

Klassifizierung nachhaltiger Betone in ERC nach EC2 (EN1992-1-1) Referenzverfahren und Korrelation mit SIA262/1

Dr.-Ing. Stefanie von Greve-Dierfeld
TGB AG

Dr. Christian Paglia
SUPSI

Forschungsprojekt Cemsuisse Projekt Nr. 202304

April 2025

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	3
1 Hintergrund	6
1.1 ERC und Schweizer Dauerhaftigkeitsanforderungen	6
1.1.1 ERC-Klassen nach BD zur prEN1992-1-1	6
1.1.2 Schweizer Dauerhaftigkeitsanforderungen	13
1.1.3 Vorteile des ERC-Konzepts in prEN1992-1-1	16
1.1.4 Stand der Umsetzung des ERC-Konzepts in CEN-Mitgliedsstaaten	17
1.2 Leistungsnachweis	18
1.3 Leistungsindikatoren	19
2 Untersuchungsmatrix	22
2.1 Betonzusammensetzung	22
2.1.1 Gesteinskörnung	22
2.1.2 Zement	23
2.1.3 Mischungsmatrix und Betonherstellung	23
2.1.4 GWP der Mischungen	26
2.1.5 Leistungsindikatoren	27
2.2 Aufteilung der durchgeführten Prüfungen	30
3 Resultate	31
3.1 Druckfestigkeitsentwicklung	31
3.2 Karbonatisierungswiderstand	35
3.2.1 Beschreibung der Normprüfungen	35
3.2.2 SIA 262/1 Annex I	36
3.2.3 EN 12390-10 Chamber vs. SIA 262/1 Anhang I	40
3.2.4 EN 12390-12 vs. SIA 161/1 Anhang I	41
3.3 Chloridwiderstand	43
3.3.1 Beschreibung der angewendeten Normprüfungen	43
3.3.2 SIA 262/1 Annex B	45
3.3.3 EN 12390-11 vs. SIA 262/1 Annex B	47
4 Korrelationen	54
4.1 Karbonatisierungswiderstand vs. w/CaO	54
4.2 Chloridwiderstand vs. w/SiO ₂ , w/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃)	55
4.3 Karbonatisierungs- und Chloridwiderstand vs. f _c	59
4.4 Karbonatisierung vs. Chloridwiderstand	60
5 Klassifizierung von Beton	62
5.1 Klassifizierung in XRC-Klassen	62
5.2 Klassifizierung in XRDS-Klassen	67
5.3 Sorten ohne Grenzwert – Vorschlag für KW und CW	71
5.4 Überlegung zu Expositionsclassen	72
6 Zusammenfassung	74
6.1 Verhalten nachhaltiger Betone	74
6.2 Korrelation der natürlichen Prüfungen mit SIA 262/1 Schnellprüfungen	74
6.3 ERC-Klassifizierung und Grenzwerte	74
7 Weiter Forschungsbedarf	77
Literaturverzeichnis	78

Zusammenfassung

Problemstellung

Mit dem Ziel die Hürden zum Einsatz nachhaltiger Bindemittel, Betone und Betonkonstruktionen zu verringern, wird in Zukunft auch in prEN 1992-1-1 [1] ein leistungsbezogenes Konzept zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Stahlbetonkonstruktionen eingeführt. In prEN 1992-1-1 [1] darf beispielsweise bei einer Überdeckung von minimal 20 mm die Karbonatisierungsrate in der Expositionsklasse XC3 4 mm/Jahr^{0.5} mit 90-prozentiger Wahrscheinlichkeit nicht übersteigen und der Chloriddiffusionskoeffizient in der Expositionsklasse XD3 darf $1 \cdot 10^{-13}$ m²/s mit 90-prozentiger Wahrscheinlichkeit nicht übersteigen. Diese Grenzwerte für den Materialwiderstand heissen Expositions-Widerstandsklassen (ERC = Exposure Resistance Class).

Die Klassifizierung von Betonen in ERC erfolgt mit Referenzprüfverfahren (EN 12390-10 [2], EN12390-11 [3]). Für beide Prüfnormen gibt es derzeit nur wenig Erfahrungswerte. Es ist unbekannt mit welchen Resultaten bei bestimmten Betonsorten gerechnet werden muss. Es existiert bisher keine Korrelation zwischen Prüfung nach SIA 262/1 [4] und EN-Referenzverfahren. Deshalb ist bisher auch unbekannt, welche ERC-Klassen unsere Betonsorten nach SN EN 206 [5] abdecken werden.

Lösungsansatz

Innerhalb üblicher Betonsorten (A, B, C, D und F) werden Betone mit hohen, mittleren und niedrigen zu erwartenden Widerständen und langsamer sowie schneller Erhärtung hergestellt und nach SIA- und EN-Referenzverfahren geprüft. Die Prüfung erfolgt vergleichend in zwei verschiedenen Laboren.

Mit den im Projekt 201903 vorgeschlagenen Untersuchungen werden folgende Projektziele anvisiert:

- Korrelation zwischen SIA- und EN-Referenzverfahren
- Korrelation mit Leistungsindikatoren
- Klassifizierung von Beton in ERC mit den Zielen (a) Klassen die mit den üblichen, bereits im Portfolio der Betonhersteller befindlichen Betone der Sorten A, B, C, D und F korrelieren (b) Klassen, die mit KW und CW korrelieren (c) Zuordnung von Leistungsindikatoren zu den Klassen (d) Zuordnung von GWP-Bereichen zu den Klassen
- Vergleich bzw. Ableitung von Überdeckungen in Abhängigkeit der ERC-Klassen
- Grenzwerte für Expositionsclassen ohne Dauerhaftigkeitsanforderungen

Resultate

Verhalten nachhaltiger Betone

Insgesamt weisen die klinkerärmeren nachhaltigeren Betone einen geringeren Karbonatisierungswiderstand auf, was auf die verringerte CO₂-Bindekapazität zurückgeführt werden kann. Nachhaltigen, klinkerärmeren Mischungen (CEM II/C-M bzw. CEM III/B) zeigen in der natürlichen Prüfung nach SN EN 12390-10 weit höhere Widerstände gegenüber Karbonatisierung als in der Schnellprüfung. Demgegenüber profitieren die klinkerreichen Betone weniger von einer natürlichen Prüfung. Recyciertes Feinmaterial als Zementersatz wird normativ als inerte Füller verstanden. Da insbesondere der SiO₂ Gehalt gegenüber einem sonst ähnlichen CEM II/B-M(T-LL) deutlich erhöht ist wurde angenommen, dass ggf. reaktives SiO₂ im recycierten Feinanteil vorhanden ist, was insbesondere durch die Resultate zum Chloridwiderstand zu bestätigen

scheinen. Für die Verifizierung wären weitere Untersuchungen erforderlich. Ein verminderter Widerstand durch erhöhte Porosität in Beton mit recyceltem Feinanteil, wie in [6] angegeben konnte nicht bestätigt werden. Ein Abfall der Dauerhaftigkeit bei RC-Beton konnte ebenfalls nicht festgestellt werden. Auch der RC-C25 Beton wies ähnliche Eigenschaften auf wie die Betone mit ähnlichem Klinkergehalt derselben Sorte. Das Verhalten der untersuchten Betone kann zufriedenstellend mit dem w/CaO beschrieben werden [7].

Im Falle Chlorideinwirkung weisen die nachhaltigeren Mischungen insbesondere in der natürlichen Diffusionsprüfung einen sehr viel höheren Chloridwiderstand auf, als die weniger nachhaltigen klinkerreichen Betone. Insbesondere das Langzeitverhalten wird positiv beeinflusst. Dies liegt in erster Linie daran, dass im Bindemittel Klinker durch Grossteiles puzzolanische und latent hydraulische SCM ersetzt werden. Diese Bindemittel weisen damit oft einen höheren SiO_2 und Al_2O_3 Gehalt auf, was wiederum zu höheren Anteilen an C-(A-)S-H und AFm führt. Höhere C-(A-)S-H und AFm Gehalte führen im Allgemeinen zu einer verbesserten Chloridbindefähigkeit. Auch eine voranschreitende Hydratation führt zu höheren Chloridwiderständen und verbessertem Langzeitverhalten. Der Chloridwiderstand von Beton kann näherungsweise mit dem w/SiO_2 bzw. präziser mit dem $w/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ beschrieben werden.

Korrelation der natürlichen Prüfungen mit SIA 262/1 Schnellprüfungen

Die natürliche Karbonatisierungsprüfung nach SN EN 12390-10 [2] führt zu ca. 0.9 x so hohen Karbonatisierungswiderständen als in der Schnellprüfung nach SIA 262/1 Anhang I [4]. Die längere Nachbehandlung und insbesondere die natürlichere etwas höhere relative Luftfeuchte, die noch während der Lagerung Nachhydratation zulassen kann, kann als ursächlich identifiziert werden. Unter Anderem aus diesen Gründen zeigen insbesondere die nachhaltigeren Mischungen mit vermutlich feinerer Porosität und langsamerer Hydratation höhere Widerstände in der natürlichen Prüfung als von der Schnellprüfung erwartet worden wäre. Die Korrelation wurde für 3 Tage nachbehandelte Proben nach SIA 262/1 Anhang I [4] durchgeführt.

Der Chloridwiderstand nach 90 Tagen Diffusion nach SN EN 12390-11 [3] ist ca. halb so hoch wie der Chloridwiderstand aus der Schnellprüfung nach SIA 262/1 Anhang B [4]. Auch hier profitieren die nachhaltigeren Mischungen durch den höheren Hydratationsgrad bei der natürlichen Prüfung sowie durch den verlängerten Zeithorizont, der für eine ggf. verstärkte, chemische Chloridbindung zur Verfügung steht. Je länger die Diffusionszeit ist, d.h., je länger die Auslagerungszeit ist, bis der Diffusionskoeffizient ermittelt wird, desto grösser ist die Differenz zwischen Chloriddiffusionskoeffizient und Chloridwiderstand nach SIA 262/1 Anhang B [4].

Klassifizierung:

Durch die Korrelation zwischen SIA-Schnellprüfungen mit EN-Referenzprüfungen konnten die ERC-Klassen mit Karbonatisierungs- bzw. Chloridwiderständen korreliert werden. Damit konnten die NPK-Sorten in ERC-Klassen klassifiziert werden. Entsprechend der Exposition (Karbonatisierung oder Chlorid) konnten Leistungsindikatoren identifiziert werden (Karbonatisierungskoeffizient, Chloridwiderstand, Altersexponent) und den Klassen hinzugefügt werden. Weitere Forschung ist hier noch erforderlich. Ebenfalls konnten erste Anhaltswerte für GWP den Klassen zugeordnet werden. Auch hier ist noch Forschungsbedarf gegeben. Die Schweizer Dauerhaftigkeitsanforderungen passen mit den ERC-Klassen überein. Die Überdeckungen können in bestimmten Expositionsklassen noch optimiert werden (z.B. XC4, XD2a).

Es ist anzumerken, dass die vorgeschlagenen Überdeckungen $c_{\text{min,dur}}$ darstellen. C_{nom} ergibt sich in der Schweiz auf der sicheren Seite liegend aus $c_{\text{min,dur}} + 10$ mm. Simultaner Karbonatisierungsfortschritt und Chlorideintrag sind gesondert zu betrachten.

Grenzwerte für Expositionsklassen ohne Dauerhaftigkeitsanforderungen:

Für die Expositionsklassen ohne Schweizer Dauerhaftigkeitsanforderungen (XC2, XD1, XD2a) wurden Grenzwerte gefunden. Bei Chlorid wären es Grenzwerte für die Expositionsklassen XD1/XD2a mit $CW \approx 20$. Das ist der Widerstand, der von Betonen der Sorte D gerade noch eingehalten wurde.

Für die Karbonatisierung in der XC2 Exposition wäre ein $KW \approx 10$ der Grenzwert, welcher durch Betone der Sorte A derzeit eingehalten wird. Ist Kalzium Auslaugen der massgebende die Korrosion auslösende Faktor, wäre der Grenzwert gemäss [cemsuisse 2020] der Auslaugwiderstand in der Schnellprüfung $L_{AC} < 50 \text{ mm/Jahr}^{0.5}$. Da die Korrelation zwischen Kalzium Auslaugen und Karbonatisierung aufgrund der Unterschiedlichen Auswirkung auf die Porosität von Beton in Abhängig der Zusammensetzung unterschiedlich ausfällt, lägen die mit dem Auslaugwiderstand korrelierenden Karbonatisierungswiderstände zwischen $7.8 \leq KW \leq 11.7 \text{ mm/Jahr}^{0.5}$.

Überlegungen zu den Expositionsklassen oder Dauerhaftigkeitsprüfungen:

Die XD2a Exposition erfordert durch die Zusammenlegung von XD1 mit XD2a die Überdeckungen der XD1 Exposition. Der für die XD2a Exposition definierte maximale Chloridgehalt ist so gering, dass chloridinduzierte Bewehrungskorrosion im Allgemeinen ausgeschlossen werden kann und Betonqualität und Überdeckung entsprechend XC2 Anforderungen gewählt werden könnten. D.h. es könnte die XD2a Exposition gestrichen oder der XC2 Exposition zugeordnet werden. In der XC2 Exposition wäre eine Auslaugprüfung zu empfehlen, da bisher keine Dauerhaftigkeitsprüfung vorliegt und Auslaugen massgebend ist.

Die bisher mit der XD3 Exposition gleich geschaltete XD2b Exposition könnte (a) zukünftig getrennt betrachtet werden oder (b) der Grenzwert für den maximalen Chloridgehalt erhöht werden. Ein Grund für den schnelleren Chlorideintrag in der XD3 Exposition gegenüber der XD2a Exposition ist der Transportmechanismus. In der XD3 Exposition mit Wechselfeuchtbedingungen (Austrocknung und Sättigung im Wechsel) wird Chlorid auch durch Kapillartransport aufgenommen. Dieser Transport ist um ein Vielfaches schneller als reine Diffusion.

Bisher ist die Überdeckung in XC3 um 5 mm geringer als in XC4 bei gleichem KW in XC3 und XC4. Resultate aus Bauwerksuntersuchungen und Modellierungen haben aber gezeigt, dass die Überdeckung in XC4, auch unter der Annahme, dass die Bewehrung während der Nutzungsdauer nie korrodieren darf, bei gleichem KW um 5 mm gesenkt werden könnten. D.h. die Überdeckungen und der KW könnten für XC3 und XC4 identisch sein. Der Grund für die Senkung der Überdeckung ist, der langsame Karbonatisierungsfortschritt.

1 Hintergrund

1.1 ERC und Schweizer Dauerhaftigkeitsanforderungen

1.1.1 ERC-Klassen nach BD zur prEN1992-1-1

Mit dem Ziel nachhaltigere Betone leichter einsetzen zu können, erlaubt nun auch die prEN 1992-1-1:2023 [1] Betone leistungsorientiert einzusetzen. Das Europäische leistungsorientierte Konzept beruht auf sog. ERC `Exposure Resistance Classes`.

Die ERC-Klassen stehen für Dauerhaftigkeitsanforderungen des Betons gegenüber einer bestimmten Einwirkung. Beispielsweise die XRC-Klassen beschreiben den Betonwiderstand gegenüber Karbonatisierung und XRDS-Klassen beschreiben den Betonwiderstand gegenüber Chlorideinwirkung. Die Zahlen, die den XRC bzw. XRDS-Klassen zugeordnet sind, geben den minimalen Karbonatisierungs- bzw. Chloridwiderstand an, den ein Beton aufweisen darf, um noch der spezifischen Klasse zugeordnet werden zu dürfen. Je ERC-Klasse werden minimale Überdeckungen angegeben, die in den Expositionsklassen XC, XS oder XD differenziert nach Nutzungsdauer (50 oder 100 Jahre) einzuhalten sind.

Aufgrund unterschiedlicher Klimabedingungen und Rohstoffe am Ort der Verwendung sind die Überdeckungen und Anzahl der Klassen in prEN 1992-1-1:2023 [1] NDP. D.h. auf nationaler Ebene können Überdeckungen festgelegt werden. Delegationen aus Süd, Mittel und Nordeuropa und der Schweiz waren Mitglieder der Normkommission Dauerhaftigkeit (CEN TC 250 SC2 WG110). Dort haben sie für lokale Klima- und Ausführungsbedingungen sowie Rohstoffvorkommen Überdeckungen in Abhängigkeit von Karbonatisierungswiderstandsklassen (XRC) und in Abhängigkeit von Chloridwiderstandsklassen (XRDS) erarbeitet.

Die Überdeckungen in Abhängigkeit der Expositionsklasse und der XRC-Klasse (Karbonatisierungswiderstand) in *Abb.1* wurden aus Parameterstudien für Schweizer Bedingungen entwickelt im BD prEN1992-1-1:2023 [1] im Chapter 2.1 entwickelt. Für die Bemessung der Bewehrungsüberdeckung wurden sowohl Modellrechnungen mit Parameterstudien durchgeführt als auch die Resultate aus Auslagerungsuntersuchungen zur Extrapolation herangezogen. Die Parameterstudien wurden für eine Zuverlässigkeit von $\beta \approx 1.5$ berechnet.

Tabelle 6.3 (CH) — Mindestbetondeckung $c_{min,dur}$ für unlegierten Betonstahl — Karbonatisierung

ERC	Expositionsklasse (Karbonatisierung)							
	XC1		XC2		XC3		XC4	
	Geplante Nutzungsdauer (Jahre)							
	50	100	50	100	50	100	50	100
XRC 1	10	10	10	10	10	10	10	15
XRC 2	10	10	10	15	10	15	10	20
XRC 3	10	10	10	15	10	20	15	25
XRC 4	10	10	15	20	15	25	20	30
XRC 5	10	10	15	20	20	30	25	35
XRC 6	10	10	20	25	25	35	30	40
XRC 7	10	10	20	25	30	40	35	45
XRC 8	10	10	25	30	35	45	40	50
XRC 9	10	10	25	30	40	50	45	55

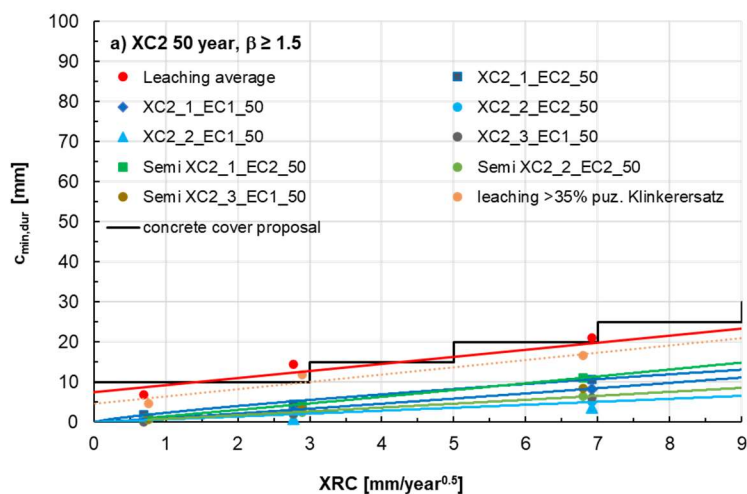
ANMERKUNG 1 XRC-Klassen für die Beständigkeit gegen Korrosion infolge von Karbonatisierung werden aus der Karbonisierungstiefe [mm] (charakteristischer Wert 90 %-Quantil) ermittelt, von der angenommen wird, dass sie nach 50 Jahren unter Referenzbedingungen (400 ppm CO₂ in einer konstanten 65 %-RH-Umgebung und bei 20 °C) erreicht wird. Der Wert in der Bezeichnung von XRC hat die Dimension einer Karbonisierungsrate [mm/√(Jahre)].

ANMERKUNG 2 Die empfohlenen Werte der Mindestbetondeckung $c_{min,dur}$ gehen von einer Bauausführung und Nachbehandlung in Übereinstimmung mit EN 13670.

ANMERKUNG 3 Die Mindestbetondeckungen können um ein zusätzliches Sicherheitselement $\Delta c_{dur,\gamma}$ erhöht werden, das besondere Anforderungen (z. B. extremere Umgebungsbedingungen) berücksichtigt.

Abb.1 Dauerhaftigkeitsanforderungen nach BD zur EN 1992-1-1 Chapter 2.1 Seite 80-95 [8] für die Expositionsklassen XC1, XC2, XC3 und XC4

Abb.2 bis Abb.4 zeigen die Resultate der Parameterstudien aus BD prEN1992-1-1 Chapter 2.1 Seite 80 - 95 [8] die zu den Überdeckungen in Abb. 1 geführt haben. Die Kurven zeigen die Modellrechnungen und die CH-Vorschläge für Überdeckungen gemäss CH-Klima- und Ausführungsbedingungen sind durch die schwarze Treppenkurve dargestellt. Die Modellrechnungen wurden für einen Zuverlässigkeitsindex $\beta \geq 1.5$ in vollprobabilistischen und semiprobabilistischen (semi) Rechnungen für zwei Ausführungsqualitäten (EC1 = Execution Class 1 und EC2 = Execution Class 2) durchgeführt. Extrapolierte Resultate aus Auslagerungsuntersuchungen wurden ebenfalls angefügt (Lab bzw. leaching cemsuisse in XC2, Wildegg bzw. Visp in XC3 und XC4). Die Resultate aus den Auslagerungsversuchen wurden um den Teilsicherheitsbeiwert ($\gamma_f = 1.25 - 1.3$ [9]) erhöht, um die Anforderungen an die Zuverlässigkeit einzuhalten. In zukünftiger Forschung sollten gezielt Resultate aus Bauwerksuntersuchungen für die Korrelation zwischen erforderlicher Überdeckung und XRC-Klasse ausgewertet werden.



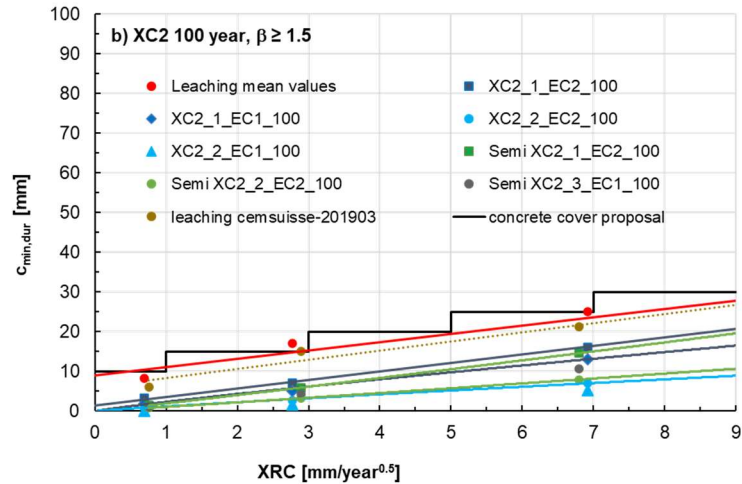
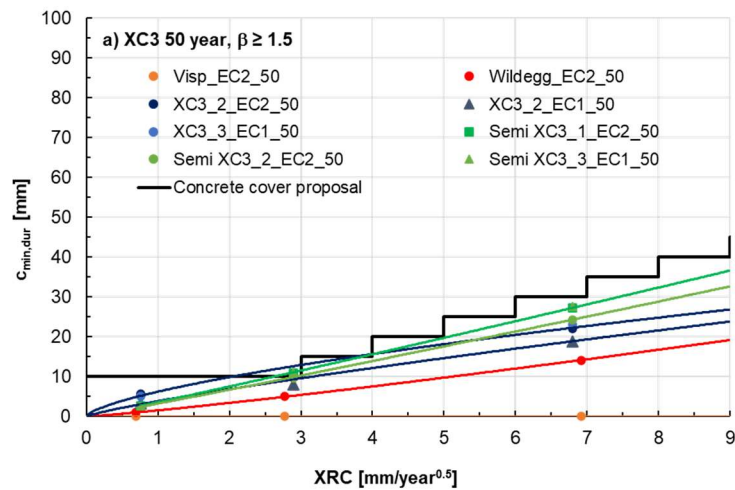


Abb.2 Parameterstudien aus BD prEN1992-1-1 Kapitel 2.1 Seite 80-95 [8] zur Herleitung der Bewehrungsüberdeckung in Abhängigkeit der XRC-Klassen für die Expositionsklasse XC2 für (a) 50 und (b) 100 Jahre

Die Überdeckungen im BD zur EN 1992-1-1 wurden einmal für die Expositionsklasse XC2 Exposition berechnet. Obwohl konservativ mit Karbonatisierungsfortschritt bei 85 bis 90% relativer Feuchte anstelle von wassergesättigt waren die berechneten minimalen Überdeckungen gering. Da in der XC2 Exposition (nass, hohe feuchte) jedoch mit Kalziumauslaugen gerechnet werden muss [10], mit sowohl höheren Auslaug- als auch höheren Korrosionsraten (tolerierbare Korrosionszeit ca. $t_{corr} < 2$ Jahre) werden in dem 'Leaching Fall' höhere Überdeckungen erforderlich.



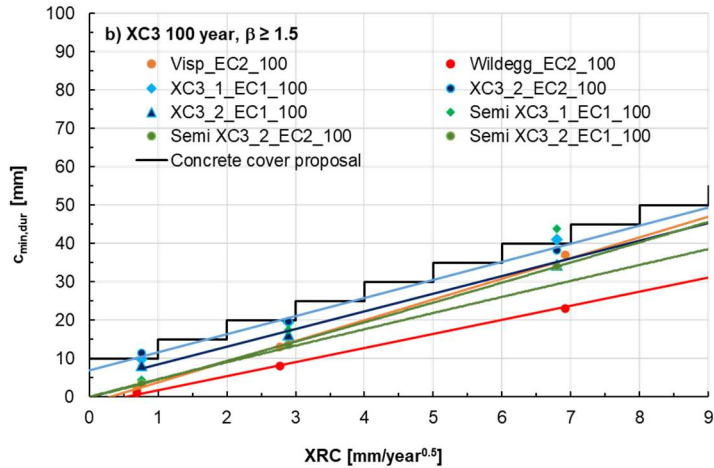
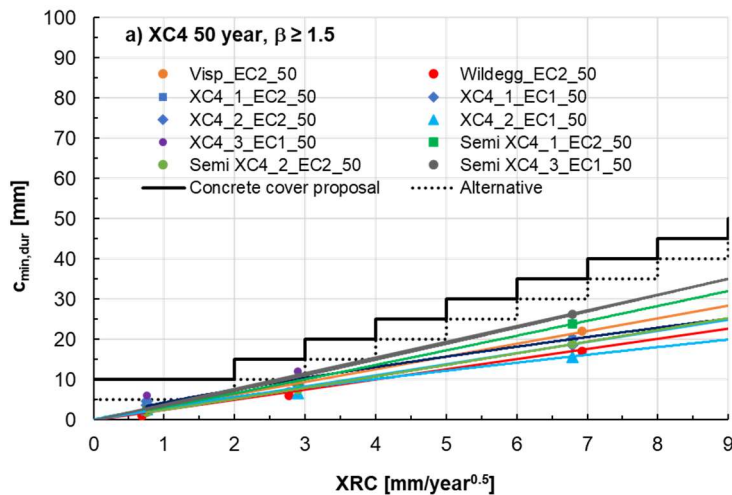


Abb.3 Parameterstudien aus BD prEN1992-1-1 Kapitel 2.1 Seite 80-95 [8] zur Herleitung der Bewehrungsüberdeckung in Abhängigkeit der XRC-Klassen für die Expositionsklasse XC3 für (a) 50 und (b) 100 Jahre

Insbesondere in der XC3 Exposition bestimmt die Korrosionsgeschwindigkeit die berechneten Überdeckungen. Je trockener die Umgebung (relative Feuchte) desto schneller ist der Karbonatisierungsfortschritt und desto länger ist im Gegenzug die tolerierbare Korrosionszeit (desto geringer die Korrosionsrate). Dies wird besonders bei den Daten von Auslagerungsversuchen in geschützter Aussenbedingung in Visp deutlich.

Die Korrosionsrate war in Visp Bedingungen so gering, dass rechnerisch erst nach 50 Jahren ohne Überdeckung einen Abtrag von 50 μm erreichen würde (Abb.3). D.h. die tolerierbare Korrosionszeit beträgt fast 50 Jahre. Bei 100 Jahren Nutzungsdauer muss das Erreichen der Karbonatisierungsfront an der Bewehrung für 50 Jahre verhindert werden, um dann noch 50 Jahre Korrosionszeit mit geringen Korrosionsraten ($\leq 1 \mu\text{m}/\text{Jahr}$) noch tolerieren zu können.

Für die Auslagerungsversuche in Wildegg wiederum, wo die relative Feuchte höher ist, schreitet die Korrosion schneller voran (ca. 25 Jahre tolerierbare Korrosionsphase). Dafür ist der Karbonatisierungsfortschritt durch die höhere Feuchte verlangsamt.



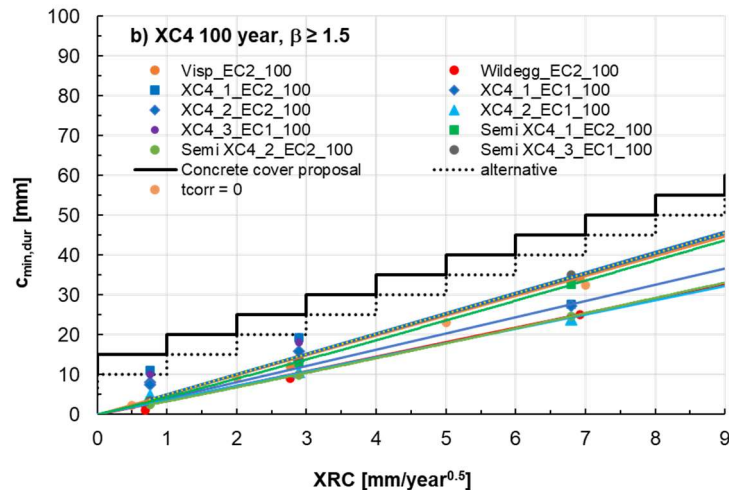


Abb.4 Parameterstudien aus BD prEN1992-1-1 Kapitel 2.1 Seite 80-95 [8] zur Herleitung der Bewehrungsüberdeckung in Abhängigkeit der XRC-Klassen für die Expositionsklasse XC4 für (a) 50 und (b) 100 Jahre

In der XC4 Exposition kann die tolerierbare Korrosionszeit insbesondere bei kleinen Überdeckungen nicht oder nur gering (bis zu 5 Jahre Korrosionszeit) berücksichtigt werden. Bei höheren Überdeckungen bzw. grösseren XRC-Klassen kann zwar eine längere Korrosionszeit toleriert werden, gezielte Korrosionsuntersuchungen an XRC > 6 Betonen sind aber noch durchzuführen. Trotz dieser eingebauten Sicherheit, d.h. auch bei gänzlicher Vernachlässigung einer tolerierbaren Korrosionszeit ($t_{corr} = 0$) liegen die berechneten Überdeckungen unter den Anforderungen in der Schweiz an die Überdeckung (schwarze Treppenkurve). Deshalb ist ein Vorschlag für angepasste Überdeckungen in Abb.4 (a) und (b) mit der gestrichelten schwarzen Treppenkurve angedeutet. Die gestrichelte Kurve hätte zur Konsequenz, dass die Anforderungen an Betonwiderstand und Bewehrungsüberdeckung für die Expositionsklasse XC3 und XC4 beide identisch wären. Bisher werden an die XC4 Exposition, zumindest an die Bewehrungsüberdeckung, höhere Anforderungen gestellt.

Auch für die Expositionsklassen bei Chlorideinwirkung (XD) wurden ERC-Klassen erarbeitet [6-8]. Aufbauend auf [6-8] wurden ERC-Klassen für eine Zuverlässigkeit von $\beta \geq 0.5$ erarbeitet und mit Resultaten aus Bauwerksuntersuchungen verglichen. Die ERC-Klassen gegenüber Chlorideinwirkung werden XRDS-Klassen genannt. Für die Chlorideinwirkung aus Meerwasserexposition (Expositionsklasse XS) werden hier keine Überdeckungen angegeben, da diese Exposition in der Schweiz nicht zum Tragen kommt.

Tabelle 6.4 (CH) — Minimale Betondeckung $c_{min,dur}$ für unlegierten Betonstahl — Chlorid

ERC	Expositionsklasse (Chlorid)			
	XD1=XD2a(CH)		XD3 = XD2b	
	Geplante Nutzungsdauer (Jahre)			
	50	100	50	100
XRDS 1	10	20	20	30
XRDS 2	15	25	25	35
XRDS 4	20	30	30	40
XRDS 6	25	35	35	45
XRDS 8	25	35	40	50
XRDS 9	25	35	45	55
XRDS 12	30	40	50	60
XRDS 14	30	40	55	65
XRDS 16	30	40	60	70
XRDS 18	30	40	65	75
XRDS 24	35	45	70	80
XRDS 30	40	50	75	85
XRDS 40	45	55	85	95

ANMERKUNG 1 XRDS-Klassen für die Beständigkeit gegen Korrosion infolge von Chlorideintrag werden aus der Tiefe des Chlorideintrags [mm] (charakteristischer Wert 90 %-Quantil) ermittelt, die einer Referenzchloridkonzentration [0,6 % Massenanteil des Bindemittels (Zement + Zusatzstoffe des Typs II)] entspricht, von der angenommen wird, dass sie nach 50 Jahren auf einem Beton erreicht wird, der einseitigem Eindringen von Referenzmeerwasser (30 g/l NaCl) bei 20 °C ausgesetzt ist. Der Wert in der Bezeichnung von XRDS hat die Dimension eines Diffusionskoeffizienten [$10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$].

ANMERKUNG 2 Die empfohlenen Werte der Mindestbetondeckung $c_{min,dur}$ gehen von einer Bauausführung und Nachbehandlung in Übereinstimmung mit EN 13670.

ANMERKUNG 3 Die Mindestbetondeckungen können um ein zusätzliches Sicherheitselement $\Delta c_{dur,\gamma}$ erhöht werden, das besondere Anforderungen (z. B. extremere Umgebungsbedingungen) berücksichtigt.

Abb.5 Dauerhaftigkeitsanforderungen in Anlehnung an das BD prEN1992-1-1 Kapitel 2.1 Seite 168-192 [8] für die Expositionsklassen XD1, XD2, XD3, XS1- XS3 aber für eine Zuverlässigkeit von $\beta \approx 0.5$

Abb.6 und Abb.7 zeigen die Resultate der Parameterstudien BD prEN1992-1-1 Kapitel 3.1 Seite 168-192 [8] die zu den Überdeckungen in Abb.6 geführt haben. Die Kurven zeigen die Modellrechnungen für eine Zielzuverlässigkeit von $\beta \geq 0.5$ anstelle von $\beta \geq 1.5$ aus [8]. Der Grund ist, dass bei einer Zuverlässigkeit von 1.5 unwirtschaftlich hohe Überdeckungen gefordert würden, obwohl nur beim Zusammentreffen von unterdurchschnittlicher Ausführungsqualität von Beton und Überdeckung bei gleichzeitig überdurchschnittlich hoher Chlorideinwirkung der Fall der früheren Depassivierung eintritt. Hier wird deshalb empfohlen die 80/20 Regel anzuwenden, d.h. Normen sollten 80% abdecken. Eine Möglichkeit zur Erhöhung der Sicherheit wäre die Anforderungen an die Nachbehandlungsklasse in scharfen Expositionen projektspezifisch zu erhöhen oder eine Anpassung für XD3 in SN EN 13670 [11]. Hinzu kommt, dass das gewählte Zuverlässigkeitsniveau ein NDP ist.

Die Vorschläge für Überdeckungen gemäss CH-Klima- und Ausführungsbedingungen sind durch die schwarze Treppenkurve dargestellt. Die Modellrechnungen wurden für einen Zuverlässigkeitsindex $\beta \approx 0.5$ in voll- und semiprobabilistischen Rechnungen durchgeführt. Neben der Sicherheit in der Überdeckung (Erhöhung der minimalen, rechnerisch erforderlichen Überdeckung auf die nominale Überdeckung) wurde die Eindringtiefe um den Teilsicherheitsbeiwert ($\gamma_f = 1.0 - 1.2$ [8]) erhöht. Die maximale Chloridkonzentration lag bei 1.5-2 gew. % bei XD1 und bei 2.5 bis 3.5 gew. %/Zement bei XD3/XD2a, der kritische Chloridgehalt variierte zwischen bei 0.5-0.8 gew. %, und Tiefe mit maximalem Chloridgehalt in den Wechselfeuchtbedingungen wurde mit 5 bis 10 mm berücksichtigt.

Neben den modellierten Überdeckungen wurden anhand von Bauwerksdaten, d.h. aus Chloridprofilen aus der XD1 bzw. XD3 Exposition von realen Bauwerken (Einstellhallen, Brücken in der Schweiz) durch Extrapolation die erforderliche Überdeckung nach 50 oder 100 Jahren sowie die vorliegende XRDS-Klasse ermittelt [8]. Die Korrosionsphase wurde

dabei vernachlässigt ($t_{\text{corr}} = 0$). In zukünftigen Forschungsprojekten sollten weitere gezielte Auswertungen stattfinden mit genauer Darlegung der Vorgehensweise.

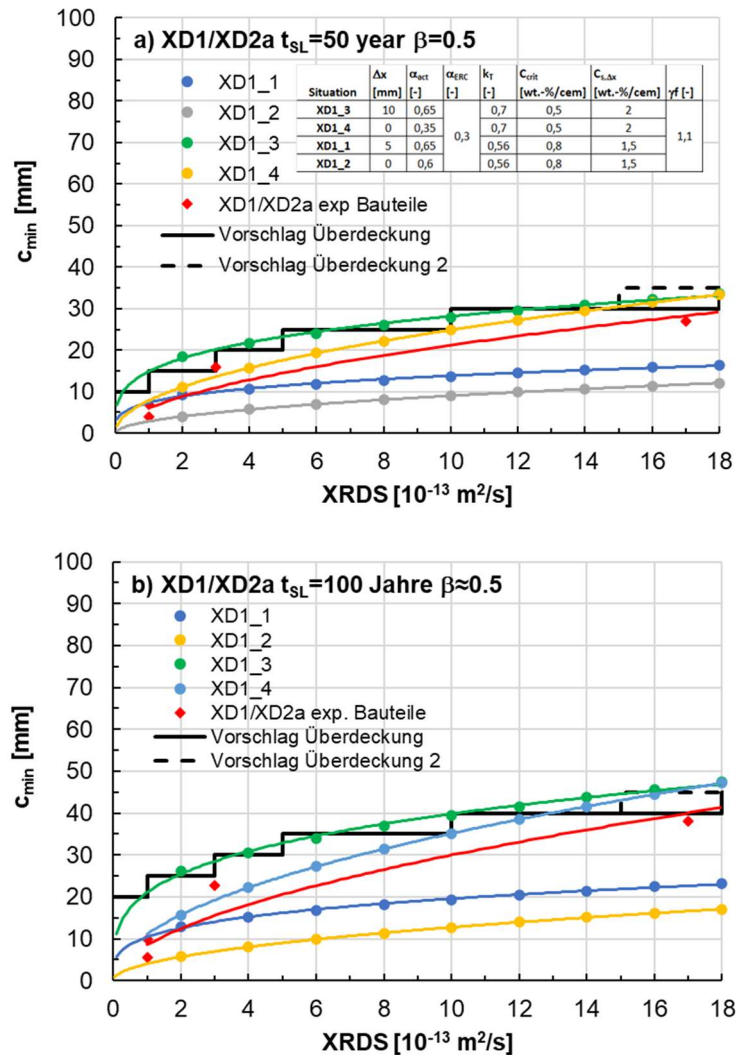


Abb.6 Parameterstudien aus BD prEN1992-1-1 Kapitel 2.1 Seite 168-192 [8] zur Herleitung der Bewehrungsüberdeckung in Abhängigkeit der XRDS-Klassen in der Expositionsklasse XD1/XD2a für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren

Obwohl SN EN 206 die XD2a(CH) Exposition mit einem Chloridgehalt ≤ 0.5 g/L führt rechnerisch zu einer maximalen Chloridkonzentration an der Betonoberfläche von ≤ 0.1 - 0.2 Gew.-% bezogen auf den Zement. Diese Konzentrationen entsprechen des höchstzulässigen Chloridgehalt in Tabelle NA4 in SN EN 206 und liegen unterhalb den als kritisch erachteten korrosionsauslösenden Chloridgehalten. Deshalb wurde auf eine Darstellung der erforderlichen bzw. nicht erforderlichen Überdeckung mit XD2a(CH) verzichtet.

Die Vorschläge für die Überdeckung wurde deshalb für die XD1 Exposition anhand der konservativsten, d.h. für die schärfste Chlorideinwirkung (grüne Kurve) gewählt.

Für die Chloridprofile aus der XD1 Exposition an realen Bauwerken, wurden hier Chloridprofile aus einer Brückenuntersicht und Chloridprofile aus einem Tunnel in 1.75 bis 2.0 m Höhe aus dem Wandbereich zum Vergleich herangezogen [8]. Auch die aus den Chloridprofilen abgeleiteten erforderlichen Überdeckungen liegen auf der sicheren Seite für die vorgeschlagenen Überdeckungen. In weiterer Forschung sollten die Überprüfung der ERC-Klassen mit Bauwerksdaten genauer geprüft werden, da im Rahmen dieses Projektes nur eine Überschlagsanalyse durchgeführt wurde.

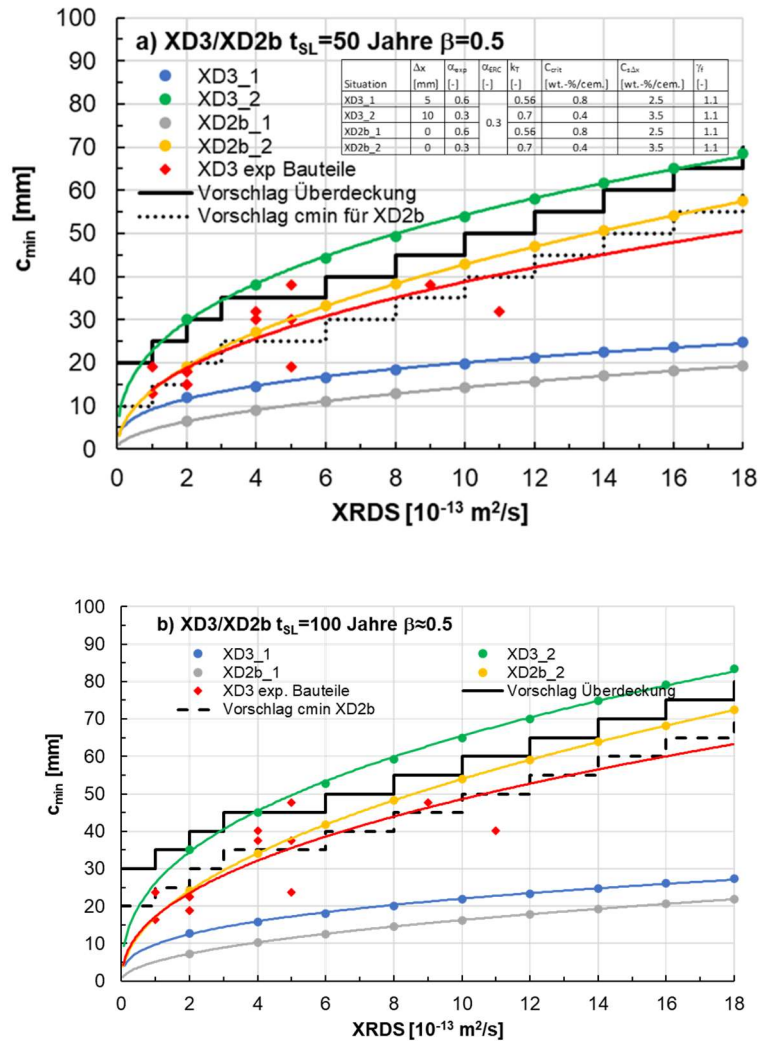


Abb.7 Parameterstudien aus BD prEN1992-1-1 Kapitel 2.1 Seite 168-192 [8] zur Herleitung der Bewehrungsüberdeckung in Abhängigkeit der XRDS-Klassen in der Expositionsklasse XD3/XD2b für eine Nutzungsdauer von 100 Jahren

Die vorgeschlagenen Überdeckungen für die XD3 Exposition liegen mit zwei Ausnahmen über den anhand von Bauwerksdaten erforderlichen Überdeckungen und im Bereich der für das Worst-Case Szenario berechneten Kurve.

Die XD2b Exposition zeigt aber rechnerisch geringere erforderliche Überdeckungen als in der XD3 Exposition. Für die XD3 Exposition wurden rechnerisch Wechsel-Feucht-Bedingungen berücksichtigt. In der Wechsel-Feucht-Bedingungen wird auch der Chlorideintrag durch kapillares Saugen mitberücksichtigt. Deshalb sind die rechnerischen Überdeckungen hier höher als in der Exposition XD2b mit ständig gesättigten Bedingungen und diffusivem Chloridtransport. Deshalb wurden zusätzlich Überdeckungen für die XD2b Exposition vorgeschlagen (gestrichelte Treppenkurve).

In zukünftiger Forschung sollten gezielt auch Bauwerksdaten von XD2b Expositionen berücksichtigt werden.

1.1.2 Schweizer Dauerhaftigkeitsanforderungen

Bisher war die Schweiz eines der wenigen CEN-Mitgliedsstaaten, dass ein leistungsorientiertes Konzept zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit normativ zur Verfügung stellte. Kern des Konzeptes sind sog. Schweizer Dauerhaftigkeitsanforderungen unter

202304| Klassifizierung von Beton nach EC2 Referenzverfahren

Einsatz von freigegebenen Zementen, Zusatzstoffen und Zement Zusatzstoff Kombinationen. Die Schweizer Dauerhaftigkeitsanforderungen in SN EN 206:2013+A2:2021 [5] geben in Abhängigkeit von Expositionsklassen Grenzwerte für Dauerhaftigkeitseigenschaften vor, die der Beton einzuhalten hat, vgl. Abb.8 (a), (b). Neben den Anforderungen an die Dauerhaftigkeitseigenschaften sind in den Expositionsklassen, die die Bewehrungskorrosion beschreiben, Anforderungen an die Bewehrungsüberdeckung nach SIA 262:2013 [12] einzuhalten, vgl. Abb.8 (c). Die Toleranzen und die Folgen der negativen Abweichung in Form von c_{min} sind in Abb.8 (d) dargestellt.

Tabelle NA.6 Anforderungen an die Zusammensetzung und Prüfung der üblichen Betonsorten mit einem Grösstkorn der Gesteinskörnung von 8 mm bis 63 mm

(a)

Bezeichnung Anforderungen	Sorte 0 (Null)	Sorte A	Sorte B	Sorte C	Sorte D (T1)	Sorte E (T2)	Sorte F (T3)	Sorte G (T4)
Expositionsklasse (Kombination der aufgeführten Klassen)	X0(CH)	XC2(CH)	XC3(CH)	XC4(CH), XF1(CH)	XC4(CH), XD1(CH), XF2(CH)	XC4(CH), XD1(CH), XF4(CH)	XC4(CH), XD3(CH), XF2(CH)	XC4(CH), XD3(CH), XF4(CH)
Maximaler w/z-Wert bzw. w/z_{eq} -Wert	–	0,65	0,60	0,50	0,50	0,50	0,45	0,45
Mindestzementgehalt Z_{min} in kg/m^3 ^{1,2)}	–	280	280	300	300	300	320	320
Dauerhaftigkeitsprüfungen ³⁾	Keine	Keine	WL ⁴⁾ , KW	KW	KW, FT	KW, FT	CW, FT	CW, FT
Andere Anforderungen	SN EN 12620+A1:2008 enthält Anforderungen an die Gesteinskörnungen							
Frei gegebene Zementarten (Tabelle NA.1)	Bei der Kombination von Expositionsklassen gilt für die Wahl des Zementes jeweils die strengste Anforderung							

Tabelle NA.14 Vorgaben zur Prüfung der Wasserleitfähigkeit, des Karbonatisierungs-, Chlorid- und des Frost-Tausalz-Widerstandes

(b)

	Wasserleitfähigkeit	Karbonatisierungswiderstand		Chloridwiderstand	Frost-Tausalzwiderstand	
					mittel	hoch
Prüfung gemäss SIA 262/1:2019	Anhang A	Anhang I		Anhang B	Anhang C	
Prüfung ist durchzuführen bei den Expositionsklassen (CH)	XC3 ¹⁾	XC3	XC4, XD1, XD2a, XF1	XD2b, XD3	XF2, XF3	XF4
Prüfung ist durchzuführen bei den Betonsorten gemäss Tabelle NA.5	Sorte B ¹⁾	Sorte B	Sorte C, D und E	Sorte F und G	Sorte D und F	Sorte E und G
Grenzwert für Mittelwert	$q_w \leq 10$ g/m^2h	$K_N \leq 6,5$ $mm/Jahr^{1/2}$ ^{2,3)}	$K_N \leq 6,5$ $mm/Jahr^{1/2}$ ^{2,4)}	$D_{Cl} \leq 10 \cdot 10^{-12}$ m^2/s	$m \leq 2'500$ g/m^2	$m \leq 400$ g/m^2 oder $m \leq 750$ g/m^2 und $\Delta m_{28} \leq (\Delta m_6 + \Delta m_{14})$
Grenzwert für Mittelwert + Grenzabweichung	$q_w \leq 12$ g/m^2h	$K_N \leq 7,0$ $mm/Jahr^{1/2}$ ^{2,3)}	$K_N \leq 7,0$ $mm/Jahr^{1/2}$ ^{2,4)}	$D_{Cl} \leq 13 \cdot 10^{-12}$ m^2/s	$m \leq 3'000$ g/m^2	$m \leq 450$ g/m^2 oder $m \leq 950$ g/m^2 und $\Delta m_{28} \leq (\Delta m_6 + \Delta m_{14})$
Prüfhäufigkeit für Betonhersteller ohne ausreichende Erfahrung ⁵⁾	Mind. 4 pro Jahr oder alle 500 m^3 , ab 4'000 m^3 : alle 1'000 m^3 , ab 17'000 m^3 : alle 1'250 m^3 , ab 30'000 m^3 : alle 1'500 m^3 , ab 60'000 m^3 : alle 3'000 m^3			Mindestens 4 pro Jahr oder alle 125 m^3 , ab 1'000 m^3 : alle 250 m^3 , ab 2'000 m^3 : alle 500 m^3		
Prüfhäufigkeit für Betonhersteller mit ausreichender Erfahrung ⁵⁾	Mind. 2 pro Jahr oder alle 1'000 m^3 , ab 4'000 m^3 : alle 2'000 m^3 , ab 17'000 m^3 : alle 2'500 m^3 , ab 30'000 m^3 : alle 3'000 m^3 , ab 60'000 m^3 : alle 6'000 m^3			Mindestens 2 pro Jahr oder alle 250 m^3 , ab 1'000 m^3 : alle 500 m^3 , ab 2'000 m^3 : alle 1'000 m^3		

Tabelle 18: Planmässige Bewehrungsüberdeckung

(c) Bewehrungsüberdeckung c_{nom} [mm] ¹⁾	Expositionsklasse gemäss Tabelle 1							
	2) Bewehrungskorrosion in karbonatisiertem Beton				3) Bewehrungskorrosion induziert durch Chloride			
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2a	XD2b	XD3
Betonstahl	20	35	40	40	40			55
Spannstahl bzw. Spannglied	30	45	50	50	50			65

¹⁾ Die tabellierten Werte der Bewehrungsüberdeckung dürfen bei der Ausführung maximal um die Abweichungen gemäss Ziffer A.3.5 unter- oder überschritten werden.

(d)

Soll-Grösse	c_{nom} in mm	20	>20 bis <30	≥ 30
Zulässige Abweichung in mm	geschalte und abtaloschierte / abgeglättete Oberflächen	+ 10 0	+ 10 - 5	+ 10 - 10
	nicht geschalt, vorbereiteter Untergrund oder Negativbeton			+ 20 - 20
	nicht geschalt, gegen Erdreich			+ 30 - 30

Bewehrungsüberdeckung c_{min} [mm]	Expositionsklasse gemäss Tabelle 1							
	2) Bewehrungskorrosion in karbonatisiertem Beton				3) Bewehrungskorrosion induziert durch Chloride			
	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2a	XD2b	XD3
Betonstahl	10	25	30	30	30			45

Abb.8 Dauerhaftigkeitsanforderungen nach SN EN 206:2013+A2:2021 [5] (a) und ein Ausschnitt aus der Tabelle NA14 mit den Grenzwerten für die Dauerhaftigkeitsanforderungen (b) sowie nominale Überdeckung

Mit Einführung des Anhang ND entfallen bei seiner Anwendung die Anforderungen an den Maximalen w/z-Wert, den Mindestzementgehalt und den k-Wert Ansatz. Weiterhin gehört der Beton einer Betonsorte an und muss daher die Anforderungen an die Dauerhaftigkeitseigenschaften erfüllen.

Da die Exposition XC1 in SN EN 206:2013+A1:2021 [5] nicht benannt ist, kann die Überdeckung bisher keiner Expositionsklasse zugeordnet werden.

Neben der SN EN 206:2013+A2:2021 [5] mit SIA 262:2013 [12] mit prSIA262:2024 [13] werden differenzierte Anforderungen an vorgefertigte Bauteile in SN EN 13369:2018 [14] gestellt. Abb.9 fasst die informativen Anforderungen an die Überdeckung in SN EN 13369:2018 zusammen. Die Angaben wurden für eine übliche Nutzungsdauer von 50 Jahren gemacht.

Maße in Millimeter

Expositionsklassen nach EN 206	Umwelt- bedin- gungen	c_{min}	C_0	Umge- bungs- bedin- gungen	Bewehrungs- stäbe für Platten		Bewehrungs- stäbe für andere Produkte als Platten		Spannglieder im sofortigen Verbund für Platten		Spannglieder im sofortigen Verbund für andere Produkte als Platten	
					$\geq C_0$	$< C_0$	$\geq C_0$	$< C_0$	$\geq C_0$	$< C_0$	$\geq C_0$	$< C_0$
X0	A	C20/25	C30/37	A	10	10	10	10	10		10	
XC1	B	C20/25	C30/37	B	10	10	10	10	15		15	
XC2-XC3	C	C25/30	C35/45	C	10	15	15	20	20	25	25	30
XC4	D	C30/37	C40/50	D	15	20	20	25	25	30	30	35
XD1-XS1	E	C30/37	C40/50	E	20	25	25	30	30	35	35	40
XD2-XS2	F	C30/37	C40/50	F	25	30	30	35	35	40	40	45
XD3-XS3	G	C35/45	C45/55	G	30	35	35	40	40	45	45	50

Abb.9 Differenzierte Anforderungen an die Überdeckung in SN EN 13369:2018 [14]

Die Angaben für die Festigkeitsklassen für die c_{min} je Expositionsklasse gilt, entsprechen den Festigkeitsklassen der SN EN 206 [5]. Insgesamt sind die Anforderungen an die Überdeckung bei vorfabrizierten Bauteilen geringer als in SIA 262 [12, 13], solange eine spezielle Qualitätskontrolle der Betonherstellung sichergestellt ist. Bemerkenswert ist, dass Betone, die höhere Festigkeitsklassen aufweisen als SN EN 206 [5], darf die minimale Überdeckung abgemindert werden. Ist die Festigkeit um zwei Klassen höher als die nach SN EN 206 [5] beträgt die Abminderung 5 mm.

Bei Sonderbetonen wie beispielsweise RC-Beton nach MB 2030 [15] erfolgt die Einteilung der Betone in Sorten nach SN EN 206 [5]. Daraus folgen die sortenbezogenen Anforderungen an Beton SN EN 206 [5] bzw. Anforderungen an den Beton nach SN EN 206 Anhang ND:2024 [16] und Anforderungen an die Überdeckung nach SIA 262 [12, 13]. Bei UHFB nach MB 2052 [17] werden demgegenüber gesonderte Anforderungen an die Überdeckung bei Betonstahl gestellt ($C_{nom} = 15$ mm bis 10 mm). Gesonderte Massnahmen zur Gewährleistung der Dauerhaftigkeit in den Expositionsklassen XC, XD, XA und XF werden nicht gefordert.

Mit Ausnahme der SN EN 13369 [14] sind die Anforderung an den Karbonatisierungswiderstand und den Chloridwiderstand mit Expositionsklasse einem einzigen Grenzwert eng begrenzt.

1.1.3 Vorteile des ERC-Konzepts in prEN1992-1-1

Seit Einführung des Anhang ND entfallen zwar in der SN EN 206 [5] die Anforderungen an Mindestzementgehalt, maximalen w/z-Wert und der k-Wert Ansatz, dennoch bleibt der Eine, strikte Grenzwert für KW bzw. CW erhalten. Ein besonders nachhaltiger Beton beispielsweise mit geringem Zement und oder Klinkergehalt kann dennoch meist nicht eingesetzt werden, da er den einen Schweizer Grenzwert nicht einhält. Würde man einen zweiten höheren Grenzwert in Kombination mit einer höheren Überdeckung zulassen, könnten auch nachhaltigere Zemente oder Beton eingesetzt werden.

Ein Beton der Sorte A ohne Anforderung an den Karbonatisierungswiderstand kann in der Expositionsklasse XC3 oder XC4 nicht eingesetzt werden. D.h. obwohl dieser vermutlich nachhaltigere Beton im Portfolio des Herstellers vorliegt, darf der Beton nur in ganz bestimmten Expositionsklassen (z.B. XC2) eingesetzt werden kann und der Handel damit auf diese eine Exposition beschränkt ist. Mit den ERC-Klassen könnte dieser NPK-A auch in der Expositionsklasse XC3 oder sogar XC4 mit dementsprechend angepasster Überdeckung eingesetzt werden.

Umgekehrt können bei Einsatz von NPK-C Betonen in der XC2 Exposition nach ERC Konzept Überdeckung eingespart und damit wenig nachhaltige Überbemessung verhindert werden. Im Prinzip wird das ERC-Konzept bereits teilweise umgesetzt. Beispielsweise erlaubt die SN EN 13369 im informativen Anhang, bei höherer Betonqualität die Überdeckung abzumindern und damit eine Überbemessung zu verhindern. Zukünftig kann

durch das ERC-Konzept diese Doppelspurigkeit zwischen Vorfabrikation nach SN EN 13369 und SIA 262 abgebaut werden.

Der Handel mit Beton in grenznahen Regionen ist zudem eingeschränkt, da die Anforderungen, meist deskriptiv, nicht mit unseren übereinstimmen. Mit der Harmonisierung, d.h. Einführung von ERC-Klassen mit zugehöriger Prüfung wird den Handel von Beton über Landesgrenzen innerhalb der CEN-Mitgliedsstaaten erleichtern können.

1.1.4 Stand der Umsetzung des ERC-Konzepts in CEN-Mitgliedsstaaten

In Deutschland [18-21] und mündlichen Gesprächen mit Udo Wiens, Angelika Schiessl-Peck und David Ov [22].

Nach [18-22] wird das Performance Concept für die Expositionsclassen XC2, XC3, XC4 und XD1/XS1 eingeführt. Neben Performance Anforderungen wird ein minimaler Zementgehalt von 70 kg/m^3 gefordert und der k-Wert Ansatz ausgeschlossen. Die Expositionsklasse XF1 muss die Anforderung $> C20/25$ erfüllen. Für die Expositionsclassen XA1-XA3, XF2-XF4, XM1-XM3, XD2/XS2 und XD3/XS3 wird eine Kombination aus deskriptiven Anforderungen an die Betonzusammensetzung und DIN 1045-2 (= EN206 + NAD) gefordert.

Für die XC2-XC4 Expositionsclassen wurden vier XRC-Klassen ausgewählt (XRC5, XRC7, XRC9 und XRC12).

Die Überdeckungen für die XRC-Klassen wurden gegenüber der prEN1992-1-1:2024 wurden signifikant verringert und liegen auf dem Niveau von [8]. Anstatt wie hier vorgeschlagen, die Anforderungen an die Ausführungsqualität in SN EN 13670 für spezifische Situationen zu regeln (zu erhöhen), geben sie bis je ERC und Expositionsklasse für bis zu drei verschiedene Nachbehandlungsklassen Überdeckungen an. D.h. für beispielsweise die XRC7 in Expositionsklasse XC4 kann die minimale Überdeckung 15 mm betragen, wenn die Nachbehandlungsklasse 4 zum Ansatz kommt, bei der Nachbehandlungsklasse 3 muss die minimale Überdeckung 25 mm aufweisen und bei der Nachbehandlungsklasse 2 muss die minimale Überdeckung 30 mm betragen.

Die Klassifizierung des Betons erfolgte Anhand EN12390-10 Chamber test. Eine Korrelation zur Schnellkarbonatisierung liegt bisher nicht vor. Die Grenzwerte für den Karbonatisierungswiderstand sind nahezu identisch mit den Grenzwerten in dieser Arbeit, wenn statt der Schnellkarbonatisierung die Resultate aus EN12390-10 Chamber test zur Klassifizierung herangezogen werden.

Für die Expositionsklasse XD1/XS1 wurden drei XRDS-Klassen (XRDS2, XRDS5 und XRDS10) ausgewählt.

Die Überdeckung wurden für die XD1/XS1 Exposition gegenüber der EN 1992-1-1 nicht verändert. Jedoch wurden die Überdeckungen jeweils abgemindert, wenn die Nachbehandlungsklasse 3 oder 4 verwendet wird. In SIA262 wird bereits eine erhöhte oder hohe Anforderung an die Nachbehandlung gestellt, weshalb in dieser Arbeit bzw. in [8] die Überdeckungen geringer sind.

Die Klassifizierung des Betons erfolgt Anhand der Deutschen Migrationsprüfung $D_{RCM,28\text{day}}$. Wobei der Faktor zwischen XRDS und $D_{RCM,28\text{day}}$ 0.3 beträgt. In unseren Untersuchungen war XRDS nur 0,9-mal CW. Dies liegt an dem Ansatz eines weit konservativeren Age-Exponenten in unseren Untersuchungen.

Skandinavische Länder:

Norwegen, Dänemark, Island, Finnland und Schweden [23-26] arbeiten derzeit gemeinsam an einem ERC-Konzept für diese skandinavischen Staaten. Das Performance basierte ERC-Konzept danach für alle XC, XD und XS-Expositionsklassen umgesetzt. Für XA, XF und XM-Expositionsklassen wird erwartet, dass ebenfalls ERC Klassen XRA, XRF und XRM eingeführt werden. Diese werden jedoch mit deskriptiven Anforderungen an die Betonzusammensetzung und vermutlich nicht mit leistungsbasierten Anforderungen beschrieben.

Im Falle Korrosion infolge Karbonatisierung (Expositionsklassen XC) schlagen sie 10 XRC-Klassen vor, wobei die höchste Klasse XRC15 ist und die niedrigste XRC0.5.

Genauso wie in [2] bzw. dieser Arbeit werden in den XC-Expositionen die im Eurocode 2 sehr konservativ gewählten hohen Überdeckungen verworfen und nationale, geringere Überdeckungen, basierend auf den vorherrschenden Klimabedingungen erarbeitet.

Die Klassifizierung von Beton in XRC-Klassen erfolgt mittels EN 12390-10 [2] chamber test in einer Erstprüfung (Initial Type Testing ITT), wobei zusätzlich eine Korrelation mit der Schnellprüfung nach EN 12390-12 [27] erarbeitet wurde. Der Grenzwert der Karbonatisierungsrate nach EN 12390-10 [2] zur Klassifizierung von Beton in XRC-Klassen ist strenger als in dieser Arbeit. Beispielsweise XRC4 erfordert eine maximale Karbonatisierungsrate nach EN 12390-10 von 2 mm/Jahr^{0.5}. Diese Differenz ist auf den Ansatz eines CoV von 30% und eine Abminderung für die Ausführungsqualität zurückzuführen. Dieser CoV beinhaltet Material-, Klima-, Ausführungs- und Prüfstreuungen. Demgegenüber wurde im Schweizer Konzept kein CoV angesetzt. Die Streuung der Karbonatisierungsrate infolge Material-, Klima- und Ausführungsschwankungen wurden bei der Berechnung der Bewehrungsüberdeckung berücksichtigt. Ferner sichert die in CH implementierte FPK für Dauerhaftigkeits-eigenschaften die gleichbleibende Qualität des Betons ab.

Für Korrosion bei Chlorideinwirkung (Expositionsklassen XD und XS) schlagen sie 14 Klassen vor, wobei die höchste Klasse XRDS20 ist und die niedrigste Klasse XRDS0.5.

Es wird vermutet, dass auch die Überdeckungen in den XD/XS Expositionen von den Vorschlägen des FprEN1992-1-1 [1] abweichen werden.

Die Klassifizierung von Beton in XRDS-Klassen erfolgt mittels EN 12390-11. Ferner wurde eine Korrelation zwischen EN 12390-11 und Schnellprüfung nach EN 12390-18 erarbeitet. Die Klassifizierung erfolgt für vier Age-exponenten. Da auch hier ein CoV von ca. 45% für die Erstprüfung ansetzen und dafür auf die FPK verzichten, sind die Grenzwerte für den Diffusionskoeffizienten etwas strenger als in dieser Arbeit.

1.2 Leistungsnachweis

Die Prüfung der Konformität von Beton mit den `Schweizer Dauerhaftigkeitsanforderungen` Karbonatisierungswiderstand bzw. Chloridwiderstand erfolgt in der Referenzprüfung nach SIA 262/1 Anhang I bzw. Anhang B [4].

Die Konformität mit den ERC-Anforderungen erfolgt in den Referenzverfahren EN 12390-10 (Karbonatisierung `Chamber Test`) [2] bzw. EN 12390-11 (Chloriddiffusion) [3]. Diese beiden Prüfnormen entsprechen der Definition der XRC bzw. XRDS-Klasse. Da die Prüfnormen, die als Referenzverfahren gelten, eine Prüfdauer von maximal ein bis zwei Jahren aufweisen anstelle von 50 Jahren gemäss XRC- bzw. XRDS-Definition ist eine Hochrechnung auf die ERC-Designation nötig.

Da die (natürlichen) Prüfungen nach EN 12390-10 bzw. -11 [2, 3] für baupraktische Belange aufgrund der langen Prüfdauer schwer umzusetzen sind, können auch Nicht-

Referenzverfahren mit Vorgaben am Ort der Verwendung genutzt werden, solange die Leistungsfähigkeit des Betons am Verwendungsort nicht geringer ist als nach ERC.

1.3 Leistungsindikatoren

Sowohl die Karbonatisierung des Betons als auch das Eindringen von Chloriden in den Beton ist massgebend abhängig von seiner tortuosen Porosität und der Bindekapazität der verwendeten Materialien. Der w/z -, w/b - bzw. $w/z_{\text{äq}}$ -Wert beschreibt indirekt die Porosität des Betons. Den Karbonatisierungs- bzw. den Chloridwiderstand über den w/z -Wertes, w/b -Wertes oder des $w/z_{\text{äq}}$ -Wertes zu beschreiben, wird bis heute angewendet. Anzumerken ist, dass das Bestimmtheitsmass der Korrelation bereits im Labor geringer ist, da die (CO_2 - bzw. Chlorid-) Bindekapazität des Betons als zweiter die Transportgeschwindigkeit bestimmender Faktor unberücksichtigt bleibt [28].

Alternativ dazu werden Eigenschaften, die die Durchlässigkeit des Betons indirekt beschreiben, wie z.B. die Gaspermeabilität [z.B. 29], der Elektrolytwiderstand [z.B. 30] oder die Betondruckfestigkeit [z.B. 31] verwendet. Als präziserer Leistungsindikator wurde der $w/\text{CaO}_{\text{reactive}}$ von [7] in [28, 32] identifiziert ($w/\text{CaO}_{\text{reactive}}$ = Wassergehalt / reaktivem CaO Gehalt). Der reaktive CaO Gehalt ergibt sich darin aus dem gemessenen CaO Gehalt unter Abzug des in CaCO_3 gebundenen CaO. *Abb.10* zeigt den Karbonatisierungswiderstand nach SIA 262/1 Anhang I in Abhängigkeit der 28 Tage Würfeldruckfestigkeit und *Abb.11* in Abhängigkeit des $w/\text{CaO}_{\text{reactive}}$.

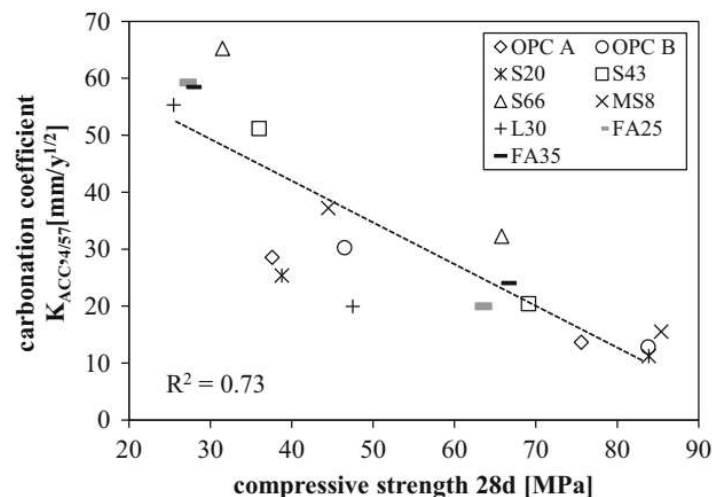


Abb.10 Karbonatisierungswiderstand ermittelt nach SIA 262/1 Anhang I in Abhängigkeit der Druckfestigkeit [7]

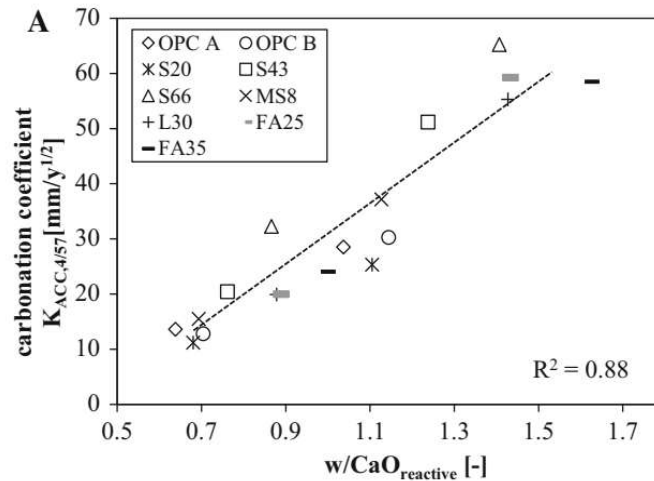


Abb.11 Karbonatisierungswiderstand in Abhängigkeit des $w/CaO_{reactive}$ [7]

Für die Beschreibung des Chloridwiderstand von untersuchten NPK-C Betonen wurde in [33] der w/SiO_2 bzw. $w/(SiO_2+Al_2O_3)$ identifiziert. *Abb.12* zeigt den Chloridwiderstand in Anlehnung an SIA 262/1 Anhang B in Abhängigkeit des w/SiO_2 und des $w/(SiO_2+Al_2O_3)$ ohne Berücksichtigung des Hydratationsgrads, d.h. ohne Abzug des noch nicht reagierten Klinkers, der zur Chloridbindung ggf. nicht zur Verfügung steht. Der hohe Einfluss der Chloridbindung auf den Chloridwiderstand wird auch in [34] bestätigt.

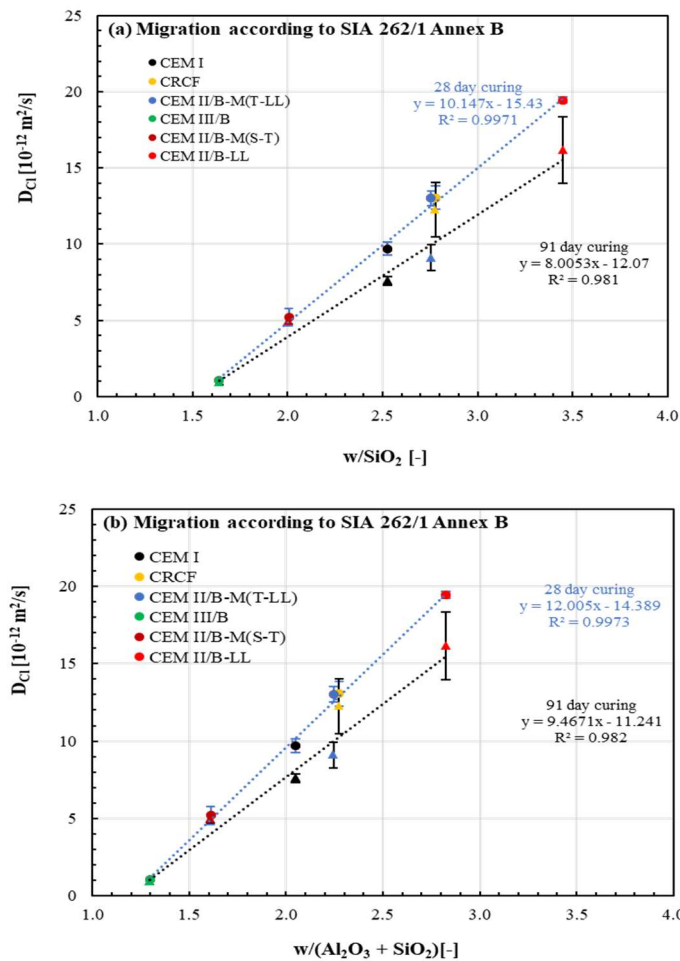


Abb.12 Abhängigkeit des Chloridwiderstand ermittelt in Anlehnung an SIA 262/1 Anhang B (a) in Abhängigkeit des w/SiO_2 und (b) des $w/(SiO_2+Al_2O_3)$ [33]

Beide Indikatoren können den Chloridwiderstand gut beschreiben, wobei die Nachbehandlungsdauer einen wesentlichen Einfluss auf die Geradengleichung hat. Bei der Migration ist der Einfluss des Al_2O_3 , d.h. die chemische Chloridbindung durch Umwandlung von Afm in Friedel's Salz, auf das Bestimmtheitsmass vernachlässigbar gering.

Abb.13 zeigt den Chloridwiderstand in Anlehnung an SIA 262/1 Anhang B einmal geprüft nach 28 Tagen Nachbehandlung und einmal geprüft nach 90 Tagen Nachbehandlung in Abhängigkeit der Würfeldruckfestigkeit nach 28 Tagen bzw. der Würfeldruckfestigkeit nach 90 Tagen und des spezifischen Elektrolytwiderstand, gemessen nach ca. 90 Tagen Wasserlagerung.

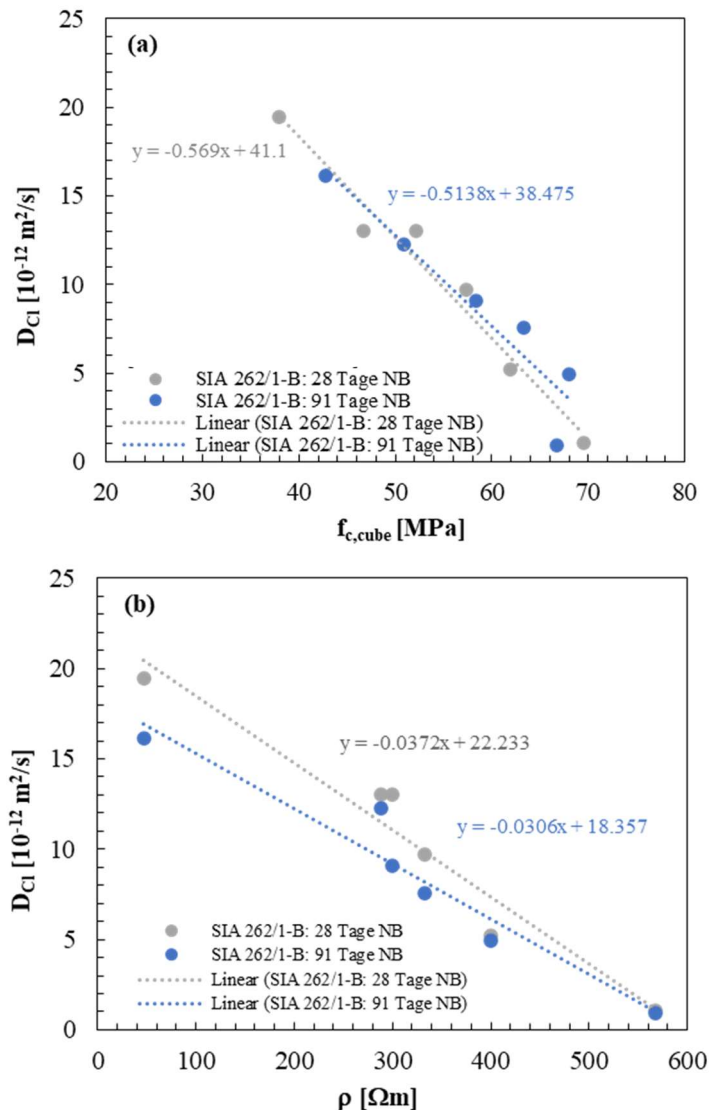


Abb.13 Abhängigkeit des Chloridwiderstand ermittelt in Anlehnung an SIA 262/1 Anhang B (a) in Abhängigkeit der Druckfestigkeit und (b) des spezifischen Elektrolytwiderstands aus Daten von [33]

Mit zunehmender Druckfestigkeit und zunehmendem spezifischen Elektrolytwiderstand nimmt der Chloridwiderstand zu bzw. der Migrationskoeffizient ab. Aufgrund der zeitlichen Abweichung zur EN 12390-19 [35] ist eine direkte Ableitung der XRDS hier nicht möglich. Weiter Forschungsarbeiten sind empfehlenswert.

2 Untersuchungsmatrix

2.1 Betonzusammensetzung

2.1.1 Gesteinskörnung

Für die Betone nach SN EN 206 [5] und SIA-Merkblatt 2030 [15] wurden sowohl herkömmliche Gesteinskörnung aus 0-2 Quarzsand, 0-4 Brechsand als auch RC-Gesteinskörnung verwendet. *Tab. 1* zeigt die Körnungen der Sand- und Kiesgemische sowie RC-Granulat Gemische für den Normal- und den RC-C Beton. Das RC-Granulat wurde von Lenz Kies AG bereitgestellt. In der Rezeptur wurde der W_G des Betongranulats zu 100% zugegeben. Weiterführende Literatur zu RC-Beton findet sich in [36].

Tab. 1 Gesteinskörnung

Beton	0-2	0-4	4-8	8-16	16-32	RC 0-22
Normal-Beton	19	19	19	19	24	0
RC-C Beton	17	5	7	10	12	49
WA24 [%]	0.66	0.81	0.99	0.85	0.78	4.5

Zur Herstellung einer homogenen Mischung mit geringem Leimanspruch wurde eine Sieblinie innerhalb A-B bzw. der SN EN 12620 [37] Grenzen gewählt. Die gewählte Sieblinie ist in *Abb. 14* angegeben. Es wurde darauf geachtet möglichst ähnliche Sieblinien für (Betone mit) normaler Gesteinskörnung und (Betone mit) recycelter Gesteinskörnung zu erhalten.

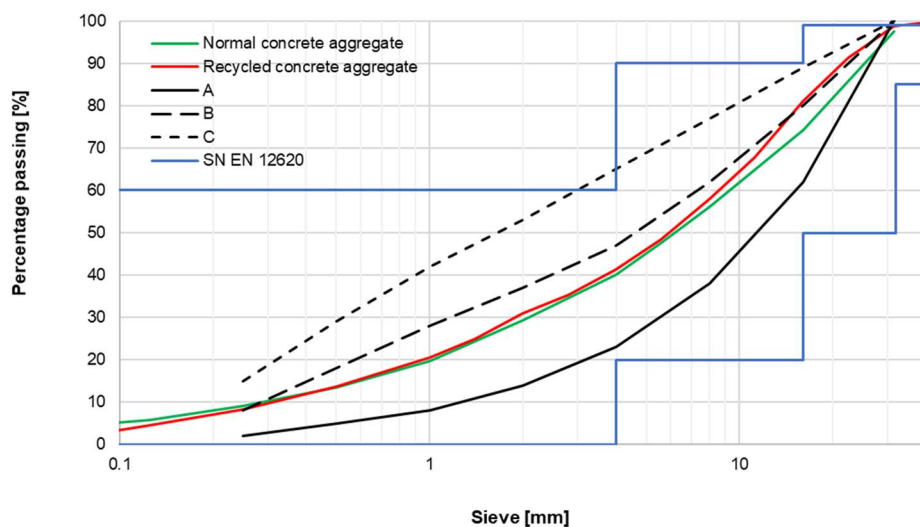


Abb. 14 Sieblinie gewählt für Normalbeton (grün), Recyclingbeton (rot) und Normvorgaben nach SN EN 12620 [37] (blau) bzw. nach Fuller die Sieblinien A, B und C (schwarz)

Die Sieblinien wurden so gewählt, dass sie zwischen A und B bzw. mittig nach SN EN 12620 [37] liegen. Ferner wurden die Sieblinien so gewählt, dass die des Normalbetons ähnlich der Sieblinie des RC-C Betons ist.

2.1.2 Zement

Tab. 2 zeigt die verwendeten Zemente und ihre chemische Zusammensetzung bestimmt mittels XRF. Ebenfalls angefügt sind die Feinheit nach Blaine, die Rohdichte sowie die durchschnittliche Festigkeitsentwicklung r als Verhältnis von 3 zu 28 Tage Druckfestigkeit. Die Informationen zur chemischen Zusammensetzung, Blaine Werte, Rohdichten und Festigkeitsentwicklung wurden von Holcim Schweiz AG bzw. Jura Cement Fabriken zur Verfügung gestellt. Einzelne Werte wurden durch die TFB AG bestimmt, wie z.B. der CaCO_3 -Gehalt.

Tab. 2 Zement

Oxides wt.-% mittels XRF	CEM I 52.5 R	CEM II/C-M(F-T) 42.5N (ZN/D)	CEM II/C-M (Q-LL) 42.5N	CEM II/A-LL 42.5N	CEM II/B-LL 32.5R	CEM III/B 32.5N LH/SR
SiO ₂	20.59	(26.76) 19***	19*	16.7	15.3	30.5
Al ₂ O ₃	4.86	5.89	5.8	4.2	3.9	8.1
Fe ₂ O ₃	3.27	3.47	3.2	2.6	2.4	1.4
CaO	62.65	50.3	52	61.7	60.3	47.8
CaO(-CaCO ₃)*	59.85	43.59	48.02	51.50	45.13	47.2 (38.5**)
MgO	2.37	2.39	4.3	1.6	1.4	5.5
SO ₃	3.8	0.09	2.8	3.0	3.0	3.9
K ₂ O	0.94	1.16	1.1	0.8	0.7	0.078
Na ₂ O	0.82	0.37	-	-	-	0.25
Cl	0.029	0.024	0.01	0.03	0.03	0.012
CaCO ₃	1.42	11.99	7.11	18.22	27.09	1
LoI	-	-	5.1	8.9	12.8	-
Blaine cm ³	4200	6200	5400	4100	4800	-
Density [g/cm ³]	3.14	2.99	3.05	3.05	3.00	2.95
$r(2/28)$ [-]	0.5-0.7	0.45-0.55	0.5	0.5	0.53	0.25-0.35

* Reactive CaO used to calculate w/CaO ** CaO in SIA 262/1 Annex I test reduced by the degree of hydration of 0.8 and used to calculate w/CaO*** reactive SiO₂ used to calculate w/SiO₂ and w/(SiO₂ +Al₂O₃)

2.1.3 Mischungsmatrix und Betonherstellung

Die Mischungsmatrix wurde mit folgenden Untersuchungszielen entwickelt:

- Ableiten einer Korrelation zwischen SIA 262/1 Prüfungen und EN 12390 [37] Prüfungen
- Klassifizieren bei CH-Dauerhaftigkeitsanforderungen:
 - Welche ERC-Klassen decken wir in der Schweiz mit NPK-Betonen ab?
- Klassifizieren bei Expositionsclassen ohne CH-Dauerhaftigkeitsanforderungen?
 - Wo läge der CH-Grenzwert und was wäre die korrespondierende ERC-Klasse?

Als Referenz dienten uns die Sorten entsprechend Expositionsclassen, d.h. es wurden NPK-Betone hergestellt. Es wurde aber darauf geachtet den Schwerpunkt auf nachhaltigere Zemente zu legen, da diese zukünftig vermehrt zum Einsatz kommen. Ferner wurde zur Berücksichtigung von Kreislaufwirtschaft RC-C25 in Anlehnung an das Merkblatt 2030 aufgenommen. Auf die Prüfung von Beton mit künstlichen Luftporen wurde verzichtet und sollte in anschliessenden Arbeiten untersucht werden.

Um obige Arbeiten durchführen zu können wurden die Mischungen und Zemente wie folgt zusammengestellt:

- (1) Alle relevanten Expositionsklassen sind mit Sorten abzudecken
- (2) Je relevanter Sorte sind maximale, mittlere und minimale Widerstände zu erhalten → Klassifizierung
- (3) Über die gesamte Bandbreite an Sorten A bis F sind je Mechanismus maximale, mittlere und minimale Widerstände zu erhalten → Korrelation
- (4) Doppelbestimmung der EN-Prüfung für einen niedrigen, mittleren und hohen Widerstand → Korrelation, Klassifizierung
- (5) Je Einwirkung (Karbonatisierung/Chlorid) Zemente mit schneller mittlerer und langsamer Festigkeitsentwicklung zu berücksichtigen → Korrelation

Für die Expositionsklasse XC1 bzw. X0(CH), d.h. die Sorte 0 ohne Anforderungen an den Maximalen w/z und Mindestzementgehalt, wurden die Anforderungen in XC1 anderer Länder verglichen (Abb. 15), um davon Anforderungen für die Sorte 0 abzuleiten.

Expositionsklasse	XC1	A1 = XC1	XC1	XC1	XC1	XC1	XC1	I = XC1
Länder	Deutschland	Australien	Dänemark	Nowegen	Portugal	Niederlande	Großbritannien	Spanien
max. w/z [-]	0.75	0.75	0.75-0.80	0.6	0.65	0.65	0.7	0.65
min. Druckfestigkeit	C16/20	20	C12/15	NR	C25/30	NR	C20/25	C20/25
min. Zementgehalt [kg/m ³]	240	200-240	200-240	250	240/260	260	240	200
Betondeckung c _{min} [mm]	10	20	10	15	15	15	15	15
c _{nom} [mm]	20		15	25	25	20	30	25

Abb.15 Deskriptive Anforderungen an den Beton in verschiedenen Ländern [9]

Tab. 3 zeigt die gewählten Mischungen. Das Ziel war es ein Ausbreitmass zwischen 420 und 480 mm (Konsistenzklasse C3) möglichst einzuhalten. Dafür wurde zum Teil Fließmittel eingesetzt. Bei einem Teil der Mischungen wurde das Ausbreitmass leicht überschritten.

Tab. 3 Mischungsmatrix

Name	Herstellung	Sorte	w/z [-]	Bindemittel Typ	Bindemittel [kg/m ³]	Gesteins- körnung	FM ViscoCrete 4097 [wt.-%/Zement]
M01	16.07.2024	0	0.75	CEM I	240	NA	0
M02	16.07.2024		0.75	CEM II/C-M(Q-LL)	240	NA	0
M1	12.09.2023	A	0.65	CEM I	280	NA	0
M2	14.09.2023		0.65	CEM II/C-M(F-T)	280	NA	0
M13	19.09.2023		0.66*	CEM II/A-LL	300	RCA	0.8
M14	19.09.2023		0.66*	CEM II/C-M(F-T)	300	RCA	0.3
M3	19.09.2023	B	0.65	CEM II/C-M(Q-LL)	280	NA	0
M5	12.09.2023		0.65	CEM II/B-LL	280	NA	0
M4	19.09.2023		0.6	CEM II/C-M(Q-LL)	280	NA	0.2
M11	26.09.2023		0.6	CEM II/A-LL	280	NA	0
M12	26.09.2023		0.5	CEM III/B	300	NA	0.3
M16	14.09.2023		0.5	CEM II/A-LL	300	NA	0.2
M15	14.09.2023	C - D	0.5	CEM II/C-M(F-T)	300	NA	0
M17	26.09.2023		0.5	CEM II/B-LL	300	NA	0.3
M7	26.09.2023	F	0.45	CEM III/B	320	NA	0.4
M8	14.09.2023		0.45	CEM I	320	NA	0.2
M8W	09.11.2023		0.45	CEM I	320	NA	0.2
M9	12.09.2023		0.45	CEM II/C-M(F-T)	320	NA	0.7
M10	26.09.2023		0.45	CEM II/C-M(Q-LL)	320	NA	0.4

* Die Zugabe des gesamten W_G zur Mischung hat zu einer Erhöhung des w/z-Wertes von 0.5 (Sorte C) zu 0.66 (Sorte A) geführt. Auch die 28 Tage Würfeldruckfestigkeiten liegen eher im Bereich Sorte A als Sorte C. Deshalb wurden die RC-Betone der Sorte A zugeordnet

Tab. 4 fasst die Resultate der Frischbetonkontrolle zusammen. Obwohl bei den Mischungen M2 und M5 auf die Fließmittelzugabe verzichtet wurde, lag das Ausbreitmass weit über 480 mm, sodass diese Betone der Konsistenzklasse C4 anstelle von C3 zugeordnet werden müssen. Bei der Mischung M9 wurde Fließmittel überdosiert, was zu dem hohen Ausbreitmass führte. Der Luftporengehalt und die Frischbetonrohddichte sind vom Ausbreitmass unbeeinflusst. Der Frischbetonluftporengehalt nimmt mit zunehmendem FM-Gehalt tendenziell zu. Der Luftporengehalt liegt bei allen Mischungen zwischen 0.4% und 1.6% und die Rohddichte zwischen 2328 kg/m³ und 2430 kg/m³ und nimmt mit der Sorte von A nach F zu. Eine Ausnahme bilden die RC-25 Mischungen. Hier ist der Frischbetonluftporengehalt mit 1.7 bis 2.0% höher und die Frischbetonrohddichte mit 2234 bzw. 2239 kg/m³ geringer.

Tab. 4 Resultate Frischbetonkontrolle

Mischung	Betonsorte	Frischbeton-temperatur [°C]	Frischbeton-rohddichte [kg/m ³]	Frischbeton-luftporen [%]	Ausbreitmass [mm]
M01	0	21	2393	1.3	540
M02	0	21	2387	1.3	490
M1	A	18	2376	0.4	480
M2	A	20	2342	1.4	510
M3	A	21	2361	0.9	470
M4	B	17	2364	1.2	450
M5	A	19	2328	0.8	550
M7	F	17	2408	0.8	530
M8	F	19	2383	0.8	480
M9	F	23	2430	0.7	560
M10	F	16	2388	1.1	440
M11	B	17	2365	1.0	480
M12	C	25	2372	1.8	410
M13_RC	A*	23	2239	1.7	470
M14_RC	A*	21	2234	2.0	430
M15	C	21	2369	1.2	490
M16	C	22	2384	1.6	430
M17	C	20	2356	1.9	440
M8W	F	12	2407	1.0	470

* Die Zugabe des gesamten W_G hat zu einer Erhöhung des w/z-Wertes von 0.5 (Sorte C) zu 0.66 (Sorte A) geführt. Die 28 Tage Würfeldruckfestigkeiten liegen im Bereich Sorte A. Deshalb wurden die RC-Betone der Sorte A zugeordnet.

Abb. 16 zeigt Fotos der Betonherstellung (a) Ausbreitmass zwei unterschiedlicher Sorten (b) eine Mischung.



Abb. 16 (a) Ausbreitmass (b) Mischung

2.1.4 GWP der Mischungen

Tab. 5 zeigt das abgeschätzte GWP (A1-A3 nach SN EN 15804+A2 [38]) der einzelnen Mischungen ausgehend von den Rohmaterialien. Die Angaben für das GWP der Rohstoffe wurden folgenden Quellen entnommen [39-51]. Damit sind diese GWPs Minimal- und Maximalwerte aus dieser internationalen Literaturrecherche. Die GWPs sind geringfügig tiefer als die Grenzwerte in der schwedischen Richtlinie zum Nachhaltigen Betonbau [52].

Tab. 5 GWP [$\text{kg CO}_2/\text{m}^3$]

Mix	Sorte	GWP-GK		GWP-Zement		GWP-FM		GWP-Wasser		GWP-Mix	
		min	max	min	max	min	max	min	max	min	max
M01	0	7.1	18.8	183	199	0.00	0.00	0.04	0.47	190	219
M02	0	7.0	18.7	95	132	0.00	0.00	0.04	0.47	112	151
M1	A	6.9	18.4	214	233	0.00	0.00	0.04	0.47	221	252
M13_RC	A*	2.7	7.7	177	212	1.73	0.45	0.04	0.51	181	221
M5	A	6.9	18.3	141	166	0.00	0.00	0.04	0.47	148	184
M2	A	6.9	18.3	111	154	0.00	0.00	0.04	0.47	147	183
M14_RC	A*	2.7	7.7	119	165	0.65	0.17	0.04	0.51	154	184
M3	A	6.9	18.3	111	154	0.00	0.00	0.04	0.47	130	173
M11	B	7.0	18.7	165	198	0.00	0.00	0.03	0.44	172	217
M4	B	7.0	18.7	111	154	0.40	0.11	0.03	0.44	130	173
M16	C	6.8	18.5	177	212	0.00	0.00	0.03	0.39	184	231
M17	C	6.8	18.4	152	177	0.65	0.17	0.03	0.39	159	196
M15	C	6.8	18.4	119	165	0.43	0.11	0.03	0.39	158	195
M12	C	7.1	18.9	86	133	0.65	0.17	0.03	0.39	93	152
M8	F	7.2	19.1	244	266	0.46	0.12	0.03	0.37	252	285
M9	F	7.1	18.9	126	176	1.61	0.42	0.03	0.37	169	207
M10	F	7.2	19.0	126	176	0.92	0.24	0.03	0.37	148	196
M7	F	7.1	18.9	91	141	0.92	0.24	0.03	0.37	99	161

* Die Zugabe des W_G hat zu einer Erhöhung des w/z-Wertes von 0.5 (Sorte C) zu 0.66 (Sorte A) geführt (jedoch mit einem Zementgehalt von 300 kg/m^3), bestätigt durch die 28 Tage Würfeldruckfestigkeiten, die im Bereich der Sorte A liegen. Deshalb wurden die RC-Betone in Sorte A umbenannt

Abb. 17 zeigt die gewählten Mischungen getrennt nach Sorte und die Abschätzung ihres GWPs aus [39-51] als einer der Parameter, der die Nachhaltigkeit massgebend bestimmt und gleichzeitig integral von der Betonzusammensetzung insbesondere der Zementart beeinflusst wird. Grün dargestellt sind die Betone, die mit einem maximalen GWP von $\leq 200 \text{ kgCO}_2/\text{m}^3$ von uns in Anlehnung an [49-51] als `nachhaltig` deklariert wurden. Bei den

Betonmischungen mit recyceltem Feinanteil, wurde der Anteil RC Material mit null CO_2 angesetzt. Der Anteil an CO_2 , der durch die Karbonatisierung des recycelten Feinanteils aufgenommen wurde, wurde vom Bindemittel abgezogen. Der aufgenommene Anteil an CO_2 wurde anhand des gebundenen CO_2 im CaCO_3 Gehalt des CEM II/C-M(F-T) abzüglich des abgeleiteten CaCO_3 Gehalt aus Kalkstein zu 14,8, 15,8 bzw. 16,9 kgCO_2/m^3 für die Sorten A, C bzw. F berechnet. Um den CaCO_3 Gehalt aus Kalkstein abzuschätzen, wurden die Anteile der Einzelkomponenten Ölschiefer und CEM I durch Vergleich der nicht Ca enthaltenen Oxide abgeschätzt. Beim RC-Granulat wurde in Anlehnung an [50, 52] das Betongranulat mit 85% weniger CO_2/m^3 als beim Brechsand angesetzt, um seine CO_2 Bindung mit zu berücksichtigen.

Ferner wird als Referenzmischung für die Schweiz hier die Sorte C mit CEM II/A-LL (M16) deklariert.

Es ist festzuhalten, dass die GWPs aller Mischungen um rund 50-100 kgCO_2/m^3 geringer sind als die Analysen bzw. Anhaltswerte in [39-52]. Beispielsweise die Branchenreferenz in der XD3 Exposition weist in [49-51] ein GWP von im Mittel 350 kgCO_2/m^3 auf, während unser CEM I Beton der Sorte F (XD3) zwischen bei im Mittel 270 kgCO_2/m^3 liegt.

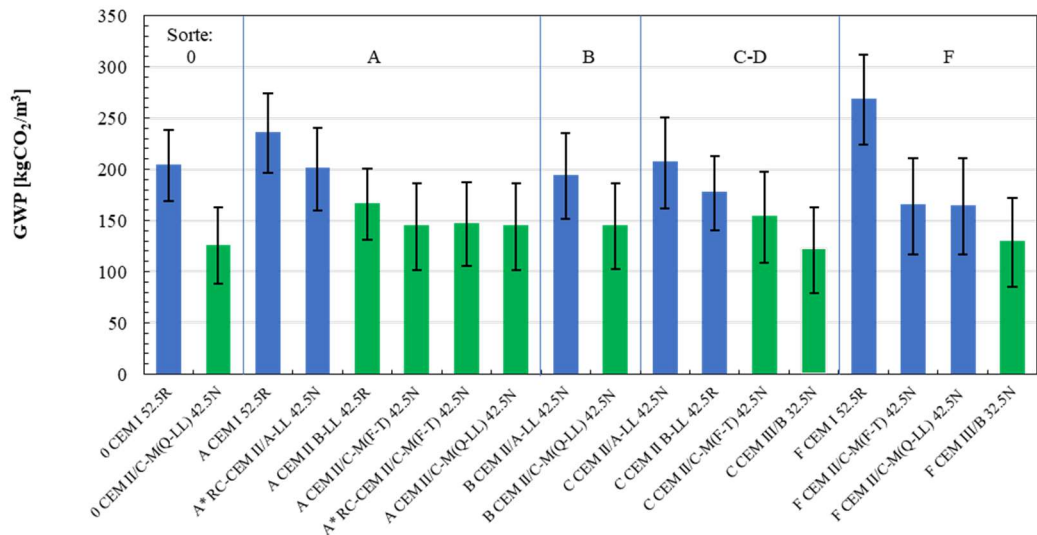


Abb.17 mittlere, minimale und maximale GWPs der Mischungen getrennt nach Betonsorte 0, A, B, C-D bzw. F

Mit zunehmendem Zementgehalt und damit von der Sorte A, bis Sorte F nimmt das Niveau des GWP zu, da der Zementgehalt zunimmt. Mit zunehmendem Klinkerersatz innerhalb einer Sorte nimmt das GWP von CEM I über CEM II/A, CEM II/B und CEM II/C bis CEM III/B ab. Das ähnliche Niveau des GWP der Mischungen mit CEM II/C-M(F-T) und CEM II/C-M(Q-LL) liegt an der Annahme, dass recyciertes Feinmaterial des CEM II/C-M(F-T) karbonatisiert ist, welches positiv in die CO_2 Bilanz aufgenommen wurden (vom $\text{CO}_{2\text{eq}}$ des Zements abgezogen wurde) um den positiven Einfluss in Bezug auf Kreislaufwirtschaft zu berücksichtigen. Dennoch fällt dieser positive Effekt des Anteils karbonatisierten RC-Granulat kaum ins Gewicht.

2.1.5 Leistungsindikatoren

Tab. 6 stellt die Leistungsindikatoren aus Kapitel 2.1.2 für die Mischungen, d.h. in Abhängigkeit der Betonsorte (Wassergehalt und Zementgehalt) sowie der chemischen Zusammensetzung des Zements und dem Hydratationsgrad (Kapitel 3.1) zusammen. Als Leistungsindikatoren im Falle Karbonatisierung wurde w/CaO und der w/CaO_r gewählt. Hintergründe sind in [7] dargelegt. Der w/CaO_r ($w/\text{CaO}_{\text{reactive}}$) wurde unter Abzug des CaO im Kalkstein berechnet. Der w/CaO_{r3} bzw. w/CaO_{r28} ($w/\text{CaO}_{\text{reacted}}$) wurde unter Abzug

des CaO im Kalkstein und unter Berücksichtigung des Hydratationsgrads (nach 3 Tagen bzw. 28 Tagen) berechnet.

Die dominanten Materialparameter bei Chlorideintrag sind die Porosität und Chloridbindefähigkeit des Betons. Massgebend können dann der w/z-Wert, der Al₂O₃ und der SiO₂ Gehalt sein. Der Al₂O₃ Gehalt bestimmt den AFm Gehalt. Chloride können durch Umwandlung von AFm in Friedel'schem Salz chemisch gebunden werden und stehen dann weder für den Weitertransport noch für die Korrosionsinitiierung zur Verfügung. Da Chloride auch physikalisch in den C-(A)-S-H Phasen gebunden werden können, steht der SiO₂ Gehalt stellvertretend für die Menge an physikalisch gebundenen Chloriden. Die Bindung von Al₂O₃ kann mehrere Wochen andauern, weshalb häufig auf diese Kenngrösse insbesondere für die Schnellprüfung 'Chloridmigration' verzichtet wird [33, 53]. Als Leistungsindikatoren ergeben sich dann der w/SiO₂ bzw. der w/(SiO₂+Al₂O₃) Wert. Wobei noch zu prüfen ist, wie hoch der SiO₂ Gehalt anzurechnen ist, wenn die Anteile im z.B. Monosulfat abgezogen werden [33]. Da auch für die Chloridbindefähigkeit der Hydratationsgrad des Betons zum Zeitpunkt der Prüfung eine integrale Rolle spielt, wurde auch für den Al₂O₃ und SiO₂ Gehalt der Hydratationsgrad berücksichtigt. Da alle Chlorid-Prüfungen im Betonalter von 28 Tage durchgeführt werden, wurde der Hydratationsgrad im Alter von 28 Tagen angesetzt.

Tab. 6 Leistungsindikatoren

Sorte	Zement	r ₃ /r ₉₁	r ₂₈ /r ₉₁	w/CaO	w/CaO _{r3}	w/CaO _{r28}	w/SiO _{2r}	w/(SiO ₂ +Al ₂ O ₃)r
0	CEM II/C-M(Q-LL)	0.4	0.9	1.6	2.1	1.78	4.5	3.5
	CEM I 52.5	0.7	1.0	1.3	1.5	1.39	3.8	3.1
A	CEM II B-LL 42.5R	0.6	0.9	1.4	1.88	1.61	4.5	3.6
A*	RC-CEM II/A-LL	0.6	0.9	1.3	1.58	1.43	4.3	3.4
A	CEM II/C-M(F-T)	0.5	0.9	1.5	1.92	1.67	3.7	2.8
A*	RC-CEM II/C-M(F-T)	0.6	0.9	1.5	1.92	1.68	3.7	2.8
A	A CEM II/C-M(Q-LL)	0.5	0.9	1.4	1.80	1.50	3.8	2.9
	A CEM I 52.5R	0.6	1.0	1.1	1.37	1.20	3.3	2.7
B	B CEM II/C-M(Q-LL)	0.4	0.8	1.2	1.63	1.46	3.9	3.0
	B CEM II/A-LL 42.5N	0.6	0.9	1.2	1.42	1.33	4.2	3.3
C-D	C-D CEM III/B 32.5N	0.3	0.9	1.1	1.56	1.21	1.9	1.5
	C-D CEM II/C-M(F-T)	0.6	0.9	1.1	1.46	1.27	2.8	2.1
	C-D CEM II B-LL 42.5R	0.7	1.0	1.1	1.40	1.21	3.3	2.6
	C-D CEM II/A-LL 42.5N	0.6	0.9	1.0	1.19	1.09	3.2	2.6
F	F CEM III/B 32.5N	0.2	0.8	1.0	1.40	1.11	1.8	1.4
	F CEM II/C-M(F-T)	0.6	0.9	1.0	1.25	1.18	2.7	2.1
	F CEM II/C-M(Q-LL)	0.5	0.9	0.9	1.19	1.07	2.7	2.1
	F CEM I 52.5R	0.5	0.9	0.8	0.98	0.83	2.4	1.9

Abb.18 zeigt die Leistungsindikatoren die zur Abschätzung des Karbonatisierungswiderstands relevant sind. Für den w/CaO_r als Leistungsindikator wurde lediglich der als nicht reaktiv erachtete CaO Gehalt abgezogen. Für den w/CaO_{r3} bzw. w/CaO_{r28} wurde vom reaktiven CaO-Gehalt nur der entsprechend dem Hydratationsgrad als reaktiver Anteil angenommene CaO Gehalt berücksichtigt. Hohe Indikatoren weisen auf einen geringen Widerstand hin.

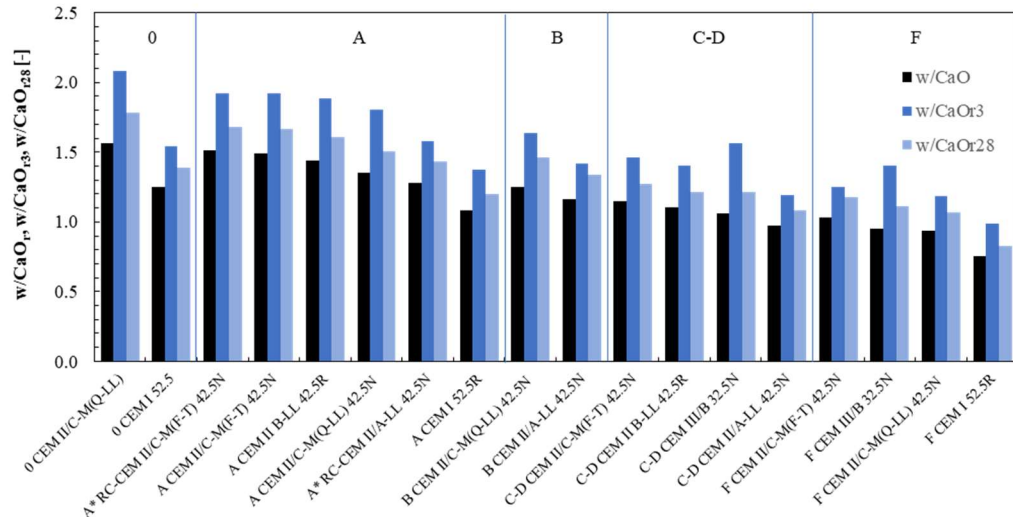


Abb.18 w/CaO zur Abschätzung des Karbonatisierungswiderstand

Deutlich wird der Einfluss des Hydratationsgrads lediglich beim CEM III/B. Ohne Berücksichtigung des Hydratationsgrads weist CEM III/B auf ein gegenüber den CEM II/C-M Betonen höheren Widerstand gegenüber Karbonatisierung hin. Unter Berücksichtigung des Hydratationsgrads (3 Tagen Nachbehandlung) weist der Leistungsindikator auf einen geringeren Widerstand des CEM III/B hin. Insgesamt weisen die Diagramme darauf hin, dass der Widerstand der Mischungen gegenüber Karbonatisierung von Sorte A nach Sorte F zunimmt.

In *Abb.19* zeigt Leistungsindikatoren zur Abschätzung des Chloridwiderstand. Ein hoher Wert für den Indikator deutet auf einen geringen Widerstand hin. Ein geringer Wert für den Indikator deutet auf einen hohen Widerstand hin.

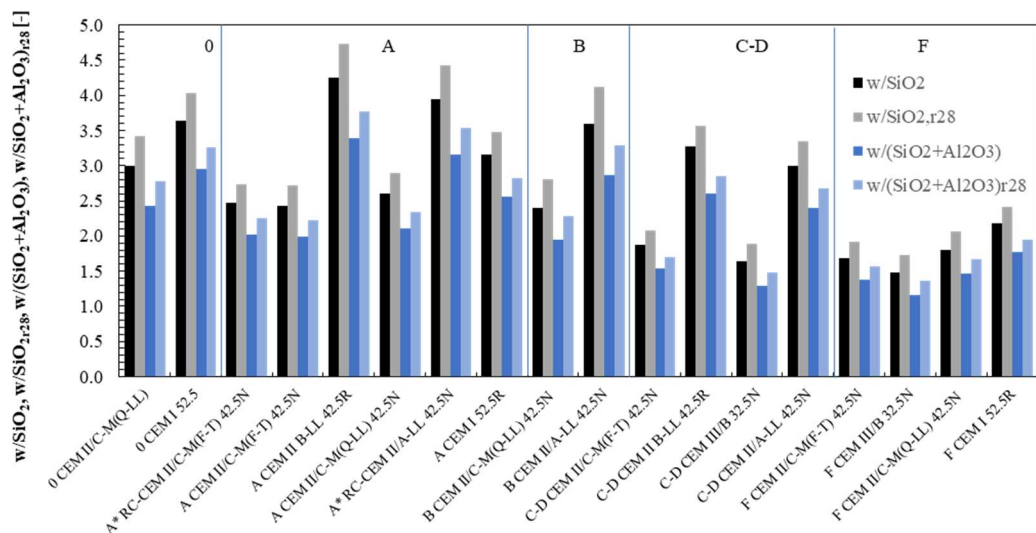


Abb.19 Leistungsindikatoren zur Abschätzung des Chloridwiderstand

Die Indikatoren bestätigen die Zunahme des Widerstands gegenüber Chlorid mit der Sorte. Dennoch deuten die Indikatoren darauf hin, dass durch puzzolanische Zusatzstoffe oder latent hydraulische Zusatzstoffe der Chloridwiderstand eines Betons der Sorte A höher ausfallen kann als der eines Betons der Sorte D mit CEM II/B-LL, d.h. nur inerten Zusatzstoffen. Durch die Berücksichtigung von Al₂O₃ ändert sich das Ranking zwischen

den verschiedenen Mischungen kaum. Genauso hat die Berücksichtigung eines geringeren Hydratationsgrads kaum Auswirkung auf das Ranking.

2.2 Aufteilung der durchgeführten Prüfungen

Die Prüfmatrix ist in *Tab. 7* angegeben. Ist als Symbol ein x eingetragen, finden die Prüfungen an der TFB statt. Ist als Symbol ein y eingetragen, finden die Untersuchungen am SUPSI statt. Ist das Symbol bei den Dauerhaftigkeitseigenschaften einmal vorhanden, findet eine Einfachbestimmung statt. Um bei der Prüfung nach SN EN 12390-10 und SN EN 12390-12 in Bezug auf Probenvolumen und insbesondere Kapazität der Klimakammer die Untersuchungen durchführen zu können, muss in den meisten Fällen auf eine Doppelbestimmung, d.h. die Einlagerung von zwei Parallelproben, verzichtet werden. In vorausgegangenen Forschungsvorhaben der cemsuisse wurde bereits festgestellt, dass die Doppelbestimmung bei Einhaltung der Anforderungen an die Lagerung der Proben in der Klimakammer keine signifikante Auswirkung auf das Prüfergebnis hat [39]. Für die Bestimmung der Vergleichspräzision wurden jedoch Doppelbestimmungen gewählt. Diese sind in der Tabelle mit der doppelten Anzahl der Symbole angegeben (z.B. xx = Doppelbestimmung).

Tab. 7 Prüfmatrix

	Mischung	Würfeldruckprüfung			SIA	SN EN	SN EN	SIA	SN EN	Alter
		3 Tage	28 Tage	91 Tage	262/1 Anhang I	12390- 10	12390- 12	262/1 Anhang B	12390- 11	
0	M01: CEM I	x	x	x	x	x	x			
	M02: CEM II/B-M(Q-LL)	x	x	x	x	x	x			
A	M1: CEM I	x	x	x	x	x				
	M2: CEM II/C-M(F-T)	x	x	x	x	x				
	M13: RC-CEM II/ALL	x	x	x	x	x		y	y	y
	M14: RC-CEM II/C-M(F-T)	x	x	x	x	x		x	x	x
	M3: CEM II/C-M(Q-LL)	x	x	x	x	xx, yy	y	x	x	x
	M5: CEM II/B-LL	x	x	x				x	x, y	y
B	M4: CEM II/C-M (Q-LL)	x	x	x	x	y		x	x	x
	M11: CEM II/A-LL		x		x	y				
C-D	M12: CEM III/B		x		x	x	y	x	x	
	M15: CEM II/C-M(F-T)	x	x	x	x	x		x	y,x	y
	M16: CEM II/A-LL	x	x	x		xx, yy		y	y	y
	M17: CEM II/B-LL		x					y	y	
F	M7: CEM III/B	x	x	x				x	x, y	x
	M8: CEM I	x	x	x	x	xx, yy	y	x	x	x
	M9: CEM II/C-M(F-T)	x	x	x	x	y				
	M10: CEM II/C-M(Q-LL)	x	x	x	x	y		y	y	y

3 Resultate

3.1 Druckfestigkeitsentwicklung

Die Druckfestigkeiten und Festbetonrohdsichten bestimmt nach 3, 28 und 91 Tagen sind in Abb. 20 angegeben. Die Rohdsichten des RC-Betons sind grün umrandet.

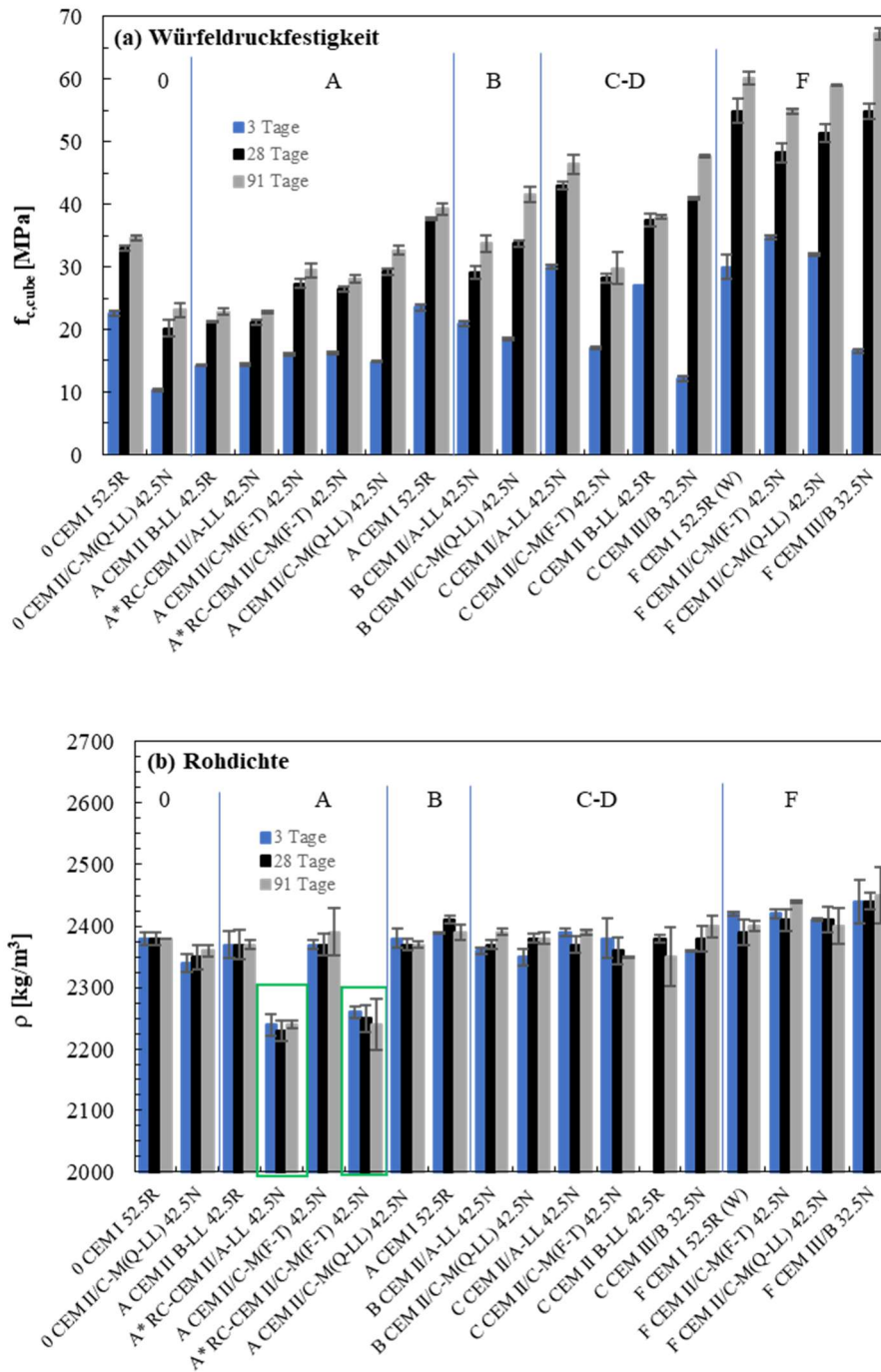


Abb. 20 (a) Würfeldruckfestigkeit und (b) Festbetonrohdsichte

Entsprechend den Sorten 0, A, B, C-D und F steigt die Festigkeit über alle Zemente an. Die Rohdsichte liegt insgesamt bei allen Mischungen und Sorten auf ähnlichem Niveau.

Lediglich die Rohdichte der RC-Mischungen ist wie erwartet auf einem niedrigeren Niveau (grünes Rechteck).

Abb. 21 (a) bis (e) vergleicht die Festigkeitsentwicklung der Zemente getrennt nach Betonsorte.

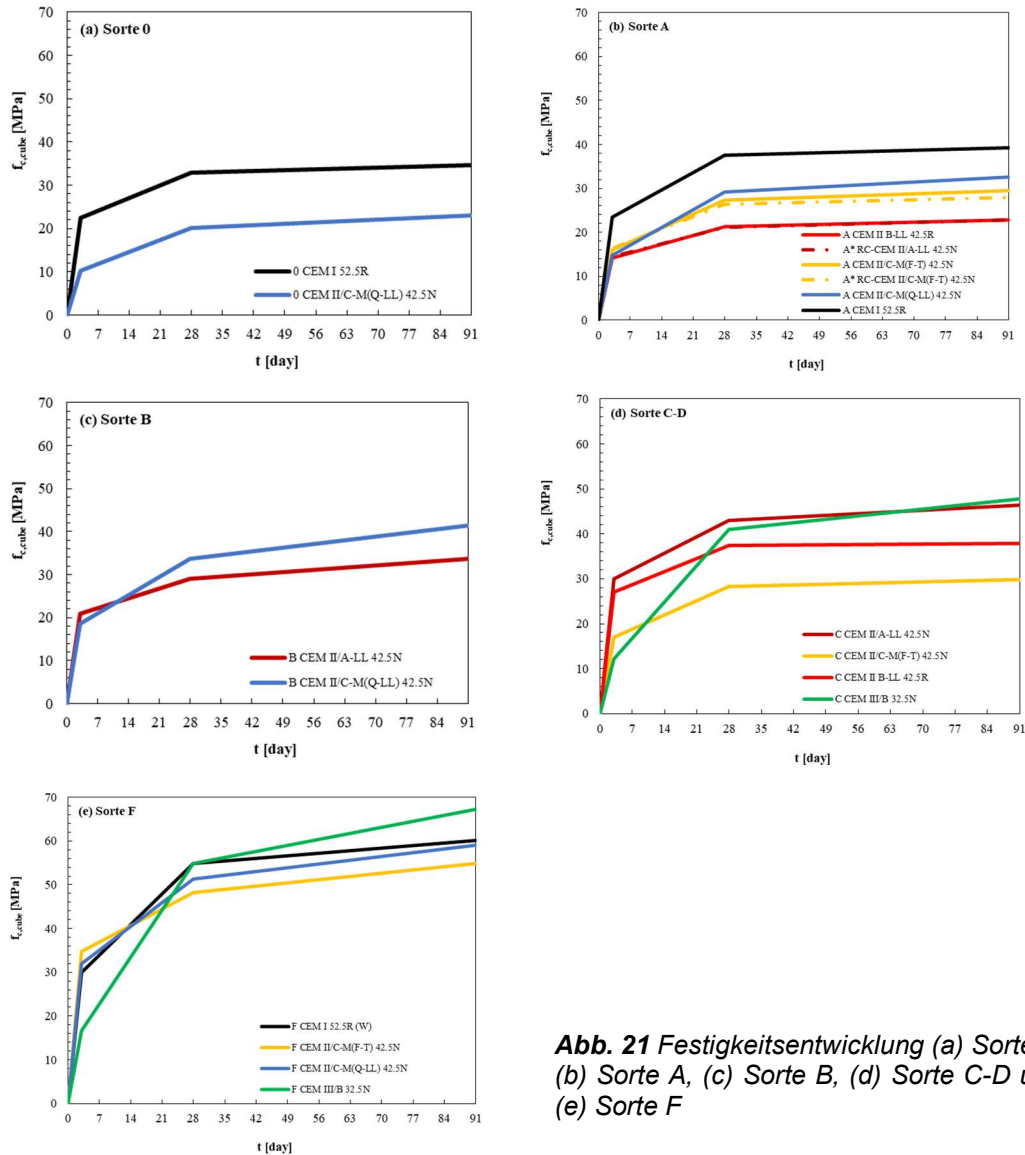


Abb. 21 Festigkeitsentwicklung (a) Sorte 0, (b) Sorte A, (c) Sorte B, (d) Sorte C-D und (e) Sorte F

Der Festigkeitsverlauf je Zementart ist ähnlich, lediglich das Festigkeitsniveau steigt mit abnehmendem w/z-Wert der Mischung an. Die 'Endfestigkeit' steigt innerhalb einer Sorte von CEM II/B-LL 42.5N über CEM II/C-M(F-T) 42.5N zu CEM II/A-LL 42.5N an. Die Endfestigkeit von CEM II/C-M(Q-LL) mit calciniertem Ton liegt über der von CEM II/C-M(F-T) bei geringerer Festigkeit im jungen Alter. CEM I 52.5R und CEM III/B 32.5N übersteigen die Endfestigkeit von CEM II/C-M(Q-LL). Die Festigkeit des NPK-C CEM II/C-M(F-T) in (d) liegt unterhalb der anderen Betone. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der verwendete Zement für diese Mischung wohl überlagert war.

Der prozentuale Anteil der 28-Tage Würfeldruckfestigkeit gegenüber der 3-Tage (grau) bzw. 91-Tage (blau) Würfeldruckfestigkeit ist in Abb. 22 angegeben.

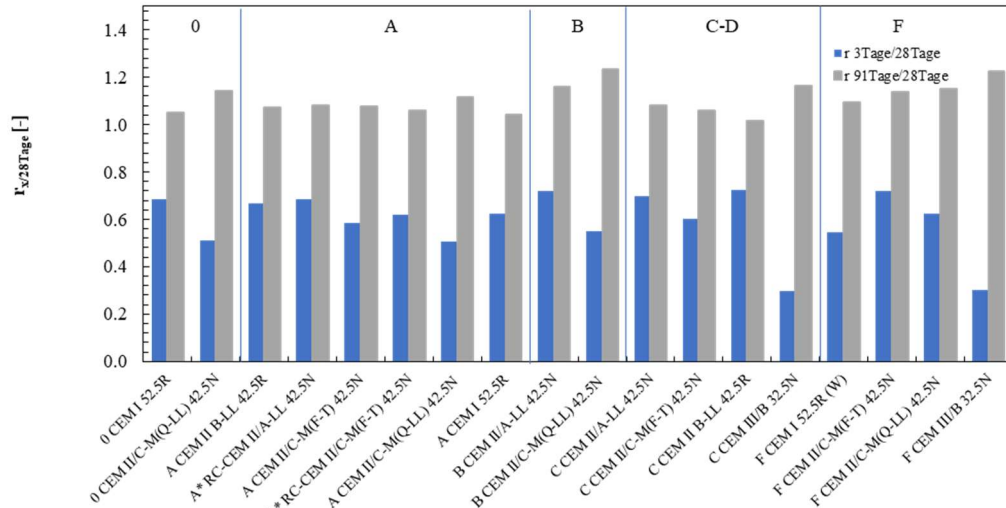


Abb. 22 Prozentualer Anteil der Druckfestigkeit nach 3 bzw. 91 Tagen gegenüber der 28 Tage Druckfestigkeit

Unabhängig von der Sorte liegt der Anteil der Festigkeit nach 3 Tagen zwischen 50 und 70% (0.5 bis 0.7) von der 28 Tage Druckfestigkeit. Lediglich bei CEM III/B Mischungen liegt die Festigkeit nach 3 Tagen bei 30% (0.3) der 28 Tage Festigkeit. Der Anteil der 91 Tage Festigkeit an der 28 Tage Festigkeit ist bei der Sorte A tendenziell geringer als bei den weiteren Sorten mit geringerem w/z-Wert. Der Anteil der 91 Tage Festigkeit liegt unabhängig von der Sorte bei 100 bis 110% (1.0 bis 1.1) der 28 Tage Festigkeit. Lediglich die Mischungen mit calciniertem Ton CEM II/C-M(Q-LL) und hohem Hüttensandgehalt weisen eine Festigkeit nach 91 Tagen von rund 120% (1.2) der 28 Tage Festigkeit auf.

Abb. 23 zeigt den Anteil der Festigkeit über die Nachbehandlungszeit bezogen auf die 28 Tage Festigkeit getrennt nach Sorte (a) bis (d) und Zementart.

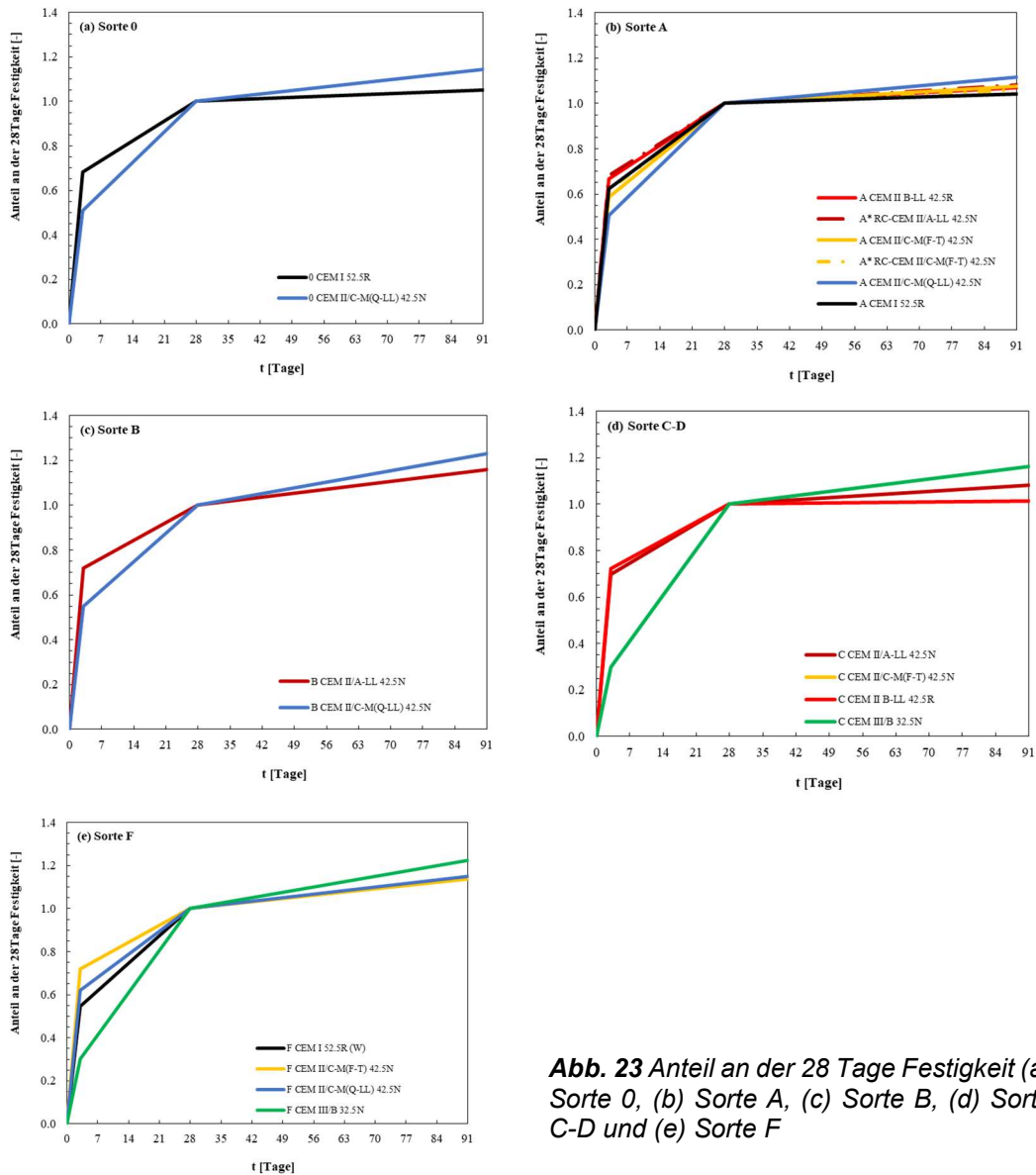


Abb. 23 Anteil an der 28 Tage Festigkeit (a) Sorte 0, (b) Sorte A, (c) Sorte B, (d) Sorte C-D und (e) Sorte F

Die Festigkeitszunahme nach 28 Tagen ist bei Sorte A und bei CEM II/B-LL am geringsten. Ebenfalls gut erkennbar ist die schnelle Festigkeitsentwicklung der CEM I, CEM II/A-LL, CEM II/B-LL und CEM II/C-M(F-T) Mischungen in jungem Alter, gegenüber der etwas langsameren Festigkeitsentwicklung von CEM II/C-M(Q-LL) bzw. der stärker verzögerten Festigkeitsentwicklung von CEM III/B. Auch wird die verstärkte Nachhydratation (Festigkeitsentwicklung ab einem Alter von 28 Tagen) der CEM II/C-M(Q-LL) und CEM III/B Mischungen deutlich. Wobei der Nachhydratation von CEM III/B im Vergleich stärker ausgeprägt ist.

3.2 Karbonatisierungswiderstand

3.2.1 Beschreibung der Normprüfungen

Die durchgeführten Prüfungen sind in *Tab. 8* zusammen mit den wichtigsten Prüfparametern angegeben.

Tab. 8 Prüfbedingungen

Prüfung	SIA 262/1 Anhang I	SN EN 12390-10	SN EN 12390-12
Wahl	Chamber Test Normativ		
Probenanzahl	1 Prisma	2 Prismen	2 Prismen
Probengrösse	350x120x 120 mm	L ≥ 350mm B, H ≥ 3D _{max}	L ≥ 350mm B, H ≥ 3D _{max}
Nachbehandlungsdauer	3 Tage*	28 Tage	28 Tage
Nachbehandlungsklima	1 Tag in Folie danach bis Ende der Nachbehandlung in Normlagerung nach EN 12390-2 in Wasser 20°C		
Vorlagerungsdauer	25 Tage	16 ± 2 Stunden	14 Tage
Vorlagerungsklima	CO ₂ : ≤ 0.04 T: 20 ± 2°C rF: 57±3%	CO ₂ : Labor T: 20 ± 2°C rF: 65±5%	CO ₂ : Labor T: 18-25°C rF: 50-65%
Prüfdauer	0, 7, 28, 63 Tage	3, 6, 12 Monate	7, 28, 70 Tage
Prüfklima	CO ₂ : 4 % T: 20 ± 2°C rF: 57±3%	CO ₂ : 400±10ppm T: 20 ± 2°C rF: 65 ± 2%	CO ₂ : 3 ± 0.5% T: 20 ± 2°C rF: 57 ± 3%
Prüfungsart	Gasdiffusion		

* Zukünftig 7 Tage, hier ist dann nach [fib, BD] eine Erhöhung der Bewehrungsüberdeckung zu bedenken, falls für langsam hydratisierende Bindemittel die Nachbehandlung weniger als 7 Tage unter Bauwerksbedingungen festgelegt wird

Da die aktuellen CO₂ Konzentration in der Aussenumgebung (Wildegg) mit im Mittel 450 bis 550 ppm die Prüfbedingung (400 ppm) übersteigt, wurde ein Klimaschrank für dieses Forschungsvorhaben neu entwickelt. Der Klimaschrank beinhaltet eine Temperatur- und Feuchteregulierung. Die Luft wird über eine Zementsteinmehlschicht durch CO₂ Bindung gefiltert. Mithilfe einer CO₂ Zudosierung wird die CO₂ Konzentration der gefilterten Luft auf 400 ppm eingestellt.

Abb. 24 (oben) zeigt ein Foto des Klimaschranks, (mittig) die CO₂-Konzentration und (unten) die relative Luftfeuchte im Klimaschrank.

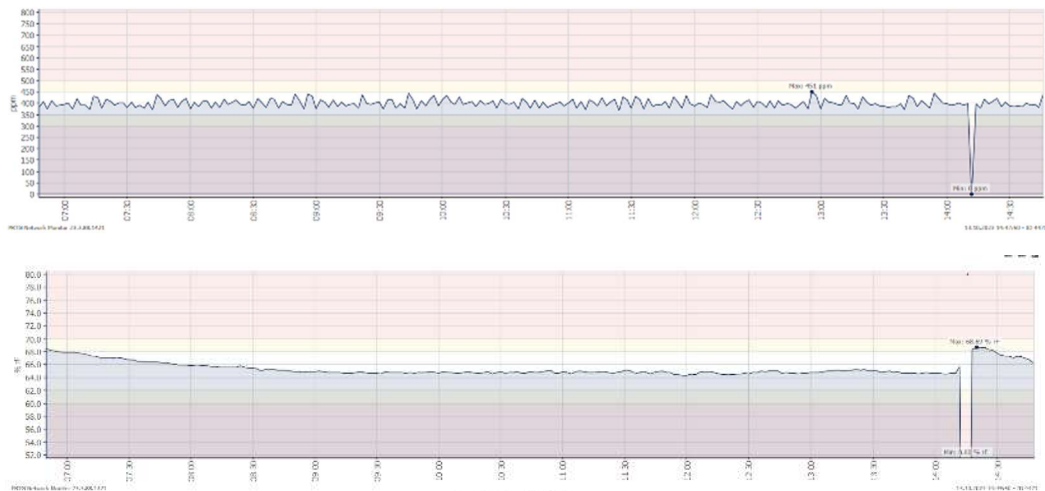


Abb. 24 (oben) Foto des Klimaschranks für die EN 12390-10 Prüfung an der TFB AG und (mittig) das Monitoring der CO₂ Konzentration und (unten) die relative Luftfeuchte im Klimaschrank der TFB AG

3.2.2 SIA 262/1 Annex I

Abb. 25 zeigt die gemessenen Karbonatisierungskoeffizienten K_s (a) und den daraus berechneten Wert für K_N (b) nach SIA 262/1 Anhang I unter Ansatz der Faktoren $a = 19.1$, $b = 0.1$ und $c = 1.36$ mit denen K_s multipliziert wird, um K_N zu erhalten. In Abb. 25 (b) ist der Grenzwert KW für den Karbonatisierungswiderstand nach SN EN 206 für 50 Jahre

Nutzungsdauer für in $\text{mm/Jahr}^{0.5}$ mit angegeben. Sind keine Zahlen angegeben, gibt es keinen Grenzwert.

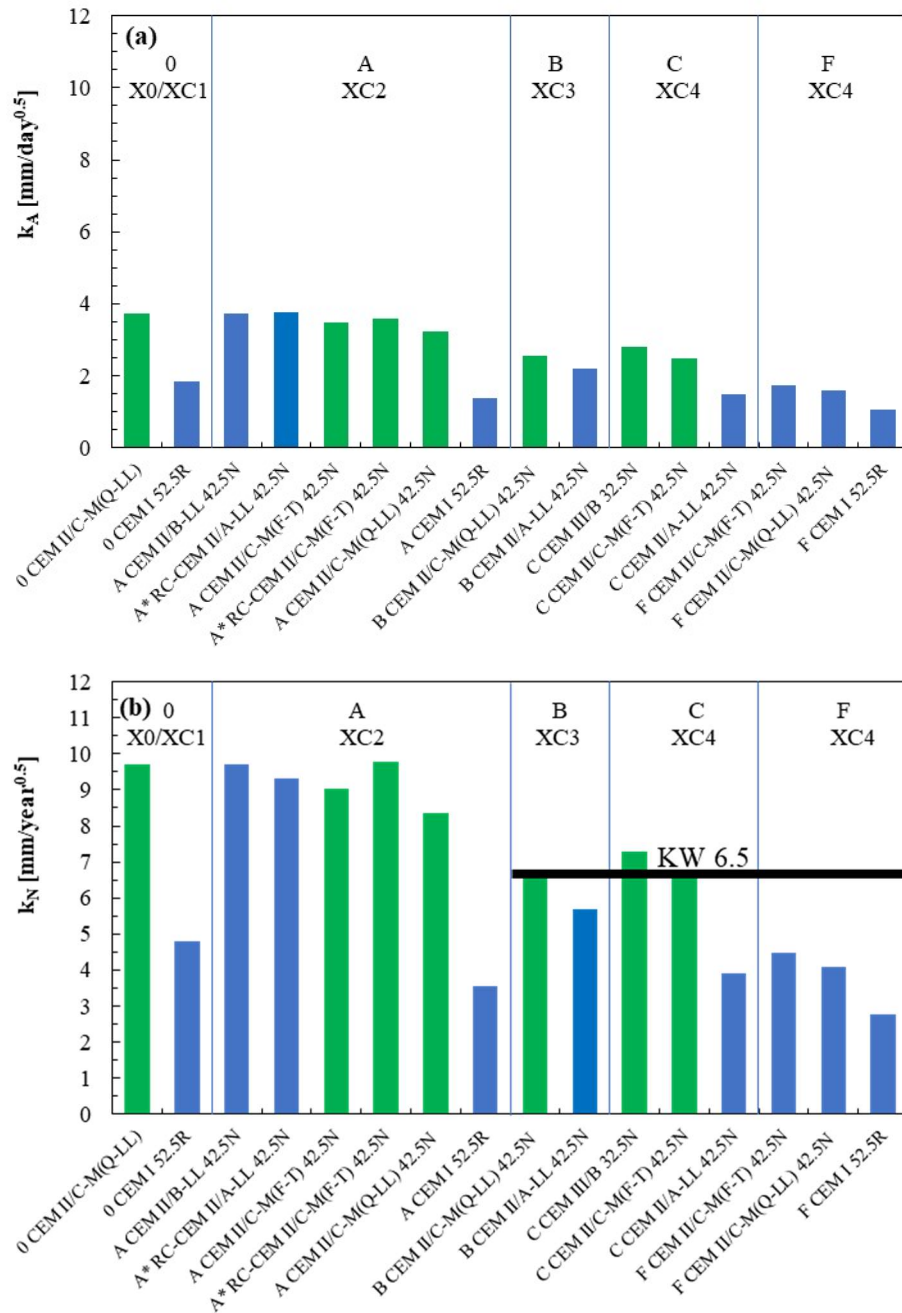


Abb. 25 Karbonatisierungskoeffizienten (a) K_S und (b) K_N geprüft nach SIA262/1 Anhang I in Abhängigkeit der Mischung und Betonsorte.

Unter Ausschluss der RC-Granulat Mischungen nimmt der Karbonatisierungskoeffizient je verwendeter Zementsorte, bedingt durch den abnehmenden w/z-Wert und den zunehmenden Zementgehalt ab. Vergleicht man die RC-Mischungen mit den zugehörigen Referenzmischungen, liegt der Karbonatisierungskoeffizient der RC-Mischungen auf einem höheren Niveau. Dies wird mit der erhöhten Porosität begründet, da reaktive Zementsteinpartikel am Gesteinskorn den Karbonatisierungswiderstand erhöhen und nicht verringern sollten. Die höhere Porosität kann mehrere Ursachen haben. Die volle Zugabe des WA_{24} , der nicht in der Gesteinskörnung gebunden, sondern teilweise den w/z-Wert erhöht, das Vorliegen von zwei statt einer Kontaktzone (einmal Gesteinskorn Altzement und einmal Altzement und Neuzement) mit dort erhöhter Porosität und Mikrorisse im Altzement durch die RC-Herstellung. Die erhöhte Porosität zeigt sich auch durch die

geringere Druckfestigkeit. Wie erwartet zeigt CEM I den höchsten und CEM III/B den geringsten Karbonatisierungswiderstand.

Neben den Terminen zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe nach 0-, 7-, 28- und 63-Tagen wurde die Karbonatisierungstiefe auch nach 105-Tagen gemessen. *Abb. 26* zeigt beispielhaft Fotos der Karbonatisierungstiefe nach 63-Tagen (links) und 105-Tagen (rechtes). Für jeweils den Beton mit dem geringsten Widerstand je Sorte sind von oben nach unten je eine Mischung der Sorte A, B, C ohne RC-Granulat, C mit RC-Granulat und Sorte F dargestellt.

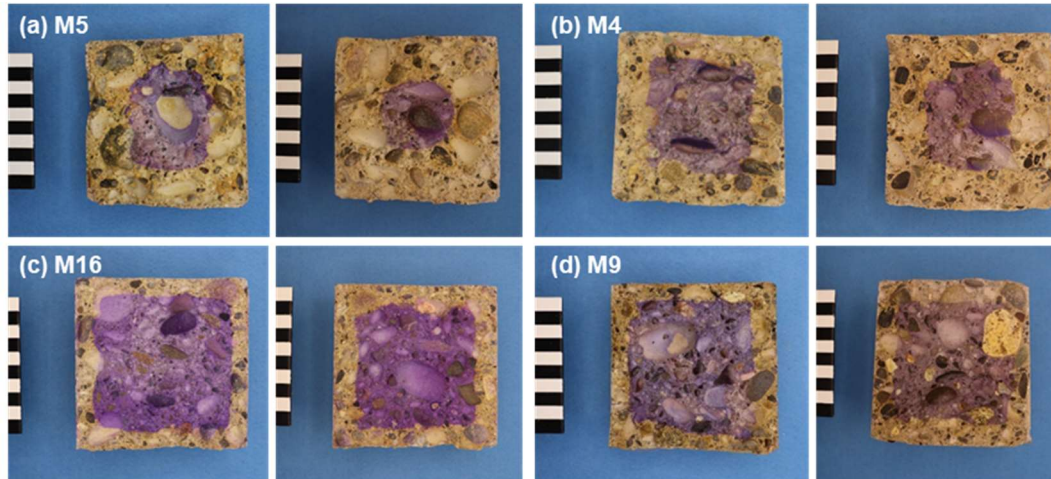


Abb. 26 Fotos der Karbonatisierungsprüfung nach 63 und 105 Tagen der Mischungen (a) M5 (Sorte A), (b) M4 (Sorte B), (c) M16 (Sorte C) und (d) M9 (Sorte F)

Auch Betone mit geringem Karbonatisierungswiderstand weisen nach 105 Tagen noch eine messbare Karbonatisierungstiefe auf. Die Messung reduzierte sich im Fall (a) jedoch auf max. ein bis zwei Tiefenmessungen je Seite.

Abb. 27 zeigt die (a) Entwicklung der Karbonatisierungstiefe für die Mischungen aus *Abb. 26* und (b) den Vergleich der Karbonatisierungskoeffizienten mit und ohne Berücksichtigung des Messwertes nach 105 Tagen.

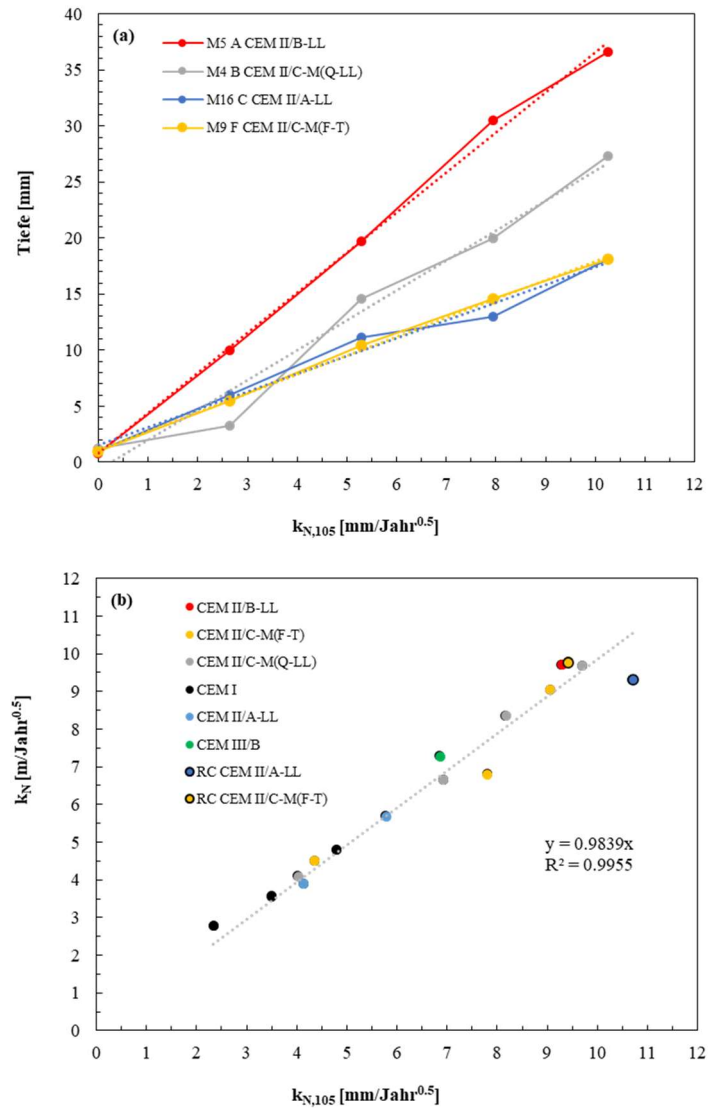


Abb. 27 (a) zeitliche Entwicklung der Karbonatisierungskoeffizienten aus Abb. 26 und (b) Korrelation zwischen k_N mit und ohne dem Messwert nach 105 Tagen

Signifikant höhere Karbonatisierungswiderstände infolge z.B. Nachhydratation oder systematisch geringere Karbonatisierungswiderstände infolge z.B. Verlust des karbonatisierbaren Materials in Richtung Kernbeton (Karbonatisierungsgradienten von vier Seiten) konnten bei Berücksichtigung einer weiteren Messung nach 105 Tagen nicht festgestellt werden.

3.2.3 EN 12390-10 Chamber vs. SIA 262/1 Anhang I

Abb. 28 zeigt die Karbonatisierungskoeffizienten k_N geprüft nach SN EN 12390-10 (gestrichelte Balken) und im Vergleich dazu die k_N geprüft nach SIA 262/1 Anhang I (ausgefüllte Balken). Mischungen mit Zementen mit stärker reduziertem Klinkergehalt oder Recyclingmaterial sind in grün dargestellt.

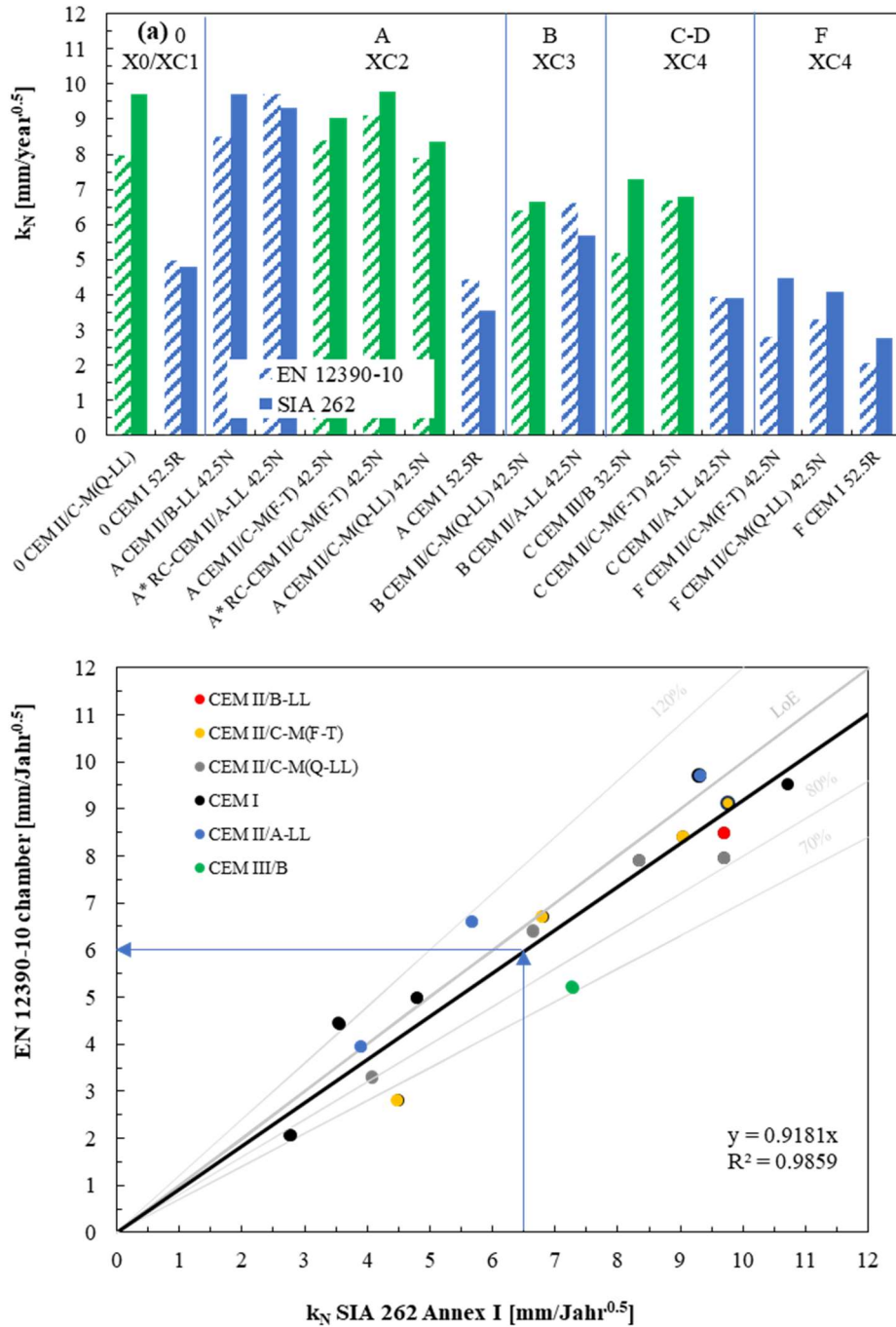


Abb. 28 k_N geprüft nach SN EN 12390-10 in Abhängigkeit der Mischung und Betonsorte.

Die Karbonatisierungsraten bestimmt nach SN EN 12390-10 liegen leicht unter den Raten bestimmt nach SIA262/1 Anhang I. Ein Grund ist die höhere relative Feuchte von 65% während der Prüfung in EN 12390-10 anstelle von 57% relativer Feuchte nach SIA 262/1 Anhang I. Die höhere Feuchte von 65% liegt näher an der durchschnittlichen relativen Luftfeuchte in der Schweiz von ca. 75%. Besonders ausgeprägt ist dieser Einfluss bei den langsamer hydratisierenden CEM II/C-M und CEM III/B Mischungen. Bei diesen drei Mischungen ist der Karbonatisierungskoeffizient in der natürlichen Prüfung geringer als in

der Schnellkarbonatisierung. Umgekehrt verhält es sich vor allem beim schnell hydratisierenden CEM I 52.5R und dem CEM II/A-LL.

In *Tab. 9* wurden Präzisionsdaten abgeschätzt. Es ist zu bemerken, dass diese Daten nur Anhaltswerte geben, da die Prüfung nur von zwei Laboren durchgeführt wurde und die Wiederhol- und Vergleichbarkeit jeweils über zwei Proben bestimmt wurde. Dennoch stimmen die Resultate gut mit denen der SN EN 12390-10 [2] und fib Bulletin 112 [53] überein.

Tab. 9 Abgeschätzte Präzisionsdaten

Mischung	Niveau Karbonati- sierungs- widerstand	Wiederholstandard- abweichung	Vergleichs- standardab- weichung	Wiederhol- grenze	Vergleichs- grenze
		S _r [mm]	S _R [mm]	r [mm]	R [mm]
Karbonatisierungsgeschwindigkeit k_c in der Kammerprüfung	3.3 – 8.4 mm/Jahr ^{0.5}	0.35	0.98	0.81	2.27
Präzision ausgedrückt als Variationskoeffizient		CV_r [%]	r [%]	CV_R [%]	R [%]
Karbonatisierungsgeschwindigkeit k_c in der Kammerprüfung		12	33	19	53

3.2.4 EN 12390-12 vs. SIA 262/1 Anhang I

Abb. 29 zeigt die Karbonatisierungskoeffizienten (a) K_S und daraus abgeschätzte (b) K_N geprüft nach SN EN 12390-12. Für den Vergleich wurden jeweils zwei Mischungen aus CEM I, zwei aus CEM II/C-M(Q-LL) und eine aus CEM III/B nach SN EN 12390-12 geprüft. Die Abschätzung erfolgte mit Gl. (3.1). Hierin wurde eine natürliche CO_2 Konzentration von 0.04 vol.-% angesetzt (wie in SIA 262/1) wobei heute die natürliche CO_2 Konzentration bei 0.045-0.05 vol.-% liegt. Der Beschleunigungsfaktor wurde zu 1.28 aus [53] für 3 Vol.-% CO_2 angesetzt.

$$K_N = K_{AC} \cdot \sqrt{\frac{0.04}{3}} \cdot \sqrt{365} \cdot 1.28 \quad (3.1)$$

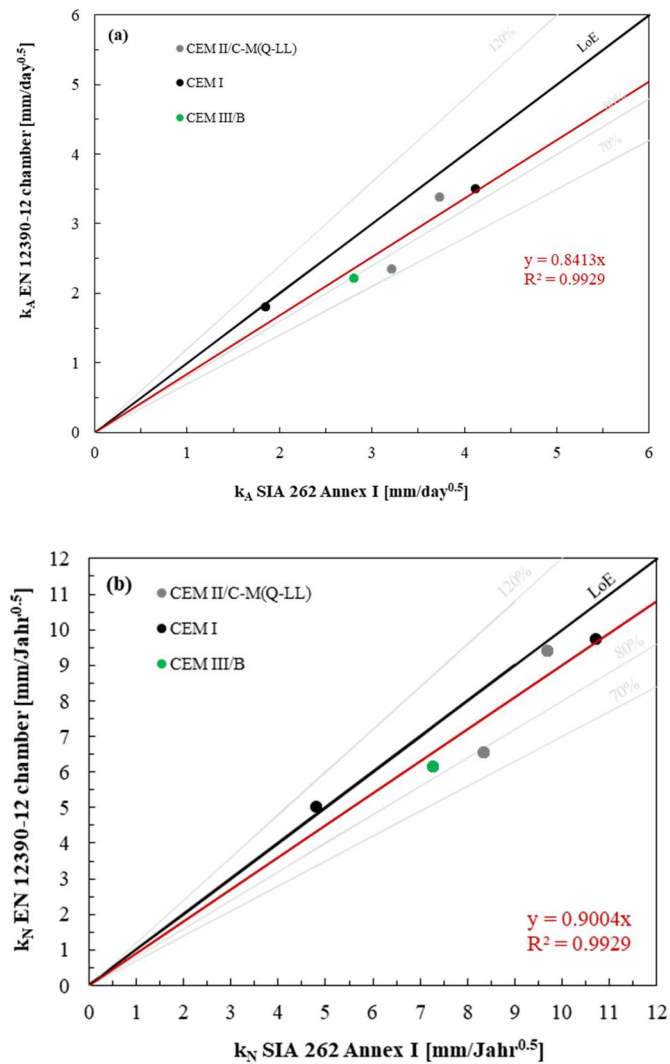


Abb. 29 (a) K_{AC} und (b) K_N geprüft nach SN EN 12390-12 vs. geprüft nach SIA 262/1 Anhang I in Abhängigkeit der Mischung und Betonsorte.

Die Karbonatisierungskoeffizienten K_A unter beschleunigten Bedingungen in Abb. 29 (a) sind aufgrund der unterschiedlichen CO_2 Konzentrationen kaum vergleichbar. Deshalb wurden die Karbonatisierungskoeffizienten auf 400 ppm CO_2 bezogen und in Abb. 29 (b) angegeben. Trotz nun vergleichbarer CO_2 Konzentration sind die Karbonatisierungskoeffizienten bestimmt nach SN EN 12390-12 geringer als die Karbonatisierungskoeffizienten bestimmt nach SIA 262/1 Anhang I, vgl. [54]. Die geringeren Koeffizienten können auf die längere Nachbehandlungsdauer und die kürzere Vorlagerung der Proben zurückgeführt werden.

3.3 Chloridwiderstand

3.3.1 Beschreibung der angewendeten Normprüfungen

Die durchgeführten Prüfungen sind in *Tab. 10* zusammen mit den wichtigsten Prüfparametern angegeben.

Tab. 10 Prüfbedingungen

Prüfung	SIA 262/1 Anhang B	SN EN 12390-11	SN EN 12390-11 Anhang A
	Migrationkoeffizient D_{Cl}	Diffusionskoeffizient D_{nss90d}	Diffusionskoeffizient $D_{app}(t)$ und Age Exponent α
Probenanzahl	5 Zylinder	1 Würfel oder 1 Zylinder je Prüfzeitpunkt	
Probengrösse	Ø 50mm, h 50 mm		L ≥ 100 mm
Nachbehandlungsdauer	28 Tage		28 Tage
Nachbehandlungsklima		Wasserlagerung	
Probenvorbereitung	2-4h trocknen der nicht exponierten Fläche und anschliessend beschichten dann 24h trocknen der Epoxidbeschichtung vor Einlagerung		
Prüfdauer	24 Stunden	35, 90 und 365 Tage	
Prüfklima	3% NaCl-KOH- Lösung 20 Volt 20 ± 2°C	3% NaCl Lösung (30g NaCl in 970g dest. Wasser $\sigma \leq 0.5$ mS/m) mit 12.5 ml/cm ² exponierter Probenoberfläche; 20 ± 2°C	
Prüfungsart	Migration	Diffusion in Lösung	

Die Prüfung der Chlorid Diffusion nach EN 12390-11 erlaubt drei verschiedene Lagerungsarten:

- (a) vollständiges eintauchen,
- (b) teilweise Eintauchen der exponierten Fläche und
- (c) Aufbringen einer Lösungssäule auf der Probe mithilfe eines Aufsatzrahmens.

Im Rahmen dieser Arbeit haben sich das SUPSI und die TFB AG für die Variante (a) entschieden. *Abb. 30* zeigt (oben) die Probenvorbereitung und -untersuchung schematisch und (unten) ein Foto der Lagerung am SUPSI. Die Würfel werden parallel zur Einfüllseite geschnitten, sodass ein Quader mit Abmessungen 150 x 150 x ca. 50 mm und ein Quader mit 150 x 150 x 100 mm entsteht. Die Scheibe mit 150 x 150 x 50 mm wird noch einmal halbiert, sodass eine Probenscheibe mit 150 x 150 x 25 mm entsteht, die gemahlen und auf den Eigenchloridgehalt (C_i) hin untersucht wird. Der Quader wird allseitig bis auf die Schnittfläche 2 bis 4 h angetrocknet und anschliessend beschichtet. Um Kantenflucht zu vermeiden, werden zuerst die Kanten mit Epoxidharz beschichtet. Im Anschluss erfolgt die vollflächige Beschichtung in zwei Auftragungen. In einer Wanne werden die Proben so gestapelt, dass zwischen den unbeschichteten Stirnflächen ein Abstand von mindestens 12.5 cm eingehalten ist. Ferner sollte die Zirkulation der Lösung zwischen den Probensäulen möglich sein. Die Wanne wird mit 3% NaCl-Lösung befüllt. Die Cl-Konzentration der Lösung wird im Abstand von 90 Tagen mittels Ionenselektiver Elektrode (Vergleich mit Referenzgehalt) bzw. über die Leitfähigkeit (Verhindern eines Drifts) gemessen und bei Bedarf gewechselt.

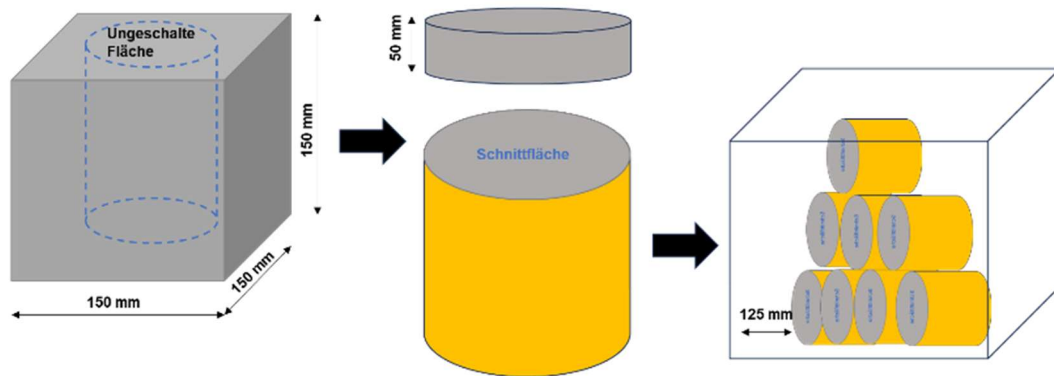


Abb. 30 Probenvorbereitung, Beschichtung und Lagerungsschema (oben) sowie Fotos der Lagerung am SUPSI (unten)

Der Ausgangschloridgehalt C_i wurde am abgeschnittenen Probenstück ermittelt und lag im Allgemeinen unter der Detektionsgrenze. Bei Chloridgehalten oberhalb der Detektionsgrenze wurde dieser in der Berechnung des scheinbaren Diffusionskoeffizienten zum jeweiligen Prüfzeitpunkt $D_{app}(t)$ in $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ nach Gl. (3.1) berücksichtigt. Hierin sind weiter $C(x,t)$ der Chloridgehalt in der Tiefe x in m zum Zeitpunkt t in Sekunden und $C_s(t)$ die Chloridoberflächenkonzentration in gew.-% bezogen auf den Beton.

$$C(x, t) = C_s(t) - (C_s(t) - C_i) \cdot \left(\operatorname{erf} \left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t}} \right) \right) \quad \text{Gl.(3.1)}$$

Aus den scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizienten zum jeweiligen Prüfzeitpunkt wurde der Altersexponent und der scheinbare Diffusionskoeffizient zum Zeitpunkt t_0 (hier $t_0 = 1$ Jahr) bestimmt. Der Zusammenhang zwischen $D_{app}(t)$, $D_{app}(t_0)$ und Altersexponent α ist mit Gl. (3.2) gegeben.

$$D_{app}(t) = D_{app}(t_0) \cdot \left(\frac{t_0}{t} \right)^\alpha \quad \text{Gl.(3.2)}$$

Die Prüfung nach SIA 262/1 Anhang B ist für die Prüfung des CW von $\leq 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ausgelegt. Bei Probekörpern der Sorte A oder B welche ein D_{Cl} von $\geq 35 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ aufweisen ist das Eindringen von Chlorid weit schneller (rechnerisch 50 mm in 24h) als bei Betonen mit $D_{Cl} \leq 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Deshalb wurde für die Klassifizierung von Beton die

Prüfdauer z.T. auf 5 Stunden reduziert. Die Auswertung der Resultate erfolgte nach Gl. (3.4) und Gl. (3.5) nach SIA 262/1 Anhang B.

Die Formel wurde aus dem Nernst-Planck Gesetz abgeleitet unter der Annahme, dass das elektrische Feld in der Probe konstant ist, chemische Reaktionen mit den Hydratphasen vernachlässigbar sind (was aber nicht ausgeschlossen werden kann [33, 55]), keine Interaktion mit anderen Ionen stattfindet und Konvektionsmechanismen nicht signifikant sind [55], Gl. (3.3) bis Gl. (3.7). Hierin ist z die Ionenzahl ($z=1$), F die Faraday Konstante 96490, R ist die Gaskonstante in 8.314, U ist die aufgebrachte Spannung, T ist die durchschnittliche Temperatur in K (hier: 293.15 K), h ist die Probendicke in m, x_d ist die Eindringtiefe gemessen mit einer Indikatorlösung in m, t ist die Testdauer in s, erf^{-1} ist die Inverse der Fehlerfunktion, $c_d = 0.07$ ist die angenommene Chloridkonzentration beim Farbumschlag des AgNO_3 Indikators und $c_0 = 0.51$ ist die Chloridkonzentration der Lösung. Für die gegebene Chloridkonzentration von 30g/L und einen Farbumschlag bei 0.07 ist die Lösung der Fehlerfunktion 0.78.

$$D_{Cl} = \frac{RT}{zFE} \cdot \left(\frac{x_d - \alpha \cdot \sqrt{x_d}}{t} \right) \quad \text{in m}^2/\text{s} \quad \text{Gl.(3.3)}$$

$$E = \frac{U}{h} \quad \text{in V/m} \quad \text{Gl.(3.4)}$$

$$\alpha = 2 \cdot \sqrt{\frac{RT}{zFE}} \cdot \text{erf}^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0} \right) \quad \text{in m} \quad \text{Gl.(3.5)}$$

$$D_{Cl} = \frac{z}{t} \cdot (x_d - 1.5462 \cdot \sqrt{z \cdot x_d}) \quad \text{in m}^2/\text{s} \quad \text{Gl.(3.6)}$$

$$z = 8.619 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{hT}{U} \rightarrow z = 8.619 \cdot 10^{-5} \cdot \frac{h \cdot T}{U} \quad \text{in m} \quad \text{Gl.(3.7)}$$

3.3.2 SIA 262/1 Annex B

Abb. 31 zeigt die gemessenen Chloridwiderstände nach SIA 262/1 Anhang B und die zugehörigen Rohdichten der Bohrkerne. Der Grenzwert für den Chloridwiderstand CW nach SN EN 206 ist mit angegeben.

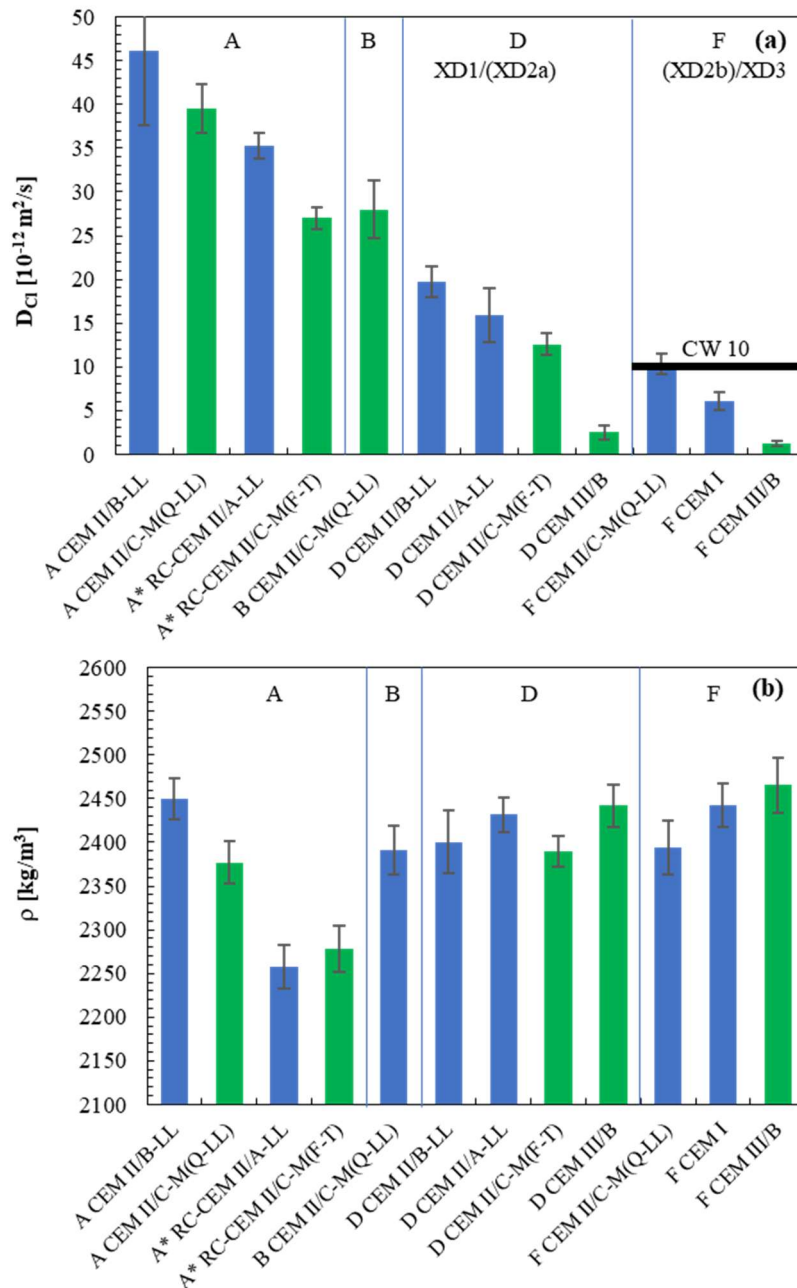
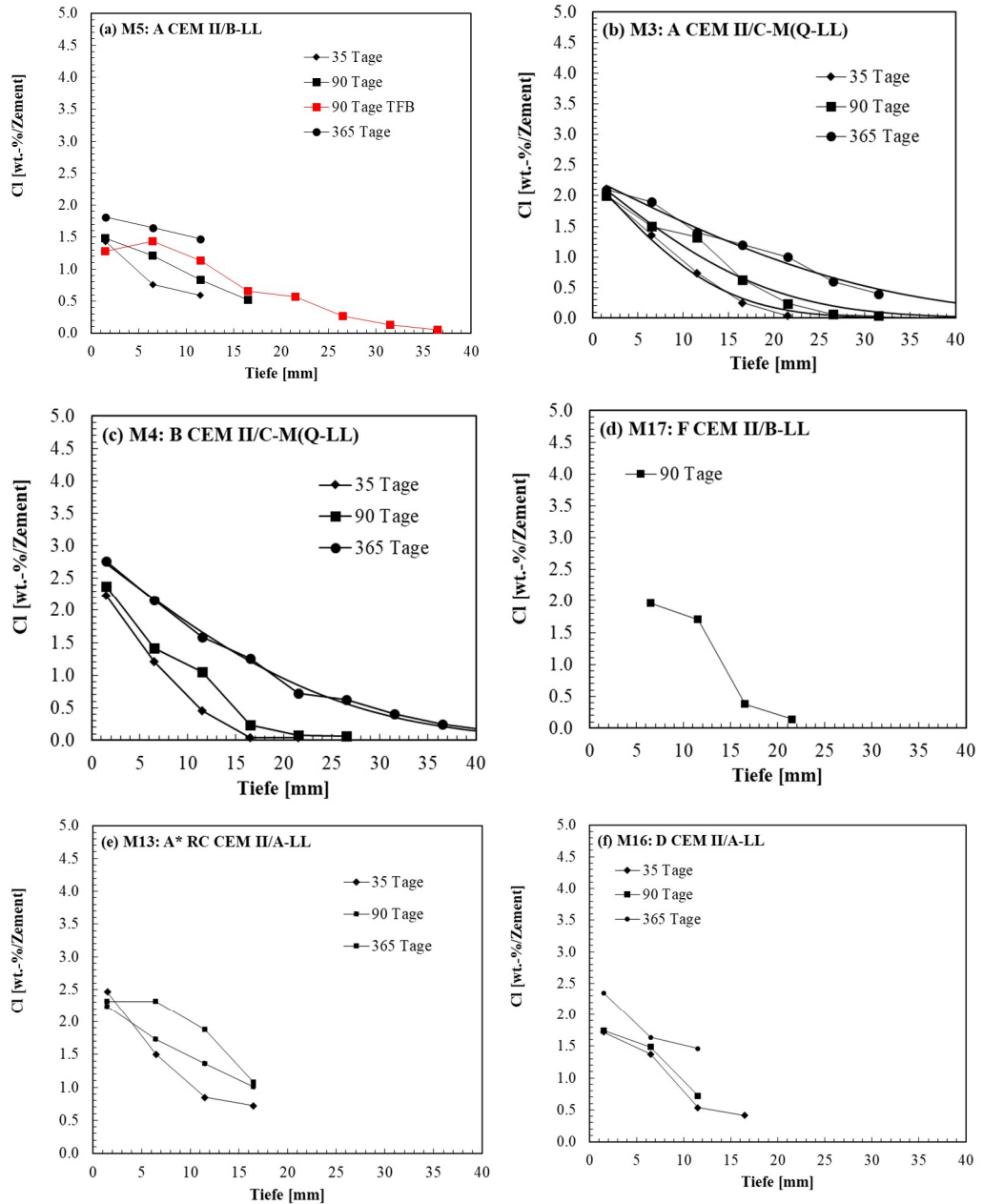


Abb. 31 Chloridwiderstände nach SIA 262/1 Anhang B (a) und Rohdichte der Bohrkerne (b) für die Betonsorten A, B, D und F

Wie erwartet nimmt der Chloridwiderstand ausgehend von der Sorte A nach Sorte F zu. Die Zementart und der RC-Anteil haben entscheidenden Einfluss. Beispielsweise der Chloridwiderstand des CEM III/B ist auch als Sorte D höher als der Chloridwiderstand der Mischungen ohne Hüttensand in Sorte F. Die Chloridwiderstände der Betone mit RC-Granulat (RC-C25 mit 49% Ersatz der Gesteinskörnung durch Betongranulat) liegen im Rahmen der zu erwartenden Chloridwiderstände in Sorte A bzw. übertreffen die Erwartungen. Ein Grund kann sein, dass der Zementstein am Recyclingmaterial in der Lage ist, Chloride chemisch und / oder physikalisch zu binden. Dieser positive Effekt übersteigt das erwartete schnellere Eindringen von Chlorid durch die porösere `doppelte` Kontaktzone [18, 44]. Wie erwartet zeigt Sorte A CEM II/B-LL den geringsten und Sorte F CEM III/B den höchsten Chloridwiderstand. Die Chloridwiderstände liegen zwischen $46.2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ und $1.2 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Die Rohdichten der RC-C25 Mischungen sind geringer als die der Mischungen mit normaler Gesteinskörnung.

3.3.3 EN 12390-11 vs. SIA 262/1 Annex B

Abb. 32 zeigt die Chloridprofile der nach EN 12390-11 Proben nach 35 Tagen, 90 Tagen und 365 Tagen Einlagerungsdauer für jede Mischung. An die gemessenen Gehalte in Tiefenstufen (Symbole) sind exemplarisch Diffusionsprofile (Kurven) angefügt. Die Diffusionsprofile wurden mit der Fehlerfunktionslösung zum 2^{ten} Fick'schen Diffusionsgesetz gemäße EN 12390-11 ermittelt.



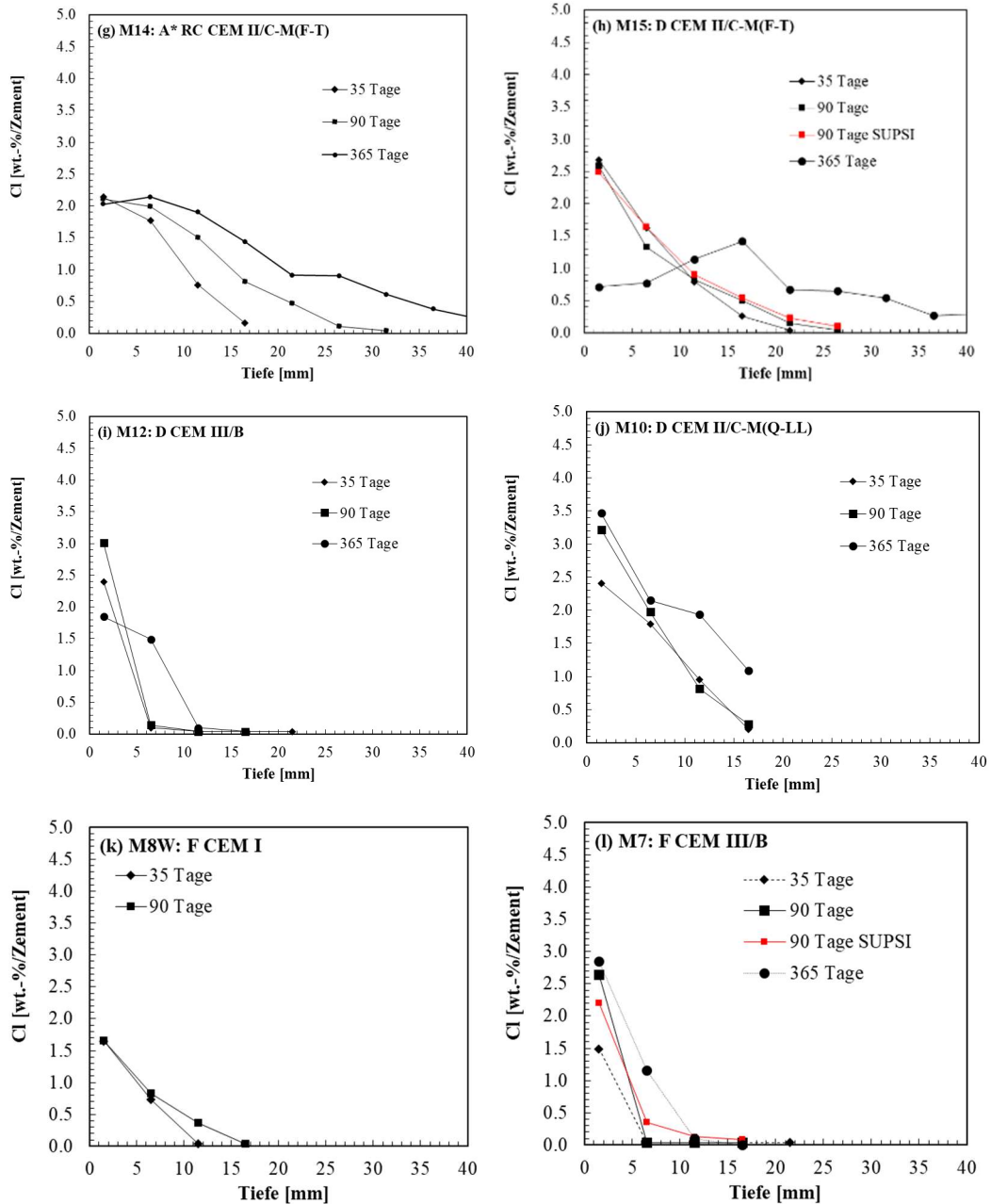
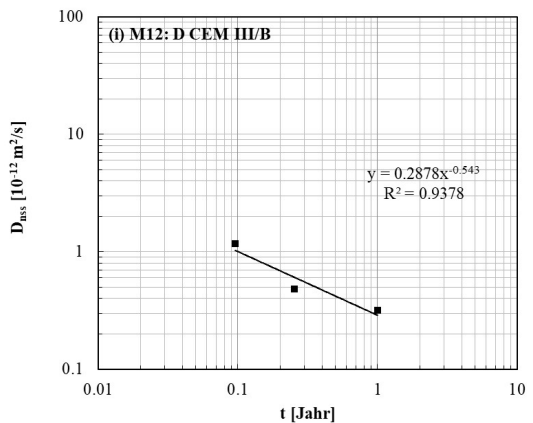
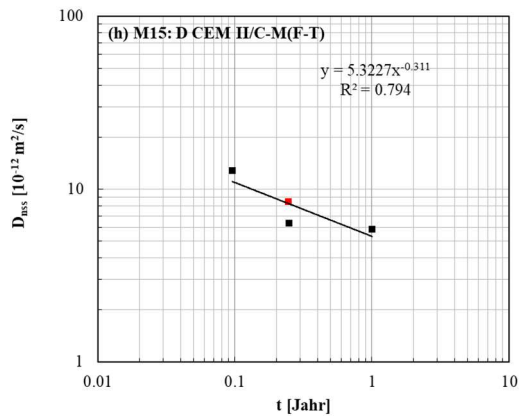
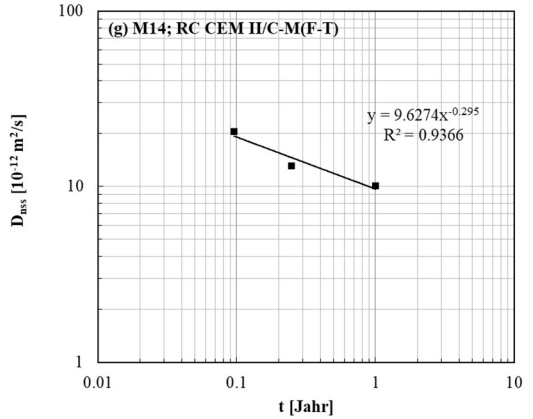
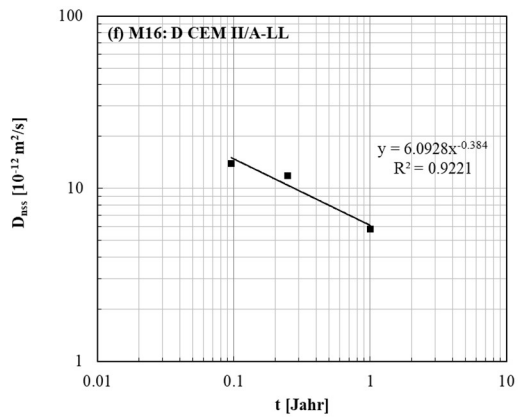
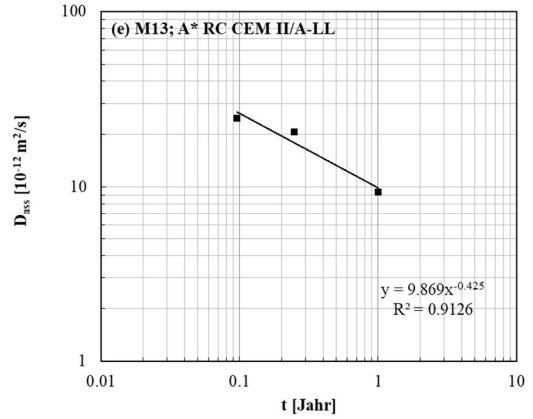
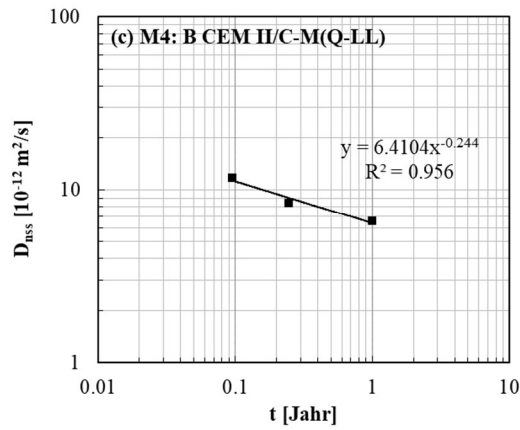
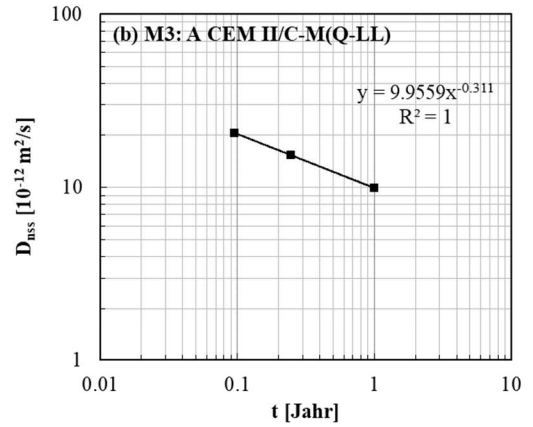
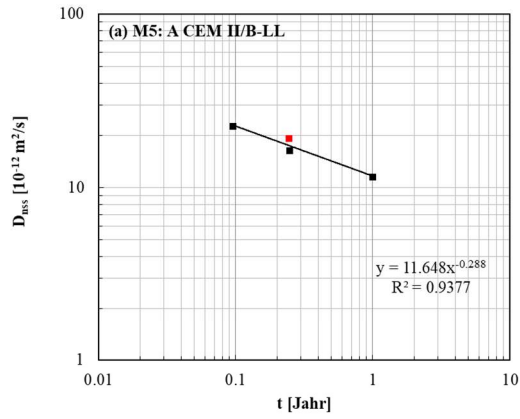


Abb. 32 Chloridprofile nach EN 12390-11 ermittelt nach 35 Tagen, 90 Tagen und 365 Tagen Diffusion getrennt nach Mischung

Abb. 33 zeigt den zeitlichen Verlauf der Diffusionskoeffizienten $D_{app}(t)$ (Symbole) getrennt nach Mischung. Mittels Regression einer Potenzfunktion an die scheinbaren Diffusionskoeffizienten zum jeweiligen Prüfzeitpunkt wurde der scheinbare Diffusionskoeffizient $D_{app}(t_0)$ mit $t_0 = 1$ Jahr und der Altersexponenten α ermittelt.



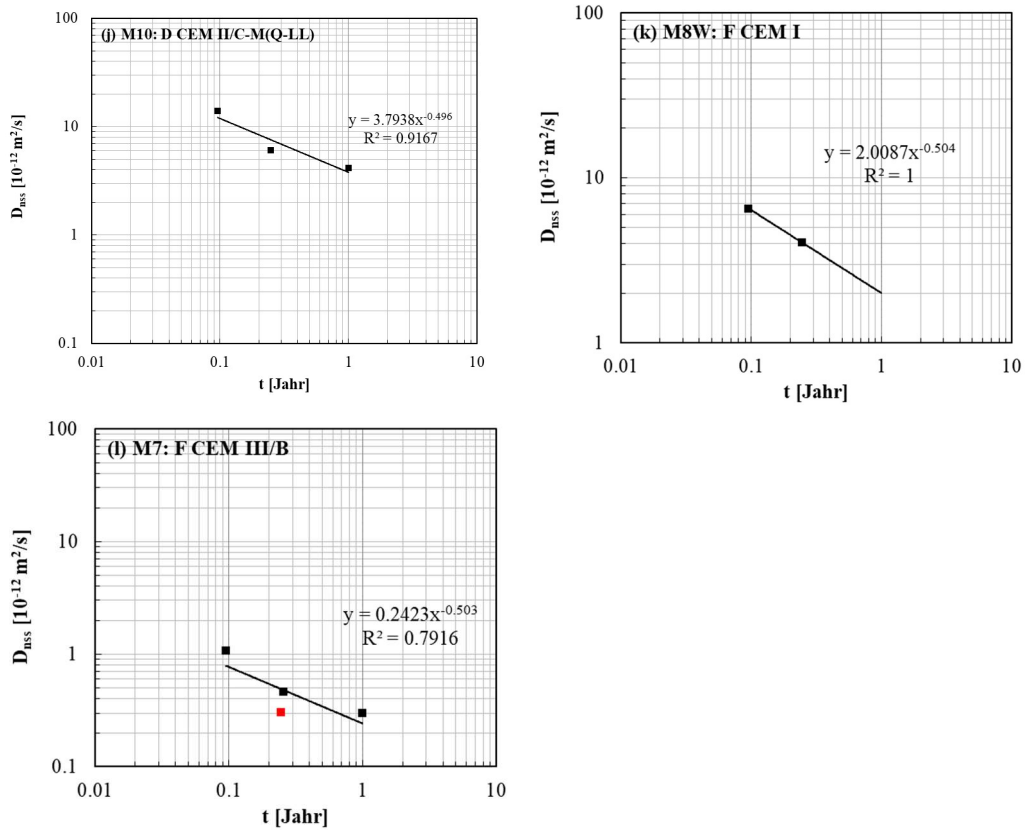


Abb. 33 Zeitlicher Verlauf der Diffusionskoeffizienten $D_{app}(t)$ (Symbole mit $t = 35$ Tage, 90 Tage bzw. 365 Tage) und daraus ermittelte Zeitexponenten α sowie scheinbare Diffusionskoeffizienten $D_{app}(t_0)$ getrennt nach Mischung

Tab. 11 fasst die Oberflächenkonzentrationen und Zeitexponenten zusammen.

Tab. 11 Chloridoberflächenkonzentration und Zeitexponenten

Mix	Sorte	Zement	Cs(35d)	Cs(90d)*	Cs(365d)	$D_{app}(t_0)$	α
			[Gew.-%/Zement]				
M5	A	CEM II/B-LL	1.5	1.6/2.1	2.3	11.648	-0.29
M3	A	CEM II/C-M(Q-LL)	2.3	2.3	2.3	10.0	-0.31
M4	B	CEM II/C-M(Q-LL)	2.6	2.6	2.9	6.4	-0.24
M17	D	CEM II/B-LL	-	3.4	-		-
M13_RC	A*	CEM II/A-LL	2.7	1.8	2.6	9.9	-0.43
M16	D	CEM II/C-M(F-T)	2.7	2.0	2.4	6.1	-0.38
M14_RC	A*	CEM II/C-M(F-T)	2.6	3.2	2.8	9.6	-0.30
M15	D	CEM II/A-LL	3.5	2.8/2.8	3.2	5.3	-0.31
M12	D	CEM III/B	4.2	5.1	6.0	0.3	-0.54
M10	F	CEM II/C-M(Q-LL)	3.7	3.7	3.6	3.8	-0.50
M8	F	CEM I	2.0	1.9	-		-0.50
M7	F	CEM III/B	2.7	4.5/4.5	5.0	0.2	-0.50

* Bei Doppelbestimmung SUPSI und TFB sind beide Werte mit / getrennt angegeben

Abb. 34 (a) zeigt die Chloridwiderstände nach SIA 262/1 Anhang B, die scheinbaren Diffusionskoeffizienten $D_{app}(t)$ gemessen nach 35 Tagen, 90 Tagen und 365 Tagen Auslagerung gemäss EN 12390-11. Sowie der scheinbare Diffusionskoeffizient $D_{app}(t_0)$ ermittelt durch Regression gemäss Gl. 3.1. Der Referenzwert bzw. das Prüfergebn nach

EN 12390-11 ist der scheinbare Diffusionskoeffizient nach 90 Tagen Auslagerung $D_{app}(t=90d)$. Für die Klassifizierung kann der Referenzwert ($D_{app}(t=90\text{ Tage})$) mit einem realistischen Zeitexponent auf den Referenzzeitpunkt 50 Jahre mit Gl. (3.2) extrapoliert werden. Besser noch ist es den Diffusionskoeffizienten $D_{app}(t_0)$ zu extrapolieren, da er bereits die Streuungen zwischen den einzelnen Prüfzeitpunkten nivelliert. **Abb. 34** (b) zeigt die Korrelation der Chloridwiderstände nach SIA 262/1 Anhang B mit dem Prüfwert: Chloridwiderstand nach 90 Tagen nach EN 12390-11.

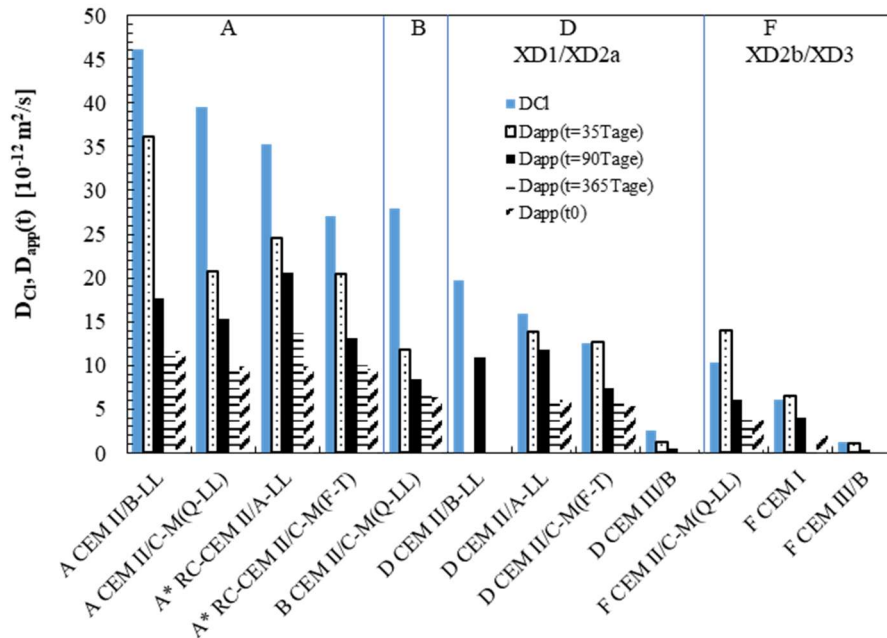
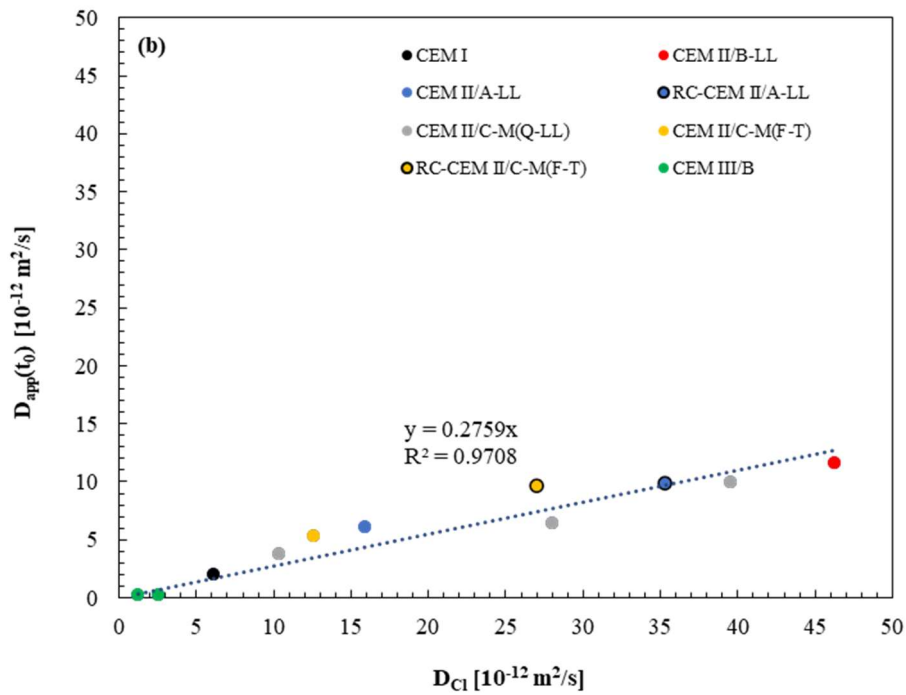
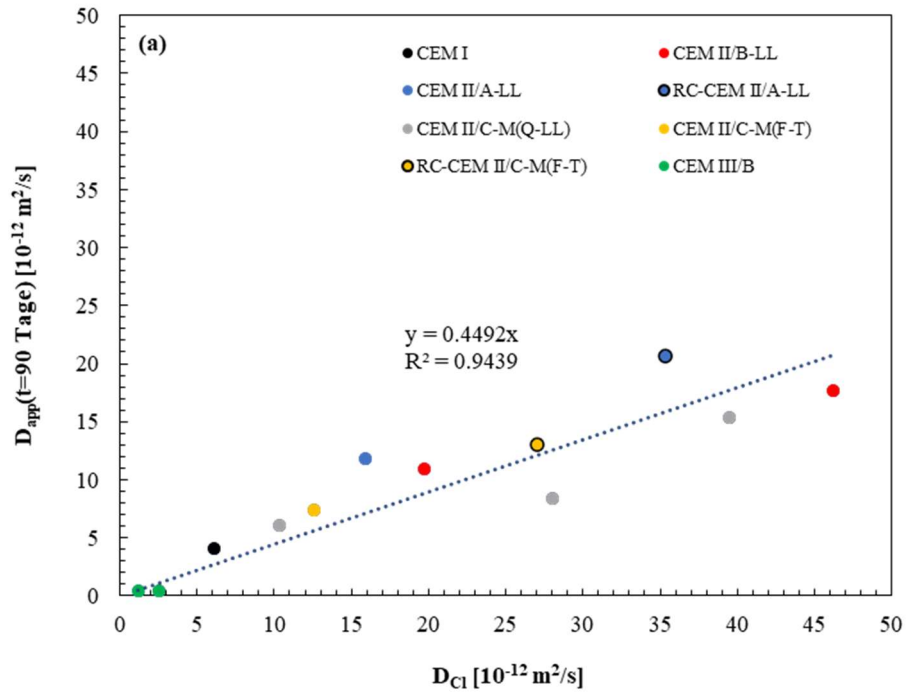


Abb. 34 Chloridwiderstände nach SN EN 12390-11 vs. SIA 262/1 Anhang B

Der Migrationskoeffizient D_{Cl} ist am höchsten, massgeblich da er bereits nach einem Alter von 28 Tagen bestimmt wird. Der Diffusionskoeffizient $D_{app}(t)$ nimmt mit der Auslagerungszeit ab. Der gemessene und der durch Extrapolation bestimmte scheinbare Diffusionskoeffizient $D_{app}(365\text{ Tage})$ bzw. $D_{app}(t_0)$ sind wie erwartet auf ähnlichem Niveau. Das Bindemittel hat einen teilweise höheren Einfluss auf den Chloridwiderstand als der w/z-Wert (vgl. CEM III/B mit CEM II B-LL).

Abb. 35 korreliert den Migrationskoeffizienten D_{Cl} nach SIA 262/1 Anhang B mit dem scheinbaren Diffusionskoeffizienten $D_{app}(t=90\text{ Tage})$ gemessen nach 90 Tagen Lagerung gemäss EN 12390-11 (a) und dem durch Regression bestimmten scheinbaren Diffusionskoeffizienten $D_{app}(t_0)$ (b).



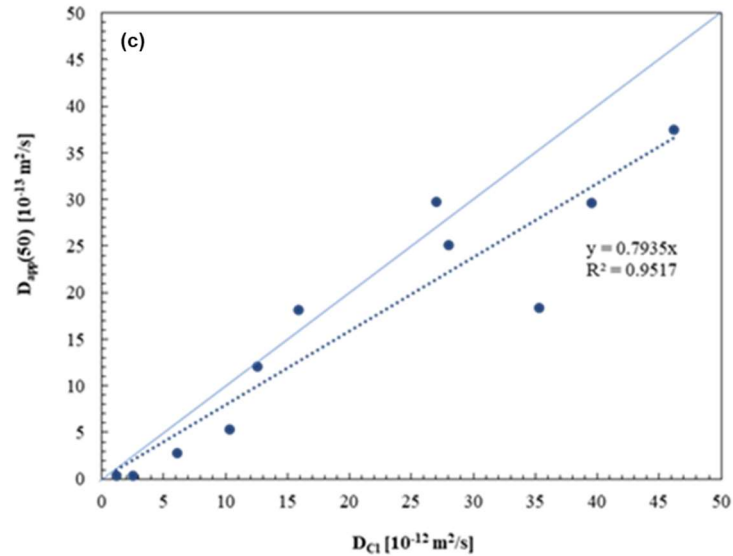


Abb. 35 Chloridwiderstände nach SN EN 12390-11 vs. SIA 262/1 Anhang B (a) $D_{app}(t=90$ Tagen) gemessen, (b) $D_{app}(t_0)$ ermittelt durch Regression und (c) $D_{app}(t=50$ Jahre)

Insgesamt ist der D_{Cl} mehr als doppelt so hoch wie der $D_{app}(t=90$ Tage) und rund vier mal so hoch wie der $D_{app}(t_0)$. Nach 50 Jahren ist $D_{app}(t=50y)$ in [$10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$] etwas mehr als eine Potenz geringer als D_{Cl} in [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]. $D_{app}(t=50y)$ wurde mithilfe der ermittelten Zeitexponenten auf 50 Jahre aus den Untersuchungen nach SN EN 12390-11 hochgerechnet.

In *Tab. 12* wurden Präzisionsdaten abgeschätzt. Es ist zu bemerken, dass diese Daten nur Anhaltswerte geben, da die Prüfung nur von zwei Laboren durchgeführt wurde und die Vergleichbarkeit anhand einer Probe bestimmt wurde. Dennoch stimmen die Resultate gut mit denen der EN 12390-12 und *fib* Bulletin 112 [53] überein.

Tab. 12 Abgeschätzte Präzisionsdaten

Mischung	Niveau Chloriddiffusionskoeffizient nach 90 Tagen	Vergleichsstandardabweichung	Vergleichsgrenze
		S_R [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	R [mm]
Chloriddiffusionskoeffizient in der Eintauchmethode	0.3 – 19.1 $10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$	0.12-1.93	0.3-5.2
Präzision ausgedrückt als Variationskoeffizient		CoV S_R [%]	CoV R [%]
Chloriddiffusionskoeffizient in der Eintauchmethode		11-30	30-81

4 Korrelationen

4.1 Karbonatisierungswiderstand vs. w/CaO

Abb. 36 zeigt die Karbonatisierungskoeffizienten K_N nach SIA 262/1 Anhang I in Abhängigkeit des w/CaO_r , d.h. beim CaO wurde lediglich der CaO des $CaCO_3$ abgezogen (a) und des $w/CaO_{r,3d}$ bzw. $w/CaO_{r,28d}$ für den Hydratationsgrad nach 3 (SIA262/1 Anhang I) bzw. 28 Tagen (EN 12390-10 bzw. -12) (b), welcher anhand des Anteils an der 91 Tage Festigkeit abgeschätzt wurde.

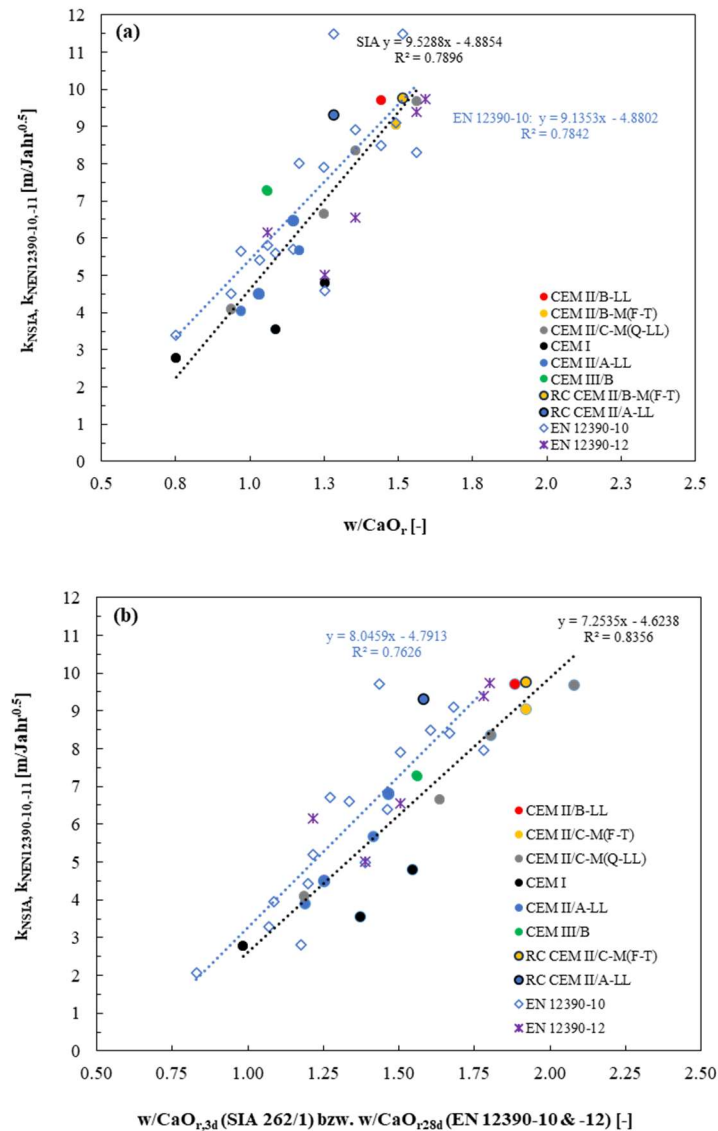
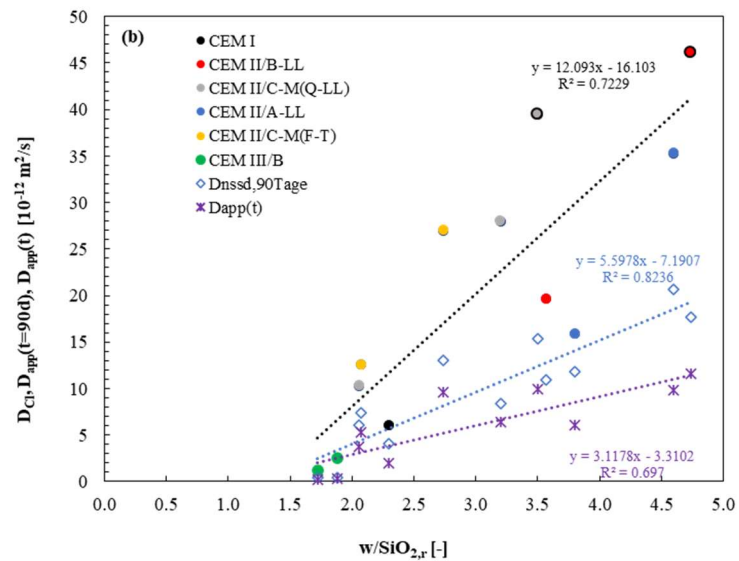
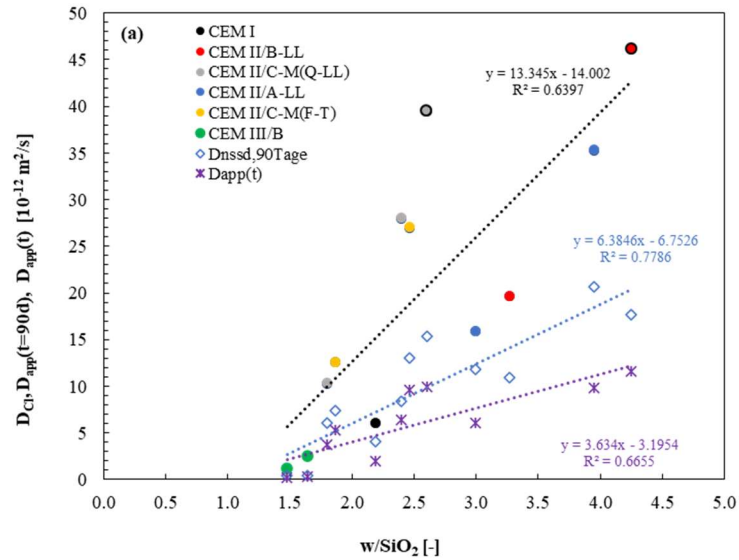


Abb. 36 Karbonatisierungskoeffizienten K_N in Abhängigkeit des (a) w/CaO und des (b) w/CaO_r unter Berücksichtigung des Hydratationsgrads bei nur 3 Tagen Hydratation

Sowohl die Korrelation zwischen Karbonatisierungswiderstand und w/CaO als auch zwischen Karbonatisierungswiderstand und w/CaO_r ergeben einen zufriedenstellenden Zusammenhang [vgl. 17]. Die geringeren Karbonatisierungskoeffizienten in der Prüfung nach EN 12390-10 spiegeln sich in der nach unten versetzten Regressionsgeraden wider, vgl. Abb. 36 (a). Beim w/CaO_r wurde der Einfluss des Hydratationsgrads auf die Pufferkapazität überschätzt, wodurch die Korrelationsgerade steiler verläuft.

4.2 Chloridwiderstand vs. w/SiO_2 , $w/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$

Abb. 37 zeigt die Korrelation zwischen Chloridwiderstand CW und (a) w/SiO_2 , (b) $w/\text{SiO}_{2,r}$ (c) $w/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)$ und (d) $w/(\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3)_r$. Bei (b) und (d) wird der Hydratationsgrad einer 28-tägigen Nachbehandlung berücksichtigt.



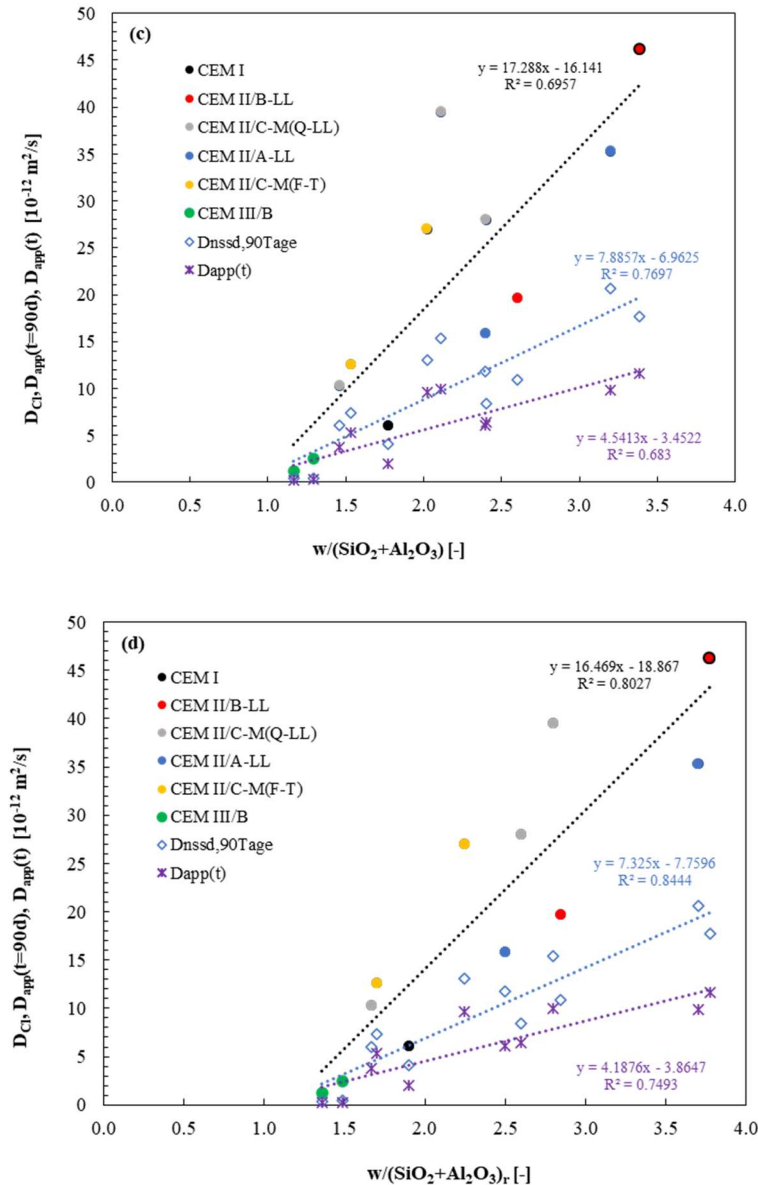
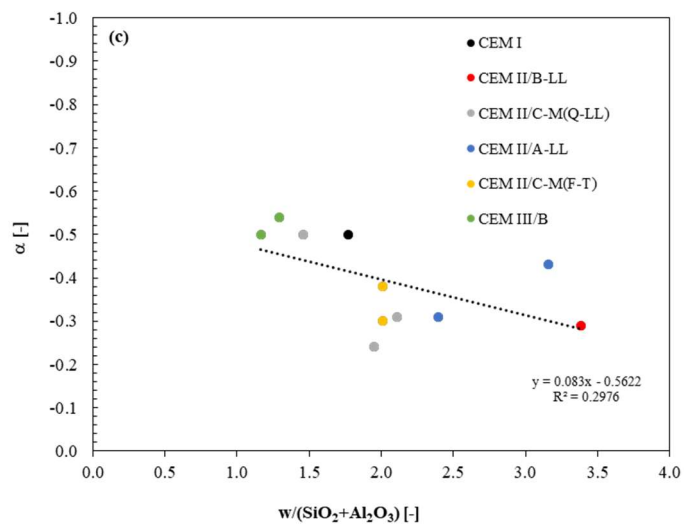
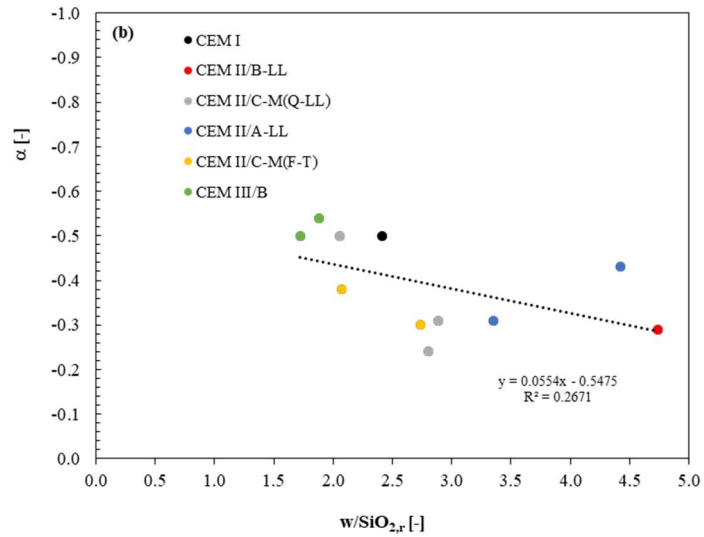
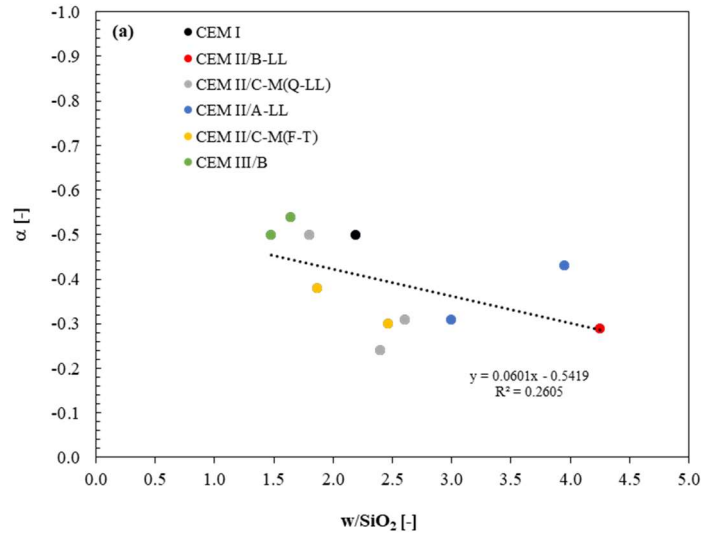


Abb. 37 Korrelation zwischen Chloridwiderstand CW und (a) w/SiO_2 , (b) $w/\text{SiO}_{2,r}$ (c) $w/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ und (d) $w/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)_r$

Sowohl mit dem w/SiO_2 als auch mit $w/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ ergibt sich eine zufriedenstellende Korrelation. Jedoch liegt das Bestimmtheitsmass bei der Korrelation mit $w/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ für alle Prüfarten auf deutlich höherem Niveau. Während die Berücksichtigung des Hydratationsgrads die Korrelation bei w/SiO_2 verbessert, ist das Gegenteil bei $w/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ der Fall. Dies könnte darauf zurückgeführt werden, dass der Hydratationsgrad des Al_2O_3 für die Korrelation wird die CEM III/B Mischung besonders stark unterschätzt und die CEM II/C-M(Q-LL) besonders stark überschätzt.

Abb. 38 zeigt die Korrelation zwischen Altersexponent α und (a) w/SiO_2 , (b) $w/\text{SiO}_{2,r}$ (c) $w/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)$ und (d) $w/(\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3)_r$. Bei (b) und (d) wird der Hydratationsgrad einer 28-tägigen Nachbehandlung berücksichtigt. Der Altersexponent beschreibt die zeitliche Entwicklung bzw. zeitliche Abnahme des Diffusionskoeffizienten. Der Altersexponent wurde aus Regression an die zu drei Zeitpunkten gemessenen Diffusionskoeffizienten nach Gl. (3.2) bestimmt. Da die spätere Klassifizierung von Beton in XRDS-Klassen anhand des auf 50 Jahre extrapolierten Diffusionskoeffizienten bestimmt wird, kann ein sehr hoher Altersexponent zu einer starken Abnahme des Diffusionskoeffizienten und damit zu einer Einteilung des Betons in eine qualitativ hochwertige Klasse führen.



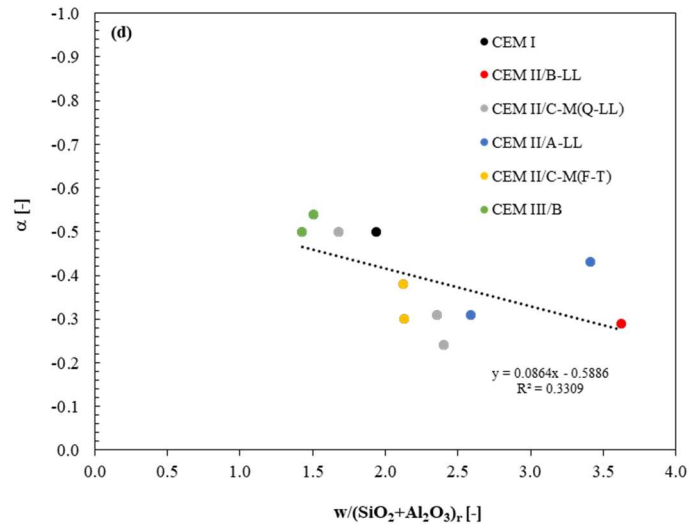


Abb. 38 Korrelation zwischen Altersexponent α und (a) w/SiO_2 , (b) $w/SiO_{2,r}$ (c) $w/(SiO_2+Al_2O_3)$ und (d) $w/(SiO_2+Al_2O_3)_r$

Mit dem w/SiO_2 ist die Korrelation zum Altersexponenten α weniger zufriedenstellen. Ausgeprägtere Tendenzen sind bei der Korrelation zwischen dem Altersexponenten als auch mit $w/(SiO_2+Al_2O_3)$ ergibt sich eine zufriedenstellende Korrelation. Tendenziell sollte der Al_2O_3 und der Hydratationsgrad bzw. die weitere Hydratation über die Auslagerungszeit einen wesentlichen Einfluss auf den Altersexponenten haben. Die Korrelation ist aber unter Berücksichtigung des SiO_2 und des Al_2O_3 Gehalts am präzisesten.

4.3 Karbonatisierungs- und Chloridwiderstand vs. f_c

Abb. 39 zeigt (a) die Karbonatisierungskoeffizienten K_N nach SIA 262/1 Anhang I, EN 12390-10 und EN 12390-12 und (b) den Chloridwiderstand D_{Cl} nach SIA 262/1 Anhang B, den Chloriddiffusionswiderstand nach 90 Tagen Exposition $D_{nssd,90}$ nach EN 12390-11 und den scheinbaren Diffusionskoeffizienten ermittelt durch Regression an Diffusionskoeffizienten bestimmt nach 35 Tagen, 90 Tagen und 365 Tagen Exposition nach EN 12390-11 in Abhängigkeit der 28 Tage Würfeldruckfestigkeit.

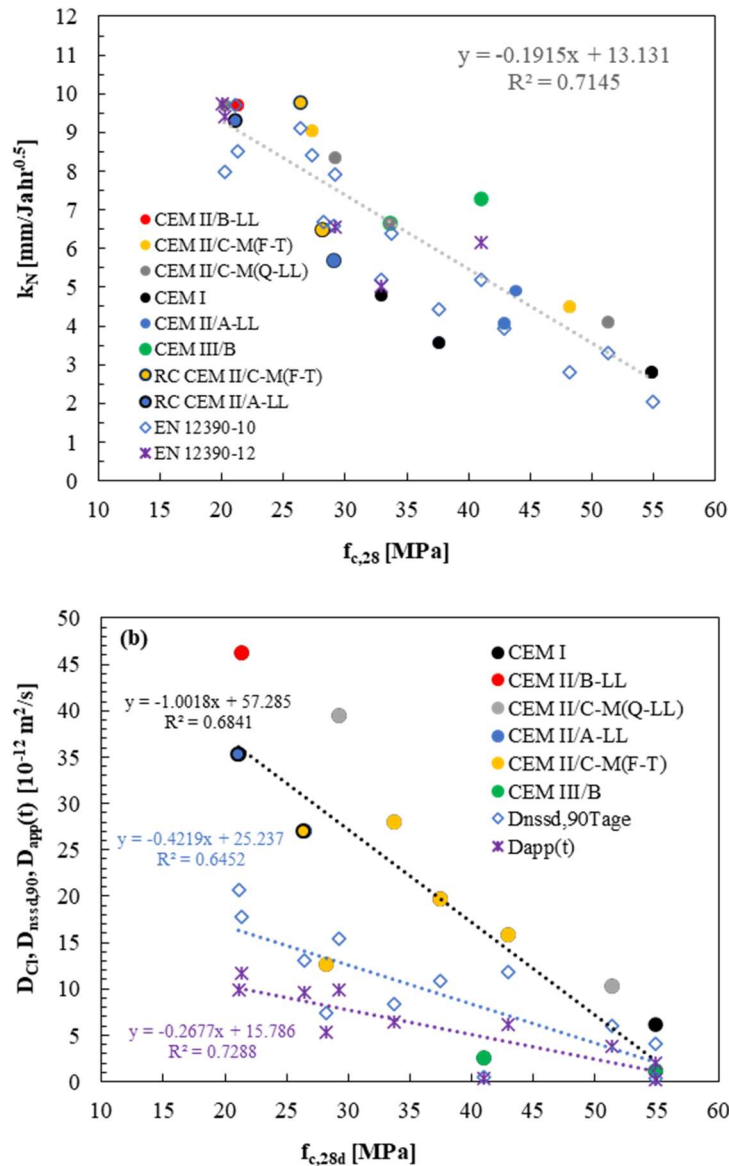
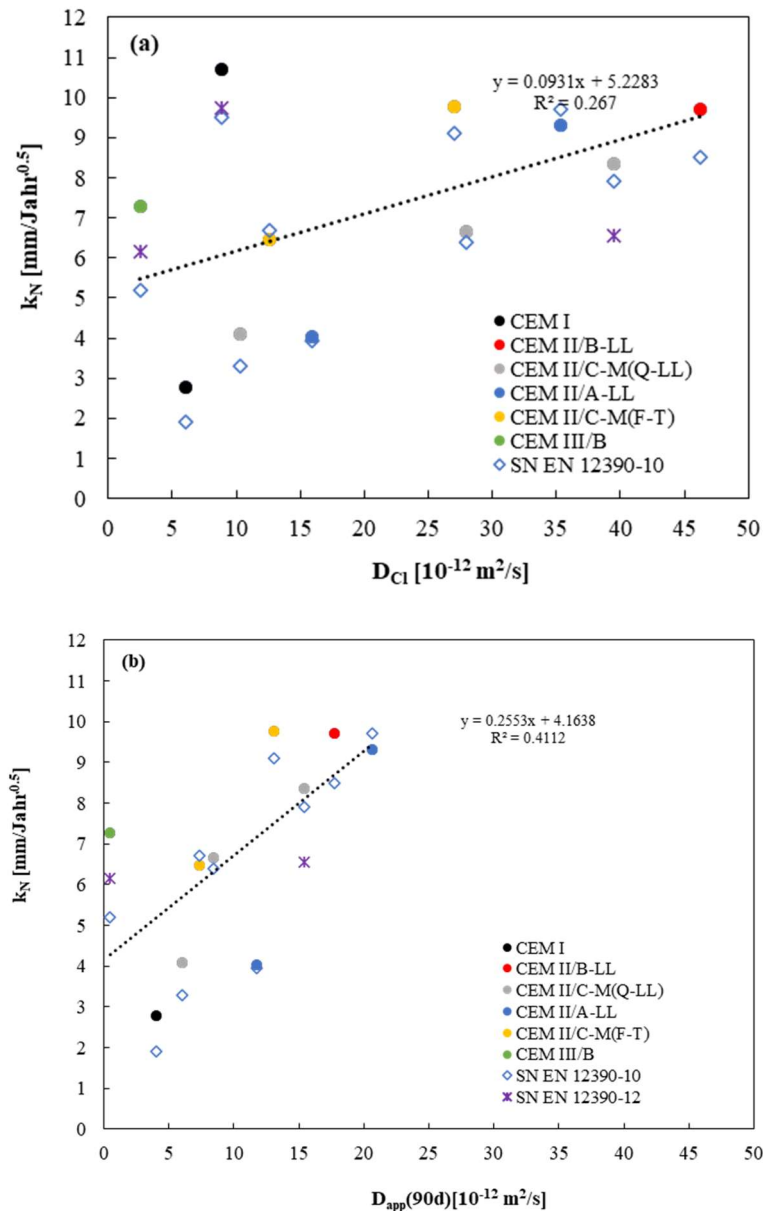


Abb. 39 (a) Karbonatisierungskoeffizienten K_N und (b) Chloridwiderstände in Abhängigkeit der 28 Tage Würfeldruckfestigkeit

Die Druckfestigkeit zeigt indirekt auch die Porosität des Betons und kann damit auch die Dichtigkeit gegenüber Karbonatisierung bzw. Chlorideintrag beschreiben. Das Bestimmtheitsmass ist bei der Korrelation mit dem w/CaO bzw. dem w/SiO_2 oder dem $w/(SiO_2 + Al_2O_3)$ präziser.

4.4 Karbonatisierung vs. Chloridwiderstand

Abb. 40 zeigt die Karbonatisierungskoeffizienten k_N ermittelt nach SIA 262/1 Anhang I, (Ausgefüllte Symbole) nach EN 12390-10 (leere Symbole) und EN 12390-12 (Sterne) in Abhängigkeit des (a) Chloridwiderstand nach SIA262/1 Anhang B, (b) des Chloriddiffusionskoeffizient nach 90 Tagen Exposition $D_{app}(90d)$ nach EN 12390-11 und (c) des scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizient $D_{app}(t_0)$ ermittelt durch Regression an die gemessenen Diffusionskoeffizienten nach EN 12390-11 Anhang A.



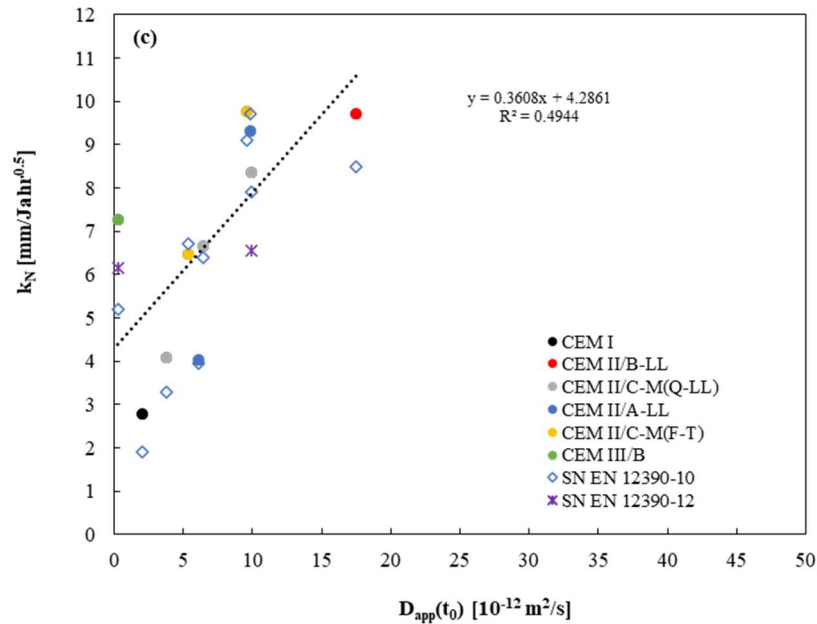


Abb. 40 Karbonatisierungskoeffizienten k_N ermittelt nach SIA 262/1 Anhang I (ausgefülltes Symbol), nach EN 12390-10 (leeres Symbol) und EN 12390-12 (Stern) in Abhängigkeit des (a) Chloridwiderstand D_{Cl} nach SIA262/1 Anhang B, (b) des Chloriddiffusionskoeffizient nach 90 Tagen Exposition $D_{app}(90d)$ nach EN 12390-11 und (c) des scheinbaren Chloriddiffusionskoeffizient ermittelt durch Regression an die gemessenen Diffusionskoeffizienten $D_{app}(t_0)$ nach EN 12390-11

Der Karbonatisierungskoeffizient und der Diffusionskoeffizient bzw. Migrationskoeffizient werden durch die chemische Zusammensetzung und die Porosität des Betons bestimmt. Sowohl bei Karbonatisierung als auch bei Chlorideintrag nimmt die Fortschrittsgeschwindigkeit zu, wenn die tortuose Porosität zunimmt. Demgegenüber nimmt die Geschwindigkeit des Karbonatisierungsfortschritts ab, wenn mehr Klinker bzw. mehr CaO_r , d.h. karbonatisierbares Material vorliegt. Bei Chlorid nimmt die Geschwindigkeit des Eintrags freier Chloride zu, wenn der Klinkergehalt bzw. der Anteil an puzzolanischen und latent hydraulischen Bestandteilen bzw. der C-(A-)S-H und AFm Gehalt zunehmen ab.

Da tendenziell eine positive Korrelation zwischen Karbonatisierungswiderstand und Chloridwiderstand vorliegt, kann angenommen werden, dass der Einfluss der Porosität bei beide Größen dominant ist.

Die starke Streuung bzw. das geringe Bestimmtheitsmass zeigt aber auch, dass in den Fällen, in denen beispielsweise der C-S-H Gehalt hoch ist, der Chloridwiderstand zu, der Karbonatisierungswiderstand aber abnimmt.

5 Klassifizierung von Beton

5.1 Klassifizierung in XRC-Klassen

Die Prüfung des Karbonatisierungswiderstand fand an Sorten 0, Sorte A, Sorte B, Sorte C und Sorte F statt. Damit wurde eine grosse Zahl von Betonen die üblicherweise im Portfolio der Betonhersteller vorliegenden abgedeckt.

Die Zahlen der XRC-Klassen beschreiben den Karbonatisierungswiderstand eines Betons nach 50 Jahren in ausgelagert in 65% relativer Luftfeuchte bei 20°C und 400 ppm CO₂. Diese Definition soll die standardisierte geschützte Aussenbedingung XC3-Exposition simulieren. Die Referenzprüfung ist die EN 12390-10 Chamber Test. Zur Korrelation mit der Schweizer Dauerhaftigkeitsprüfung können zwei Abminderungsfaktoren in Betracht gezogen werden:

Aus den Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Schweizer Schnellprüfung (SIA 262/1 Anhang I) geringfügig schärfer ist als die EN 12390-10 chamber test Prüfung. Dies liegt vermutlich an (a) der geringeren Feuchte in der Prüfung (57% r. F.) und (b) der längeren Nachbehandlungsdauer. Die höhere Feuchte entspricht eher den üblichen Schweizer Umgebungsbedingungen (Wildegg, Horw). Die längere Nachbehandlung soll die Nachhydratation in geschützter Aussenlagerung simulieren. Insgesamt waren die Karbonatisierungswiderstände nach EN 12390-10 nur **0.92-mal** so hoch die die nach SIA 262/1 Anhang I. Der Abminderungsfaktor zur Korrelation der Karbonatisierungskoeffizienten mit den XRC-Klassen läge dann bei 0.92.

In Untersuchungen nach [Hunkeler et al. 2019] wurde bestätigt, dass die zeitliche Entwicklung des Karbonatisierungsfortschritts unter geschützten Aussenbedingungen XC3 (Expositionen Visp, Wildegg und Horw) vom Wurzel-Zeit-Gesetz abweicht. Statt eines Zeitexponenten von 0.5 gemäss Wurzel-Zeit-Gesetz, weisen Betone die in der geschützten Aussenlagerung liegen (auch bei unter 65% relativer Feuchte wie in Visp) einen Zeitexponenten von unter 0.45 aufweist. Diese Abweichung wurde bereits bei dem Schweizer Grenzwert für den Karbonatisierungskoeffizienten (XC3: $k_N \leq 6.5 \text{ mm/Jahr}^{0.5}$) im nationalen Anhang der SN EN 206 mit aufgenommen und in Bauprojekten der ASTRA angewendet. Bei einer Lebensdauer von 50 Jahren ergibt sich unter Ansatz eines Zeitexponenten von 0.45 anstelle von 0.50 ein **0.82-mal geringerer** Karbonatisierungskoeffizient, vgl. Gl. (5.1).

$$k_N(b = 0.45 \text{ zu } 0.5) = k_N \cdot 50^{(0.45-0.5)} = k_N \cdot 0.82 \quad (5.1)$$

Der Abminderungsfaktor zur Korrelation der Karbonatisierungskoeffizienten mit den XRC-Klassen läge dann bei 0.82.

Tab. 13 zeigt beispielsweise die Korrelation zwischen XRC und KW in Abhängigkeit der oben vorgestellten Faktoren.

Tab. 13 Korrelation SIA 262/1-I k_N mit XRC-Klassen

KW	k_N in Abhängigkeit der XRC		XRC [mm/Jahr ^{0.5}]
	EN = XRC = $k_N \cdot 0.92$ (EN12390-10 statt SIA 262/1I)	EN = XRC = $k_N \cdot 0.82$ (b=0.45 statt b=0.5)	
4.5	4.1	3.7	XRC4
6.5 = KW	6.0	5.3	XRC6
10	9.2	8.2	XRC9

Abb. 41 zeigt XRC-Klasse in Abhängigkeit der Karbonatisierungswiderstände KW bzw. K_N gemäss SIA 262/1 Anhang I. Zur Korrelation zwischen XRC und KW wurde konservativ nur ein Faktor angesetzt. Ferner sind die Sorten angegeben, welche gerade noch die spezifische XRC-Klasse erfüllen. Die Klassifizierung bestätigt auch [33]. Weiter sind der jeweilige w/CaOr aus Abb. 34 und ein unterer und ein oberes GWP aus Abb. 16 angegeben. Beim GWP wurden jeweils die GWP-Bereiche verwendet, die Mischungen aufwiesen, die die Klassengrenze relative genau erreichen. Für die XC4 Expositionsklasse wurde noch eine Alternative für die Überdeckungen angegeben.

Ferner wurde im Rahmen dieser Arbeit die Mischung M16 der Sorte C mit CEM II/A-LL als CH-Referenz für das GWP definiert. Die prozentuale Abminderung bzw. Erhöhung gegenüber der Referenz ist ebenfalls mit angegeben.

Tabelle 6.3 (CH) — Mindestbetondeckung $c_{min,dur}$ für unlegierten Betonstahl — Karbonatisierung

Reduktion (-) oder Zunahme (+) in GWP		w/CaO	Sorte	KW	ERC	Expositionsklasse (Karbonatisierung)									
						XC1		XC2		XC3		XC4 alternative		XC4	
						Geplante Nutzungsdauer (Jahre)									
lower	upper					50	100	50	100	50	100	50	100	50	100
81	46	0.65	F	1.0	XRC 1	10	10	10	10	10	10	10	10	10	15
64	37	0.75	F	2.0	XRC 2	10	10	10	15	10	15	10	15	10	20
48	28	0.90	F,C	3.5	XRC 3	10	10	10	15	10	20	10	20	15	25
32	19	1.00	C, F	4.5	XRC 4	10	10	15	20	15	25	15	25	20	30
16	9	1.15	C	5.5	XRC 5	10	10	15	20	20	30	20	30	25	35
0	0	1.25	C, B	6.5	XRC 6	10	10	20	25	25	35	25	35	30	40
-16	-10	1.35	B, C	7.5	XRC 7	10	10	20	25	30	40	30	40	35	45
-33	-19	1.50	A, B	9.0	XRC 8	10	10	25	30	35	45	35	45	40	50
-50	-29	1.60	A	10.0	XRC 9	10	10	25	30	40	50	40	50	45	55

ANMERKUNG 1 XRC-Klassen für die Beständigkeit gegen Korrosion infolge von Karbonatisierung werden aus der Karbonatisierungstiefe [mm] (charakteristischer Wert 90 %-Quantil) ermittelt, von der angenommen wird, dass sie nach 50 Jahren unter Referenzbedingungen (400 ppm CO₂ in einer konstanten 65 %-RH-Umgebung und bei 20 °C) erreicht wird. Der Wert in der Bezeichnung von XRC hat die Dimension einer Karbonatisierungsrate [mm/√(Jahre)].

ANMERKUNG 2 Die empfohlenen Werte der Mindestbetondeckung $c_{min,dur}$ gehen von einer Bauausführung und Nachbehandlung in Übereinstimmung mit SN EN 13670 und SIA262.

ANMERKUNG 3 Die Mindestbetondeckungen können um ein zusätzliches Sicherheitselement $\Delta c_{dur,y}$ erhöht werden, das besondere Anforderungen (z. B. extremere Umgebungsbedingungen) berücksichtigt.

Abb. 41 Korrelation zwischen XRC-Klassen, KW, w/CaO, GWP und minimaler Bewehrungsüberdeckung mit Anforderungen an die Ausführung nach SIA 262, in Abhängigkeit der Expositionsklassen mit Alternative für eine Anpassung der XC4 Überdeckungen

Anhand der Resultate aus den vorliegenden Untersuchungen sowie [7, 56] und den Korrelationen in *Abb. 39* wurden drei XRC Klassen ausgewählt mit dem Ziel i) den KW für die Expositionsklassen XC3 und XC4 ohne Änderung übernehmen zu können, ii) für die Sorten 0 und A neu eine Klasse mit XRC und KW vorzuweisen, iii) das Potenzial dauerhafterer Betone der Sorte F beispielsweise in der Vorfabrikation oder in der Ausführungskontrolle mit berücksichtigen zu können, iv) hinreichende Sprünge in der Überdeckung von Klasse zu Klasse vorzuweisen und v) die Abstände zwischen zwei Klassen so zu wählen, dass die Streuung der Karbonatisierungsprüfung geringer ist als die Klassendifferenz.

Gewählt wurden die Klassen XRC4, XRC6 und XRC10. *Abb. 42* vergleicht die gewählten drei XRC-Klassen mit den gemessenen Karbonatisierungswiderständen nach SIA 262/1 Anhang I getrennt nach Sorte. Die XRC-Klasse, welche sich bereits mit dem Schweizer Grenzwert für den Karbonatisierungswiderstand deckt, ist als durchgezogene rote horizontale Linie gekennzeichnet.

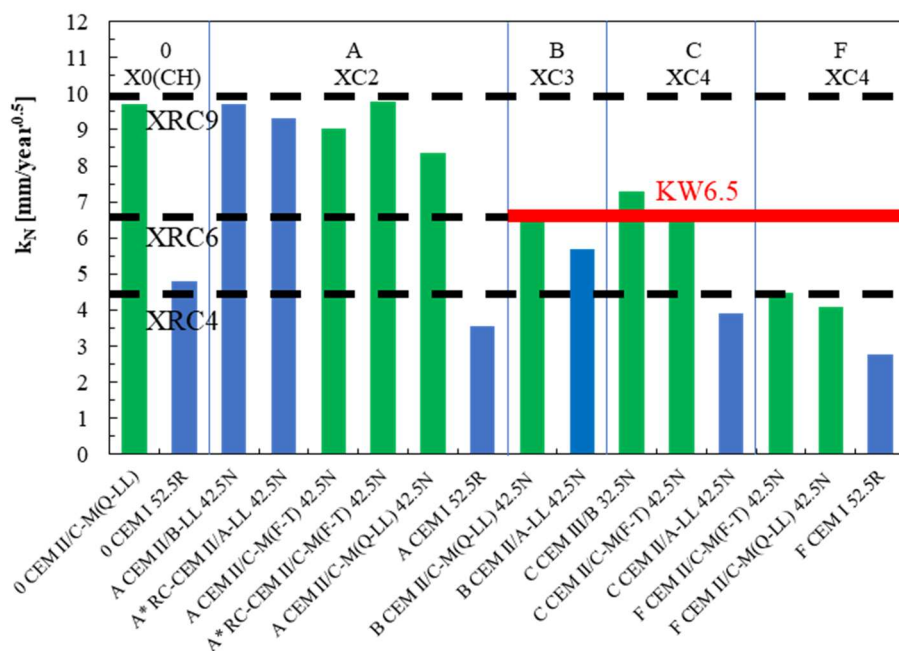


Abb. 42 Vorschlag für XRC-Klassen mit zugehörigen k_N in der Schweiz

Mit der Klasse XRC9 werden alle Betone der Sorte 0 und A bzw. der Expositionsklassen X0(CH) und XC2 abgedeckt. Mit der Klasse XRC6, welche identisch mit dem Schweizer Dauerhaftigkeitsgrenzwert KW ist, werden die Sorten der Expositionsklasse XC3 und XC4 abgedeckt. Mit der Klasse XRC4 werden Sorten, die üblicherweise in der Expositionsklasse XD3 verwendet werden, abgedeckt. Die Differenz in der Betonüberdeckung liegt zwischen 10 (XRC6 → XRC4) und 15 mm (XRC 6 → XRC 10). Die höhere Überdeckung in XC3/XC4 um 15 mm mehr Beton bei einem nun 26.5 cm statt 25 cm starken Betonbauteil fällt bezüglich GWP kaum ins Gewicht, während die Klinkereinsparung auf die gesamten 26 cm das GWP fast halbiert, d.h. signifikant reduziert, vgl. *Tab. 14*.

Tab. 14 CO₂ Einsparpotenzial in der XC4 Exposition bei Verwendung der Sorte A

Sorte	ERC	Zement	Zementgehalt [kg/m ³]	GWP [kg/m ³]	Bauteildicke [cm]	GWP [kgCO ₂ /m ²]
C	XRC6	CEM II/A-LL (GWP=210)	300	210	25 (davon 4 Überdeckung)	17.75
0	XRC9	CEM II/C-M(Q-LL) (GWP=125)	240	125	26 (davon 5 Überdeckung)	7.8
Bilanz						- 50%

Bisher können Betone der Sorte A nicht für die Expositionsklassen XC3 oder XC4 verwendet werden. Durch Einführung der XRC8 Klasse in SN EN 206 zusammen mit der Einführung einer zusätzlichen Überdeckung für die XRC9 Betone in den Expositionsklassen XC3 und XC4, die höher ist als die bisherige Überdeckung, könnten diese Betonsorten zukünftig auch in den Expositionsklassen XC3 und XC4 eingesetzt werden. Der Vorteil ist, dass gerade diese Betonsorten hohes Treibhausgas-Einsparpotenzial bieten.

Bisher werden Betone der Sorte F für die Expositionsklasse XD3 eingesetzt. Betone mit sehr hohem Chloridwiderstand werden meist aus Zementen mit geringer CO₂-Pufferkapazität hergestellt. Dennoch zeigen die vorliegenden Untersuchungen, dass diese Betonsorte auch unter Verwendung von Zementen mit geringerer CO₂ Pufferkapazität (CEM II/C-M) halten den KW nach SIA 262/1 mit immenser Sicherheit ein, weshalb derzeit auf den Einsatz der Sorte F ausserhalb der XD3 Exposition verzichtet wird. Zukünftig könnten in der XC3- oder XC4-Exposition ohne Chloridbelastung die im Portfolio befindlichen Sorte F genutzt werden, um geringere Betonüberdeckungen auszuwählen.

Vorteilhaft wäre noch eine weitere XRC-Klasse (z.B. XRC9) zwischen XRC6 und XRC10 einzufügen.

Tab. 15 zeigt die Überdeckung für die XRC4-, XRC6- und XRC9-Klasse für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren, welche im BD EN 1992-1-1 von der Schweizer Delegation anhand von Untersuchungsergebnissen und Modellrechnungen vorgeschlagen wurden. Den Überdeckungen sind die in SIA 262 angegebenen nominellen Betonüberdeckungen gegenübergestellt. Wenn keine Überdeckung in SIA 262 angegeben ist, ist keine Angabe (-) eingetragen.

Tab. 15 Gegenüberstellung KW, XRC und Überdeckungen $\beta=1.5$								
[mm/Jahr ^{0.5}]		Ca. Sorte	c _{nom} [mm] XC2		c _{nom} [mm] XC3		c _{nom} [mm] XC4	
XRC	KW		BD EN 1992-1-1	SIA262	BD EN 1992-1-1	SIA262	BD EN 1992-1-1	SIA262
4	-	F	25	-	25	-	30	-
6	6.5	B/C	30	-	35	35	40	40
9	-	A	35	35	45	-	50	-

5.2 Klassifizierung in XRDS-Klassen

Die Prüfung des Chloridwiderstand fand an den Sorten A, B, D und F statt. Damit wurde eine grosse Zahl von Betonen die üblicherweise im Portfolio der Betonhersteller vorliegenden abgedeckt.

Die Zahlen der XRDS-Klassen beschreiben den Chloriddiffusionskoeffizienten in $10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$ eines Betons nach 50 Jahren in 30g/L NaCl-Lösung bei 20°C. Diese Prüfung soll die XS2 Exposition simulieren. Die Referenzprüfung hierfür ist die EN 12390-11.

Aus den hiesigen Untersuchungen wurde festgestellt, dass die Schweizer Schnellprüfung (SIA 262/1 Anhang B) mehr als doppelt so hohe CW liefert, als der Diffusionskoeffizient nach 90 Tagen in der EN 12390-11 Prüfung. Insgesamt waren die Chloriddiffusionskoeffizienten nach EN 12390-11 nur **0.45-mal** so hoch die die nach SIA 262/1 Anhang B.

In den hiesigen Untersuchungen und Literaturlauswertungen zu Zeitexponenten (Age Exponenten α) in der Chloridprüfung wurde festgestellt, dass diese mindestens 0.2 bis 0.3 betragen. Ausnahmen bilden Betone hohen Anteilen inertem Material (Kalkstein und recyciertem Feinanteil CEM II/C-M(F-LL)). Bei einer Lebensdauer t_{SL} von 50 Jahren und der Basis, d.h. dem Diffusionskoeffizient nach 90 Tagen ergibt sich unter Ansatz eines Age Exponenten α von 0.3 anstelle von 0.0 ein **0.2-mal geringer** Chloridwiderstand.

Insgesamt ergibt sich dann die Korrelation zwischen XRDS und D_{Cl} gemäss Gl. (5.2).

$$\begin{aligned} XRDS \left[\frac{10^{-13} \text{ m}^2}{\text{s}} \right] &= D_{app}(t = 90d) \cdot 10 \cdot \left(\frac{50}{t = 0.247} \right)^{-0.3} = D_{Cl} \cdot 10 \cdot 0.45 \cdot 0.2 \\ &= D_{Cl} \cdot 0.9 \left[\frac{10^{-1} \text{ m}^2}{\text{s}} \right] \end{aligned} \quad (5.2)$$

Basiert die Rechnung auf dem scheinbaren Diffusionskoeffizienten $D_{app}(t_0)$ ist $D_{app}(t_0)$ 0.27-mal geringer als D_{Cl} . Damit würde in Gl. (5.2) 0.45 durch 0.27 ersetzt. Ferner würde in Gl. (5.2) anstelle von $t = 0.247$ Jahre ein $t = t_0 = 1$ Jahr eingesetzt, was für den gewählten Zeitexponent zu einer Abminderung um 0.31 statt 0.2 führen würde. Das Endresultat bliebe vergleichbar.

Tab. 16 zeigt CW und weitere D_{Cl} sowie deren Korrelation mit den XRDS-Klassen. Da die XRDS-Klassengrenzen von 0% der geprüften Betone überschritten werden dürfen, was bisher auch bei der Prüfung des CW der Fall war, ist die zusätzliche Anforderung and die XRDS-Klasse eingehalten und übertroffen. Die zusätzliche Anforderung ist das die XRDS-Klassengrenze in maximal 10% der Fälle überschritten werden darf. Hier darf die XRDS-Klassengrenze in 0% der Fälle überschritten werden.

Tab. 16 Korrelation SIA 262/1-B D_{Cl} mit XRDS-Klassen

CW	D_{Cl} in Abhängigkeit der ERC		XRDS [$10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$]
	XRDS [$10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$] = $10 \cdot 0.2 \cdot 0.45 \cdot D_{Cl} = 0.9 \cdot D_{Cl}$	oder XRDS [$10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$] = $10 \cdot 0.31 \cdot 0.28 \cdot D_{Cl} = 0.87 \cdot D_{Cl}$	
5		4.5	XRDS5
10 = CW		9	XRDS9
18		16	XRDS16
20		18	XRDS18

Abb. 43 zeigt die XRDS-Klasse in Abhängigkeit der Chloridwiderstände CW bzw. D_{Cl} gemäss SIA 262/1 Anhang B. Des Weiteren sind die Sorten angegeben, welche die spezifische XRDS-Klasse noch erfüllen. Weiter sind der jeweilige $w/(SiO_2+Al_2O_3)$ aus Abb. 35 angegeben. Die Klassifizierung bestätigt auch [33]. Da der Chloridwiderstand nicht wie bei der Karbonatisierung vom Klinkergehalt direkt abhängt, ist auch die Angabe eines GWP hier kaum zielführend. Lediglich die XRDS-Klassen \leq XRDS5 liegen auf einem niedrigen Niveau, da nur der CEM III/B diese niedrigen D_{Cl} erreicht. Mit zunehmendem D_{Cl} nimmt zwar die Betonqualität ab, d.h. u.a. könnte der Bindemittelgehalt abnehmen und der w/z -Wert nimmt zunehmen. Dann wäre dies mit einer Verringerung des GWP verbunden. Der D_{Cl} nimmt jedoch auch ab, wenn der Anteil z.B. von Hüttensand im Bindemittel reduziert wird. Dies hätte wiederum einen negativen Einfluss auf das GWP. Da keine eindeutige Korrelation zwischen GWP und XRDS über verschiedene Bindemittel angegeben werden konnte, wird auf die Angabe detaillierter GWP wie bei den XRC-Klassen für die XRDS-Klassen verzichtet. Auf das GWP wurde verzichtet. Weiterführende Untersuchungen würden hier erfordert.

Tabelle 6.4 (CH) — Minimale Betondeckung $c_{min,dur}$ für unlegierten Betonstahl — Chlorid

w/SiO ₂	w/ (SiO ₂ +Al ₂ O ₃)	Sorte	CW	ERC	Expositionsklasse (Chlorid)					
					XD1=XD2a(CH)		XD2 =XD2b(CH)		XD3 = XD2b	
					Geplante Nutzungsdauer (Jahre)					
					50	100	50	100	50	100
1.5	1.30	F	1	XRDS 1	10	20	15	25	20	30
1.6	1.35	F	2	XRDS 2	15	25	20	30	25	35
1.8	1.45	F	4	XRDS 4	20	30	25	35	30	40
2.1	1.55	F, D	6	XRDS 6	25	35	30	40	35	45
2.3	1.70	F, D	9	XRDS 8	25	35	35	45	40	50
2.4	1.80	F, D	10	XRDS 9	25	35	40	50	45	55
2.6	1.90	D	13	XRDS 12	30	40	45	55	50	60
2.7	2.00	D	15	XRDS 14	30	40	50	60	55	65
2.8	2.10	D	18	XRDS 16	30	40	55	65	60	70
2.9	2.30	D*	20	XRDS 18	30	40	60	70	65	75
3.1	2.50	B	26	XRDS 24	35	45	65	75	70	80
3.5	2.90	B, A	33	XRDS 30	40	50	70	80	75	85
4.3	3.50	A	44	XRDS 40	45	55	80	90	85	95

ANMERKUNG 1 XRDS-Klassen für die Beständigkeit gegen Korrosion infolge von Chlorideintrag werden aus der Tiefe des Chlorideintrags [mm] (charakteristischer Wert 90 %-Quantil) ermittelt, die einer Referenzchloridkonzentration [0,6 % Massenanteil des Bindemittels (Zement + Zusatzstoffe des Typs II)] entspricht, von der angenommen wird, dass sie nach 50 Jahren auf einem Beton erreicht wird, der einseitigem Eindringen von Referenzmeerwasser (30 g/l NaCl) bei 20 °C ausgesetzt ist. Der Wert in der Bezeichnung von XRDS hat die Dimension eines Diffusionskoeffizienten [$10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$].

ANMERKUNG 2 Die empfohlenen Werte der Mindestbetondeckung $c_{min,dur}$ gehen von einer Bauausführung und Nachbehandlung in Übereinstimmung mit SN EN 13670 und SIA 262.

ANMERKUNG 3 Die Mindestbetondeckungen können um ein zusätzliches Sicherheitselement $\Delta c_{dur,\gamma}$ erhöht werden, das besondere Anforderungen (z. B. extremere Umgebungsbedingungen) berücksichtigt.

Abb. 43 Korrelation zwischen XRDS-Klasse, CW, w/(SiO₂+Al₂O₃) und minimaler Bewehrungsüberdeckung, SIA 262 6.4.6 ist zu berücksichtigen (Nachbehandlungsklasse erhöht bzw. hoch)

Anhand der Resultate aus den vorliegenden Untersuchungen sowie [8, 33] und den Korrelationen in *Abb. 43* wurden beispielhaft XRDS-Klassen ausgewählt mit dem Ziel i) den CW für die Expositionsklassen XD3/XD2b ohne Änderung übernehmen zu können, ii) für die Sorten A bis D neu Klassen mit XRDS und CW vorzuweisen, iii) das Potenzial dauerhafter Betone der Sorte F beispielsweise in der Vorfabrikation oder in der Ausführungskontrolle mit berücksichtigen zu können, iv) hinreichende Sprünge in der Überdeckung von Klasse zu Klasse vorzuweisen und v) die Abstände zwischen zwei Klassen so zu wählen, dass die Streuung der Karbonatisierungsprüfung geringer ist als die Klassendifferenz.

Gewählt wurden die Klassen XRDS5, XRDS11, XRDS18 und zusätzlich XRDS30, XRDS40. *Abb. 44* vergleicht die gewählten drei XRDS-Klassen mit den gemessenen Chloridwiderständen nach SIA 262/1 Anhang B getrennt nach Sorte. Die XRDS-Klasse, welche sich bereits mit dem Schweizer Grenzwert für den Chloridwiderstand deckt, ist als durchgezogene rote horizontale Linie gekennzeichnet.

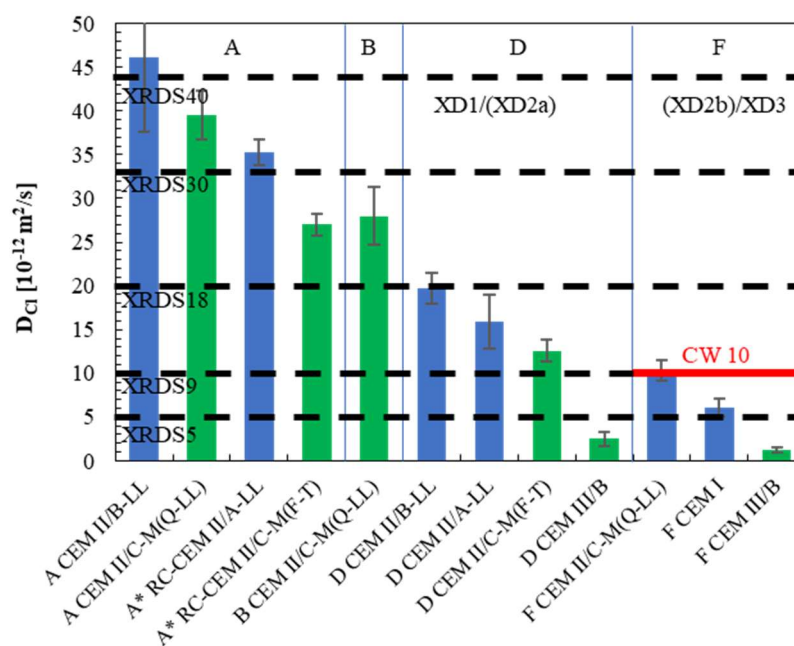


Abb. 44 Vorschlag für XRDS-Klassen mit zugehörigen CW in der Schweiz

Aus der Auswahl an XRDS-Klassen nach EN1992-1-1 wurden drei Haupt-Klassen gewählt, mit dem Ziel die Schweizer Betonsorten F und G abzudecken. Die Klasse XRDS11 korreliert mit dem CW der Sorten F bis G für die XD3/XD2b Exposition.

Mit der Klasse XRDS11 können nun aber auch genauso Betone der Sorte D und E in der XD3/XD2b Exposition eingesetzt werden, solange der Frostwiderstand eingehalten ist und die Luftporen den Chloridwiderstand nicht nachteilig beeinflussen dürfen.

Mit der Klasse XRDS5 kann nun das Potenzial von Betonen (üblicherweise F Betone mit Bindemittel reich an Hüttensand) mit signifikant höherem Chloridwiderstand genutzt werden, indem Bewehrungsüberdeckung eingespart werden darf.

D Betone weisen heute einen CW von $\leq 20 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ auf. Dies korrespondiert mit der XRDS18 Klasse. Für einen Zuverlässigkeitsindex von $\beta = 1.5$ wurden im BD EN 1992-1-1 Überdeckungen berechnet, die die heutigen Anforderungen überschreiten. Überdeckungen für einen Zuverlässigkeitsindex von $\beta = 0.5$ stimmen mit der Vorgabe in SIA262 für die XD1/XD2a Exposition überein. Mit entsprechend höherer Überdeckung könnten die Betone der Sorte D bzw. der XRDS18 Klasse nun auch in der XD3/XD2b Exposition eingesetzt werden.

Bisher können Betone der Sorte A und B nicht für die Expositionsclassen XD1/XD2a und XD3/XD2b verwendet werden. Deshalb wurden zusätzlich noch die Klassen XRDS30 und XRDS40 hinzugenommen, mit dem Ziel zumindest in der wenig scharfen XD1/XD2a Exposition mit geringen Überdeckungen auch weniger hochwertige Betone einsetzen zu dürfen.

Tab. 15 zeigt die Überdeckung für die XRDS5, XRDS11 und XRDS18-Klasse für eine Nutzungsdauer von 50 Jahren gemäss BD EN 1992-1-1 [2], welche anhand von Untersuchungsergebnissen und Modellrechnungen vorgeschlagen wurden. Den Überdeckungen sind den in SIA 262 angegebenen nominellen Betonüberdeckungen gegenübergestellt. Wenn keine Überdeckung in SIA 262 angegeben ist, ist keine Angabe (-) eingetragen.

Tab. 17 Gegenüberstellung CW, XRDS und Überdeckungen $\beta=0.5$

XRDS [10 ⁻¹³ m ² /s]	CW [10 ⁻¹² m ² /s]	Sorte [-]	c _{nom} [mm] XD1/XD2a		c _{nom} [mm] XD3/XD2b	
			BD EN 1992-1-1	SIA262	BD EN 1992-1-1	SIA262
5	-	F	30	-	50	-
9	10	F	35	-	55	55
18	-	D	40	40	60	-
30	-	B	45	-	-	-
40	-	A	50	-	-	-

5.3 Sorten ohne Grenzwert – Vorschlag für KW und CW

Gemäss Tabelle NA.6 (Abb. 45) werden keine KW oder CW für die Sorten A (XC2) bzw. Sorte D und E (XD1, XD2a) angegeben.

Bezeichnung Anforderungen	Sorte 0 (Null)	Sorte A	Sorte B	Sorte C	Sorte D (T1)	Sorte E (T2)	Sorte F (T3)	Sorte G (T4)
Expositionsklasse (Kombination der aufgeführten Klassen)	X0(CH)	XC2(CH)	XC3(CH)	XC4(CH), XF1(CH)	XC4(CH), XD1(CH), XF2(CH)	XC4(CH), XD1(CH), XF4(CH)	XC4(CH), XD3(CH), XF2(CH)	XC4(CH), XD3(CH), XF4(CH)
Maximaler w/z-Wert bzw. w/z _{eq} -Wert	-	0,65	0,60	0,50	0,50	0,50	0,45	0,45
Mindestzementgehalt z _{min} , in kg/m ³ 1),2)	-	280	280	300	300	300	320	320
Dauerhaftigkeitsprüfungen 3)	Keine	Keine	WL ⁴⁾ , KW	KW	KW, FT	KW, FT	CW, FT	CW, FT
Andere Anforderungen	SN EN 12620+A1:2008 enthält Anforderungen an die Gesteinskörnungen							
Frei gegebene Zementarten (Tabelle NA.1)	Bei der Kombination von Expositionsclassen gilt für die Wahl des Zementes jeweils die strengste Anforderung							

Abb. 45 Tabelle NA.6 in SN EN 206

Im Rahmen dieses Projekts wurden Karbonatisierungs- und Chloridwiderstände für die Sorten A und D mit gemessen. Bei den Betonmischungen wurde darauf geachtet sowohl in der Sorte A als auch D Bindemittel mit eher niedrigerem und Bindemittel mit eher höherem Karbonatisierungs- bzw. Chloridwiderstand zu untersuchen. Anhand der Untersuchungsergebnisse kann ein Vorschlag für KW bzw. CW für die Sorte A bzw. D gemacht werden. Abb. 46 zeigt den Vorschlag für (a) KW und (b) CW, der für denen ein Grossteil üblicher Betone eingehalten ist.

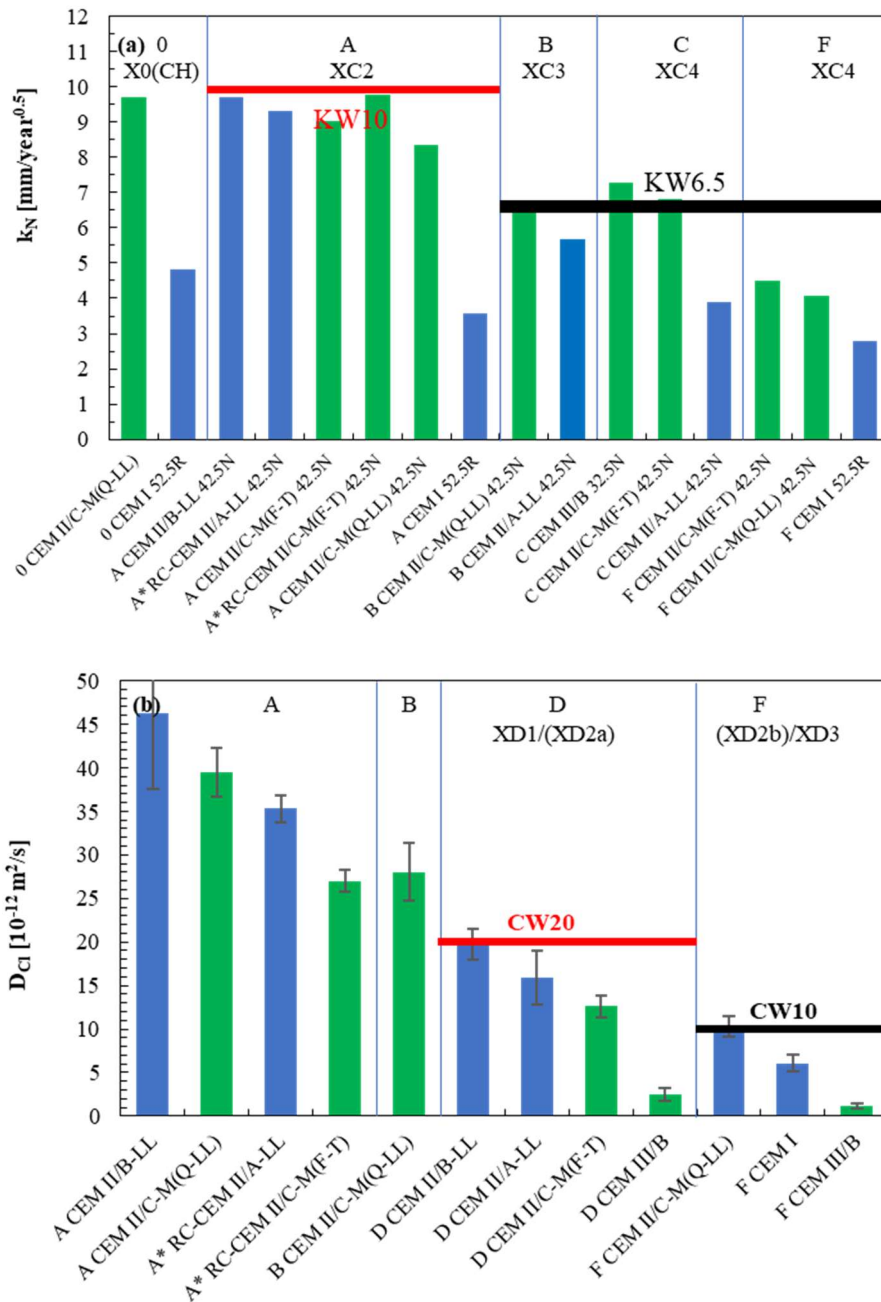


Abb. 46 Vorschlag für (a) KW für die Sorte A und (b) CW für die Sorte D

KW10 würde die Folgen der Karbonatisierung bei hoher, aber mässiger Feuchte bzw. trotz häufiger Feuchte temporäre Trockenphasen verhindern. KW10 würde vor allem die Folgen von Kalziumauslaugen bei ständig nassen Bedingungen verhindern.

CW20 würde sicherstellen, dass die Folgen der Chlorideinwirkung in der XD1/XD2a Exposition in einem rein Performance basierten Konzept verhindert werden.

5.4 Überlegung zu Expositionsklassen

Die XD2a Exposition erfordert durch die Zusammenlegung von XD1 mit XD2a die Überdeckungen der XD1 Exposition. Der für die XD2a Exposition definierte maximale Chloridgehalt ist so gering, dass Chloridinduzierte Bewehrungskorrosion im Allgemeinen ausgeschlossen werden kann und Betonqualität und Überdeckung entsprechend XC2 Anforderungen gewählt werden könnten.

Die bisher mit der XD3 Exposition gleich geschaltete XD2b Exposition könnte zukünftig getrennt betrachtet werden. Ein Grund für den schnelleren Chlorideintrag in der XD3 Exposition gegenüber der XD2a Exposition ist der Transportmechanismus. In der XD3 Exposition mit Wechselfeuchtbedingungen (Austrocknung und Sättigung im Wechsel) wird Chlorid auch durch Kapillartransport aufgenommen. Dieser Transport ist um ein Vielfaches schneller als reine Diffusion.

Bisher ist die Überdeckung in XC3 um 5 mm geringer als in XC4 bei gleichem KW in XC3 und XC4. Resultate aus Bauwerksuntersuchungen und Modellierungen haben aber gezeigt, dass die Überdeckung in XC4, auch unter der Annahme, dass die Bewehrung während der Nutzungsdauer nie korrodieren darf, bei gleichem KW um 5 mm gesenkt werden könnten. D.h. die Überdeckungen und der KW könnten für XC3 und XC4 identisch sein. Der Grund für die Senkung der Überdeckung ist, der langsame Karbonatisierungsfortschritt.

6 Zusammenfassung

6.1 Verhalten nachhaltiger Betone

Insgesamt weisen die klinkerärmeren nachhaltigeren Betone einen geringeren Karbonatisierungswiderstand auf, was auf die verringerte CO₂ Bindekapazität zurückgeführt werden kann. Die Nachhaltigen, klinkerärmeren Mischungen (CEM II/C-M bzw. CEM III/B) zeigen aber in der natürlichen Prüfung nach SN EN 12390-10 weit höhere Widerstände gegenüber Karbonatisierung als in der Schnellprüfung. Demgegenüber profitieren die klinkerreichen Betone weniger von einer natürlichen Prüfung. Obwohl in der Literatur darauf verwiesen wird [20], dass recyciertes Feinmaterial als Zementersatz mit abnehmender Mahlfineinheit poröser wird und damit an Dauerhaftigkeit verliert, konnten hier keine Einbuße festgestellt werden. Auch der RC-C25 Beton wies ähnliche Eigenschaften auf die die Betone mit ähnlichem Klinkergehalt derselben Sorte. Das Verhalten von Beton kann zufriedenstellend mit dem w/CaO beschrieben werden [7].

Im Falle Chlorideinwirkung weisen die nachhaltigeren Mischungen insbesondere in der natürlichen Diffusionsprüfung ein sehr viel höheren Chloridwiderstand auf, als die weniger nachhaltigen klinkerreichen Betone. Dies liegt Linie daran, dass Klinker durch Grossteils puzzolanische und latent hydraulische Bindemittel ersetzt werden, die eine höhere Chloridbindefähigkeit aufweisen, was sich besonders beim stark verbesserten Langzeitverhalten zeigt. Ferner zeigen die NPK-A und NPK-B der nachhaltigeren, langsamer hydratisierenden Mischungen höhere Widerstände, was ggf. auf die Nachhydratation während der Langzeitlagerung zurückgeführt werden kann. Das Verhalten von Beton kann näherungsweise mit dem w/SiO₂ bzw. präziser mit dem w/(SiO₂+Al₂O₃) beschrieben werden [33].

6.2 Korrelation der natürlichen Prüfungen mit SIA 262/1 Schnellprüfungen

Die natürliche Karbonatisierungsprüfung nach SN EN 12390-10 führt zu ca. 0.9 x so hohen Karbonatisierungswiderständen als in der Schnellprüfung nach SIA 262/1 Anhang I. Die längere Nachbehandlung aber insbesondere die auch die natürlichere etwas höhere relative Luftfeuchte, die auch noch während der Lagerung Nachhydratation zulässt, kann als ursächlich identifiziert werden. Unter Anderem aus diesen Gründen zeigen insbesondere die nachhaltigeren Mischungen mit vermutlich feinerer Porosität und langsamerer Hydratation höhere Widerstände in der natürlichen Prüfung als von der Schnellprüfung erwartet worden wäre.

Der Chloridwiderstand nach 90 Tagen Diffusion nach SN EN 12390-11 ist ca. halb so hoch wie der Chloridwiderstand aus der Schnellprüfung nach SIA 262/1 Anhang B.

6.3 ERC-Klassifizierung und Grenzwerte

Abb. 47 und *Abb. 48* zeigen tabellarisch die vorgeschlagene reduzierte Anzahl an XRC- bzw. XRDS-Klassen. *Abb. 47* zeigt die minimalen Überdeckungen und *Abb. 48* die Vorschläge für die nominalen Überdeckungen.

Im Falle Chlorid wurde die XD2b und XD3 Exposition wieder zusammengefasst. Beim Zusammenfassen dieser Expositionsklassen könnte der XD2b Grenzwert für den Chloridgehalt erhöht werden.

Tabelle 6.3 (CH) — Minimale Betondeckung $c_{min,dur}$ für unlegierten Betonstahl — Karbonatisierung

ERC	Expositionsklasse (Karbonatisierung)									
	XC1		XC2		XC3		XC4 alternative		XC4	
	Geplante Nutzungsdauer (Jahre)									
	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100
XRC 2	10	10	10	15	10	15	10	15	10	20
XRC 4	10	10	15	20	15	25	15	25	20	30
XRC 6	10	10	20	25	25	35	25	35	30	40
XRC 9	10	10	25	30	40	50	40	50	45	55

Tabelle 6.4 (CH) — Minimale Betondeckung $c_{min,dur}$ für unlegierten Betonstahl — Chlorid

ERC	Expositionsklasse (Chlorid)					
	XD1=XD2a(CH)		XD2 =XD2b(CH)		XD3 = XD2b	
	Geplante Nutzungsdauer (Jahre)					
	50	100	50	100	50	100
XRDS 1	10	20	15	25	20	30
XRDS 4	20	30	25	40	30	45
XRDS 9	25	35	40	50	45	55
XRDS 18	30	40	60	-	65	-
XRDS 30	40	50	-	-	-	-

Abb. 47 Korrelation von Sorten und Schweizer Dauerhaftigkeitsanforderungen mit (a) XRC- und (b) XRDS-Klassen für $c_{min,dur}$

Tabelle 6.3 (CH) — Nominale Betondeckung c_{nom} für unlegierten Betonstahl — Karbonatisierung

ERC	Expositionsklasse (Karbonatisierung)									
	XC1		XC2		XC3		XC4 alternative		XC4	
	Geplante Nutzungsdauer (Jahre)									
	50	100	50	100	50	100	50	100	50	100
XRC 2	20	20	20	25	20	25	20	25	20	30
XRC 4	20	20	25	30	25	35	25	35	30	40
XRC 6	20	20	30	35	35	45	35	45	40	50
XRC 9	20	20	35	40	50	60	50	60	55	65

Tabelle 6.4 (CH) — Nominale Betondeckung c_{nom} für unlegierten Betonstahl — Chlorid

ERC	Expositionsklasse (Chlorid)					
	XD1=XD2a(CH)		XD2 =XD2b(CH)		XD3 = XD2b	
	Geplante Nutzungsdauer (Jahre)					
	50	100	50	100	50	100
XRDS 1	20	30	25	35	30	40
XRDS 4	30	40	35	50	40	55*
XRDS 9	35	45	50	60	55	65
XRDS 18	40	50	-	-	-	-
XRDS 30	50	60	-	-	-	-

* konservative Modifikation

Abb. 48 Korrelation von Sorten und Schweizer Dauerhaftigkeitsanforderungen mit (a) XRC- und (b) XRDS-Klassen für c_{nom}

7 Weiter Forschungsbedarf

Bisher wurde der Frostwiderstand nicht mitbestimmt. D.h. von den hier untersuchten D-Betonen sollte der Frostwiderstand nach Schweizer Verfahren bestimmt werden. Eine Korrelation zwischen EN-Referenzverfahren für die Klassifizierung in XRF-Klassen und dem Frostwiderstand nach Schweizer Verfahren wäre im nächsten Schritt zu untersuchen.

Abb. 49 stellt die Schweizer Verfahren und Referenzverfahren (CEN/TS 12390-9) zusammen.

Prüfung	Methodik	Betonalter	Prüfdauer
SIA 262/1 _Anhang C	Physikalisch	28 Tage	14 Tage
BE-I, VSS 40464, 2019-03	Mikroskopisch	Würfeldruckfestigkeit > 5N/mm ²	5 Tage
BE-II, VSS 40464, 2019-03	Physikalisch	28 Tage	8.5 Tage
TFB-Schnelltest, nicht genormt	Physikalisch + Mikroskopisch	In der Regel 28 Tage	4 Tage + Mikroskopie
Slab test, CEN/TS 12390-9	Physikalisch	28 Tage	56 Tage

Abb. 49 Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost- und des Frost-Tausalz-Widerstands [57]

Gleichzeitig ist zu überprüfen ob die gewählten Sorten bzw. Betone auch die Anforderungen an XF1, XF2 erfüllen.

Beton mit Luftporenbildner wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht. Es sollten gezielt noch Untersuchungen an Betonen mit Luftporenbildner Sorte E und G durchgeführt werden. Zum einen sollte der Einfluss auf den Chloriddiffusions- und Chloridmigrationswiderstand vergleichend untersucht und auch die Zeitexponenten ermittelt und mit den hier geprüften D Betonen verglichen werden.

Die meisten untersuchten Betone im Rahmen dieses Projekts, von [33] und die Literaturrecherche in [8] ergaben, dass ein Altersexponent von mindestens 0.3 angesetzt werden kann. Bei Betonen mit hohem Anteil inerten Zusatzstoffen (Kalkstein, recycliertem nicht reaktivem Feinmaterial) kann der Age-Exponent aber weiter absinken. Bei welchem Bindemittelgehalt und welchen Ersatzraten dies der Fall ist wäre aber noch genauer zu untersuchen. Auch die Korrelationen des Altersexponenten mit Parametern der Zusammensetzung sind weiter zu untersuchen.

Die Überdeckungen der ERC-Klassen wurden mit nur sehr wenigen Bauwerksdaten verglichen. Ein gross angelegter vergleich mit gezielter Sammlung von Bauwerksdaten (Karbonatisierung und Chlorid) wäre in zukünftiger Forschung empfehlenswert.

Während bei den XRC-Klassen Anhaltswerte für GWPs zugeordnet werden konnte, ist dies im Falle von XRDS-Klassen noch nicht möglich. In zukünftigen Arbeiten sollte eine genaue LCA der Schweizer Betone erfolgen und Anhaltswerte auch in Abhängigkeit von ERC-Klassen angegeben werden.

Der Altersexponent ist bei Chlorideinwirkung der massgebende die Dauerhaftigkeit bestimmende Parameter. Weiterführende Untersuchungen zu Leistungsindikatoren für den Altersexponenten, um diese ohne langwierige Prüfung abzuschätzen sind deshalb dringend notwendig.

Literaturverzeichnis

-
- [1] FprEN 1992-1-1:2023 (Eurocode 2) Eurocode 2 – Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1: Allgemeine Regeln und Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke
-
- [2] EN 12390-10:2018 Prüfung von Festbeton - Teil 10: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton bei atmosphärischer Konzentration von Kohlendioxid
-
- [3] EN 12390-11:2015 Prüfung von Festbeton - Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton - Einseitig gerichtete Diffusion
-
- [4] SIA 262/1: 2019 Betonbau – Ergänzende Festlegungen
-
- [5] SN EN 206:2013 + A2:2021 Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität
-
- [6] Siehe CRCF Veröffentlichung ASTRA
-
- [7] Leemann A., Moro F. (2016) Carbonation of concrete: the role of CO₂ concentration, relative humidity and CO₂ buffer capacity. *Materials and Structures* 50(1):30.
-
- [8] François Toutlemonde, C. Andrade, C. V. Nielsen, S. von Greve-Dierfeld et al. (2023) Background Document for FprEN 1992-1-1, CEN/TC 250/SC 2 N2087
Greve-Dierfeld, S.v. (2023) Chapter 2.1
Greve-Dierfeld, S.v. (2023) Chapter 3.1
-
- [9] Greve-Dierfeld S.v. (2015) Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit XC exponierter Stahlbetonbauteile. Dissertation TU München bzw. DAfStb Heft 622
-
- [10] Greve-Dierfeld, S.v. (2022) Auslaugen von Beton – Korrosionsrisiko in der XC2 Exposition. Cemsuisse Forschungsprojekt Abschlussbericht. https://www.cemsuisse.ch/app/uploads/2023/11/201903_Abschlussbericht-web.pdf
-
- [11] SN EN 13670:2009 Ausführung von Tragwerken aus Beton
-
- [12] SIA 262:2013 Betonbau + C1:2017
-
- [13] prSIA 262:2024 Betonbau
-
- [14] SN EN 13369:2018 Allgemeine Regeln für Betonfertigteile
-
- [15] SIA MB 2030:2021 Beton mit recycelten Gesteinskörnungen
-
- [16] SN EN 206:2024 Anhang ND
-
- [17] SIA MB 2052:2016 Ultra-Hochleistungs-Faserbeton (UHFB) – Baustoffe, Bemessung und Ausführung
-
- [18] Wiens U, Schiessl-Pecka A (2024) Implementation of ERC-concept into German Standardisation – ERC Guideline of DAfStb. CEN/TC104/SC1/WG1, 2024-12-11 (ZOOM)
-
- [19] Hermerschmidt W, Duffer M (2025) Wissenschaftliche Studie zur Ermittlung des CO₂-Reduktionspotenzials durch das deutsche ERC-Konzept. Entwurf des Abschlussbericht zum Sonderforschungsvorhaben SS02
-
- [20] DAfStb Guideline Greenhouse gas-reduced concrete, reinforced concrete or prestressed concrete structures. Draft Report 2024
-
- [21] Müller C, Palm S (2024) Dauerhaftigkeit von Beton: Konzepte heute und morgen insbesondere am Beispiel Carbonatisierung – Teil 1 und Teil 2. Beton 5 (Teil 1), Beton 7+8 (Teil 2)
-
- [22] Ov D, Wiens U, Schiessl-Pecka A (2025) E-Mail Korrespondenz und online meeting Februar 2025
-
- [23] Helland S (2025) Answers to Stefanie on Nordic ERC standards
-
- [24] Helland S, Greve-Dierfeld S.v. (2025) E-Mail Diskussion März/April 2025
-
- [25] Helland S (2024) Derivation of XRC and XRDS criteria and background document - memo by Steinar Helland Sketch for SN/TR Background Document for Norwegian Standard for ERC Included deriving threshold values for ITT Version 21.04.2024. CEN/TC 104/SC 1/WG 1 N 434
-
- [26] prNS XXXX:20YY (E) (April 2025) Concrete —Exposure resistance class concrete — Specification and conformity criteria. This document (NS XXXX) has been prepared by Technical Committee SN/K 7 "Referansegruppen for betongområdet". This document is intended to be used in conjunction with NS-EN 206+NA and NS-EN 1992-1-1+NA.
-
- [27] EN 12390-12:2020 Prüfung von Festbeton – Teil 12: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton – Beschleunigtes Karbonatisierungsverfahren; Deutsche Fassung EN 12390-12:2020
-
- [28] Greve-Dierfeld S.v., Lothenbach B (...) De Belie N (2020) Understanding the carbonation of concrete with supplementary cementitious materials: a critical review by RILEM TC 281-CCC. *Materials and Structures* 53:136. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-01558-w>
-
- [29] Moro F, Torrent R (2023) Durability Performance Indicators for Service Life Analysis and Quality Control. Eighth International Symposium on Life-Cycle Civil Engineering IALCCE Milan, Italy, July 2-6 2023
-

- [30] Andrade C, Prieto M, Tanner P, Tavares F, D'Andrea R (2013) Testing and modelling chloride penetration into concrete. *Construction and Building Materials* 39:9-18.
- [31] Paglia C, Mosca C (2022) The relationship between compressive strength and carbonation for in service concrete elements. The 8th international conference on advanced engineering and technology. Incheon National University South Korea, online 21. Mai 2022.
- [32] Vollpracht A, Gluth G (...) De Belie N (2024) Report of RILEM TC 281-CCC insights into factors affecting the carbonation rate of concrete with SCMs revealed from data mining and machine learning approaches. *Materials and Structures* 57:206. <https://doi.org/10.1617/s11527-024-02465-0>
- [33] Greve-Dierfeld S.v., Grolimund D., Trtick P. (2025) Carbonation – passivation performance and corrosion kinetic under wet-dry cycles in the presence of chlorides. ASTRA AG BGT_20_03A_01 Final Report
- [34] Reichlin F, Paglia C (2023) The penetration of chlorides within cement paste under an electrical field. *Structures*, 14-16 June, Milos, Greece.
- [35] EN 12390-19 Prüfung von Festbeton - Teil 19: Bestimmung des elektrischen Widerstands; Deutsche Fassung EN 12390-19:2023
- [36] Paglia C, Paderi M, Mosca C, Antonelli S (2022) The recycling of a concrete with known properties to reproduce a durable material for the civil engineering infrastructure. International meet on civil, structural and environmental engineering, 23-26 Mai, Munich, Germany, presentation online, Civilmeet 2022.
- [37] SN EN 12620+A1 2008: Gesteinskörnungen für Beton.
- [38] SN EN 15804 + A2:2022. Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte
- [39] <https://www.kbob.admin.ch/de/oekobilanzdaten-im-baubereich>
- [40] https://www.oekobaudat.de/no_cache/datenbank/suche.html
- [41] <https://ecoinvent.org/database> über German A, Nägeli M, Stapfer P, Zubler C (2021) CAS Betontechnologie 2021 Leistungsfähigkeit von ECO-effizienten Betonen.
- [42] Schack T, Deiters M, Neubauer K, Oberhoff T, Klemm-Albert K, Haist M (2023) Roadmap zur klimaoptimierter Transportbetonherstellung. *Beton- und Stahlbetonbau* 118 Heft 3. (Deutschland)
- [43] Juhard J, Autischer M, Krüger M (2022) A CASE STUDY OF LOW CARBON CONCRETE IN AUSTRIA fib congress, June 2022, Oslo. (Österreich)
- [44] Zerín A, Kasuga A (2022) LCA OF A CHALLENGING LOW CARBON ULTRA-HIGH DURABILITY NON-METALLIC BRIDGE fib congress. fib congress, June 2022, Oslo. (Japan).
- [45] Haist M, Bergmeister K, Curbach M, Forman P, Gaganelis G, Gerlach J, Mark P, Moffatt J, Müller C, Müller HS, Reiners J, Scope C, Tietze KV (2022) Nachhaltig konstruieren und bauen mit Beton. *Betonkalender* 2022
- [46] A. Getto, R. Patel, V. Rüthi, S. Pra Kasan, A. S. Basavaraj, S. Palaniappan, S. Maity (2019) Influence of supplementary cementitious materials on the sustainability parameters of cements and concretes in the Indian context. *Materials and Structures* (2019) 52:10 <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1321-5> (India)
- [47] Esmaeilkhanian B, Khayat KH, Wallevik OH (2017) Mix design approach for low-powder self-consolidating concrete: Eco-SCC—content optimization and performance. *Materials and Structures* 50:124 DOI 10.1617/s11527-017-0993-y (Canada)
- [48] Muigai R, Alexander M, Moyo P (2016) A novel framework towards the design of more sustainable concrete infrastructure. *Materials and Structures* 49:1127–1141 DOI 10.1617/s11527-015-0563-0 (Europ SimaPro)
- [49] NB No. 37:2020 NB norsk betongforening No. 37:2020 Lavkarbonbetong
- [50] Bundesverband Transportbeton Deutschland (2021) CSC – Technisches Handbuch V2.1
- [51] SVENSK BETONG (2022) – Vägledning Klimatförderbetrad betong utgåva 2.0
- [52] Reiterman P, Holcpek O, Davidova V, Jaskulski R, Keppert M (2019) Estimation of hydration degree of blended cements with the help of k-values. *Materials* 12(15):2420. doi: 10.3390/ma12152420.
- [53] Boumaaza M (...) Greve-Dierfeld S.v. (...) Linger L (2024) fib Bulletin 112
- [54] Matthes W (2023) Prüfung des Karbonatisierungswiderstands von Betonen gemässe SIA 262/1+C1 und EN 12390-12. *Cemsuisse Bericht* https://www.cemsuisse.ch/app/uploads/2023/11/202101_Schlussbericht-Web.pdf
- [55] Tang I; Nilsson LO (1997) Accelerated tests for chloride diffusivity and their application in prediction of chloride penetration. In Skrivener KL and Young JF Mechanisms of chemical degradation of cement-based systems
- [56] Hunkeler F, Greve-Dierfeld Sv (2019) Karbonatisierung von Beton und Korrosionsgeschwindigkeit der Bewehrung im karbonatisierten Beton, https://www.tfb.ch/Htdocs/Files/v/10921.pdf/Publikationsliste/AGB-2013_005_Bericht-Nr.-696_April-2019_fh.p
- [57] Matthes W (2022) BE I und BE II – Prüfungen zum Frost- und Frosttaumittelwiderstand.