

Abschlussbericht

zum Einzel-Forschungsvorhaben

„Grenzzustandsbezogene Optimierung von Betonzusammensetzungen: Ein Schritt zur weiteren Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Beton“

des Gesamt-Forschungsvorhabens

„Entwicklung leistungsfähiger Zemente und Betone mit geringen spezifischen CO₂-Emissionen“ Abschnitt 2.1 „Einsatz weiterer Zementhauptbestandteile“

**gefördert durch die
„Dres. Edith und Klaus Dyckerhoff-Stiftung“**

Bearbeiter:
Dominik Niedermeier (bis 09/2016),
Nura Tomala (ab 10/2016)
Tel.: +49 211 4578 414
E-Mail: nura.tomala@vdz-online.de

Zuwendungsempfänger:
VDZ gGmbH
Tannenstraße 2
40476 Düsseldorf

Ansprechpartner:
Dr. Martin Schneider
Tel.: +49 211 4578 200
E-Mail: Martin.Schneider@vdz-online.de

Dr. Christoph Müller
Tel.: +49 211 4578 372
E-Mail: Christoph.Mueller@vdz-online.de

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung und Zielsetzung	3
2	Arbeitsprogramm und Untersuchungsmethoden	4
2.1	Allgemeines	4
2.2	Versuche zum Carbonatisierungswiderstand	5
2.3	Versuche zum Chlorideindringwiderstand	7
2.4	Durchführung von probabilistischen Lebensdauerberechnungen	8
2.4.1	Grundprinzip	8
2.4.2	Probabilistische Berechnungen für den Grenzzustand „Depassivierung der Bewehrung infolge Carbonatisierung“	9
2.4.3	Probabilistische Berechnungen für den Grenzzustand „Erreichen eines kritischen, korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung“	11
3	Untersuchungsergebnisse	14
3.1	Frisch- und Festbetoneigenschaften	14
3.2	Carbonatisierungswiderstand von Betonen	14
3.3	Chlorideindringwiderstand von Betonen	24
3.4	Lebensdauerberechnungen für Stahlbetonbauteile	28
3.4.1	Grenzzustand „Depassivierung der Bewehrung infolge Carbonatisierung“	28
3.4.2	Grenzzustand „Erreichen des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung“	30
4	Zusammenfassung	34
5	Literatur	38
6	Anhang	40
A	Frisch- und Festbetoneigenschaften der untersuchten Betone	40
B	Ergebnisse der Carbonatisierungsversuche	41
C	Ergebnisse der Versuche zum Chlorideindringen	46

1 Problemstellung und Zielsetzung

Bei der Planung von Stahlbetonbauwerken wird in der Regel eine Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren zugrunde gelegt. Zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit des Betons enthalten die Normen DIN EN 1992-1-1 [1] mit Nationalem Anhang DIN EN 1992-1-1/NA [2], EN 206-1 [4] und DIN 1045-2 [3] deskriptiv festgelegte Anforderungen hinsichtlich der Mindestbetondeckung, des maximal zulässigen Wasserzementwerts, des Mindestzementgehalts und der Eigenschaften der Betonausgangsstoffe.

Demgegenüber enthält der fib Model Code „Service Life Design“ (MC SLD) [5] Nachweisprinzipien, Modelle und auch Hinweise auf Eingangsparameter für eine vollprobabilistische Lebensdauerbemessung. Anwendbare vollprobabilistische Vorhersagemodelle sind derzeit für die carbonatisierungs- und die chloridinduzierte Korrosion der Bewehrung vorhanden. Hierdurch würde eine differenziertere Betrachtung der Wirkung betontechnologischer Einflussparameter (z. B. w/z-Wert, Zementgehalt, Zementart) auf den Widerstand des Betons gegenüber Carbonatisierung und Chlorideindringen möglich. Grundlage ist die Definition der Grenzzustände Depassivierung der Bewehrung infolge Carbonatisierung bzw. infolge des Erreichens eines kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung. Mit dem Bezug auf diese Grenzzustände böte sich die Möglichkeit, die bereits in der Praxis vollzogene Verwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen weiter abzusichern und notwendige Anforderungsprofile an Betonzusammensetzungen zu formulieren, um den Klinker/Zement-Faktor weiter zu reduzieren, die Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Beton zu fördern und zur gleichen Zeit die Dauerhaftigkeit des Betons bzw. der Betonbauwerke sicher zu stellen.

Das Ziel des durchgeführten Forschungsvorhabens war die Erarbeitung einer umfangreichen Datenbasis für die Materialparameter Carbonatisierungswiderstand und Chlorideindringwiderstand und die Durchführung darauf aufbauender grenzzustandsbezogener Lebensdauerberechnungen. Die untersuchten Betonrezepturen umfassten dabei einerseits Grenzzusammensetzungen gemäß DIN 1045-2 sowie grenzzustandsbezogen optimierte Betonzusammensetzungen. Hinsichtlich der Zemente kamen sowohl Zemente zum Einsatz, deren Verwendung für alle Expositionsklassen zugelassen ist, als auch neue Zemente, die bisher noch keinen Eingang in die europäische Zementnorm EN 197-1 gefunden haben. Aufbauend auf die experimentellen Ergebnisse wurden probabilistische, grenzzustandsbezogene Lebensdauerberechnungen für typische Stahlbetonbauteile durchgeführt, um den Einfluss betontechnologischer Parameter auf die Dauerhaftigkeit solcher Bauteile aufzuzeigen.

2 Arbeitsprogramm und Untersuchungsmethoden

2.1 Allgemeines

Die experimentellen Untersuchungen teilen sich auf in Untersuchungen zum Carbonatisierungswiderstand und Untersuchungen zum Chlorideindringwiderstand verschiedener Betone. Aufbauend darauf wurden probabilistische Berechnungen der Lebensdauer typischer Stahlbetonbauteile mit den Modellen aus dem MC SLD [5] für den Grenzzustand „Depassivierung der Bewehrung“ durchgeführt.

Bei der Auswahl der untersuchten Betone wurde der Fokus insbesondere auf eine Variation der Zementart bei sonst gleicher Zusammensetzung gelegt. Des Weiteren wurde in Teilen eine Variation des Zementgehalts und des Wasserzementwertes vorgenommen. **Tabelle 1** gibt einen Überblick über die untersuchten Betonrezepturen.

Die Bezeichnungen der Betonrezepturen enthalten jeweils das Kürzel für den verwendeten Zement. Die Zusammensetzungen der verwendeten Zemente bzgl. ihrer Hauptbestandteile sind in **Tabelle 2** zusammengestellt. Ausgewählt wurden einerseits Zemente mit Zusammensetzungen nach DIN EN 197-1 und andererseits bisher nicht genormte Zemente mit unterschiedlichen Kombinationen der drei Hauptbestandteile Klinker, Hüttensand und Kalkstein. Die letztgenannten wurden im Rahmen des Projekts mit „CEM X“ bezeichnet. Die Zemente wurden mit Ausnahme des Zements Z5 großtechnisch in Zementwerken durch getrennte Mahlung der Hauptbestandteile hergestellt. Die Zemente Z3 und Z4 wurden speziell für Versuchszwecke hergestellt, die restlichen Zemente stammten aus dem Standardlieferprogramm. Der Zement Z5 wurde im Labor durch Mischen der zuvor unter Laborbedingungen gemahlenen Hauptbestandteile und einem Sulfatträger hergestellt. Der Vergleich der Betone soll zeigen, inwieweit die Zementart und die Rezepturparameter (Zementgehalt und Wasserzementwert) die dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften der Betone beeinflussen. Der Schwerpunkt liegt auf Untersuchungen zur Wirkung der Zementhauptbestandteile Klinker, Hüttensand und Kalkstein und deren Verhältnissen untereinander. Hieraus sollen Erkenntnisse generiert werden, welche Zeiträume sich rechnerisch bis zum Erreichen der Grenzzustände „Depassivierung der Bewehrung infolge Carbonatisierung“ (kurz: Grenzzustand Carbonatisierung der Betondeckung) und „Erreichen eines kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts“ (kurz: Grenzzustand Chlorideindringen) für typische Stahlbetonbauteile unter Verwendung der genannten klinkereffizienten Zemente ergeben.

Tabelle 1 Untersuchte Betonrezepturen

Bezeichnung	Zementart	z [kg/m³]	w/z [-]	Sieblinie
B0-Z1	CEM I 42,5 R	280	0,65	A16/B16
B0-Z2	CEM III/A 42,5 N	280	0,65	A16/B16
B1-Z1	CEM I 42,5 R	320	0,50	A16/B16
B1-Z2	CEM III/A 42,5 N	320	0,50	A16/B16
B1-Z3	CEM X	320	0,50	A16/B16
B1-Z4	CEM X	320	0,50	A16/B16
B1-Z5	CEM II/B-M (S-LL)	320	0,50	A16/B16
B1-Z6	CEM II/A-LL 32,5 R	320	0,50	A16/B16
B1-Z7	CEM II/B-LL 32,5 R	320	0,50	A16/B16

Tabelle 2 Zusammensetzung der Hauptbestandteile der verwendeten Zemente

Bezeichnung	Zementart	Klinker (K) [M.-%]	Hüttensand (S) [M.-%]	Kalkstein (LL) [M.-%]
Z1	CEM I 42,5 R	100	-	-
Z2	CEM III/A 42,5 N	55	45	-
Z3	CEM X	35	30	35
Z4	CEM X	20	30	50
Z5	CEM II/B-M (S-LL)	65	10	25
Z6	CEM II/A-LL 32,5 R	79,0 - 82,2 ¹⁾	-	17,8 – 21,0 ¹⁾
Z7	CEM II/B-LL 32,5 R	72,5 - 76,7 ¹⁾	-	23,3 - 27,5 ¹⁾
¹⁾ Der Kalksteingehalt wurde stöchiometrisch aus dem gemäß DIN EN 196-2 bestimmten CO ₂ -Gehalt berechnet. Für die Berechnung wurde ein CaCO ₃ -Gehalt des Kalksteins zwischen 85 M.-% und 100 M.-% angenommen.				

Die Zusammensetzung der Betone wurde so gewählt, dass mit der Rezeptur B0 die Anforderungen der Expositionsklasse XC3 gemäß DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 erfüllt werden (Grenzzusammensetzung), sofern für diese Expositionsklasse zugelassene Zemente eingesetzt werden. Die Rezeptur B1 erfüllt die Anforderungen der Expositionsklassen XC4, XD2 und XS2 gemäß DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 bei Verwendung von für diese Expositionsklassen zulässigen Zementen. Weitere Expositionsklassen, denen die Betone zugeordnet werden könnten, werden nicht betrachtet, da sich die Untersuchungen auf Carbonatisierung und Chlorideindringen beschränken. Die Verwendung der Zemente Z1, Z2 und Z6 ist gemäß DIN 1045-2 für alle Expositionsklassen zulässig. Die Verwendung der Zemente Z5 und Z7 ist gemäß DIN 1045-2 jeweils nur für einen eingeschränkten Expositionsklassenbereich zugelassen, der die hier betrachteten Expositionsklassen nicht abdeckt. Die Zemente Z3 und Z4 (Zementart CEM X) sind bisher nicht Bestandteil der DIN EN 197-1, sodass ihre Verwendung für Beton gemäß DIN 1045-2 aktuell nicht zugelassen ist.

Die Betone wurden in einem Labormischer mit einem maximalen Fassungsvermögen von 75 l hergestellt. Begleitend zu den Untersuchungen zur Carbonatisierung und zum Chlorideindringen wurden am Frischbeton die Rohdichte nach DIN EN 12350-6, der Luftgehalt nach DIN EN 12350-7 und das Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 bestimmt. Weiterhin wurde am Festbeton die Würfeldruckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 bestimmt. Die Prüfkörper lagerten (24 ± 2) h in den Formen vor Austrocknen geschützt bei einer Lufttemperatur von (20 ± 2) °C, danach 6 Tage in einem Wasserbad mit Leitungswasser bei (20 ± 2) °C und anschließend bis zur Prüfung im Alter von 28 Tagen bei (20 ± 2) °C und (65 ± 5) % relativer Luftfeuchte (Klima 20/65).

2.2 Versuche zum Carbonatisierungswiderstand

Der Carbonatisierungswiderstand der Betone wurde mit verschiedenen Prüfverfahren untersucht. Die Variation der Prüfverfahren wurde vorgenommen, da die Untersuchungen in Teilen mit neuen, bisher relativ wenig untersuchten Zementarten durchgeführt wurden. Durch den Vergleich kann festgestellt werden, ob die Übertragbarkeit der Ergebnisse verschiedener Prüfverfahren bei den neuen Zementen in gleicher Weise gegeben ist wie bei den Zementen mit Zusammensetzungen nach DIN EN 197-1. Zur Anwendung kamen die folgenden Prüfverfahren:

1. **CarboB:** Bestimmung der Carbonatisierungstiefe an Betonprismen (100 mm / 100 mm / 500 mm) im Alter von 14, 28, 56, 91, 180 und 360 Tagen. Die Vorlagerung der Probekörper erfolgte für (24 ± 2) h in den Formen vor Austrocknen geschützt bei einer Lufttemperatur von (20 ± 2) °C, danach 6 Tage in einem Wasserbad mit Leitungswasser bei (20 ± 2) °C. Anschließend lagerten die Probekörper bei (20 ± 2) °C, (65 ± 5) % relativer Luftfeuchte (Klima 20/65) und einer CO₂-Konzentration von ca. 0,04 Vol.-% (natürliche CO₂-Konzentration) bis zum Prüfzeitpunkt. Je Prüftermin wurden durch Spalten drei ca. 50 mm lange Stücke von den Probekörpern abgetrennt und die Carbonatisierungstiefe wurde durch Aufsprühen von Phenolphthalein und Messen der Farbumschlagtiefe bestimmt.
2. **SCarboB:** Bestimmung der Carbonatisierungstiefe von Beton mit dem beschleunigten Verfahren nach MC SLD [5]: Abmessungen und Vorlagerung der Probekörper bis zum Alter von 28 Tagen stimmen mit dem Verfahren CarboB überein, anschließend erfolgte eine 28 tägige Lagerung im Klima 20/65 bei einer CO₂-Konzentration von 2 Vol.-%, danach wurden die Prismen gespalten und die Carbonatisierungstiefe wurde durch Aufsprühen von Phenolphthalein und Messen der Farbumschlagtiefe bestimmt.
3. **CarboFB:** Bestimmung der Carbonatisierungstiefe an Feinbetonprismen nach CEN/TR 16563:2013 [6]. Herstellung von Feinbetonprismen (40 mm / 40 mm / 160 mm) mit vorgegebener Zusammensetzung (für 3 Prismen: 450 g Zement, 1350 g Gesteinskörnung Sieblinie A8/B8, 225 g Wasser). Die Vorlagerung der Prismen erfolgte bis zum Alter von 7 Tagen (Kurzbezeichnung CarboFB-7d) bzw. 28 Tagen (Kurzbezeichnung CarboFB-28d) unter Wasser bei (20 ± 2) °C, anschließend lagerten die Prismen im Klima 20/65 bei einer CO₂-Konzentration von ca. 0,04 Vol.-% (natürliche CO₂-Konzentration) bis zum Prüfzeitpunkt. Die Carbonatisierungstiefe wurde jeweils 14, 28, 56, 98, 140 Tage nach Ende der Wasserlagerung durch Abspalten einer Scheibe von den Prismen, Aufsprühen von Phenolphthalein und Messen der Farbumschlagtiefe bestimmt. Weiterhin wird bzw. wurde die Carbonatisierungstiefe 1, 2 und 5 Jahre nach Ende der Wasserlagerung bestimmt, sodass die Versuchsreihen über das Ende der offiziellen Projektlaufzeit fortgeführt werden.
4. **CarboFB-mod:** Probekörperabmessungen und Prüfablauf stimmen mit dem Verfahren CarboFB überein, jedoch wurde die Feinbetonzusammensetzung verändert. Die Zusammensetzungen der Feinbetone entsprachen den in **Tabelle 1** angegebenen Zusammensetzungen, mit dem Unterschied, dass die Sieblinie zu A8/B8 modifiziert wurde. Durch den Vergleich mit den Ergebnissen des Prüfverfahrens CarboB lässt sich der Einfluss des Größtkorns und der Probekörperabmessungen auf die Prüfergebnisse bei sonst gleichbleibenden Randbedingungen ermitteln.

In **Tabelle 3** ist der Umfang der Versuche zum Carbonatisierungswiderstand dargestellt.

Tabelle 3 Versuchsumfang der Carbonatisierungsversuche

Beton	CarboB	SCarboB	CarboFB	CarboFB-mod
B0-Z1	x	x	x	x
B0-Z2	x	x	x	x
B1-Z1	x	x	x	x
B1-Z2	x	x	x	x
B1-Z3	x	x	x	-
B1-Z4	x	x	x	-
B1-Z5	x	x	-	-
B1-Z6	-	-	-	-
B1-Z7	-	-	-	-

2.3 Versuche zum Chlorideindringwiderstand

Der Widerstand der Betone gegenüber eindringenden Chloriden wurde mit zwei unterschiedlichen Prüfverfahren untersucht:

1. **RCM:** Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten D_{Mig} nach BAW Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Beton“ [8]: Hierbei wird das Eindringen von Chloriden in den Beton durch Anlegen einer elektrischen Spannung beschleunigt, sodass die Prüfung es erlaubt, den Widerstand des Betons gegenüber Chlorideindringen in kurzer Zeit zu ermitteln. Aus der Eindringtiefe, der Höhe der angelegten Spannung und weiteren Parametern wird der Chloridmigrationskoeffizient berechnet. Der Chloridmigrationskoeffizient wurde an den untersuchten Betonen im Alter von 35 und 98 Tagen bestimmt (Alter bei Beginn der Prüfung, Kurzbezeichnung RCM-35d, RCM-98d). Die Probekörper wurden in den ersten (24 ± 2) h nach der Herstellung bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ in der Form gegen Austrocknung geschützt und anschließend bis zum Beginn der Prüfung unter Wasser bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ gelagert.
2. **CD:** Bestimmung des scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{\text{Diff,m}}$ nach DIN EN 12390-11 [9]: In diesem Verfahren wird der Beton mit einer 3 %igen NaCl-Lösung beaufschlagt. Nach Ablauf der Beaufschlagungsdauer wird die Prüfkörperoberfläche in Schichten abgetragen und der Chloridgehalt des abgetragenen Schleifmehls bestimmt. Aus dem gemessenen Chloridprofil wird in einer anschließenden Regressionsanalyse der Chloriddiffusionskoeffizient $D_{\text{Diff,m}}$ bestimmt. Es wurden Beaufschlagungsdauern von 90, 180, 365 sowie teilweise 730 Tagen untersucht (Kurzbezeichnung CD-90d, CD-180d, CD-365d, CD-730d). Die Probekörper wurden in den ersten (24 ± 2) h nach der Herstellung bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ in der Form gegen Austrocknung geschützt und anschließend bis zum Alter von 28 Tagen unter Wasser bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ gelagert. Anschließend wurde jeder Probekörper in zwei Teilprobekörper geschnitten und im Vakuum mit Wasser gesättigt. Danach wurden alle Oberflächen mit Ausnahme der gesägten Fläche versiegelt und die Probekörper für eine Dauer von 18 h in gesättigter Calciumhydroxidlösung gelagert. Direkt im Anschluss begann die Beaufschlagung mit der NaCl-Lösung.

Ein wesentlicher Unterschied in den Verfahren ist darin zu sehen, dass eine chemische Chloridbindung im Chloridmigrationsversuch (Verfahren RCM) aufgrund der kurzen Beaufschlagungszeiten nicht zum Tragen kommen kann.

In **Tabelle 4** ist der Umfang der Versuche zum Chlorideindringwiderstand dargestellt. Die Betone B0-Z1 und B0-Z2 wurden in die Untersuchungen mit einbezogen, obwohl sie gemäß der Expositionsklassenzuordnung nach DIN 1045-2 nicht im Bereich chloridbeanspruchter Bauteile eingesetzt werden dürfen. Hiermit soll gezeigt werden, inwieweit ein Abweichen von den deskriptiven Regeln der DIN 1045-2 die Dauerhaftigkeit der Betone beeinflusst und welche Wechselwirkungen hierbei mit der Zementart bestehen.

Tabelle 4 Umfang der Versuche zum Chlorideindringwiderstand

Beton	RCM	CDC
B0-Z1	-	x
B0-Z2	-	x
B1-Z1	x	x
B1-Z2	x	x
B1-Z3	x	x
B1-Z4	x	x
B1-Z5	-	-
B1-Z6	x	x
B1-Z7	x	x

2.4 Durchführung von probabilistischen Lebensdauerberechnungen

2.4.1 Grundprinzip

Die mit Hilfe von Versuchen zum Carbonatisierungswiderstand und Chlorideindringwiderstand bestimmten Materialeigenschaften der Betone dienen als Basis für die Durchführung probabilistischer Lebensdauerberechnungen für typische Stahlbetonbauteile. Die Ergebnisse der Berechnungen dienen zur Beurteilung der rechnerischen Dauer bis zum Erreichen der Grenzzustände „Carbonatisierung der Betondeckung“ und „Chlorideindringen“ bei Verwendung der Betone unter den für Deutschland typischen Umgebungsbedingungen. Die Grundgleichungen der Berechnung basieren auf der Gegenüberstellung von Einwirkung S und Widerstand R . Die Differenz aus Einwirkung und Widerstand definiert die sogenannte Grenzzustandsfunktion:

$$g(X) = S - R \quad (1)$$

Der Grenzzustand ist erreicht, sobald die Grenzzustandsfunktion kleiner null wird. Da die Einwirkungen und Widerstände in der Regel von mehreren, unsicheren Variablen beeinflusst werden, werden sie in der probabilistischen Berechnung als Zufallsvariablen betrachtet. Werden für diese Zufallsvariablen jeweils Wahrscheinlichkeitsverteilungen definiert, kann berechnet werden, mit welcher Wahrscheinlichkeit die Grenzzustandsfunktion kleiner null wird. Diese Wahrscheinlichkeit wird als Eintrittswahrscheinlichkeit des Grenzzustands p_f bezeichnet. Damit direkt verknüpft ist der Zuverlässigkeitsindex β , der im Bauwesen häufig genutzt wird, um ein Sicherheitsniveau für einen bestimmten Grenzzustand festzulegen. Der Zuver-

lässigkeitsindex β und die Wahrscheinlichkeit des Erreichens des Grenzzustandes p_f sind über die Standardnormalverteilung Φ wie folgt miteinander verknüpft:

$$\Phi(-\beta) = p_f \quad (2)$$

Die Berechnung der Wahrscheinlichkeit für das Erreichen des Grenzzustandes bzw. des Zuverlässigkeitsindex erfolgt in der Regel mit Hilfe von spezieller Software basierend auf numerischen Verfahren, da eine analytische Lösung der Grenzzustandsgleichung nur in wenigen Fällen möglich ist. Für die Durchführung der im Folgenden beschriebenen probabilistischen Berechnungen wurde das Softwarepaket STRUREL verwendet.

2.4.2 Probabilistische Berechnungen für den Grenzzustand „Depassivierung der Bewehrung infolge Carbonatisierung“

Bei der carbonatisierungsinduzierten Bewehrungskorrosion (Expositionsklassengruppe XC) wird der Grenzzustand gemäß MC SLD [5] als Depassivierung der Bewehrung definiert. Dabei wird angenommen, dass die Bewehrung dann depassiviert vorliegt, wenn die Carbonatisierungstiefe $x_c(t)$ zum Zeitpunkt t größer ist als die Betondeckung d_c . Die Grenzzustandsfunktion ergibt sich zu:

$$g_{carb}(X, t) = x_c(t) - d_c \quad (3)$$

Mit der Definition des Grenzzustandes als Depassivierung der Bewehrung werden die Berechnungen auf die Einleitungsphase der Korrosion beschränkt. Der tatsächliche Schädigungsfortschritt infolge von Korrosion wird nicht in die Betrachtungen mit einbezogen. Welche Konsequenzen nach der Depassivierung zu erwarten sind, hängt insbesondere von der Korrosionsgeschwindigkeit ab, welche wiederum vom Sauerstoffangebot und dem Elektrolytwiderstand im Beton abhängig ist.

Die zeitliche Entwicklung der Carbonatisierungstiefe $x_c(t)$ wird nach MC SLD [5] mit der folgenden Modellgleichung beschrieben:

$$x_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_{c,MC} \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot C_S \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)} \quad (4)$$

mit

k_e : Parameter zur Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen

$k_{c,MC}$: Parameter zur Berücksichtigung der Nachbehandlung

k_t : Parameter zur Übertragung beschleunigter in natürliche Prüfbedingungen

$R_{ACC,0}^{-1}$: inverser Carbonatisierungswiderstand des Betons in $(\text{m}^2/\text{s})/(\text{kg}/\text{m}^3)$

ε_t : Fehlerterm in $(\text{m}^2/\text{s})/(\text{kg}/\text{m}^3)$

C_S : CO_2 -Konzentration der Umgebungsluft in kg/m^3

t : Zeit ab Beginn der Carbonatisierung in s,

$W(t)$: Wetterfunktion

Der Materialwiderstand wird in dieser Gleichung in Form des inversen Carbonatisierungswiderstands $R_{ACC,0}^{-1}$ berücksichtigt, der aus den Ergebnissen von Carbonatisierungsversuchen bei 2 Vol.-% CO₂ zu bestimmen ist, vgl. Abschnitt 3.2.

Für den Parameter k_e zur Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen gilt in Abhängigkeit der relativen Luftfeuchte RH_{real} :

$$k_e = \left(\frac{1 - \left(\frac{RH_{real}}{100} \right)^5}{1 - \left(\frac{RH_{ref}}{100} \right)^5} \right)^{2.5} \quad (5)$$

mit

RH_{real} : relative Luftfeuchte der Umgebung in %

RH_{ref} : relative Luftfeuchte während der Materialprüfung in % ($RH_{ref} = 65$ %)

Der Parameter $k_{c,MC}$: zur Berücksichtigung der Nachbehandlung ist definiert als:

$$k_{c,MC} = \left(\frac{t_c}{7} \right)^{b_c} \quad (6)$$

mit

t_c : Dauer der Nachbehandlung in Tagen

b_c : Regressionsparameter, gemäß [5] Normalverteilung mit $m = -0,567$ und $s = 0,024$

Die Wetterdefinition $W(t)$ dient zur Berücksichtigung starker Regenfälle und ist wie folgt definiert:

$$W(t) = \left(\frac{t_0}{t} \right)^{\frac{(p_{SR} \cdot ToW)^{b_w}}{2}} \quad (7)$$

mit

t_0 : Referenzzeit in Jahren ($t_0 = 0,0767$ Jahre)

p_{SR} : Schlagregenwahrscheinlichkeit

ToW : relative Anzahl von Regentagen mit $h_{Nd} \geq 2,5$ mm bezogen auf ein Jahr:

$$ToW = \frac{\text{Anzahl Tage mit } h_{Nd} \geq 2,5 \text{ mm pro Jahr}}{365}$$

b_w : Regressionsparameter

In den probabilistischen Berechnungen sollen für Deutschland typische, der Expositionsklasse XC3 zuzuordnende Bedingungen abgebildet werden. Die Werte der Parameter zur Beschreibung der entsprechenden klimatischen Bedingungen und Bauteilbedingungen sind in **Tabelle 5** zusammengestellt. Zur Beschreibung der klimatischen Bedingungen wurden die Werte aus [5] und [10] übernommen. Für die Nachbehandlungsdauer wurde ein geschätzter, üblicher Wert von 3 Tagen angesetzt. Als Mittelwert der Betondeckung wurde die minimal zulässige nominale Betondeckung (Summe aus Mindestbetondeckung und Vorhaltemaß) für die Expositionsklasse XC3 gewählt. Für die Standardabweichung der Betondeckung wurden gemäß [10] 61 % - 100% des Vorhaltemaßes angesetzt. Der Mittelwert des inversen Carbona-

tisierungswiderstands des Betons $R_{ACC,0,m}^{-1}$ wurde direkt im Versuch bestimmt, vgl. Abschnitt 2.2 und 3.2. Als Verteilung wurde eine Normalverteilung angenommen. Die zugehörige Standardabweichung $R_{ACC,0,s}^{-1}$ wurde gemäß MC SLD [5] wie folgt abgeschätzt:

$$R_{ACC,0,s}^{-1} = 0,69 \cdot (R_{ACC,0,m}^{-1})^{0,78} \quad (8)$$

Tabelle 5 Parameter für probabilistische Berechnungen für den Grenzzustand „Depassivierung der Bewehrung infolge Carbonatisierung“

Parameter	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Standardabweichung	obere Grenze
RH	%	Weibullverteilung	80	12	100
t_c	d	konstant	3		-
b_c	-	Normalverteilung	-0,567	0,024	-
k_t	-	Normalverteilung	1,25	0,35	-
ε_t	(m ² /s)/(kg/m ³)	Normalverteilung	315,5	48	-
C_s	kg/m ³	Normalverteilung	$8,3 \cdot 10^{-4}$	$1 \cdot 10^{-5}$	-
p_{SR}	-	konstant	0	-	-
d_c	mm	Normalverteilung	35	15	-

2.4.3 Probabilistische Berechnungen für den Grenzzustand „Erreichen eines kritischen, korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung“

Der Grenzzustand für die chloridinduzierte Korrosion (Expositionsklassengruppen XD und XS) wird gemäß MC SLD [5] definiert als Erreichen eines kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts an der Betonstahloberfläche. Die Grenzzustandsfunktion kann wie folgt formuliert werden:

$$g_{Cl}(X, t) = C_{crit} - C(d_c, t) \quad (9)$$

mit:

C_{crit} : kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt in M.-% vom Beton

$C(d_c, t)$: Chloridgehalt des Betons zum Zeitpunkt t an der Betonstahloberfläche in M.-%

d_c : Betondeckung in m

Analog zur carbonatisierungsinduzierten Korrosion sind die Berechnungen auch bei der chloridinduzierten Korrosion auf die Einleitungsphase der Korrosion beschränkt.

Die zeitliche Entwicklung der Chloridkonzentration an der Betonstahloberfläche $C(d_c, t)$ ist gemäß MC SLD [5] wie folgt definiert:

$$C(d_c, t) = C_0 + (C_{s,\Delta x} - C_0) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{d_c - \Delta x}{2\sqrt{D_{app,c}(t) \cdot t}} \right) \right] \quad (10)$$

mit:

C_0 : Eigenchloridgehalt des Betons in M.-%

- $C_{S,\Delta x}$: Chloridgehalt des Betons in einer Tiefe Δx bzw. an der Betonoberfläche (bei $\Delta x = 0$) in M.-%
- Δx : Dicke der Konvektionszone in mm (Schicht des Betons, in der der Eintrag von Chloriden vom 2. Fick'schen Gesetz abweicht)
- $D_{app,C}(t)$: scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient des Betons in mm²/a für den Zeitraum ab dem Auslagerungszeitpunkt t_{ex} ($t_{ex} \approx 0$) bis zum Zeitpunkt t
- erf: Gauß'sche Fehlerfunktion

Der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient des Betons kann aus dem im Versuch bestimmten Chloridmigrationskoeffizient wie folgt berechnet werden:

$$D_{app,C}(t) = k_e \cdot D_{Mig,0} \cdot k_t \cdot A(t) \quad (11)$$

mit

- k_e : Parameter zur Berücksichtigung der Umgebungstemperatur

$$k_e = \exp\left(b_e \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{real}}\right)\right), \text{ mit}$$

T_{ref} : Referenztemperatur bei der Versuchsdurchführung,

T_{real} : Temperatur der Umgebung des Bauteils

- $D_{Mig,0}$: im Versuch bestimmter Chloridmigrationskoeffizient [m²/s] zum Bezugszeitpunkt t_0

- k_t : Übertragungsparameter zur Berücksichtigung der Testmethode

- $A(t)$: Alterungsfunktion $A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a$,

mit a : Alterungsexponent in Abhängigkeit der Zementart

t_0 : Bezugszeitpunkt (Start des Migrationsversuchs)

In den probabilistischen Berechnungen sollen für Deutschland typische, der Expositionsklasse XD2 zuzuordnende Bedingungen abgebildet werden. Die hierfür gewählten Werte der Parameter sind in **Tabelle 6** zusammengestellt. Die Parameterwerte zur Beschreibung der Einwirkungen wurden aus [14] übernommen. Als Mittelwert der Betondeckung wurde die minimal zulässige nominale Betondeckung (Summe aus Mindestbetondeckung und Vorhaltemaß) für die Expositionsklasse XD2 gewählt. Die Standardabweichung der Betondeckung wurde erneut gemäß [10] mit 61 % des Vorhaltemaßes abgeschätzt. Der Mittelwert des Chloridmigrationskoeffizienten wurde für die untersuchten Betone in Versuchen bestimmt, vgl. Abschnitt 2.3 und 3.3. Für die Verteilung wurden die Angaben aus [11] übernommen, wonach der Chloridmigrationskoeffizient durch eine Normalverteilung mit einem Variationskoeffizienten von 20 % statistisch hinreichend beschrieben werden kann. Die zur Berechnung des scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten notwendigen Altersexponenten wurden ebenfalls aus [14] übernommen bzw. aus den Versuchsergebnissen zur Chloriddiffusion abgeleitet, vgl. Abschnitt 3.3 und 3.4.2.

Tabelle 6 Parameter für probabilistische Berechnungen für den Grenzzustand „Erreichen eines kritischen, korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung“

Parameter	Einheit	Verteilung	Mittelwert	Standard- abweichung	untere Grenze	obere Grenze
C_{crit}	M.-%	Betaverteilung	0,60	0,15	0,20	2,00
C_0	M.-%	konstant	0	-	-	-
$C_{S,\Delta x}$	M.-%	Log. Normalverteilung	3,50	2,625	-	-
d_c	mm	Normalverteilung	55	9	-	-
Δx	mm	konstant	0	-	-	-
b_e	-	Normalverteilung	4800	700	-	-
T_{ref}	K	konstant	293	-	-	-
T_{real}	K	Normalverteilung	283	8	-	-
k_t	-	konstant	1	-	-	-

3 Untersuchungsergebnisse

3.1 Frisch- und Festbetoneigenschaften

Die Druckfestigkeiten der Betone im Alter von 28 Tagen sind in **Bild 1** dargestellt. Dargestellt sind die Mittelwerte aus jeweils drei Messwerten. Die jeweiligen Einzelwerte sind in **Tabelle A-1** im Anhang zusammengestellt. Die höchste Druckfestigkeit zeigt der Beton B1-Z2, der mit einem CEM III/A 42,5 N hergestellt wurde. Der Beton B1-Z1 mit CEM I 42,5 R zeigt eine vergleichbare Druckfestigkeit. Die weiteren Betone mit der Zusammensetzung „B1“ ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,5$) zeigen um 11 % bis 45 % geringere Festigkeiten. Die Betone B0-Z1 und B0-Z2 zeigen aufgrund des höheren w/z -Wertes und geringeren Zementgehaltes erwartungsgemäß geringere Festigkeiten als die mit den gleichen Zementen hergestellten Betone B1-Z1 und B1-Z2. Der mit CEM X (20 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 50 M.-% Kalkstein) hergestellte Beton B1-Z4 zeigt trotz des geringeren w/z -Wertes und höheren Zementgehaltes eine geringere Festigkeit als die Betone B0-Z1 und B0-Z2, was auf den geringen Klinkergehalt bzw. den geringen Anteil reaktiver Hauptbestandteile des Zements zurückzuführen ist.

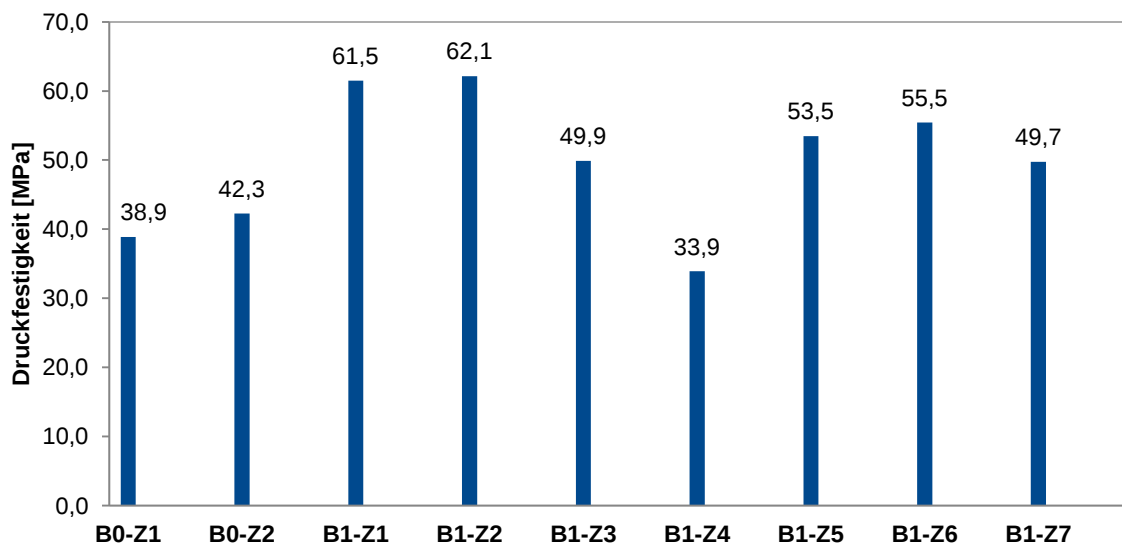


Bild 1 Druckfestigkeiten der Betone im Alter von 28 Tagen

Die an den Betonen bestimmten Frischbetoneigenschaften (Ausbreitmaß, Rohdichte, Luftgehalt) sind in **Tabelle A-2** im Anhang zusammengestellt.

3.2 Carbonatisierungswiderstand von Betonen

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Carbonatisierungswiderstand der Betone im Klima 20/65 und bei natürlicher CO_2 -Konzentration (CarboB) sind in **Bild 2** dargestellt. Die einzelnen Messwerte aller Versuchsreihen sind im Anhang in **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.1** zusammengestellt.

Zur Beschreibung des Carbonatisierungsfortschrittes über die Zeit wurde an die Messwerte für jeweils einen Beton eine Wurzel-Zeit-Funktion der Form

$$x_c(t) = k_c \cdot \sqrt{t} \quad (12)$$

mit

$x_c(t)$: Carbonatisierungstiefe [mm] nach einer Auslagerungszeit t ,

k_c : Carbonatisierungsrate [mm/a^{0,5}],

t : Auslagerungszeit (Zeit ab Ende der Wasserlagerung) [a]

angepasst und zusätzlich zu den Einzelergebnissen in **Bild 2** dargestellt. Die Carbonatisierungsrate k_c wurde durch lineare Regression anhand der Messwerte bestimmt. Die Werte der Carbonatisierungsrate und die zugehörigen Bestimmtheitsmaße R^2 sind in **Tabelle 7** zusammengestellt. Die für alle Betone außer B1-Z1 und B1-Z2 hohen Bestimmtheitsmaße ($R^2 > 0,9$) belegen, dass der zeitliche Verlauf der Carbonatisierung mit der Wurzel-Zeit-Funktion gemäß **Gleichung (12)** gut abgebildet werden kann. Die schlechtere Übereinstimmung der Messwerte und der Funktion bei den Betonen B1-Z1 und B1-Z2 könnte auf die in diesen Fällen geringen Carbonatisierungstiefen (< 2 mm) zurückzuführen sein, die messtechnisch schwieriger zu erfassen sind.

Die Carbonatisierungstiefen bzw. Carbonatisierungsraten ordnen sich für die untersuchten Betone in folgender Reihenfolge:

$$k_c(\text{B1-Z1}) < k_c(\text{B1-Z2}) < k_c(\text{B0-Z1}) < k_c(\text{B1-Z5}) < k_c(\text{B0-Z2}) < k_c(\text{B1-Z3}) < k_c(\text{B1-Z4})$$

Hierbei zeigen die Werte eine deutliche Spreizung, im Minimum ergab sich eine Carbonatisierungsrate von 1,108 mm/a^{0,5} (Beton B1-Z1) und im Maximum von 13,049 mm/a^{0,5} (Beton B1-Z4).

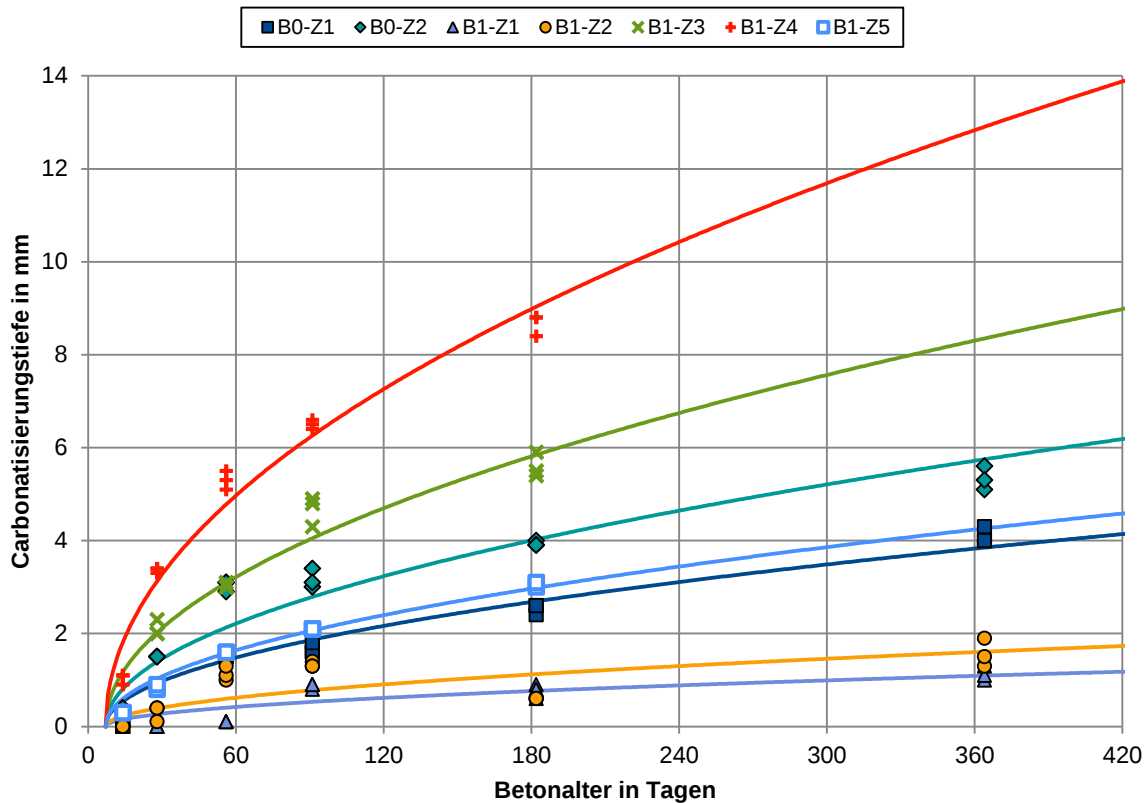


Bild 2 An Betonen bestimmte Carbonatisierungstiefen bei Lagerung im Klima 20/65 mit natürlicher CO₂-Konzentration (CarboB)

Tabelle 7 Anhand der Versuchsdaten durch Regression bestimmte Carbonatisierungsraten für die Carbonatisierung der Betone im Klima 20/65 bei natürlicher CO₂-Konzentration (CarboB)

Beton	Carbonatisierungsrate $k_{c,CarboB}$ in mm/a ^{0,5}	Bestimmtheitsmaß R^2
B0-Z1	3,893	0,975
B0-Z2	5,814	0,916
B1-Z1	1,108	0,804
B1-Z2	1,628	0,500
B1-Z3	8,444	0,937
B1-Z4	13,049	0,966
B1-Z5	4,309	0,995

Die in den beschleunigten Carbonatisierungsversuchen (SCarboB) bei einer CO₂-Konzentration von 2 Vol.-% bestimmten Carbonatisierungstiefen $x_{c,SCarbo}$ sind in **Tabelle 8** zusammengestellt. Des Weiteren sind in **Tabelle 8** die aus den Messwerten abgeleiteten inversen Carbonatisierungswiderstände $R_{ACC,0}^{-1}$ angegeben. Für den inversen Carbonatisierungswiderstand gilt nach MC SLD [5]:

$$R_{ACC,0}^{-1} = \left(\frac{x_{c,SCarbo}}{\tau} \right)^2 \quad (13)$$

mit

$x_{c,SCarbo}$: im beschleunigten Verfahren bestimmte Carbonatisierungstiefe [m],

τ : „Zeitkonstante“ $[(s/kg/m^3)^{0,5}]$ zur Berücksichtigung der Prüfbedingungen,
 $\tau = 420 (s/kg/m^3)^{0,5}$

Nach der Berechnung von $R_{ACC,0}^{-1}$ kann mithilfe der in [5] angegebenen Zusammenhänge aus den Ergebnissen der beschleunigten Carbonatisierungsversuche (SCarboB) eine Carbonatisierungsrate entsprechend **Gleichung (12)** abgeleitet werden, um die Ergebnisse der Schnellcarbonatisierungsversuche (SCarboB) und der Carbonatisierungsversuche bei natürlicher CO_2 -Konzentration miteinander zu vergleichen. Gemäß MC SLD [5] gilt für die zeitliche Entwicklung der Carbonatisierungstiefe (s. a. Abschnitt 2.4.2):

$$x_c(t) = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_{c,MC} \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot C_S \cdot \sqrt{t} \cdot W(t)} \quad (14)$$

mit

k_e : Parameter zur Berücksichtigung der Umgebungsbedingungen, hier $k_e = 1$ da rel. Luftfeuchte = 65 %

$k_{c,MC}$: Parameter zur Berücksichtigung der Nachbehandlung, hier $k_{c,MC} = 1$ wegen 7 tägiger Wasserlagerung

k_t : Parameter zur Übertragung beschleunigter in natürliche Prüfbedingungen, Normalverteilung mit $m = 1,25$; $s = 0,35$

$R_{ACC,0}^{-1}$: inverser Carbonatisierungswiderstand in $(m^2/s)/(kg/m^3)$ nach **Gleichung (13)**

ε_t : Fehlerterm in $(m^2/s)/(kg/m^3)$, Normalverteilung mit $m = 1,0 \cdot 10^{-11} (m^2/s)/(kg/m^3)$; $s = 1,5 \cdot 10^{-12} (m^2/s)/(kg/m^3)$

C_S : CO_2 -Konzentration der Umgebungsluft in kg/m^3 , Normalverteilung mit $m = 0,000082 kg/m^3$; $s = 0,0001 kg/m^3$

t : Zeit ab Beginn der Carbonatisierung in s,

$W(t)$: Wetterfunktion zur Berücksichtigung starker Regenfälle, hier $W(t) = 1$ wegen Laborbedingungen (Regenwahrscheinlichkeit = 0)

Nach Gleichsetzen von **Gleichung (12)** und **Gleichung (14)** ergibt sich die mit dem Verfahren SCarboB bestimmte Carbonatisierungsrate zu

$$k_{c,SCarbo} = \sqrt{2 \cdot k_e \cdot k_{c,MC} \cdot (k_t \cdot R_{ACC,0}^{-1} + \varepsilon_t) \cdot C_S \cdot W(t)}. \quad (15)$$

Die nach dem beschriebenen Vorgehen aus dem Verfahren SCarboB bestimmten Carbonatisierungsraten $k_{c,SCarbo}$ sind in **Tabelle 8** zusammengestellt. Für die Parameter, für die im MC SLD [5] eine Häufigkeitsverteilung angegeben ist, wurde jeweils der Mittelwert angesetzt.

Tabelle 8 In Schnellcarbonatisierungsversuchen (SCarboB) bestimmte Carbonatisierungstiefen und daraus abgeleitete inverse Carbonatisierungswiderstände und Carbonatisierungsraten

Beton	mittl. Carbonatisierungstiefe $x_{c,SCarbo}$ nach 28 Tagen bei 2 Vol.-% CO ₂ in mm	inverser Carbonatisierungswiderstand $R_{ACC,0}^{-1}$ in (mm ² /a)/(kg/m ³)	Carbonatisierungsrate $k_{c,SCarbo}$ in mm/a ^{0,5}
B0-Z1	7,4	9790	4,48
B0-Z2	11,5	23643	6,96
B1-Z1	4,3	3260	2,59
B1-Z2	4,3	3352	2,62
B1-Z3	9,2	15132	5,57
B1-Z4	16,4	48260	9,95
B1-Z5	5,3	5022	3,21

Die nach diesem Vorgehen berechneten Carbonatisierungsraten ordnen sich für die untersuchten Betone wie folgt:

$$k_{c,SCarbo}(B1-Z1) < k_{c,SCarbo}(B1-Z2) < k_{c,SCarbo}(B1-Z5) < k_{c,SCarbo}(B0-Z1) < k_{c,SCarbo}(B1-Z3) < k_c(B0-Z2) < k_c(B1-Z4)$$

Qualitativ wird mit den Schnellcarbonatisierungsversuchen eine ähnliche Beurteilung der Carbonatisierungsraten vorgenommen wie mit den Carbonatisierungsversuchen bei natürlicher CO₂-Konzentration (CarboB). Abweichend zum Verfahren CarboB wird die Carbonatisierungsrate des Betons B0-Z1 nach den Schnellcarbonatisierungsversuchen höher eingeschätzt als die des Betons B1-Z5 und die Carbonatisierungsrate des Betons B0-Z2 höher als die des Betons B1-Z3. Nach den Carbonatisierungsversuchen bei natürlicher CO₂-Konzentration ergibt sich jeweils eine umgekehrte Beurteilung. Die qualitative Abstufung der Carbonatisierungsraten für die restlichen Betone stimmt für beide Verfahren überein.

Die aus den Ergebnissen der Verfahren SCarboB und CarboB bestimmten Carbonatisierungsraten werden in **Bild 3** einander gegenübergestellt. Für die Betone B0-Z1, B0-Z2, B1-Z1 und B1-Z2 ergibt das Verfahren SCarboB eine höhere Carbonatisierungsrate als das Verfahren CarboB (Punkte liegen unterhalb der Diagonalen). Für die Betone B1-Z3, B1-Z4 und B1-Z5 ergibt das Verfahren SCarboB eine geringere Carbonatisierungsrate als das Verfahren CarboB (Punkte liegen oberhalb der Diagonalen). Die beste Übereinstimmung zwischen den Verfahren ergibt sich für den Beton B0-Z1, bei dem die aus den Schnellcarbonatisierungsversuchen bestimmte Carbonatisierungsrate 15 % höher ist als die aus den Carbonatisierungsversuchen bei natürlicher CO₂-Konzentration bestimmte Carbonatisierungsrate. Die schlechteste Übereinstimmung ergibt sich für den Beton B1-Z1. Für diesen Beton ist die aus den Schnellcarbonatisierungsversuchen bestimmte Carbonatisierungsrate etwa 2,3-mal so hoch wie die aus den Carbonatisierungsversuchen bei natürlicher CO₂-Konzentration bestimmte Carbonatisierungsrate. Eine mögliche Erklärung für diese starke Abweichung könnten die bei diesem Beton im Verfahren CarboB insgesamt geringen Carbonatisierungstiefen und die damit verbundene mögliche Ungenauigkeit der Messwerte sein. Die mittlere Abweichung über alle Betone beträgt rund 45 %.

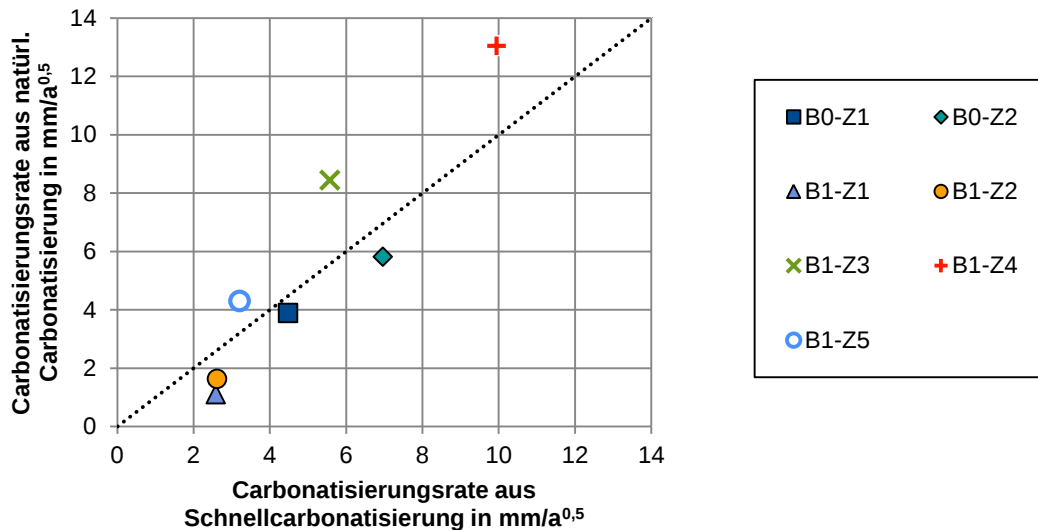


Bild 3 Vergleich der aus den Schnellcarbonatisierungsversuchen (SCarboB, horizontale Achse) und den Carbonatisierungsversuchen bei natürlicher Konzentration (CarboB, vertikale Achse) bestimmten Carbonatisierungsraten

Die Ergebnisse der Carbonatisierungsversuche an Feinbetonen sind in **Bild 4** und **Bild 5** dargestellt. **Bild 4** zeigt die Ergebnisse für die Feinbetone mit Zusammensetzungen gemäß CEN/TR 16563:2013 [6] (Verfahren CarboFB), **Bild 5** die Ergebnisse für die Feinbetone mit modifizierten Zusammensetzungen (Verfahren CarboFB-mod). Wie bereits beim Verfahren CarboB wurde an die Ergebnisse jeder Versuchsreihe eine Wurzel-Zeit-Funktion gemäß **Gleichung (12)** durch Regression angepasst. Die so bestimmten Carbonatisierungsraten $k_{c,CarboFB,7}$ bzw. $k_{c,CarboFB,28}$ und die zugehörigen Bestimmtheitsmaße sind in **Tabelle 9** zusammengestellt.

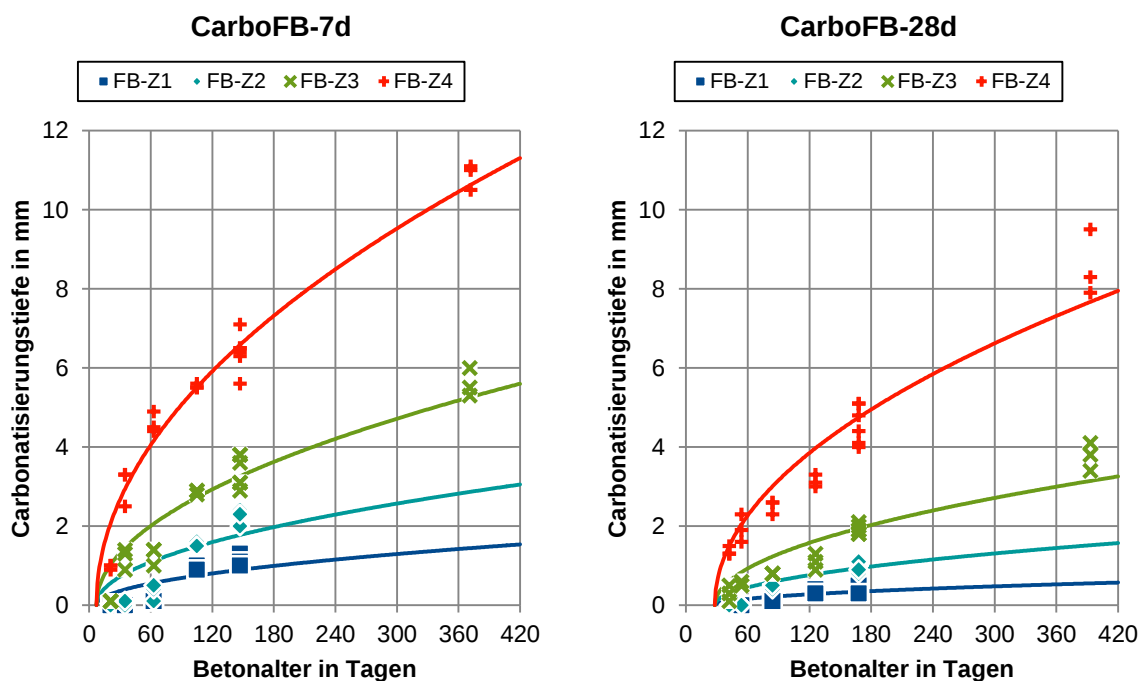


Bild 4 An Feinbetonen gemäß CEN/TR 16563:2013 [6] bestimmte Carbonatisierungstiefen nach 7 Tagen (links) bzw. 28 Tagen (rechts) Vorlagerung unter Wasser

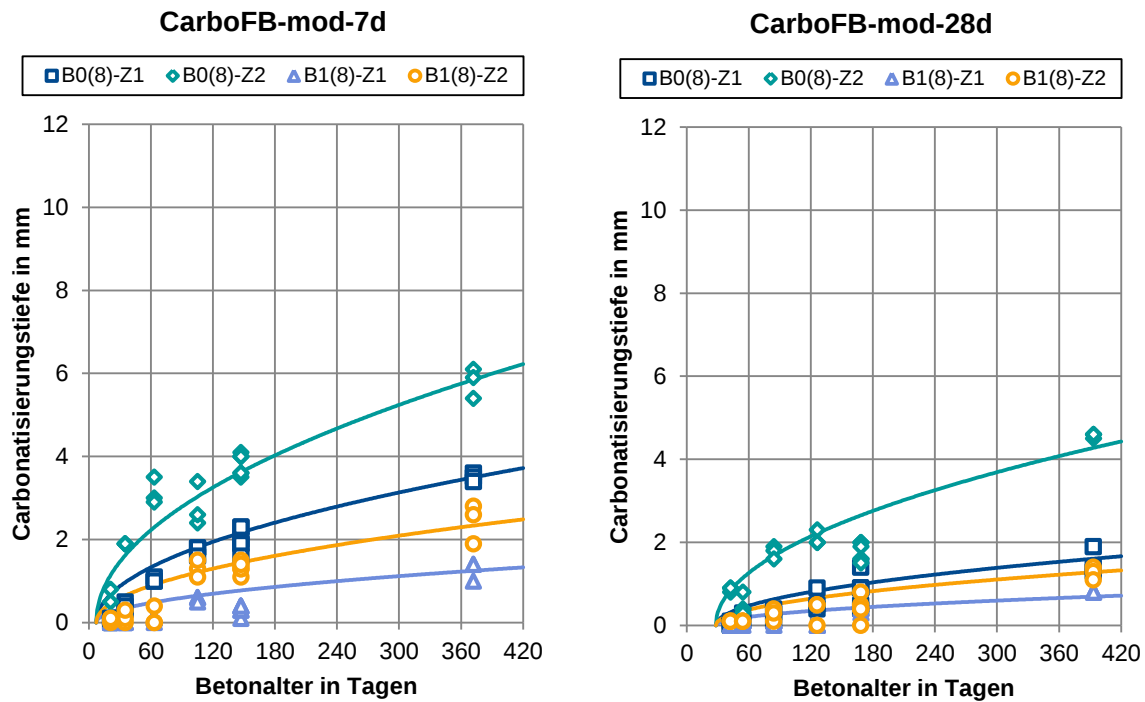


Bild 5 An modifizierten Feinbetonen bestimmte Carbonatisierungstiefen nach 7 Tagen (links) bzw. 28 Tagen (rechts) Vorlagerung unter Wasser

Tabelle 9 Anhand der Versuchsdaten durch Regression bestimmte Carbonatisierungsraten für die Carbonatisierung der Feinbetone im Klima 20/65 bei natürlicher CO₂-Konzentration (CarboFB bzw. CarboFB-mod)

Feinbeton	Vorlagerung 7 Tage unter Wasser		Vorlagerung 28 Tage unter Wasser	
	Carbonatisierungsrate $k_{c,CarboFB,7}$ in mm/a ^{0,5}	Bestimmtheitsmaß R^2	Carbonatisierungsrate $k_{c,CarboFB,28}$ in mm/a ^{0,5}	Bestimmtheitsmaß R^2
FB-Z1	1,446	0,890	0,554	0,831
FB-Z2	2,869	0,924	1,518	0,872
FB-Z3	5,265	0,954	3,143	0,951
FB-Z4	10,630	0,968	7,670	0,944
B0(8)-Z1	3,497	0,973	1,605	0,811
B0(8)-Z2	5,850	0,892	4,274	0,847
B1(8)-Z1	1,249	0,812	0,692	0,771
B1(8)-Z2	2,335	0,883	1,280	0,744

Sowohl bei den Feinbetonen mit Zusammensetzungen gemäß CEN/TR 16563:2013 [6] als auch bei den Feinbetonen mit modifizierter Zusammensetzung zeigen die Ergebnisse, dass sich eine längere Lagerung der Probekörper unter Wasser erwartungsgemäß positiv auf den Carbonatisierungswiderstand auswirkt. In **Bild 6** werden die anhand der Versuche mit 7 tägiger Wasserlagerung und mit 28 tägiger Wasserlagerung bestimmten Carbonatisierungsraten $k_{c,CarboFB,7}$ und $k_{c,CarboFB,28}$ einander gegenüber gestellt. Es zeigt sich ein näherungsweise

linearer Zusammenhang zwischen den Carbonatisierungsraten $k_{c,CarboFB,7}$ und $k_{c,CarboFB,28}$. Durch lineare Regression wurde der folgende Zusammenhang bestimmt (mit $R^2 = 0,985$):

$$k_{c,CarboFB,28} = 0,67 \cdot k_{c,CarboFB,7}$$

Die Carbonatisierungsrate nach 28 tägiger Vorlagerung unter Wasser ist demnach um rd. 33 % geringer als die Carbonatisierungsrate nach 7 tägiger Vorlagerung unter Wasser.

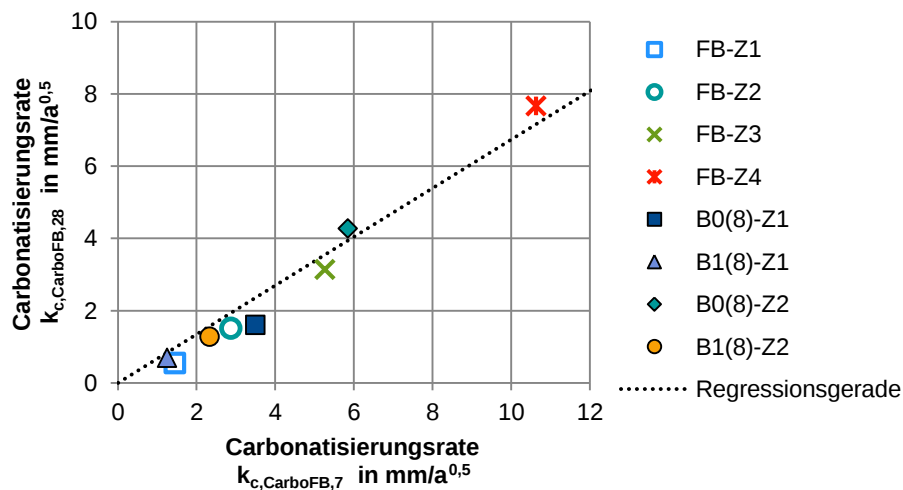


Bild 6 Gegenüberstellung der anhand der Versuche mit 7 tägiger Wasserlagerung und mit 28 tägiger Wasserlagerung bestimmten Carbonatisierungsraten $k_{c,CarboFB,7}$ und $k_{c,CarboFB,28}$

Bei den Feinbetonen mit Zusammensetzungen gemäß CEN/TR 16563:2013 [6] (**Bild 4**) ergeben sich für den mit CEM I hergestellten Feinbeton FB-Z1 die geringsten Carbonatisierungstiefen bzw. –raten. Für den mit CEM III/A hergestellten Feinbeton FB-Z2 ergeben sich höhere Carbonatisierungstiefen bzw. –raten, wobei der Unterschied bei der 7 täglichen Vorlagerung unter Wasser ausgeprägter ist als bei der 28 täglichen Vorlagerung. Die mit CEM X hergestellten Feinbetone FB-Z3 und FB-Z4 weisen höhere Carbonatisierungstiefen und –raten auf als die Feinbetone FB-Z1 und FB-Z2, wobei die Carbonatisierungstiefen beim Feinbeton FB-Z4 nochmals um mehr als Faktor 2 höher liegen als beim Feinbeton FB-Z3.

In **Bild 7** erfolgt eine Gegenüberstellung der Versuchsergebnisse für die Feinbetone gemäß CEN/TR 16563:2013 [6] und der für die Bewertung bei Zulassungsprüfungen herangezogenen Datenbasis des DIBt aus [6]. In Zulassungsprüfungen für Zemente wird von einer ausreichenden Dauerhaftigkeit gegenüber Carbonatisierung ausgegangen, wenn die Ergebnisse aus den Versuchen mit 7 tägiger und 28 tägiger Vorlagerung jeweils unter den als durchgezogene Linien eingezeichneten Grenzwerten liegen. Für die Feinbetone FB-Z1 und FB-Z2 werden die Grenzwerte eingehalten, was angesichts der verwendeten Zementarten CEM I und CEM III/A, deren Verwendung für alle Expositionsklassen zugelassen ist, den Erwartungen entspricht. Die Ergebnisse für den Feinbeton FB-Z3, der mit einem CEM X mit 35 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 35 M.-% Kalkstein hergestellt wurde, liegen ebenfalls unterhalb der Grenzwerte. Die Ergebnisse für den Feinbeton FB-Z4, der mit einem CEM X mit 20 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 50 M.-% Kalkstein hergestellt wurde, überschrei-

ten die Grenzwerte, sodass mit diesem Zement kein ausreichender Carbonatisierungswiderstand gemäß der Definition von CEN/TR 16563:2013 [6] erreicht werden kann.

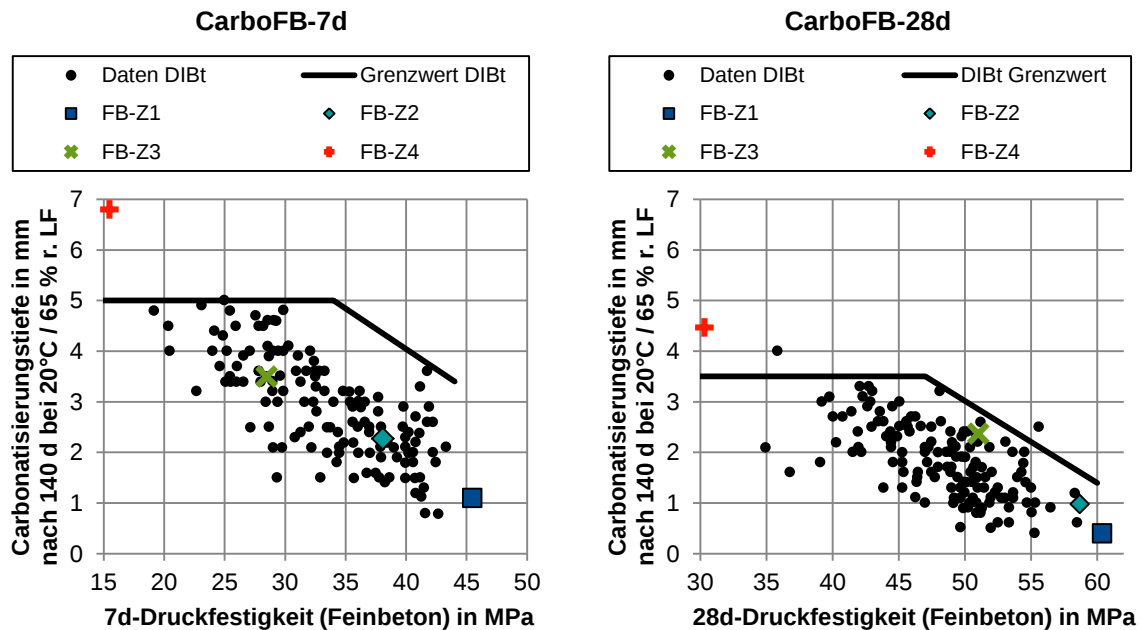


Bild 7 Einordnung der Ergebnisse der Carbonatisierungsversuche an Feinbetonen in den Bewertungsrahmen des DIBt gemäß CEN/TR 16563:2013 [6]

Anhand der Ergebnisse für die Feinbetone mit modifizierten Zusammensetzungen kann der Einfluss des w/z-Wertes und des Zementgehalts auf die Carbonatisierungsrate bei sonst gleicher Zusammensetzung bewertet werden (**Bild 5**). Erwartungsgemäß ergeben sich für die Feinbetone mit den höheren w/z-Werten und geringeren Zementgehalten, B0(8)-Z1 und B0(8)-Z2, höhere Carbonatisierungstiefen bzw. –raten als für die Feinbetone mit den geringeren w/z-Werten und höheren Zementgehalten, B1(8)-Z1 und B1(8)-Z2. Bei den mit CEM III/A hergestellten Feinbetonen B0(8)-Z2 und B1(8)-Z2 ergeben sich jeweils höhere Carbonatisierungstiefen als bei den mit CEM I und sonst gleicher Zusammensetzung hergestellten Feinbetonen B0(8)-Z1 und B1(8)-Z1. Die Unterschiede der Carbonatisierungstiefen bzw. –raten sind bei den Feinbetonen B0(8)-Z1, B1(8)-Z1 und B1(8)-Z2 bei einer 28 tägigen Vorlagerung unter Wasser weniger stark ausgeprägt als bei einer 7 tägigen Vorlagerung unter Wasser. Da die Messwerte bei den genannten Versuchsserien mit 28 tägiger Vorlagerung insgesamt klein sind (< 2 mm), sind die Unterschiede zwischen den Feinbetonen wahrscheinlich aufgrund der Messunsicherheit nicht mehr so deutlich ersichtlich.

Die Zusammensetzungen der Feinbetone B0(8)-Z1, B0(8)-Z2, B1(8)-Z1 und B1(8)-Z2 stimmen bis auf das Größtkorn bzw. die Sieblinie der Gesteinskörnung mit denen der Betone B0-Z1, B0-Z2, B1-Z1 und B1-Z2 überein. Die Ergebnisse der jeweiligen Versuchsreihen CarboB und CarboFB-7d können daher direkt miteinander verglichen werden. In **Bild 8** werden die anhand der Versuche an Betonen (CarboB) und Feinbetonen (CarboFB-7d) bestimmten Carbonatisierungsraten $k_{c,CarboB}$ und $k_{c,CarboFB,7}$ einander gegenüber gestellt. Über alle Betone betrachtet ergibt sich eine gute Übereinstimmung der Carbonatisierungsraten $k_{c,CarboB}$ und $k_{c,CarboFB,7}$. Das Bestimmtheitsmaß beträgt für die betrachteten vier Wertepaare 0,96. Die beste Übereinstimmung ergibt sich für den Beton B0-Z2 und den Feinbeton

B0(8)-Z2. Die am Beton B0-Z2 bestimmte Carbonatisierungsrate ist nur rd. 1 % geringer als die am Feinbeton B0(8)-Z2 bestimmte Carbonatisierungsrate. Die schlechteste Übereinstimmung ergibt sich für den Beton B1-Z2 und den Feinbeton B1(8)-Z2. Die am Beton B1-Z2 bestimmte Carbonatisierungsrate ist um rd. 30 % geringer als die am Feinbeton B1(8)-Z2 bestimmte Carbonatisierungsrate.

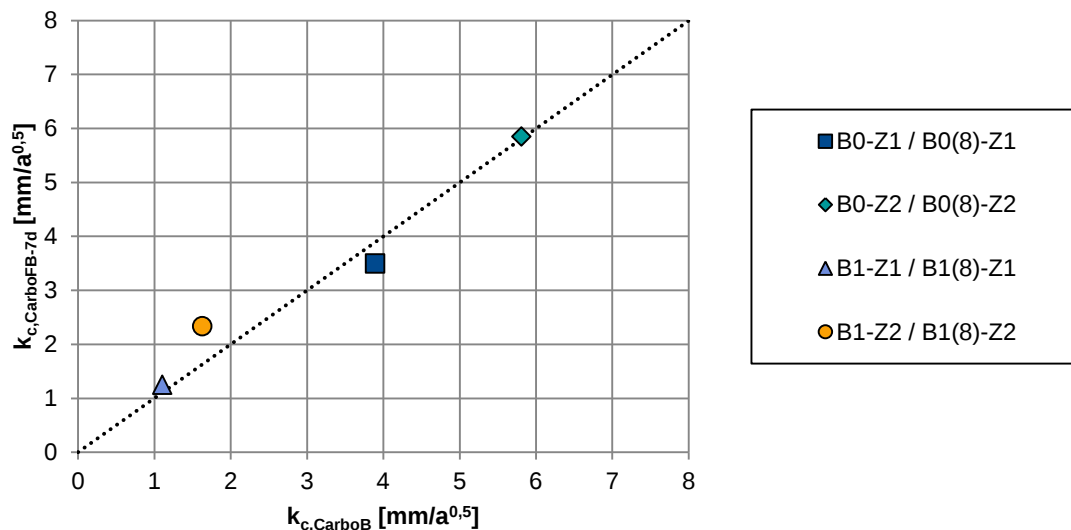


Bild 8 Gegenüberstellung der anhand der Versuche an Betonen (CarboB) und Feinbetonen (CarboFB-7d) bestimmten Carbonatisierungsraten $k_{c,CarboB}$ und $k_{c,CarboFB,7}$

Beim Vergleich sämtlicher Carbonatisierungsversuche an Betonen und Feinbetonen (ausgenommen beschleunigte Carbonatisierungsversuche) ergeben sich durchgehend die geringsten Carbonatisierungstiefen bzw. -raten für die mit CEM I und einem w/z-Wert von 0,5 hergestellten Betone und Feinbetone B1-Z1, B1(8)-Z1 und FB-Z1. Die höchsten Carbonatisierungstiefen bzw. -raten ergeben sich für die Betone und Feinbetone B1-Z4 und FB-Z4, die mit einem CEM X mit 20 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 50 M.-% Kalkstein hergestellt wurden. Ebenfalls höhere Carbonatisierungstiefen bzw. -raten als die weiteren Betone und Feinbetone zeigen die Betone und Feinbetone B1-Z3 und FB-Z3, die einen CEM X mit 35 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 35 M.-% Kalkstein beinhalten. Bezogen auf das Gesamtspektrum der Versuche zeigten die mit CEM I bzw. CEM III und einem w/z-Wert von 0,65 hergestellten Betone B0-Z1 und B0-Z2 mittlere Carbonatisierungstiefen bzw. -raten. Der mit CEM II/B-M (S-LL) hergestellte Beton B1-Z5 ordnet sich ebenfalls im mittleren Bereich ein.

Insgesamt macht der Vergleich der Ergebnisse der Carbonatisierungsversuche deutlich, dass insbesondere die Zementart, aber auch der w/z-Wert in Kombination mit dem Zementgehalt den Carbonatisierungswiderstand von Betonen stark beeinflussen. Den größten Unterschied zeigen die Betone B1-Z1 und B1-Z4, die bis auf die Zementart die gleiche Zusammensetzung besitzen. Die am Beton B1-Z4 bestimmte Carbonatisierungsrate ist etwa 12-mal so hoch wie die am Beton B1-Z1 bestimmte Carbonatisierungsrate. Werden die Betone mit den Grenzzusammensetzungen für die Expositionsklasse XC3 gemäß DIN 1045-2 (B0-Z1 und B0-Z2) als Referenz betrachtet, wird deutlich, dass die mit CEM X hergestellten Betone B1-Z3 und B1-Z4 trotz geringerer w/z-Werte und höherer Zementgehalte geringere Carbonatisierungswiderstände besitzen. Hierbei wurden die Ergebnisse der Versuche bei natürlicher

CO₂-Konzentration zugrunde gelegt. Anhand der Ergebnisse der Schnellcarbonatisierungsversuche ergibt sich für den Beton B1-Z3 dagegen ein höherer Carbonatisierungswiderstand als für den Beton B0-Z2. Bei dem mit CEM II/B-M (S-LL) hergestellten Beton B1-Z5 kann durch die Wahl eines geringeren w/z-Wertes und eines höheren Zementgehalts ein vergleichbarer Carbonatisierungswiderstand wie bei den Betonen mit den Grenzzusammensetzungen für die Expositionsklasse XC3 gemäß DIN 1045-2 (B0-Z1 und B0-Z2) erreicht werden.

Die Auswirkungen der unterschiedlichen Carbonatisierungswiderstände auf die rechnerische Nutzungsdauer von Stahlbetonbauteilen werden im Rahmen von probabilistischen Grenzzustandsberechnungen in Abschnitt 3.4 untersucht.

3.3 Chlorideindringwiderstand von Betonen

Die Ergebnisse der Chloridmigrationsversuche im Alter von 35 Tagen (RCM-35d) und 98 Tagen (RCM-98d) sind in **Bild 9** dargestellt. Dargestellt sind jeweils die Mittelwerte der Chloridmigrationskoeffizienten aus drei Versuchen. Die Einzelwerte der Chloridmigrationskoeffizienten sowie die zugehörigen Eindringtiefen und Dauern der Migration sind im Anhang in **Tabelle C-1** zusammengestellt.

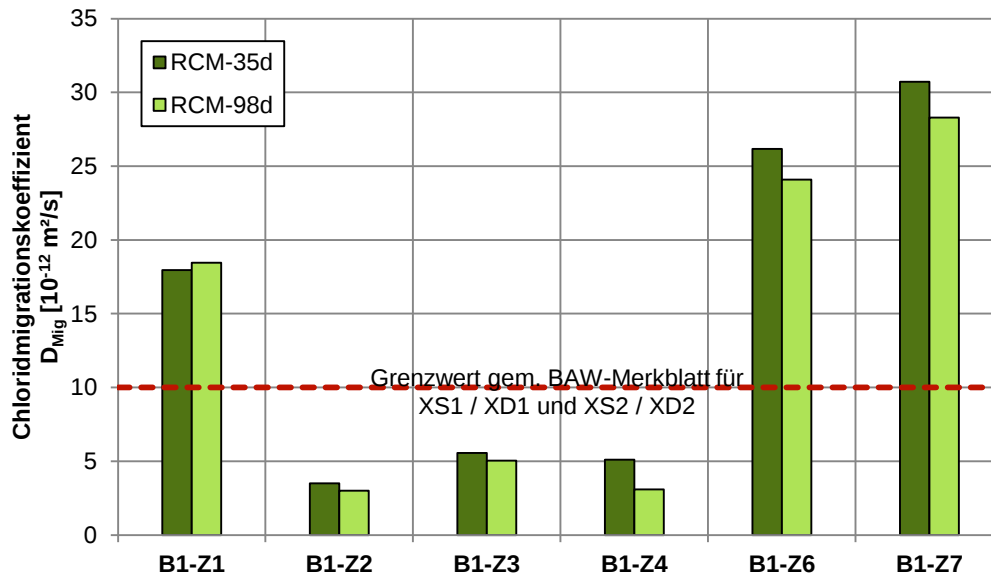


Bild 9 Ergebnisse der Chloridmigrationsversuche (RCM-35d: Versuchsstart im Alter von 35 Tagen, RCM-98d: Versuchsstart im Alter von 98 Tagen)

Aus **Bild 9** wird deutlich, dass die Chloridmigrationskoeffizienten sich grundsätzlich in zwei Wertebereiche einordnen lassen. Die Betone B1-Z1, B1-Z6 und B1-Z7 erreichen vergleichsweise hohe Chloridmigrationskoeffizienten, während die Chloridmigrationskoeffizienten der Betone B1-Z2, B1-Z3 und B1-Z4 sich auf einem deutlich niedrigeren Niveau einordnen. Die Gruppe mit den höheren Chloridmigrationskoeffizienten umfasst die Betone mit Portlandzement CEM I und Portlandkalksteinzementen CEM II/A-LL und CEM II/B-LL. Die Gruppe mit den niedrigen Chloridmigrationskoeffizienten umfasst die Betone mit hüttensandhaltigen Zementen CEM III/A und CEM X. Für den Hochofenzement CEM III/A entspricht dieses Verhalten den Erwartungen, da bekannt ist, dass der Chlorideindringwiderstand durch den Einsatz von Hüttensand als Zementhauptbestandteil bzw. Betonzusatzstoff im Vergleich zu reinem Portlandzement gesteigert werden kann, vgl. u. a. [16], [17], [18], [19]. Die geringen Chloridmigrationskoeffizienten der mit CEM X hergestellten Betone lassen darauf schließen, dass dieser positive Effekt sich ebenso im Dreistoffsystem Klinker, Hüttensand und Kalkstein bei geringen Klinkergehalten zeigt.

Nach dem BAW-Merkblatt „Chlorideindringwiderstand von Betonen“ [8] ist für Betone für Wasserbauwerke in den Expositionsklassen XS1 bzw. XD1 und XS2 bzw. XD2 ein Chloridmigrationskoeffizient $\leq 10,0 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ nachzuweisen. Diese Anforderung wird von der Gruppe der Betone mit hüttensandhaltigen Zementen, d. h. B1-Z2, B1-Z3 und B1-Z4, erfüllt. Die Chloridmigrationskoeffizienten der Betone mit Portlandzement Portlandkalksteinzement, B1-Z1, B1-Z6 und B1-Z7, liegen deutlich oberhalb des Grenzwerts.

Die Erhöhung des Alters bei Versuchsbeginn von 35 Tagen auf 98 Tage bewirkt bei allen Betonen außer B1-Z1 eine Verringerung des Chloridmigrationskoeffizienten. Die Verringerung ist bei den Betonen mit hüttensandhaltigen Zementen stärker ausgeprägt als bei den restlichen Betonen und beträgt zwischen 10 % (B1-Z3) und 39 % (B1-Z4). Bei den Betonen mit Portlandkalksteinzementen beträgt die Verringerung in beiden Fällen (B1-Z6 und B1-Z7) 8 %. Da hüttensandhaltige Zemente in der Regel eine stärker ausgeprägte Zunahme des Hydratationsgrades im höheren Alter (> 28 Tage) zeigen als Portlandkalksteinzemente, entsprechen diese Beobachtungen den Erwartungen. Für den mit CEM I hergestellten Beton B1-Z1 ergibt sich für den Versuchsbeginn nach 98 Tagen ein um 3 % höherer Chloridmigrationskoeffizient als für den Versuchsbeginn nach 35 Tagen. Diese recht geringe Zunahme des Wertes ist wahrscheinlich auf die Streuungen der Prüfwerte zurückzuführen.

Die anhand der Chloriddiffusionsversuche für unterschiedliche Diffusionsdauern bestimmten scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten sind in **Bild 10** dargestellt. Die Versuche wurden als Einzelbestimmung und in einigen Fällen als Doppelbestimmung (in der Regel für die Diffusionsdauer 90 Tage) durchgeführt. Die durch Analysen von Schleifmehlen bestimmten Chloridprofile, aus denen die Diffusionskoeffizienten abgeleitet wurden, sind im Anhang in **Bild C-6** bis **Bild C-13** zusammengestellt.

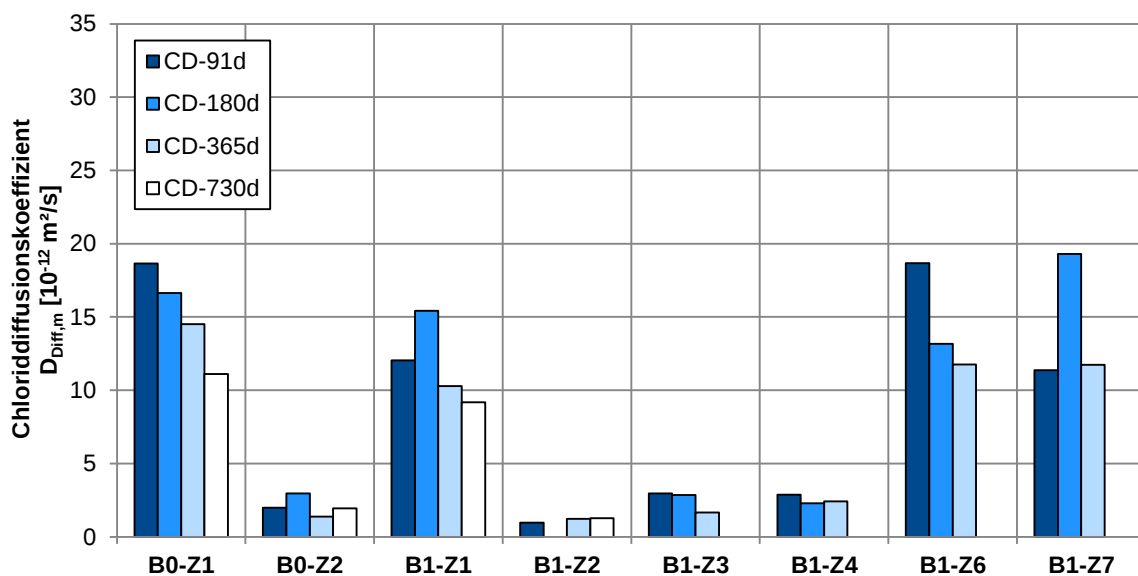


Bild 10 Ergebnisse der Chloriddiffusionsversuche (Diffusionsdauern von 91 (CD-91d), 180 (CD-180d), 365 (CD-365d) und 730 Tagen (CD-730d))

Ähnlich wie bei den Chloridmigrationsversuchen ergeben sich für die Betone mit hüttensandhaltigen Zementen deutlich geringere Chloriddiffusionskoeffizienten als für die restlichen Betone. Die Diffusionsversuche wurden auch an den Betonen B0-Z1 und B0-Z2 durchgeführt, die einen höheren w/z-Wert und niedrigeren Zementgehalt als die restlichen Betone besitzen und gemäß der deskriptiven Regeln der DIN 1045-2 nicht für die Anwendung im Expositionsklassenbereich XD bzw. XS zugelassen sind. Der Vergleich mit den weiteren Betonen macht deutlich, dass die Wahl der Zementart die Werte der Chloriddiffusionskoeffizienten weit mehr beeinflusst als der w/z-Wert und der Zementgehalt. Trotz höherem w/z-Wert und geringerem Zementgehalt sind die Chloriddiffusionskoeffizienten beim Beton B0-Z2 mit CEM III/A deut-

lich geringer als bei den Betonen B1-Z1, B1-Z6 und B1-Z7 mit CEM I, CEM II/A-LL und CEM II/B-LL.

Die scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten zeigen wie auch die Chloridmigrationskoeffizienten eine Abhängigkeit vom Alter bzw. der Beaufschlagungszeit mit Natriumchloridlösung. Die in der Literatur häufig beschriebene kontinuierliche Abnahme mit zunehmender Beaufschlagungszeit, vgl. u. a. [11], [12], [13], [14], konnte aber nur für die Betone B0-Z1, B1-Z3 und B1-Z6 beobachtet werden. Ein möglicher Grund dafür könnte der relativ geringe Umfang der Versuche je Beaufschlagungsdauer (in der Regel Einzelbestimmung, einige Doppelbestimmungen für $t_{\text{Diff}} = 90$ d) in Verbindung mit dem recht großen Variationskoeffizienten sein, der gemäß DIN EN 12390-11 [9] 15 % bis 30 % beträgt.

Gemäß MC SLD [5] kann zwischen dem scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizient $D_{\text{app},c}(t)$ nach einer Beaufschlagungsdauer t und dem Chloridmigrationskoeffizient $D_{\text{Mig},0}$ der folgende Zusammenhang angenommen werden (s. a. Abschnitt 2.4.3):

$$D_{\text{app},c}(t) = k_e \cdot D_{\text{Mig},0} \cdot k_t \cdot A(t) \quad (16)$$

mit

k_e : Parameter zur Berücksichtigung der Umgebungstemperatur

$$k_e = \exp\left(b_e \cdot \left(\frac{1}{T_{\text{ref}}} - \frac{1}{T_{\text{real}}}\right)\right), \text{ hier } k_e = 1 \text{ da } T_{\text{real}} = T_{\text{ref}} = 20 \text{ °C}$$

$D_{\text{Mig},0}$: im Versuch bestimmter Chloridmigrationskoeffizient in m^2/s zum Bezugszeitpunkt t_0

k_t : Übertragungsparameter zur Berücksichtigung der Testmethode, $k_t = 1$ (konstanter Wert gemäß MC SLD)

$A(t)$: Alterungsfunktion $A(t) = \left(\frac{t_0}{t}\right)^a$,

mit a : Alterungsexponent in Abhängigkeit der Zementart, vgl. **Tabelle 10**

t_0 : Bezugszeitpunkt (Start des Migrationsversuchs), hier $t_0 = 35$ d

Auf Basis dieses Zusammenhangs soll im Folgenden die Übertragbarkeit der Prüfmethoden Chloridmigration und Chloriddiffusion überprüft werden. In einem ersten Schritt werden für den Alterungsexponenten a die in [14] angegebenen Mittelwerte angenommen, vgl. **Tabelle 10**, Spalte „Variante A“. Im zweiten Schritt wurden die Werte für den Alterungsexponenten a aus den eigenen Versuchsergebnissen so bestimmt, dass sich eine möglichst gute Übereinstimmung zwischen den im Versuch bestimmten und den aus dem Chloridmigrationskoeffizienten umgerechneten Chloriddiffusionskoeffizienten ergibt, vgl. **Tabelle 10**, Spalte „Variante B“.

Tabelle 10 Altersexponenten in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung bzw. der Zementart (Variante A: Mittelwerte aus [14], Variante B: aus eigenen Versuchen bestimmte Werte)

Beton	Zementart	Altersexponent (Variante A)	Altersexponent (Variante B)
B1-Z1	CEM I	0,30	0,18
B1-Z2	CEM III/A	0,40	0,62
B1-Z3	CEM X	0,40 ¹⁾	0,41
B1-Z4	CEM X	0,40 ¹⁾	0,36
B1-Z6	CEM II/A-LL	0,30	0,29
B1-Z7	CEM II/B-LL	0,30	0,40

¹⁾ Für die Zementart CEM X wurden dieselben Werte angenommen wie für die Zementart CEM III/A, da die Zementzusammensetzungen, verglichen mit denen, für die in [14] Werte für den Altersexponent angegeben werden, einem CEM III/A am nächsten kommen.

Der Vergleich der aus den Versuchen bestimmten und der aus den Chloridmigrationskoeffizienten für das Prüfalter 35 Tage berechneten Chloriddiffusionskoeffizienten ist für die Verwendung der Altersexponenten gemäß [14] (Variante A) in **Bild 11** und für die Verwendung der anhand der Versuche bestimmten Altersexponenten in **Bild 12** dargestellt. Im linken Diagramm ist jeweils der gesamte Wertebereich für alle Betone dargestellt. Die Darstellung im rechten Diagramm ist jeweils auf den Wertebereich der Betone mit hüttensandhaltigen Zementen beschränkt.

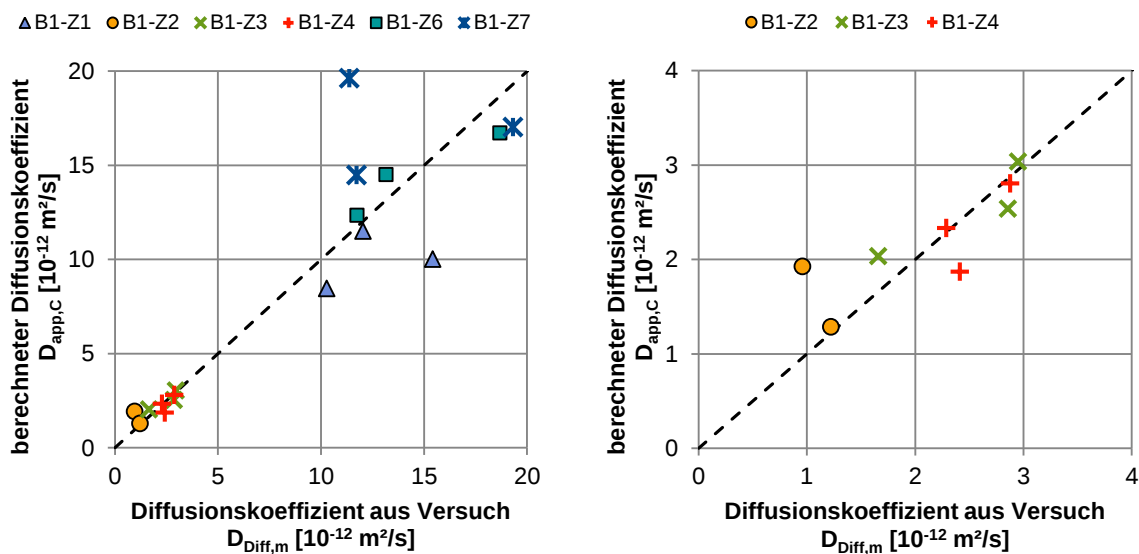


Bild 11 Gegenüberstellung der aus den Versuchen bestimmten Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{Diff,m}$ und der aus den Chloridmigrationskoeffizienten für das Prüfalter 35 Tage berechneten Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{app,C}$ bei Annahme der Altersexponenten aus [14] (Variante A gemäß **Tabelle 10**)

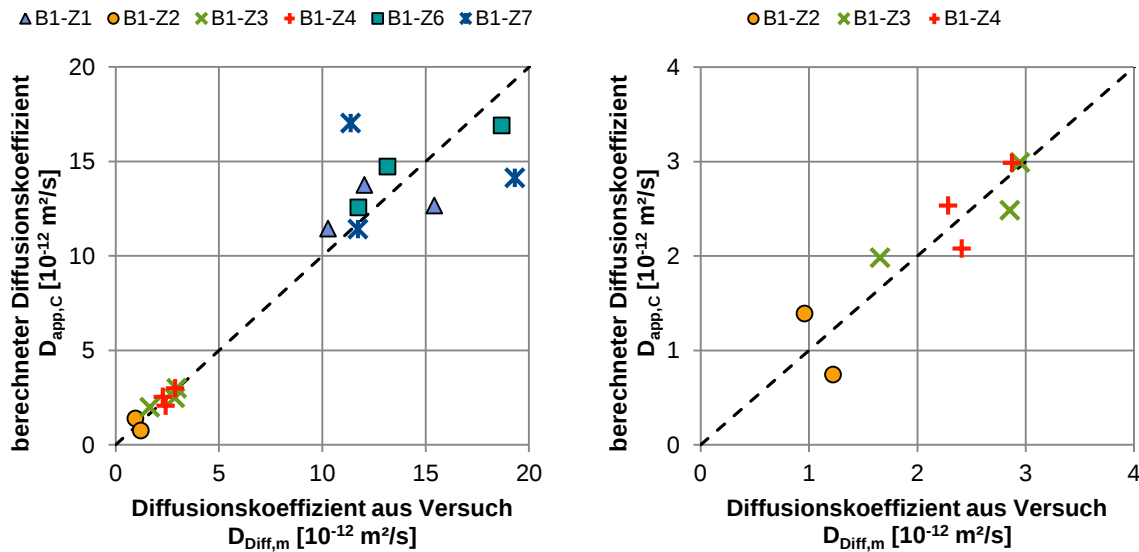


Bild 12 Gegenüberstellung der aus den Versuchen bestimmten Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{Diff,m}$ und der aus den Chloridmigrationskoeffizienten für das Prüfalter 35 Tage berechneten Chloriddiffusionskoeffizienten $D_{app,C}$ bei Verwendung der aus Versuchen bestimmten Altersexponenten (Variante B gemäß **Tabelle 10**)

Bei Verwendung der Mittelwerte für die Altersexponenten aus [14] (Variante A) ergibt sich über alle Betone betrachtet ein Bestimmtheitsmaß von 0,83 für die Übereinstimmung zwischen den aus den Chloriddiffusionsversuchen bestimmten und den aus den Chloridmigrationsversuchen rechnerisch abgeleiteten Chloriddiffusionskoeffizienten (Diagonale in **Bild 11**). Durch eine Optimierung der Altersexponenten anhand der Versuchsdaten (Variante B, **Bild 12**) kann das Bestimmtheitsmaß auf 0,89 erhöht werden.

3.4 Lebensdauerberechnungen für Stahlbetonbauteile

3.4.1 Grenzzustand „Depassivierung der Bewehrung infolge Carbonatisierung“

Für die Berechnung der Zuverlässigkeit der Betone hinsichtlich Depassivierung der Bewehrung infolge Carbonatisierung wurden die aus den Schnellcarbonatisierungsversuchen bestimmten inversen Carbonatisierungswiderstände als Materialparameter zugrunde gelegt. Die in den Versuchen bestimmten Mittelwerte und daraus unter Verwendung des im MC SLD [5] angegebenen Zusammenhangs abgeleiteten Standardabweichungen sind in **Tabelle 11** zusammengestellt. Die weiteren Berechnungsparameter sind in **Tabelle 5** (Abschnitt 2.4.2) zusammengestellt.

Tabelle 11 Mittelwerte und Standardabweichungen der inversen Carbonatisierungswiderstände für die untersuchten Betone

Beton	inverser Carbonatisierungswiderstand $R_{ACC,0}^{-1}$ in (mm ² /a)/(kg/m ³)	
	Mittelwert	Standardabweichung
B0-Z1	9790	895
B0-Z2	23643	1780
B1-Z1	3260	379
B1-Z2	3352	388
B1-Z3	15132	1256
B1-Z4	48260	3105
B1-Z5	5022	532

Die berechneten Zuverlässigkeitsindizes für die untersuchten Betone sind in **Bild 13** für einen Betrachtungszeitraum von 100 Jahren dargestellt. Als Zielzuverlässigkeit wurde auf Basis der Angaben aus [10] und [15] ein Wert des Zuverlässigkeitsindex von $\beta > 0,5$ festgelegt. Hiermit wird eine Eintrittswahrscheinlichkeit ($p_f \approx 31\%$) zugelassen. Der Hintergrund ist, dass aufgrund der mäßigen Feuchte in der Expositionsklasse XC3 auch nach der Depassivierung der Betondeckung nicht mit einer signifikanten Korrosion zu rechnen ist. Die Zeit bis zum Erreichen der Grenzzuverlässigkeit von $\beta = 0,5$ wird im Folgenden als „rechnerische Lebensdauer“ bezeichnet. Die rechnerischen Lebensdauern für die untersuchten Betone sind in **Tabelle 12** zusammengestellt.

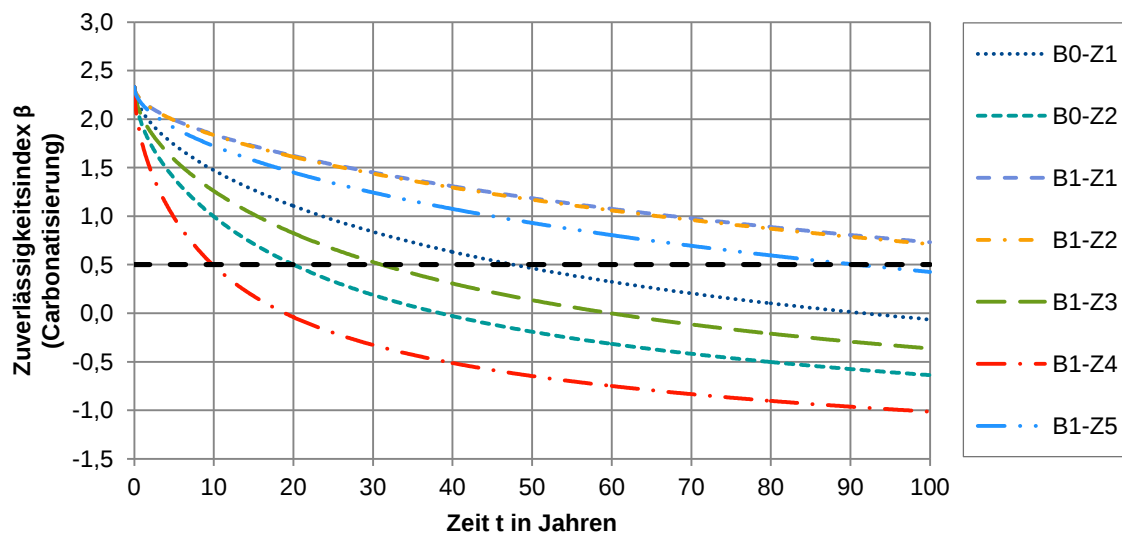


Bild 13 Zeitliche Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex für die untersuchten Betone für den Grenzzustand „Depassivierung der Bewehrung infolge Carbonatisierung“

Tabelle 12 Rechnerische Lebensdauer für die untersuchten Betone in Jahren (Grenzzustand Carbonatisierung)

B0-Z1	B0-Z2	B1-Z1	B1-Z2	B1-Z3	B1-Z4	B1-Z5
48	20	136	133	31	10	91

Da in den Berechnungen jeweils nur die Mittelwerte und Standardabweichungen des inversen Carbonatisierungswiderstandes verändert wurden, während alle weiteren Parameterwerte beibehalten wurden, ordnen sich die rechnerischen Lebensdauern qualitativ entsprechend der Werte der inversen Carbonatisierungswiderstände. Je höher der inverse Carbonatisierungswiderstand des Betons ist, desto höher ist die rechnerische Lebensdauer. Es ergibt sich ein großer Wertebereich für die rechnerische Lebensdauer zwischen 10 Jahren (Beton B1-Z4) und 136 Jahren (Beton B1-Z1).

Für die Betone mit der Grundrezeptur B0 (B0-Z1 und B0-Z2) und die Betone mit der Zementart CEM X (B1-Z3 und B1-Z4) ergeben sich rechnerische Lebensdauern von weniger als 50 Jahren. Das bedeutet, dass die Bewehrung innerhalb der angesetzten Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren mit einer Eintrittswahrscheinlichkeit von rd. 30 % depassiviert. Die Betone B0-Z1 und B0-Z2 erfüllen die deskriptiven Regeln der DIN 1045-2 [3] zur Sicherstellung einer ausreichenden Dauerhaftigkeit in der Expositionsklasse XC3, was zunächst im Widerspruch zur rechnerischen Lebensdauer steht. Jedoch muss bei dieser Beurteilung beachtet werden, dass die probabilistischen Berechnungen nur die Einleitungsphase der Korrosion berücksichtigen. Wenn die Korrosion aufgrund der mäßigen Feuchte danach nur sehr langsam voranschreitet, ist trotz eines frühen Erreichens der Depassivierung der Betondeckung nur mit einer geringen Wahrscheinlichkeit mit dem Auftreten von Korrosionsschäden innerhalb der geforderten Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren zu rechnen.

Wenn davon ausgegangen wird, dass der Beton B0-Z2 aufgrund der Erfüllung der deskriptiven Regeln der DIN 1045-2 [3] eine ausreichende Dauerhaftigkeit in der Expositionsklasse XC3 erreicht, kann dies entsprechend auch für alle Betone mit einer vergleichbaren oder größeren rechnerischen Lebensdauer angenommen werden. Nach dieser Bewertung ist nur der Beton B1-Z4 als unsicher hinsichtlich der Dauerhaftigkeit einzustufen. Zu beachten ist allerdings, dass der Beton B1-Z3 in den Carbonatisierungsversuchen bei natürlicher CO_2 -Konzentration höhere Carbonatisierungstiefen zeigte als der Beton B0-Z2. In den Schnellcarbonatisierungsversuchen, deren Ergebnisse den Lebensdauerberechnungen zugrunde liegen, war dieses Verhältnis umgekehrt. Wenn die Ergebnisse der Carbonatisierungsversuche bei natürlicher CO_2 -Konzentration als Bewertungsgrundlage herangezogen werden, müsste dementsprechend auch die Dauerhaftigkeit des Betons B1-Z3 als unsicher eingestuft werden.

3.4.2 Grenzzustand „Erreichen des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung“

In den Berechnungen der Zuverlässigkeit hinsichtlich des Erreichens des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung (kurz: Grenzzustand Chlorideindringen) wurde der Materialwiderstand in Form des scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten berücksichtigt. Dieser setzt sich zusammen aus dem Chloridmigrationskoeffizient, dessen Mittelwert im Migrationsversuch gemäß [8] bestimmt wurde und dem Altersexponent, der in Abhängigkeit der Zementart aus Literaturangaben übernommen oder auf Basis der Ergebnisse von Chloriddiffusionsversuchen mit unterschiedlichen Diffusionsdauern bestimmt wurde. Für die Verteilung des Chloridmigrationskoeffizienten wurde gemäß [11] eine Normalverteilung mit einem Variationskoeffizient von 20 % angenommen. Die sich daraus für die untersuchten Betone ergebenden Mittelwerte und Standardabweichungen sind in **Tabelle 13**

zusammengestellt. Für die Altersexponenten wurden in einer ersten Berechnungsvariante (Variante A) die Werte aus [14] übernommen. Für die Betone mit der Zementart CEM X (B1-Z3 und B1-Z4) wurden die gleichen Werte wie für den Beton mit CEM III/A angesetzt, vgl. Abschnitt 3.3. In einer weiteren Berechnungsvariante (Variante B) wurden die aus den Ergebnissen der Chloriddiffusionsversuche bestimmten Altersexponenten (Abschnitt 3.3) als Mittelwerte angesetzt, vgl. **Tabelle 13**. Für die Bestimmung der Standardabweichung wurde ein Variationskoeffizient von 45 % angenommen. Dies entspricht der in [5], [11] und [14] maximal angenommenen Streuung für den Altersexponent. Die weiteren Berechnungsparameter sind in **Tabelle 6** (Abschnitt 2.4.3) zusammengestellt.

Tabelle 13 Mittelwerte und Standardabweichungen der Chloridmigrationskoeffizienten und Altersexponenten für die untersuchten Betone

Beton	Chloridmigrationskoeffizient in $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$		Altersexponent (Variante A)		Altersexponent (Variante B)	
	Mittelwert	Standard- abweichung	Mittelwert	Standard- abweichung	Mittelwert	Standard- abweichung
B1-Z1	17,97	3,59	0,30	0,12	0,17	0,08
B1-Z2	3,50	0,70	0,40	0,18	0,62	0,28
B1-Z3	5,57	1,11	0,40	0,18	0,41	0,18
B1-Z4	5,10	1,02	0,40	0,18	0,36	0,16
B1-Z6	26,17	5,23	0,30	0,12	0,29	0,13
B1-Z7	30,73	6,15	0,30	0,12	0,40	0,18

In den Expositionsklassen XS2 und XD2 können sich im Anschluss an das Erreichen eines kritischen Chloridgehalts relativ rasch Korrosionsschäden einstellen [15]. Sofern auf Instandsetzungsmaßnahmen während der Nutzungsdauer verzichtet werden soll, sollte daher eine hohe Zuverlässigkeit von $\beta > 1,5$ eingehalten werden. Hierbei ergeben sich allerdings nach [15] zum Teil unwirtschaftlich hohe Betondeckungsmaße. Für diese Fälle wird in [15] empfohlen, die Zielzuverlässigkeit auf $\beta > 0,5$ zu senken und ergänzende Maßnahmen (z. B. regelmäßige Inspektionen, Wartungsplan) festzulegen, um sich anbahnende Korrosionsschäden früh zu erkennen und mit geringem Aufwand instand setzen zu können.

Die Darstellung der Zuverlässigkeitsindizes in **Bild 14** (Variante A) bzw. **Bild 15** (Variante B) macht deutlich, dass ein Zuverlässigkeitsindex $\beta > 1,5$ von den untersuchten Betonen nur für relativ kurze Zeiträume eingehalten werden kann. Dementsprechend wird gemäß der Empfehlung aus [15] eine Zielzuverlässigkeit von $\beta > 0,5$ festgelegt. Die auf Basis dieser Annahmen bestimmten rechnerischen Lebensdauern sind in **Tabelle 14** zusammengestellt.

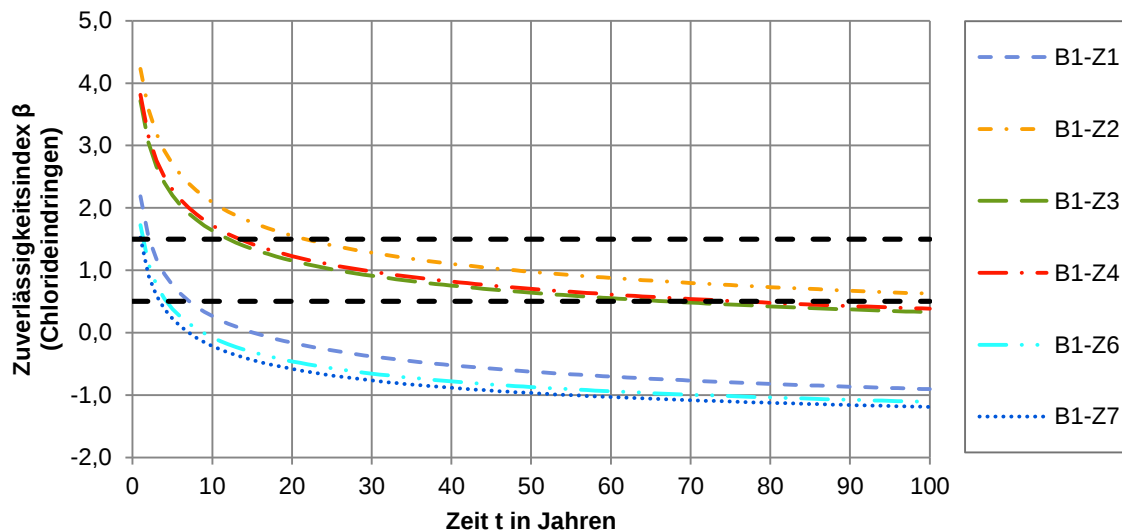


Bild 14 Zeitliche Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex für die untersuchten Betone für den Grenzzustand „Erreichen des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung“ (Variante A: Altersexponenten gemäß Literaturangaben)

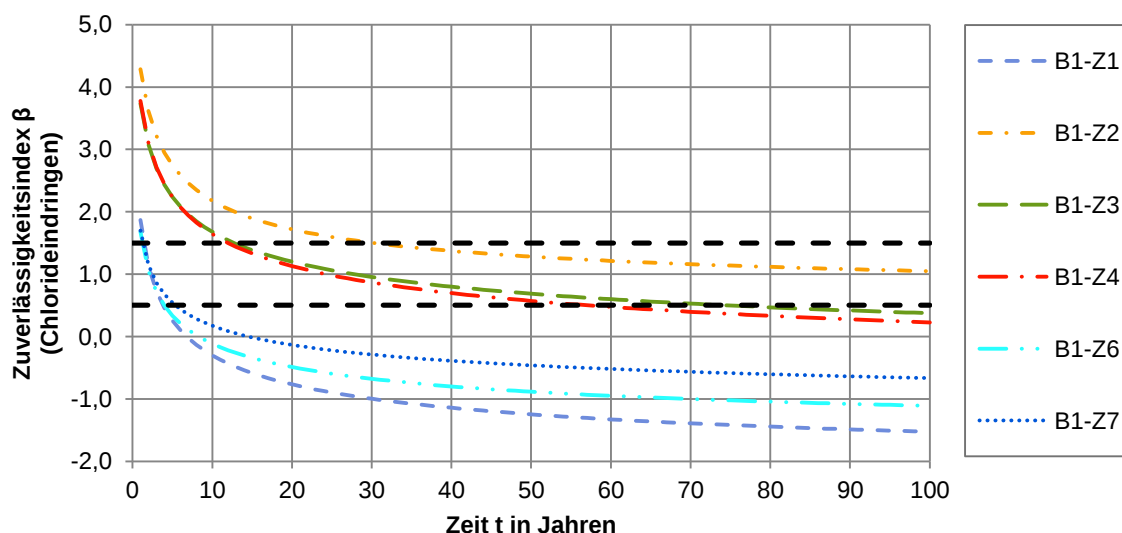


Bild 15 Zeitliche Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex für die untersuchten Betone für den Grenzzustand „Erreichen des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung“ (Variante B: Altersexponenten aus Versuchen bestimmt)

Tabelle 14 Rechnerische Lebensdauer für die untersuchten Betone in Jahren (Grenzzustand Chlorideindringen, Zielzuverlässigkeit $\beta > 0,5$)

	B1-Z1	B1-Z2	B1-Z3	B1-Z4	B1-Z6	B1-Z7
Variante A	8	> 100	68	77	5	4
Variante B	4	> 100	75	58	4	6

Analog zu den Chloridmigrations- bzw. Chloriddiffusionskoeffizienten zeigt sich auch bei den Zuverlässigkeitsindizes eine deutliche Teilung der Betone in zwei Gruppen. Bei den Betonen mit hüttensandhaltigen Zementen (B1-Z2, B1-Z3 und B1-Z4) ergeben sich deutlich höhere

Zuverlässigkeitsindizes als bei den Betonen mit Portlandzement (B1-Z1) bzw. kalksteinhaltigen Portlandkompositzementen (B1-Z6 und B1-Z7).

Der Vergleich der beiden Berechnungsvarianten macht den Einfluss des Altersexponenten auf die berechneten Zuverlässigkeitsindizes bzw. Lebensdauern deutlich. Durch die modifizierten Altersexponenten werden sowohl die absoluten Werte der rechnerischen Lebensdauer als auch die relative Abstufung der Lebensdauern der Betone untereinander verändert. Der größte Unterschied zeigt sich beim Beton B1-Z4, für den die rechnerische Lebensdauer bei Verwendung des aus Versuchen bestimmten Altersexponenten (Variante B) um 19 Jahre geringer ist als bei Verwendung des Altersexponenten aus [14] (Variante A). Beim Beton B1-Z3 ergibt sich trotz einer sehr geringen Veränderung des Mittelwertes des Altersexponenten von 0,40 auf 0,41 in der Variante B eine um 7 Jahre höhere rechnerische Lebensdauer als in der Variante A. Diese Veränderungen führen weiterhin dazu, dass in der Variante B der Beton B1-Z3 eine höhere rechnerische Lebensdauer als der Beton B1-Z4 erreicht, während sich in der Variante A der umgekehrte Zusammenhang ergibt. Die hohe Sensitivität der Berechnungsergebnisse gegenüber der Veränderung des Altersexponenten verdeutlicht die Wichtigkeit dieses Berechnungsparameters. Für Betone mit Zementen, für die keine oder nur wenige Erfahrungen vorliegen, ist daher die Bestimmung des Altersexponenten aus Chloriddiffusionsversuchen der Verwendung von Literaturwerten vorzuziehen. Des Weiteren sollte beachtet werden, dass die Lebensdauerberechnung umso ungünstigere Ergebnisse liefert, je geringer der Altersexponent ist.

Trotz der teilweise erheblich unterschiedlichen Ergebnisse zeichnen sich in beiden Berechnungsvarianten die gleichen Tendenzen ab. Das deutlich geringere Zuverlässigkeitsniveau bei den Betonen B1-Z1, B1-Z6 und B1-Z7 ist verbunden mit recht geringen rechnerischen Lebensdauern, die zwischen 4 und 8 Jahren betragen. Anhand dieser geringen rechnerischen Lebensdauern würden diese Betone in Projekten, bei denen ein rechnerischer Nachweis gefordert wird, als „schlecht geeignet“ für die Expositionsklassen XD2 und XS2 eingestuft werden. Demgegenüber erreichen die Betone B1-Z2, B1-Z3 und B1-Z4 deutlich höhere rechnerische Lebensdauern zwischen 58 Jahren und über 100 Jahren. Dies bedeutet, dass auch mit den Betonen mit der bisher wenig erprobten Zementart CEM X rechnerisch eine ausreichende Dauerhaftigkeit gegeben wäre, wenn von einer einzuhaltenden Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren ausgegangen wird. Die untersuchten CEM X-Zemente bieten somit eine hinsichtlich der Dauerhaftigkeit in den Expositionsklassen XD2 und XS2 eine gute Alternative zum CEM III/A. Zwar kann mit dem Beton B1-Z2 mit CEM III/A ein höheres Zuverlässigkeitsniveau als mit den Betonen B1-Z3 und B1-Z4 mit CEM X erzielt werden, es ist aber im Einzelfall zu beurteilen, ob dies einen tatsächlichen Vorteil bringt. Das Zuverlässigkeitsniveau kann außerdem durch eine größere Betondeckung positiv beeinflusst werden, sodass hierdurch die Leistungsfähigkeit von Betonen bzw. Betonbauteilen mit den CEM X-Zementen weiter gesteigert werden könnte.

4 Zusammenfassung

Das Ziel des durchgeführten Forschungsvorhabens war die Erarbeitung einer Datenbasis für dauerhaftigkeitsrelevante Materialparameter von Betonen mit unterschiedlichen Zusammensetzungen und verschiedenen, teilweise neuen Zementarten. Darauf aufbauend wurden probabilistische Lebensdaueruntersuchungen durchgeführt, um die Leistungsfähigkeit der Betone bei der Verwendung in Stahlbetonbauteilen mit für Deutschland typischen Umgebungsbedingungen zu beurteilen. Die Ergebnisse bilden eine Grundlage, um die in der Praxis bereits in Teilen vollzogene Verwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen weiter abzusichern und Randbedingungen zu formulieren, um in der Breite den Klinker/Zement-Faktor weiter zu reduzieren, die Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Beton zu fördern und zur gleichen Zeit Betone mit ausreichender Dauerhaftigkeit zu konzipieren.

Die experimentellen Untersuchungen umfassten Versuche zum Carbonatisierungsverhalten von sieben Betonen und zum Chlorideindringwiderstand von acht Betonen. Bei der Wahl der Betonzusammensetzungen lag der Fokus auf der Variation der Zementart in zwei hinsichtlich Wasserzementwert und Zementgehalt verschiedenen Grundzusammensetzungen, s. **Tabelle 15** und **Tabelle 16**. Es wurden zum einen Zemente eingesetzt, deren Verwendung für alle Expositionsklassen zugelassen ist und zum anderen neue Zemente, für die es bisher keine Praxiserprobung gibt, s. **Tabelle 16**.

Tabelle 15 Untersuchte Betonzusammensetzungen

Bezeichnung	Zementgehalt	Wasserzementwert	Sieblinie
B0	280 kg/m ³	0,65	A16/B16 (Rheinsand + -kies)
B1	320 kg/m ³	0,50	A16/B16 (Rheinsand + -kies)

Tabelle 16 Bezeichnung und Zusammensetzung der verwendeten Zemente

Bezeichnung	Zementart	Klinker (K) [M.-%]	Hüttensand (S) [M.-%]	Kalkstein (LL) [M.-%]
Z1	CEM I 42,5 R	100	-	-
Z2	CEM III/A 42,5 N	55	45	-
Z3	CEM X	35	30	35
Z4	CEM X	20	30	50
Z5	CEM II/B-M (S-LL)	65	10	25
Z6	CEM II/A-LL 32,5 R	79,0 - 82,2	-	17,8 – 21,0
Z7	CEM II/B-LL 32,5 R	72,5 - 76,7	-	23,3 - 27,5

Das Carbonatisierungsverhalten der Betone wurde mit drei verschiedenen Prüfverfahren untersucht (Carbonatisierungsversuche an Betonen und an Feinbetonen im Klima 20/65 bei natürlicher CO₂-Konzentration sowie Schnellcarbonatisierungsversuche im Klima 20/65 bei einer CO₂-Konzentration von 2 Vol.-%). Alle Prüfverfahren ergaben eine qualitativ ähnliche Beurteilung des Carbonatisierungsverhaltens der Betone. Mit den Ergebnissen der Schnellcarbonatisierungsversuche war durch eine Umrechnung der Ergebnisse eine grobe quantitative Abschätzung der Carbonatisierungsraten bei natürlicher CO₂-Konzentration möglich,

wobei in einzelnen Fällen jedoch deutliche Abweichungen zwischen beiden Prüfverfahren festgestellt wurden.

Die gemessenen Carbonatisierungstiefen und daraus abgeleiteten Carbonatisierungsraten zeigten deutliche Einflüsse sowohl der Zementart als auch des Wasserzementwertes und des Zementgehaltes auf das Carbonatisierungsverhalten. Bei bis auf die Zementart gleicher Zusammensetzung waren die bei natürlicher CO_2 -Konzentration bestimmten Carbonatisierungstiefen umso größer, je geringer der Klinkergehalt des Zements war. Negative Einflüsse aus dem Zement auf den Carbonatisierungswiderstand konnten teilweise durch eine hinsichtlich w/z-Wert und Zementgehalt optimierte Betonzusammensetzung ausgeglichen werden. Mit dem Zement Z5 (Zementart CEM II/B-M (S-LL)) konnte in der optimierten Betonzusammensetzung B1-Z5 ein vergleichbarer bzw. höherer Carbonatisierungswiderstand als mit der Grenzzusammensetzung für die Expositionsklasse XC3 gemäß DIN 1045-2 bei Verwendung der „konventionellen“ Zemente Z1 und Z2 (Betone B0-Z1 und B0-Z2) erzielt werden. Bei den Zementen Z3 und Z4 (Zementart CEM X) genügte diese betontechnische Optimierung nicht, um einen vergleichbaren Carbonatisierungswiderstand wie bei der Grenzzusammensetzung mit den Zementen Z1 und Z2 zu erzielen.

Der Widerstand der Betone gegenüber eindringenden Chloriden wurde durch Chloridmigrations- und Chloriddiffusionsversuche untersucht, wobei jeweils das Alter zu Versuchsstart bzw. die Beaufschlagungsdauer variiert wurde. Bei beiden Prüfverfahren wurde eine deutliche Trennung der Ergebnisse in zwei Gruppen festgestellt. Die Betone mit den Zementen Z2, Z3 und Z4 (CEM III/A und CEM X) zeigten vergleichsweise geringe Chloridmigrations- bzw. Chloriddiffusionskoeffizienten, während sich für die Betone mit dem Portlandzement Z1 und den Portlandkalksteinzementen Z6 und Z7 deutlich höhere Werte ergaben.

Die im Berechnungsmodell für Chloriddiffusion gemäß Model Code Service Life Design (MC SLD) [5] angenommene kontinuierliche Abnahme des Chloriddiffusionskoeffizienten mit zunehmendem Betonalter bzw. zunehmender Beaufschlagungszeit wurde mit den Versuchsergebnissen nur teilweise bestätigt.

Mithilfe der Zusammenhänge aus dem MC SLD [5] wurden zudem die Ergebnisse der Chloridmigrationsversuche zu scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten umgerechnet und mit den experimentell bestimmten scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten verglichen, um die Übertragbarkeit der Prüfmethoden zu beurteilen. Bei der Verwendung von Literaturwerten für die Altersexponenten ergab sich über alle untersuchten Betone betrachtet ein Bestimmtheitsmaß von 0,83 für die Übereinstimmung zwischen rechnerisch und experimentell bestimmten Chloriddiffusionskoeffizienten. Wurde der Altersexponent zuvor aus den Chloriddiffusionsversuchen mit unterschiedlicher Beaufschlagungszeit abgeleitet, konnte das Bestimmtheitsmaß auf 0,89 erhöht werden.

Mit probabilistischen Lebensdauerberechnungen wurde aufbauend auf den Versuchsergebnissen die Leistungsfähigkeit der Betone bei der Verwendung in Stahlbetonbauteilen mit für Deutschland typischen Umgebungsbedingungen untersucht. Für die betrachteten Grenzzustände „Depassivierung der Bewehrung infolge Carbonatisierung“ und „Erreichen des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung“ wurde für die untersuchten Betone die jeweilige Entwicklung des Zuverlässigkeitsindex über der Zeit ausgewertet und daraus eine rechnerische Lebensdauer abgeleitet.

Die Untersuchungen zum Grenzzustand „Depassivierung der Bewehrung infolge Carbonatisierung“ zeigten, dass bei den gewählten Randbedingungen mit den Betonen B1-Z1, B1-Z2 und B1-Z5 hohe rechnerische Lebensdauern von über 90 Jahren erreicht werden können. Für die weiteren untersuchten Betone, d. h. B0-Z1, B0-Z2, B1-Z3 und B1-Z4 waren die rechnerischen Lebensdauern (Zeitspanne bis zur Depassivierung der Bewehrung) geringer als die in der Regel für Stahlbetonbauwerke geforderte Mindestnutzungsdauer von 50 Jahren. Da in den Berechnungen nur die Einleitungsphase der Bewehrungskorrosion betrachtet wurde, bedeuten diese Ergebnisse nicht zwangsläufig, dass innerhalb von kurzer Zeit nach dem Überschreiten der rechnerischen Lebensdauer mit Korrosionsschäden zu rechnen ist. Dennoch bestätigen die Berechnungsergebnisse die bereits anhand der Carbonatisierungsversuche festgestellten geringeren Carbonatisierungswiderstände der Betone B1-Z3 und B1-Z4 trotz im Vergleich zur Grenzzusammensetzung für die Expositionsklasse XC3 optimierter Zusammensetzung (geringerer w/z-Wert, höherer Zementgehalt). Um trotzdem den Einsatz der Zemente Z3 und Z4 in der Expositionsklasse XC3 zu ermöglichen, müsste daher überprüft werden, ob der Carbonatisierungswiderstand durch eine weitere betontechnologische Optimierung auf das geforderte Niveau gesteigert werden kann. Alternativ wäre die Betondeckung zu erhöhen. Beide Maßnahmen ließen sich auch kombinieren.

In den Untersuchungen zum Grenzzustand „Erreichen des kritischen korrosionsauslösenden Chloridgehalts auf Höhe der Bewehrung“ ergaben sich für die Betone B1-Z1, B1-Z6 und B1-Z7 deutlich geringere rechnerische Lebensdauern als für die Betone B1-Z2, B1-Z3 und B1-Z4. Es zeigte sich somit eine direkte Übertragung der Gruppierung der Chloridmigrationskoeffizienten auf die rechnerischen Lebensdauern. Für die Betone B1-Z2, B1-Z3 und B1-Z4 wurden rechnerische Lebensdauern von deutlich über 50 Jahren, für den Beton B1-Z2 sogar von über 100 Jahren bestimmt. Die Betone B1-Z1, B1-Z6 und B1-Z7 erreichten dagegen nur rechnerische Lebensdauern von weniger als 10 Jahren, sodass bei Verwendung dieser Betone innerhalb einer Nutzungsdauer von 50 Jahren mit einer Depassivierung der Bewehrung und ggf. auch mit dem Auftreten von Korrosionsschäden zu rechnen wäre. Durch eine Variation der Berechnungsparameter konnte ein deutlicher Einfluss des Altersexponenten auf den berechneten Zuverlässigkeitsindex bzw. die rechnerische Lebensdauer aufgezeigt werden. Insbesondere bei der Verwendung neuer Zementarten sollte die Wahl dieses Parameters daher basierend auf experimentellen Untersuchungen erfolgen, um in den Lebensdauerberechnungen belastbare Ergebnisse erzielen zu können.

Die Untersuchungsergebnisse haben gezeigt, dass für die Beurteilung der Leistungsfähigkeit von Betonen mit (teilweise) neuen Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen eine differenzierte Betrachtung je nach Einwirkung bzw. Expositionsklasse sinnvoll ist. Hierdurch können gezielt geeignete Zemente bzw. Betone für bestimmte Anwendungsbereiche ausgewählt werden.

Weiterer Untersuchungsbedarf besteht insbesondere hinsichtlich der Zusammenhänge zwischen der Zementzusammensetzung und betontechnologischen Parametern wie dem Wasserzementwert und dem Zementgehalt. Eine genauere Beschreibung dieser Zusammenhänge würde Möglichkeiten bieten, konkrete Randbedingungen für die Anwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen unter Einhaltung eines spezifischen Dauerhaftigkeitsniveaus zu formulieren.

Parallel dazu sollte eine Weiterentwicklung der Berechnungsmodelle und der Definition der benötigten Berechnungsparameter, die den probabilistischen Lebensdauerberechnungen zugrunde liegen, verfolgt werden, um die Verlässlichkeit der Berechnungsergebnisse weiter zu verbessern. Ansatzpunkte liegen hier zum einen in der Überprüfung und Weiterentwicklung der Übertragbarkeit der durch beschleunigte Prüfverfahren gemäß MC SLD bestimmten Materialparameter auf natürliche Bedingungen, insbesondere für Betonzusammensetzungen mit Zementen ohne ausreichende Praxiserprobung. In den Untersuchungen wurde deutlich, dass die Umrechnung der Materialparameter gemäß MC SLD nicht in allen Fällen eine gute Übereinstimmung mit den unter natürlichen Bedingungen bestimmten Materialparametern ergibt. Besonders die Bestimmung des Altersexponenten für die Modellierung des Chlorideindringens war auf Basis der durchgeführten Untersuchungen nur schlecht möglich. Da dieser Parameter das Ergebnis der probabilistischen Lebensdauerberechnungen sehr stark beeinflusst, besteht diesbezüglich in den Modellen und Prüfverfahren nennenswerter Weiterentwicklungsbedarf. Des Weiteren gelten die bestehenden Modelle ausschließlich für ungerissenen Beton. Risse, die in Stahlbetonbauteilen planmäßig auftreten, beeinflussen den Transport von Gasen und Flüssigkeiten im Beton und damit den Zeitpunkt der Depassivierung der Bewehrung infolge Carbonatisierung oder Chlorideindringens. Durch die Erweiterung der Modelle auf gerissenen Beton könnte die Prognosegenauigkeit der Lebensdauerberechnungen verbessert werden. Eine weitere Verbesserung könnte durch die Berücksichtigung der Schädigungsphase der Korrosion in den Lebensdauerberechnungen erzielt werden.

5 Literatur

- [1] DIN EN 1992-1-1 – Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010
- [2] DIN EN 1992-1-1/NA: Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau
- [3] DIN 1045-2, *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität - Anwendungsregeln zu DIN EN 206*, Ausgabe 2008-08
- [4] DIN EN 206, *Beton: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*, Deutsche Fassung 2001-07 mit DIN EN 206-1/A1:2004-10 und DIN EN 206-1/A2:2005-09
- [5] International Federation for Structural Concrete (fib): *Model Code for Service Life Design*, fib Bulletin 34, 2006
- [6] CEN/TC 104: Technical Report CEN/TR 16563:2013, *Principles of the equivalent durability procedure*
- [7] prEN 12390-10, *Testing hardened concrete – Part 10: Determination of the carbonation resistance of concrete at atmospheric levels of carbon dioxide*; English Version prEN 12390-10:2015
- [8] Bundesanstalt für Wasserbau (Hrsg.): *Chlorideindringwiderstand von Beton*, BAW-Merkblatt, Ausgabe 2012, abrufbar unter http://vzb.baw.de/publikationen/merkblaetter/0/BAWMerkblatt_Chlorideindringwiderstand_MCL_2012_k.pdf
- [9] DIN EN 12390-11, *Prüfung von Festbeton – Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton – Einseitig gerichtete Diffusion*; Deutsche Fassung EN 12390-11:2015
- [10] von Greve-Dierfeld, S.: *Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit XC-exponierter Stahlbetonbauteile*. Dissertation, Technische Universität München, 2015
- [11] Gehlen, C. 2000: *Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 510, Beuth, Berlin, 2000
- [12] Wiens, U.: *Zur Wirkung von Steinkohlenflugasche auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton*. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton, Heft 551. Beuth, Berlin, 2005
- [13] Kapteina, G.: *Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Verkehrsbauwerken*. Dissertation, Technische Universität München, 2011
- [14] Rahimi, A.: *Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung*; Dissertation, Technische Universität München, 2016

- [15] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb): *Positionspapier des DAfStb zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J*. In: Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 12
- [16] Brodersen, H.A.: *Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton von Struktur und Zusammensetzung des Zementsteins*. Dissertation, RWTH Aachen, 1982
- [17] Efes, Y.: Einfluß der Zemente mit unterschiedlichem Hüttensandgehalt auf die Chlорiddiffusion im Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik 46 (1980), Heft 4-6
- [18] Yeau, K. Y., Kim, E. K.: *An experimental study on corrosion resistance of concrete with ground granulated blast-furnace slag*. In: Cement and Concrete Research, 35(7), pp. 1391-1399, 2005
- [19] Thomas, M. D., Scott, A., Bremner, T., Bilodeau, A., Day, D.: *Performance of slag concrete in marine environment*. In: ACI Materials Journal, 105(6), pp. 628-634, 2008

6 Anhang

A Frisch- und Festbetoneigenschaften der untersuchten Betone

Tabelle A-1 Druckfestigkeit der untersuchten Betone

Beton	Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen in MPa			
	Prüfkörper 1	Prüfkörper 2	Prüfkörper 3	Mittelwert
B0-Z1	38,7	39,3	38,5	38,9
B0-Z2	42,2	42,3	42,2	42,3
B1-Z1	61,9	61,4	61,2	61,5
B1-Z2	61,8	60,6	64,0	62,1
B1-Z3	49,9	50,1	49,6	49,9
B1-Z4	33,8	33,5	34,4	33,9
B1-Z5	52,8	54,6	53,1	53,5
B1-Z6	56,2	55,5	54,6	55,5
B1-Z7	49,6	50,3	49,3	49,7

Tabelle A-2 Frischbetoneigenschaften der untersuchten Betone

Beton	Ausbreitmaß in mm	Luftgehalt im Vol.-%	Frischbetonrohddichte in kg/m ³
B0-Z1	505	1,0	2370
B0-Z2	430	1,1	2350
B1-Z1	390	1,3	2390
B1-Z2	n. b.	1,4	2370
B1-Z3	370	1,5	2400
B1-Z4	570	n. b.	n. b.
B1-Z5	460	2,5	2350
B1-Z6	370	0,8	2410
B1-Z7	365	0,8	2400
n. b. = nicht bestimmt			

B Ergebnisse der Carbonatisierungsversuche

Tabelle B-1 Ergebnisse der Carbonatisierungsversuche an Beton bei natürlicher CO₂-Konzentration (Verfahren CarboB)

Betonalter in Tagen	Carbonatisierungstiefe in mm (Mittelwert der vier Probekörperseiten)						
	B0-Z1	B0-Z2	B1-Z1	B1-Z2	B1-Z3	B1-Z4	B1-Z5
14	0,10	0,30	0,00	0,00	0,30	1,10	0,60
	0,00	0,40	0,00	0,00	0,30	0,90	0,60
	0,00	0,40	0,00	0,00	0,30	1,10	0,60
28	0,90	1,50	0,00	0,10	2,30	3,40	1,03
	0,90	1,50	0,00	0,40	2,00	3,40	1,03
	0,90	1,50	0,00	0,40	2,00	3,30	1,03
56	1,50	3,10	0,10	1,00	3,00	5,50	1,58
	1,50	3,10	0,10	1,10	3,00	5,30	1,58
	1,60	2,90	0,10	1,30	3,10	5,10	1,58
91	1,60	3,00	0,80	1,40	4,80	6,40	2,07
	1,60	3,40	0,90	1,30	4,90	6,60	2,07
	1,80	3,10	0,90	1,30	4,30	6,50	2,07
182	2,40	4,00	0,90	0,60	5,90	8,80	2,98
	2,60	3,90	0,60	0,60	5,50	8,40	2,98
	2,60	3,90	0,80	0,60	5,40	8,80	2,98
364	4,30	5,10	1,00	1,30	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾
	4,00	5,60	1,30	1,50	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾
	4,00	5,30	1,10	1,90	- ¹⁾	- ¹⁾	- ¹⁾
¹⁾ Messtermin nach Ende der Projektlaufzeit							

Tabelle B-2 Ergebnisse der Carbonatisierungsversuche an Feinbetonen mit Zusammensetzung gemäß CEN/TR 16563:2013 [6] (Verfahren CarboFB, Feinbetone FB-Z1 und FB-Z2)

Zeit nach Ende Was- serlagerung in Tagen	Carbonatisierungstiefe in mm (Mittelwert der vier Probekörperseiten)			
	FB-Z1 CarboFB-7d	FB-Z1 CarboFB-28d	FB-Z2 CarboFB-7d	FB-Z2 CarboFB-28d
14	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
28	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,00	0,00
	0,00	0,00	0,10	0,00
56	0,10	0,30	0,10	0,50
	0,10	0,10	0,40	0,40
	0,10	0,10	0,50	0,50
98	0,90	0,40	1,60	1,30
	1,00	0,30	1,50	1,00
	0,90	0,30	1,50	1,00
140	1,10	0,40	2,40	1,00
	1,10	0,50	2,30	1,00
	1,00	0,30	2,30	1,10
	1,30	-	2,30	0,80
	1,10	-	2,00	1,10
	1,00	-	2,30	0,90

Tabelle B-3 Ergebnisse der Carbonatisierungsversuche an Feinbetonen mit Zusammensetzung gemäß CEN/TR 16563:2013 [6] (Verfahren CarboFB, Feinbetone FB-Z3 und FB-Z4)

Zeit nach Ende Was- serlagerung in Tagen	Carbonatisierungstiefe in mm (Mittelwert der vier Probekörperseiten)			
	FB-Z3 CarboFB-7d	FB-Z3 CarboFB-28d	FB-Z4 CarboFB-7d	FB-Z4 CarboFB-28d
14	0,10	0,10	0,90	1,50
	0,10	0,50	1,00	1,30
	0,10	0,30	1,00	1,30
28	1,40	0,50	3,30	2,30
	1,30	0,50	3,30	1,60
	0,90	0,60	2,50	1,90
56	1,40	0,80	4,50	2,30
	1,40	0,80	4,90	2,60
	1,00	0,80	4,40	2,60
98	2,80	0,90	5,50	3,00
	2,90	1,10	5,60	3,30
	2,90	1,30	5,50	3,10
140	2,90	2,10	6,50	4,40
	3,10	1,80	6,40	4,10
	3,80	1,90	6,50	4,00
	3,10	1,90	6,30	4,80
	3,60	2,00	7,10	5,10
	3,80	1,80	5,60	5,10
365	5,30	3,80	11,10	7,90
	6,00	3,40	10,50	8,30
	5,50	4,10	11,00	9,50

Tabelle B-4 Ergebnisse der Carbonatisierungsversuche an Feinbetonen mit modifizierter Zusammensetzung (Verfahren CarboFB-mod, Feinbetone B0(8)-Z1 und B0(8)-Z2)

Zeit nach Ende Was- serlagerung in Tagen	Carbonatisierungstiefe in mm (Mittelwert der vier Probekörperseiten)			
	B0(8)-Z1 CarboFB-mod-7d	B0(8)-Z1 CarboFB-mod-28d	B0(8)-Z2 CarboFB-mod-7d	B0(8)-Z2 CarboFB-mod-28d
14	0,00	0,00	0,80	0,90
	0,10	0,00	0,50	0,80
	0,10	0,10	0,10	0,90
28	0,30	0,30	1,90	0,40
	0,50	0,10	1,90	0,30
	0,40	0,10	1,90	0,80
56	1,00	0,40	3,50	1,90
	1,10	0,30	3,00	1,80
	1,00	0,10	2,90	1,60
98	1,80	0,40	3,40	2,00
	1,80	0,90	2,40	2,00
	1,60	0,50	2,60	2,30
140	2,30	0,90	4,10	1,60
	2,00	1,40	3,50	1,60
	2,30	0,90	4,00	2,00
	1,90	0,40	3,60	2,00
	1,90	0,50	3,60	1,90
	1,60	0,90	4,00	1,50
365	3,60	1,30	5,40	4,60
	3,50	1,90	6,10	4,50
	3,40	1,40	5,90	4,60
728	5,40	2,60	8,00	7,60
	5,50	3,00	8,00	5,30
	5,30	2,60	8,10	7,30

Tabelle B-5 Ergebnisse der Carbonatisierungsversuche an Feinbetonen mit modifizierter Zusammensetzung (Verfahren CarboFB-mod, Feinbetone B1(8)-Z1 und B1(8)-Z2)

Zeit nach Ende Was- serlagerung in Tagen	Carbonatisierungstiefe in mm (Mittelwert der vier Probekörperseiten)			
	B1(8)-Z1 CarboFB-mod-7d	B1(8)-Z1 CarboFB-mod-28d	B1(8)-Z2 CarboFB-mod-7d	B1(8)-Z2 CarboFB-mod-28d
14	0,00	0,00	0,00	0,10
	0,00	0,00	0,10	0,10
	0,00	0,00	0,10	0,10
28	0,00	0,00	0,00	0,10
	0,00	0,10	0,10	0,10
	0,00	0,10	0,30	0,10
56	0,00	0,10	0,00	0,40
	0,10	0,10	0,40	0,10
	0,10	0,00	0,00	0,30
98	0,60	0,00	1,30	0,50
	0,60	0,00	1,50	0,50
	0,50	0,00	1,10	0,00
140	0,30	0,30	1,50	0,40
	0,10	0,60	1,10	0,80
	0,40	0,40	1,30	0,50
	0,40	0,60	1,40	0,00
	0,30	0,60	1,30	0,40
	0,40	0,50	1,40	0,40
365	1,40	0,80	2,80	1,40
	1,00	0,80	1,90	1,30
	1,40	0,80	2,60	1,10
728	2,40	1,00	3,80	2,30
	2,40	1,10	3,60	2,50
	2,40	1,10	3,60	2,40

C Ergebnisse der Versuche zum Chlorideindringen

Tabelle C-1 Ergebnisse der Chloridmigrationsversuche

Beton	Alter bei Beginn der Prüfung [d]	Chlorideindringtiefe [mm]	Versuchsdauer [s]	Chloridmigrationskoeffizient [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]
B1-Z1	35	16,2	29400	18,2
		15,7	29400	18,4
		18,1	29400	17,3
	98	9,4	29100	18,6
		10,5	29100	17,9
		10,8	29100	18,9
B1-Z2	35	14,6	174300	3,4
		14,8	174300	3,3
		14,0	174300	3,8
	98	18,6	120600	2,7
		17,9	120600	3,1
		18,9	120600	3,2
B1-Z3	35	14,20	86400	6,0
		13,60	86400	5,7
		12,20	86400	5,0
	98	13,70	105000	4,6
		17,60	105000	6,1
		13,00	105000	4,4
B1-Z4	35	14,30	86400	6,0
		12,60	86400	5,2
		10,10	86400	4,1
	98	14,30	182400	2,8
		16,10	182400	3,2
		16,30	182400	3,3
B1-Z6	35	21,60	28800	28,0
		19,50	28800	25,0
		19,90	28800	25,5
	98	18,50	28800	23,9
		19,70	28800	25,5
		17,80	28800	22,9
B1-Z7	35	23,00	28800	29,7
		25,40	28800	33,0
		22,90	28800	29,5
	98	21,50	28800	28,1
		21,80	28800	28,4
		21,80	28800	28,4

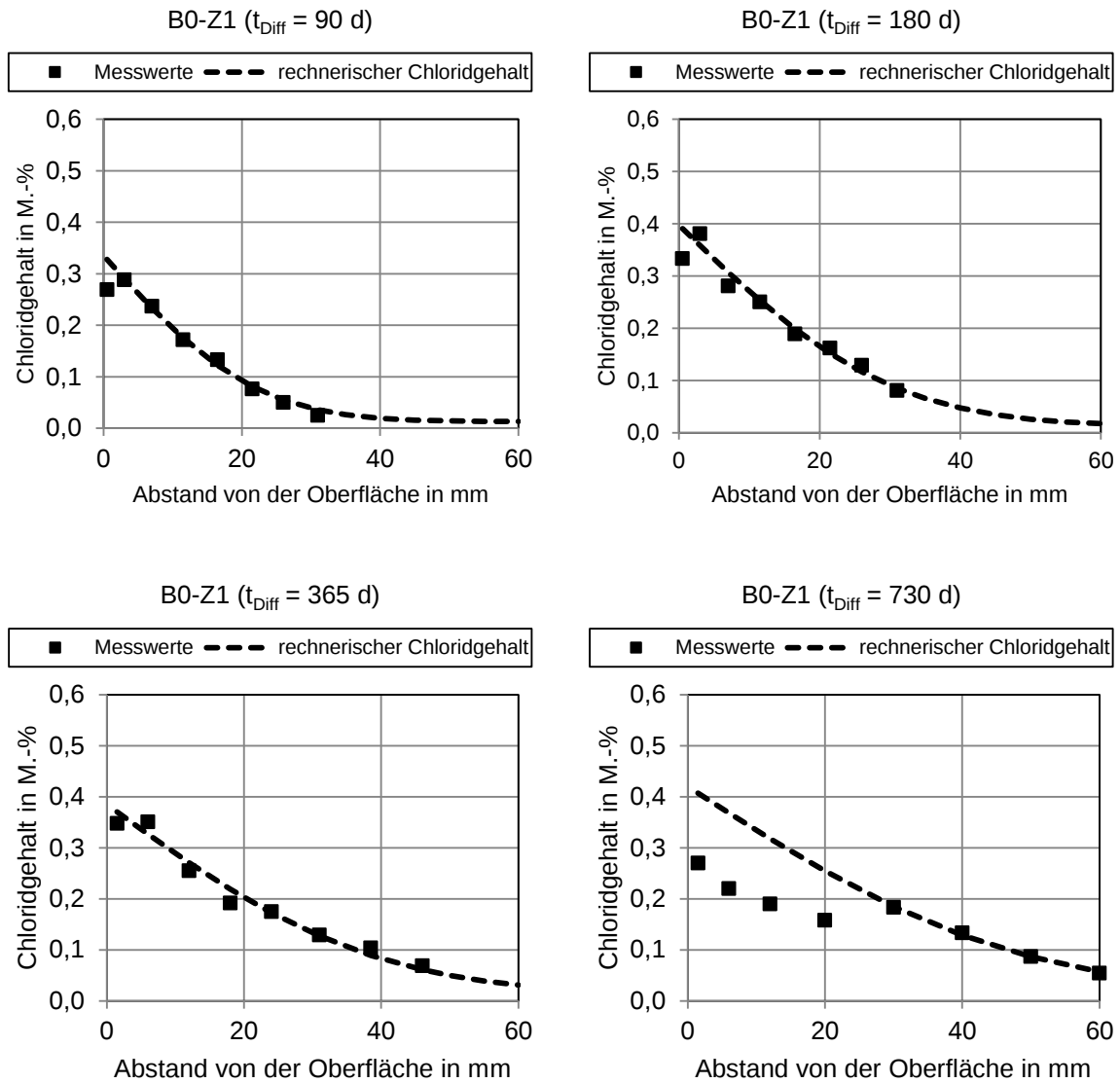
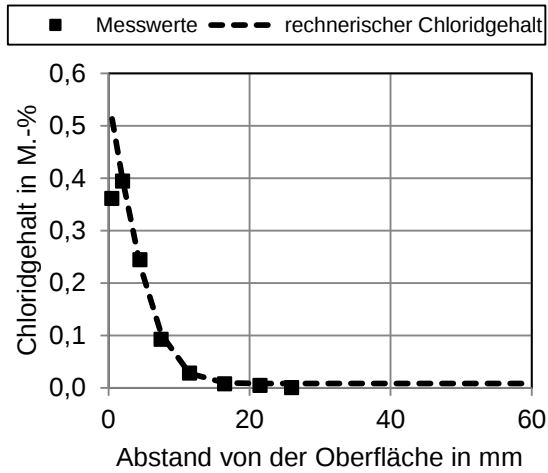
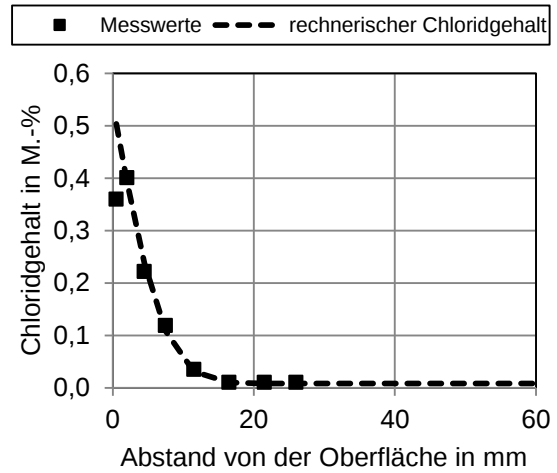


Bild C-6 Für den Beton B0-Z1 ermittelte Chloridprofile nach einer Diffusionsdauer von 90 d, 180 d, 365 d und 730 d

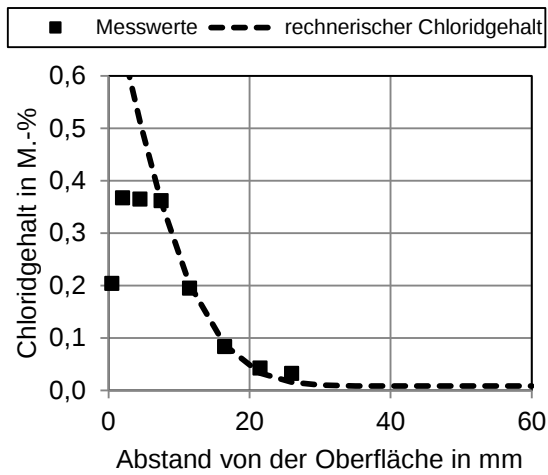
B0-Z2 ($t_{\text{Diff}} = 90 \text{ d}$, 1. Messung)



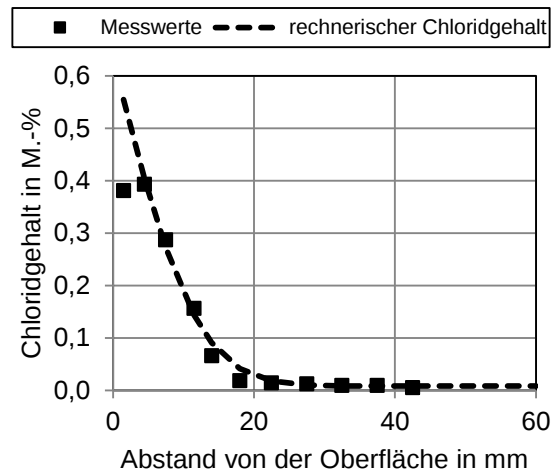
B0-Z2 ($t_{\text{Diff}} = 90 \text{ d}$, 2. Messung)



B0-Z2 ($t_{\text{Diff}} = 180 \text{ d}$)



B0-Z2 ($t_{\text{Diff}} = 365 \text{ d}$)



B0-Z2 ($t_{\text{Diff}} = 730 \text{ d}$)

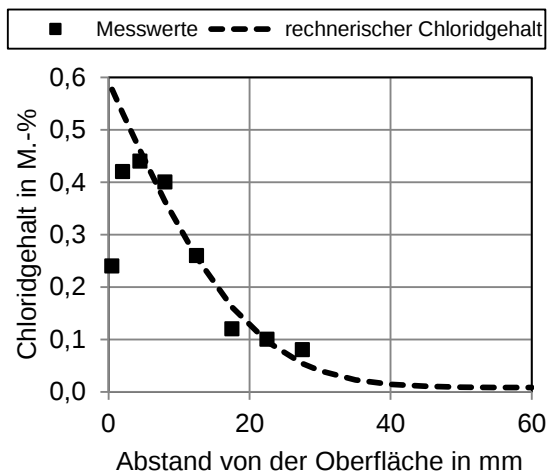


Bild C-7 Für den Beton B0-Z2 ermittelte Chloridprofile nach einer Diffusionsdauer von 90 d, 180 d, 365 d und 730 d

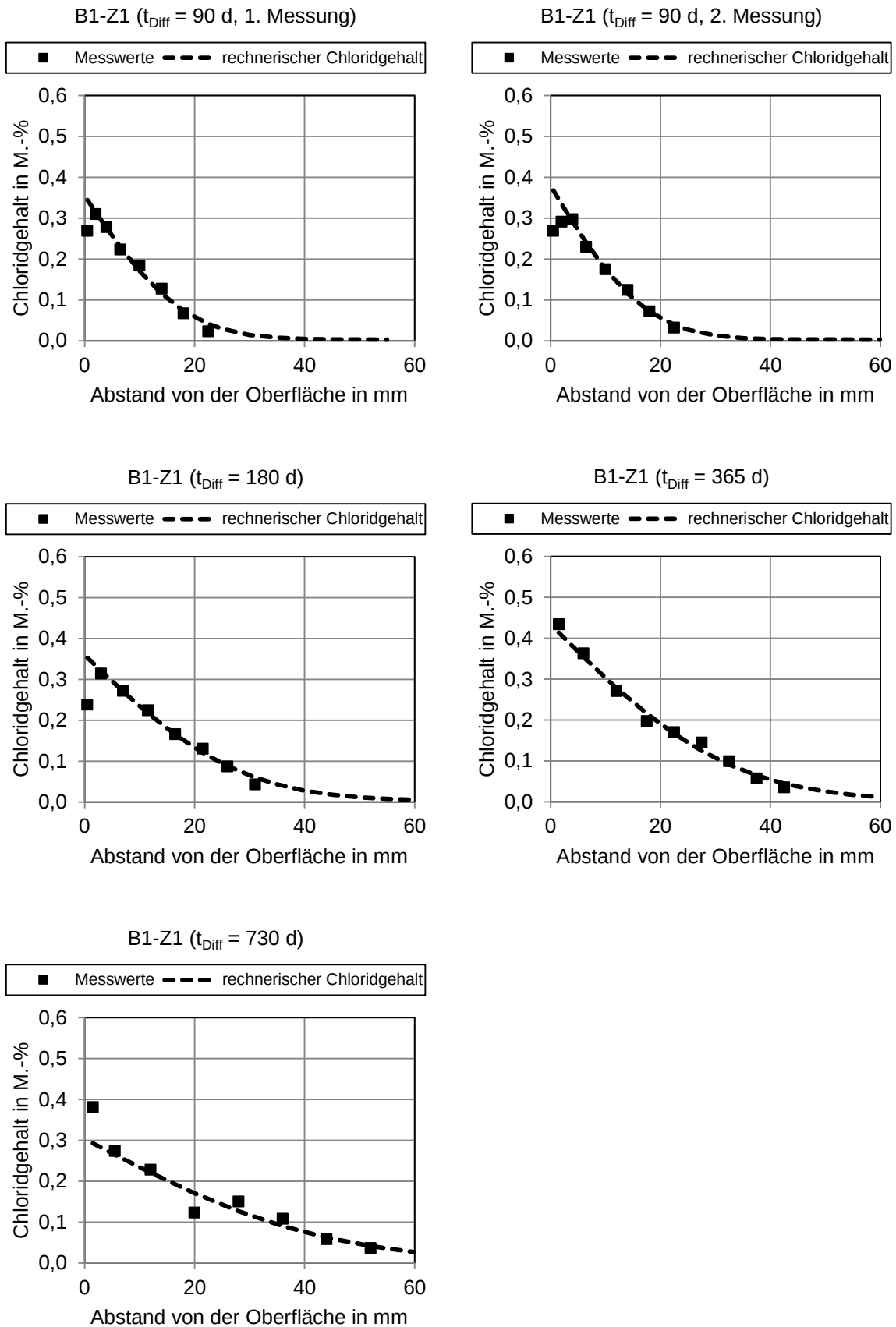


Bild C-8 Für den Beton B1-Z1 ermittelte Chloridprofile nach einer Diffusionsdauer von 90 d, 180 d, 365 d und 730 d

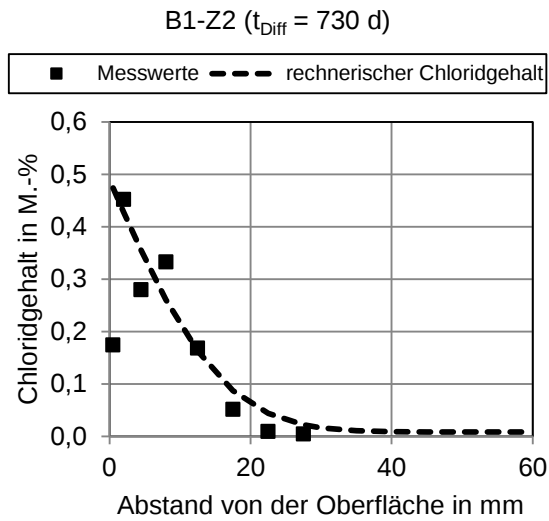
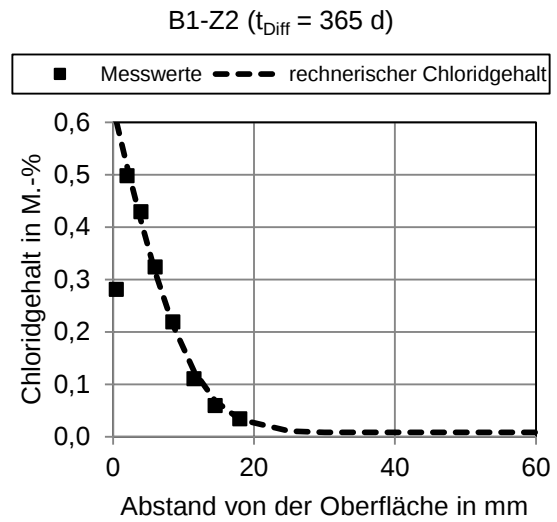
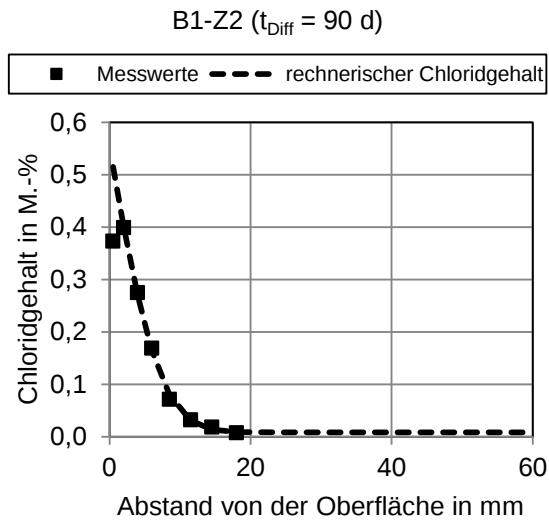


Bild C-9 Für den Beton B1-Z2 ermittelte Chloridprofile nach einer Diffusionsdauer von 90 d, 365 d und 730 d

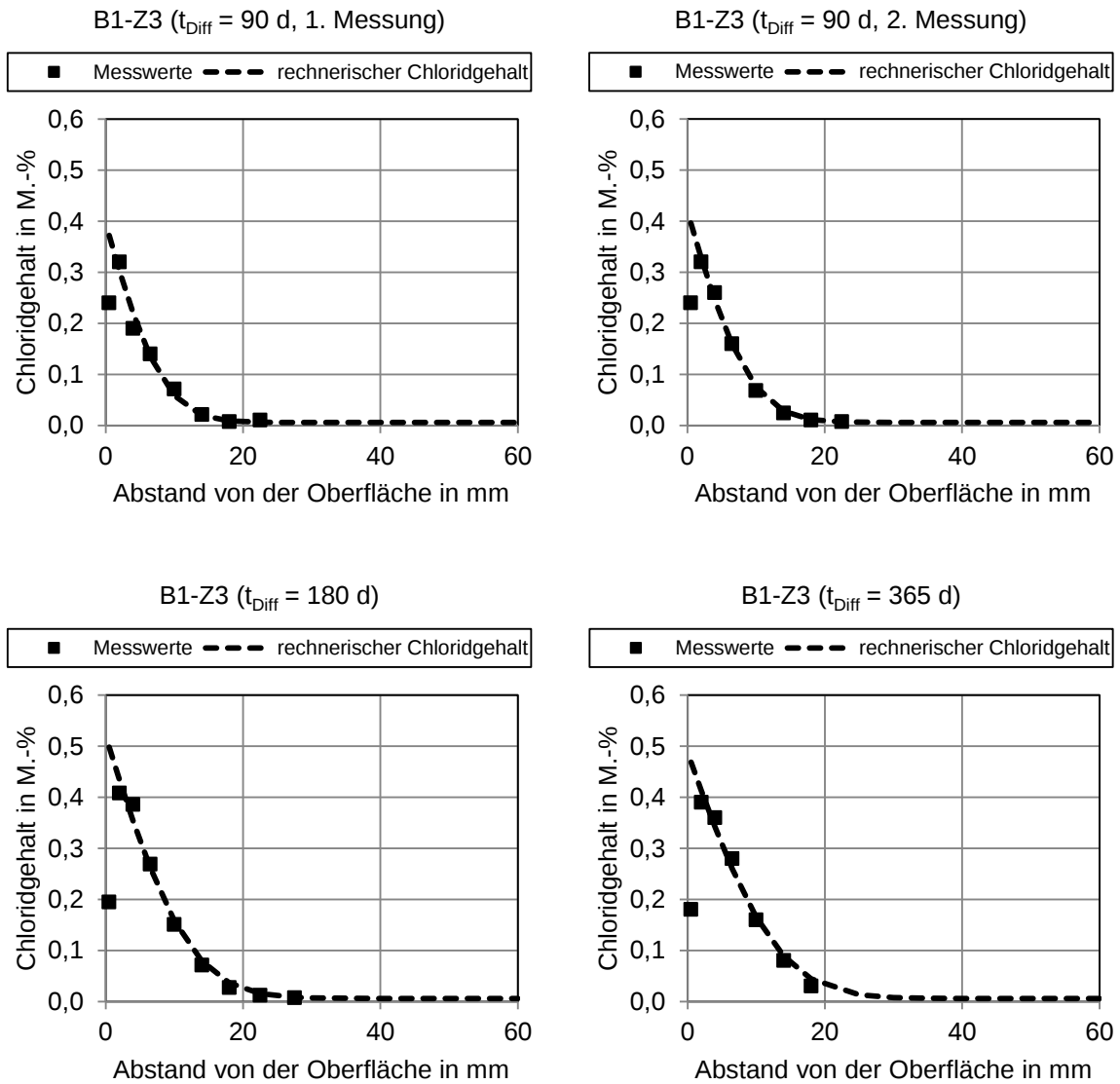


Bild C-10 Für den Beton B1-Z3 ermittelte Chloridprofile nach einer Diffusionsdauer von 90 d, 180 d und 365 d

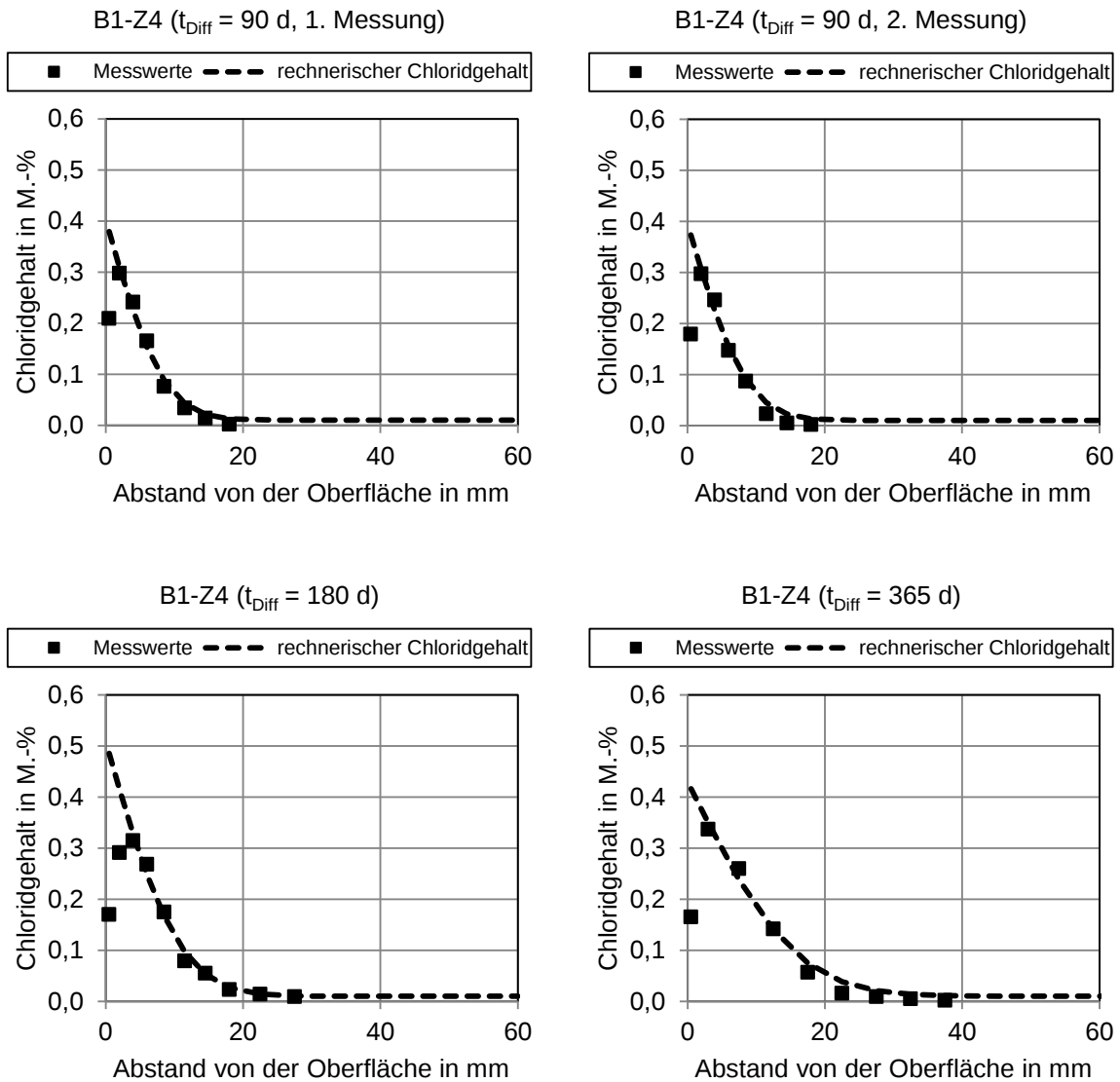


Bild C-11 Für den Beton B1-Z4 ermittelte Chloridprofile nach einer Diffusionsdauer von 90 d, 180 d und 365 d

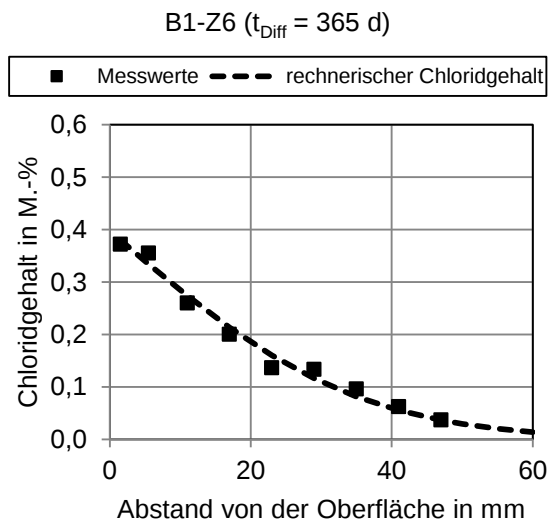
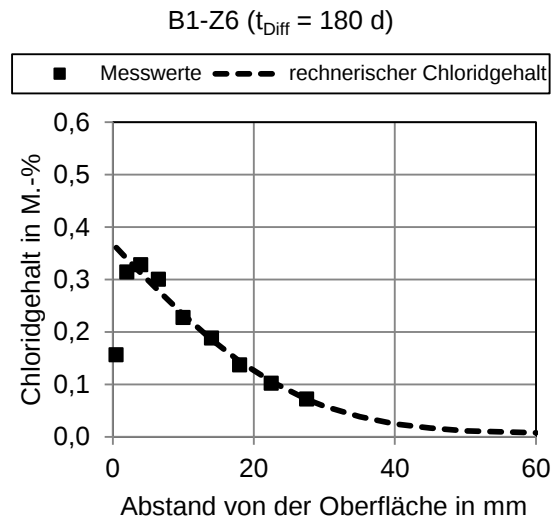
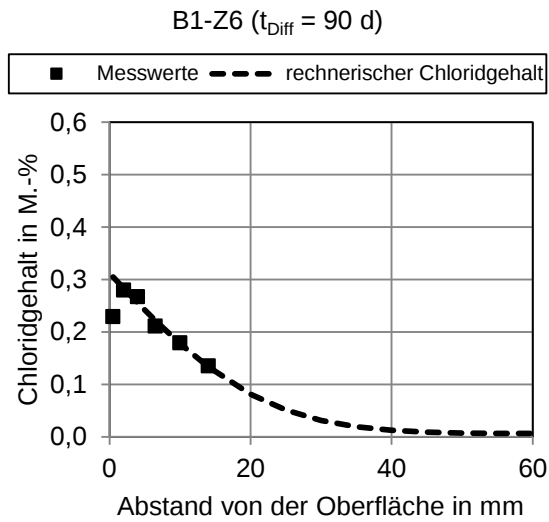


Bild C-12 Für den Beton B1-Z6 ermittelte Chloridprofile nach einer Diffusionsdauer von 90 d, 180 d und 365 d

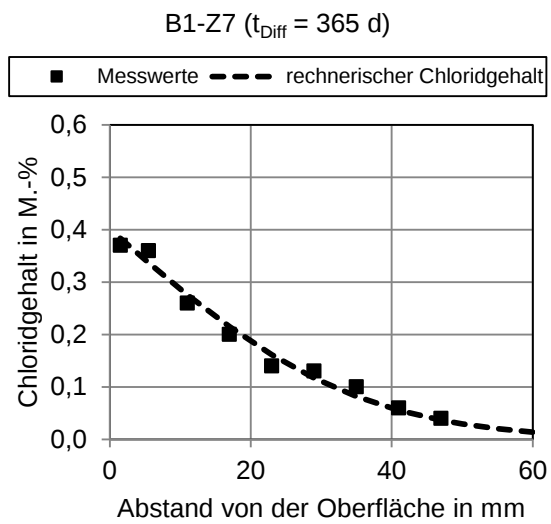
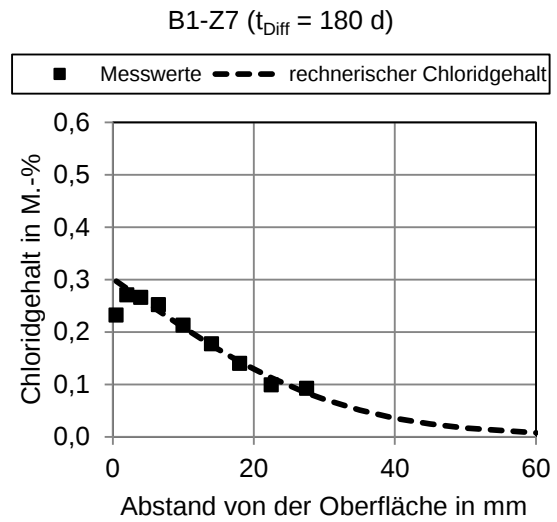
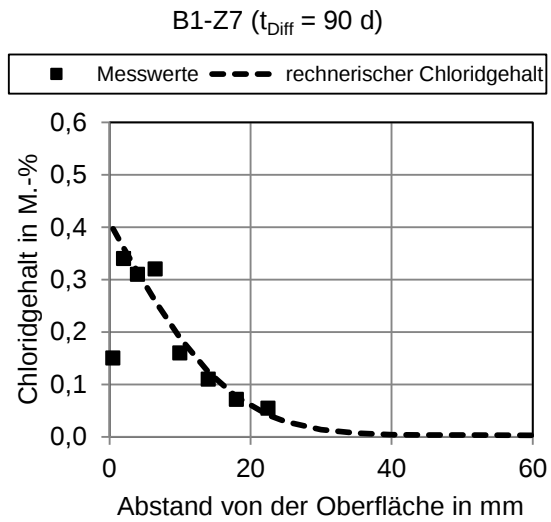


Bild C-13 Für den Beton B1-Z7 ermittelte Chloridprofile nach einer Diffusionsdauer von 90 d, 180 d und 365 d