Probe und eine Messung vorgenommen wird, können Fehler und Ausreißer nicht bzw. nur schwer (Erfahrung) bemerkt werden.

#### **3.6.5.4 SIA 262/1:2013**

Die Vorlagerung, bestehend aus 3 Tage Wasserlagerung und bis zum 28. Tag Laborlagerung, ist sehr gut geeignet, um die benötigte Teilsättigung im Beton zu erreichen.

Die Umgebungsbedingungen sind in einem passenden Bereich.

Da nur eine Probe und eine Messung vorgenommen wird, können Fehler und Ausreißer nicht bzw. nur schwer (Erfahrung) bemerkt werden.

#### **3.6.5.5 Cementbulletin August 1988**

Die Probekörper sind nicht definiert, es gibt keine Nachbehandlung, die rel. Luftfeuchtigkeit ist zu hoch, die CO<sub>2</sub>-Konzentration ist zu hoch.

#### **3.6.5.6 Fazit**

Von den 5 erklärten Verfahren sind entsprechend der Diskussion das Verfahren nach ÖNORM EN 13295:2004 und nach Cementbulletin August 1988 nicht zur Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes geeignet:

- Beim Cementbulletin August 1988 sind sämtliche Parameter außerhalb eines geeigneten Bereichs.
- Das Verfahren nach ÖNORM EN 13295:2004 scheidet aus, da die Vorlagerung erstens keine Wasserlagerung vorsieht (wodurch der Karbonatisierungswiderstand unterschätzt werden kann) und zweitens nicht einheitlich ist, sondern vom Massenverlust abhängig ist (keine Vergleichbarkeit).

Die anderen drei sind zur Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes geeignet.

Die Vergleichbarkeit von Ergebnissen der unterschiedlichen Verfahren ist aber nicht gegeben, da unterschiedliche Arten der Lagerung und Nachbehandlung (!) durchgeführt werden und infolge dessen unterschiedliche Karbonatisierungskoeffizienten ermittelt werden können.

In weiterer Folge müsste ein Standardvorlagerungsverfahren definiert werden, mit dem auch Grenzwertberechnungen für die jeweiligen Expositionsklassen durchgeführt werden.

## 4 Prüfungen an typischen Transportbetonen

Es wurden zwei verschiedene Betonsorten in vier verschiedenen Varianten mit dem Größtkorn 22 hergestellt. Diese acht Standardfälle spiegeln die typische Zusammensetzung von Transportbetonen wieder, die den überwiegenden Anteil der Produktion in Österreich ausmachen<sup>9</sup>. Die Zusammensetzungen wurden vom GVTB definiert und die Betone in einem akkreditierten Labor eines Mitgliedsbetriebes des GVTB (Bautech Labor GmbH Niederlassung Steiermark) hergestellt.

### 4.1 Zusammensetzung der Betonsorten

Die folgende Tabelle gibt einen Überblick über die Betonzusammensetzungen:

Tabelle 22 Betonzusammensetzung SOLL

Bezeichnung	Sorte	W/B	anrechenbarer Bindemittelgehalt $B_{\text{alkal}}$	Gesamtwasser $[\text{kg}/\text{m}^3]$	Zementgehalt $[\text{kg}/\text{m}^3]$	AHWZ-Gehalt $[\text{kg}/\text{m}^3]$	Gesteinskörnung	Zement	AHWZ $(k=0,8)$
XC1-NW-CEMA	XC1	0,7	260	182	216,7	54,2	NW	CEM II/A M(S-L) 42,5 N	20% $B_G$
XC1-HW-CEMA			286	200	238,1	59,5	HW	CEM II/A M(S-L) 42,5 N	20% $B_G$
XC1-NW-CEMB			260	182	260,0	0	NW	CEM II/B-M(S-L) 42,5 N	0%
XC1-HW-CEMB			286	200	285,7	0	HW	CEM II/B-M(S-L) 42,5 N	0%
XC3-NW-CEMA	XC3	0,6	280	168	233,3	58,3	NW	CEM II/A M(S-L) 42,5 N	20% $B_G$
XC3-HW-CEMA			333	200	277,8	69,4	HW	CEM II/A M(S-L) 42,5 N	20% $B_G$
XC3-NW-CEMB			280	168	280,0	0	NW	CEM II/B-M(S-L) 42,5 N	0%
XC3-HW-CEMB			333	200	333,0	0	HW	CEM II/B-M(S-L) 42,5 N	0%

<sup>9</sup> Lt. Auskunft vom GVTB machen die Sorten XC1 und XC3 ca. 40-50 % der Transportbetonmenge aus

Legende:

---

NW ... Gesteinskörnung mit niedrigem Wasseranspruch, geringes Leimvolumen

---

HW ... Gesteinskörnung mit hohem Wasseranspruch, hohes Leimvolumen

---

CEM A: CEM II/A M (S-L) 42,5 N + AHWZ → Bindemittel mit niedrigerem Klinkergehalt

---

CEM B: CEM II/B M (S-L) 42,5 N → Bindemittel mit höherem Klinkergehalt

---

AHWZ ... aufbereiteter hydraulisch wirksamer Zusatzstoff nach ÖNORM B 3309 mit hohem Hüttensandanteil

Die tatsächliche Bindemittelzusammensetzung ist in Tabelle 28 zu sehen.

Die Betonsorten XC1 und XC3, gemäß Expositionsklassen nach ÖNORM B 4710-1:2007, unterscheiden sich u. a. durch ihren W/B-Wert. Bei den Varianten wurde der Zusatzstoff (AHWZ) sowie die Gesteinskörnung variiert.

Bei der Gesteinskörnung mit dem Größtkorn 22 wird unterschieden in Gestein mit niedrigem und hohem Wasseranspruch. Das Gestein mit niedrigem Wasseranspruch ist ein Rundkorn aus dem Raum Untersiebenbrunn (Donaumaterial - quarzitisches), wo hingegen das Gestein mit hohem Wasseranspruch ein Kantkorn aus dem Raum Gradenberg (Schöckelkalk – karbonatisch) ist. Beide Sieblinien wurden an die Regelsieblinie B angepasst (siehe Abbildung 8 und Abbildung 9: Rote Linie = IST-Sieblinie; grün-strichliert = SOLL-Sieblinie).

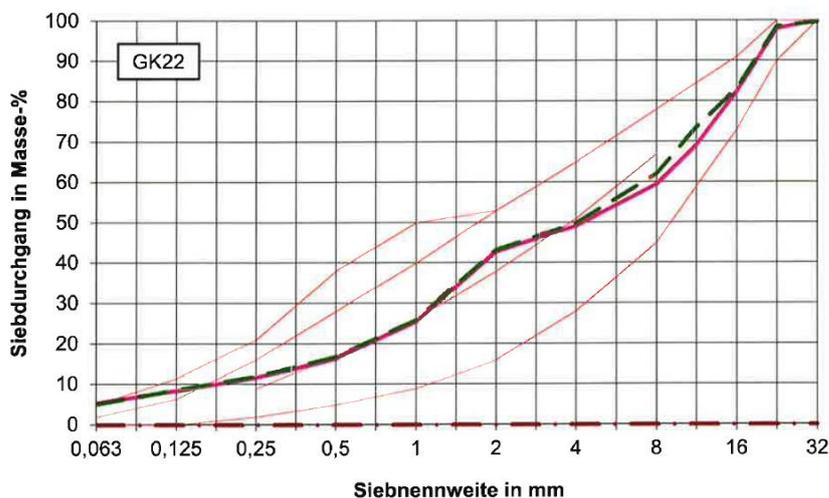


Abbildung 8 Sieblinie: Kantkorn - HW

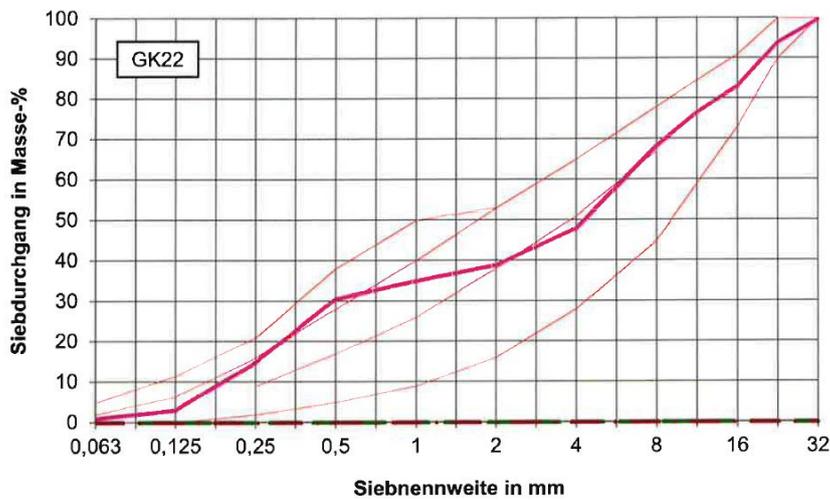


Abbildung 9 Sieblinie: Rundkorn - NW

In der folgenden Abbildung sind beide Sieblinien in einem Diagramm ersichtlich:

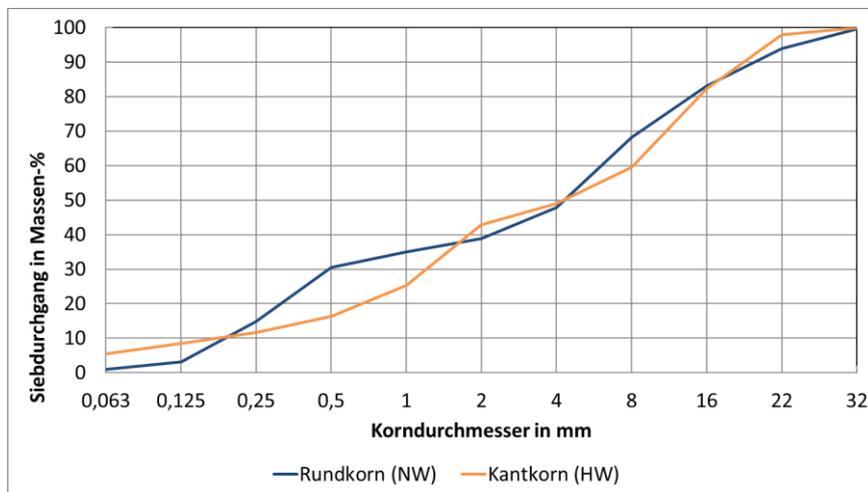


Abbildung 10 Sieblinien: Kant- & Rundkorn

#### 4.1.1 Chemische Analyse

Die beiden Zemente und das verwendete AHWZ sind durch eine vom GVTB beauftragten Firma chemisch-mineralogisch analysiert worden. Es wurde eine RDA und eine RFA (Analyse 1), sowie eine Analyse nach ONR

29196-4 und RDA am AHWZ (Analyse 2) durchgeführt. Die Ergebnisse sind in den folgenden Tabellen ersichtlich:

Tabelle 23 Chemische Analyse: RDA (Analyse 1)

Bestandteile (Angabe in %)	CEM II/A M(S-L) 42,5 N	CEM II/B-M(S-L) 42,5 N	AHWZ
Σ Alit, C <sub>3</sub> S	45	39	
Σ Belit, C <sub>2</sub> S	12	10	
Σ Aluminat, C <sub>3</sub> A	4	4	
Ferrit, C <sub>4</sub> AF	5	7	
Lime, CaO	<1	<1	
Portlandit, Ca(OH) <sup>2</sup>	2	1	
Periclas, MgO	(+/-)	<1	
Arcanit	1	<1	
Langbeinit	(+/-)		
Aphthitalit	(+/-)	(+/-)	
Hüttensand / BFS	19	16	62
Flugasche			20
Quarz	(+/-)	(+/-)	3
Kalzit	7	17	12
Mullit			2
Magnetit/Hämatit			1
Gypsum	(+/-)	2	(+/-)
Hemihydrat	3		
Anhydrat	<1	1	
Summe	100	100	100
* Σ Klinker	72	66	
Hüttensand/BFS	20	16	
Σ Nebenbestandteile	8	18	

\* Σ Klinker ohne Gips, Hemihydrat, Anhydrit

Tabelle 24 Chemische Analyse: RFA (Analyse 1)

Bestandteile		CEM II/A M(S-L) 42,5 N	CEM II/B-M(S-L) 42,5 N
CaO	%	61,1	61,0
SiO <sub>2</sub>	%	19,1	16,3
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	4,2	4,2
SO <sub>3</sub>	%	3,6	3,3
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	%	2,3	2,8
MgO	%	2,4	2,5
K <sub>2</sub> O	%	0,8	0,8
MnO	%	0,3	0,5
TiO <sub>2</sub>	%	0,3	0,3
Na <sub>2</sub> O	%	0,3	0,3
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ppm	758	1580
SrO	ppm	434	1500
Cl	ppm	1080	551
CuO	ppm	263	389
ZnO	ppm	226	352
BaO	ppm	288	
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ppm		161
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	ppm	132	
ZrO <sub>2</sub>	ppm	88	91
NiO	ppm	68	64
MoO <sub>3</sub>	ppm		35

Anschließend wurde noch eine weitere Analyse der Zemente von einem Labor eines Zementherstellers nach ONR 29196-4 bzw. mit dessen RDA am AHWZ durchgeführt (Analyse 2). Die Ergebnisse sind in Tabelle 25 ersichtlich.

Tabelle 25 Chemische Analyse nach ONR 29196-4 (Analyse 2)

Bezeichnung	CEM II/A M(S-L) 42,5 N	CEM II/B-M(S-L) 42,5 N	AHWZ
Methode	ONR 29196-4	ONR 29196-4	RDA
Kalkstein [%]	7	14	15
Hüttensand [%]	13	10	66
Flugasche [%]	0	0	19
Klinker [%]	80	76	0
Gipsgehalt [%]	4,7	4,4	

Anmerkung zu den Analysen:

Das Verhältnis Klinkergehalt CEM A/CEM B von Analyse 1 und 2 ist nicht proportional:

$$\frac{80}{76} = 1,05 \neq \frac{72}{66} = 1,09$$

Es ist zu sehen, dass RDA Untersuchung und nasschemische Analyse voneinander abweichen. Dasselbe merkte auch der Laborbericht des Zementherstellers an, der ebenfalls RDA Untersuchung durchführte. Das Referenzverfahren zur Zementanalyse ist ONR 29196-4.

#### 4.1.2 Unterschiede in der Betonzusammensetzung

Die Betonzusammensetzungen wurden so gewählt, dass sich die folgenden drei Parameter deutlich unterscheiden:

- W/B-Wert
- Leimvolumen
- Klinkeranteil und Hüttensandanteil im Bindemittel

Die Variation des Klinker- und Hüttensandanteils wird durch die unterschiedlichen Zementsorten und des AHWZ im gesamten Bindemittel hervorgerufen.

Unterschiede im Leimvolumen werden wegen des unterschiedlichen Wasseranspruchs der Gesteinskörnung gemacht. Beim Betonentwurf wurde die Erfahrung, dass Gesteinskörnung RK (Untersiebenbrunn) einen wesentlich geringeren Wasserbedarf hat als Gesteinskörnung KK (Gradenberg), berücksichtigt. Gesteinskörnung mit höherem Wasseranspruch ergeben bei gegebenen W/B-Wert ein höheres Leimvolumen.

Anmerkung: Leimvolumen = Wasser + Stoffe < 0,125mm + Zusatzmittel + Luftporengehalt. Der Luftporengehalt wurde hier vernachlässigt.

Der W/B-Wert wird entsprechend der geforderten Expositionsklassen festgelegt.

Einen Überblick über die Unterschiede liefert die folgende Abbildung und Tabelle:

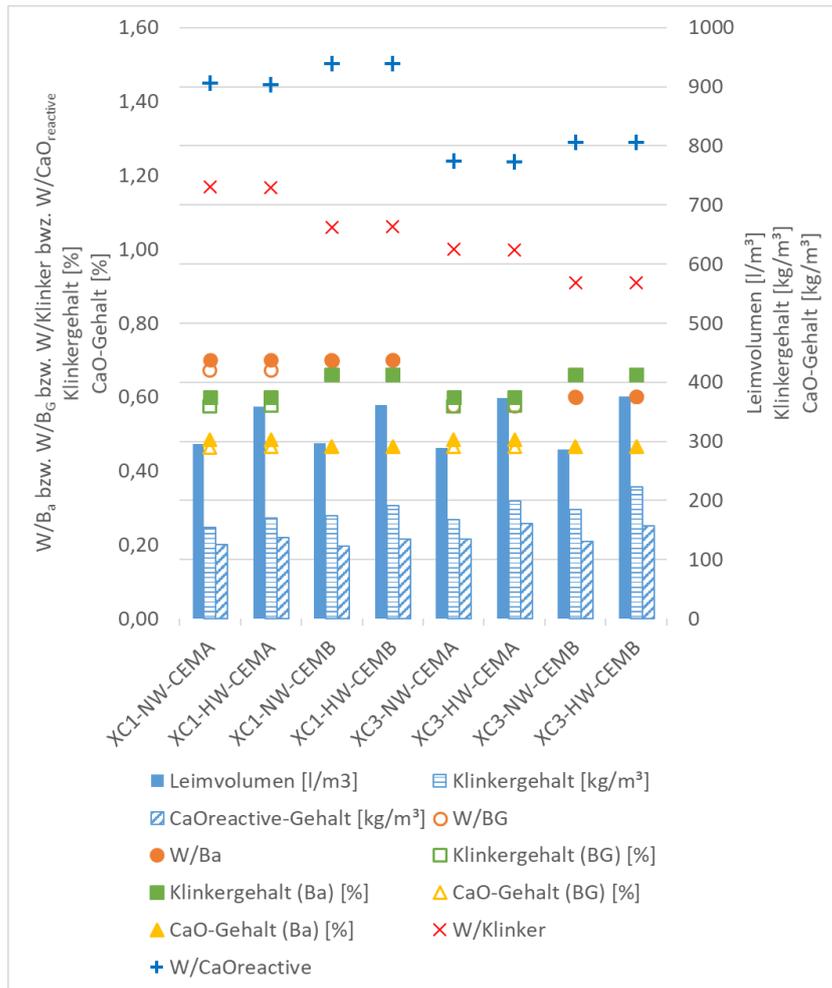


Abbildung 11 Unterschiede Betonvarianten

Tabelle 26 Unterschiede Betonvarianten

	XC1-NW-CEMA	XC1-HW-CEMA	XC1-NW-CEMB	XC1-HW-CEMB	XC3-NW-CEMA	XC3-HW-CEMA	XC3-NW-CEMB	XC3-HW-CEMB
$B_a$ [kg/m <sup>3</sup> ]	258	284	263	290	278	332	280	338
$W/B_a$	0,70	0,70	0,70	0,70	0,60	0,60	0,60	0,60
$B_G$ [kg/m <sup>3</sup> ]	269	296	263	290	290	346	280	338
$W/B_G$	0,67	0,67	0,70	0,70	0,58	0,58	0,60	0,60
Leimvolumen [l/m <sup>3</sup> ]	295,3	358,4	296,2	361,3	288,7	373,8	285,7	376,3
Klinkergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	155	171	174	191	167	199	185	223
Klinkergehalt ( $B_G$ ) [%]	58%	58%	66%	66%	58%	58%	66%	66%
Klinkergehalt ( $B_a$ ) [%]	60%	60%	66%	66%	60%	60%	66%	66%
$CaO_{\text{reactive}}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	125	138	122	135	135	161	130	157
$W/CaO_{\text{reactive}}$	1,45	1,45	1,50	1,50	1,24	1,24	1,29	1,29
CaO-Gehalt ( $B_G$ ) [%]	46%	46%	47%	47%	46%	46%	47%	47%
CaO-Gehalt ( $B_a$ ) [%]	48%	48%	47%	47%	48%	48%	47%	47%

Anmerkung: Die Ermittlung des Klinker- und CaO-Gehalts wurde nach Kapitel 5.8.2.2. durchgeführt.

## **4.2 Durchgeführte Prüfungen**

Um die Performance der Betone zu beurteilen, wurden sowohl Frischbeton-, als auch Festbetonkennwerte geprüft.

### **4.2.1 Frischbeton**

Folgende Frischbetonparameter wurden gemäß ONR 23303:2010 geprüft:

- Konsistenz (10 min und 90 min nach Wasserzugabe)
- Luftgehalt des Frischbetons (10 min nach Wasserzugabe)
- Frischbetonrohddichte
- Frischbetontemperatur
- Klima bei der Herstellung

#### **4.2.1.1 Konsistenz**

Die Prüfung der Konsistenz wurde mit dem Ausbreitmaß nach ONR 23303:2010 durchgeführt.

#### **4.2.1.2 Luftgehalt**

Die Prüfung des Luftgehalts wurde nach ONR 23303:2010 mit dem Druckausgleichsverfahren durchgeführt.

#### **4.2.1.3 Frischbetonrohddichte**

Die Messung der Frischbetonrohddichte wurde mit der Prüfung des Luftporengehalts nach ONR 23303:2010 durchgeführt: Der leere 8 l LP-Topf und der gefüllte, verdichtete Topf wurden gewogen, durch die Differenz wird die Masse des Betons ermittelt und anschließend durch Division durch das bekannte Volumen die Frischbetonrohddichte ermittelt.

#### **4.2.1.4 Klima bei der Herstellung**

Die Temperatur und die relative Luftfeuchtigkeit wurden mit elektronischen Thermo- bzw. Hygrometern gemessen.

## 4.2.2 Festbeton

Folgende Festbetonparameter wurden geprüft:

- Karbonatisierung mit einem beschleunigten Verfahren
- Druckfestigkeit
- Porosität
- Wassereindringtiefe
- Wasseraufnahmekoeffizient

### 4.2.2.1 Karbonatisierung mit einem beschleunigten Verfahren

Geprüft wurde nach ACC (accelerated carbonation test) im Model Code for service life design (fib, 2006) und angelehnt an ÖNR CEN/TR 12390-12:2010. Um die Karbonatisierung zu prüfen, wurden je Variante zwei Balken der Größe 100 x 100 x 400 mm hergestellt. Diese wurden als Nachbehandlung bis zum nächsten Tag abgedeckt in der Schalung belassen und anschließend sieben Tage wassergelagert. Danach wurden sie für 21 Tage in einer Klimakammer bei 20°C und 65% rel. LF gelagert.

28 Tage nach der Herstellung wurden die Balken in der Mitte geteilt (entspricht einer Erhöhung der Probekörperzahl von zwei auf vier) und die Nullmessung wurde durchgeführt: Dazu wurden die Bruchflächen der Proben unmittelbar nach dem Brechen von Staub und losen Partikeln befreit und mit einer Phenolphthalein-Lösung (eine Indikatorlösung, die Flächen mit einem pH-Wert > 9 lila einfärbt) besprüht. Die Eindringtiefe der Karbonatisierungsfront wurde nach einer Stunde mit einer Schublehre an fünf Stellen jeder Seite gemessen. Dabei wurde darauf geachtet mit ausreichendem Abstand von der Ecke zu messen und an Stellen mit groben Gesteinskörnungen nicht zu messen. Zusätzlich wurden die Bruchflächen fotografiert.

Dann wurden die Proben in einem CO<sub>2</sub>-Schrank bei 20°C, 65% rel. LF und 2,0% CO<sub>2</sub> gelagert. Nach 28, 70 und 140 Tagen wurden die Proben aus dem Schrank entnommen um die Eindringtiefe zu messen. Dazu wurde von den Probekörpern eine ca. 5 cm dicke Scheibe abgespalten, die frische Bruchfläche besprüht und nach ca. einer Stunde gemessen.

Anmerkung: Während der Versuchsdauer kam es dreimal zu kurzen Ausfällen der CO<sub>2</sub>-Versorgung. Um die gleichmäßige Dauer der 2% CO<sub>2</sub>-Lagerung einzuhalten, mussten die Proben also insgesamt um die Ausfallzeiten länger gelagert werden.

#### **4.2.2.2 Druckfestigkeit**

Für die Prüfung der Druckfestigkeit wurden sieben Würfel mit einer Seitenlänge von 150 mm hergestellt. Geprüft wurde nach ÖNORM EN 12390-3:2012.

Die Nachbehandlung erfolgte gleich wie für die Karbonatisierungsprüfung: bis zum nächsten Tag abgedeckt in der Schalung belassen, sieben Tage Wasserlagerung und anschließend Lagerung für 21 Tage in einer Klimakammer bei 20°C und 65% rel. LF.

28 Tage nach der Herstellung wurden drei Würfel geprüft und 70 Tage nach der Herstellung zwei Würfel. Die letzten zwei Würfel wurden zeitgleich mit der letzten Karbonatisierungsprüfung geprüft.

#### **4.2.2.3 Porosität**

Für die Prüfung der Porosität wurden zwei Würfel mit einer Seitenlänge von 150mm hergestellt. Geprüft wurde nach ÖNORM EN 1936:2007 „Prüfverfahren für Naturstein – Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität“. Die erste Prüfung fand 28 Tage nach der Herstellung statt, die zweite zeitgleich mit der 140d Karbonatisierungsprüfung.

Die Probekörper wurden einen Tag nach der Herstellung ausgeschalt und anschließend immer im Wasser gelagert.

Aus dem Probekörper wurden vier Würfel mit einer Seitenlänge von ca. 50mm herausgeschnitten, welche nach einer Tauchwägung getrocknet wurden. Die Massenkonstanz wurde erreicht, wenn an dem darauffolgenden Tage die Massendifferenz kleiner 0,1% war. Aus der gemessenen Wasseraufnahme und der Dichte wurde die offene Porosität bestimmt.

#### **4.2.2.4 Wasseraufnahmekoeffizient**

Für die Prüfung des Wasseraufnahmekoeffizienten wurden die getrockneten Würfel der Porositätsprüfung verwendet. Die Prüfung erfolgte gemäß ÖNORM EN 772-11:2011.

Dazu wurden die Würfel 5 mm tief in Wasser eingetaucht und nach bestimmten Zeiten wurde die Masse der Würfel durch Wiegen bestimmt. Die eingetauchte Fläche wurde gemessen und der Wasseraufnahmekoeffizient bestimmt.

#### 4.2.2.5 WU-Prüfung

Für die WU-Prüfung wurden drei Quader mit der Abmessung 200 x 200 x 120 mm hergestellt. Die Probekörper wurden einen Tag nach der Herstellung ausgeschalt und anschließend 28 Tage immer im Wasser gelagert.

Die WU-Prüfung wurde nach ONR 23303:2010 durchgeführt: Nach 3 Tagen bei 1,75bar wurde der Druck bis zum 14. Tag auf 7,0 bar erhöht. Danach wurden die Probekörper in der Mitte gespalten - Die Wassereindringtiefe konnte an den Bruchflächen bestimmt werden.

### 4.3 Ergebnisse

In diesem Kapitel werden die Prüfungsergebnisse präsentiert.

#### 4.3.1 Frischbeton: Zusammensetzung und Prüfungsergebnisse

Die Rezeptur und die Ergebnisse der Frischbetonprüfungen sind in den folgenden Tabellen ersichtlich:

Tabelle 27 Frischbeton: Prüfungsergebnisse

	XC1-NW-CEMA	XC1-HW-CEMA	XC1-NW-CEMB	XC1-HW-CEMB	XC3-NW-CEMA	XC3-HW-CEMA	XC3-NW-CEMB	XC3-HW-CEMB
Lufttemperatur [°C]	19	20	18	19	18	19	18	18
Betontemperatur [°C]	24	20	21	20	23	20	20	20
Ausbreitmaß 10 min [cm]	52	56	58	54	52	53	54	53
Ausbreitmaß 90 min [cm]	45	42	47	43	38	42	37	43
LP-Gehalt 10 min [%]	2,4	1,5	1	1	1,3	1,6	1,2	0,9
Frischbetonrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ]	2347	2353	2381	2384	2379	2360	2388	2391
Konsistenzhaltung [%]	87%	75%	81%	80%	73%	79%	69%	81%

Tabelle 28 Beton: Rezepturkennwerte

	XC1-NW-CEMA	XC1-HW-CEMA	XC1-NW-CEMB	XC1-HW-CEMB	XC3-NW-CEMA	XC3-HW-CEMA	XC3-NW-CEMB	XC3-HW-CEMB
Zementgehalt CEM A [kg/m <sup>3</sup> ]	215	237	0	0	232	277	0	0
Zementgehalt CEM B [kg/m <sup>3</sup> ]	0	0	263	290	0	0	280	338
Zusatzstoffgehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	54	59	0	0	58	69	0	0
k-Wert	0,8	0,8			0,8	0,8		
Wassergehalt [kg/m <sup>3</sup> ]	181	199	184	203	167	199	168	203
W/B – Wert (k=0,8)	0,70	0,70	0,70	0,70	0,60	0,60	0,60	0,60
W/B – Wert (k=1,0)	0,67	0,67	0,70	0,70	0,58	0,58	0,60	0,60
W/Z - Wert	0,84	0,84	0,70	0,70	0,72	0,72	0,60	0,60
Körnung RK [kg/m <sup>3</sup> ]	1898	0	1934	0	1923	0	1939	0
Körnung KK [kg/m <sup>3</sup> ]	0	1857	0	1892	0	1815	0	1851
Kornanteile in %								
RK 0/4 – KK 0/2e	48	48	48	48	42	48	42	48
RK 4/16 – KK 4/16	34	33	34	33	40	33	40	33
RK 16/32 – KK 16/22	18	19	18	19	18	19	18	19
hydr. Zusatzstoffe [%]	20	20	0	0	20	20	0	0
Fließmittel [kg/m <sup>3</sup> ]	2,32	0,63	1,75	0,34	2,37	0,57	1,47	0,6
Entschäumer [kg/m <sup>3</sup> ]	0	0	0,34	0,34	0	0	0,34	0,34
Leimvolumen [l/m <sup>3</sup> ]	295	358	296	361	289	374	286	376

Die laut ÖNORM B 4710-1:2007 geforderten Werte (max. W/B-Wert und min. Bindemittelgehalt) wurden für alle Betone eingehalten

#### 4.3.1.1 Konsistenz & Zusatzmittel

Die Prüfung des Ausbreitmaßes wurde durchgeführt, um festzustellen, ob alle hergestellten Betone die geforderte Konsistenz von F52 (52cm ± 3cm - 10 Minuten nach Wasserzugabe) haben.

Die Ergebnisse der Konsistenzprüfung sind in Abbildung 12 ersichtlich.

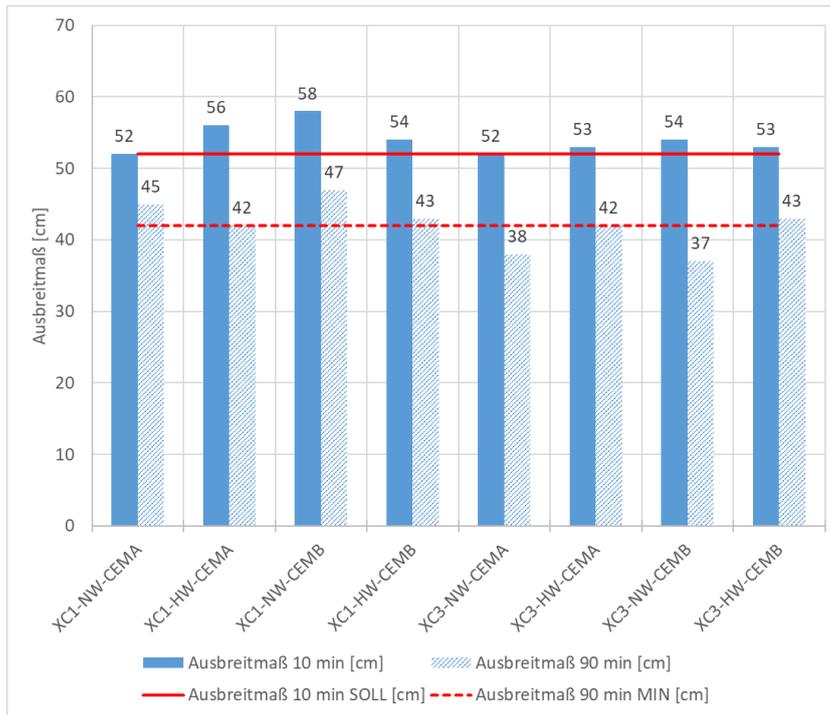


Abbildung 12 Frischbetonprüfergebnis: Ausbreitmaß: 10min & 90min nach Wasserzugabe

Die hinzugefügten Zusatzmittel sind in Abbildung 13 ersichtlich.

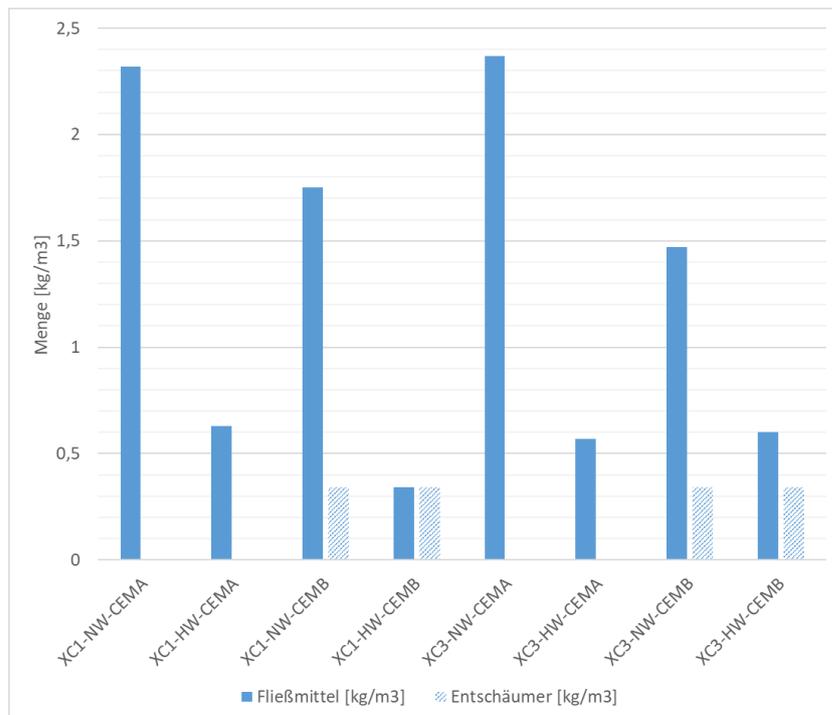


Abbildung 13 Betonzusatzmittel

Die geforderte Konsistenzklasse F52 wurde praktisch erreicht. XC1-NW-CEMB weicht geringfügig ab. Die geforderte Konsistenzhaltung, nämlich ein Rückgang um maximal eine Konsistenzklasse auf F45 ( $45 \text{ cm} \pm 3 \text{ cm}$ ), wurde in zwei Fällen gemäß Abbildung 12 nicht erreicht. Alle Probekörper waren mit entsprechender Verdichtung homogen herstellbar. Es kann davon ausgegangen werden, dass die Konsistenz die Festbetonprüfergebnisse nicht wesentlich beeinflusst.

Bei Betrachtung der verwendeten Zusatzmittel fallen folgende Punkte auf:

- Die Betone mit der Gesteinskörnung mit niederem Wasserbedarf haben mehr Fließmittel benötigt, als die Betone mit der Gesteinskörnung mit hohem Wasserbedarf. Die Ergebnisse sind konträr zu den Erwartungen. Der Wasseranspruch der Gesteinskörnung wurde nicht ganz richtig eingeschätzt. Die Konsistenz wurde planmäßig mit Hilfe von Zusatzmitteln (Fließmittel) eingestellt
- Des Weiteren ist nur bei den Betonen mit CEM II B ein Entschäumer nötig gewesen.<sup>10</sup>
- Der Einfluss des Fließmittel auf die Karbonatisierungseigenschaften ist nicht genau geklärt. Die wenigen, aktuelleren Arbeiten, zeigen aber, dass der Einsatz von Fließmittel keinen bzw. wenig Einfluss hat (Hunkeler, 2012a) .

#### 4.3.1.2 Luftgehalt

Der Luftgehalt wurde zu Vergleichszwecken überprüft. Die Ergebnisse sind in Abbildung 14 ersichtlich. Die Luftporengehalte schwanken, befinden sich aber in einem üblichen Rahmen.

---

<sup>10</sup> Laut Einschätzung der Hersteller wurden die Zementproben direkt von einer Betonmischanlage bezogen, wodurch es möglich sein kann, dass von vorherigen Mischungen noch kleine Mengen Fremdstoffe enthalten waren, die zu einem größeren Luftgehalt führen können.

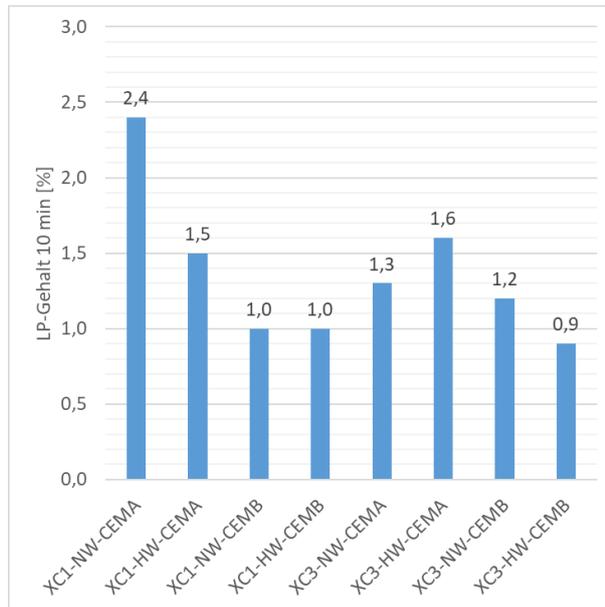


Abbildung 14 Frischbetonprüfergebnis: Luftgehalt

#### 4.3.1.3 Frischbetonrohddichte

Die Frischbetonrohddichte wurde zu Vergleichszwecken überprüft. Die Ergebnisse sind in Abbildung 15 ersichtlich und entsprechen der Schwankung der Luftporengehalte.

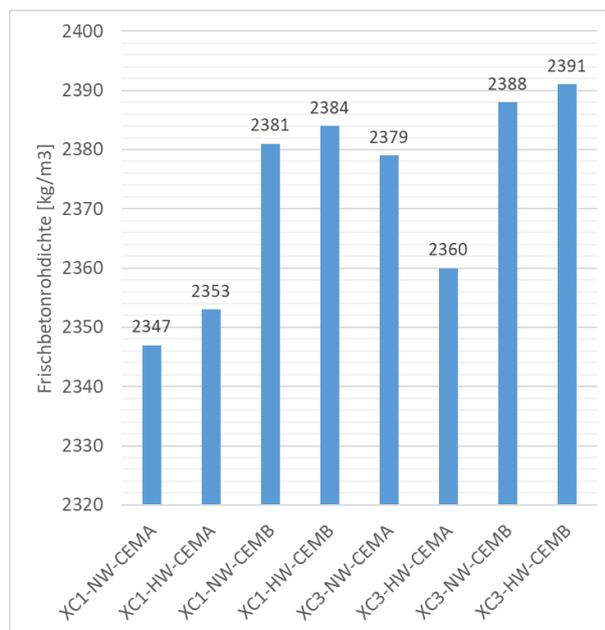


Abbildung 15 Frischbetonprüfergebnis: Frischbetonrohddichte

#### 4.3.1.4 Frischbetontemperatur

Die Frischbetontemperatur wurde zu Vergleichszwecken überprüft. Die Ergebnisse sind in Abbildung 16 ersichtlich.

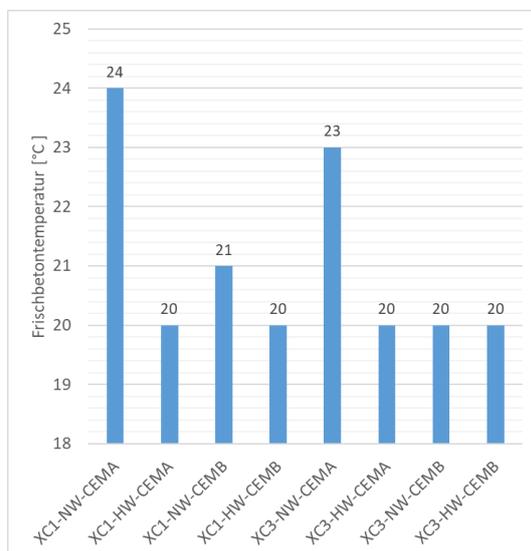


Abbildung 16 Frischbetonprüfergebnis: Frischbetontemperatur

#### 4.3.1.5 Temperatur und Feuchte der Umgebung

Die Ergebnisse sind in Abbildung 17 ersichtlich. Sie entsprechen praktisch den normgemäßen, geforderten Bedingungen nach ONR 23303:2010 (rel. LF  $\geq$  50%; Temperatur zwischen 15° und 22° C).

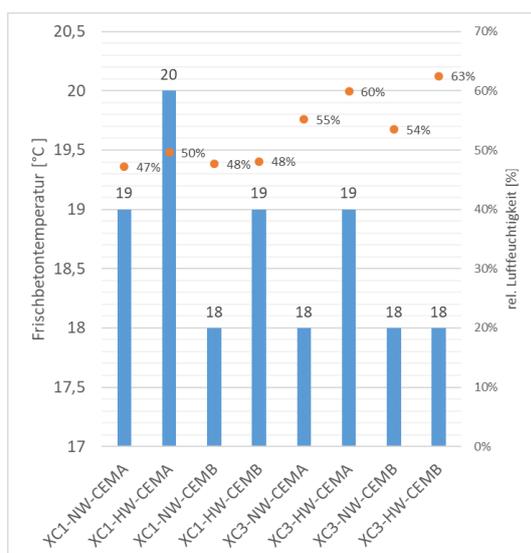


Abbildung 17 Frischbetonprüfergebnis: Klima bei der Herstellung

### 4.3.2 Festbetonergebnisse

In diesem Kapitel werden die Prüfungsergebnisse präsentiert und erläutert.

#### 4.3.2.1 Karbonatisierung mit einem beschleunigten Verfahren

Die Ergebnisse sind in Abbildung 18 und Tabelle 30 ersichtlich. Wie in 3.6.3 bereits erwähnt, beträgt die erwartete Wiederholpräzision nach ONR CEN/TS 12390-12:2010 2,0 mm (bei einer Dauer von 70 Tagen).

Bei Betrachtung der Eindringtiefen der unterschiedlichen Betonsorten, sieht man, dass diese nicht signifikant voneinander abweichen. Somit können für die Sorte XC1 und XC3 folgende mittleren Werte bestimmt werden (siehe Tabelle 29):

Tabelle 29 Mittlere Karbonatisierungstiefen und Standardabweichung der Betonsorten

Tage	28	70	140
XC1 MW [mm]	9,5	14,0	20,3
XC3 MW [mm]	6,3	9,5	13,8
XC1 STABW [mm]	1,17	0,99	1,49
XC3 STABW [mm]	0,62	0,80	1,05

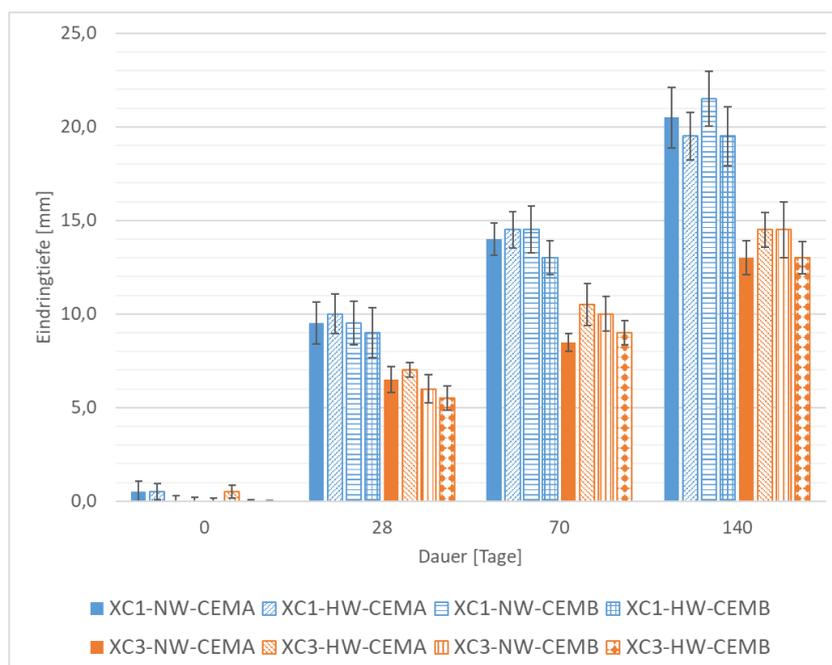


Abbildung 18 Karbonisierungstiefe mit Angabe der einfachen Standardabweichung

Tabelle 30 Karbonatisierungstiefe mit Standardabweichung

Dauer [Tage]	0		28		70		140	
	Eindringtiefe	STABW	Eindringtiefe	STABW	Eindringtiefe	STABW	Eindringtiefe	STABW
XC1-NW-CEMA	0,5	0,56	9,5	1,12	14,0	0,85	20,5	1,61
XC1-HW-CEMA	0,5	0,44	10,0	1,06	14,5	0,96	19,5	1,28
XC1-NW-CEMB	0,0	0,30	9,5	1,16	14,5	1,25	21,5	1,48
XC1-HW-CEMB	0,0	0,21	9,0	1,34	13,0	0,91	19,5	1,59
XC3-NW-CEMA	0,0	0,17	6,5	0,69	8,5	0,47	13,0	0,90
XC3-HW-CEMA	0,5	0,34	7,0	0,39	10,5	1,13	14,5	0,92
XC3-NW-CEMB	0,0	0,09	6,0	0,74	10,0	0,93	14,5	1,49
XC3-HW-CEMB	0,0	0,03	5,5	0,64	9,0	0,65	13,0	0,87

Wie in 2.3 bereits erklärt wurde, verläuft die Karbonatisierung bei konstanten Bedingungen nach einem Wurzel-Zeit-Gesetz. Dies ist in Abbildung 19 und in Abbildung 20 dargestellt.

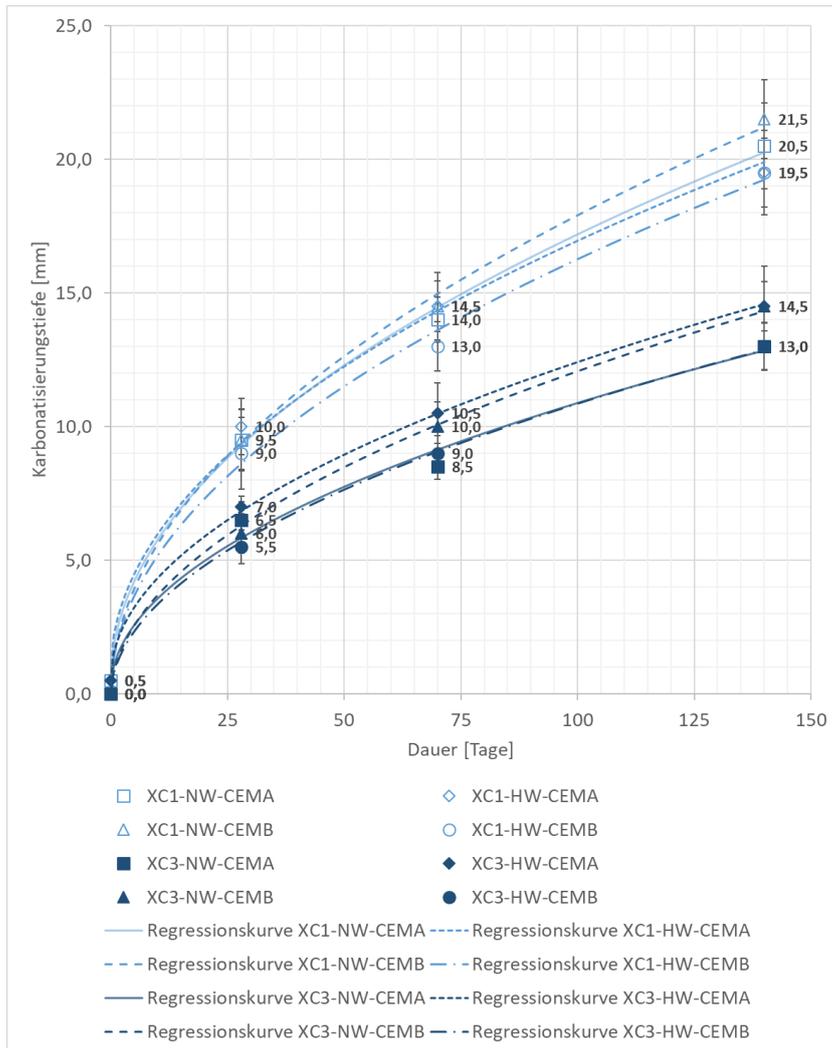


Abbildung 19 Karbonatisierungsverlauf

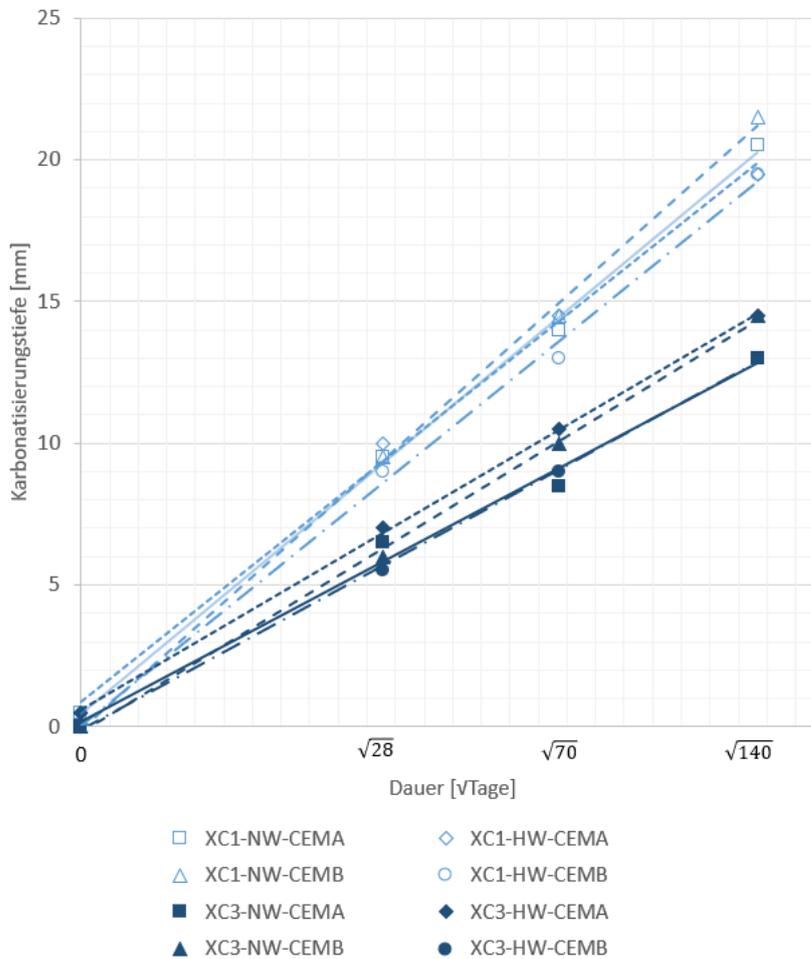


Abbildung 20 Karbonatisierungsverlauf ( $\sqrt{t}$ (Tage))

Aufbauend auf den Karbonatisierungstiefen, lassen sich die dazugehörigen Karbonatisierungskoeffizienten bestimmen (siehe Kapitel 5.1).

- Einfluss W/B-Wert: Die XC3-Betone haben, wie erwartet, geringere Karbonatisierungstiefen
- Einfluss Leimvolumen: Das Leimvolumen beeinflusst die Karbonatisierungstiefen nicht (siehe Kapitel 5.7).
- Einfluss Bindemittel: Keine signifikanten Unterschiede bemerkbar.

Eine genaue Analyse des Karbonatisierungswiderstandes (mit verschiedenen Einflussfaktoren) ist in Kapitel 5 zu finden.

### 4.3.2.2 Druckfestigkeit

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung sind in Tabelle 31 und Abbildung 21 ersichtlich.

Tabelle 31 Ergebnis: Druckfestigkeit

		XC1-NW-CEMA	XC1-HW-CEMA	XC1-NW-CEMB	XC1-HW-CEMB	XC3-NW-CEMA	XC3-HW-CEMA	XC3-NW-CEMB	XC3-HW-CEMB
Druckfestigkeit [N/mm <sup>2</sup> ] nach ... Tagen	28	38,3	32,9	37,1	35,9	49,9	43,9	43,0	41,5
	28	38,6	32,9	35,2	34,4	49,2	44,0	45,9	42,3
	28	39,0	32,7	34,9	34,3	50,5	42,0	43,8	42,5
	70	45,4	37,3	40,3	39,7	56,8	47,8	49,6	47,0
	70	45,8	38,0	39,7	38,3	57,2	48,1	49,4	48,7
	190	48,5	41,2	41,7	40,6	60,3	49,7	50,8	45,8
	190	47,6	41,0	41,9	39,8	61,3	52,0	50,0	47,1
Mittelwert	28	38,6	32,9	35,7	34,9	49,9	43,3	44,3	42,1
	70	45,6	37,6	40,0	39,0	57,0	47,9	49,5	47,8
	190	48,0	41,1	41,8	40,2	60,8	50,9	50,4	46,5
Standard- abweichung	28	0,3	0,1	1,0	0,7	0,5	0,9	1,2	0,4
	70	0,2	0,4	0,3	0,7	0,2	0,1	0,1	0,9
	190	0,5	0,1	0,1	0,4	0,5	1,2	0,4	0,6

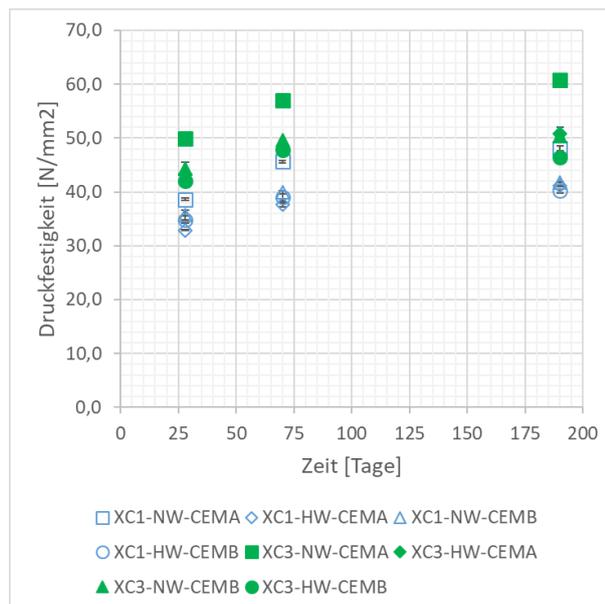


Abbildung 21 Druckfestigkeit

Die Einteilung der Festigkeitsklasse wurde nach ÖNORM B 4710-1:2007 Tabelle NAD 13 durchgeführt:

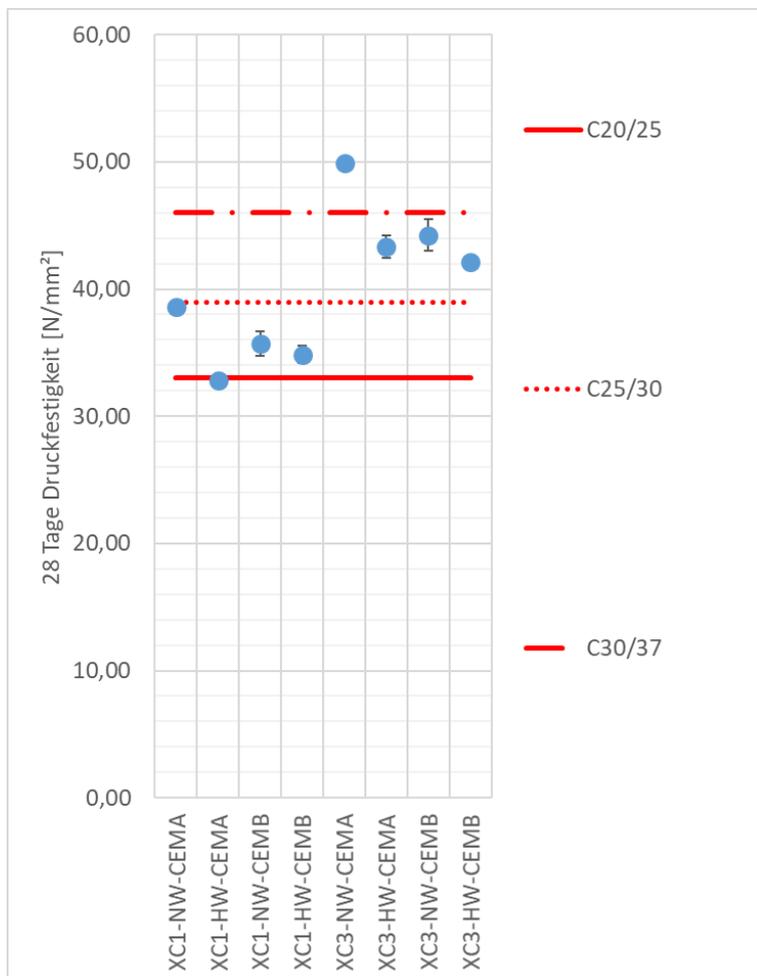


Abbildung 22 Einteilung Festigkeitsklassen

Daraus ergeben sich folgende Festigkeitsklassen der Betone:

Tabelle 32 Einteilung: Festigkeitsklassen

	XC1-NW-CEMA	XC1-HW-CEMA	XC1-NW-CEMB	XC1-HW-CEMB	XC3-NW-CEMA	XC3-HW-CEMA	XC3-NW-CEMB	XC3-HW-CEMB
Festigkeitsklasse	C20/25	C16/20	C20/25	C20/25	C30/37	C25/30	C25/30	C25/30

Die laut Eurocode 2 Mindestfestigkeitsklassen (XC1 = 16/20 MPa, XC3 = 25/30 MPa) werden von allen Betonen eingehalten.

- Einfluss W/B-Wert: Die Betone mit niedrigerem W/B-Wert haben auf Grund des höheren Bindemittelanteils eine höhere Druckfestigkeit.

- Einfluss Leimvolumen: Das Leimvolumen wirkt sich negativ auf die Druckfestigkeit aus, da der Leim die Schwachstelle im Gefüge ist.
- Einfluss Bindemittel: In drei von vier Fällen (nur beim Vergleich XC1-HW nicht) erreichte der CEM A höhere Festigkeiten, was an dem größeren Anteil an hydraulisch wirksamen Stoffen liegt.

#### 4.3.2.3 Korrelationen Druckfestigkeit

Weiters wurden Abhängigkeiten der Druckfestigkeit mit folgenden Parametern gebildet:

- $W/B_a$
- $W/B_G$
- $W/Klinker$
- $W/CaO_{reactive}$

Die Werte dafür sind in Tabelle 26 zu finden.

Die Ergebnisse sind in den folgenden Abbildungen zu finden:

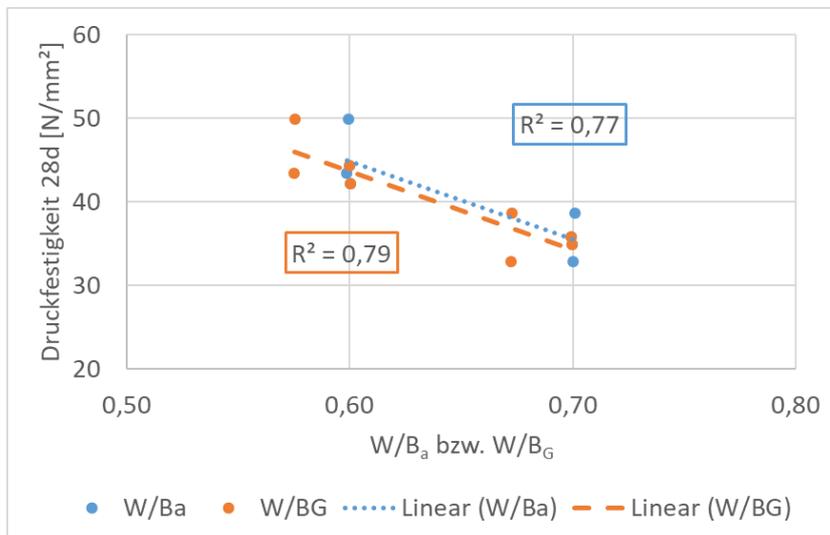


Abbildung 23 Korrelation: Druckfestigkeit - W/B

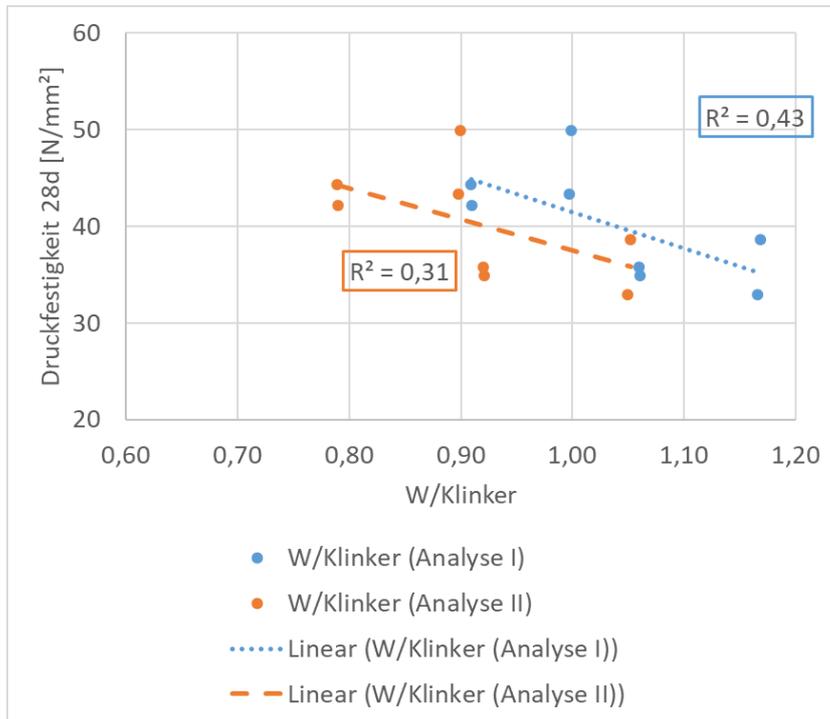


Abbildung 24 Korrelation: Druckfestigkeit - W/Klinker

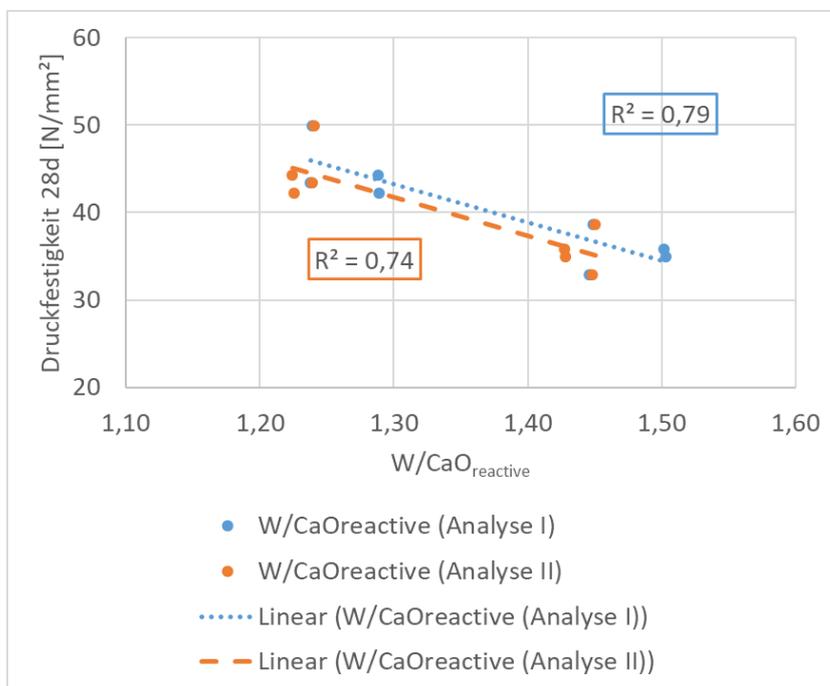


Abbildung 25 Korrelation: Druckfestigkeit - W/CaO<sub>reactive</sub>

Bei Betrachtung der Korrelationen sind folgend Punkte zu sehen:

- Die Korrelation Druckfestigkeit- $W/B_G$  ( $R^2 = 0,79$ ) ist geringfügig höher als mit  $W/B_a'$  ( $R^2 = 0,77$ ).
- Die Korrelation mit dem  $W/Klinker$ -Verhältnis ist nicht zu empfehlen ( $R^2 = 0,31$  bzw.  $0,43$ )
- Die Korrelation mit dem  $W/CaO_{\text{reactive}}$ -Verhältnis erreicht ähnliche Werte wie mit  $W/B$

Allgemein kann angemerkt werden, dass der  $k$ -Wert des AHWZ für die Korrelation mit der Druckfestigkeit auf 1,0 erhöht werden kann und die Korrelation mit  $W/CaO_{\text{reactive}}$  auch zum groben Abschätzen geeignet ist.

#### 4.3.2.4 Porosität

Bei der Porositätsprüfung wurde die Wasseraufnahme, die Rohdichte und die Offene Porosität bestimmt. Die Ergebnisse davon sind in Abbildung 26, Abbildung 27, Abbildung 28 ersichtlich.

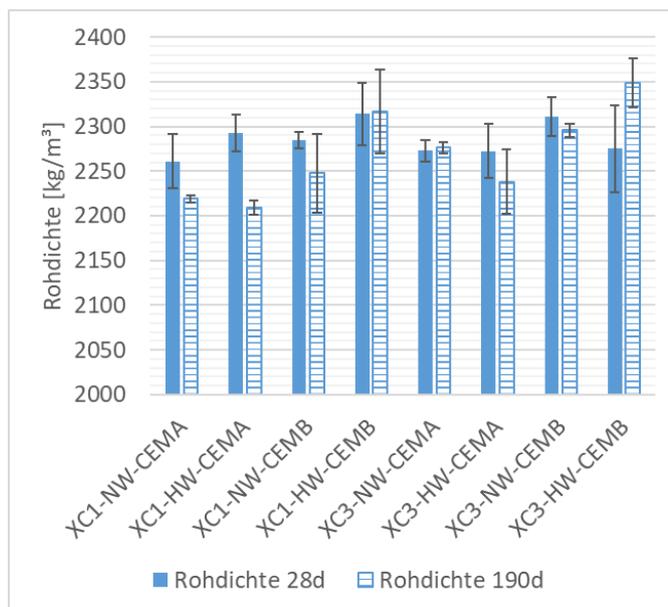


Abbildung 26 Rohdichte (28d & 190d)

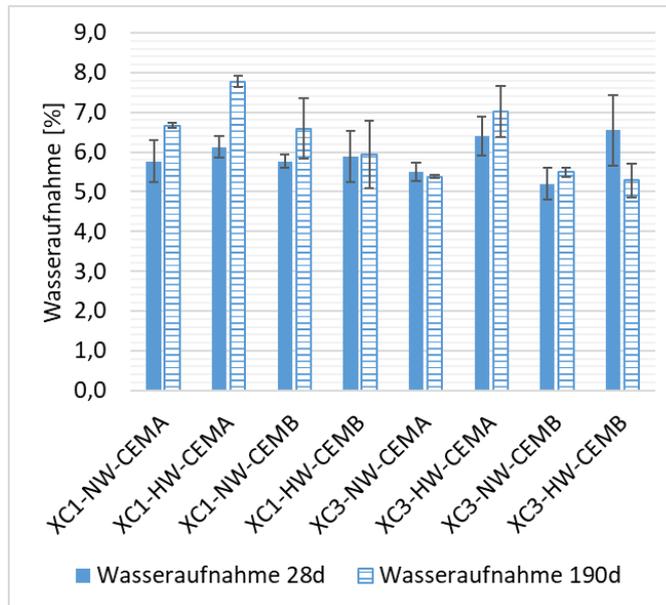


Abbildung 27 Wasseraufnahme (28d & 190d)

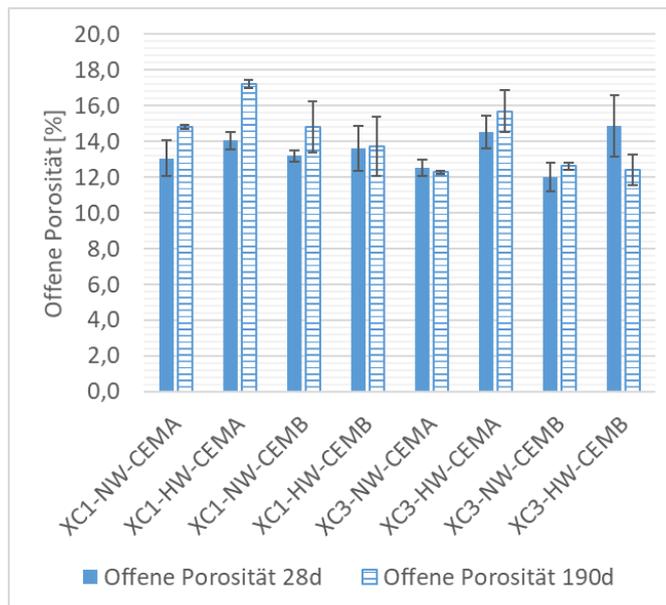


Abbildung 28 Offene Porosität (28d & 190d)

Tabelle 33 Ergebnisse: Porosität 28d

28 Tage	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Standardabweichung	Wasseraufnahme [%]	Standardabweichung	Offene Porosität [%]	Standardabweichung
XC1-NW-CEMA	2261	30	5,8	0,5	13,1	1,0
XC1-HW-CEMA	2293	20	6,1	0,3	14,1	0,5
XC1-NW-CEMB	2285	9	5,8	0,2	13,2	0,3
XC1-HW-CEMB	2314	35	5,9	0,6	13,6	1,2
XC3-NW-CEMA	2273	12	5,5	0,2	12,5	0,5
XC3-HW-CEMA	2272	30	6,4	0,5	14,5	0,9
XC3-NW-CEMB	2311	21	5,2	0,4	12,0	0,8
XC3-HW-CEMB	2275	49	6,5	0,9	14,9	1,7

Tabelle 34 Ergebnisse: Porosität 190d

190 Tage	Rohdichte [kg/m <sup>3</sup> ]	Standardabweichung	Wasseraufnahme [%]	Standardabweichung	Offene Porosität [%]	Standardabweichung
XC1-NW-CEMA	2219	4	6,7	0,1	14,8	0,1
XC1-HW-CEMA	2209	8	7,8	0,1	17,2	0,2
XC1-NW-CEMB	2247	44	6,6	0,8	14,8	1,4
XC1-HW-CEMB	2316	47	5,9	0,8	13,7	1,6
XC3-NW-CEMA	2276	6	5,4	0,0	12,3	0,1
XC3-HW-CEMA	2238	36	7,0	0,6	15,7	1,2
XC3-NW-CEMB	2295	8	5,5	0,1	12,6	0,2
XC3-HW-CEMB	2348	27	5,3	0,4	12,4	0,8

- Einfluss W/B-Wert: Keine Unterschiede bemerkbar
- Einfluss Leimvolumen: Keine Unterschiede bemerkbar
- Einfluss Bindemittel: Keine Unterschiede bemerkbar

#### 4.3.2.5 Wasseraufnahmeverlauf

Die Prüfungsergebnisse sind in Tabelle 35 Wasseraufnahmeverlauf ersichtlich. Korrelationen auf Grund dieses Tests konnten nicht gefunden werden.

Tabelle 35 Wasseraufnahmeverlauf

Zeit	Zeit [s <sup>0,5</sup> ]	XC1-NW-CEMA	XC1-HW-CEMA	XC1-NW-CEMB	XC1-HW-CEMB	XC3-NW-CEMA	XC3-HW-CEMA	XC3-NW-CEMB	XC3-HW-CEMB
00:00 h	0,0	0	0	0	0	0	0	0	0
00:30 h	42,4	851	1004	852	1015	903	1175	1100	1462
01:00 h	60,0	1259	1412	1179	1427	1221	1615	1396	1824
01:30 h	73,5	1520	1726	1412	1745	1441	1919	1641	2150
02:00 h	84,9	1729	1973	1673	1968	1612	2165	1827	2401
04:00 h	120,0	2322	2659	2215	2688	2186	2958	2393	3182
07:30 h	164,3	2913	3449	2743	3421	2771	3858	2992	4056

#### 4.3.2.6 WU-Prüfung

Die Ergebnisse der WU-Prüfung sind in diesem Kapitel ersichtlich:

Tabelle 36 Mittlere Wassereindringtiefe

	XC1-NW-CEMA	XC1-HW-CEMA	XC1-NW-CEMB	XC1-HW-CEMB	XC3-NW-CEMA	XC3-HW-CEMA	XC3-NW-CEMB	XC3-HW-CEMB
Mittlere Wassereindringtiefe - 1. Versuch [mm] (fehlerhaft)	58,6	60,0	25,6	33,2	14,1	21,8	18,5	33,1
Mittlere Wassereindringtiefe – WH [mm]	34,4	48,3	25,6	33,2	14,1	21,8	18,5	33,1

Anmerkung: Bei der Auswertung von XC1-NW-CEMA und XC1-HW-CEMB hat es Probleme beim Finden des Eindringhorizontes gegeben, da er sich nicht klar abgezeichnet hat. Deswegen wurde diese Werte nochmals überprüft.

#### Überprüfung der Wassereindringtiefe für XC1-NW-CEMA und XC1-HW-CEMA:

Da die oben genannten Werte sehr abweichen, wurde mit den Rückstellproben der Porositätswürfel die WU-Prüfung wiederholt: Die Quader mit

der Größe 150x150x~100mm waren die gesamte Zeit wassergelagert und wurden wie in 4.2.2.5 beschrieben geprüft.

Tabelle 37 Überprüfung WU von XC1-CEMA

Probekörpernummer:	V1-8	V1-9
Masse vor Versuchsbeginn [g]	4993,4	4925,7
Länge [mm]	149,44	147,10
Breite [mm]	149,00	146,10
Höhe [mm]	95,55	94,50
Betonrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ]	2347	2425
Mittlere Wassereindringtiefe Einzelwerte [mm]	9,2	7,9
Mittlere Wassereindringtiefe Mittelwert [mm]	8,6	
Probekörpernummer:	V2-8	V2-9
Masse vor Versuchsbeginn [g]	5016,5	5001,6
Länge [mm]	148,51	149,28
Breite [mm]	149,19	149,52
Höhe [mm]	94,58	93,78
Betonrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ]	2394	2389
Mittlere Wassereindringtiefe Einzelwerte [mm]	13,6	10,6
Mittlere Wassereindringtiefe Mittelwert [mm]	12,1	
Probekörpernummer:	V3-8	
Masse vor Versuchsbeginn [g]	4865,0	
Länge [mm]	148,66	
Breite [mm]	148,77	
Höhe [mm]	94,42	
Betonrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ]	2330	
Mittlere Wassereindringtiefe Einzelwerte [mm]	7,4	
Probekörpernummer:	V4-8	
Masse vor Versuchsbeginn [g]	5019,2	
Länge [mm]	148,90	
Breite [mm]	146,88	
Höhe [mm]	94,11	
Betonrohddichte [kg/m <sup>3</sup> ]	2439	
Mittlere Wassereindringtiefe Einzelwerte [mm]	7,3	

Die Ergebnisse der Probekörper V3-8 und V4-9 wurden mit den Ergebnissen der richtigen (=1. WU-Prüfung) verglichen und ein Faktor berechnet,

mit dem die Ergebnisse der Wiederholungsprüfung nach oben skaliert werden können. Die neuen Ergebnisse für XC1-NW-CEMA und XC1-HW-CEMA sind in Tabelle 36 ersichtlich:

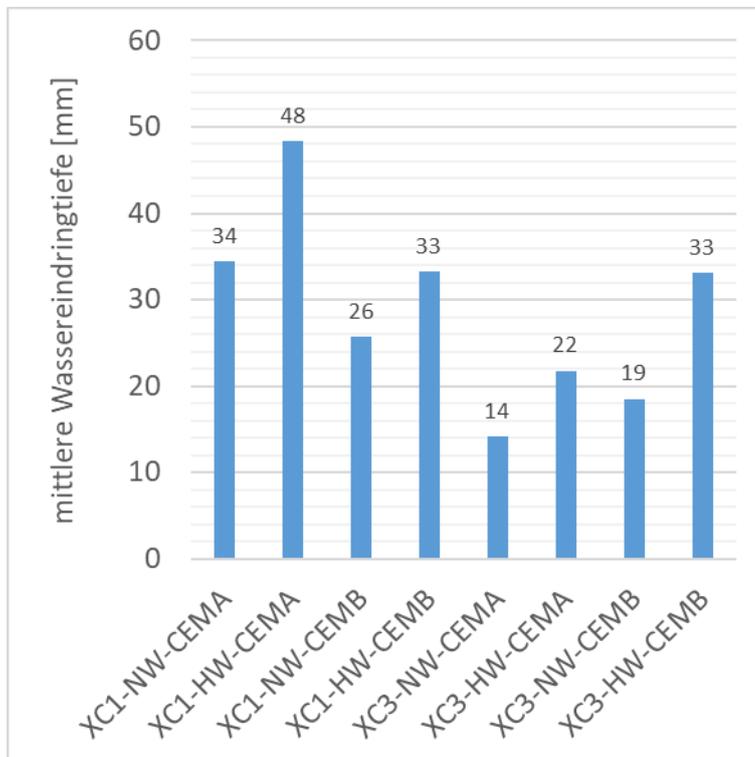


Abbildung 29 Ergebnis: Wassereindringtiefe

Die laut ÖNORM B 4710 geforderte max. Wassereindringtiefe von 50mm bei XC3 wurde von allen Betonen eingehalten.

- Einfluss W/B-Wert: bei drei von vier Betonen hat sich die Eindringtiefe verkleinert
- Einfluss Leimvolumen: Das größere Leimvolumen führt zu tieferen Eindringtiefen, da das eindringende Wasser nur durch den Zementstein hindurchkann.
- Einfluss Bindemittel: es kann keine eindeutige Aussage getroffen werden

## 5 Performance-Beurteilung

In diesem Kapitel wird versucht Korrelationen des Karbonisierungsverhalten von Betonen mit den anderen, geprüften Parametern zu finden

### 5.1 Karbonisierungstiefe – Karbonisierungskoeffizient beschleunigt

Der beschleunigte Karbonisierungskoeffizient wird nach SIA 262/1-Anhang I mit der folgenden Formel berechnet:

$$K_{ACC} = \frac{(d_K - A)}{\sqrt{t}}$$

$K_{ACC}$	Karbonisierungskoeffizient (beschleunigt) [mm/vJahr]
$d_K$	Karbonisierungstiefe [mm]
A	Karbonisierungstiefe zur Zeit t=0 [mm]
t	Zeit [Jahre]

Bei Anwendung der erwähnten Formeln erhält man folgende beschleunigte Karbonisierungskoeffizienten:

Tabelle 38 Karbonisierungskoeffizient beschleunigt  $K_{ACC,2\%}$

Dauer [Tage]	28	70	140	MW	STABW
XC1-NW-CEMA [mm/vJahr]	32,5	30,8	32,3	<b>31,9</b>	0,7
XC1-HW-CEMA [mm/vJahr]	34,3	32,0	30,7	<b>32,3</b>	1,5
XC1-NW-CEMB [mm/vJahr]	34,3	33,1	34,7	<b>34,0</b>	0,7
XC1-HW-CEMB [mm/vJahr]	32,5	29,7	31,5	<b>31,2</b>	1,2
XC3-NW-CEMA [mm/vJahr]	23,5	19,4	21,0	<b>21,3</b>	1,7
XC3-HW-CEMA [mm/vJahr]	23,5	22,8	22,6	<b>23,0</b>	0,4
XC3-NW-CEMB [mm/vJahr]	21,7	22,8	23,4	<b>22,6</b>	0,7
XC3-HW-CEMB [mm/vJahr]	19,9	20,6	21,0	<b>20,5</b>	0,5

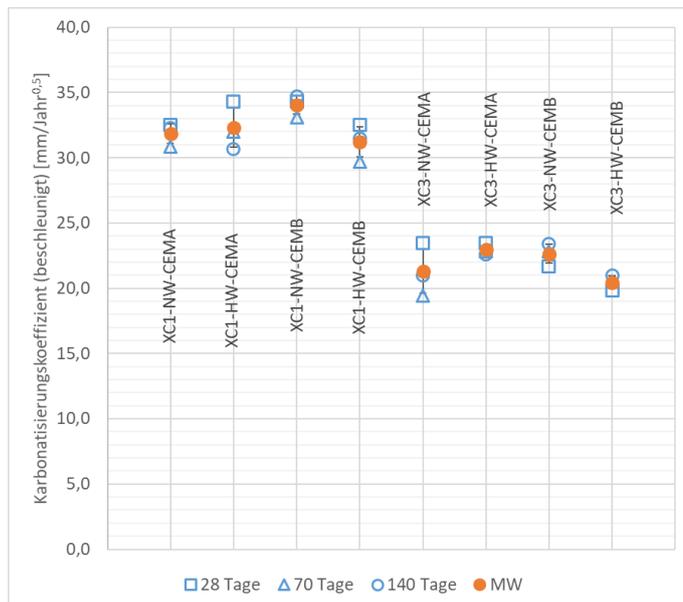


Abbildung 30 Karbonatisierungskoeffizient beschleunigt  $K_{ACC,2\%}$

In Kapitel 4.3.2.1 wurde bereits erwähnt, dass, da die Karbonisierungstiefen nicht signifikant voneinander abweichen, ein Mittelwert je Betonsorte gebildet werden kann.

Dauer [Tage]	28	70	140	MW	STABW
XC1 [mm/vJahr]	33,4	31,4	32,3	<b>32,4</b>	1,0
XC3 [mm/vJahr]	22,1	21,4	22,0	<b>21,8</b>	0,8

### 5.1.1 Vergleich mit anderen Betonen

In diesem Kapitel werden die geprüften Betonsorten beispielhaft mit anderen, in der Literatur gefundenen Betonen verglichen. Es wurden nur jene Quellen ausgewählt, bei denen die Ausgangsparameter (Nachbehandlung, CO<sub>2</sub>-Konzentration) ähnlich zu dieser Arbeit sind.

- Quelle 1: diese Arbeit
- Quelle 2: (Hermann, 2017): Bei den Betonen handelt es sich um die Betonsorte C30/37 B2 (XC3/XD2/XF1/XA1L/SB lt. ÖNORM B 4710-1:2007) GK 16 bzw. bei R<sub>0,53</sub>\_CEM II A 42,5 R um C40/50 B4 (XC4/XD2/XF2/XA1L/SB) GK 16 und entsprechend, äquivalente Öko<sup>2</sup>Betone für Fertigteile
- Quelle 3: (Leemann and Moro, 2017)
  - ♦ S22 0,65: CEM II/B-S 42,5R mit W/B = 0,65 und Zementgehalt = 280 kg/m<sup>3</sup>

- ♦ MS8 0,65: CEM II/A-D 42,5N mit W/B = 0,65 und Zementgehalt = 280 kg/m<sup>3</sup>
- Quelle 4: (Hunkeler, 2012a): sämtliche Betone haben die Expositions-klasse XC3 mit W/B = 0,60 und Zementgehalt = 280 kg/m<sup>3</sup>. A-A und B-A geben die Nachbehandlung an:
  - ♦ A-A: 1 Tag in Schalung, 27 Tage Schwindraum (70% rel. LF)
  - ♦ B-A: 1 Tag in Schalung, 6 Tage Wasserlagerung, 21 Tage Schwindraum (70% rel. LF)

Tabelle 39 Karbonatisierungskoeffizient beschleunigt: Vergleich

Quelle	Betonbezeichnung	K <sub>ACC, 2%</sub> [mm/√Jahr]	K <sub>ACC, 4%</sub> [mm/√Jahr]
1	XC1 (0,70)	32,4	41,6*
1	XC3 (0,60)	21,8	28,0*
2	R_0,53_CEM II A 52,5 N	9,7	12,5*
2	R_0,53_CEM I 52,5 R	6,9	8,8*
2	O_0,59_CEM I_HüS_KSM	12,8	16,4*
2	O_0,53_CEM I_HüS_KSM	6,3	8,1*
2	O_0,59_CEM I_KSM	7,1	9,1*
2	O_0,56_CEM I_KSM	7,5	9,6*
2	R_0,53_CEM II A 42,5 R	8,8	11,3*
2	O_0,53_CEM I_KSM	1,7	2,2*
2	O_0,56_CEM I_HüS_KSM	11,7	15,0*
3	S22 0,65	22,0*	28,3
3	MS8 0,65	27,2*	34,9
4	AGB21 A-A (CEM I 42,5 N)	24,4*	31,3
4	AGB26 A-A (CEM II/B-LL 32,5 R)	49,8*	64,0
4	AGB29 A-A (CEM II/B-M (T-LL) 32,5 R)	32,9*	42,2
4	AGB21 B-A (CEM I 42,5 N)	19,3*	24,8
4	AGB26 B-A (CEM II/B-LL 32,5 R)	36,6*	47,0
4	AGB29 B-A (CEM II/B-M (T-LL) 32,5 R)	24,5*	31,5

\* bedeutet berechneter Wert (Umrechnung der verschiedenen CO<sub>2</sub>-Gehalte siehe Kapitel 2.4.1)

Anhand der Tabelle kann man erkennen, dass der W/B-Wert alleine nicht zum Einteilen in Expositions-klassen geeignet ist, da große Unterschiede im Karbonatisierungskoeffizienten bei gleichen W/B-Werten erkennbar sind (XC3 (0,60) – 21,8; O\_0,59\_CEM I\_KSM – 7,1; AGB26 B-A – 36,6). Außerdem ist an den Betonen der Quelle 4 gut der Einfluss der längeren Nachbehandlung zu sehen.

## 5.2 Karbonatisierung – Druckfestigkeit

Laut Eurocode 2 sind Mindestfestigkeiten für Expositionsklassen einzuhalten.

In Abbildung 31 kann man erkennen, dass es leichte Korrelationen zwischen Karbonatisierungswiderstand und Druckfestigkeit gibt ( $R^2=0,55$ ). Als alleiniges Beurteilungsmerkmal ist es nicht geeignet, da man klar den Einfluss der unterschiedlichen W/B-Werte erkennen kann.

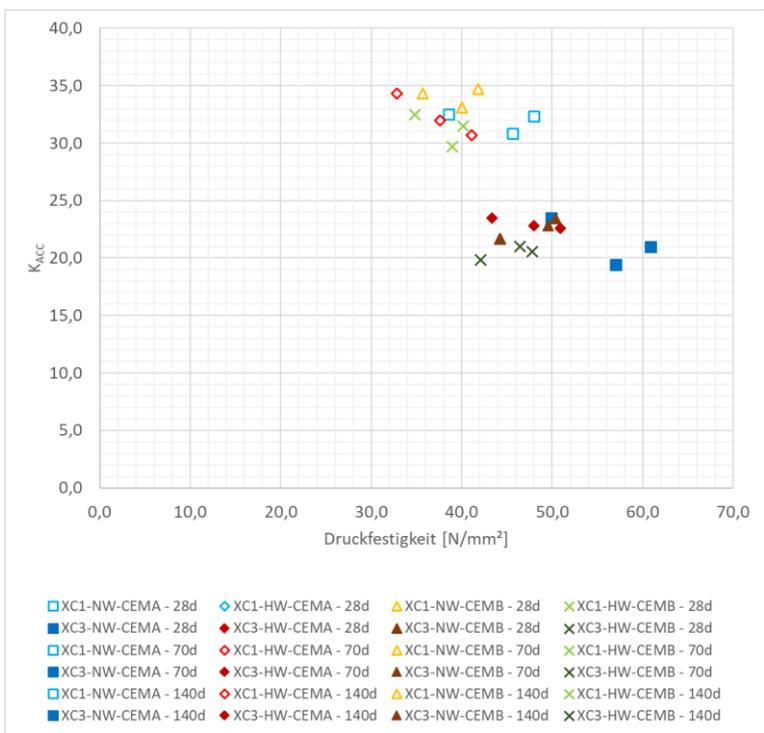


Abbildung 31  $K_{ACC}$  – Druckfestigkeit

## 5.3 Karbonatisierung – Offene Porosität

Theoretisch müsste eine größere offene Porosität zu einem höheren Karbonatisierungskoeffizienten führen, da die Diffusion durch den Beton erleichtert wird.

In Abbildung 32 kann keine Korrelation bezüglich Karbonatisierungswiderstand und offener Porosität erkannt werden. Sehr wohl ist der Einfluss der unterschiedlichen W/B-Werte (Karbonatisierungskoeffizient) und der des Leimvolumens erkennbar (offene Porosität).

Eine andere Möglichkeit wäre die Betrachtung der mittleren Porenradien oder Porenradienverteilung, da bei größeren Radien das  $CO_2$  leichter in den Beton gelangen kann.

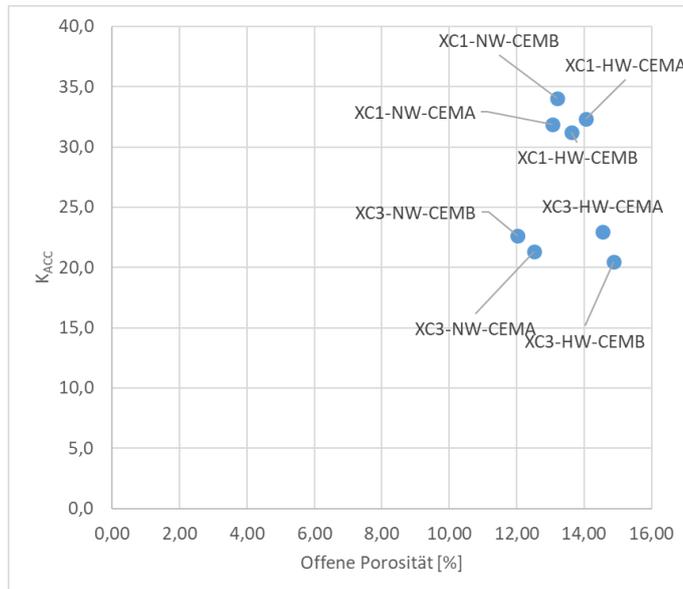


Abbildung 32 K<sub>ACC</sub> - Offene Porosität

#### 5.4 Karbonatisierung – Wasseraufnahmemenge

Bei (Basheer, Kropp and Cleland, 2001) wird auf die Korrelation der Karbonatisierungstiefe nach 1,5 Jahren und der Wasseraufnahme nach 4 Stunden hingewiesen. Bei Überprüfung dieser Annahme konnten keine Korrelationen festgestellt werden (siehe Abbildung 33). Sehr wohl ist der Einfluss der unterschiedlichen W/B-Werte (Karbonatisierungskoeffizient) und der des Leimvolumens (Wasseraufnahme) erkennbar.

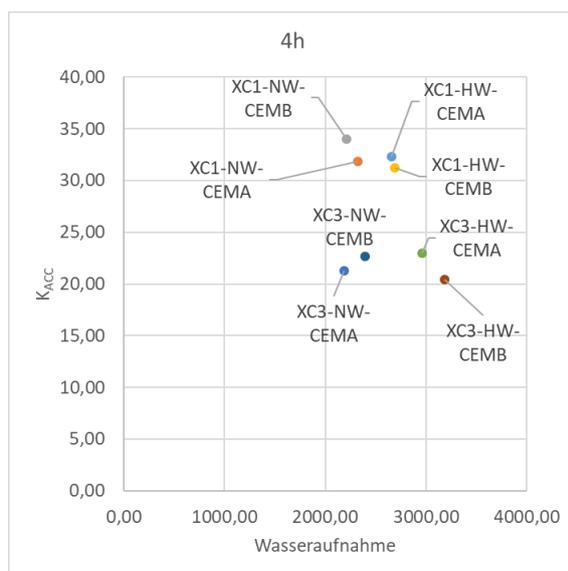


Abbildung 33 K<sub>ACC</sub> – Wasseraufnahmemenge nach 4h

## 5.5 Karbonatisierung – WU

Laut ÖNORM B 4710:2007 darf bei der WU-Prüfung für Betone der Expositionsklasse XC3 die Eindringtiefe maximal 50mm betragen. Folglich sollte ein Zusammenhang zwischen Karbonatisierung und Wassereindringtiefe bestehen.

Bei Überprüfung dieser Annahme konnte eine nur sehr schwache Korrelation festgestellt werden (siehe Abbildung 34,  $R^2 = 0,345$ )

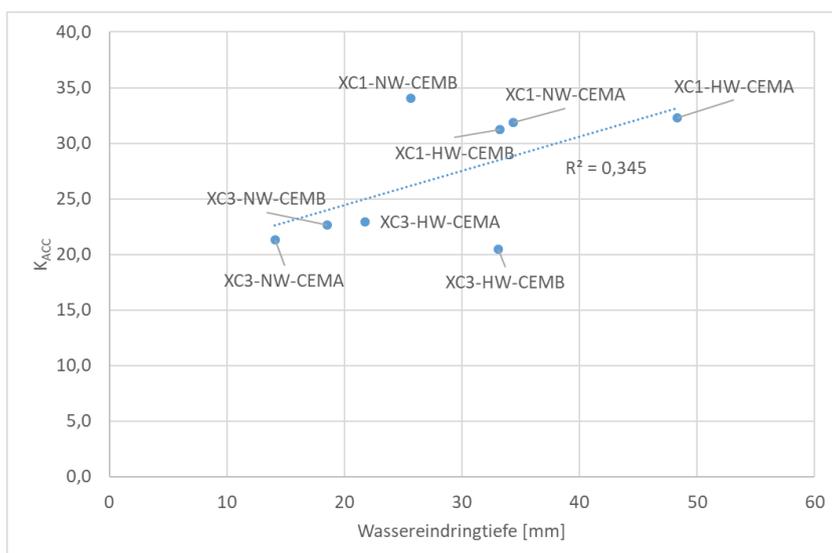


Abbildung 34 K<sub>Acc</sub> - Wassereindringtiefe

## 5.6 Karbonatisierung – W/B-Wert

Laut ÖNORM B 4710 sind für verschiedene Expositionsklassen maximale W/B-Werte definiert. Zwischen Karbonatisierung und W/B-Wert ist eine klare Korrelation erkennbar ( $R^2 = 0,96$ ). Durch Verminderung des W/B-Wertes wird einerseits der Beton dichter, da weniger überschüssiges Wasser zu weniger Kapillarporen führt und andererseits mehr Bindemittel zu mehr Portlandit führt, dass umgesetzt werden kann.

Des Weiteren ist erkennbar, dass die Verwendung des anrechenbaren Bindemittelgehaltes sinnvoller ist, als der Gesamtbindemittelgehalt ( $R^2 = 0,90$ ).

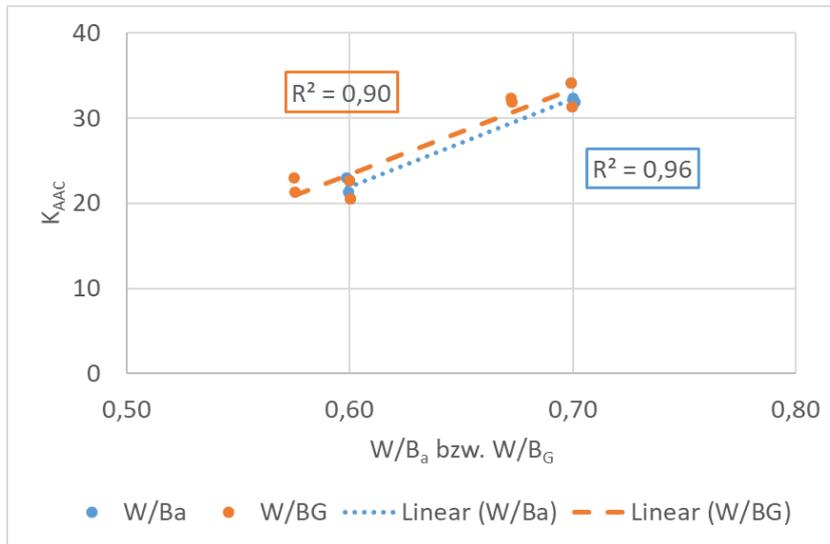


Abbildung 35 K<sub>ACC</sub> - W/B-Wert

### 5.7 Karbonatisierung – Leimvolumen

Zwischen Karbonatisierung und Leimvolumen ist keine Korrelation erkennbar. Dies deckt sich mit den Erkenntnissen von z.B. (Hunkeler, 2012a)

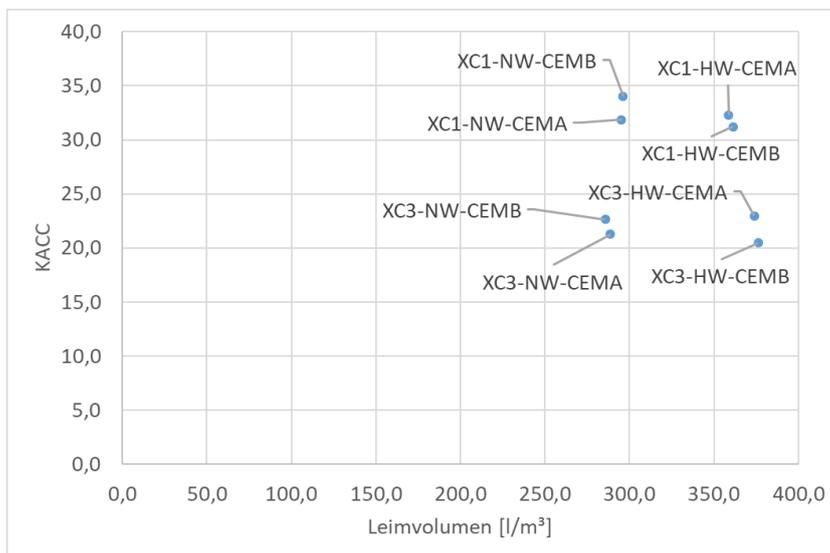


Abbildung 36 K<sub>ACC</sub> - Leimvolumen

## 5.8 Karbonatisierung – Innerer Widerstand

### 5.8.1 W/Klinker

Wie in Kapitel 2 beschrieben, reagiert das  $\text{CO}_2$  der Luft mit dem Portlandit des Betons. Eine Möglichkeit diesen Inneren Widerstand zu beschreiben ist das Verhältnis von Wasser/Klinker. Wie in Abbildung 37 ersichtlich, ist eine Korrelation erkennbar, welche aber schlechter ist, als die Korrelation mit dem W/B-Wert ( $R^2 = 0,69$ ).

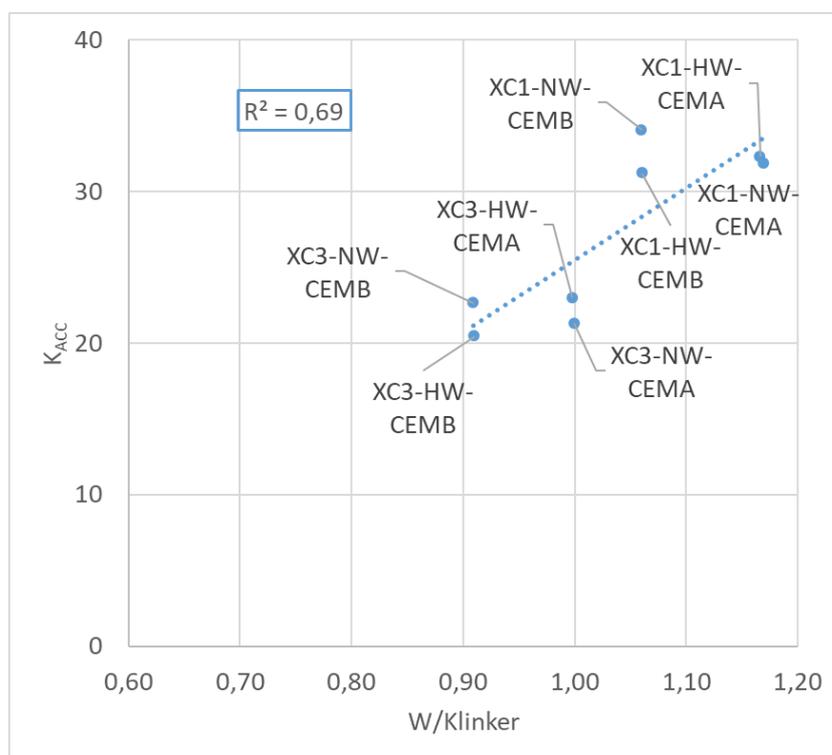


Abbildung 37 Karbonatisierung - W/Klinker

### 5.8.2 W/CaO

Eine weitere Möglichkeit ist die in Kapitel 2.4 erwähnte Variante des W/CaO-Gehalt. Der Einfachheit halber wird nur das reaktive CaO berücksichtigt, der Hydratationsgrad also außer Acht gelassen.

Diese Annahme wird getroffen, da die W/B-Verhältnisse mit 0,60 (XC3) und 0,70 (XC1) sehr hoch sind: Schon bei der ersten Messung (28 Tage) wird ein Hydratationsgrad  $> 0,90$  angenommen (Leemann and Nygaard, 2014) und dieser wird sich somit im weiteren Verlauf (Messung bei 70 und 140 Tage) nicht mehr entscheidend verändern.

### 5.8.2.1 CaO aus RFA (Analyse 1)

Bei der Ermittlung des CaO-Gehalts aus der Röntgenfluoreszenzanalyse (wie in (Leemann *et al.*, 2015) ergibt sich folgender Zusammenhang:

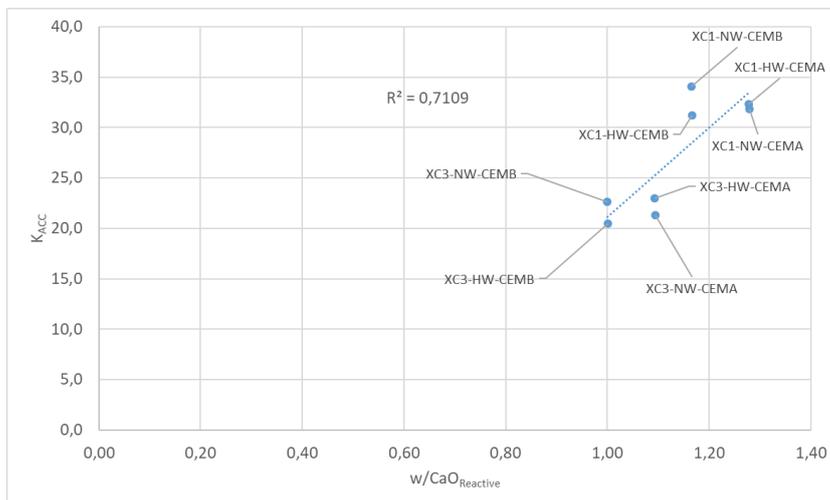


Abbildung 38 Karbonatisierung -  $w/\text{CaO}_{\text{reactive}}$

Wieder ist eine Korrelation ( $R^2 = 071$ ) erkennbar, die ähnlich dem Zusammenhang Karbonatisierungskoeffizient zu  $w/\text{Klinker}$  ist. Im Vergleich mit den folgenden Varianten zur Bestimmung des CaO-Gehalts, scheint die Bestimmung des CaO aus der Röntgenfluoreszenzanalyse nicht aussagekräftig bzw. sinnvoll.

### 5.8.2.2 CaO-Gehalt aus der RDA-Analyse (Analyse 1)

Um den CaO-Gehalt zu bestimmen wurde der prozentuelle Anteil des atomaren Gewichtes der vier Klinkerminerale bestimmt:

Tabelle 40 Atomare Masse: Elemente

Element	Ca	O	Si	Al	Fe
Atomare Masse [u]	40,1	16,0	28,1	27,0	55,8

Tabelle 41 Klinkerminerale

	Alit	Belit	Aluminat	Ferrit
Atomare Masse Gesamt [u]	228	172	270	486
Atomare Masse CaO [u]	168	112	168	224
Prozentueller Anteil vom CaO	74%	65%	62%	46%

Der angenommene CaO-Anteil von Hüttensand beträgt lt. Dr. Juhart ca. 35%<sup>11</sup>. Der CaO-Anteil von Flugasche wird mit 5% angenommen (Mittelwert von (Stark and Wicht, 2013))

Zur Berechnung des CaO-Anteils im Zement wird nun der Anteil der Klinkermineralien (Tabelle 41) mit den Werten der RDA (Tabelle 23) multipliziert und summiert. So ergeben sich folgende CaO-Anteile:

- CEM A                    52%
- CEM B                    47%
- Zumahlstoff            23%

So ergeben sich folgende  $w/\text{CaO}_{\text{reactive}}$  – Werte:

Tabelle 42  $w/\text{CaO}_{\text{reactive}}$  Variante RDA

	XC1-NW-CEMA	XC1-HW-CEMA	XC1-NW-CEMB	XC1-HW-CEMB	XC3-NW-CEMA	XC3-HW-CEMA	XC3-NW-CEMB	XC3-HW-CEMB
$w/\text{CaO}_{\text{reactive}}$	1,45	1,45	1,50	1,50	1,24	1,24	1,29	1,29

Nun erhält man folgende sehr gute Korrelation ( $R^2 = 0,90$ ):

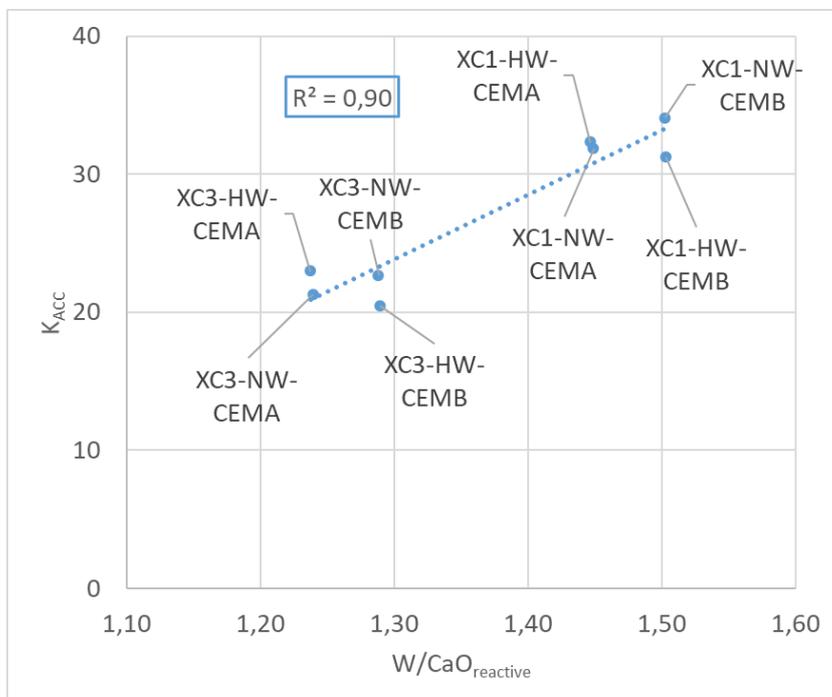


Abbildung 39 Karbonatisierung -  $w/\text{CaO}_{\text{reactive}}$  Variante RDA

<sup>11</sup> Lt. inoffizieller Angabe der Fa. VOEST und Erfahrung am Institut

Die Bestimmung des CaO aus RDA ist also sinnvoll, um die Korrelation zu bestimmen. Im Gegensatz zu (Leemann *et al.*, 2015) ändert sich die Korrelation im Vergleich zum W/B-Gehalt nicht.

### 5.8.2.3 CaO aus Untersuchung gem. ONR 29196-4 (Analyse 2)

Zur Berechnung des CaO-Anteils im Zement wird der durchschnittliche CaO-Anteil im Klinker (64,5% - Mittelwert nach (Stark and Wicht, 2013)) mit den Ergebnissen der Untersuchung gem. ONR 29196-4 multipliziert. Analog dazu ist beim Zuschlagstoff vorgegangen worden, wobei die durchschnittlichen CaO-Gehalte von 5.8.2.2 übernommen wurden. So ergeben sich folgende CaO-Anteile:

- CEM A                    52%
- CEM B                    49%
- Zuschlagstoff            24%

Woraus sich folgende  $w/\text{CaO}_{\text{reactive}}$  – Werte ergeben:

Tabelle 43  $w/\text{CaO}_{\text{reactive}}$  Variante ONR 29196-4 (Analyse 2)

	XC1-NW- CEMA	XC1-HW- CEMA	XC1-NW- CEMB	XC1-HW- CEMB	XC3-NW- CEMA	XC3-HW- CEMA	XC3-NW- CEMB	XC3-HW- CEMB
$w/\text{CaO}_{\text{reactive}}$	1,45	1,45	1,43	1,43	1,24	1,24	1,22	1,23

Nun erhält man wieder folgende sehr gute Korrelation ( $R^2 = 0,95$ ):

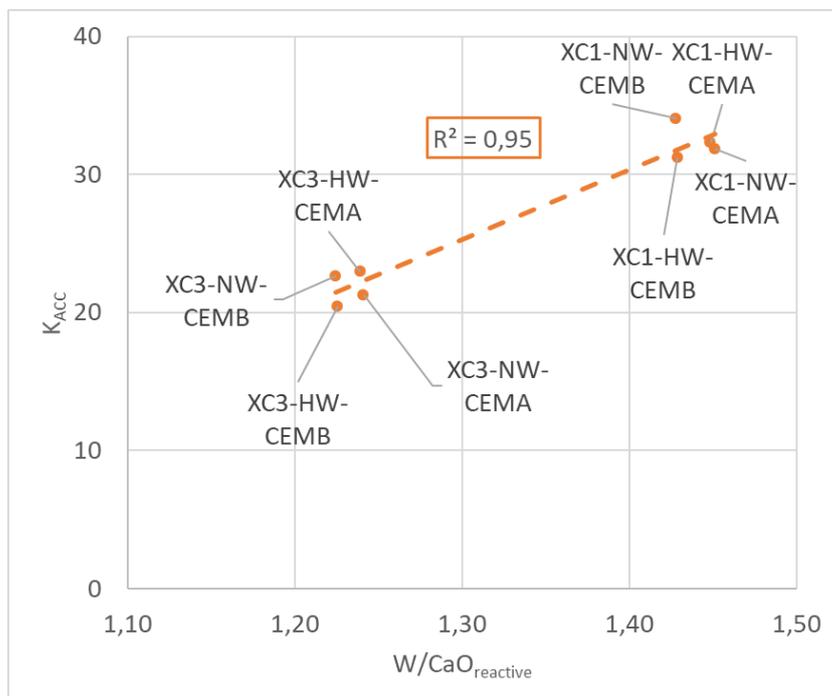


Abbildung 40 W/CaO<sub>reactive</sub> Variante ONR 29196-4 (Analyse 2)

Es ist festzuhalten, dass die Bindemittelzusammensetzungen CEM A (mit AHWZ) und CEM B keine signifikanten Unterschiede beim CaO<sub>reactive</sub>-Anteil machen!

### 5.9 Karbonatisierungskoeffizient natürlich nach SIA 262/1

Mit Hilfe des beschleunigten Karbonatisierungskoeffizients kann der natürliche Karbonatisierungskoeffizient an Hand folgender Gleichung berechnet (angepasst an (Hunkeler, 2012a) bzw. SIA 262/1-Anhang I) werden:

$$K_{NAC} = f * \frac{K_{ACC}}{\sqrt{\frac{[CO_2]_S}{[CO_2]_N}}}}$$

- K<sub>NAC</sub> Karbonatisierungskoeffizient (natürlich) [mm/vJahr]
- K<sub>ACC</sub> Karbonatisierungskoeffizient (beschleunigt) [mm/vJahr]
- [CO<sub>2</sub>]<sub>S</sub> CO<sub>2</sub>-Gehalt Klimaschrank (2%)
- [CO<sub>2</sub>]<sub>N</sub> CO<sub>2</sub>-Gehalt in der Luft (0,033%)
- f Korrekturfaktor für Schnellkarbonatisierung:  
Interpolation zwischen 1,13 [1%] und 1,31 [4%] → 1,19 [2%] lt. (Hunkeler, 2012a)

Die errechneten natürlichen Karbonatisierungskoeffizienten sind in der folgenden Tabelle ersichtlich:

Tabelle 44  $K_{NAC}$  Mittelwerte & Standardabweichung mit hochgerechneten Karbonatisierungstiefen

$K_{NAC}$ [mm/vJahr]	XC1-NW- CEMA	XC1-HW- CEMA	XC1-NW- CEMB	XC1-HW- CEMB	XC3-NW- CEMA	XC3-HW- CEMA	XC3-NW- CEMB	XC3-HW- CEMB
MW	5,1	5,2	5,4	5,0	3,4	3,7	3,6	3,3
STABW	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1
$d_{K,25 \text{ Jahre}}$ [mm]	25	26	27	25	17	18	18	16
$d_{K,50 \text{ Jahre}}$ [mm]	36	36	38	35	24	26	26	23
$d_{K,100 \text{ Jahre}}$ [mm]	51	52	54	50	34	37	36	33

Laut SIA 262:2013 gelten folgende max. Werte für  $K_{NAC}$  des Betons:

Tabelle 45  $K_{NAC,max}$  mit hochgerechneten Karbonatisierungstiefen

Nutzungsdauer	XC3		XC4	
50 Jahre	5,0 mm/Jahre <sup>0,5</sup>	36 mm	5,0 mm/Jahre <sup>0,5</sup>	36 mm
100 Jahre	4,0 mm/Jahre <sup>0,5</sup>	40 mm	4,5 mm/Jahre <sup>0,5</sup>	45 mm

Daraus folgt, dass sämtliche XC3-Betone laut der Schweizer Norm auch als XC3-Betone gelten würden, sogar mit 100-jähriger Nutzungsdauer. Dies gilt nur wenn die geforderte Mindestbetondeckung (siehe SIA 262:2013) eingehalten wird.

## 6 Zusammenfassung, Schlussfolgerung & Ausblick

In dieser Arbeit wurden folgende Themen behandelt:

Untersuchung des Karbonatisierungswiderstandes typischer Transportbetone: Der Karbonatisierungskoeffizient von typischen Transportbetonen der Expositionsclassen XC1 und XC3 (jeweils 4 Sorten) wurde anhand einer Karbonatisierungsprüfung mit einer beschleunigten Verfahren ermittelt.

Diskussion von Prüfverfahren zur Ermittlung der Karbonatisierungswiderstandes: Von den fünf untersuchten Verfahren zur Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes sind drei Verfahren geeignet um den Karbonatisierungswiderstand zu bestimmen. Die Ergebnisse der Verfahren sind aber nur mit Ergebnissen desselben Verfahrens zu vergleichen, da vor allem eine andere Vorlagerung zu unterschiedlichen Ergebnissen führt. Des Weiteren ist es möglich Ergebnisse von Prüfungen mit einem bestimmten  $\text{CO}_2$ -Gehalt auf eine andere  $\text{CO}_2$ -Konzentration umzurechnen (bis zu 4%  $\text{CO}_2$ ), wodurch eine Lebensdauerabschätzung möglich ist.

Untersuchung des Einflusses der Zusammensetzung auf den Karbonatisierungswiderstand: Hohe Korrelationen wurden beim Verhältnis W/B und  $\text{W}/\text{CaO}_{\text{reactive}}$  gefunden. Das Leimvolumen, sowie die Wassereindringtiefe haben keine Korrelationen gezeigt.

### 6.1 Korrelationen des Karbonatisierungswiderstandes mit Kenngrößen der Betone

Eine hohe Korrelation des Karbonatisierungskoeffizienten ist mit dem Verhältnis von W/B und  $\text{W}/\text{CaO}_{\text{reactive}}$  zu sehen.

Schwache Korrelationen sind mit der Druckfestigkeit und dem W/Klinker-Verhältnis zu beobachten.

Eine Korrelation der Porosität, der Wasseraufnahme nach 4h, der Wassereindringtiefe und dem Leimvolumen mit dem Karbonatisierungskoeffizienten ist nicht feststellbar.

Wichtig zu bemerken ist, dass zu wenig unterschiedliche Zusammensetzungen geprüft wurden, um eindeutige Korrelationen mit Bindemittelzusammensetzung, Wassereindringtiefe, Porosität festzustellen. Eindeutig sind Unterschiede des  $K_{\text{ACC}}$  vom W/B-Wert feststellbar und vom Verhältnis  $\text{W}/\text{CaO}_{\text{reactive}}$ .

#### 6.1.1 Vergleich der Bindemittel

Bei Auswertung der Korrelationen wurde festgestellt, dass die Bindemittel im Hinblick auf die Karbonatisierungseigenschaften nicht unterschiedlich

sind, da die entscheidenden Einflussfaktoren  $W/B_a$  und  $W/CaO_{\text{reactive}}$  gleich bzw. nur leicht unterschiedlich voneinander sind (siehe Tabelle 26).

### 6.1.2 W/CaO

Die Korrelationen von Karbonatisierungskoeffizienten mit  $W/CaO_{\text{reactive}}$  sind, wie bereits erwähnt, sehr gut. Dies bedeutet  $CaO_{\text{reactive}}$  in dem gesamten Bindemittel ist ein wichtiger Indikator. Allerdings gehen wir dabei von einer fast vollständigen Hydratation aus (Hydratationsgrad  $\approx 100\%$ ), was lt. Literatur bei hohen  $W/B$ -Werten anzunehmen ist (Leemann and Nygaard, 2014).

In Wirklichkeit sollte nur das reagierte  $CaO$  in Rechnung gestellt werden. Da dies aber nur mit Aufwand machbar ist, bzw. der Hydratationsgrad im Allgemeinen nicht bekannt ist, darf das  $W/CaO_{\text{reactive}}$ -Verhältnis nur bei einer Vollständigen Hydratation als Kennwert des Karbonatisierungswiderstandes herangezogen werden

## 6.2 Karbonatisierungswiderstand mit einem beschleunigten Verfahren

Wie in Kapitel 3 bereits erwähnt, gibt es eine Vielzahl an Verfahren, die aber nur zum Teil auch geeignet sind, den Karbonatisierungswiderstand abzubilden.

### 6.2.1 Vergleichbarkeit der Verfahren

Die Vergleichbarkeit von Ergebnissen der unterschiedlichen Verfahren ist nur bedingt gegeben:

Unterschiedliche  $CO_2$ -Konzentrationen können, bis zu Konzentrationen von 4%  $CO_2$ , gut umgerechnet werden. Dadurch ist es auch möglich eine Einwirkungsdauerabschätzung mit einem Karbonatisierungskoeffizienten, der mit einem beschleunigten Verfahren ermittelt wurde, zu machen.

Ergebnisse von Versuchen mit unterschiedlichen Arten der Vorlagerung und Nachbehandlung können nicht miteinander verglichen werden, da unterschiedliche Aushärtung bei Vorlagerung zu unterschiedlichen Karbonatisierungskoeffizienten führt.

### 6.2.2 Umrechnung beschleunigte/natürliche Karbonatisierung

Die Umrechnung erfolgt wie in 3.6.2 beschrieben mit folgender Formel:

$$K_{NAC} = f * \frac{K_{ACC}}{\sqrt{\frac{[CO_2]_S}{[CO_2]_N}}}}$$

Durch Multiplikation von  $K_{NAC}$  mit der Wurzel der Zeit kann nun die Karbonatisierungstiefe zu diesem bestimmten Zeitpunkt ermittelt werden.

Hinzuzufügen ist, dass die Karbonatisierung in einer Klimakammer unter konstanten, immer gleichen Bedingungen stattfindet (ständige Teilsättigung der Poren). Allerdings findet die natürliche Karbonatisierung unter variablen Bedingungen statt.

### 6.2.3 Beispielabschätzung der Lebensdauer

Für eine Betonsorte wird eine Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes mit einem beschleunigten Verfahren gemacht. Daraus erhält man einen beschleunigten Karbonatisierungskoeffizienten ( $K_{ACC}$ ). Mit diesem kann man den natürlichen Karbonatisierungskoeffizienten ( $K_{NAC}$ ) und damit die Eindringtiefe nach einer gewissen Zeit  $t$  berechnen.

Folgende Formeln werden dazu benötigt:

- Umrechnung auf natürliche Karbonatisierungsrate:

$$K_{NAC} = f * \frac{K_{ACC}}{\sqrt{\frac{[CO_2]_S}{[CO_2]_N}}}} \quad \text{für XC1-NW-CEMA:} \quad 5,1 = 1,19 * \frac{31,9}{\sqrt{\frac{2,0}{0,036}}}$$

- Berechnung der Karbonatisierungstiefe zu einem bestimmten Zeitpunkt:

$$d_t = K_{NAC} \cdot \sqrt{t} \quad \text{für XC1-NW-CEMA (100 Jahre):} \quad 51 = 5,1 \cdot \sqrt{100}$$

Für die in dieser Arbeit geprüften Betone ergeben sich für eine Bemessungsdauer von 25/50/100 Jahren folgende Werte:

Tabelle 46 Berechnete Karbonatisierungstiefen abhängig von der Einwirkungsdauer

	XC1-NW-CEMA	XC1-HW-CEMA	XC1-NW-CEMB	XC1-HW-CEMB	XC3-NW-CEMA	XC3-HW-CEMA	XC3-NW-CEMB	XC3-HW-CEMB
$K_{AAC}$ -MW [mm/ $\sqrt{\text{Jahr}}$ ]	31,9	32,3	34,0	31,2	21,3	23,0	22,6	20,5
$K_{NAC}$ -MW [mm/ $\sqrt{\text{Jahr}}$ ]	5,1	5,2	5,4	5,0	3,4	3,7	3,6	3,3
$d_{25}$ -MW [mm]	25	26	27	25	17	18	18	16
$d_{50}$ -MW [mm]	36	36	38	35	24	26	26	23
$d_{100}$ -MW [mm]	51	52	54	50	34	37	36	33

Laut SIA 262:2013 wird der  $K_{NAC,max}$  von 5,0 mm /Jahre<sup>0,5</sup> (Tabelle 45) von den XC3-Betonen eingehalten. Allerdings ist die in dieser Versuchsreihe gewählte Vorlagerung anders (längere Wasserlagerung), wodurch der Karbonatisierungswiderstand überschätzt werden kann.

Die Bemessungsregeln nach Model Code 2010 und Model Code for Service Life Design 2006 sind noch nicht durchgängig. Angelehnt an (Hermann, 2017) wird nun die erforderliche Betondeckung bei natürlichen Bedingungen ermittelt.<sup>12</sup>

Der Nachweis könnte wie folgt geführt werden:

$$\gamma_f \cdot d_t \leq c_{nom,dur} - \Delta c$$

$d_t$	Berechnete Karbonatisierungstiefe nach t Jahren [mm]
$\gamma_f$	Annahme Teilsicherheitsbeiwert: 1,5 lt. (Hermann, 2017); 1,25 lt (Greve-Dierfeld, 2015)
$c_{nom,dur}$	Nominelle Betondeckung [mm]
$\Delta c$	Vorhaltemaß [mm], 5mm lt. ÖNORM B 1992-1-1:2011

Ausgehend von einer Bemessungsdauer von 50 und 100 Jahren sind nach ÖNORM EN 1992-1-1:2009 folgende Mindestbetonüberdeckungen notwendig:

Tabelle 47 Mindestbetonüberdeckung (Auszug aus Eurocode 2 & SIA 262:2013)

Anforderungsklasse	XC1	XC3
S4 (50 Jahre)	15 mm	25 mm
S6 (100 Jahre)	25 mm	35 mm
SIA 262:2013	-	35 mm

Wenn nun die berechnete Karbonatisierungstiefe kleiner als die Mindestbetonüberdeckung ist, kann von im Mittel ausreichender Betondeckung ausgegangen werden

In diese Berechnung fließen aber keine Faktoren, wie die unterschiedlichen Bedingungen der unterschiedlichen Expositionsklassen ein! Dadurch wären für die geprüften Betone (die lt. gültiger Norm hergestellt wurden) sogar größere Betondeckungen nötig!

In den folgenden Tabellen sind die ermittelten Mittelwerte mit angenommenen Teilsicherheitsbeiwerten der Karbonatisierungstiefen ersichtlich:

<sup>12</sup> **Achtung:** Es gibt keine gültige ÖNORM für so eine Lebensdauerbemessung und Teilsicherheitsbeiwerte sind nicht festgelegt.

Tabelle 48 Berechnete mittlere Karbonatisierungstiefen ( $\gamma_i=1,5$ )

	XC1-NW- CEMA	XC1-HW- CEMA	XC1-NW- CEMB	XC1-HW- CEMB	XC3-NW- CEMA	XC3-HW- CEMA	XC3-NW- CEMB	XC3-HW- CEMB
d <sub>50</sub> -MW [mm]	54	55	58	53	36	39	38	35
d <sub>100</sub> -MW [mm]	76	77	82	75	51	55	54	49

Tabelle 49 Berechnete mittler Karbonatisierungstiefen ( $\gamma_i=1,25$ )

	XC1-NW- CEMA	XC1-HW- CEMA	XC1-NW- CEMB	XC1-HW- CEMB	XC3-NW- CEMA	XC3-HW- CEMA	XC3-NW- CEMB	XC3-HW- CEMB
d <sub>50</sub> -MW [mm]	45	46	48	44	30	32	32	29
d <sub>100</sub> -MW [mm]	64	64	68	62	42	46	45	41

### 6.3 Empfehlungen für weiterführende Versuche

Für weitere Versuchsreihen, könnten folgende Empfehlungen berücksichtigt bzw. Versuche durchgeführt werden:

- Größere Unterschiede der Betonzusammensetzung und der Bindemittel
- Prüfung der Karbonatisierung mit einem beschleunigten Verfahren
- Prüfung der Druckfestigkeit (zur Überprüfung der indikativen Druckfestigkeit)
- Ermittlung der mittleren Porenradien bzw. Porenradienverteilung
- Anpassung der Karbonatisierungsprüfung: Durch eine Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration auf 4,0 % kann die Prüfungsdauer verringert werden. Prüfungen zu folgenden Zeitpunkten erscheinen sinnvoll: 0, 28, 56 und 70 Tage. Jedenfalls sollten mindesten drei Prüfzeitpunkte stattfinden.
- Klärung des Einflusses der CO<sub>2</sub>-Konzentration auf Mineralbildung und Diskussion der Aussage des (fib, 2006), dass bei > 2,0 % CO<sub>2</sub> nicht mehr die natürlichen Bedingungen widerspiegelt werden

## 6.4 Ausblick

Folgende Punkte können in weiteren Arbeiten abgehandelt werden:

- Festlegung Vorlagerung: Um das Performance-based Design Concept für Karbonatisierung anzuwenden, ist ein Vorlagerungsverfahren für die Betone auszuwählen.
- Expositionsklassen und Performance: Nach dem ECPC (equivalent concrete performance concept) erfolgt ein Vergleich mit Referenzbetonen mit typischen Zusammensetzungen nach deskriptiver Norm. Alternativ zum ECPC kann ein Konzept, wie im (fib, 2006) bzw. SIA 262/1:2013 verfolgt werden. Eine Möglichkeit wäre dann die Übernahme der Grenzwerte lt. SIA 262/1:2013, aber dann müsste die Vorlagerung auch ident sein. Zusätzlich sind generell Teilsicherheitsbeiwerte, Mindestbetondeckung und gegebenenfalls Faktoren zur Berücksichtigung der natürlichen Umgebungsbedingungen im Gegensatz zu Laborbedingungen zu berücksichtigen
- Einfluss Betonzusammensetzung: Um das Karbonatisierungsverhalten von Betonen genauer zu definieren, müssen die Einflüsse verschiedener Ausgangsstoffe genauer untersucht werden.
- Überprüfung Korrelation W/CaO-Gehalt: Überprüfung der Vorgehensweise mit anderen Betonen mit deutlichen Unterschieden im Klinker- und Zusatzstoffanteil (unterschiedliche Bindemittelzusammensetzungen)
- Erweiterung der Versuchsreihe: für potentielle Erweiterung der Untersuchungen auf neue Betonzusammensetzungen oder auf das equivalent performance of binder concept sollte die Abhängigkeit der Dauerhaftigkeitskenngrößen von W/B und W/P (Wasser/Feinstoffwert) unter anderem untersucht werden.

## Glossar

<b>RDA</b>	Röntgendiffraktometrie: Analyse der Beugung von Röntgenstrahlen an geordneten Strukturen zur z.B.: Mineralienbestimmung <sup>13</sup> Es können kristalline Zementbestandteile, die nicht amorph sind mineralogisch eingeordnet werden.
<b>RFA</b>	Röntgenfluoreszenzanalyse: „Methode aus der Materialanalytik auf Grundlage der Röntgenfluoreszenz“ <sup>14</sup> Es können Zementbestandteile hinsichtlich ihrer molekularen Zusammensetzung analysiert werden.
<b>Wiederholpräzision</b>	„Die Wiederholpräzision ist das Ausmaß der Übereinstimmung zwischen Ergebnissen unabhängiger Messungen desselben Analyten, die unter folgenden Bedingungen durchgeführt wurden: dasselbe Messverfahren, derselbe Bearbeiter, dasselbe Instrument, derselbe Ort, dieselben Versuchsbedingungen, Wiederholung der Messungen innerhalb kurzer Zeitintervalle“ <sup>15</sup>
<b>Vergleichspräzision</b>	„Die Vergleichspräzision ist in der Messtechnik [...] definiert als die Präzision unter Vergleichsbedingungen. [...] Unterscheiden können sich z.B.: die benutzten Messinstrumente (ähnlichen Typs), die Orte oder Zeitpunkte der Messung, die Person, die die Messung durchführt, die allgemeinen Versuchsbedingungen, solange das Verfahren gleich bleibt.“ <sup>16</sup>

<sup>13</sup> Vgl.: WIKIPEDIA.: Röntgenbeugung. <https://de.wikipedia.org/wiki/R%C3%B6ntgenbeugung#Anwendungen>. Datum des Zugriffs: 24.11.2017.

<sup>14</sup> WIKIPEDIA.: Röntgenfluoreszenzanalyse. <https://de.wikipedia.org/wiki/R%C3%B6ntgenfluoreszenzanalyse>. Datum des Zugriffs: 24.11.2017.

<sup>15</sup> WIKIPEDIA: Wiederholpräzision: <https://de.wikipedia.org/wiki/Wiederholpräzision>. Datum des Zugriffs: 04.12.2017

<sup>16</sup> WIKIPEDIA: Vergleichspräzision: <https://de.wikipedia.org/wiki/Vergleichspräzision>. Datum des Zugriffs: 04.12.2017

## Literaturverzeichnis

Basheer, L., Kropp, J., and Cleland, D. J. (2001) 'Assessment of the durability of concrete from its permeation properties: A review', *Construction and Building Materials*, 15(2-3), pp. 93–103.

Basheer, P. A. M. *et al.* (2001) 'Effect of relative humidity and air permeability on prediction of the rate of carbonation of concrete', *Structures and Buildings*, 146(3), pp. 319–326.

Cui, H. *et al.* (2015) 'Experimental study on effects of CO<sub>2</sub> concentrations on concrete carbonation and diffusion mechanisms', *Construction and Building Materials*, 93, pp. 522–527.

fib (2006) *Model Code for Service Life Design*, fib Bulletin No. 34, Lausanne: International Federation for Structural Concrete (fib).

Gonen, T. and Yazicioglu, S. (2007) 'The influence of compaction pores on sorptivity and carbonation of concrete', *Construction and Building Materials*, 21(5), pp. 1040–1045.

von Greve-Dierfeld, S. M. (2015): *Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit XC-exponierter Stahlbetonbauteile*, Dissertation am Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen an der Technischen Universität München.

von Greve-Dierfeld, S. M. and Gehlen, C. (2016) 'Performance-based durability design, carbonation part 2 - Classification of concrete', *Structural Concrete*, 17(4), pp. 523–532.

Hainer, S., Proske, T. and Graubner, C. A. (2015) 'Einfluss der Nachbehandlung auf das Karbonatisierungsverhalten von Beton aus klinkerarmen Zementen', *Beton- und Stahlbetonbau*, 110(1), pp. 41–49.

Hermann, P. (2017) *Karbonatisierungswiderstand von Öko-Beton für Fertigteile*, Diplomarbeit am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie mit angeschlossener TVFA für Festigkeits- und Materialprüfung an der Technischen Universität Graz.

Hunkeler, F. (2012a) *Anforderungen an den Karbonatisierungswiderstand von Betonen*, Forschungsauftrag AGB 2008/012 auf Antrag der Arbeitsgruppe Brückenforschung (AGB).

Hunkeler, F. (2012b) 'Einfluss des CO<sub>2</sub>-Gehaltes, der Nach- und Vorbehandlung sowie der Luftfeuchtigkeit auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit von Beton', *Beton- und Stahlbetonbau*, 107(9), pp. 613–624.

Ishida, T. and Li, C.-H. (2007) 'Modeling of Carbonation based on Thermo-Hygro Physics with Strong Coupling of Mass Transport and Equilibrium in Micro-pore Structure of Concrete', *Journal of Advanced Concrete Technology*, 6(2), pp. 303-316.

Leemann, A. *et al.* (2015) 'Relation between carbonation resistance, mix design and exposure of mortar and concrete', *Cement and Concrete Composites*, 62, pp. 33–43.

Leemann, A. and Moro, F. (2017) 'Carbonation of concrete: the role of CO<sub>2</sub> concentration, relative humidity and CO<sub>2</sub> buffer capacity', *Materials and Structures*, 50:30.

Leemann, A. and Nygaard, P. (2014) *Zusammenhang zwischen Karbonatisierungswiderstand, CO<sub>2</sub>-Pufferkapazität und Diffusivität von Mischzementen*, Schlussbericht des cemsuisse-Projekt 201207.

Stark, J. and Wicht, B. (2013) *Dauerhaftigkeit von Beton, 2.*, aktualisierte und erweiterte Auflage, Berlin: Springer.

## Normenverzeichnis

ÖNORM B 1992-1-1:2011	Eurocode 2 — Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
ÖNORM B 4710-1:2007	Beton Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis
ÖNORM EN 12390-3:2012	Prüfung von Festbeton Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern
ÖNORM EN 13295:2004	Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Bestimmung des Karbonatisierungswiderstands
ÖNORM EN 14630:2007	Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken — Prüfverfahren — Bestimmung der Karbonatisierungstiefe im Festbeton mit der Phenolphthalein-Prüfung
ÖNORM EN 1936:2007	Prüfverfahren für Naturstein — Bestimmung der Reindichte, der Rohdichte, der offenen Porosität und der Gesamtporosität
ÖNORM EN 1999:2013	Eurocode — Grundlagen der Tragwerksplanung
ÖNORM EN 1992-1-1:2009	Eurocode 2: Bemessung von Stahlbeton und Spannbetontragwerke – Teil 1-1 Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
ÖNORM EN 197-1:2011	Zement - Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement
ÖNORM EN 206:2014	Beton — Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
ÖNORM EN 772-11:2011	Prüfverfahren für Mauersteine - Teil 11: Bestimmung der kapillaren Wasseraufnahme von Mauersteinen aus Beton, Porenbetonsteinen, Betonwerksteinen und Natursteinen sowie der anfänglichen Wasseraufnahme von Mauerziegeln
ONR 23303:2010	Prüfverfahren Beton (PVB) Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe
ONR 29196-4:2008	Prüfverfahren für Zement — Teil 4: Quantitative Bestimmung der Bestandteile (CEN/TR 196-4:2007)
ONR CEN/TS 12390-12:2010	Prüfung von Festbeton - Teil 12: Bestimmung des potentiellen Karbonatisierungswiderstandes von Beton: Beschleunigtes Karbonatisierungsverfahren
prÖNORM B 4710-1:2017	Beton Teil 1: Festlegung, Herstellung, Verwendung und Konformitätsnachweis
ÖNORM B 4710-1:2019	Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung, Verwendung und Konformität
SIA 262/1:2013	Betonbau – Ergänzende Festlegungen
SIA 262:2013	Betonbau





Dies ist eine Veröffentlichung des

### **FACHBEREICHS INGENIEURBAUKUNST (IBK) AN DER TU GRAZ**

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst umfasst die dem konstruktiven Ingenieurbau nahe stehenden Institute für Baustatik, Betonbau, Stahlbau & Flächentragwerke, Holzbau & Holztechnologie, Materialprüfung & Baustofftechnologie, Baubetrieb & Bauwirtschaft, Hochbau & Industriebau, Bauinformatik und Allgemeine Mechanik der Fakultät für Bauingenieurwissenschaften an der Technischen Universität Graz.

Dem Fachbereich Ingenieurbaukunst ist das Bautechnikzentrum (BTZ) zugeordnet, welches als gemeinsame hochmoderne Laboreinrichtung zur Durchführung der experimentellen Forschung aller beteiligten Institute dient. Es umfasst die drei Laboreinheiten für konstruktiven Ingenieurbau, für Bauphysik und für Baustofftechnologie.

Der Fachbereich Ingenieurbaukunst kooperiert im gemeinsamen Forschungsschwerpunkt „Advanced Construction Technology“. Dieser Forschungsschwerpunkt umfasst sowohl Grundlagen- als auch praxisorientierte Forschungs- und Entwicklungsprogramme.

Weitere Forschungs- und Entwicklungskooperationen bestehen mit anderen Instituten der Fakultät, insbesondere mit der Gruppe Geotechnik, sowie nationalen und internationalen Partnern aus Wissenschaft und Wirtschaft.

Die Lehrinhalte des Fachbereichs Ingenieurbaukunst sind aufeinander abgestimmt. Aus gemeinsam betreuten Projektarbeiten und gemeinsamen Prüfungen innerhalb der Fachmodule können alle Beteiligten einen optimalen Nutzen ziehen.

Durch den gemeinsamen, einheitlichen Auftritt in der Öffentlichkeit präsentiert sich der Fachbereich Ingenieurbaukunst als moderne Lehr- und Forschungsgemeinschaft, welche die Ziele und Visionen der TU Graz umsetzt.

Nummerierungssystematik der Schriftenreihe:

D – Diplom(Master)arbeiten/Dissertationen | F – Forschungsberichte  
B - Projekt Bachelor | M - Projekt Master | S – Skripten,  
Vorlesungsunterlagen | V – Vorträge, Tagungen

Institutskenzahl:

1 – Allgemeine Mechanik | 2 – Baustatik | 3 – Betonbau  
4 – Holzbau & Holztechnologie | 5 – Stahlbau & Flächentragwerke  
6 – Materialprüfung & Baustofftechnologie | 7 – Baubetrieb & Bauwirtschaft  
8 – Hochbau & Industriebau | 9 – Bauinformatik  
10 – Labor für Konstruktiven Ingenieurbau

Fortlaufende Nummer pro Reihe und Institut / Jahreszahl