HafenCity Universität Hamburg

Bauingenieurwesen | Arbeitsbereich Baustofftechnologie

Einfluss des Frost-Tausalz-Angriffs auf den Chloridtransport in Beton

Dem Promotionsausschuss der HafenCity Universität Hamburg vorgelegte und genehmigte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades

Doktor Ingenieur (Dr.-Ing.)

Christoph Langer
aus München

1. Gutachterin (Betreuerin):	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Gesa Kapteina
2. Gutachter:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn (KIT)
Vorsitzender:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Ingo Weidlich
Zusätzliche Professur:	Univ.-Prof. Dr.-Ing. Tim Pucker

Einreichung beim Promotionsausschuss: 25.11.2024
Annahme durch den Promotionsausschuss: 25.04.2025
Disputation: 09.10.2025
Veröffentlichung: Mai 2026, DOI: 10.34712/142.74
Creative Commons Lizenz CC BY 4.0

Inhaltsverzeichnis

Vorwort **IV**

Kurzfassung **V**

Abstract **V**

1 Einleitung **1**
1.1 Motivation und Problemstellung 1
1.2 Zielsetzung und Lösungsansatz 2
1.3 Aufbau der Arbeit 4

2 Grundlagen von Beton unter Frost-Tausalz-Angriff **5**
2.1 Struktur der Bindemittelmatrix 5
2.1.1 Hydratation und Porosität 5
2.1.2 Verbundzone 9
2.2 Transport von Chlorid in Beton 10
2.2.1 Kapillartransport 10
2.2.2 Hydraulischer Druck 11
2.2.3 Diffusion 11
2.2.4 Osmose 13
2.3 Einflussgrößen auf den Chloridtransport 13
2.3.1 Temperatur 13
2.3.2 Luftporen (LP) 14
2.3.3 Chloridbindung 14
2.3.4 Carbonatisierung 15
2.4 Wasser unter Frosteinfluss in Beton 16
2.4.1 Wassersorption 16
2.4.2 Gefrierende Flüssigkeit 18
2.4.3 Pessimum der Tausalzlösung 19
2.4.4 Flüssigkeitsaufnahme 20
2.5 Theorien für den Frost-Tausalz-Angriff 21
2.5.1 Theorien 21
2.5.2 Einordnung der Theorien mit Blick auf den Chloridtransport 25

3 Versuche **27**
3.1 Vorgehen und untersuchte Betone 27
3.1.1 Übersicht der Prüfkonzepte 27
3.1.2 Untersuchte Betone 29
3.1.3 Druckfestigkeiten 31
3.2 Bestimmung des Chlorid- und Bromidgehaltes 32
3.2.1 Analysemethoden 32

3.2.2 Quantifizierung des Chlorid- und Bromidgehaltes . . . 35
3.3 Diffusions- und Frost-Tausalz-Versuche . . . 37
3.3.1 Prüfkonzept für Diffusions-/Frost-Tausalz-Probekörper . . . 37
3.3.2 Abwitterung, Flüssigkeitsaufnahme und dynamischer E-Modul . . . 38
3.3.3 Chloridprofile . . . 46
3.3.4 Gefüge der Betonrandzone mit und ohne Frost-Tausalz-Angriff . . . 54
3.3.5 Zeitliche Chloridumverteilung von Diffusions- und Frost-Tausalz-Versuchen 60
3.4 Ioneneindringen nach Frost-Tausalz-Angriff und Migration . . . 62
3.4.1 Prüfkonzept des Eindringwiderstandes nach Frost-Tausalz-Angriff im RBM-Versuch . . . 62
3.4.2 Modifikation des RCM-Tests . . . 64
3.4.3 Koppelung des Indikatorverfahrens mit LIBS . . . 68
3.4.4 Ionentransport nach Frost-Tausalz-Angriff und Migration . . . 73
3.4.5 Bromideindringwiderstände nach Frost-Tausalz-Angriff . . . 75
3.4.6 Chlorideindringen nach Frost-Tausalz-Angriff und Migration . . . 81
3.4.7 Stromflüsse während Migrationstest nach Frost-Tausalz-Angriff . . . 83
3.4.8 Migrationskoeffizienten vor und nach Frost-Tausalz-Angriff . . . 86

4 Modellierung des Chloridtransports von Betonen unter Frost-Tausalz-Angriff 90
4.1 Ungeschädigter Bereich im Kernbeton . . . 90
4.1.1 Allgemeines zur Modellierung der Chloridprofile . . . 90
4.1.2 Modellansatz Diffusion . . . 92
4.1.3 Validierung des Diffusionsansatzes von Betonen unter Frost-Tausalz-Angriff 94
4.1.4 Einfluss der Expositionsart und Dauer auf den Diffusionskoeffizienten . . 96
4.1.5 Vergleich der Diffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentration 98
4.1.6 Berücksichtigung des Temperatureinflusses . . . 101
4.1.7 Temperatureinfluss auf die Diffusionskoeffizienten . . . 103
4.2 Geschädigter Bereich in der Betonrandzone . . . 105
4.2.1 Berechnung der Porosität und des Hydratationsgrads . . . 105
4.2.2 Modellvorschlag im durch Frost geschädigten Bereich . . . 106

5 Zusammenfassung 110

6 Ausblick 111
6.1 FEM-Modell: Chloridtransport durch Diffusion . . . 111
6.2 FEM-Modell: Chloridtransport unter Frost-Tausalz-Angriff . . . 111
6.3 Einfluss des Frost-Tausalz-Angriffes auf die Lebensdauerprognose . . . 112
6.4 Migrationstest . . . 113

Anhang 114
A-1 Fluoreszenzmikroskopie . . . 114
A-2 LIBS–Kalibrierpresslinge . . . 115

A-3 Einfluss auf den Chloridgehalt mit LIBS 117
A-4 Vergleich von RCM, RBM und Indikatormethode 117
A-5 Farbumschlagspunkt mit LIBS im 0-RBM 118
A-6 2D-LIBS und Chloridprofile nach 14. FTSW bzw. 20 °C/65 RH 127
A-7 2D-LIBS und Chloridprofile nach 28. FTSW bzw. 20 °C/65 RH 137
A-8 Chloridprofile nach 28. FTSW (Projekt) bzw. 20 °C/65 RH 148
A-9 2D-LIBS Darstellungen und Bromidprofile nach 14. FTSW+RBM 151
A-10 2D-LIBS Darstellungen und Bromidprofile nach 28. FTSW+RBM 160
A-11 Kombinierte Br^--, Cl^--Darstellungen nach 14. FTSW+RBM 170
A-12 Kombinierte Br^--, Cl^--Darstellungen nach 28. FTSW+RBM 180
A-13 Fitting nach 14. FTSW bzw. 20 °C/65 RH 200
A-14 Fitting nach 28. FTSW bzw. 20 °C/65 RH 210
A-15 Fitting nach 28. FTSW bzw. 20 °C/65 RH (Projekt) 225
A-16 Porosität und des Hydratationsgrades nach [Röh12] 231

Abbildungsverzeichnis **VI**

Tabellenverzeichnis **XVII**

Literaturverzeichnis **XIX**

Abkürzungen **XXX**

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Anstellung als wissenschaftlicher Mitarbeiter im Bereich Forschung und Lehre bei Frau Prof. Dr.-Ing. Gesa Kapteina im Zeitraum von 2016 bis 2023 an der HafenCity Universität (HCU) Hamburg im Fachbereich Baustofftechnologie. In den beiden Forschungsprojekten „Norm-LIBS-Normative Regelung der Anwendung von LIBS für die Chlorid-Analyse im Bauwesen “(01/2020-06/2022, Förderkennzeichen: 03TNK1013B, BMWi (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie), WIPANO (Wissens- und Technologietransfer durch Patente und Normen-Normung und Standardisierung)) und „Dauerhaftigkeit von Beton nach dem Performance-Prinzip: Klassifikation der Materialwiderstände, Produktionskontrolle (PC), Konformitätskriterien und -kontrolle (CC) “(05/2021-10/2023, Förderkennzeichen: IGF 21826 N, Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF), im Rahmen des Programms zur Forderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF), Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. (FTB)) konnte zum einen ein tieferes Verständnis über erweiterte Analysemöglichkeiten von Beton mit LIBS (Laser-induzierte Breakdown Spektroskopie) erlangt und zum anderen fachlicher Austausch im Rahmen von Performance-basierten Prüfverfahren.

Frau Prof. Dr.-Ing. Kapteina betreute mich über die ganze Zeit stets mit Wohlwollen und wertvollen, andauernden Diskussionen in fachlichen und v. a. auch mentalen Angelegenheiten. Ihre fördernde und fordernde Art trug maßgeblich zur Themenfindung und insbesondere zur Bearbeitung dieser Arbeit bei. Ich bedanke mich sehr für die Übernahme der Erstbegutachtung.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn vom Karlsruher Institut für Technologie (KIT) für Massivbau und Baustofftechnologie danke ich sehr für die Übernahme der Zweitbegutachtung.

Im zuvor genannten Verbundforschungsprojekt „Dauerhaftigkeit von Beton“, das aus fünf Teilprojekten bestand, wurden mir von Herrn Dr.-Ing. Volkert Feldrappe zehn weitere Betone zur Verfügung gestellt und dadurch die Stichprobengröße der hier dargestellten Ergebnisse nochmals deutlich vergrößert. Vielen Dank an Herrn Dr.-Ing. Feldrappe an dieser Stelle für die Herstellung ergänzender Probekörper, die somit Eingang in diese Arbeit gefunden haben.

Herrn Dr.-Ing. Matthias Müller von der Bauhaus-Universität Weimar am F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde möchte ich an dieser Stelle besonders danken. Er las den Theorieteil mit seinem tiefen Fachwissen gegen.

Meiner Mama, Papa und Schwester danke ich für das langanhaltende gute Zureden und die mentale Unterstützung, gerade in der Fertigstellungsphase außerhalb der Universität neben der regulären Arbeitszeit.

Da diese Arbeit einen Schwerpunkt im Bereich Laboruntersuchungen aufweist, möchte ich dem ganzen Laborteam der HCU danken. Im Speziellen möchte ich dem Laborleiter Herrn Dipl.-Ing. (FH) Marcus Illguth M. Eng. danken. Er hatte stets professionelle Ideen zur Umsetzung von Gedanken im Labor und gab ebenfalls fachlich sehr wertvollen Input bei der Auswertung und Deutung von Daten.

Während der Bearbeitungszeit kam die künstliche Intelligenz auf. Mit deren Unterstützung konnte ich das Programmieren zur Datenauswertung und Erstellung von Grafiken skalieren.

Kurzfassung

Diese Arbeit untersucht den Einfluss des Frost-Tausalz-Angriffs auf den Chloridtransport in Beton mithilfe eines modifizierten Diffusionsansatzes, welcher den Temperatureinfluss berücksichtigt. Durch kombinierte Laborversuche und Analysemethoden wurde der Transportprozess quantifiziert und über 2D-Darstellungen sowie Ionenprofile (Cl^-, Br^-) visualisiert. Die Diffusionskoeffizienten verschiedener Betone wurden sowohl unter Frost-Tausalz-Angriff als auch unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses aus unbefrosteten Chloridprofilen ermittelt und verglichen. Die Modellgüte im Kernbeton befrosteter Probekörper wurde mittels Bestimmtheitsmaß ($R^2 \geq 95$ %) bestätigt. Der Frost-Tausalz-Angriff wurde durch die CDF-Prüfung simuliert und über Vergleichsprobekörper ohne Frostbeanspruchung ergänzt. Der $NaCl/NaBr$-Austausch im Schnellmigrationstest ermöglichte die Bewertung des Eindringwiderstands; LP-Betone zeigten dabei häufig einen durch den Frost-Tausalz-Angriff bewirkten Abdichtungseffekt. Die Ionengehalte von Cl^- und Br^- wurden mittels LIBS (Laser-induzierte Breakdown Spektroskopie) erfasst und durch Kopplung mit dem herkömmlichen $AgNO_3$-Indikatorverfahren für kombinierte Beanspruchungen quantifiziert. Es zeigte sich ein beschleunigter Chloridtransport unter Frost-Tausalz-Angriff sowie eine teilweise schnellere Chloridumverteilung ins Betoninnere bei befrosteten Probekörpern. Es war zu erkennen, dass sich die Chloridprofile unter Frost-Tausalz-Angriff den Profilen ohne Frostbeaufschlagung im Laufe der Zeit anglichen. Randzonenschäden wurden fluoreszenzmikroskopisch erfasst, ohne direkten Zusammenhang zu den Chloridprofilen. Im Ausblick werden Ansätze zur Modellierung geschädigter Betonzonen sowie erste Überlegungen zu FEM-Modellierungen vorgestellt.

Abstract

This work investigates the influence of freeze–thaw and de-icing salt exposure on chloride transport in concrete using a modified diffusion approach that accounts for temperature effects. Laboratory experiments and analytical methods were combined to quantify the transport process and visualize it via 2D representations and Cl^-/Br^- profiles. Diffusion coefficients of different concretes were determined under salt-freeze exposure and from non-frozen reference specimens, then compared. The diffusion model for the concrete core of frozen specimens was validated with $R^2 \geq 95$ %. Freeze–thaw attack was simulated using a CDF test and supplemented by unexposed reference specimens. Substituting $NaCl$ with $NaBr$ in rapid migration tests revealed an increased penetration resistance in low-porosity concretes, reflecting a densification effect induced by prior salt-freeze exposure. LIBS (Laser-induced breakdown spectroscopy) measurements coupled with $AgNO_3$ staining quantified chloride and bromide contents under combined loading. Results indicate accelerated chloride ingress and, in some cases, faster redistribution in frozen specimens, with profiles gradually approaching those of reference concretes. Fluorescence microscopy allowed quantification of near-surface damage, without direct correlation to chloride profiles. Finally, approaches for modeling damaged concrete zones and preliminary FEM-based simulations are presented.

1 Einleitung

1.1 Motivation und Problemstellung

Zur Aufrechterhaltung der Verkehrssicherheit wird überwiegend das Salz $NaCl$ auf Straßen aufgebracht. Trotz Klimawandel und damit verbundener Erderwärmung wird dies auch zukünftig, wenn auch seltener, der Fall sein [MNH09]. Die Erwärmung kann in Regionen, in denen es vor der Klimaerwärmung während der Wintermonate dauerhaft kalt war, aufgrund der Temperaturerhöhungen zu einer erhöhten Anzahl von Frost-Tausalz-Wechseln (FTSW) führen. Dadurch können über unterschiedliche Transportprozesse wie Konvektion, Mikroeislinsenpumpe (vgl. Kapitel 2.5.1) und Diffusion in der Eis- oder Schneeschmelze dissoziierte Chloride verstärkt in den Beton eindringen. Hauptsächlich betroffen sind Infrastrukturbauwerke, wie Brücken und Tunnel, bei denen die angestrebte Lebensdauer oftmals nicht erreicht [Haa09] wird, da diese überwiegend aufgrund von chloridinduzierter Bewehrungskorrosion instandsetzungsbedürftig werden. Auch Tiefgaragen werden mit Chloriden belastet. Während der Fahrt, sammeln sich Chloride in den Radkästen der Autos an, die dadurch in die Tiefgaragen gelangen.

Von 2008 bis 2024 erhöhte sich die Anzahl der Brückenbauwerke von ca. 38.300 auf 40.160 Brücken (39.928 Brücken an Bundesfernstraßen im Jahr 2008). Die Statistiken der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) zeigen auf, dass sich die Zustandsnoten von Brücken an Bundesfernstraßen mit zunehmendem Alter z. T. rasch verschlechterten [Haa09]. In der nachfolgenden Abbildung 1-1 sind die Zustandsnoten von 1,0 bis 4,0 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich die Zustände von 2008 bis 2020 deutlich verschlechtern und von 2020 bis 2024 in Abhängigkeit der durchgeführten Instandsetzungsmaßnahmen allmählich wieder verbessern.

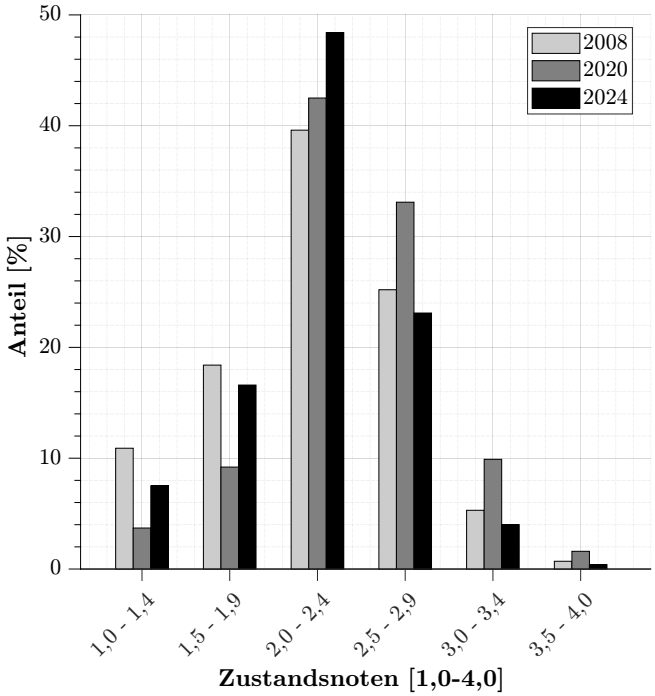


Abb. 1-1: Zustandsnoten von Brücken an Bundesfernstraßen in Deutschland nach DIN 1076. Grafik erstellt durch die Statistiken der BASt, vgl. [Haa09] und jahresbezogene Brückenstatistiken der BASt.

Die durch Chloride ausgelöste Korrosion von Betonstahl richtet großen finanziellen Schaden auch in Deutschland an. Sie stellt im Vergleich zu anderen Schadensursachen den größten Anteil dar [Bre19]. In Abbildung 1-2 werden die direkten Kosten unterschiedlicher Ursprünge in den Vereinigten Staaten von Amerika (U.S.) gegenübergestellt. Es werden hierbei die gesamten Kosten, verursacht durch Korrosion, mit anderen Bereichen verglichen. Es wird ersichtlich, dass auch in den U.S. der Anteil der Korrosion, die u. a. durch Chloride verursacht wird, im Vergleich zu Kosten, die durch Rauchen, Adipositas (Fettleibigkeit) oder Wetter-/Klimakatastrophen hervorgerufen wird, einen wesentlichen Anteil an den direkten Kosten hat. Die Datengrundlage bezieht sich hierbei auf die Jahre 2010 und 2011.

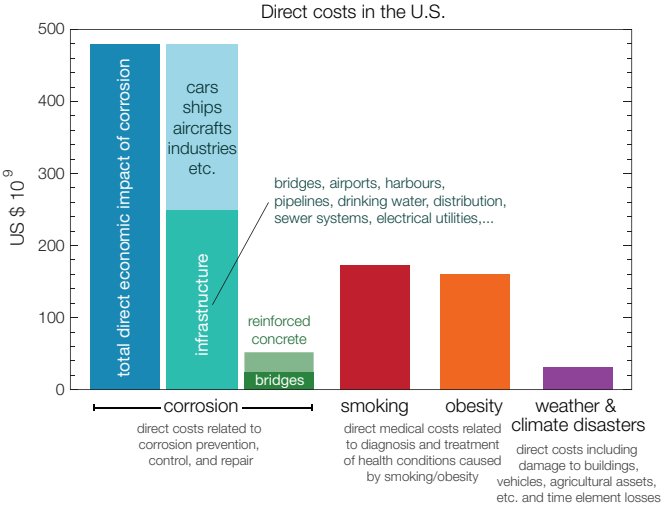


Abb. 1-2: Grafik von [Ang18]

Wie eben geschildert, sind die ökonomischen Auswirkungen aufgrund chloridinduzierter Bewehrungskorrosion von Infrastrukturbauwerken weitreichend. Insbesondere diese sind verschiedenen Umwelteinflüssen wie z. B. wiederkehrenden Frost-Tausalz-Angriffen ausgesetzt.

1.2 Zielsetzung und Lösungsansatz

In der Literatur wird seit einigen Jahrzehnten vermehrt auf den Schädigungsmechanismus von Beton, der einem Frost-Tausalz-Angriff ausgesetzt ist, eingegangen. Der damit einhergehende Chloridtransport in Beton wird hierbei auch untersucht, ist jedoch oftmals nicht im Fokus der Betrachtungen. Daher wird der Einfluss des Frost-Taulsalzangriffes auf den Chloridtransport in Beton näher betrachtet und ein vereinfachtes Diffusionsmodell zur Beschreibung von Chloridprofilen unter Frost-Tausalzeinfluss gesucht. Darüber hinaus wird ein Vorschlag unterbreitet, wie der Chloridtransport in der durch Frost-Tausalz-Angriff geschädigten Betonrandzone beschrieben werden könnte.

Ferner soll der Eindringwiderstand von Beton, der bereits im Rahmen der CDF-Prüfung mit 3,0 M.-%-iger $NaCl$-Lösung beaufschlagte wurde, im Migrationstest untersucht werden. Hierzu soll der herkömmliche Rapid Chloride Migration-Test (RCM-Test), wie bereits von anderen aufgezeigt, mit einem anderen Salz als $NaCl$ durchgeführt werden, um eine Differenzierung zwischen

den beiden Beaufschlagungsarten, Frost-Tausalz-Angriff und Migration, zu ermöglichen. Hierzu wird das Salz $NaBr$ verwendet, um im Anschluss an den Migrationstest die Bromidverteilung aus dem RBM-Test zu untersuchen.

Die quantitative Ionengehaltsbestimmung von Chloriden aus der CDF-Prüfung und Bromiden aus dem anschließenden RBM-Test wird in den hier vorgestellten Laboruntersuchungen mit der Laser-Induzierten Breakdown Spektroskopie (LIBS) durchgeführt.

Durch die Betrachtung der Unterschiede zwischen befrosteten und unbefrosteten Betonprobekörpern soll der Einfluss des Frost-Tausalz-Angriffes näher quantifiziert werden. Um möglichst alle Einflüsse bis auf die Temperatur zu minimieren, werden die befrosteten Proben in der herkömmlichen CDF-Prüfung mit den unbefrosteten Proben aus vereinfachten Diffusionsversuchen miteinander vergleichen. Der Vergleich findet zu zwei Zeitpunkten, nach sieben ($\equiv$ 14. FTSW) und nach 14 Tagen ($\equiv$ 28. FTSW) statt. Zu diesen Zeitpunkten werden die Proben auf deren Chloridverteilung hin untersucht und Chloridprofile erstellt. Anhand der Chloridprofile werden sowohl von den befrosteten als auch von den unbefrosteten Proben Diffusionskoeffizienten bestimmt. Um den Einfluss der Temperatur mit zu berücksichtigen werden, die Diffusionskoeffizienten aus den vereinfachten Diffusionsversuchen mit Hilfe von Arrhenius den Diffusionskoeffizienten aus der CDF-Prüfung gegenübergestellt.

Für die Betrachtung des Chlorideindringwiderstandes werden zu den o. g. Zeitpunkten (14., 28. FTSW) aus denselben Proben, die für die Quantifizierung des Frosteinflusses genutzt wurden, Zylinder für Migrationstests hergestellt. Somit kann der Eindringwiderstand von Beton untersucht werden, der bereits einem Frost-Tausalz-Angriff ausgesetzt war.

Durch erste FEM-Modellierungen soll darüber hinaus ein weiterer Vorschlag bereitgestellt werden, den Einfluss des Frost-Tausalz-Angriffes auf den Chloridtransport in Beton besser zu simulieren.

Diese Arbeit soll einen weiteren Beitrag dazu leisten, den Einfluss des Frost-Tausalz-Angriffes durch verschiedene Laborversuche (vgl. Abb. 1-3) und der Anwendung bestehender Modelle (2. Ficksches Diffusionsgesetz unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses) auf den Chloridtransport in Beton näher zu quantifizieren.

1.3 Aufbau der Arbeit

In Abbildung 1-3 ist der Aufbau der Arbeit unter Angabe der Kapitel, in denen die entsprechenden Themen bearbeitet werden, schematisch dargestellt. Der Modellansatz in Kapitel 4 zur Beschreibung der Chloridprofile unter Frost-Tausalz-Angriff basiert auf dem Abgleich von Diffusions- und Frostversuchen in der CDF-Prüfung (Capillary suction of Deicing Solution and Freeze-thaw Test) unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses. Hierbei wird zwischen geschädigter Betonrandzone in Kapitel 4.2 und Kernbeton in Kapitel 4.1, der überwiegend ungeschädigt ist, unterschieden.

Im Ausblick in den Kapiteln 6.1 und 6.2 werden zwei Vorschläge zur Modellierung von Diffusion und Frost-Tausalz-Angriff mittels FEM vorgestellt.

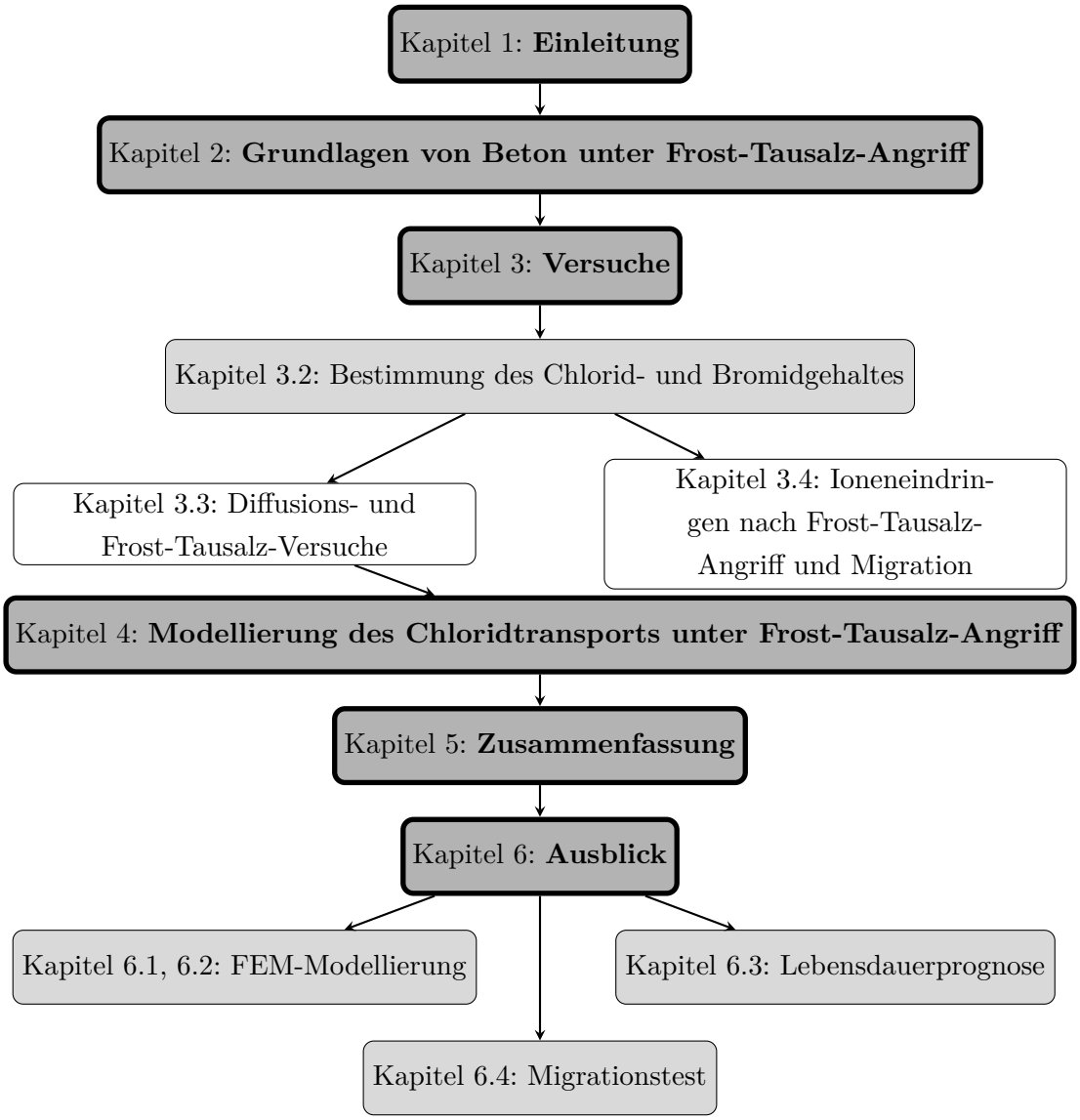


Abb. 1-3: Aufbau der Arbeit

2 Grundlagen von Beton unter Frost-Tausalz-Angriff

2.1 Struktur der Bindemittelmatrix

2.1.1 Hydratation und Porosität

Die Rohstoffe aus der Natur zur Herstellung von Portlandzement (CEM I nach [DIN11]) sind Kalkstein, Ton und bei Bedarf Quarzsand sowie eisenoxidhaltige Stoffe. Die für die Hydratation relevanten Klinkerbestandteile können dem Dreistoffdiagramm in Abbildung 2-4 entnommen werden. Als Erstarrungsregler werden Sulfatträger wie z. B. Gips verwendet. Durch Brennen des Rohstoffgemisches bei hohen Temperaturen (> 1400 °C) entstehen die vier bedeutendsten Klinkerphasen (vgl. erste vier Teile in Tabelle 2-1), die an der Hydratation beteiligt sind (vgl. z. B. [NV11] [Ben15]).

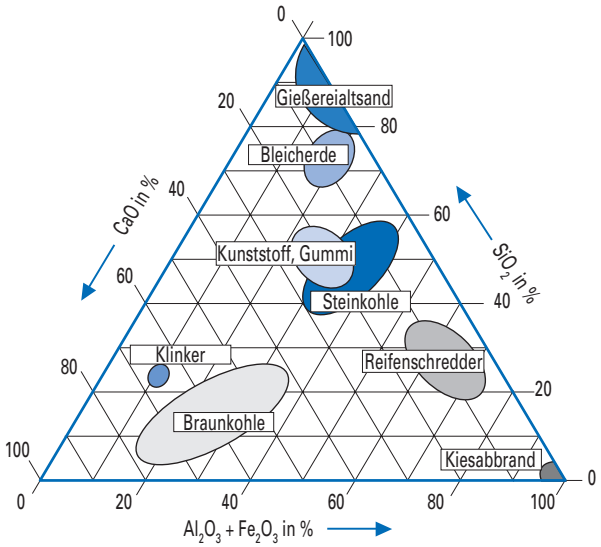


Abb. 2-4: Dreistoffdiagramm von $CaO, SiO_2, Al_2O_3 + Fe_2O_3$ in [M.-%]. Zusammensetzung der Klinkerbestandteile im Vergleich zu Sekundärrohstoffen und Aschen von Sekundärbrennstoffen. Grafik aus [Sch02]

Mit der Hydratation von Bindemitteln ist mehr als nur die Anlagerung von H_2O-Molekülen gemeint. Sie beschreibt in diesem Zusammenhang die Hydratations- und Protolysereaktionen bis zur Ausbildung der porösen, festen Bindemittelmatrix [Ben15]. Im Nachfolgenden wird daher von Reaktionsart gesprochen. Die in Tabelle 2-1 dargestellten vier Klinkerphasen, sind sowohl an der hydraulischen Hydratation wie auch mit der damit verbundenen Ausbildung unterschiedlicher Porositäten in der späteren festen Bindemittelmatrix beteiligt. Ferner ist der Ablauf der Hydratation von mehreren Parametern wie der Temperatur (je geringer desto langsamer), dem w/b-Wert (Wasser-/Bindemittel-Wert, Optimum bei ca. 0,38 [-]), der Mahlfeinheit des Bindemittels (je feiner, desto größere spezifische Oberfläche, desto schnellere Reaktionen), dem Druck (je höher der Druck, desto höher ist vermutlich die Hydratationsrate [Röh12]) und der Art des Bindemittels abhängig.

Zusätzlich zu den zuvor genannten Hauptbestandteilen kann der Portlandzementklinker an-

teilig durch Klinkerersatzstoffe ersetzt werden. Sie haben u. a. Einfluss auf das Porengefüge. Durch die Bildung zusätzlicher *C-S-H*-Phasen auf unterschiedliche Art und Weise verfeinern Klinkerersatzstoffe, die puzzolanisch oder latent-hydraulisch reagieren, i. d. R. die Poren im festen Zustand, sodass sich mehr kleinere Poren ausbilden. Inerte Klinkerersatzstoffe verdichten das Porengefüge durch eine geringe Mahlfeinheit überwiegend durch einen Füllereffekt. Zu einem Teil kann es bei Kalksteinmehl zusätzlich zur Keimbildung während der Hydratation kommen, das neben der physikalischen Füllerwirkung noch einen verdichtenden Effekt auf das Porengefüge hat. Die Art des Porengefüges hat maßgebenden Einfluss auf den Frostwiderstand und den Chloridtransport in Beton. In Tabelle 2-1 sind neben den Hauptbestandteilen noch die Art der Reaktion bzw. der Einfluss auf das Porensystem anhand einer Nummerierung dargestellt.

Da die Hydratation ein exothermer Prozess ist, lässt sich u. a. auf Basis von Temperaturmessungen indirekt der Hydratationsgrad annäherungsweise berechnen. [Röh12] stellt auf Basis von experimentellen Versuchen (s. auch Teil 5 in [PB48] oder [PCHM65][PH53]) und anderen umfangreichen Literaturquellen eine optimierte Formel zur Berechnung des Hydratationsgrades vor. Da die Hydratation nach derzeitigem Kenntnisstand wohl nie ganz zum Erliegen kommt, wird ein Hydratationsgrad von 1 auch unter optimalen Bedingungen bei einem w/b-Wert von ca. 0,38 und Lagerungsbedingungen, die Austrocknung vermeiden, nicht erreicht. In [Röh12] werden maximale Hydratationsgrade von 0,85 angegeben. In Kapitel 4.2.1 wird der Hydratationsgrad auf Basis von Gelbildungsfaktoren (Glg. 4-XV) berechnet. Somit kann der volumetrische Anteil an Kapillarporen berechnet werden.

Tab. 2-1: Hauptbestandteile (Auszug) von Bindemitteln nach [DIN11], Oxid- und Baustoffschreibweise in Anlehnung an [Ben15]. Reaktionsart 1: hydraulisch, Reaktionsart 2: latent-hydraulisch, zusätzliche alkalische Aktivierung notwendig (z. B. durch $Ca(OH)_2$), Bildung ähnlicher Produkte wie die C-S-H-Phasen bei der hydraulischen Reaktionsart, Reaktionsart 3: puzzolanisch, Umsetzung von $Ca(OH)_2$ mit H_2O unter Bildung zusätzlicher C-S-H-Phasen, Reaktionsart 4: (nahezu) inert

Haupt-bestandteile	**Oxid-schreibweise**	**Baustoff-symbol**	**Reaktions-art (s. oben)**
Tricalciumsilicat (Alit)	$3CaO \cdot SiO_2$	C_3S	1
Dicalciumsilicat (Belit)	$3CaO \cdot SiO_2$	C_2S	1
Tricalciumaluminat (Aluminat)	$3CaO \cdot Al_2O_3$	C_3A	1
Calciumaluminatferrit (Ferrit)	$4CaO(Al_2O_3,Fe_2O_3)$	C_4AF	1
Hüttensand (Hochofenschlacke)	CaO, SiO_2, Al_2O_3	H, HÜS	2
Flugasche (FA, kieselsäure- (V), kalkreich (W))	SiO_2[1], Al_2O_3, CaO	V, W	V: 3, W: z. T. 1, 3 V, W: Füllereffekt
Silicastaub (engl.: Silica Fume (SF))	SiO_2[1], Al_2O_3, CaO	D	3, Füllereffekt
Kalkstein	u. a. $CaCO_3$	L[2] , LL[3]	4, ggf. Keimbildung

[1] u. a. deutlich höherer SiO_2-Gehalt (Kieselsäure) bei Silicastaub (> 85 M.-%) als bei Flugasche (15-63 M.-%). Hieraus bilden sich bei der Reaktion von SiO_2 unter Verbrauch von $Ca(OH)_2$ zusätzliche C-S-H-Phasen

[2] TOC ≡ Total Organic Carbon ≡ organischer Kohlenstoffgehalt < 0,5 M.% ([SS91a][SS91b])

[3] TOC ≡ Total Organic Carbon ≡ organischer Kohlenstoffgehalt < 0,2 M.% ([SS91a][SS91b])

Durch die Hydratationsprozesse entstehen unterschiedliche Arten von Poren. Im erhärteten Zustand hat die Bindemittelmatrix aufgrund der ablaufenden Hydratationsprozesse eine größere Porosität als im frischen Zustand während der Betonherstellung. Nachfolgend in Tabelle 2-2 sind die Porenarten gelistet und qualitativ auf deren Einfluss auf mögliche Transportprozesse in den Beton dargestellt.

Tab. 2-2: Einteilung der möglichen Porenarten im erhärteten Beton mit qualitativer Angabe des Einflusses auf Transportprozesse in die Bindemittelmatrix (-: wenig Einfluss, +: großer Einfluss) in Anlehnung an [Röh12]

Poren-art	**Porendurch-messer [mm]**	**Einfluss auf Transport**	**Erläuterung**
Verdichtungs-poren	1 bis 10	++	grobe Vernetzung des Porensystems
Luftporen	$1{\cdot}10^{-3}$ bis 1	+	i. d. R. Vernetzung des Porensystems
künstlich zuge-führte Luftporen	$1{\cdot}10^{-3}$ bis 1	–	unterbricht Kapillarsystem (vgl. Kapitel 2.3.2)
Kapillarporen	$50{\cdot}10^{-3}$ bis $100{\cdot}10^{-3}$	++	Vernetzung der Kapillar-poren durch Kapillare
Gelporen	$0{,}3{\cdot}10^{-6}$ bis $100{\cdot}10^{-6}$	- oder +	wirksam am Transport bei Frost, sonst keinen Einfluss

[SA97] teilt die unterschiedlich großen Poren, die in der erhärteten Bindemittelmatrix entstehen können, nach Tabelle 2-3 ein. Hier wird zusätzlich die Art des Wassers in den Porenarten angegeben. Dadurch kann eine Einschätzung erfolgen, welchen Aggregatzustand das Wasser in Abhängigkeit von der Temperatur hat. Die Einteilung erfolgt ferner in Abhängigkeit vom hydraulischen Radius. Da auf das Wasser in Abhängigkeit von der Porengröße unterschiedlich starke Oberflächenkräfte wirken, wird durch das Verhältnis des jeweiligen Porenvolumens zur Porenoberfläche der hydraulische Radius berechnet. Nach [SA97] entspricht der hydraulische Radius dem halben Porendurchmesser, sofern vereinfacht von einer zylindrischen Poren ausgegangen wird [Sin82].

Tab. 2-3: Klassifikation der Poren in Abhängigkeit vom hydraulischen Radius R_H in der erhärteten Bindemittelmatrix in Anlehnung an [SA97] [Sin82] [Mül21]

Porenart	**hydraulischer Radius R_H [mm]**	**Struktur des Wassers**
grobe Poren	> 1	n. v.
Makrokapillarporen	< 1	makroskopisches Wasser, hohe Beweglichkeit, geringer Kapillardruck, gefrierbar bis -20 °C
Mesokapillarporen	$< 30 \cdot 10^{-3}$	makroskopisches Wasser, noch beweglich, großer Kapillardruck, gefrierbar bis -20 °C
Mikrokapillaren	$< 1 \cdot 10^{-3}$	makroskopisches Wasser, noch beweglich, sehr hoher Kapillardruck, gefrierbar bis -20 °C
Mesogelporen	$< 30 \cdot 10^{-6}$	vorstrukturiertes Wasser, Verdunstung in 50% RH, gefrierbar ab -23 °C
Mikrogelporen	$< 1 \cdot 10^{-6}$	vorstrukturiertes Wasser, Verdunstung in 50% RH, gefrierbar ab -23 °C

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Gel- und Kapillarporen die Porengrößen sind, die den Chloridtransport unter Frosteinfluss dominieren.

Es sollte noch angemerkt werden, dass durch Auslaugprozesse (Auswaschen von Kationen wie z. B. Na^+, K^+, Ca^{++}) die Kapillarporosität steigen kann [Nil22] [KIS22]. Dadurch ist es möglich, dass der Schädigungsgrad steigt und damit verbunden auch ein erhöhter Chlorideintrag verbunden ist.

2.1.2 Verbundzone

Klinkerersatzstoffe wie Silikastaub, Hüttensand (latent-hydraulische C-S-H-Phasenbildung) und Flugasche (puzzolanische C-S-H-Phasenbildung) verringern nach allgemein anerkanntem Wissensstand (vgl. z. B. [VS07b][Wie05]) die Porosität zwischen Gesteinskorn und Bindemittelmatrix. Aufgrund der damit einhergehenden geringeren Porosität erhöht sich der Widerstand gegenüber Chlorideindringen. Unabhängig von betrachteten Frost-Schadens-Modellen (vgl. Kapitel 2.5.1), die die Schädigungsmechanismen von Beton unter Frosteinfluss näher beschreiben, ist die Verbundzone dann von Interesse, wenn Kanäle vorhanden sind, die durchgängig miteinander verbunden sind. Andernfalls kann es zwar in der Verbundzone aufgrund einer im Vergleich zum Kernbeton veränderten Porenstruktur in diesem Bereich partiell zu Frostschädigungen führen, allerdings ist dies makroskopisch mit Blick auf den gesamten Betonprobekörper von eher untergeordneter Bedeutung. [YSG+18]

2.2 Transport von Chlorid in Beton

2.2.1 Kapillartransport

Der Transport von Flüssigkeiten durch Kapillarkräfte innerhalb der Bindemittelmatrix erfolgt zeitlich deutlich schneller als Diffusionsprozesse. Die Geschwindigkeit von Flüssigkeit, in der Chloride gelöst sein können, ist im Vergleich zu anderen Transportmechanismen wie z. B. Diffusionsprozessen oder der Effekt der Mikroeislinsenpumpe hoch. Die Kapillarität (auch das sog. kapillare Saugen) ist hauptsächlich von beiden physikalischen Eigenschaften der Oberflächenspannung des Wassers und der Benetzbarkeit des Feststoffes des Wassers gekenntzeichnet [Klo74] [Vol91] [RG10] [Kap11].

Unter der Modellvorstellung, dass Wasser in einer zylinderförmigen Kapillare aufsteigt, ist der höchste Punkt der aufsteigenden Flüssigkeit am Rand zwischen der Grenzfläche Flüssigkeit und Feststoff (z. B. Wandung der Kapillarpore in Bindemittelmatrix). Die kapillare Steighöhe ist als Höhe H vom Meniskus bis zur Oberfläche des Wassers gemessen, in dem sich die Kraftrichtungen der Wassermoleküle wieder gleich in alle Richtungen erstrecken und sich daher im Gleichgewicht befinden. Die adhäsiven Kräfte zwischen der Flüssigkeit und dem Feststoff führen aufgrund eines Ungleichgewichtes der Anziehungskräfte auf die Wassermoleküle an der Grenzfläche zum spontanen Aufsteigen der Flüssigkeit. Um das Gleichgewicht wiederherzustellen, entsteht an der Grenzfläche eine Zugkraft. Somit ergibt sich die in Abbildung 2-5 konkav (nach unten) gekrümmte Oberfläche mit der kapillaren Steighöhe H und Randwinkel ϑ. Die Steighöhe ist v. a. vom Radius der Kapillare abhängig. Sie ist höher, je enger der Radius ist. Für Beton, der aus anorganischen Bindemitteln und somit gut benetzbaren Oberflächen hergestellt wurde, ist dies allerdings im Rahmen der Betontechnologie von untergeordneter Bedeutung. Eine sehr vereinfachte mathematische Beschreibung der Kapillarität kann durch das Wurzel-Zeit-Gesetz erfolgen. Auf die Darstellung der Formel wird verzichtet, da sie den zuvor genannten oder anderen Literaturstellen entnommen werden kann.

Es sei an dieser Stelle angemerkt, dass sich der Meniskus unterhalb der Wasseroberfläche befindet, wenn die Benetzbarkeit von Stoffen hingegen gering ist.

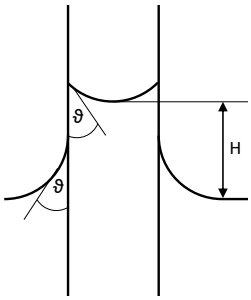


Abb. 2-5: Schematische Darstellung der kapillaren Steighöhe einer Flüssigkeit von einem Feststoff mit guter Benetzbarkeit der Oberfläche (z. B. Kapillarpore in Bindemittelmatrix) und Angabe des Randwinkels ϑ. Grafik nach [Klo74]

Mit Blick auf die Wirkung der Kapillarität unter zyklischem Frost-Tausalz-Angriff hat dieser Transportmechanismus gerade in der Kontaktfläche zwischen chloridhaltiger Flüssigkeit Einfluss

auf den Chloridtransport in Beton. Befindet sich die Flüssigkeit in flüssigem Zustand und sind Kapillare noch nicht ganz wassergesättigt, kann davon ausgegangen werden, dass sie mit zusätzlicher Flüssigkeit durch kapillares Saugen befüllt werden. Sind die Kapillare zusätzlich noch durch Kapillargänge vernetzt, so findet z. T. auch ein Transport zwischen den Kapillarporen statt.

2.2.2 Hydraulischer Druck

Ist Beton Frost ausgesetzt, so entsteht nach [Pow45] im oberflähennahen Bereich ein hydraulischer Druck, der Schädigungen hervorruft. Die Theorie besagt, dass Wasser kurz vor der Betonrandzone zuerst gefriert. In der direkten Kontaktfläche mit dem Beton liegt Wasser aufgrund anderer Druckverhältnisse im Porensystem, Sättigungsgrade und aufgrund des Temperaturgradienten noch ungefroren vor. Bei weiterer Frostbeaufschlagung wird das Wasser von Bereichen mit höheren Sättigungsgraden in tiefere Bereiche mit geringeren Sättigungsgraden transportiert. Der Transport durch die Bindemittelmatrix mit unterschiedlichen Porengrößen führt zum hydraulischen Druck. Der Druck entsteht durch eine Kraft, die die Bewegung des Wassers in der porösen Umgebung mit einem entsprechenden Reibungswiderstand verursacht. Beschreiben lässt sich das Druckgefälle der Wassermenge, in dem auch Chloride gelöst sein können, von der beaufschlagten Seite bis weiter ins Innere des Betons durch das Gesetz der hydraulischen Strömung (sog. Darcy's-Gesetz). Überschreitet der hydraulische Druck die aufnehmbaren Zugspannungen, so kommt es zu Abwitterungen in der Betonrandzone.

2.2.3 Diffusion

Diffusionsprozesse finden statt, wenn sich Teilchen von höher konzentrierten Bereichen in niedriger konzentrierte Bereich bewegen. In Bereichen mit z. B. höherer Chloridkonzentration steigt die stochastische Wahrscheinlichkeit aufgrund der thermischen Eigenbeweglichkeit der Teilchen (sog. "Brown'sche Molekularbewegung"), sodass sich gleich geladene Teilchen öfter berühren und somit in Bereiche niedrigerer Konzentration verteilen, bis die Wahrscheinlichkeit der Abstoßung der Teilchen gleich ist. Es kann verallgemeinert von einer Verteilung entlang eines Konzentrationsgradienten gesprochen werden [Kap11]. Für den ort- und zeitabhängigen ($\equiv$ instationären) Fall des Chloridtransportes in Beton durch Diffusion kann vereinfacht das 2. Fick'sche Diffusiongesetz [Fic55] verwendet werden. Der Ausgleich wird durch einen Chlordionenfluss pro Zeiteinheit (z. B. [s]) durch eine Fläche (z. B. beaufschlagte Betonfläche in [m^2]) beschrieben. Die Lösung der linearen, partiellen Differentialgleichung zweiter Ordnung kann nach Glg. 4-X in Kapitel 4.1.2 erfolgen. Man erhält dann den Diffusionskoeffizienten in $x \cdot 10^{-12}$ [m^s/s].

Der Diffusionskoeffizient ist sowohl von material- als auch von expositionsbedingten Parametern abhängig. In der nachfolgenden Tabelle 2-4 sind materialbedingte Einflüsse mit ergänzender Literatur aufgeführt.

Der Diffusionskoeffizient ist auch abhängig von der Anzahl der Wassermoleküle, die ein Chloridion umgeben. Die Anlagerung von Wassermolekülen wird in diesem Zusammenhang ebenfalls als Hydratation bezeichnet. Anders als in Kapital 2.1.1 beschrieben, ist hier allerdings nur die

Anlagerung von Wassermolekülen an Chloridionen gemeint. Dadurch entsteht z. B. bei Salzen wie $NaCl$ um das Chloridion eine Hydrathülle. Die Anzahl an an H_2O-Molekülen kann auch mit Hilfe von Solvatationzahlen beschrieben werden ([HA71] [Vol91]). Sie hat u. a. Einfluss auf Transporteigenschaften von Salzen in porösen Medien wie Beton. Je mehr Moleküle sich um ein Ion anlagern, desto größer ist es, und es kann verallgemeinert gesagt werden, dass es dadurch langsamer in den porösen Feststoff eintritt.

Tab. 2-4: Materialbedingte Einflüsse auf den Chloriddiffusionskoeffizienten. - bremsend, + beschleunigend.

Parameter	**Einfluss**	**Bemerkung**	**Literatur (Auszug)**
Porosität	-	Verschiebung von Kapillar- zu Gelporen	[PB48][PCHM65] [Lay06] [Wie05] [Kap11]
Porenlösung Na^+, K^+, Ca^{++} etc.	-	Potentialdifferenzen an Porenwandung	[ZG96] [Kap11]
Chloridbindung	- o. +	Bindemittelabhängig	[Lud96] [Tan96] [Wie05] [Kap11]

Neben den expositionsbedingten Einflüssen sind in der nachfolgenden Tabelle 2-5 materialbedingte Einflüsse mit ergänzender Literatur aufgeführt.

Tab. 2-5: Expositionsbedingte Einflüsse auf den Chloriddiffusionskoeffizienten. - bremsend, + beschleunigend.

Parameter	**Einfluss**	**Bemerkung**	**Literatur (Auszug)**
Temperatur	-	mit abnehmender Temperatur	[PSE81] [Bro82] [Rau92] [Geh00]
Chloridgehalt	+	mit steigendem Chloridgehalt	[Kap11] [Rah16] [Lay06]
Wassersättigung	-, - o. +, +	trocken, intermittierend, ständig nass	[Kap11] [Rah16] [Lay06] [DIN10]

Einen theoretisch-experimentellen Ansatz in Hinblick auf die Feuchtigkeitsverteilung im Zementstein gibt [Hel61]. Die Überlegung besteht darin, dass die Gelporen durch Diffusion nahezu wassergesättigt bleiben. Aufgrund der Oberflächenkräfte an den Porenwandungen der Gelporen kann somit freie Energie (oder auch chemisches Potential genannt) entstehen, um die dadurch entstehenden Ungleichgewichte in Hinblick auf deren chemisches Potential im Gleichgewichtszustand zu erreichen. Begründet wird dies indirekt durch Messungen während Schrumpf- und Ausdehnungsprozessen unter Temperatureinflüssen (vgl. Kapitel 2.5.1 [Hel61]).

[Lin98] verwendet den Diffusionsansatz unter Berücksichtigung der Chloridbindung ebenfalls, um den Transport von Chloriden bei verschiedenen Temperaturen z. T. beschreiben zu kön-

nen. Aufgrund von Diffusionsprozessen oberhalb des Gefrierpunktes, die durch Konzentrationsunterschiede zwischen anstehender Prüflösung und Porenlösung hervorgerufen werden, werden Chloride in den Beton transportiert.

[VS07c] beschreibt den Chloridtransport durch das Gleichgewicht zwischen Chloridkonzentration der Prüflösung und der Konzentration in der Porenlösung der Bindemittelmatrix. Hingegen widerspricht er dem zuvor genannten Anatz von [Hel61].

Auch in [Mül21] wird ein kleiner Teil des Chloridtransportes während der Gefrierphase auf Diffusionprozesse zurückgeführt.

2.2.4 Osmose

Im Allgemeinen wird der Transportprozess Osmose ebenfalls wie bei der Diffusion durch einen Konzentrationsunterschied hervorgerufen. Es findet also ein Konzentrationsausgleich vom höher zum niedriger konzentrierten Bereich statt. Jedoch ist der Prozess bei der Osmose noch zusätzlich durch eine halbdurchlässige (sog. semipermeable) Membran verlangsamt. Es diffundieren also Teilchen einseitig durch die Membran.

Am Ende des Kapitels 2.2.3 wird der Anteil der Diffusion am Flüssigkeitstransport bei zyklischer Frost-Tau-Beanspruchung erläutert. In [Pow65] wird der Flüssigkeitstransport durch Diffusion während der Frost-Tausalz-Zyklen um im Wasser gelöste Stoffe erweitert. Hierbei soll Zementmatrix als Membran wirken. Da das Eis keinen nennenswerten Anteil an Stoffen in das Kristallgitter einbauen kann, erhöht sich die Stoffkonzentration in der noch ungefrorenen Kapillarporenlösung. Die Membran bestehend, aus Zementstein, ist für Wasser besser durchlässig als für darin gelöste Stoffe. Es entsteht ein thermodynamisches Ungleichgewicht von den Gelhin zu den Kapillarporen. Das Eiswachstum in den Kapillaren steigt, und es kommt zu höheren Drücken aufgrund von Osmose (s. auch [VS07c]).

2.3 Einflussgrößen auf den Chloridtransport

2.3.1 Temperatur

Die Temperatur hat im Allgemeinen Einfluss auf die Geschwindigkeit von Molekülbewegungen [Sch16] [BFJ+16]. In Hinblick auf die im Beton ablaufenden physikalischen und chemischen Prozesse beeinflusst die Temperatur die Hydratationsgeschwindigkeit und das Verhalten von Wasser in der erhärteten Bindemittelmatrix. Ähnlich der Wahrscheinlichkeit einer erhöhten Abstoßung von gleichartigen Teilchen, die den Diffusionsprozess hervorrufen (vgl. Kapitel 2.2.3, [PSE81]), erhöht sich die kinetische Energie bei höheren Temperaturen. Dadurch erhöht sich die Geschwindigkeit von Reaktionen, die bei der Hydratation ablaufen [Rös18] [PCHM65] [Röh12]. Damit verbunden ist die Ausbildung des Porensystems in der Bindemittelmatrix, das wesentlichen Einfluss auf den Chloridtransport in Beton hat. Je mehr vernetzte Kapillarporen vorhanden sind, desto schneller gelangt Chlorid bei erhöhten Temperaturen in den Beton.

In Kapitel 4.1.6 wird der Ansatz von Arrhenius verwendet, um die Diffusionskoeffizienten von befrosteten und unbefrosteten Probekörpern in Hinblick auf den Temperatureinfluss vergleichbar zu machen.

2.3.2 Luftporen (LP)

Bei der Herstellung von Beton entstehen während des Mischvorgangs Luftporen. Sie werden beim Verdichten nicht komplett entfernt, sodass z. B. für den Betonentwurf mit einem Luftporengehalt von 1,5 Vol.-%/m^3 ausgegangen werden kann. Um den Frostwiderstand zu erhöhen, können chemische Betonzusatzmittel verwendet werden, damit der Luftporengehalt durch künstlich zugeführte Luftporen erhöht wird. Das Porensystem soll dabei so verändert werden, dass zum einen ausreichend Expansionsraum für das gefrierende Wasser vorhanden ist, zum anderen sollen die fein- und gleichmässig verteilten Luftporen auch die Verbindungsgänge zwischen den Kapillarporen unterbrechen. So sollen Transportmechanismen deutlich verlangsamt werden und schädigende Stoffe wie Chlorid langsamer in den Beton eindringen.

Damit die Wirksamkeit von künstlichen Luftporen sichergestellt ist, gibt es unterschiedliche Ansätze, die mit den Theorien von Schadensmechanismen verknüpft sind. [PW49] (Gefrierschwinden vgl. [PH53]) legt dar, dass Luftporen den hydraulischen Druck, der bei der Bildung von Eis im oberflächennahen Bereich entsteht, verringert. [VS07b] bestätigt die Wirksamkeit von Luftporen mit einem bestimmten Abstand in einer ausführlichen Literaturrecherche. [Has14] beschreibt die Wirksamkeit von Luftporen mit Hilfe deren spezifischer Oberfläche. In Deutschland wird im Allgemeinen der Abstandsfaktor und der Mikroluftporengehalt verwendet, um eine Aussage über die Wirksamkeit der zugeführten Luftporen zu treffen. [PW49] legt diesen Bereich auf Basis von Versuchen dar und [VS07b] bestätigt dies in einer ausführlichen Literaturrecherche.

Tab. 2-6: Anforderungen an die Luftporenkennwerte nach [FGS23]

Prüfung	**Mikroluft-porengehalt A_{300}**	**Abstands-faktor [mm] $\overline{L}$**
Eignungs-/Erstprüfung	$\geq$ 1,8 Vol.-%	0,20
Bauwerksprüfungen	$\geq$ 1,5 Vol.-%	0,24

2.3.3 Chloridbindung

Da die Chloridbindung einen Einfluss auf die Transportgeschwindigkeit von Chlorid in Beton hat, werden nachfolgend die möglichen Einflüsse u. a. mit Blick auf den Temperatureinfluss erläutert. Je mehr Chloride gebunden sind, desto weniger freie Chloridionen stehen für Transportprozesse in Beton zur Verfügung. Lediglich die freien Chloride bewirken ab Überschreiten eines korrosionsauslösenden Chloridgehaltes, auf den in dieser Arbeit nicht näher eingegangen wird, die Depassivierung und somit Korrosion des Betonstahls.

Die Chloridbindung wird häufig übergeordnet anhand zweier unterschiedlicher Bindungsarten beschrieben [Wie05] [Dau06]. Hierbei kann zwischen physikalischer und chemischer Bindung unterschieden werden. Die schwächste Bindung stellt hierbei die physikalische Bindung dar. Sie ist geprägt durch die Adsorption (Anlagerung von Chloriden) durch z. B. Van-der-Waals-Kräfte an die Geloberfläche der $C-S-H$-Phasen. Die chemische Bindungsart von Chloriden kann wiederum mit Blick auf deren Bindungsenergie in zwei Gruppen eingeteilt werden. Durch

stärkere Bindungskräfte als durch Van-der-Waals-Kräfte werden Chloridionen ebenfalls an die Geloberflächen der $C-S-H$-Phase angelagert, z. T. aber auch unter Veränderung der Molekülstruktur eingelagert. Die stärkste Chloridbindung, die ebenfalls zur chemischen Bindungsart gezählt wird, ist die direkte Einlagerung von Chlorid in die Phasen des Zementsteins. [Ric69] belegt durch Versuche, dass die Einlagerung überwiegend durch die Bildung von Friedel'schem Salz stattfindet.

[Byf86] stellt in seinen Untersuchungergebnissen dar, dass bei geringeren OH^--Gehalten (vgl. auch [Tri89b]) und SO_4^- ($< 0{,}1$ mol/l) die Chloridbindekapazität zunimmt. Dies kann auf Auslaugungseffekte zurückgeführt werden. Durch z. B. die Auslaugung von OH^- stehen wieder Bindungsplätze der ebenfalls negativ geladenen Cl^--Ionen zur Verfügung. Im geschädigten oberflächennahen Bereich von Betonen in der CDF-Prüfung ist aufgrund der wässrigen Lösung an der exponierten Fläche ebenfalls von einer Auslaugung auszugehen.

[Lud96] (vgl. Tabelle 7 in [Lud96] oder Tabelle 2.1 in [Wie05]) stellt mögliche Chloridbindungen mit Blick auf die Phasenumwandungen im Zementstein dar. Neben materialspezifischen Parametern, können auch expositionsbedingte Randbedingungen [Kap11] wie z. B. die Temperatur Einfluss auf die Chloridbindung haben. So wird in [Lud96] angemerkt, dass bei tieferen Temperaturen (unterhalb des Gefrierpunktes) und erhöhter Chloridkonzentration ($> 0{,}5$ mol/l $\equiv 3{,}0$ M.-% $NaCl$-Lösung) Chloride in den Hydratphasen eingelagert werden können. [Ric69] erwähnt, dass während der Hydratation die Chloridbindekapazität zunimmt, wenn die Temperaturbereiche bei 20 °C und 80 °C verglichen werden. Auf eine nachträgliche Chlorideinwirkung nach einem gewissen Hydratationsgrad wird hierbei nicht eingegangen.

Die Chloridbindung kann auch mit Hilfe der BET (Brunauer, Emmett, Teller)-Isotherme modelliert werden. In [CAA99] wird das Binden von Chloriden anhand von Ergebnissen aus Migrationsversuchen durch das Fitten an die Gleichung der BET-Isotherme gezeigt. Hier wird die Tendenz gezeigt, dass Chloridionen bis zu einer Konzentration von 28 [g/l] in der Porenlösung ungebunden in der Bindemittelmatrix vorliegen. Alternativ kann die Chloridbindung auch mit den Freundlich-Isothermen beschrieben werden. In [TN93] wird dies an Portlandzementen durchgeführt. Das Resultat ist, dass die Bindekapazität nicht vom w/b-Wert oder Klinkerersatzstoffen abhängig ist.

2.3.4 Carbonatisierung

Die Carbonatisierung kann auch negative Einflüsse auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken haben. Ist ausreichend Calciumhydroxid ($Ca(OH)_2$) im Bindemittel vorhanden, so bleibt der pH-Wert im Beton hoch und es kann sich eine Passivschicht auf dem Betonstahl ausbilden, die den Stahl vor Korrosion schützt. Sie besteht aus Sauerstoffatomen und ist dauerhaft, solange der pH-Wert im Beton ausreichend hoch ist. Die Carbonatisierung sorgt u. a. für die Verringerung des pH-Wertes und kann den Betonstahl depassivieren, sodass die Wahrscheinlichkeit zur Korrosion stark steigt.

Die Gesamtporosität bei Bindemitteln, die überwiegend aus Portlandzement bestehen, sinkt bei der Carbonatisierung. Aufgrund der Reaktion von Kohlenstoffdioxid (CO_2) aus der Luft

mit dem im Porenwasser gelösten und ausreichend vorhandenen Calciumhydroxid ($Ca(OH_2)$) entsteht in diesen Poren festes Calciumkarbonat ($CaCO_3$). Dies führt zum einen zu einer Festigkeitssteigerung und zum anderen zu einem dichteren Porengefüge. In Hinblick auf das dichtere Gefüge steigt der Frostwiderstand. Anders verhalten sich Bindemittel, die einen steigenden Hüttensandgehalt aufweisen [GD15] [TLG20]. Eine mögliche Theorie, die die verminderte Frostbeständigkeit von Betonen mit Bindemitteln und erhöhtem Hüttensandgehalt erklären kann, ist, dass durch verminderten Gehalt an Portlandzement weniger $Ca(OH)_2$ vorhanden ist und somit eine weitere Reaktion stattfindet. Verbunden mit einer pH-Wert-Erniedrigung aufgrund des geringeren Calciumhydroxidgehaltes kann es zur Bildung von porösem Kiesgel [Ehr17] kommen. Dieses entsteht durch die Reaktion von Kohlenstoffdioxid mit Teilen der C-S-H-Phasen bei eher calciumarmen Bindemitteln wie hüttensandreichen Systemen. Damit geht ein erhöhtes Volumen einher, das wiederum das ehemals feinverästelte Porengefüge aufweitet und somit poröser macht. Klinkerersatzstoffe mit Aluminiumbestandteilen in C-A-S-H-Phasen können hierbei einen Anteil dazu beitragen [Irb19].

2.4 Wasser unter Frosteinfluss in Beton

2.4.1 Wassersorption

Durch Hydratationsvorgänge wird Wasser sowohl chemisch wie auch physikalisch in der Bindemittelmatrix gebunden. Bei voranschreitender Hydratation ist ein Teil des Wassers chemisch in den C-S-H-Phasen gebunden (vgl. auch Kapitel 2.1.1). Die Menge des überwiegend physikalisch gebundenen Wassers ist abhängig vom Feuchtegehalt des Betons, der Luftfeuchtigkeit (RH) und dem Wasserdampfpartialdruck. Die Sorption selbst beschreibt also die Auf- und Abnahme von Wasser in der porösen Bindemittelmatrix [BB20]. Durch schwache Va-der-Vaals-Kräfte werden Wassermoleküle zunächst einlagig an die Porenwandungen angelagert ($\equiv$ adsorbiert). Ab ca. 25 % RH werden mehrere Lagen an H_2O-Molekülen angelagert. Ab ca. 50 % RH erfolgt in kleinen Poren (zw. $1 \cdot 10^{-9}$ und $1 \cdot 10^{-6}$ [m]) eine Reduzierung des Wasserdampfpartialdrucks, und die Poren füllen sich aufgrund von Kapillarkondensation mit Wasser. Mit Hilfe von Ad- und Desorptionsisothermen lässt sich die Interaktion zwischen Gleichgewichtsfeuchte im Beton und Luftfeuchtigkeit darstellen. Abbildung 2-6 beschreibt den Verlauf des Ausgleichswassergehalts ($\equiv$ Sorptionsisotherme) unter Berücksichtigung des hygroskopischen und überhygroskopischen Bereiches. Es ist zu erkennen, dass im überhygroskopischen Bereich bei hohen Luftfeuchtigkeiten und in Porengrößen, die deutlich größer als der Gelporenbereich sind, der Feuchtegehalt im Beton nochmals deutlich ansteigen kann.

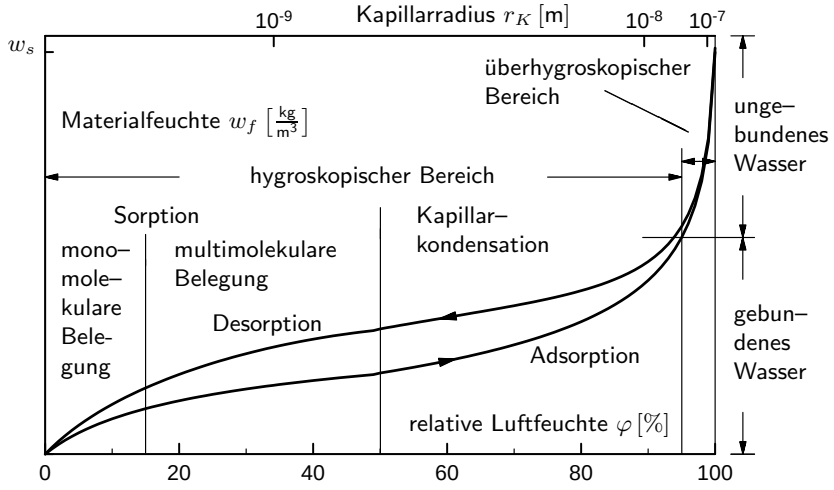


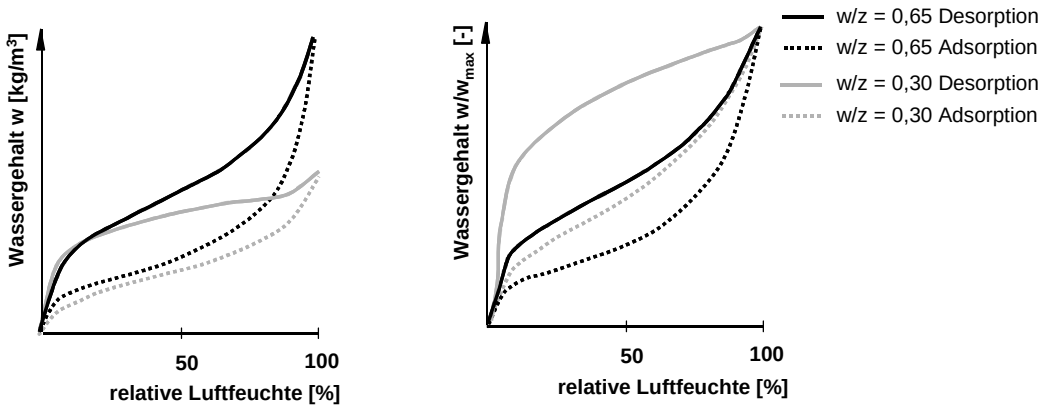
Abb. 2-6: Ab- und Desorptionsisotherme in Abhängigkeit des Porenradius r_K (obere x-Achse), der relativen Luftfeuchte (untere x-Achse), des Feuchtegehalts im Beton (linke y-Achse) und des ungebundenen sowie gebundenen Wassers (rechts y-Achse). Angabe des hygroskopischen und überhygroskopischen Bereiches. Grafik aus [Ste00] in Anlehnung an [Kie83]

Ist im Wasser zusätzlich z. B. $NaCl$ gelöst, sinkt der Wasserdampfpartialdruck ab ca. 75 % RH durch die Hygroskopizität. Dadurch steigen die Sorptionsisotherme bei 75 % RH sprunghaft [Bec23] [Wit79], d. h.die Anwesenheit von gelösten Ionen führt zur Wasserzunahme [RG08].

In Abbildung 2-7 sind die Sorptionsisotherme in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit (x-Achse) zum einen auf den absoluten Wassergehalt (y-Achse, vgl. Abb. 2-7(a)) und zum anderen auf den Wassergehalt, der ins Verhältnis zur maximal aufnehmbaren Wassergehaltmenge gesetzt ist, (y-Achse, vgl. Abb 2-7(b)) qualitativ dargestellt. Ferner sind die Ad- und Absorptionsisotherme für zwei unterschiedliche w/z-Werte angegeben. Da der Kapillarporenraum bei größeren w/z-Werten im Vergleich zum kleineren w/z-Werten deutlich größer, erhöht sich auch die Wasseraufnahme bei höheren Luftfeuchtigkeiten.

Da die Wasseraufnahme aufgrund von chloridhaltiger Flüssigkeit im Beton wegen der Sorption schon bei ca. 75 % RH gesteigert wird, wird mit Chloriden wassergesättigter Beton mit Blick auf die Wasseraufnahme durch Adsorption voraussichtlich nicht deutlich mehr Wasser aufnehmen, als wenn der Beton ohne chloridhaltiges Wasser vorgesättigt wird.

Unterschreitet die Luftfeuchtigkeit den genannten Grenzwert, so ist davon auszugehen, dass chloridhaltige Flüssigkeit den Wassersättigungsgrad in Beton erhöht. Dadurch finden anschließende Transportmechnismen, auch unter Frosteinfluss, vermehrt statt.



(a) Ad- und Desorptionsisotherme in [kg/m^3] in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit (RH) in [%]

(b) Wassergehalt ($\equiv$ Wassersättigung) bezogen auf die maximal aufnehmbare Wassermenge in [-] aus (a) in Abhängigkeit der Luftfeuchtigkeit (RH) in [%]

Abb. 2-7: Schematischer Verlauf der Sorptionssisotherme in (a) aus [Kap11] und der daraus folgenden Wassersättigung in (b) unter Verwendung von [Wit92]

2.4.2 Gefrierende Flüssigkeit

Aus [SA97] (vgl. auch [PB48] [BS90] [Erb86]) kann entnommen werden, dass die 9%-ige Volumenzunahme durch die Erhöhung der Dichte des Wassers vom festen, eisförmigen zum flüssigen, wässrigen Aggregatzustand erklärt werden kann. Im festen Zustand ist das Kristallgitter des Eises durch Wasserstoffbrückenbindungen zusammengehalten. In diesem Zustand ist jedes Wassermolekül in einer tetraederförmigen Anordnung von vier weiteren Molekülen umgeben. Bei der Änderung vom festen in den flüssigen Zustand bleibt diese Anordnung z. T. immer noch bestehen, und es werden nur 15 % der Wasserstoffbrückenbindungen aufgebrochen, sodass nun jedes Wassermolekül von mehr als nur vier weiteren Molekülen umgeben wird. Dadurch erhöht sich die Dichte. Aufgrund der hohen Polarität des Wassers verhält es sich auch als gutes Lösungsmittel, sodass z. B. Salze wie $NaCl$ darin gut dissoziiert werden. Die gelösten Ionen erniedrigen den Gefrierpunkt.

Die Verringerung des Gefrierpunktes von Wasser, in dem Ionen wie Chloride dissoziiert vorliegend können, findet aufgrund der Anlagerung von Wassermolekülen an Ionen statt. Die Anlagerung wird in diesem engeren Sinne ebenfalls Hydratation genannt (vgl. Kapitel 2.1.1). Die somit entstandene Solvathülle sorgt dafür, dass die Bindungen zu den ehemals benachbarten Wassermolekülen unterbrochen werden. Die Folge ist eine Verringerung des Dampfdrucks und somit eine Gefrierpunktserniedrigung im Vergleich zu Wasser ohne Ionen [Hof18]. Der Frost-Tausalz-Angriff wird in Deutschland i. d. R. bei einem Natriumchloridgehalt von 3,0 M.-% geprüft. Hier beträgt die Temperatur, bei der die Flüssigkeit teilweise gefriert, ca. -1,76 ° C [Bod93]. Das in der Flüssigkeit vorhandene Salz wird nicht in die Kristallstruktur eingebunden. Dies bewirkt eine Anreicherung von Ionen in der ungefrorenen Restlösung (vgl. Bereich A in Abbildung 2-8). Daher verschiebt sich der Gefrierpunkt in niedrigere Temperaturen. Der Punkt, an dem die Lösung gefriertm wird Eutektikum genannt. [Mül21] hat in Abhängigkeit des $NaCl$-Gehaltes und Temperaturen unterhalb des Nullpunktes ein Phasendiagramm erstellt. Es beseht aus den

Phasen $NaCl$ und H_2O. Bei der CDF-Prüfung und vielen anderen Prüfverfahren beträgt die Minimaltemperatur ca. -20 °C. Aus Abbildung 2-8 ist zu erkennen, dass immer noch ungefrorene Restlösung vorhanden ist.

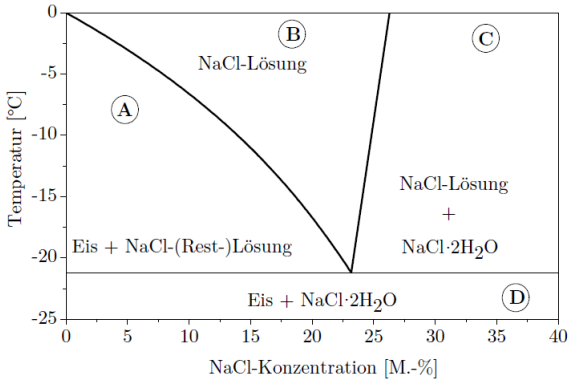


Abb. 2-8: Binäres Phasendiagramm H_2O-$NaCl$. Grafik aus [Mül21]

Auch die Porengröße und die relative Feuchtigkeit haben einen Einfluss auf die Struktur des Wassers. In den kleineren Gelporen lagern sich nach [SA97] einige wenige Wassermolekülschichten aufgrund der höheren Oberflächenspannung bis zu einer relativen Feuchte (RH) von ca. Feuchte (RH)50 % adsorptiv an die Porenwandungen an. Das Wasser liegt aufgrund der Oberflächenkräfte strukturiert vor. Aufgrund der darin enthaltenen höheren Energie im Vergleich zu Wasser in größeren Poren, in denen vernachlässigbar geringe Oberflächenkräfte wirksam sind, erniedrigt sich der Gefrierpunkt deutlich auf - 20 °C bis - 60 °C. Ab ca. 50 RH kann das Wasser kondensieren und liegt immer noch vorstrukturiert vor. Die Wasseraufnahme in diesen feuchten Gelporen findet durch Kondensation unterhalb des Sättigungsdruckes statt.

2.4.3 Pessimum der Tausalzlösung

In [Arn43] werden aufgrund von größeren Schäden an Straßen in Schweden verschiedene Versuche mit unterschiedlichen Salzarten und Salzkonzentrationen angestellt. Hier wird ein Calciumchloridgehalt von 3,5 M.-% (≡ 0,34 [mol/l] Calciumchloridkonzentration ($CaCl_2 = 101,1$ [g/mol], 35 [g])) genannt, bei dem die größten Schäden auftreten. Der $NaCl$-Gehalt wurde in Bereichen zwischen 2 bis 10 M.-% variiert. Überdies wurden weitere Salzarten getestet, die hier aufgrund heutzutage weniger Anwendungsfälle nicht näher beschrieben werden. Die Schädigungen waren in diesen Bereichen mit jenen, die mit Calciumchlorid aufgetreten sind, vergleichbar. Es konnte kein konkreter Gehalt bei einer Minimaltemperatur von -25 °C ermittelt werden, bei dem es bei den Versuchen zu erhöhten Abwitterungen gekommen ist.

In einer Literaturrecherche ab ca. 1950 wird von [VS07b] (s. auch [VK56] [Stu97] [Lin98] [MPBT99]) angemerkt, dass die ungünstigste $NaCl$-Salzkonzentration bei ca. 3,0 M.-% (≡ 0,51 [mol/l] Natriumchloridkonzentration ($NaCl = 58,4$ [g/mol], 30 [g])) liegt. Bei diesem Chloridgehalt scheint das Pessimum vorzuliegen, bei dem die größten Frostschädigungen zu erwarten sind.

In [Mül21] wurden CDF-Prüfungen in Anlehnung an [Set] [BAW12] durchgeführt. Die $NaCl$-Gehalte im Wasser werden hier in den Schritten 0,0 / 0,5 / 1,5 / 3,0 / 6,0 M.-% variiert. Diese Gehalte werden sowohl in der einwöchigen Phase der Vorsättigung, in der das kapillare Saugen stattfindet, als auch während der Frost-Tausalz-Zyklen selbst verwendet. Hier wird festgestellt, dass das Pessimum in Hinblick auf die abgewitterten Mengen [kg/m^3] nicht bei ca. 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, sondern zwischen 0,5 bis 1,0 M.-% liegt.

Mit Blick auf die maximalen Schädigungen von Beton geht die überwiegende Tendenz in Richtung eines Pessimums bei einem $NaCl$-Gehalt von ca. 3,0 M.-%. Bezieht man zusätzlich zu der oberflächennahen Abwitterung den durch Frost-Tausalz-Angriff hervorgerufenen Chloridtransport mit ein, so ist anzunehmen, dass bei einer Konzentration von 0,51 [mol/l] ($\equiv$ 3,0 M.-% $NaCl$) sowohl genug ungefrorenes wie zeitgleich ausreichend gefrorenes Wasser vorliegt, sodass bei parallel ablaufenden Transportmechanismen während der Frost-Tausalz-Zyklen in der CDF-Prüfung der ungünstigste Fall vorliegt. Bei dieser Konzentration erfolgt zum einen die Bildung von ausreichend Eisvolumen in der oberflächennahen Schicht, und zum anderen ist aber auch in der Porenlösung genug ungefrorenes Wasser vorhanden. Dadurch ist es wahrscheinlich, dass unter Einbezug von tiefenabhängigen Chloridprofilen größere Eindringtiefen und höhere Chloridmengen im Beton auftreten. In Kapitel 2.5.2 werden die vorhandenen Frostmodelle, die überwiegend die Schadensmechanismen versuchen abzubilden, um die Perspektive des Einflusses von Frost-Tausalz-Zyklen auf den Chloridtransport in Beton erweitert.

2.4.4 Flüssigkeitsaufnahme

Chloridtransport in Beton findet dann statt, wenn ein gewisser Grad an Feuchtigkeit im Beton vorhanden ist. Ist der Beton nahezu komplett trocken, können sich die Chloridionen, die z. B. in $NaCl$ vorhanden sind, nicht im Wasser auflösen und somit nicht in den Beton eindringen. Daher ist die Kenntnis der Flüssigkeitsaufnahme ein Indiz dafür, ob auch im Wasser gelöste Chloridionen in den Beton eindringen. Die Chloridfront ist i. d. R. immer hinter der Flüssigkeitsfront [ZWV$^+$17]. Dieser Effekt wird Retardation genannt.

In [LH16] werden umfangreiche Versuchsserien im Rahmen von CDF-Prüfungen u. a. nach [Set] durchgeführt. Ziel war es, den Einfluss von entionisiertem Wasser im Vergleich zu 3,0 M.-%-iger $NaCl$-Prüflösung in Hinblick auf die Feuchtigkeitsaufnahme und den Abwitterungsgrad zu untersuchen. Die getesteten Betone hatten w/b-Wert von 0,33 / 0,42 (Beton aus Feldversuch) / 0,45. Das Hauptaugenmerk wird auf Betone mit einem w/b-Wert von 0,45 gelegt. Bei den Betonrezepturen wurden zwei unterschiedliche Bindemittelarten und drei unterschiedliche Luftporengehalte getestet. Das Bindemittel war entweder reiner Portlandzement oder 50 M.-% Portlandzement und 50 M.-% Hüttensand. Die Luftporengehalte betrugen je Bindemittelart 3, 5 oder 8 Vol.-%.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei den Betonen mit Portlandzement, die sich in $NaCl$-Lösung befanden, sowohl während der Vorsättigungsphase (kapillares Saugen bei +20 °C/ 65 % RH ohne Frost-Tausalz-Angriff) als auch während der 60 FTSW (+20 °C/-20 °C) eine erhöhte Flüssigkeitsaufnahme im Vergleich zu Betonen, die nur in Wasser gelagert wurden, festgestellt wurde. Bei den Betonen mit 50 M.-% Hüttensand war die erhöhte Flüssigkeitsaufnahme

nicht feststellbar.

Die Autoren gehen hierbei u. a. auf drei unterschiedliche Porenarten ein: kleine Gelporen, Kapillarporen und künstlich zugeführte Luftporen mit einem bestimmten Abstandsfaktor nach [PW49] [Fag93] (vgl. auch Kapitel 2.3.2). Diese haben Einfluss auf die Flüssigkeitsaufnahme. So werden ungesättigte Kapillarporen bei kleinen w/b-Werten und dem Beton mit 50 M.-% Hüttensand schlagartig gefüllt. Dies erhöht den Wassergehalt im Beton unabhängig davon, ob das Wasser mit oder ohne Salz vorhanden ist. Hüttensandhaltige Betone oder Betone mit kleinen w/b-Wert («0,50) erhöhen die Verwundenheit (Tortuosiotät) und Verschieben das Porensystem zu kleineren Radien hin ([CW13] [Pig14].

Überdies können die künstlich zugeführten Luftporen durch Diffusionsprozesse mit Wasser gefüllt werden [Fag04]. [Fag73] nennt als massgeblichen Schädigungsmechanismus den kritischen Sättigungsgrad. Ab Erreichen des kritischen Sättigungsgrades entsteht ein hydraulischer Druck, der den Beton schädigt. Der kritische Sättigungsgrad ist eng verbunden mit dem Füllgrad von Wasser im Porensystem.

2.5 Theorien für den Frost-Tausalz-Angriff

2.5.1 Theorien

Es gibt zahlreiche Ansätze, die die Wirkungsweise in Hinblick auf Frost-Taumittel-Belastung und die damit verbundenen Schadensmechanismen auf unterschiedliche Art und Weise näher beschreiben. Die damit verbundenen Folgen des Frost-Tausalz-Angriffs auf den Chloridtransport beim Vergleich von befrosteten (z. B. in der CDF-Prüfung) und unbefrosteten Betonen (z. B. Lagerung bei 20 °C/65 RH) unter Einbezug verschiedener Bindemittelarten werden seltener betrachtet.

Die Schadensmechanismen werden unter Anwesenheit von in Wasser gelösten Salzen (z. B. $NaCl$) bei Frost-Tausalz-Wechseln (FTSW) verstärkt. Dadurch gelangen zwangsläufig auch Chloride in den Beton. Aufgrund der Erniedrigung des Gefrierpunktes des Wassers wegen der darin gelösten Salze kann es im Vergleich zu Wasser ohne Salzen, das schneller gefriert und somit vergleichsweise immobiler ist, vermehrt in den Beton eindringen. Im oberflächennahen Bereich kommt es nach der Theorie von [Lin98], die von [LH15] aufgegriffen wird, zum sog. Kryogenen Saugen (Cryogenic Suction). Dadurch wird die Wassersättigung des Betons erhöht, und es kommt zur Anreicherung von $NaCl$ [Fag73] [Fag77a] [Fag96] [Fag04]. Weiter im Inneren des Betons ist der Transportprozess überwiegend geprägt durch die Mikroeislinsenpumpe [Set99] [SA97] [Set02]. Diese beiden Mechanismen sind physikalisch und können dem konvektiven Transport zugeordnet werden.

Da es in der Literatur eine Vielzahl an Theorien gibt, die die Schadensvorgänge von Beton unter Frost- und Frost-Taulsalz-Angriff näher beschreiben, wird nachfolgend ein kurzer historischer Abriss gegeben.

[COL44] schätzt die Ursache der Frostschäden an Betonen, die durch Frost-Tausalz-Zyklen (+/- 18 °C innerhalb von 24 h) entstehen, als Folge eines aus der Bodenmechanik bekannten Phänomens ein. Das Phänomen beschreibt die Bildung von Eislinsen innerhalb von Bodenschichten.

Die Eislinsen entstehen durch den Wassertransport von ungefrorenen hin zu gefrorenen Bodenschichten und ordnen sich in der Grenzschicht an. Die Eislinsen führen dann zu einer Ablösung der gefrorenen Schicht im Bereich der Eislinse [Tab16] [Tab29].

In [Pow45] wird neben der ca. 9%-igen Volumenzunahme bei der Aggregatszustandsänderung von flüssigem Wasser zu gefrorenem Eis hauptsächlich der hydraulische Druck als möglicher Grund für die Überschreitung der aufnehmbaren Zugspannungen im Beton unter Frosteinfluss genannt. Er wird durch das Eis erzeugt, welches das Wasser in den Kapillargängen in die Poren drückt. Durch das Drücken des noch ungefrorenen Wassers in die darunterliegende Pore entsteht ein hydraulischer Druck an den Wandungen der Kapillare. Ab Erreichen eines kritischen Wassersättigungsgrades führt die Bildung des Eises zu einer Schädigung des Betongefüges.

In [PH53] wird die Theorie des hydraulischen Drucks, der beim Gefrieren von Flüssigkeit hauptsächlich im oberflächennahen Bereich entsteht, durch die Diffusion von Wasser aus den Gelporen in Kapillarporen erweitert. Auf Basis von Messungen der Längenänderungen von Zementstein, der zyklischen Frostbelastungen ausgesetzt ist, wird die Theorie um den Anteil der Diffusion ergänzt. Durch das ungefrorene Wasser in den Gelporen bei tieferen Temperaturen kann es zu den bereits gefrorenem Eis in den Kapillarporen diffundieren. Es entsteht ein Eisdruck, der Dehnung im Beton verursacht. Sind im Beton künstlich zugeführte Luftporen enthalten, wird der hydraulische Druck begrenzt, da das Wasser aus den Kapillaren in die Luftporen entweichen kann. Sowohl in den Kapillar- als auch in den Luftporen gefriert Wasser beim Abkühlen. Da das Eis in den Kapillarporen eine größere freie Energie als in den Luftporen besitzt, diffundiert das Wasser eher in die Luft- als in die Kapillarporen. Dies erzeugt eine Kontraktion im Zementstein, da kein Eis mehr in den Kapillaren entstehen kann. Genau umgekehrt läuft der Diffusionsprozess von Wasser beim Auftauen ab. Die Gelporen werden dann durch Diffusion mit Porenlösung gefüllt.

In [PH53] wird u. a. dargelegt, dass bei Betonen mit künstlich geführten Luftporen, aufgrund der Nukleation bei der Bildung von Eis, in den Luftporen Unterdruck entsteht, der zu einem Schrumpfen des Betons und damit verbunden einem Ansaugen von Wasser aus den angrenzenden Mesoporen führt (vgl. auch [VS07b]).

In [Pow65] wird die Theorie des hydraulischen Drucks um die des osmotischen Drucks erweitert. Sie besagt nach [Lin98], dass ein osmotischer Druck entsteht, wenn in der Porenlösung gelöste Stoffe vorhanden sind. Dadurch wird vermehrt Flüssigkeit eingetragen, und es ist sowohl Eis als auch Flüssigkeit mit darin gelösten Stoffen in den Poren vorhanden. Die anschließende verstärkte Eisbildung kann somit zur Erhöhung des hydraulischen Drucks führen, wenn Wasser aus den Poren gedrückt wird. [Lin98] steht der Theorie skeptisch gegenüber. Er begründet dies damit, dass nach dem Start des Gefrierens das chemische Potenzial der verbleibenden Porenlösung gleich dem des Eises sein müsste. Daher hätte die so entstandene Eis-Lösung mit gelösten Stoffen kein größeres Potential, neues Wasser anzuziehen, als es reines Eis hätte. In seinen Betrachtungen reduziert sich die Druckdifferenz unter der Anwesenheit von Stoffen in der Porenlösung, damit sich ein Gleichgewichtszustand (Equilibrium) zwischen Eis und Porenwasser einstellt. In seinen Tests hat sich gezeigt, dass die äußere Stoffkonzentration in der Betonrandzone einen größeren Einfluss auf Abwitterung von Beton unter zyklischer Frostbeanspruchung

hat. Die Stoffkonzentration weiter im Inneren des Betons in Hinblick auf die Schadensbildung hingegen ist weniger relevant.

[Hel61] stellte auf Basis von theoretischen, thermodynamischen Vorüberlegungen und anschließenden Versuchen, in denen das Schrumpfen und die Ausdehnung von Portlandzement bei Temperaturänderungen u. a. von -25 °C bis + 25 °C betrachtet werden, die Theorie auf, dass der exponentielle Zusammenhang zwischen $\Delta L/L$ durch Diffusion von Wasser (ohne Taumittel) erklärt werden kann. In den Gelporen liegt die Porenlösung ungefroren und in den Kapillarporen liegt sie bereits gefroren vor. Durch Überlegungen aus [PB48] stellt [Hel61] die These auf, dass die Entropie in Gelporen kleiner als in Kapillarporen sein müsste. Dadurch bildet sich zwischen diesen beiden Porenarten ein thermodynamisches Ungleichgewicht. Als Folge entsteht mehr freie Energie in den Kapillarporen. Diese Energie wird in [Hel61] auch chemisches Potential genannt. Um das System im Gleichgewicht (≡ Equilibrium) zu halten, diffundiert während des Gefriervorgangs Porenlösung aus den Gelporen in kapillare Hohlräume. Umgekehrt müsste beim Auftauen nach [Hel61] Porenlösung aus den kapillaren Hohlräumen in die Gelporen diffundieren.

[Fag96] richtet den Fokus auf den Grad der Wassersättigung. Ab Erreichen eines kritischen Sättigungsgrades von ca. 90 % führt die Frostbeanspruchung zu einer spontanen Schädigung im Beton (s. auch [Fag73][Fag77b]), der durch den Abfall des dynamischen E-Moduls ausgedrückt werden kann.

[Lin98] legt in seiner Theorie dar (vgl. auch [Sny65]), dass nicht die zuvor genannten Mechanismen des osmotischen und hydraulischen Drucks zu den Abwitterungen führen. Er stellt die These auf, dass der Schaden durch einen großen Salzgradienten zwischen Betonrandzone und dem Inneren des Betons hervorgerufen wird. Die Begründung liegt demnach hauptsächlich im eutektischen Verhalten (vgl. Kapitel 2.4.2) der Flüssigkeit im beaufschlagten Bereich. Dadurch ist unter den gegebenen Randbedingungen von Temperaturen bis - 20 °C immer noch ungefrorene Restlösung vorhanden. Durch die darin gelösten Stoffe wie Chloride steht auch bei tieferen Temperaturen ein Flüssigkeitsreservoir zur Verfügung. In den größeren Poren liegt bereits Eis vor, wohingegen in kleineren Poren noch ungefrorenes Wasser vorhanden ist. Damit sich ein thermodynamisches Gleichgewicht einstellt, führt dies zum Wassertransport von kleineren zu größeren Poren, die Eislinsen enthalten. Zusätzlich zur internen Flüssigkeitsumverteilung von den Gel- zu den Kapillarporen erfolgt ein Transport ungefrorener Tausalzlösung von außen in das Betongefüge. Dadurch kommt es zur weiteren Vergrößerung der Eislinsen und führt zu Abwitterungen in dem Bereich.

In [Set99] und [Set02] werden bestehende Theorien um thermodynamische Überlegungen in Hinblick auf Gleichgewichtszustände auf makroskopischer und mikroskopischer Ebene erweitert. Auf mikroskopischer Ebene müssen demnach sowohl das mechanische als auch das chemische Stabilitätskriterium erfüllt sein, damit sich ein thermodynamisches Gleichgewicht (≡ Equilibrium) einstellt. Durch diese Voraussetzung ist das gleichzeitige Vorhandensein aller drei Phasen des Wassers (flüssig, fest und dampfförmig) möglich. In Abhängigkeit von der Porengröße ist aufgrund von unterschiedlichen Oberflächenkräften an den Porenwandungen bei der Anlagerung von Wasser freie Energie vorhanden. Die freie Energie ist umso größer, je kleiner der Porendurchmesser ist. Dies führt zu einer Verringerung des Schmelz- und Gefrierpunktes mit abnehmendem

Porendurchmesser. So kann z. B. bei ein und derselben Temperatur in den Gelporen das Wasser dampfförmig, in der Kapillarpore flüssig und in gröberen Poren bereits eisförmig vorliegen. Ist die Voraussetzung des mechanischen oder/und chemischen Stabilitätskriteriums nicht gegeben, so findet eine Änderung des Aggregatszustandes statt (z. B. von flüssig zu fest).

Während des Gefrierens oder Auftauens befindet sich aufgrund der wechselnden Temperaturen das System nicht im Gleichgewicht. [Set02] betrachtet die poröse Bindemittelmatrix als nicht unendlich steif. Durch diese Annahme kann der sog. Pumpeneffekt erklärt werden. Beim Gefrieren wird das ungefrorene Wasser von den Gelporen in die gröberen Poren hin zur Mikroeislinse gedrückt. Dadurch ziehen sich die Gelporen zusammen, und es erfolgt eine Kontraktion des Betons. Beim Auftauen hingegen findet genau der umgekehrte Prozess statt. In den Gelporen entsteht ein Unterdruck. Da aber das Wasser in der gröberen Pore bereits gefroren ist, ist eine Flüssigkeitsumverteilung von den Kapillaren zu den Gelporen erst möglich, wenn annähernd der Schmelzpunkt des makroskopischen Wassers erreicht ist. Aufgrund des gerichteten Auftaugradienten kann sich eine externe Eisschicht auf dem Beton ausbilden, bevor die Porenlösung im Beton auftaut. Dadurch wird externes Wasser in den Beton gesaugt, sodass sich die Wassersättigung, im Ganzen betrachtet, erhöht. Es entsteht also ein Pumpeneffekt aufgrund unterschiedlicher Drücke in Abhängigkeit vom Porendurchmesser. [Set02] nennt diesen Effekt die Mikroeislinsenpumpe.

In [VS07b] [VS07c] [VS07a] wird neben einer umfangreichen Literaturrecherche seit den ca. 1950er-Jahren, die sog. „Glue-Spall-Theorie“vorgestellt. In exponierten Bereichen zwischen Beton und Prüflösung zieht sich die Eisschicht bei einem Frostangriff demnach fünfmal mehr zusammen als das darunterliegende Betongefüge. In Abhängigkeit von der Konzentration in der Prüflösung reißt zuerst die Eisschicht in viele kleine Teile. Wegen des Verbundes zwischen Eis und poröser Betonrandzone brechen aufgrund der unterschiedlichen Kontraktionen zwischen Eis und Beton schollenartig Teile aus dem Beton heraus.

Der Chronolgie und Vollständigkeit wegen wird an dieser Stelle die Fünf-Phasen-Theorie von [Kau04] genannt, ohne weiter darauf einzugehen, da die darin z. T. genannten Grundüberlegungen wie die Abwitterung in der Betonrandzone durch hydraulischen Druck nach [Pow45], der nur aufgrund von Wasser ohne gelöste Ionen entsteht, nicht mehr dem Stand der Kenntnis entsprechen. Phase 1P: Entstehen von hydraulischem Druck. Abwitterung durch überschreiten kritischer Spannungen in Bereichen, in denen die unterschiedlich konzentrierten Lösungen gefrieren. Phase 2: Eindringen der Eisfront. Phase 3: Umverteilung der Porenlösung. Phase 4: Thermische Dehnungen und Druckaufbau mit Rissbildung. Phase 5: Erhöhung der Wassersättigung in den neuen Rissen infolge von Phase 4.

[Yen15] beschreibt mit Hilfe der sog. „Brine-Rejection“-Theorie, dass innerhalb Eisschicht der noch ungefrorene Salzlösung aufgrund höherer Salzkonzentrationen vorhanden ist. Während des Gefrierens wird dieser Salzeinschluss in Richtung Betonoberfläche gedrückt. In der Grenzfläche zwischen Eis und Betonoberfläche soll das Eis durch Adhäsion mit dem Beton verbunden sein. Bei tieferen Temperaturen und ab Erreichen eines gewissen Sättigungsgrades sorgt dann der hydraulische Druck, der durch das Entweichen der Sole (Brine-Rejection) aus der Eisschicht hervorgerufen wird, für Abwitterungen in der Grenzschicht zwischen Beton und Eis.

In [LH15] wird angemerkt, dass sie bestehende Modellvorstellungen insbesondere das Modell von [Lin98] aufgreifen und es „Cryocenic Suction“nennen. Das kryogene Saugen führt demnach wie in der Theorie von [Lin98] zum einem Feuchtigkeitstransport vom Äußeren, in dem die Prüflösung mit Salz vorhanden ist, in die Betonrandzone. Dadurch wird das Eiswachstum in den Kapillarporen verstärkt, wohingegen in etwas tieferliegenden Bereichen ein Schwinden feststellbar ist. Aufgrund der damit verbundenen unterschiedlichen Spannungen kann es zu Abwitterungen im oberflächennahen Bereich kommen.

Die zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit aktuellsten Erkenntnisse in Hinblick auf die Schadensmechanismen von Beton unter zyklischem Frost-Tausalz-Angriff mit Taumitteln ($NaCl$-Lösung) kann [Mül21] [ML17][MLE19] entnommen werden. Durch die Kombination der Modelle von [Lin98] und [Set99] kann somit sowohl die Abwitterung in der Betonrandzone durch das krygogene Saugen als auch die weitere Schädigung im Inneren des Betons durch die Mikroeislinsenpumpe besser erklärt werden.

2.5.2 Einordnung der Theorien mit Blick auf den Chloridtransport

Die in Kapitel 2.5.1 beschriebenen Modelle dienen in erster Linie der Beschreibung der Schadensmechanismen von Beton, der zumeist unter zyklischer Frostbeanspruchung mit oder auch ohne Taumittel unter Laborbedingungen getestet wird. Alle Modelle haben gemein, dass alle Schäden immer in Verbindung mit Wasser oder Wasser mit Taumitteln wie $NaCl$ hervorgerufen werden. Insofern ist hier die Schnittstelle zwischen Schadensursache und dem damit verbundenen Chloridtransport in Beton unter Frosteinfluss zu finden.

Für das Verständnis des Chloridtransportes in Beton, der durch zyklische Befrostung im Rahmen von Laboruntersuchungen (z. B. Prüfung nach [DIN17] [Set]) hervorgerufen wird, sollte unter Einbezug der beschriebenen Modelle (Kapitel 2.5.1) in zwei Bereiche unterschieden werden. Der erste Bereich ist der exponierte Bereich in der oberflächennahen Betonrandzone. Er ist als Flüssigkeitsreservoir, in dem Chloride dissoziiert sein können, zu verstehen. Der zweite Bereich schließt sich weiter im Inneren des Betons an und wird mit Chloriden aus der exponierten Zone gespeist.

Bereich eins wird nach aktuellem Stand der Erkenntnisse durch das sog. kryogene Saugen geschädigt und somit auch mit Chloriden kontaminiert. Es entstehen hydraulische Drücke, die zwischen der Eisschicht und den Kapillarporen, in denen das Wasser bereits gefroren ist, vorherrschen. Da in der Eisschicht wegen partiell erhöhter Chloridgehalte noch ungefrorenes Wasser vorliegt, wird die oberflächennahe Schicht des Betons somit durch chloridhaltiges Wasser gespeist.

Der Transport in Bereich zwei erfolgt dann überwiegend durch die Mikroeislinsenpumpe. Aufgrund unterschiedlicher Porengrößen entstehen auch hier zur Aufrechterhaltung des thermodynamischen Gleichgewichts Drücke, die die Wassersättigung, in denen Chloride gelöst vorliegen, im Inneren erhöhen. Die beiden maßgeblich beteiligten Porengrößen sind die Gel- und die Kapillarporen. In Abhängigkeit der Temperatur erfolgt der Flüssigkeitstransport entweder in Richtung kleine Gel- oder in Richtung größere Kapillarpore. Der Mechanismus dieses Frostpumpeneffektes

ist in Kapitel 2.5.1 näher beschrieben.

Neben diesen beiden Transportmechanismen verlaufen parallel noch Diffusionsprozesse, die in Hinblick auf den Transport von Chlorid untergeordnet auch zur Erhöhung des Chloridgehaltes beitragen. Der Anteil von Diffusionsprozessen ist aufgrund der geringen Temperatur, die im Mittel ca. - 3,33 °C (vgl. auch Abb. 3-9) beträgt, gering. Sie sind dann wieder in den Fokus zu rücken, wenn die rein zyklische Frost-Tausalz-Beaufschlagung beendet ist und somit eine Chloridumverteilung ins Betoninnere stattfindet.

Versucht man, Chloridprofile, die im Labor unter zyklischem Frost-Tausalz-Angriff entstanden sind, mit Hilfe bekannter Modelle zu beschreiben, bietet es sich an, allgemein etablierte Ansätze zu verwenden. Der wohl am häufigsten verwendete Ansatz ist die Beschreibung von Chloridprofilen mit Hilfe des 2. Fick'schen Diffusionsgesetzes. Mathematische Grundlage ist dabei die tiefen- und zeitabhängige Bestimmung des Chloridgehaltes anhand einer linearen Differentialgleichung (DGL) zweiter Ordnung. Die Lösung der DGL erfolgt oftmals mit der sog. Errorfunktion. Mit ihr lässt sich sowohl die DGL analytisch lösen als auch der s-förmige Verlauf durch numerische Methoden wie die Minimierung der Abstandsquadrate darstellen. Hierbei wird das Chloridprofil, das aus den gemessenen tiefenabhängigen Chloridgehalten besteht, an die DGL durch zwei Fitvariablen angefittet. Da die Chloridprofile aus den Frost-Tausalz-Pürfungen (CDF-Prüfung) augenscheinlich denen von Diffusionsprofilen sehr ähnlich sind, wird dieser Ansatz verwendet. In [KIS22] wird ebenfalls gesagt, dass die meisten Ansätze zur Modellierung des Chloridtransportes in Beton das 2. Fick'sche Diffusionsgesetz verwenden. So wurde z. B. dieser Ansatz bei Probekörpern, die größtenteils unterhalb des Meereswasserspiegels gelagert wurden, gewählt.

In Kapitel 3 werden die in dieser Arbeit erhobenen Daten dahingehend ausgewertet. In Kapitel 4 werden u. a. die Chloridprofile, die während des Frost-Tausalz-Angriffs ermittelt wurden, mit diesem Ansatz beschrieben und anschließend vereinfacht modelliert.

3 Versuche

3.1 Vorgehen und untersuchte Betone

3.1.1 Übersicht der Prüfkonzepte

Die vorhandenen Modelle zur Beschreibung des Chloridtransportes in Beton basieren überwiegend auf der Annahme, dass Chloride überwiegend durch Diffusion in den Beton gelangen. Insbesondere wird dieser Ansatz zur Berechnung der Lebensdauer unter Chloridbelastung [Geh00] [Int06] [Kap11] [Int15] [BAW19] verwendet.

Zur Untersuchung des Frosteinflusses auf den Chloridtransport in Beton wurden daher parallel zum Frost-Tausalz-Angriff in der CDF-Prüfung auch Einlagerungsversuche 20 °C/65 RH durchgeführt (vgl. in Kapitel 3.3.1), die als vereinfachte Diffusionsversuche zu verstehen sind. Die Vorlagerung aller Probekörper erfolgte einheitlich, sodass sowohl die Probekörper unter Frost-Tausalz-Angriff als auch die Vergleichsprobekörper ohne Frostbeanspruchung kapillar gesättigt waren. Dadurch sollte der anschließende Vergleich zwischen Frost-Tausalz-Angriff und rein diffusionsgesteuertem Transport möglichst nur den Einfluss des Frost-Tausalz-Angriffs auf den Chloridtransport in Beton abbilden. Alle Probekörper lagerten gleichzeitig in 3,0 M.-%iger $NaCl$-Lösung bei 20 °C/65 RH. Die Seitenflächen wurden mit aluminiumkaschiertem Butylkautschukband abgedichtet, und die Probekörper tauchten mit ihrer beaufschlagten Oberfläche 5 mm in die $NaCl$-Lösung ein. Der genaue Versuchsaufbau ist in [BAW12] beschrieben.

Das Schema des Prüfkonzeptes kann Abbildung 3-12) entnommen werden. Die Diffusionsversuche sind in diesem Zusammenhang als vereinfachte Diffusionsversuche zu verstehen. Sowohl die Probekörper aus den Diffusions- als auch aus den Frostprüfungen wurden für eine Woche in 3,0 M.-%-iger $NaCl$-Lösung vorgesättigt, sodass ein ausreichender Sättigungsgrad im oberflächennahen Bereich erreicht ist. Somit sollen die anschließenden Transportprozesse in Hinblick auf den Chloridtransport, der durch Frost geprägt ist, differenziert betrachtet werden können. Somit sollen die Chloridprofile aus der CDF-Prüfung mit Hilfe des Modellansatzes der Diffusion beschrieben werden (vgl. Kapitel 4).

Der Frost-Tausalz-Angriff fand im Rahmen der CDF-Prüfung („Capillary suction of Deicing Solution and Freeze-thaw Test“) nach [DIN17] (vgl. auch [Set] [BAW12]) statt. Durch die zuvor genannte Vorsättigung soll annähernd sichergestellt werden, dass kapillare Transportprozesse zu Beginn der Frostprüfung abgeschlossen sind. Somit sollen die anschließenden Chloridanalysen aus der CDF-Prüfung weitgehend durch Frost-Tausalz-Wechsel (FTSW) hervorgerufene Transportprozesse geprägt sein. Der Temperaturverlauf eines FTSW's innerhalb von 12 Stunden reicht von - 20 °C bis + 20 °C und läuft für eine Dauer von 14 Tagen. In Abbildung 3-9 ist der Standard-Temperaturverlauf aus der CDF-Prüfung unter Angabe der mittleren Temperatur dargestellt. Aus der Abbildung wird ersichtlich, dass weitere Transportprozesse, die sich aus dem zyklischen Verlauf ergeben, nicht gänzlich auszuschließen sind. In Temperaturbereichen oberhalb des Gefrierpunktes, der bei einer 3,0 M.-%-igen $NaCl$-Lösung ca. -1,76 °C beträgt, finden mindestens im Bereich zwischen Prüflösung und Betonrandzone Diffusionsprozesse in Abhängigkeit von der Temperatur statt. Ferner muss erwähnt werden, dass in Abhängigkeit vom

Schädigungsgrad wieder Kapillarprozesse stattfinden können, sobald sich (Mikro-)Risse bilden. Überdies sorgt das eutektische Gefrierverhalten zu unterschiedlichen Chloridkonzentrationen in der gefrierenden Prüflösung. Dies führt zu unterschiedlichen Gefrierpunkten mit damit einhergehenden weiteren Transportprozessen wie dem kryogenen Saugen (vgl. Kapitel 2.5.2) in der Betonrandzone.

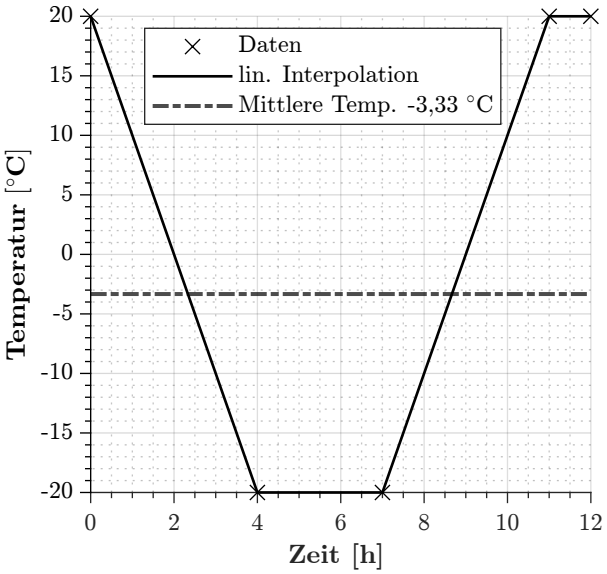


Abb. 3-9: Temperaturverlauf der CDF-Prüfung nach [DIN17] unter Angabe der mittleren Temperatur über die Laufzeit eines FTSW's (12h)

Um den Einfluss des Chlorideindringverhaltens, resultierend aus der zyklischen Frostbeaufschlagung, zu erhalten, wurden wie oben erwähnt, parallel Diffusionsversuche durchgeführt. Sie unterscheiden sich in Hinblick auf die Beaufschlagungsart darin, dass sie in der Zeit der CDF-Prüfung nach der einwöchigen Vorsättigung weiter in der Prüflösung (3,0 M.-% $NaCl$-Lösung) im Laborklima (20 °C/65 RH) lagerten. Dadurch kann angenommen werden, dass die sich anschließenden Transportprozesse von Chloriden hauptsächlich durch Diffusion stattfinden. Durch verschiedene Vergleiche der beiden unterschiedlichen Beaufschlagungsarten soll der Chloridtransport in Beton unter Frosteinfluss besser beschrieben werden können.

Die Betone im nachfolgenden Kapitel aus Tabelle 3-8 wurden für ca. ein halbes Jahr in PE-Beuteln gelagert, um Unterschiede der Chloridverteilung von Probekörpern aus den vereinfachten Diffusions- und den CDF-Versuchen zu identifizieren. In Kapitel 3.3.5) sind die Ergebnisse der zeitlichen Chloridumverteilung von befrosteten und unbefrosteten Probekörpern dargestellt.

Ergänzend zu den Untersuchungen zur Ermittlung des Frosteinflusses auf den Chloridtransport in Beton, den Widerstand von Betonen aus der CDF-Prüfung im Migrationsversuch (vgl. Kapitel 3.4.1, Abb. 3-34) zu testen, wurden Probekörper nach dem 14. FTSW (≡ 42. Herstelltag) und 28. FTSW (≡ 49. Herstelltag) in den Migrationszellen in Anlehnung an [DIN21] (vgl. auch [Lay06]) eingebaut. In Kapitel 3.4.2 ist der modifizierte Migrationsversuch beschrieben. Hierdurch sollen Erkenntnisse in Hinblick auf das Ioneneindringverhalten von Betonen gewonnen werden, die zuvor bereits mit $NaCl$ in der CDF-Prüfung beaufschlagt wurden.

Zuletzt können durch den Abgleich vom 14. zum 28. FTSW weitere Erkenntnisse in Hinblick auf den zeitlichen Einflusses der Frostzyklen auf den Chloridtransport in Beton gewonnen werden.

3.1.2 Untersuchte Betone

Für die Untersuchungen wurden insgesamt 20 unterschiedliche Betonrezepturen untersucht. Hierbei stammen zehn Betone aus eigener Herstellung (vgl. Tabelle 3-7) und zehn Betone aus einem Forschungsprojekt (vgl. Tabelle 3-8). Im Rahmen des Forschungsprojektes „Dauerhaftigkeit von Beton nach dem Performance-Prinzip: Klassifikation Materialwiderstände, Produktionskontrolle (PC), Konformitätskriterien und -kontrolle (CC)“(IGF, 21826 N) wurden weitere Probekörper aus CDF-Prüfungen und zeitgleich bei 20 °C/65 RH gelagerte Probekörper bereitgestellt.

Alle Betone wurden nach [BAW12] [SA97] [DIN17] vorgelagert (1d-Schalung/6d-Wasser/21d-Luft) (≡ 28. Herstelltag). Anschließend erfolgten die in Kapitel 3.1.1 vorgestellten Untersuchungen.

In Tabelle 3-7 sind sowohl Betone dargestellt, die mit Zementarten nach [DIN11], als auch Betone mit Bindemitteln, denen Klinkererstatzstoffe beigemengt wurde (nach [DIN11] Betonzusatzstoffe des Typ II wie Silikataub (engl.: SF = silica fume) und Steinkohleflugasche (SFA) unter Anrechnung der Wirksamkeit mit dem k-Faktor nach [DIN10], dargestellt. Um auch normative Regelungen bei der Betonherstellung einzuhalten, wurde bei der Expositionsklasse XF4 eine weitere Mischung hergestellt, die die Anrechnung von Silikastaub mit k=0 vorsieht (Fussnote g in Tabelle F.2.2 in [DIN10] für XF4). Der Einheitlichkeit wegen wird beides in den weiteren Betrachtungen als Bindemittel bezeichnet. Die verwendete Einheit bei der Darstellung der Profile, die aus den Untersuchungen bestimmt wurden, ist [M.-%/b*] . Das b bedeutet Bindemittel und der Stern, dass ein gewisser Restfeuchtegehalt an der zu analysierenden Oberfläche vorhanden war (vgl. auch Kapitel 3.2.1).

Tab. 3-7: Betonrezepturen für CDF- und Einlagerungsprüfungen mit anschließendem RBM-Test, A/B16, Splitt, w/b = 0,50, F3, Betone mit künstlich eingeführten Luftporen unter Verwendung von LP-Bildnern in **fett**

Kurz-bezeichnung [-]	**Binde-mittelart** [-]	**Gehalt** [**kg/m³**]	**Typ II** [**kg/m³**]	**LP** [**M.-%/b**]	**FM** [**M.-%/b**]	**LP-Gehalt** [**Vol.-%**]
C1 LP1,0	CEM I	350		-	1,00	1,0
C1+SF LP1,0	CEM I+SF	332	(k=1,0) 18	-	1,30	1,0
C2AS LP0,8	CEM II/A-S	350	-	-	1,75	0,8
C1 LP10,0	CEM I	350	-	0,50	0,80	10,0
C1 LP7,2	CEM I	350	-	0,36	0,75	7,2
C1+SF LP7,0	CEM I+SF	350	(k=0) 39	0,50	1,80	7,0
C1+SF LP7,0	CEM I+SF	332	(k=1,0) 18	0,50	1,30	7,0
C2AS LP9,0	CEM II/A-S	350	-	0,50	1,00	9,0
C1+SFA LP7,0	CEM I+SFA	309	(k=0,4) 102	0,80	0,70	7,0
C3B LP5,5	CEM III/B	350	-	1,50	0,80	5,5

Die in Tabelle 3-8 dargestellten Betone bestehen aus fünf unterschiedlichen Bindemitteln. Ferner wurde je Bindemittel eine Charge mit ca. 3 Vol.-% und eine Charge mit ca. 5 Vol.-% LP hergestellt. Mit diesen Betonen wurde nur der Abgleich der Ergebnisse aus den CDF- und den Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH nach dem 28. FTSW durchgeführt. Die Kombination der CDF-Prüfung mit dem Migrationsversuch fand nicht statt. Mit ihnen wurden die Erkenntnisse aus den Versuchen, die mit den Betonen aus Tabelle 3-7 gewonnen wurden, gefestigt. Damit konnte der Stichprobenumfang der untersuchten Betonsorten verdoppelt werden und betrug dann 20 unterschiedliche Betonsorten. Aufbauend auf der Stichprobengröße, sind die in den folgenden Kapiteln dargestellten Untersuchungsergebnisse und der Modellansatz zur Beschreibung der Chloridprofile aus der CDF-Prüfung besser abgesichert und z.T. auch doppelt bestimmt worden, sodass Unsicherheiten aus Streuungen genauer bestimmt werden konnten.

Tab. 3-8: Betonrezepturen für CDF- und Einlagerungsprüfungen mit, A/B16, Kies, w/b = 0,50, F3 (Projekt)

Kurz-bezeichnung [-]	**Binde-mittelart** [-]	**Gehalt** [$\mathbf{kg/m^3}$]	**LP-Gehalt** [**Vol.-%**]
C1 LP3	CEM I	320	3,6
C2ALL LP3	CEM II/A-LL	320	3,4
C3A LP3	CEM III/A	320	3,2
C3B LP3	CEM III/B	320	3,2
C2CM LP3	CEM II/C-M	320	3,5
C1 LP5	CEM I	320	5,6
C2ALL LP5	CEM II/A-LL	320	5,6
C3A LP5	CEM III/A	320	4,8
C3B LP5	CEM III/B	320	4,6
C2CM LP5	CEM II/C-M	320	5,4

3.1.3 Druckfestigkeiten

Auch wenn die Parameter wie w/b-Wert, Porensystem und Ausgangsstoffe von Beton sowohl die Festigkeiten als auch die Dauerhaftigkeit wie z. B. den Migrationskoeffizienten oder den Frost-Tausalz-Widerstand beeinflussen, so ist der Grad des Einflusses unterschiedlich. Daher ist ein Rückschluss anhand der Betondruckfestigkeiten auf die Dauerhaftigkeit, die u.a. mittels Migrationskoeffizienten (Cl^-, Br^--Eindringwiderstände) beschrieben wird, nicht ohne Weiteres möglich.

Der Frost-Tausalz-Angriff wird von Faktoren wie der Größe der Poren, der Porenverteilung, der Menge wie auch dem Abstand von künstlich eingeführten Luftporen (vgl. auch Kapitel 2.3.2) beinflusst. Ein weiterer wichtiger Faktor hinsichtlich Frost-Tausalz-Widerstand ist der Hydratationsgrad in der Betonrandzone. Letzterer wird bei der Ermittlung der Druckfestigkeit nicht berücksichtigt, da die Betonrandzone im Vergleich zur Druckfläche mit Bezug auf die ermittelten Druckfestigkeiten vernachlässigbar ist, aber einen deutlichen Einfluss auf die Frostwiderstandsfähigkeit (z. B. Abwitterungen, Chlorideindringen) haben kann. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass bei gleichbleibender Betonzusammensetzung, aber steigendem Luftporengehalt die Druckfestigkeiten sinken.

Da Beton immer noch maßgeblich anhand der Druckfestigkeiten charakterisiert wird und somit in Druckfestigkeitsklassen eingeordnet werden kann, sind nachfolgend die Druckfestigkeiten dargestellt. Die Probekörper in Abbildung 3-10 wurden einen Tag nach Betonherstellung in der Schalung und für weitere 27 Tage bis zum Tag der Druckfestigkeitsprüfung unter Wasser gelagert. Eine Klassifikation anhand von Konformitätskriterien nach z. B. [DIN10] erfolgt an dieser Stelle nicht.

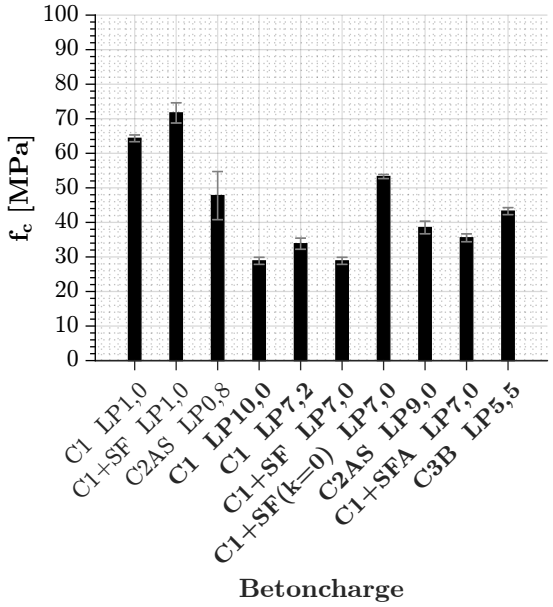


Abb. 3-10: Druckfestigkeiten der Betone aus Tabelle 3-7 und Angabe der Standardabweichung. n = 3, CoV_{Mittel} = 4,3 %

3.2 Bestimmung des Chlorid- und Bromidgehaltes

3.2.1 Analysemethoden

Beton kann aufgrund unterschiedlicher Expositionen in Kontakt mit Chloriden kommen. Dadurch gelangen Chloride durch unterschiedliche Transportmechanismen in den Beton. Erreichen Chloride den Stahl, der aufgrund hauptsächlich konstruktiver Erfordernisse in den Beton eingebaut wird, kann es unter bestimmten Voraussetzungen zur Bewehrungskorrosion kommen. Daher ist die Kenntnis über die Chloridverteilung von Interesse. In der Regel wird die Chloridverteilung durch tiefenabhängige Chloridprofile dargestellt. Hierbei wird das Profil durch die Chloridgehalte in der jeweilig untersuchten Tiefenlage ermittelt. Eine in der Baupraxis etablierte Methode zur Ermittlung der Chloridgehalte in Beton ist das nass-chemische Analyseverfahren nach [Deu89]. Die Chloridgehaltsbestimmung kann durch Entnahme von Bohrmehl mittels Bohrer in mehreren Tiefenlagen erfolgen, sodass ein Chloridprofil ermittelt werden kann. Alternativ kann z. B. auch ein Bohrkern entnommen werden. Auch beim Bohrkern erfolgt die Bestimmung des Chloridgehaltes mittels Bohrmehl. Dieses wird durch Abschleifen in einem vorher festgelegten Raster erhalten und dann nass-chemisch analysiert.

In beiden beiden Fällen, Bohrmehlentnahme mittels Bohrer oder Abschleifen des Bohrkerns, erfolgt eine Homogenisierung des Probenmaterials. Das Bohrmehl mit darin enthaltenen Chloriden wird nach Entnahme auf dessen Chloridgehalt z. B. durch potentiometrische Titration bestimmt. Hierbei werden die Chloride zu ca. 95 % aus dem Bindemittel gelöst und anschließend auf deren Chloridgehalt durch Titration im Heißaufschluss analysiert. D.h. das darin enthaltene verdampfbare Wasser wird bei der Bestimmung aufgrund des Erhitzens verdampft. Das Verfahren und Alternativen, die auch zur nass-chemischen Analyse gezählt werden, können [Deu89] entnommen werden. Der somit erhaltene Chloridgehalt wird bezogen auf die Einwaage angegeben

und kann unter Kenntnis der Betonzusammensetzung auf den Bindemittelgehalt umgerechnet werden. Somit ergibt sich der Chloridgehalt nach der Titration bezogen auf den Betongehalt und nach Umrechnung auf den Bindemittelgehalt zu [M.-%/b]. Das b steht in dieser Arbeit für Bindemittel, nicht für Beton. Der Begriff Bindemittel umfasst neben reinem Portlandzement auch selbst zugemischte Mengen an Betonzusatzoffen, die bei der Umrechnung ebenfalls berücksichtigt werden müssen. Der Umrechnungsfaktor von beton- auf den bindemittelbezogenen Chloridgehalt liegt ca. in Größenordnungen von 5,0 bis 8,5 und ist abhängig vom Bindemittelgehalt. Beträgt der Bindemittelgehalt beispielsweise 350 kg/m^3 und die Rohdichte des Betons im Betonentwurf 2300 kg^3, so ist der Umrechnungsfaktor: 7,2 [-]. Durch die Zerkleinerung der Probe, in der alle Betonausgangsstoffe vorhanden sind, ist es nicht mehr möglich, die Chloridverteilung über den Querschnitt, sondern nur noch über die Tiefe zu betrachten. Dies kann gerade bei der Analyse des Chloridgehaltes von besonderem Interesse sein, da es aufgrund von verschiedenen Einflüssen, die das Betongefüge stören, zu lokalen Chloriderhöhungen kommen kann, die den Querschnitt des Betonstahls reduzieren. In Abbdilung 3-11 ist ein Beispiel dargestellt, bei dem es bei der Entnahme mittels Bohrer im Rissbereich zur Unterschätzung von lokalen Chloridgehalten im Flankenbereich des Risses kommen kann.

Beton, der Frost-Tausalz-Angriff ausgesetzt ist, kann sowohl Risse als auch eine stark abgewitterte Oberfläche aufweisen, sodass die Chloridgehaltsbestimmung durch Bohrmehl oder Abschleifen negativ beeinträchtigt werden.

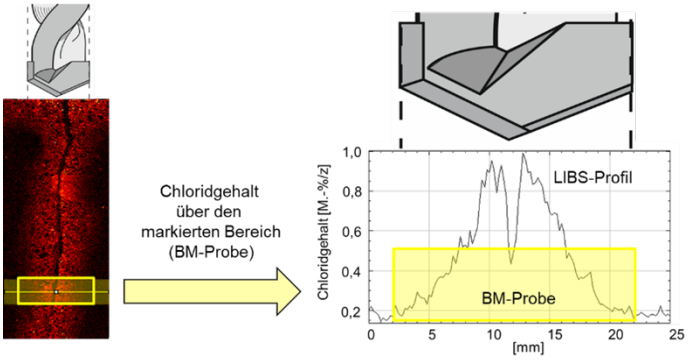


Abb. 3-11: Mit LIBS gemessene Chloridverteilung senkrecht zur Rissflanke als Falschfarbenbild und als Chloridprofil in Höhe des gelb markierten Bereichs mit gemitteltem Chloridgehalt über den Bohrdurchmesser von 20 mm aus [KLI20]

Ein alternatives Verfahren zur Bestimmung des Chloridgehaltes stellt die Laser-induzierte Breakdown Spektroskopie (≡ LIBS) dar. Vereinzelt ist in deutschsprachiger Literatur auch der Begriff Laser-induzierte Plasmaspektroskopie (LIPS) anzutreffen. Beides meint die gleiche Analysemethodik. Ein energiereicher Laser verdampft (≡ Laser-induziert) ein geringes Volumen der zu analysierenden Baustoffoberfläche. Durch die Atomisierung und z.T. Ionisierung des Materials an der Probenoberfläche entsteht ein Plasma, das beim Relaxieren (≡ Breakdown) Photonen abstrahlt. Diese werden mittels Glasfaser zum Spektrometer weitergeleitet und in elementspezifische Spektren zerlegt [Mil]. Hierbei ergeben sich je chemischem Element wellenlängenbezogene Intensitäten. In z. B. [Got19] können physikalische Details eingesehen werden.

Vorteilhaft bei der Anwendung von LIBS zur quantitativen Chloridgehaltsanalyse ist, dass diese Analysemethode die Chloridverteilung der untersuchenden Probenoberfläche nicht beeinflusst. Es findet im Gegensatz zur nass-chemischen Analyse keine Homogenisierung der Querschnittsfläche statt. Ist das Betongefüge aufgrund der Exposition von Frost beeinflusst und zum Teil abgewittert, kann mit LIBS die zu analysierende Probenoberfläche nahezu zerstörungsfrei auf deren tiefenabhängigen Chloridgehalt untersucht werden. Der Verlust an Informationen ist im Vergleich zur nass-chemischen Methode deutlich geringer. Im Merkblatt B14 der Deutschen Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung [DGZ23] sind weitere Informationen über die Anwendung von LIBS auch im Vergleich zur herkömmlichen nass-chemischen Chloridgehaltsbestimmung zu entnehmen. Durch die Verwendung von LIBS können außerdem simultan mehrere chemische Elemente an der Betonoberfläche in 2D (x-/y-Raster) erfasst werden. Aufbauend auf den 2D-Darstellungen, können Eindringprofile erstellt werden. Des Weiteren können Auffälligkeiten, die aufgrund von Inhomogenitäten im Betongefüge auftreten, genauer betrachtet werden. Dies kann bei der Auswertung berücksichtigt werden. Es kann beispielsweise durch die Probenpräparation vorkommen, dass durch das Sägen des Betonprobekörpers Bromid- oder Chloridionen verwischt werden. Außerdem können Verbundzoneneinflüsse zwischen Bindemittelmatrix und Gesteinskorn je nach Gegebenheit detaillierter betrachtet werden. Derartige herstellungsbedingte Unstimmigkeiten können dann bei der Erstellung von Eindringprofilen durch Aufbereiten des Datensatzes mit einbezogen werden.

Überwiegend wird in dieser Arbeit der Fokus auf die chemischen Elemente Chlor und Brom gelegt. Chlor liegt bei dem hier verwendeten System bei ca. 837 [nm] und Brom bei 826 [nm]. Aus den Datenbanken der NIST (National Institute of Standards and Technology) können dem LIBS-System (u.a. abhängig von der Energie des verwendeten Lasers) entsprechende Wellenlängenbereiche entnommen werden, bei denen die Maxima bei der Detektion von Elementen voraussichtlich auftreten. Da durch verschiedene Transportmechanismen z. B. die Elemente Chlor und Brom nicht als Atome, sondern i.d.R. dissoziiert in Wasser in den Beton gelangen, beziehen sich die nachfolgenden Betrachtungen auf die Ionen Bromid und Chlorid, die gleichbedeutend zu den Atomen Chlor und Brom mit LIBS im Beton erfasst werden.

Vergleicht man die Chloridgehalte von LIBS mit nass-chemischen Ergebnissen, so sollte angemerkt werden, dass sich der maßgebende Unterschied aus dem Restfeuchtegehalt im Beton ergibt. Durch die Restfeuchtigkeit im Beton werden im ablatierten Volumen die detektierten Intensitäten der chemischen Elemente "verdünnt". Ganz allgemein kann gesagt werden, dass sich die Intensitäten durch die Restfeuchtigkeit verringern, da in dem verdampften Volumen chemisch und physikalisch Wasser, das beim Auftreffen des Lasers ebenfalls in Elemente zerlegt wird, vorhanden ist. Bei der nass-chemischen Analyse wie der potentiometrischen Titration wird, wie bereits zuvor erwähnt, die homogenisierte Probenmenge i.d.R. bis zur Massekonstanz getrocknet und anschließend der Chloridgehalt bestimmt. Um die ggf. vorhandenen Restfeuchtigkeiten in den nachfolgenden Ergebnissen kenntlich zu machen, ist dies mit einem Stern (*) verdeutlicht und in der Einheit [M.-%/b*] (b $\equiv$ Bindemittelgehalt) mit angegeben. Vergleichmessungen zur Validierung der Ergebnisse mit der herkömmlichen Methode wurden durchgeführt, sind aber nicht Inhalt dieser Arbeit, da die wesentlichen Erkenntnisse u.a. bereits in [DGZ23]

veröffentlicht wurden. Um den Chloridgehalt auf den Bindemittelgehalt zu erhalten, wird die Gesteinskörnung durch Algorithmen unter Verwendung der Elementverhältnisse wie Ca/O, K/O, H/O, C/O ausgeschlossen. Durch diesen vierdimensionalen Vergleich lässt sich das Bindemittel hinreichend genau von der Gesteinskörnung differenzieren. Die Quantitäten der vier Verhältnisse unterscheiden sich, sodass jeder Messpunkt entweder dem Bindemittel oder der Gesteinskörnung zugeordnet werden kann. Somit lässt sich der zu untersuchende Elementgehalt wie z. B. Chlorid oder Bromid auf den Bindemittelgehalt darstellen. In z. B. [PKI21] können Details zur Differenzierung zwischen Zementstein und Gesteinskörnung eingesehen werden.

3.2.2 Quantifizierung des Chlorid- und Bromidgehaltes

Zur quantitativen Bestimmung des Ionengehaltes von Chlorid und Bromid im Beton mittels LIBS wurde analog zur Kalibrierung von Chlorid in Beton [MKW19] [MGG$^+$18] eine Kalibrierung mit dem Salz Natriumbromid ($NaBr$) durchgeführt. Hierfür wurden zehn Zementleime aus Portlandzement (CEM I) mit einem w/b-Wert von 0,5 hergestellt. Der zuvor berechnete theoretische Bromidgehalt wurde im Anmachwasser gelöst und dann für die Herstellung der Zementleime verwendet. Die sich erhöhenden Bromidgehalte von 0,00 bis 3,00 M.-% wurden im unteren Bereich bis 1,00 M.-% etwas feiner in Schrittweiten von 0,25 M.-% und im oberen Bereich ab 1,00 M.-% in gröberen Schrittweiten von 0,50 M.-%. Nach Erhärtung wurden die Zementsteinproben mit einer Kugelschwingmühle gemahlen, bis zur Massekonstanz getrocknet und in Aluminiumformen gepresst. Die so entstandenen Proben dienten zur Kalibrierung des System, um auch den Bromidgehalt in Betonproben mit unbekanntem Gehalt zu bestimmen. Im **??** in der Tabelle A-2 kann das Vorgehen zur Herstellung der Kalibrierproben und Berechnung der Bromidgehalte mit dem Salz $NaBr$ eingesehen werden.

Die Erfassungsgrenze $x_{EG} = 0,2$ [M.-%/b*] mit $\alpha = \beta = 5$ % und $k = 1/\alpha = 20$ wurde nach [DIN08] für das hier verwendete LIBS-System bestimmt. Ferner wurde die Erfassungsgrenze im Rahmen des Forschungsprojektes „Norm-LIBS - Normative Regelung der Anwendung von LIBS für die Chlorid-Analyse im Bauwesen“an Kalibrierpresslingen mit dem Salz $NaCl$ ermittelt. Diese wurde empirisch an Betonproben mit unbekanntem Chloridgehalt bestätigt. Es wurde nachgewiesen, dass ab einem Cl^-- oder Br^--Gehalt von 0,2 [M.-%/b*] quantifiziert werden kann.

In einem internationalen Ringversuch [VWG$^+$23] wurde die Genauigkeit der Chloridquantifizierung anhand von Kalibrierproben bestätigt. Sie ist mindestens so genau wie bei nasschemischen Analysemethoden.

Damit eine quantitative Vergleichbarkeit der eingetragenen Chlorid- und Bromidgehalte bei den Ionenprofilen vorgenommen werden kann, wurden die relativen Atommassen (^{12}C) von Chlor und Brom verwendet (vgl. auch [LK23]). Da Brom mit einer Atommasse von $A_{r(Br)} = 79,90$ schwerer ist als Chlor mit $A_{r(Cl)} = 34,34$ [BFJ$^+$16] [Sch16] und die Normalisierung in Bezug auf Chlor erfolgen soll, wurden die mit LIBS ermittelten und kalibrierten Bromidgehalte durch die Division der Bromidgehalte in [M.-%/b*] mit dem Faktor $f_{Br} = 2,25$ aus Glg. 3-I abgemindert.

$$f_{Br} = A_{r(Br)}/A_{r(Cl)} = 79,90/34,34 = 2,25\ [-] \qquad \text{(Glg. 3-I)}$$

Die in Kapitel 3.3.1 in Abbildung 3-12 dargestellten Versuche fanden zu unterschiedlichen Zeitpunkten statt. Die Chloridbindekapazität ist von mehreren Faktoren abhängig. Unter anderem von der Bindemittelart, Einflüssen aus Carbonatisierung und der Zeit (vgl. auch [Ric69], [Tuu82], [Byf86], [Tri89a], [Tri89b], [TN93], [CAA99], [Wee21]). Da die Ionenquantifizierung (Cl^-, Br^-) in Abhängigkeit des Prüfablaufes zu verschiedenen Zeitpunkten durchgeführt wurde, beinhalten die ermittelten Profile die durch die Chloridbindung beeinflussten Ionenverläufe.

3.3 Diffusions- und Frost-Tausalz-Versuche

3.3.1 Prüfkonzept für Diffusions-/Frost-Tausalz-Probekörper

In der nachfolgenden Abbildung 3-12 ist das Prüfkonzept und der Prüfablauf schematisch dargestellt.

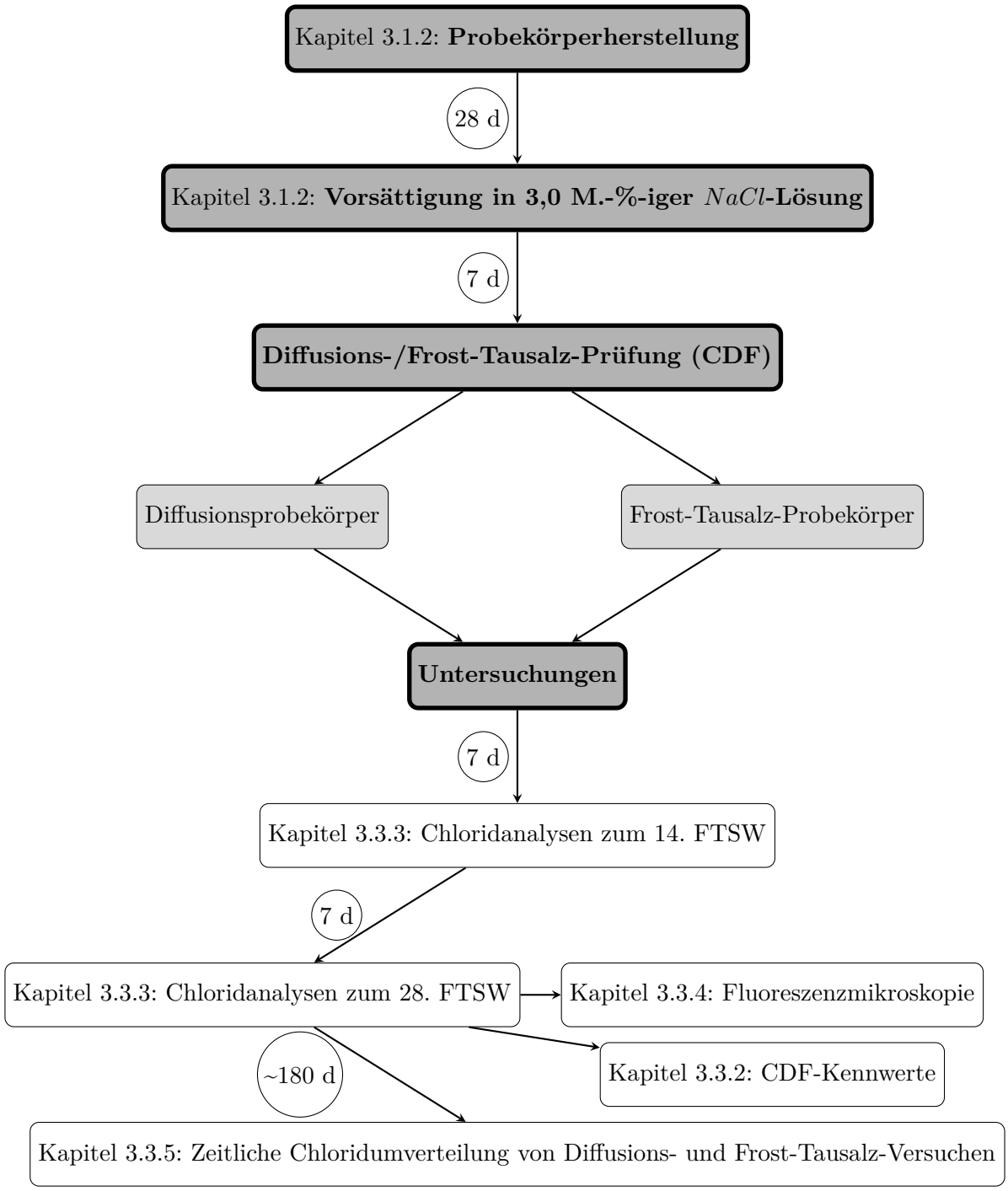
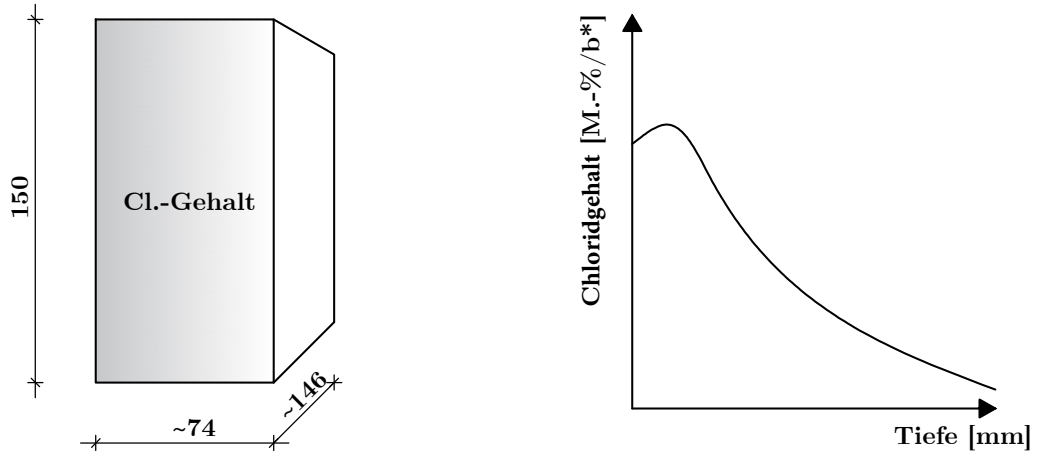


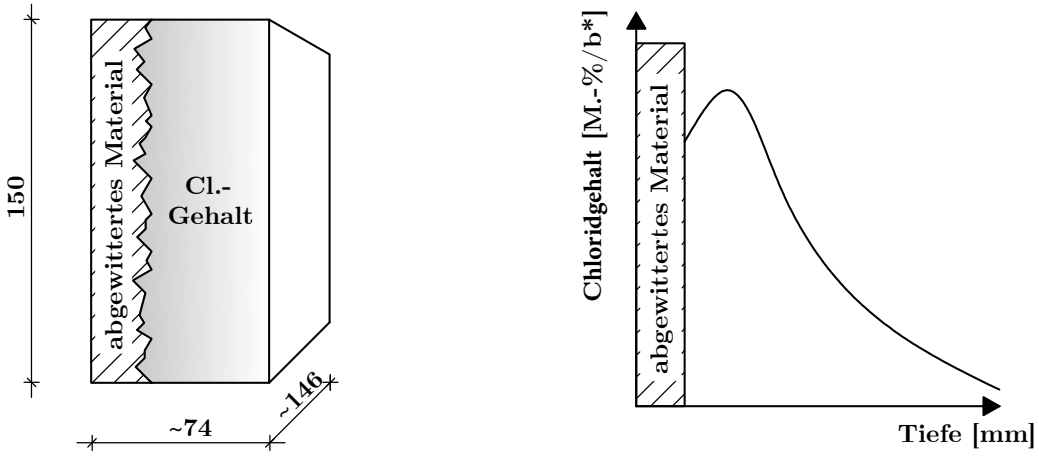
Abb. 3-12: Prüfkonzept zur Quantifizierung von Chlorid in Beton unter Frost-Tausalz-Angriff (CDF-Prüfung) durch Abgleich mit Diffusionsprobekörpern

In den Abbildungen 3-13 und 3-14 ist das Schema der Ermittlung von Chloridprofilen aus befrosteten und unbefrosteten Probekörpern skizzenhaft darstellt. Die Bestimmung der abgewitterten Höhe wird im Kapitel 3.3.2 erläutert. Somit werden die befrosteten und unbefrosteten Chloridprofile vergleichbar gemacht.



(a) Probekörper gelagert bei 20 °C/65 RH **(b)** Chloridprofil aus (a)

Abb. 3-13: Schematische Darstellung eines Probekörpers ohne Frost-Tausalz-Angriff.



(a) Probekörper nach Frost-Tausalz-Angriff (CDF-Prüfung) **(b)** Chloridprofil aus (a)

Abb. 3-14: Schematische Darstellung eines Probekörpers nach Frost-Tausalz-Angriff.

3.3.2 Abwitterung, Flüssigkeitsaufnahme und dynamischer E-Modul

Eine der maßgebenden Kenngrößen beim CDF-Test ist das abgewitterte Material m_n [g/m^2]. Dieser Kennwert wird nach dem Merkblatt Frostprüfung von Beton der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) [BAW12] in Deutschland oftmals als maßgebliches Abnahmekriterium für Betone in der Eignungs-, Güte- oder Bauwerksprüfung herangezogen, um den Frost-Tausalz-Widerstand zu bewerten. Neben der Abwitterung kann auch die innere Schädigung als Abnahmekriterium herangezogen werden. Hierbei wird die Ultraschalllaufzeit der Probekörper zu verschiedenen

Zeitpunkten des zyklischen Frost-Tausalz-Angriffes gemessen und daraus der sog. relative dynamische E-Modul berechnet. Der dynamische E-Modul kann als weiteres Abnahmekriterium dienen, um die Frostbeständigkeit von Betonen nachzuweisen. Die Grenzwerte der Abnahmekriterien für die Abwitterung und die innere Gefügeschädigung können dem BAW-Merkblatt [BAW19] entnommen werden.

Anhand des beschriebenen CDF-Tests ist es nicht möglich, die Chloridverteilung in Beton unter Frosteinfluss zu untersuchen. Daher wurden in dieser Arbeit zusätzlich zu den im CDF-Test ermittelten Kennwerten (Abwitterung, dynamischer E-Modul, Flüssigkeitsaufnahme) Chloridprofile erstellt. Die genannten Kennwerte und die Chloridprofile werden durch den Frost-Tausalz-Angriff beeinflusst. Durch das kryogene Saugen und die Volumenzunahme bei der Eisbildung während der Frost-Tausalz-Zyklen bilden sich Gefügeschädigungen im Beton. Dadurch entstehen in Abhängigkeit zur Porenverteilung und -art Abwitterungen in der Betonrandzone. Zusätzlich zu den abgewitterten Bereichen können Mikrorisse im Betongefüge auftreten. In diesem Bereich dominiert der konvektive Transportprozess des kapillaren Saugens. Er führt dazu, dass sich der Chloridgehalt rasch erhöht. Die anschließende Umverteilung der Chloride durch Diffusion führt zusätzlich dazu, dass Chloride schneller ins Betoninnere gelangen (vgl. Kapitel 3.3.5 Abbildungen 3-31 bis 3-33).

Da in den Bereichen, in denen Abwitterungen vorhanden sind, der Chloridtransport unter zyklischem Frosteinfluss im Vergleich zu Betonen ohne Befrostung begünstigt wird, ist die Kenntnis des abgewitterten Bereiches von Interesse. Durch das abgewitterte Material und die Rohdichte lässt sich dieser Bereich $h_{Frost,n}$ nach Glg. 3-IV näherungsweise berechnen.

Da die Rohdichten des abgewitterten Materials nicht genau den Rohdichten $\rho_{Randzone}$ der Probekörper aus dem CDF-Test nach der Vorlagerung (1d-Schalung/6d-H_2O/21d bei 20°C/65 RH) entsprechen, wird die Rohdichte in der Betonrandzone nach Glg. 3-V mittels betontechnologischer Kennwerte berechnet. Unter der Annahme eines normkonform hergestellten LP-Betons mit einem w/z-Wert von 0,5 ohne Bluten darf davon ausgegangen werden, dass die Betonrandzone durch die Vorlagerung eine geringere Porosität [Ehr17] aufweist. Im oberflächennahen Bereich ist aufgrund des Verdichtens an der Kontaktfläche zwischen nichtsaugender Schalung und Frischbeton vermehrt Zementleim und feinere Gesteinskörnung (je nach Stärke der Abwitterung bis ca. 2 mm) vorhanden. Dadurch und aufgrund der Luftporen, die z. B. durch LP-Bildner in Abhängigkeit der Betoncharge beigemischt wurden, ist die Rohdichte in den ersten Millimetern kleiner als die Rohdichte des Kernbetons. Im erhärteten Zustand ist das Anmachwasser sowohl chemisch wie physikalisch gebunden. Die chemische Wasserbindung findet durch ein Einlagern des H_2O's in die C-S-H-Phasen während der Hydratation, während das physikalisch gebundene H_2O durch Adsorptionskräfte (hier: Anlagerung von H_2O an Oberflächen im Zementstein) im Festbeton vorliegt. Zusammenfassend beträgt der Anteil des somit gebundenen H_2O's (chemisch und physikalisch) (vgl. [PB48], Fig. 2-22 ff.) bei einem w/b-Wert von 0,5 ca. 0,38 bis 0,4. Bei weiterer Zugabe von Wasser, die den genannten w/b-Wert vergrößert, führt das zusätzliche Wasser zu einer erhöhten Kapillarporosität. Sind die so entstandenen Kapillarporen zusätzlich durch Kapillargänge vernetzt, werden zügig stattfindende Transportprozesse wie die Konvektion, welche z. B. bei der Flüssigkeitsaufnahme durch kapillares Saugen oder der Mikroeislinsenpum-

pe, begünstigt. Dadurch kann die Flüssigkeitsaufnahme erheblich verschnellert und somit der Chloridgehalt im Beton erhöht werden.

Durch den erhöhten Luftporenanteil (> 1,5 Vol.-% = 15 dm^3) von LP-Betonen wird auch die Rohdichte in der Betonrandzone beeinflusst. Im oberflächennahen Bereich wird also auf der einen Seite die Rohdichte $\rho_{Randzone}$ aufgrund des erhöhten Zementanteils erhöht, auf der anderen Seite aber aufgrund fehlender grober Gesteinskörnung (> 2 mm) und des erhöhten Luftporengehaltes reduziert. Daher erfolgt nach Glg. 3-V im oberflächennahen Bereich eine genauere Berechnung der Rohdichten unter Berücksichtigung des leicht erhöhten Zementgehaltes, der feinen Gesteinskörnung und der künstlich eingeführten Luftporen. Die mit der Rohdichte $\rho_{Randzone}$ ermittelte Höhe $h_{Frost,n}$ muss bei der Gegenüberstellung von Chloridprofilen von befrosteten und unbefrosteten Probekörpern berücksichtigt werden, da die Chloridanalyse nur am Probekörperquerschnitt erfolgen kann, der nach dem CDF-Test noch vorhanden ist und für die LIBS-Analyse oder potentiometrische Titration verwendet werden kann. Der Beginn der Chloridprofile der befrosteten Betone wird um die rechnerisch ermittelte abgewitterte Höhe $h_{Frost,n}$ auf der Abszisse (Eindringtiefe [mm]) nach rechts verschoben. Somit wird die Vergleichbarkeit zwischen den Chloridprofilen von befrosteten und unbefrosteten Betonen hergestellt (vgl. auch weisse Balkenabschnitte in Abb. 3-20).

In den nachfolgenden Abbildung ist die abgewitterte Höhe dargestellt.

$$V_{Randzone,n} = a_0 \cdot b_0 \cdot h_{Frost,n} \rightarrow h_{Frost,n} = \frac{V_{Randzone,n}}{a_0 \cdot b_0}\ [\mathrm{m}] \qquad \text{(Glg. 3-II)}$$

$$V_{Randzone,n} = \frac{M_{Frost,n}}{\rho_{Randzone}}\left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right] \qquad \text{(Glg. 3-III)}$$

Einsetzen von Glg. 3-III mit $\rho_{Randzone}$ aus Glg. 3-V in Glg. 3-II ergibt die gesuchte mittlere abgewitterte Höhe nach dem n-ten FTSW in Glg. 3-IV.

$$h_{Frost,n} = \frac{\frac{M_{Frost,n}}{\rho_{Randzone}}}{a_0 \cdot b_0}\ [\mathrm{m}] \qquad \text{(Glg. 3-IV)}$$

mit:

$V_{Randzone,n}$	=	Volumen des Probekörpers nach dem n-ten FTSW [m^3]
a_0	=	Mittelwert aus 5 PK, lange Seite des CDF-PK [m]
b_0	=	Mittelwert aus 5 PK, kurze Seite des CDF-PK [m]
$h_{Frost,n}$	=	berechnete, abgewitterte Höhe nach dem n-ten FTSW [m]
$M_{Frost,n}$	=	Masse durch Multiplikation der abgewitterten Masse $m_n\left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^2}\right]$ mit der Prüffläche ($a_0 \cdot b_0$) [m^2] beim n-ten FTSW [kg]
$\rho_{Randzone}$	=	berechnete Rohdichte nach Glg. 3-V $\left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right]$

$$\rho_{Randzone} = \frac{m_{Randzone}}{V_{Randzone,n}}\left[\frac{\mathrm{kg}}{\mathrm{m}^3}\right] \qquad \text{(Glg. 3-V)}$$

mit:

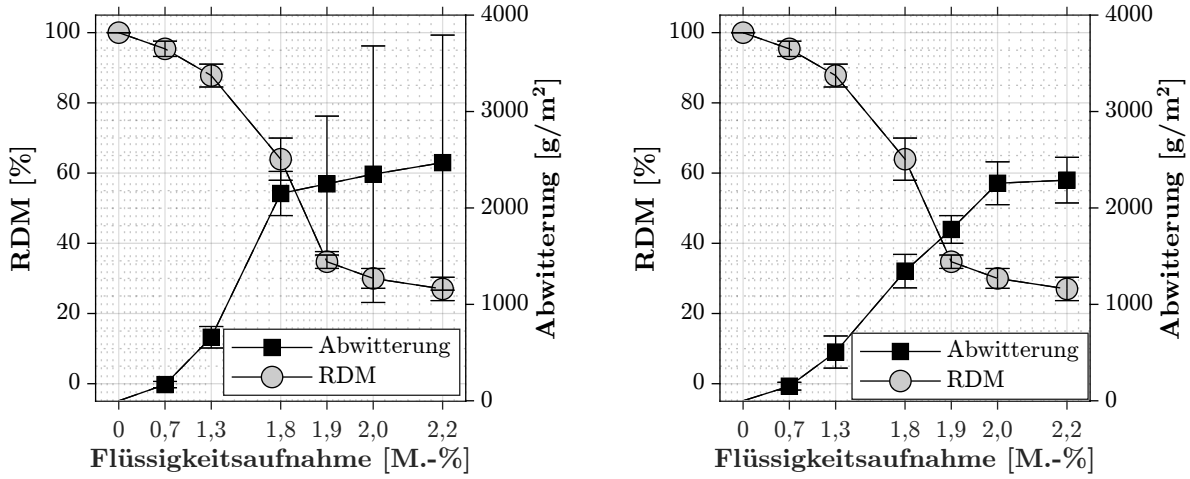
$\rho_{Randzone}$ = Rohdichte in der Betonrandzone unter Berücksichtigung des Volumens vom Bindemittel, $H_2O_{\text{chem.+phy.}}$, GK_{Fein} (0/2 [mm]), LP-Gehalt $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

$m_{Randzone}$ = Massen in der Betonrandzone vom Bindemittel, $H_2O_{\text{chem.+phy.}}$, GK_{Fein} (0/2 [mm]) $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

$V_{Randzone}$ = Volumina in der Betonrandzone vom Bindemittel, H_2O, GK_{Fein} (0/2 [mm]), LP-Gehalt $\left[\frac{\text{dm}^3}{\text{m}^3}\right]$

In den nachfolgenden Abbildungen (Abb. 3-15 bis 3-19) ist der relative dynamische E-Modul (RDM) auf der linken y-Achse den abgewitterten Mengen (Abwitterung) auf der rechten y-Achse gegenübergestellt. Diese beiden Kennwerte sind in Abhängigkeit zu der aufgenommenen Flüssigkeit während des CDF-Tests entlang der x-Achse aufgetragen. Die Intervalle der x-Achse entsprechen den Messzeitpunkten um n-ten Frost-Tausalz-Wechsel (FTSW). Sie betragen n = 0, 8, 14, 18, 22, 28.

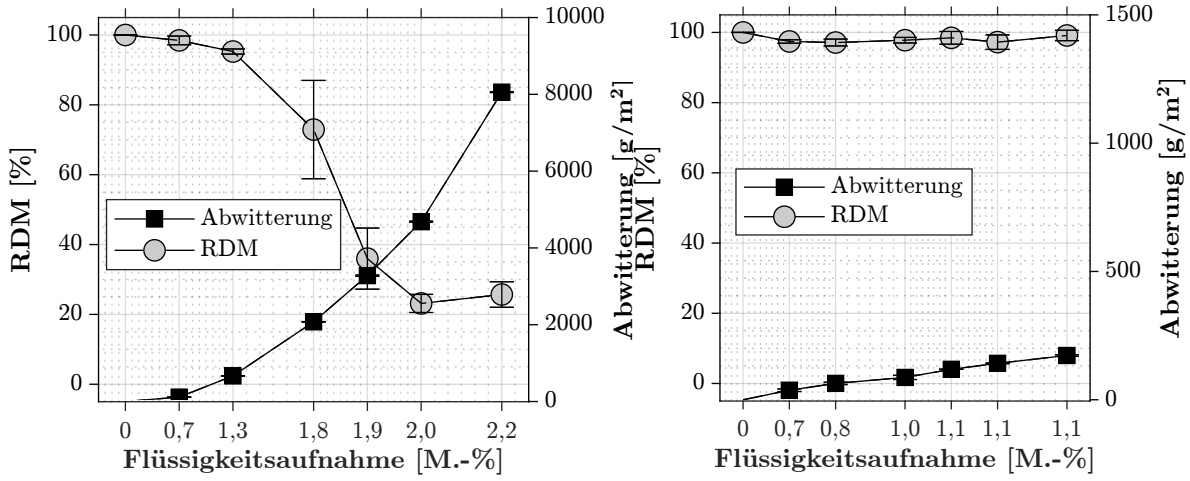
In [GLM11] wird erwähnt, dass Betone, die einen starken Abfall des RDM‘s zeigen, auch einen Schnittpunkt mit dem Verlauf der abgewitterten Mengen aufweisen. Betone ohne starken Abfall des RDM‘s und somit geringer oder keiner messbaren inneren Schädigung mit Hilfe der Ultraschallmessungen weisen diesen Schnittpunkt nicht auf. Diese Beobachtungen decken sich mit den hier dargestellten Ergebnissen in den Abbildung 3-15(a), 3-15(b) und 3-16(a). Diese Betone wurde ohne LP-Bildner hergestellt. Das kapillare Porensystem ist bei den vorgenannten Betonen zum einen vernetzt, zum anderen steht dem gefrierendem Wasser kein ausreichender Expansionsraum zur Verfügung. Daher kommt es beim Frost-Tausalz-Angriff während der CDF-Prüfung zum kryogenen Saugen, sodass die Flüssigkeitsaufnahme in den Beton überwiegend durch die Mikroeislinsenpumpe stattfindet. Bereits nach den ersten FTSW ist eine deutliche Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls mit einhergehender Abwitterung zu erkennen. Der Schnittpunkt zwischen diesen beiden Kennwerten wird bei einer Flüssigkeitsaufnahme von ca. 1,8 bis 1,9 M.-% erreicht. Es ist zu beachten, dass die Skalierung der rechten y-Achse, auf der die Abwitterungen aufgetragen sind, Einfluss auf die Lage des Schnittpunktes hat. Die Skalierung wurde in Abhängigkeit von den maximalen Abwitterungen gewählt. Daher variieren die Maxima der Abwitterungen (rechte y-Achse).



(a) CEM I, LP = 1,0 Vol.-% **(b)** CEM I+SF, LP = 1,0 Vol.-%

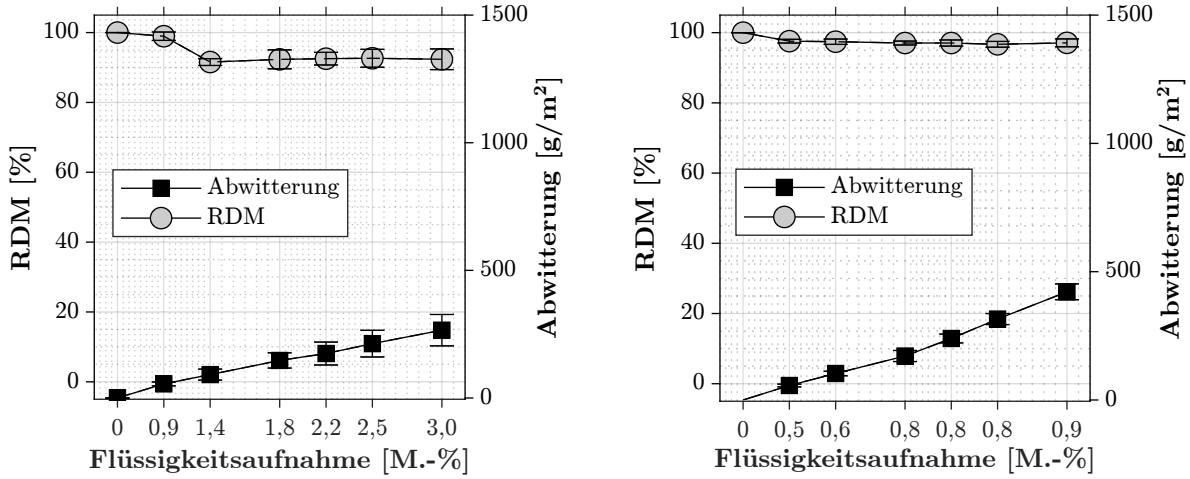
Abb. 3-15: CEM I, LP = 1,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-15(a)) und CEM I+SF, LP = 1,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-15(b)), Darstellung der Flüssigkeitsaufnahme [M.-%] auf der x-Achse zu den jeweiligen Messzeitpunkten zum n-ten FTSW (n = 0, 8, 14, 18, 24, 28), des rel. dynamischen E-Moduls (RDM) [-] auf der linken y-Achse und der abgewitterten Mengen (Abwitterungen) im CDF-Test auf der rechten y-Achse. Angabe der Standardabweichungen als Fehlerbalken.

Die Betone in den Abbildungen 3-16(b), 3-17(a), 3-17(b), 3-18(b), 3-19(a), die mit künstlich zugeführten Luftporen hergestellt wurden, zeigen sowohl geringe Abnahmen im relativen dynamischen E-Modul als auch verhältnismäßig geringe Abwitterungen auf. Bei diesen Betonen sorgen die Luftporen für ein unterbrochenes Kapillarporensystem und ausreichend Platz für das sich ausdehnende gefrierende Wasser während der Befrostung im CDF-Test.



(a) CEM II/A-S, LP = 1,0 Vol.-% **(b)** CEM I, LP = 10,0 Vol.-%

Abb. 3-16: CEM II/A-S, LP = 1,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-16(a)) und CEM I, LP = 10,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-16(b)), Darstellung der Flüssigkeitsaufnahme [M.-%] auf der x-Achse zu den jeweiligen Messzeitpunkten zum n-ten FTSW (n = 0, 8, 14, 18, 24, 28), des rel. dynamischen E-Moduls (RDM) [-] auf der linken y-Achse und der abgewitterten Mengen (Abwitterungen) im CDF-Test auf der rechten y-Achse. Angabe der Standardabweichungen als Fehlerbalken.

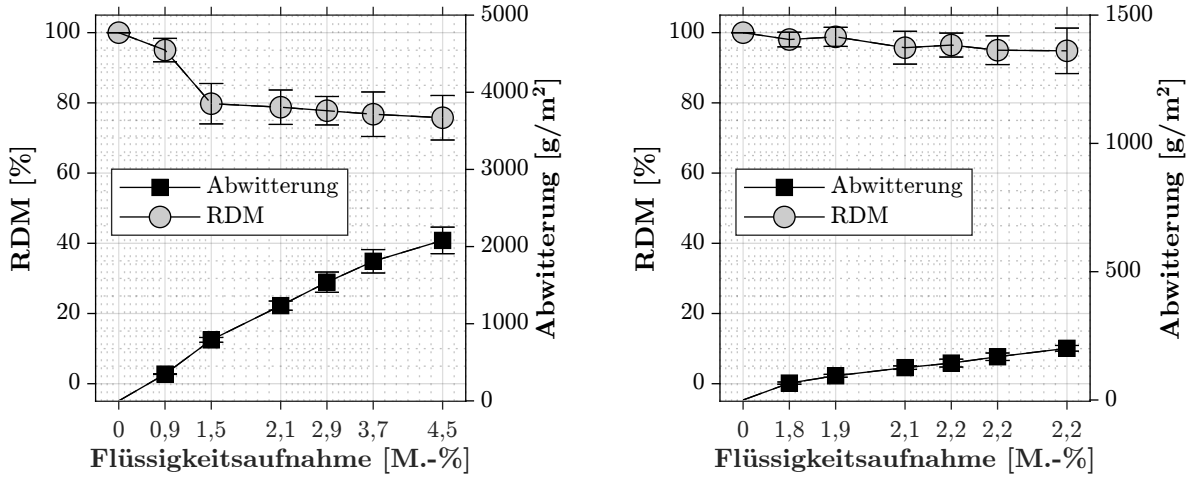


(a) CEM I, LP = 7,2 Vol.-%

(b) CEM I+SF, LP = 7,0 Vol.-%

Abb. 3-17: CEM I, LP = 7,2 Vol.-% (vgl. Abb. 3-17(a)) und CEM I+SF, LP = 7,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-17(b)), Darstellung der Flüssigkeitsaufnahme [M.-%] auf der x-Achse zu den jeweiligen Messzeitpunkten zum n-ten FTSW (n = 0, 8, 14, 18, 24, 28), des rel. dynamischen E-Moduls (RDM) [%] auf der linken y-Achse und der abgewitterten Mengen (Abwitterungen) im CDF-Test auf der rechten y-Achse. Angabe der Standardabweichungen als Fehlerbalken.

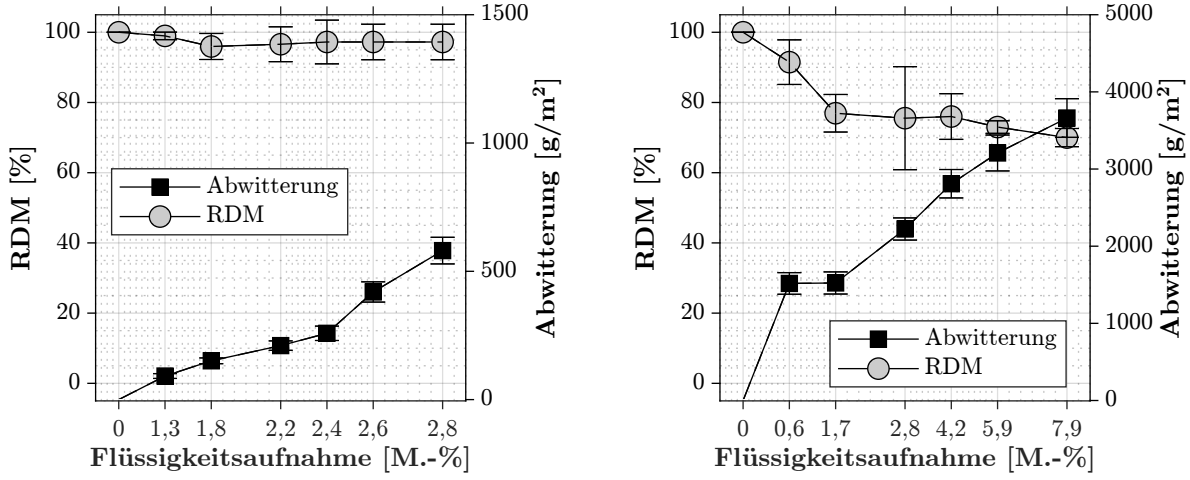
Auffällig sind die Betone, die mit dem Bindemittel CEM I und dem Betonzusatzstoff Silikastaub (SF = Silica Fume) hergestellt wurden. Beim Beton aus Abbildung 3-17(b) wurde hier der massenmäßige Anteil des CEM I mit k = 1,0 durch SF substituiert. Beim Beton aus Abbildung 3-18(a) wurde gem. Fussnote g aus [DIN10], Tabelle F.2.2-Teil 2 der Anteil des Betonzusatzstoffs SF mit k = 0 nicht mit auf den Bindemittelgehalt angerechnet. Hier zeigt im Vergleich eine moderate Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls auch erhöhte Abwitterungen. Es kann davon ausgegangen werden, dass aufgrund des hohen Mehlkornanteils die Frostbeständigkeit abnimmt.



(a) CEM I+SF (k=0), LP = 7,0 Vol.-% **(b)** CEM II/A-S, LP = 9,0 Vol.-%

Abb. 3-18: CEM I+SF (k=0), LP = 7,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-18(a)) und CEM II/A-S, LP = 9,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-18(b)), Darstellung der Flüssigkeitsaufnahme [M.-%] auf der x-Achse zu den jeweiligen Messzeitpunkten zum n-ten FTSW (n = 0, 8, 14, 18, 24, 28), des rel. dynamischen E-Moduls (RDM) [%] auf der linken y-Achse und der abgewitterten Mengen (Abwitterungen) im CDF-Test auf der rechten y-Achse. Angabe der Standardabweichungen als Fehlerbalken.

Weiterhin folgt der Beton, der mit hüttensandreichem CEM III/B und künstlich zugeführten Luftporen hergestellt wurde, nicht dem Trend von moderater RDM-Abnahme und geringen Abwitterungen. Da die Probekörper während der Vorlagerung 21 Tage an der Luft gelagert wurden, ist davon auszugehen, dass sich das Porengefüge in der Betonrandzone vergröbert hat. Im Theorieteil in Kapitel 2.3.4 wird dies näher erläutert und bei der Modellbildung in Kapitel 4.1.5 in den Abbildung 4-59 berücksichtigt.



(a) CEM I+SFA, LP = 7,0 Vol.-% **(b)** CEM III/B, LP = 5,5 Vol.-%

Abb. 3-19: CEM I+SFA, LP = 7,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-19(a)) und CEM III/B, LP = 5,5 Vol.-% (vgl. Abb. 3-19(b)), Darstellung der Flüssigkeitsaufnahme [M.-%] auf der x-Achse zu den jeweiligen Messzeitpunkten zum n-ten FTSW (n = 0, 8, 14, 18, 24, 28), des rel. dynamischen E-Moduls (RDM) [%] auf der linken y-Achse und der abgewitterten Mengen (Abwitterungen) im CDF-Test auf der rechten y-Achse. Angabe der Standardabweichungen als Fehlerbalken.

Exemplarisch wird nachfolgend die abgewitterte Höhe $h_{Frost,n}$ nach dem 28. FTSW nach Glg. 3-II aus Abbildung 3-16(b) berechnet. Es wird ein Beton mit vergleichsweise hohem LP-Gehalt (CEM I, 10 Vol.-%) gewählt, um die Systematik auch bei Betonen, in denen die abgewitterten Mengen eigentlich untergeordnet ist, zu demonstrieren. Die Grafiken in Kapitel 3.3.3 (vgl. auch einzelne Probekörper in den Anhängen A-6, A-7, A-8), in denen in weiss die abgewitterten Mengen dargestellt sind, wurden mit diesem Ansatz berechnet. In den nachfolgenden Betrachtungen erfolgt die Bestimmung von $h_{Frost,n}$ analog zu den Zeitpunkten 14. und 28. FTSW aus Kapitel 3.4, zu denen die RBM-Versuche stattfanden.

Für die nachfolgenden Berechnungen werden die Kennwerte aus dem CDF-Test nach [BAW12] nach dem 28. FTSW für den Beton CEM I, LP = 10,0 Vol.-%, w/z = 0,5 verwendet.

Einsetzen von Glg. 3-III mit $\rho_{Randzone}$ aus Glg. 3-V in Glg. 3-II ergibt die gesuchte mittlere abgewitterte Höhe $h_{Frost,n}$ nach dem 28. FTSW in Glg. 3-IV.

$$h_{Frost,n} = \frac{\frac{M_{Frost,n}}{\rho_{Randzone}}}{a_0 \cdot b_0} = \frac{\frac{3,613 \cdot 10^{-3}}{1621,8}}{0,1508 \cdot 0,1385} = 1,0667 \cdot 10^{-4}\ [\text{m}] = 0,106\ [\text{mm}]$$

mit:

$V_{Randzone,n}$ = wird berechnet
a_0 = 0,1508 [m]
b_0 = 0,1385 [m]
$h_{Frost,n}$ = wird berechnet [m]
$M_{Frost,n}$ = $0,173 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2}\right] \cdot (0,1508 \cdot 0,1385)\,[\text{m}^2] = 3,613 \cdot 10^{-3}\,[\text{kg}]$
$\rho_{Randzone}$ = berechnete Rohdichte nach Glg. 3-V $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$

$$\rho_{Randzone} = \frac{m_{Randzone}}{V_{Randzone,n}} = \frac{916,8}{565,3} = 1621,8 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$$

mit:

$\rho_{Randzone}$ = wird berechnet $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$
$m_{Randzone}$ = $350,0 + 175,0 \cdot 0,4 + 496,8 = 916,8 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$
$V_{Randzone}$ = $112,9 + 175 + 177,4 + 100 = 565,3 \left[\frac{\text{dm}^3}{\text{m}^3}\right] = 0,5653 \left[\frac{\text{m}^3}{\text{m}^3}\right]$

Aus der obigen Rechnung wird ersichtlich, dass die Rohdichte $\rho_{Randzone} = 1622 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ in der Betonrandzone und der erhöhte LP-Gehalt von 10,0 Vol.-% im Vergleich zur Rohdichte des CDF-Probekörpers nach der Vorlagerung (1d–Schalung/6d–H_2O/21d–20 °C/65 RH) $\rho_{1/6/21} = 2240 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}\right]$ zu einer größeren abgewitterten Höhe $h_{Frost,n}$ nach dem n-ten FTSW führt. Die sich daraus ergebenden Chloridprofile werden um $h_{Frost,n}$ verschoben.

Ein weiterer wichtiger Kennwert aus der CDF-Prüfung für die frostrelevanten Betrachtungen ist die Flüssigkeitsaufnahme Δw_n [M.-%] zum jedem n-ten FTSW. Die Flüssigkeitsaufnahme für Beton kann mittels Sorptionsisotherme beschrieben werden (vgl. hierzu Kapitel 2.4.1). In [LH16] wird auch gezeigt, dass die Flüssigkeitsaufnahme von Betonen unter Frost-Tausalz-Angriff im Vergleich zu Betonen ohne Frost-Tausalz-Angriff zunimmt. Die Mikroeislinsenpumpe führt dazu,

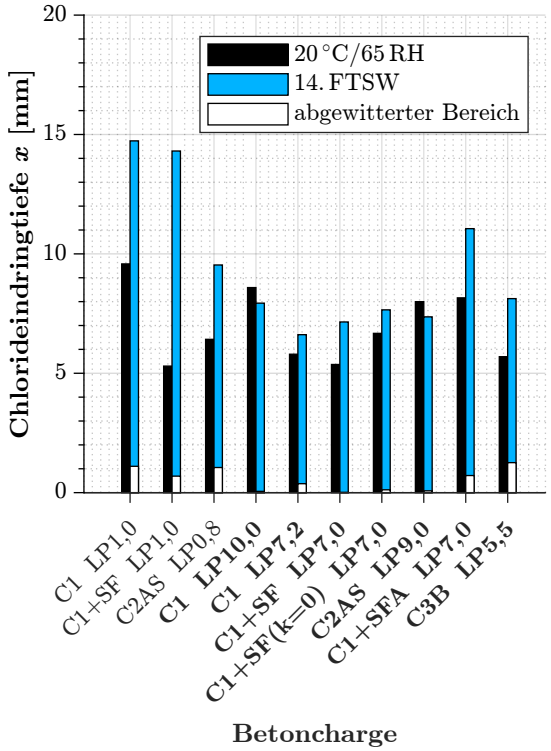
dass Kapillarporen schneller mit Flüssigkeit gefüllt werden. Diffusionsprozesse können können zur Folge haben, dass auch Luftporen mit Flüssigkeit nach und nach gefüllt werden. Wird nun noch die Zugspannung im Betoninneren überschritten, können Mikrorisse entstehen, die, geprägt durch Kapillareffekte, schnell mit Flüssigkeit gefüllt werden. Die vorgenannten Effekte einer erhöhten Flüssigkeitsaufnahme können nicht immer durch den Kennwert der abgewitterten Mengen aus der CDF-Prüfung beschrieben werden, da die Abwitterungen lediglich in der Betonrandzone ermittelt werden [GHJE11]. Hiermit lässt sich die Flüssigkeitssättigung in Kombination mit den Ultraschalllaufzeiten durch das relative dynamische E-Modul $R_{u,n}$ [%] grob abschätzen. Sinkt $R_{u,n}$ ab dem n-tem FTSW, kann unter Einbezug der Flüssigkeitsaufnahme Δw_n zum einen von einer inneren Schädigung ausgegangen werden, zum anderen spätestens dann von einer kritischen Wassersättigung. Zu beachten ist, dass der Ultraschall aufgrund des Versuchsaufbaus den Probekörper ca. in halber Höhe durchschallt. Eine direkte Aussage über die Wassersättigung und die innere Schädigung im oberflächennahen Bereich ist auf Basis der Laufzeiten daher auf diese Art und Weise nicht möglich. In Abbildung 3-16(b) sinkt weder Δw_n noch $R_{u,n}$ über den Zeitraum des Frost-Tausalz-Versuches. Das bedeutet, dass weder äußere (vgl. abgewitterte Höhe $h_{Frost,n}$ zuvor aus Glg. 3-IV) noch innere Schädigungen ($R_{u,n}$) im Beton mit einem LP-Gehalt von 10,0 Vol.-% entstanden sind.

3.3.3 Chloridprofile

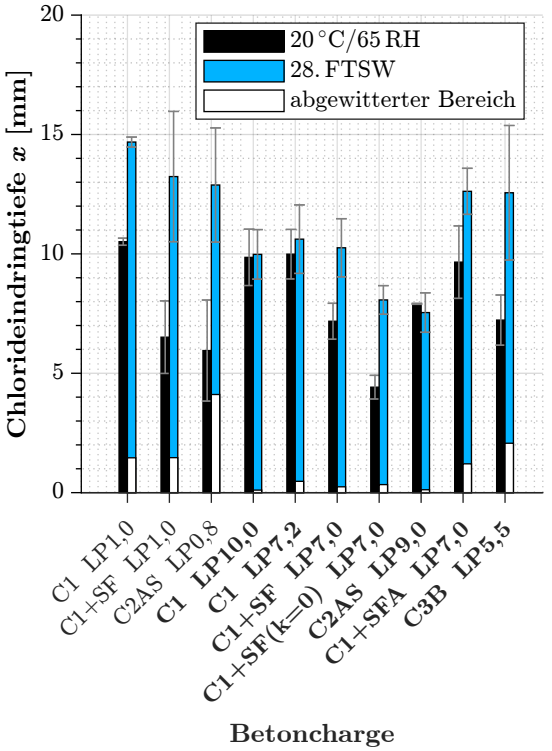
Aufgrund des Frost-Tausalz-Angriffs wittert im oberflächennahen Bereich Beton ab. Damit dieser Bereich bei der Betrachtung des Frosteinflusses auf den Chloridtransport in Beton bei den Chloridprofilen im Vergleich von befrosteten und unbefrosteten Probekörpern Berücksichtigung findet, wird unter Anwendung der Gleichung Glg. 3-IV das Chloridprofil von befrosteten Probekörpern um die rechnerisch ermittelte abgewitterte Höhe $h_{Frost,n}$ aus Kapitel 3.3.2 nach rechts verschoben. In den Untersuchungen dieser Arbeit konnte auf Basis der Messungen am Betonquerschnitt kein systematischer Einfluss festgestellt werden, der nur auf eine geschwächte Verbundzone zurückzuführen ist. In den Anhängen A-6, A-7, A-9 bis A-12 sind die 2D-Darstellung der untersuchten Betone in Hinblick auf deren Chlorid- und auch Bromidverteilungen (s. Kapitel 3.4.3) dargestellt. Die unstetigen Eindringfronten sind nicht eindeutig auf Verbundzoneneinflüsse zurückzuführen, sondern oftmals eine Kombination aus vergrößerten Lufteinschlüssen, verbundenen Luftporen oder auch unzureichender Verdichtung sowie ggf. vorhandenen Einflüssen aus einer verschlechterten Verbundzone an den betroffenen Stellen.

Um die Bestimmung der Eindringtiefen x [mm] der untersuchten Probekörper aus den Frost- und Diffusionsversuchen zu vereinheitlichen, wurde der Schnittpunkt zwischen der Diffusionsgleichung (Glg. 4-X) und der Erfassungsgrenze $x_{EG} = 0,2$ [M.-%/b*] verwendet. Der Schnittpunkt bei 0,2 [M.-%/b*] mit der gefitteten Diffusionsgleichung entspricht der Eindringtiefe von Chlorid in [M.-%/b*]. Mathematisch erfolgt die Bestimmung des Schnittpunktes durch den Befehl $fzero$ in $MATLAB$. Der Befehl sucht anhand eines Algorithmus numerisch die Nullstelle zwischen Glg. 4-X und der praktischen Erfassungsgrenze, auf die hier nicht näher eingegangen wird, durch den Abgleich von Vorzeichen.

In den Abbildungen 3-20(a) und 3-20(b) sind die Chlorideindringtiefen nach dem 14. und 28. FTSW den Betonen, die lediglich bei 20 °C/65 RH im gleichen Zeitraum im Labor lagerten, gegenübergestellt. Es ist zu erkennen, dass die Eindringtiefen von Betonen, die unter Frosteinfluss standen, größer als diejenigen sind, die im Laborklima lagerten. Die Streuungen (Standardabweichungen) der Eindringtiefen von befrosteten Betonen sind aufgrund der Abwitterungen im oberflächennahen geschädigten Bereich größer als die der Unbefrosteten. Wegen der Inhomogenitäten im Beton, die überwiegend auf die drei Komponenten Gesteinskörnung, Bindemittel und Wasser zurückzuführen sind, wittert anfangs zuerst ein dünne Bindemittelschicht ab. Anschließend kommt es zur Abwitterung von Bindemittel, in dem feine Gesteinskörnungsanteile (zwischen 0 und 0,063 mm) vorhanden sind. Schreitet der durch Frost hervorgerufene Schädigungsprozess unter Berücksichtigung des untersuchten Betons weiter voran, wittert auch gröbere Gesteinskörnung ab (zwischen 1 bis 2 mm). Da die Gesteinskörnung in Abhängigkeit der Sieblinie zufällig verteilt ist, streuen die abgewitterten Bereiche. Die Chlorideindringtiefen von Betonen nach zyklischer Frostbeaufschlagung mit $NaCl$ schwanken daher mehr als von Betonen, die bei 20 °C/65 RH im Labor lagerten. Durch diesen Effekt werden die ohnehin vorhandenen Streuungen bei den ablaufenden Transportprozessen verstärkt. Die zu den nachfolgenden Diagrammen zugehörigen Chloridprofile, aus denen die Kennwerte stammen, können den Anhängen A-6 bis A-8 entnommen werden.



(a) $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 7d (14. FTSW) CDF-Prüfung bzw. Lagerung bei 20 °C/65 RH. n = 2 je Charge und Expositionsart.



(b) $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung bzw. Lagerung bei 20 °C/65 RH. Angabe der Standardabweichungen. n = 3 je Charge und Expositionsart.

Abb. 3-20: Darstellung der Chlorideindringtiefen x aus den Chloridprofilen A-6 bis A-8 von befrosteten Betonen und unbefrosteten Betonen, die zeitgleich bei 20 °C/65 RH lagerten. Darstellung der abgewitterten Bereiche bei Betonen nach dem 14. und 28. FTSW. Betone nach Tabelle 3-7.

Der oben genannte Trend lässt sich in Abbildung 3-21 ebenfalls feststellen.

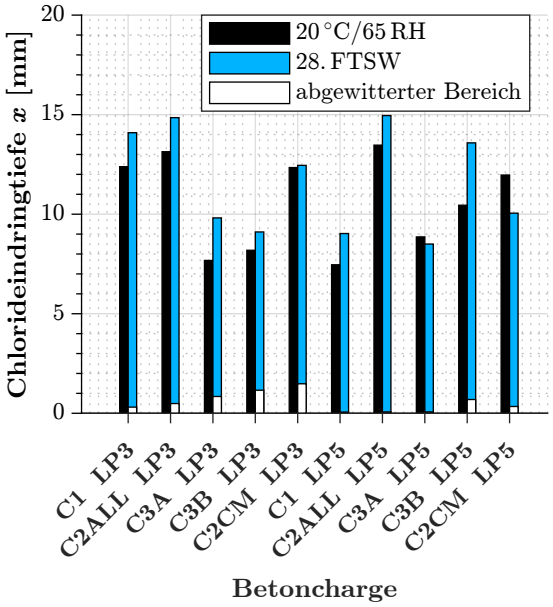


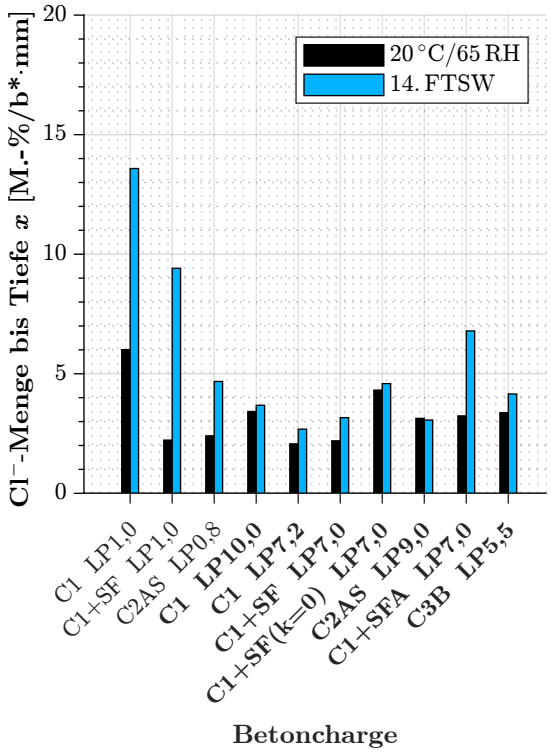
Abb. 3-21: $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung bzw. Lagerung bei 20 °C/65 RH. Darstellung der abgewitterten Bereiche bei Betonen nach dem 28. FTSW. n = 1 je Charge und Expositionsart.

Da die Kenntnis über die Eindringtiefe alleine nicht ausreichend ist, um eine quantitative Aussage über den Einfluss des Frost-Tausalz-Angriffs auf den Chloridtransport in Beton zu treffen, werden in Abbildung 3-22 zusätzlich die eingetragenen Chloridionenmengen bis zur Eindringtiefe x betrachtet. Nach der Frostexposition aus der CDF-Prüfung sind sie ein Maß für die sich anschließenden Umverteilungsprozesse. Je größer die eingetragenen Chloridionenmengen sind, desto schneller verlaufen die anschließenden Diffusionsprozesse ab. In Kapitel 3.3.5 werden die Umverteilungsprozesse von befrosteten und unbefrosteten Betonen im Zeitraum eines halben Jahres betrachtet.

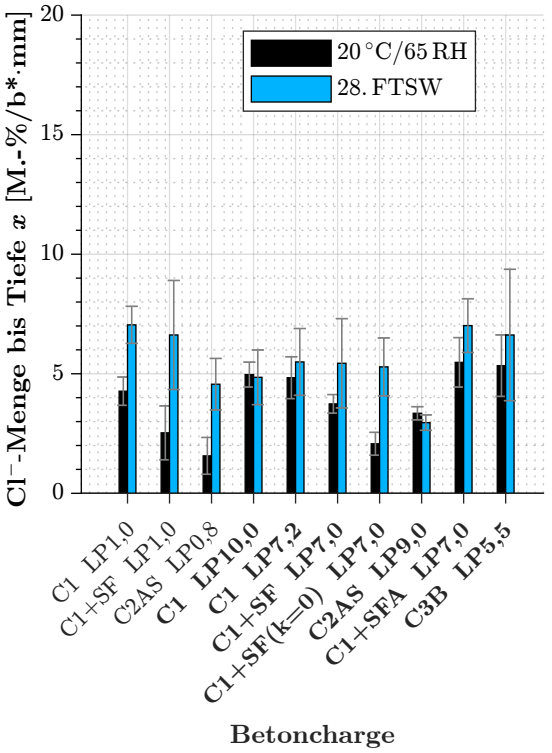
Es ist in den Abbildungen 3-22(a) und 3-22(b) sowohl nach dem 14. wie auch nach dem 28. FTSW ersichtlich, dass die eingetragenen Chloridmengen von Betonen, die einem zyklischen Frost-Tausalz-Angriff ausgesetzt waren, höhere Werte aufweisen als solche, die für die gleiche Zeit in 3,0 %-iger $NaCl$-Lösung im Laborklima lagerten. Der Beton mit CEM III/B nach dem 28. FTSW ist unter Berücksichtigung der Standardabweichung auch in diesem Trend enthalten. Da der Hydratations- und Diffusionsprozess temperaturabhängig ist, verlaufen diese Prozesse bei den im Laborklima gelagerten Betonen schneller ab als bei den Betonen, die in der CDF-Prüfung geprüft wurden. Die mittlere Temperatur bei den in der CDF-Prüfung getesteten Betonen beträgt -3,3 °C. Die nach der Vorlagerung (1d-Schalung/6d-Wasser/21d-Lagerung bei 20 °C/65 RH) und Vorsättigung (7d-kapillares Saugen in 3,0 %-iger $NaCl$-Lösung) in einem Betonalter von 35 Tagen weiter voranschreitende Hydratation hat Einfluss auf das Porengefüge und dessen geometrische Ausbildung. Die Porengrößenverteilung verschiebt sich je nach Art des Bindemittels bei den Betonen, die im Laborklima gelagert wurden, in kleinere Bereiche. Die Diffusionsprozesse, die ab diesem Zeitpunkt den Konzentrationsausgleich von Chlorid von der Beaufschlagungsseite ins Betoninnere bewirken, verlaufen aufgrund der sich verkleinernden Po-

ren ebenfalls langsamer. Vergleicht man nun die Diffusionsprozesse in Hinblick auf den Einfluss der Temperatur, so kann davon ausgegangen werden, dass sie bei den befrosteten Betonen in der CDF-Prüfung, ab Temperaturen gegen 0 °C vernachlässigbar gering sind. Nur in den Zeitspannen, in denen sich die Betone im positiven Temperaturbereich befinden, verlaufen zusätzlich zu den dominierenden Effekten, überwiegend aufgrund der Mikroeislinsepumpe, Diffusionsprozesse ab. Ähnliches gilt für das Voranschreiten der Hydratation. Bei den während der zyklischen Frostbeaufschlagung getesteten Betone verläuft die Hydratation ebenfalls langsamer ab. Dies hat zur Folge, dass sich das Porengefüge weniger in kleinere Bereiche verschiebt als die Betone, die im Laborklima gelagert wurden. Die Temperatur hat also Einfluss auf die Prozesse Hydratation und Diffusion, die genau Gegensätzliches in Hinblick auf das Chlorideindringen in Beton bewirken. Der sich verlangsamende Hydratationsprozess sorgt für ein im Vergleich gröberes Porengefüge, und die sich deutlich verlangsamenden Diffusionsprozesse verlieren in der CDF-Prüfung an Bedeutung. Die konvektiven Einflüsse, die aus dem Frostsaugen stammen, sind dominierend und führen zu einem im Vergleich zu den unbefrosteten Betonen deutlich erhöhten Chlorideintrag.

Die Betone ohne künstlich zugeführte Luftporen (vgl. erste drei Betone in den Abb. 3-22(a), 3-22(b)) folgen dem Trend der erhöhten Chlorideintrangsmenge nicht. Der Einfluss der Gefügeschädigungen während der CDF-Prüfung nach wenigen Frostzyklen hat bei diesen Betonen im Vergleich zum Pumpeneffekt aus der zyklischen Frostbeanspruchung einen größeren Einfluss auf den Chloridtransport in Beton. In den durch die Frostschädigung entstehenden Rissen findet der Chloridtransport überwiegend durch kapillare Saugeffekte statt. Durch den sog. "Huckepack Transport"[Vol91] gelangen die Chloride im Vergleich zu den Transportmechanismen Diffusion und Frostsaugen deutlich schneller in den Beton. Werden die Betone nun noch weiteren FTSW's ausgesetzt, so erhöht sich der Anteil an Mikrorissen, und Mikrorisse werden zu Rissen mit Rissbreiten bis zu 1 mm. Daher finden zwischen dem 14. FTSW und dem 28. FTSW Auslaugprozesse statt, die die eingetragene Chloridionenmenge bei Betonen ohne künstlich zugeführte Luftporen im Vergleich zum Zeitpunkt nach dem 14. FTSW verringern. Die anderen Betone mit künstlich zugeführten Luftporen weisen mit zunehmender Anzahl an FTSW eine erhöhte Chloridmenge bis in die Tiefe x auf. Der Chlorideintrag, der durch die zyklische Frostbeanspruchung hervorgerufen wird, gewinnt gegenüber der Diffusion an Bedeutung und führt zu einem erhöhten Chorideintrag in den Beton. Die Hydratation, die auch während der Befrostung noch in geringem Maße abläuft, scheint an Bedeutung zu verlieren. Denn die niedrigen abgewitterten Mengen mit dem damit abzuleitenden Flüssigkeitssättigungsgrad (vgl. Kapitel 3.3.2) weisen darauf hin, dass dem gefrierenden Wasser mit darin gelösten Chloriden ausreichend Expansionsraum zur Verfügung steht. Trotz der geringen Abwitterung und der sehr langsam ablaufenden Hydratation während der CDF-Prüfung kommt es zu einer Erhöhung der eingetragenen Chloridmengen. Das sich noch gering verändernde Porengefüge zu kleinen Porenradien beeinflusst den Chlorideintrag durch Frost im Vergleich zu den Diffusionsprobekörpern wenig.



(a) $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 7d (14. FTSW) CDF-Prüfung bzw. Lagerung bei 20 °C/65 RH. n = 2 je Charge und Expositionsart.



(b) $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung bzw. Lagerung bei 20 °C/65 RH. Angabe der Standardabweichungen. n = 3 je Charge und Expositionsart.

Abb. 3-22: Darstellung der Chloridionenmengen bis in die Tiefe x nach Abbildung 3-20. Betone nach Tabelle 3-7.

Der gleiche Trend ergibt sich für die Betonchargen aus dem Forschungsprojekt in Abbildung 3-23. Hier ist allerdings anzumerken, dass je Betoncharge und Expositionsart nur je ein PK zur Verfügung stand. Daher kann hier im Einzelnen nicht auf Details eingegangen werden, da die ggf. vorhandenen Streuungen Detailbetrachtungen zu stark beeinflussen, sodass keine verlässliche Aussage möglich ist. Bezieht man die Chlorideindringtiefen (vgl. Abb. 3-21) und die eingetragenen Chloridionenmengen (vgl. Abb. 3-23) mit in die Betrachtung mit ein, so kann auch hier davon ausgegangen werden, dass die zyklische Frostbeaufschlagung aus der CDF-Prüfung im Vergleich zu den im Laborklima gelagerten Probekörpern zu erhöhten Chlorideindringtiefen und -mengen führt.

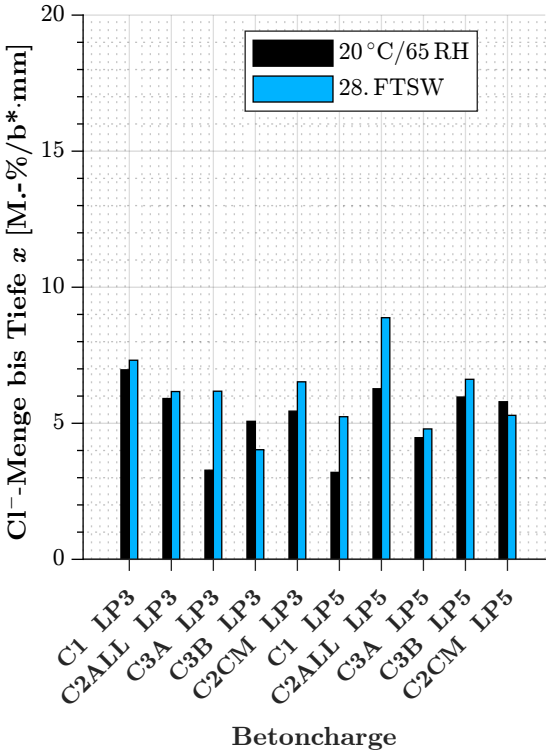
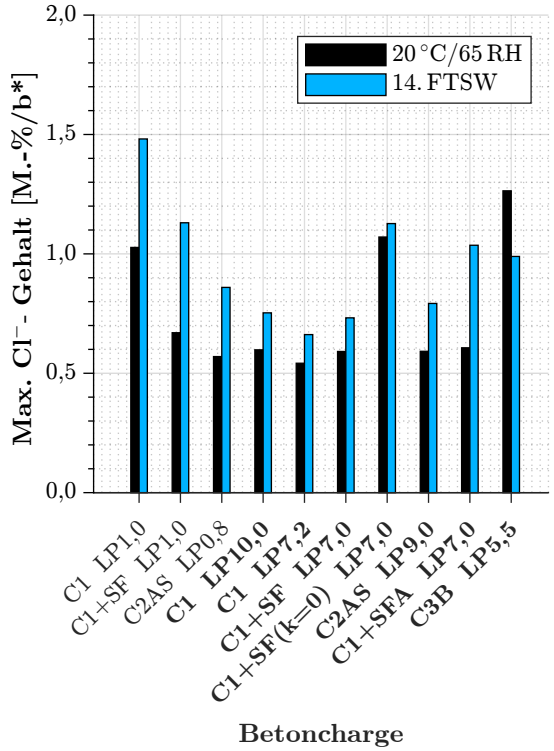
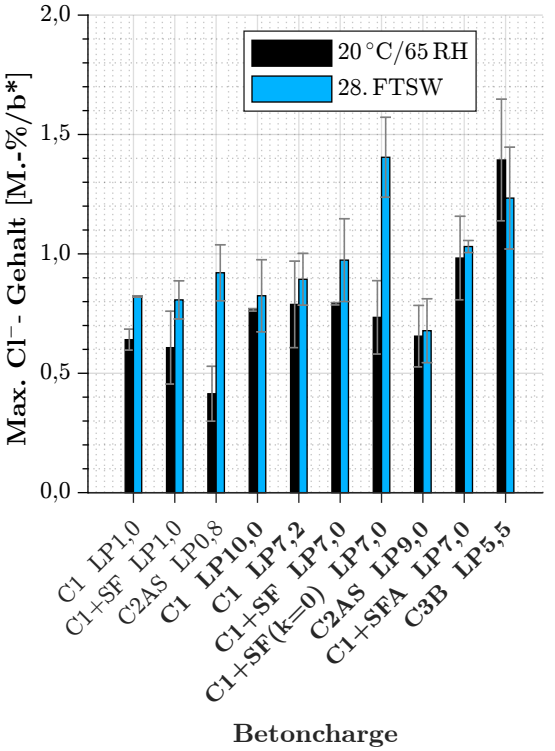


Abb. 3-23: Darstellung der Chloridionenmengen bis in die Tiefe x nach Abbildung 3-20. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung bzw. Lagerung bei 20 °C/65 RH. n = 1 je Charge und Expositionsart.

Zusätzlich zur Chloridionenmenge ist die Kenntnis über den maximalen Chloridgehalt im oberflächennahen Bereich von Interesse. Sie beeinflusst den anschließenden Chloridumverteilungsprozess maßgebend. Die Probekörper, die Frost-Tausalz-Zyklen ausgesetzt waren, weisen überwiegend einen höheren maximalen Chloridgehalt auf als die im Laborklima gelagerten Probekörper. Der maximale Chloridgehalt nimmt über die Anzahl der Zyklen vom 14. FTSW in Abbildung 3-24(a) zum 28. FTSW in Abbildung 3-24(b) zu.



(a) $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 7d (14. FTSW) CDF-Prüfung bzw. Lagerung bei 20 °C/65 RH. n = 2 je Charge und Expositionsart.



(b) $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung bzw. Lagerung bei 20 °C/65 RH. Angabe der Standardabweichungen. n = 3 je Charge und Expositionsart.

Abb. 3-24: Darstellung des maximalen Chloridgehaltes je Betoncharge und Expositionsart aus den Chloridprofilen in den Anhängen A-6. Betone nach Tabelle 3-7.

Auch bei den ergänzenden Probekörpern aus dem Forschungsprojekt in Abbildung 3-25 lässt sich diese Tendenz überwiegend feststellen.

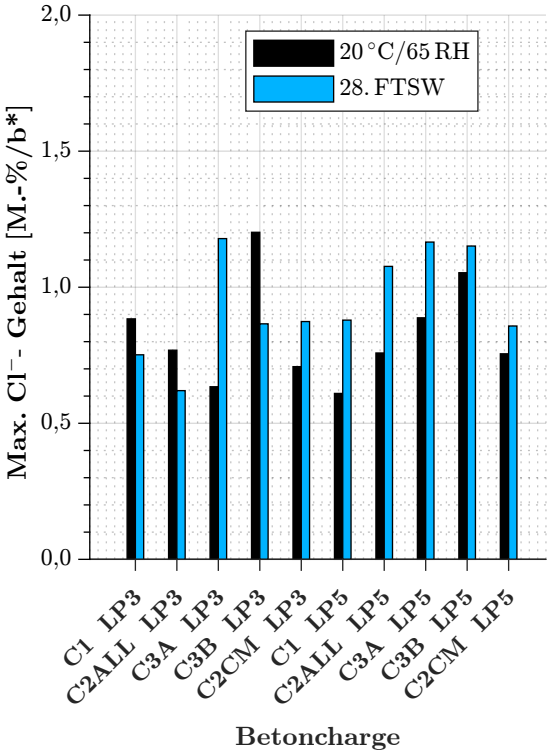


Abb. 3-25: Darstellung des maximalen Chloridgehaltes je Betoncharge und Expositionsart aus den Chloridprofilen A-7. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung bzw. Lagerung bei 20 °C/65 RH. n = 1 je Charge und Expositionsart.

3.3.4 Gefüge der Betonrandzone mit und ohne Frost-Tausalz-Angriff

Eine Möglichkeit, das Gefüge von Beton in der Betonrandzone zu untersuchen, sind optische Verfahren wie die Mikroskopie. Der Frost-Tausalz-Angriff findet überwiegend an der mit $NaCl$-Lösung beaufschlagten Fläche des Probekörpers statt und führt daher anfangs zu Schädigungen in der Betonrandzone.

Die Fluoreszenzmikroskopie zählt ebenfalls zu den optischen Methoden, Risse und z.T. Mikrorisse im Beton sichtbar zu machen. Durch dieses Verfahren können Rissbreiten und -tiefen direkt bestimmt werden [KDR99]. Vereinzelt können hiermit Auffälligkeiten aufgezeigt werden, um ggf. Erkenntnisse über die Verbundzone zu erlangen. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass das fluoreszierende Epoxidharz in die Verbundzone gelangen kann. Dies ist unter Frosteinfluss dann der Fall, wenn ein gewisser Schädigungsgrad im oberflächennahen Bereich vorhanden ist und das Betongefüge gestört ist. Die Verbundzone weist abhängig von der Bindemittel- und Gesteinskörnungsart eine im Vergleich zur übrigen Bindemittelmatrix porösere Struktur auf. Aufgrund der erhöhten Porosität kann mehr Flüssigkeit in die Verbundzone gelangen. Unter Frosteinfluss kann dies zu einer erhöhten Gefügeschädigung beitragen.

Da es für die Fluoreszenzmikroskopie kein normativ festgelegtes Verfahren zur Untersuchung von Beton gibt, der durch Frost-Tausalz-Angriff geschädigt wurde, wird im Anhang A-1 stichpunktartig das Vorgehen der Untersuchung von befrosteten (Probekörper aus der CDF-Prüfung) und unbefrosteten Probekörpern (Probekörper aus den Diffusionsversuchen) beschrieben.

Mit Hilfe der Fluoreszenzmikroskopie wird die Betonrandzone detektiert, die durch den Frost-Tausalz-Angriff während der CDF-Prüfung geschädigt wurde. In diesem Bereich entstehen Mikrorisse und ggf. Risse, die Chloride aus der Tausalzlösung während der Frostprüfung überwiegend kapillar in den Beton transportieren. Der Modellansatz nach dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz (vgl. Glg. 4-X) besitzt in dem geschädigten Bereich keine Gültigkeit, da das Gefüge derart gestört wurde, sodass konvektive Transportprozesse wie das kapillare Saugen gegenüber dem Transportprozess Diffusion dominierend sind.

Es wurde versucht, die somit ermittelte Schädigungstiefe durch eine Überlagerung mit den Chloridprofilen zu kombinieren. Dadurch sollte mit Hilfe der Fluoreszenzmikroskopie im besten Falle der Peak des Chloridprofils ermittelt werden. Allerdings decken sich die Schädigungstiefen, die mittels Fluoreszenzmikroskopie ermittelt wurden, nicht mit den Peaks aus den Chloridprofilen. Dies hängt mit weiteren in der Betonrandzone ablaufenden Prozessen wie dem Auslaugen von Ionen, Carbonatisierung der Betonrandzone während der Vorlagerung in Abhängigkeit des Bindemittels und sich verschiebenden Porengrößenverteilungen zusammen. Diese Zone wird i. A. als Konvektionszone bezeichnet.

In Abbildung 3-26 sind die Schädigungstiefen der untersuchten Betone, die mittels Fluoreszenzmikroskopie bestimmt wurden, dargestellt. Die Schädigungstiefen der Betone mit ca. 5 Vol.-% (y-Achse) sind den Tiefen von Betonen mit ca. 3 Vol.-% (x-Achse) gegenübergestellt. Wie zu erwarten war, folgen die Betone mit unterschiedlichen Bindemitteln dem Trend, dass die Betone mit einem LP-Gehalt von 3 Vol.-% eine größere Schädigungstiefe als die mit 5 Vol.-% aufweisen.

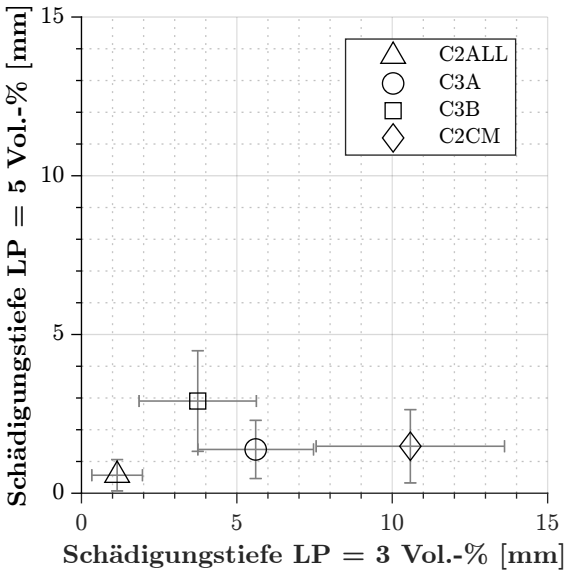
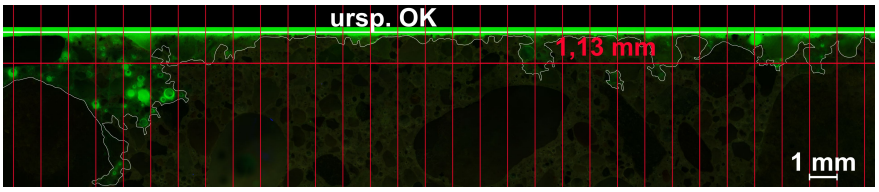


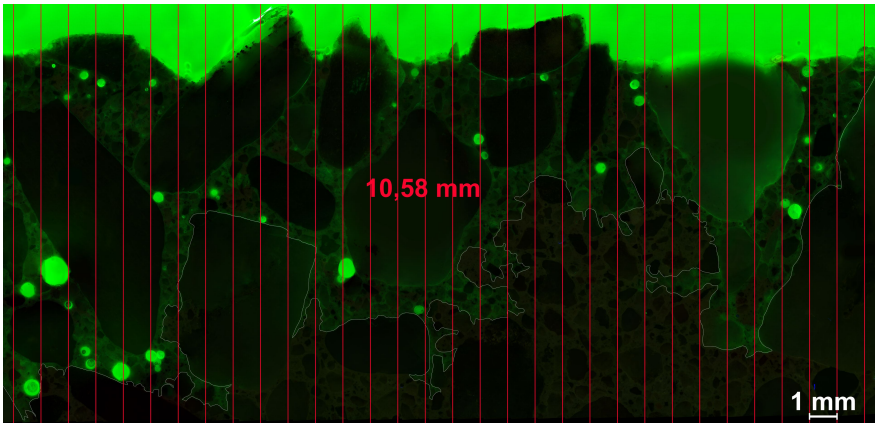
Abb. 3-26: Schädigungstiefe ermittelt durch Fluoreszenzmikroskopie für Betone mit einem LP-Gehalt von ca. 5 Vol.-% (y-Achse) und 3 Vol.-% (x-Achse). Die Gefügeschädigungstiefe wurde nach (28. FTSW) bestimmt.

Die Messungen der Tiefen, die mit der Fluoreszenzmikroskopie ermittelt wurden, sind in den nachfolgenden Abbildungen 3-27 an Betonen, die mit dem Bindemittel CEM II/C-M hergestellt wurden, dargestellt. Es ist exemplarisch ein Probekörper dargestellt, der keinen FTSW (vgl.

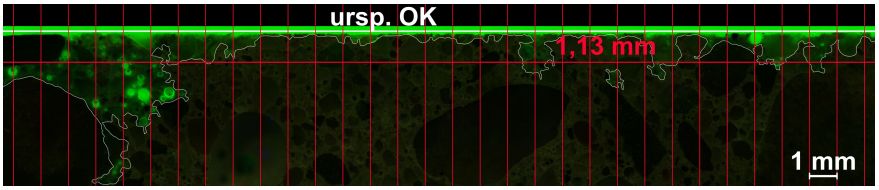
Abb. 3-27(c)) ausgesetzt und zwei Probekörper (vgl. PK mit LP = 3 Vol.-% in Abb. 3-27(b), PK mit LP = 5 Vol.-% in Abb. 3-27(c)), die nach dem 28. FTSW analysiert wurden. Aus diesen Darstellungen wird ersichtlich, warum die Streuungen bei den Messungen der Tiefen so groß werden. Aufgrund der variierenden Lage unterschiedlich großer Gesteinskörnung gelangt das niedrigviskose fluoreszierende Epoxidharz mittels Vakuum in verbundene Porenkanäle und innerhalb der Verbundzone ins Betoninnere. Da die Lage der Gesteinskörnung, die unterschiedlich großen Poren und Porenkanäle zufällig verteilt sind, kommt es zu sehr unterschiedlichen Tiefen, die sich in den großen Streuungen im Bereich der analysierten Fläche widerspiegeln. Die Tiefen sind von der ursprünglichen Oberkante bis zum maximalen Punkt des floureszierenden Bereiches im Betoninneren bestimmt worden.



(a) CEM II/C-M, LP = 5 Vol.-%, Lagerung bei 20 °C/65 RH.



(b) CEM II/C-M, LP = 3 Vol.-%, 28. FTSW. Ursprüngliche Oberkante aufgrund von Abittwerungen nicht mehr erkennbar.



(c) CEM II/C-M, LP = 5 Vol.-%, 28. FTSW.

Abb. 3-27: Ermittlung der Tiefen mittels Fluoreszenzmikroskopie. Messbreite: ca. 30 mm, Messraster: 1 mm, n (Anzahl der Messungen) = 30 je PK. Messung bis zum weissen Rand, welcher der Eindringtiefe des niedrigviskosen fluoreszierenden Expoxidharzes entspricht.

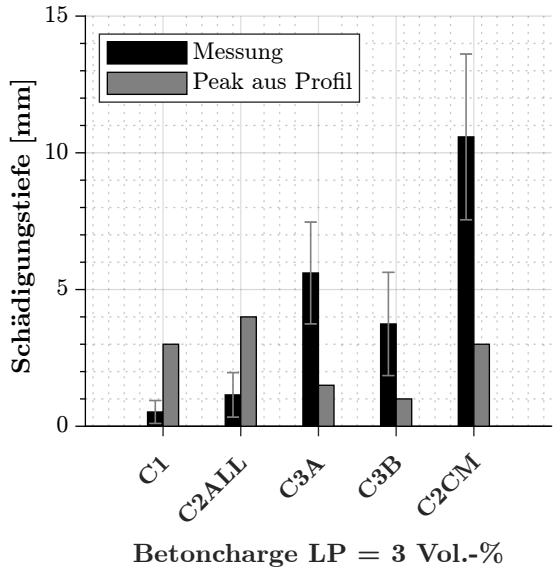
In Abbildung 3-28 sind die Schädigungstiefen aus der Fluoreszenzmikroskopie den Peaks aus den Chloridprofilen nach dem 28. FTSW dargestellt. Der Ansatz besteht darin, den durch

Frostzyklen gestörten Randbereich des Betons direkt mit LIBS ohne die Verwendung weiterer Analysemethoden zu bestimmen. Es wird aus Abbildung 3-28(a) für Betone mit niedrigem LP-Gehalt ersichtlich, dass die Befrostung während der CDF-Prüfung so große Gefügeschädigungen hervorruft, sodass keine Korrelation mehr zwischen den LIBS-Profilen und den durch Fluoreszenzmikroskopie gemittelten Schädigungstiefen herstellbar ist. Nach dem Entstehen von Mikrorissen deutet sich an, dass der Peak aus den LIBS-Profil in keinem Zusammenhang mit der durch Fluoreszenzmikroskopie ermittelten Schädigungstiefe mehr steht. Wie zuvor erwähnt, wird u.a. die Verbundzone zwischen Gesteinskörnung und Bindemittelmatrix im Laufe des Frost-Taulzangriffes weiter geschädigt, sodass sich vermehrt Mikrorisse bilden.

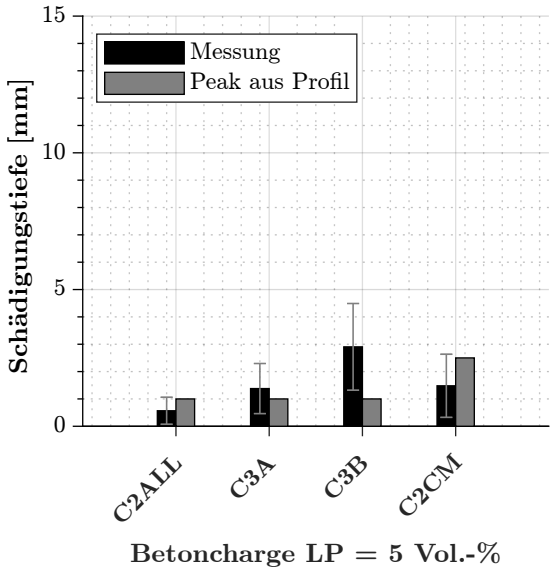
Anders verhalten sich Betone, die normkonform für die Expositionsklasse XF4 hergestellt wurden in Abbildung 3-28(b) (Beton mit CEM I fehlend, da PK bei der Vorbereitung zerstört wurde und keine Rückstellprobe mehr vorhanden war). Unter Einbezug der Standardabweichungen liegen die mit Fluoreszenzmikroskopie gemessenen Eindringtiefen innerhalb des Peaks der LIBS-Profile. Es deutet sich an, dass anhand der LIBS-Profile an Betonen mit erhöhtem LP-Gehalt ($\geq$ 5 Vol.-%) die Schädigungstiefe von Betonen aus der CDF-Prüfung grob abgeschätzt werden. Für die Ermittlung der wahren Schädigungstiefen aus Frost-Tausalz-Prüfungen oder realen Bauwerken sind allerdings weitere Untersuchungen vorzunehmen, um verlässlichere Aussagen zu treffen.

Auffällig ist lediglich der Beton, der mit dem Bindemittel CEM III/B (Hüttensandgehalt von 66 bis 80 M.-%) hergestellt wurde. Die Schädigungstiefe in Abhängigkeit zum LP-Gehalt differiert hier nur um 0,8 mm. Unter Einbezug der recht hohen Streuungen (Standardabweichung) ist die Schädigungstiefe also identisch. Dies kann durch das Porengefüge, das u.a. bei der Verwendung von Hüttensand entsteht, erklärt werden. In neueren Untersuchungen nach [Ehr17], der die bisherigen theoretischen Überlegungen durch einen physikalischen Ansatz ergänzt, und [Mül21], der die Schadensmechanismen bei einem Frost-Tausalz-Angriff durch die Kombination zweier bestehender Modelle ([Lin98] und [SA97]) genauer beschreibt, wird das sehr unterschiedliche Porengefüge zwischen karbonatisiertem, sehr oberflächennahen und nicht karbonatisiertem, im darunterliegenden Bereich für die erhöhten Abwitterungen verantwortlich gemacht. Aufgrund des recht groben karbonatisierten Bereiches an der direkten Oberfläche und des sehr dichten Gefüges kurz darunter können die Luftporen im nicht karbonatisierten Bereich das gefrierende Wasser nicht ausreichend aufnehmen, um den Sättigungsgrad im oberflächennahen Bereich zu senken. Dadurch kommt es bei hüttensandhaltigen Betonen vermehrt zur Abwitterung. Auch die Ergebnisse aus Abbildung 3-20 decken sich mit den theoretischen Betrachtungen. Im Vergleich zu Betonen mit vergleichbarem LP-Gehalt wittert der Beton mit CEM III/B am stärksten ab. Dies spiegelt sich nun auch in den ermittelten Schädigungstiefen mittels Fluoreszenzmikroskopie wider. Die Anzahl der durchgeführten Tiefenmessungen je PK beträgt ca. 30 in einer Schrittweite von 1 mm. Es ist zu erkennen, dass die Standardabweichungen bei den Betonen mit geringerem LP-Gehalt größer sind als bei denen mit größerem LP-Gehalt (vgl. Abbildungen 3-29 und 3-30). Aufgrund der gewählten Schrittweite von 1 mm streuen die Betone, die größere und tiefere Gefügeschädigungen aufweisen, deutlich mehr. Da zuerst die Betonrandzone und dann in Abhängigkeit von der Porosität zwischen Gesteinskörnung und Bindemittelmatrix

die Verbundzone durch die entstehenden Gefrierdrücke, die die aufnehmbare Zugspannung des Betons übersteigen, zerstört werden, sind die Messungen mittels Floureszenzmikroskopie mit großen Streuungen verbunden. Dies zeigen, wie bereits erwähnt, z. B. die Chlorideindringtiefen in Abbildung 3-20 im Vergleich von unbefrosteten und befrosteten Probekörpern.



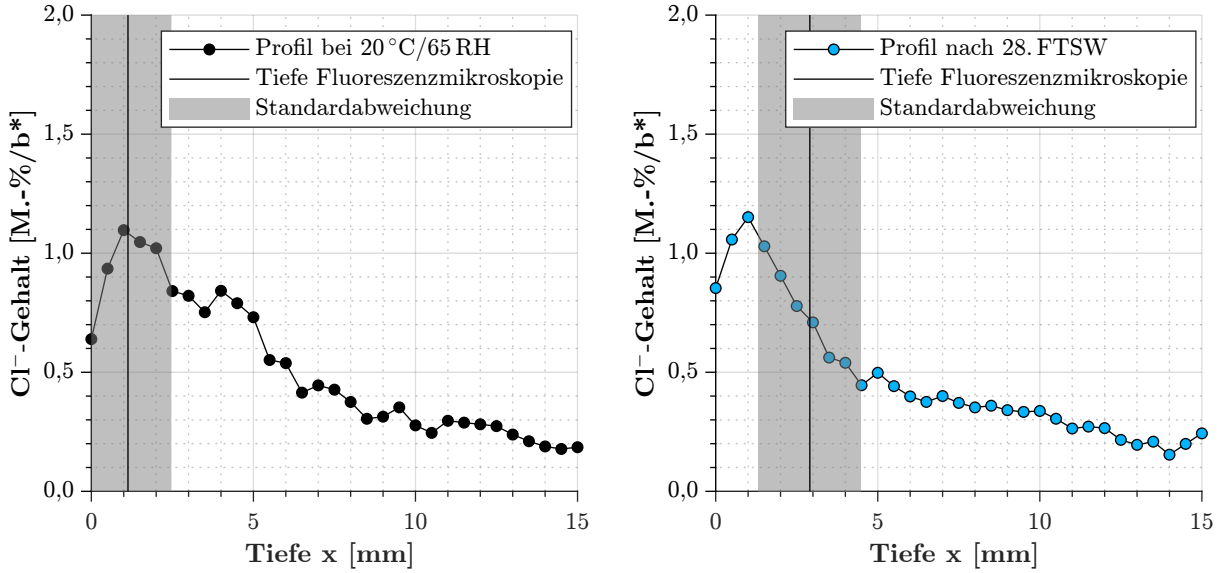
(a) Vergleich der Schädigungstiefen mit den Peaks aus den Chloridprofilen von Betonen mit LP = 3 Vol.-%.



(b) Vergleich der Schädigungstiefen mit den Peaks aus den Chloridprofilen von Betonen mit LP = 5 Vol.-%.

Abb. 3-28: Gegenüberstellung der gemittelten Schädigungstiefe mittels Fluoreszenzmikroskopie mit den Maxima (Peaks) aus den Chloridprofilen A-8 nach dem 28. FTSW für Betone mit 3 Vol.-% (vgl. Abb. 3-28(a)) und 5 Vol.-% (vgl. Abb. 3-28(b)) LP-Gehalt. Angabe der Standardabweichungen für die Fluoreszenzmikroskopie. n = 1 für Chloridprofile.

Aufgrund des offensichtlich nicht vorhandenen Zusammenhangs zwischen Chloridprofilen aus LIBS-Messungen von Betonen unter Frostbeanspruchung und der Schädigungstiefe aus der Fluoreszensmikroskopie in Abbildung 3-28(a) sind nachfolgend nur exemplarisch drei Betone mit einem LP-Gehalt von 5 Vol.-% und ein Probekörper, der keinen FTSW ausgesetzt war und für die gleiche Zeit in 3,0%-iger $NaCl$-Lösung lag, dargestellt.

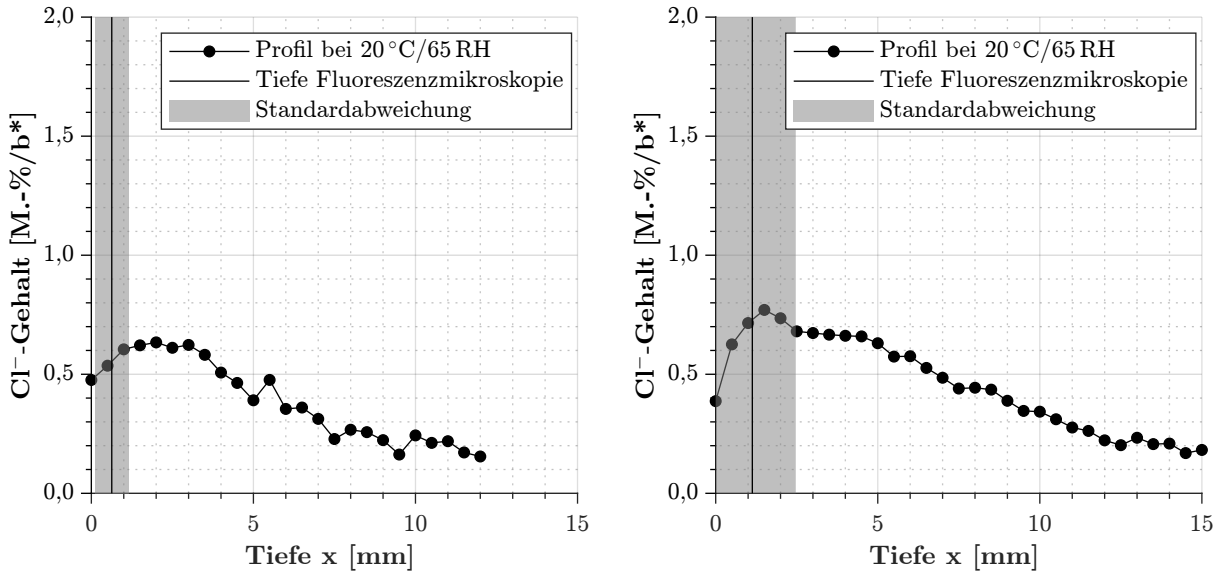


(a) CEM III/B, LP = 5 Vol.-%, Lagerung bei 20 °C/65 RH

(b) CEM III/B, LP = 5 Vol.-%, 28. FTSW

Abb. 3-29: Überlagerung der gemittelten mit Fluoreszenzmikroskopie ermittelten Tiefen mit den LIBS-Chloridprofilen.

In Abbildungen 3-30(a) und 3-30(b) sind nochmals zwei Probekörper dargestellt, die nicht befrostet wurden und bei 20 °C/65 RH in 3,0%-iger $NaCl$-Lösung lagerten. Die ermittelten Tiefen mittels Mikroskopie stimmen nicht mit den Peaks aus den Chloridprofilen überein.



(a) CEM I, LP = 5 Vol.-%, Lagerung bei 20 °C/65 RH

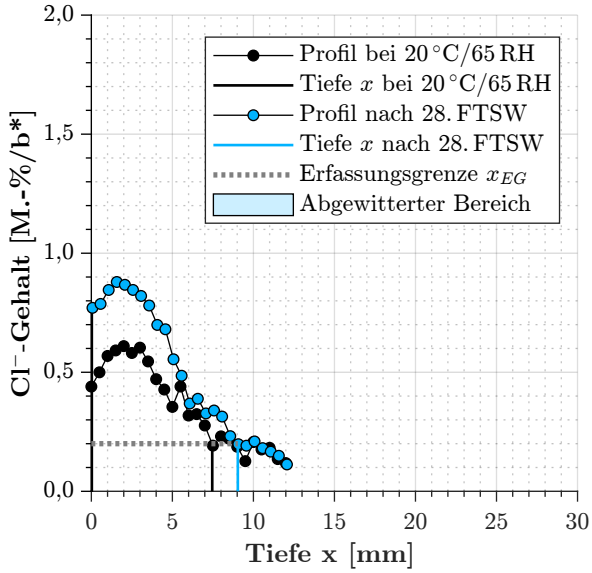
(b) CEM II/C-M (Kalkstein, Hüttensand), Lagerung bei 20 °C/65 RH

Abb. 3-30: Überlagerung der gemittelten mit Fluoreszenzmikroskopie ermittelten Tiefen mit den LIBS-Chloridprofilen.

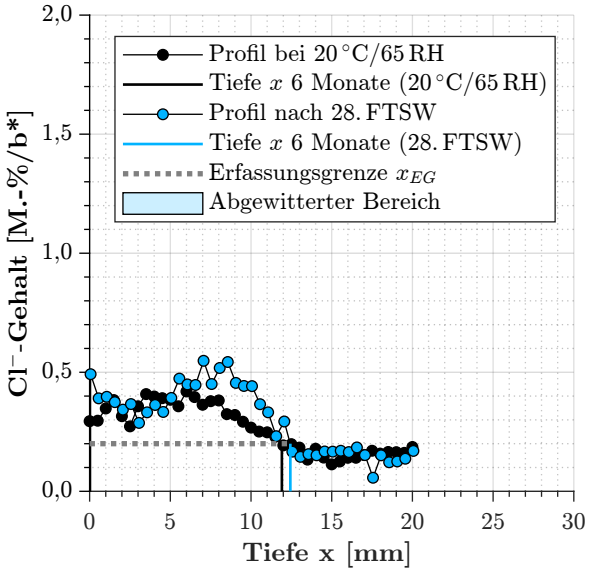
3.3.5 Zeitliche Chloridumverteilung von Diffusions- und Frost-Tausalz-Versuchen

Aufgrund des erhöhten Chloridgehalts von befrosteten im Vergleich zu unbefrosteten Betonen verläuft der anschließende Diffusionsprozess bei den Frost-Probeköpern schneller ab. Wie in Kapitel 3.3.3 (vgl. auch Anhang mit den Chloridprofilen (Projekt) A-8) beschrieben, ergibt sich aus den erhöhten Chloridgehalten, die mindestens im oberflächennahen Bereich vorliegen, nach Glg. 4-X eine größere extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration. Je größer C_{Sa} ist, desto schneller verläuft die zeitliche Chloridumverteilung in das Innere des Betons.

Da die Chloridumverteilung auch abhängig von (Mikro-)Rissen ist, die durch den Frost-Tausalz-Angriff entstehen können, wurden in den Abbildungen 3-31, 3-32(b), 3-33 nur diejenigen Betone aus Abbildung 3-21 mit in die Betrachtung einbezogen, deren abgewitterter Bereich kleiner als 1 mm (vgl. abgewitterte Höhe in 3.3.2) ist. Aufgrund der Skalierung ist der abgewitterte Bereich kaum ersichtlich, da er bei allen drei Betonen ca. 0,06 mm beträgt. Der Beton mit dem Bindemittel CEM II/C-M, der sowohl Hüttensand wie auch Kalksteinmehl enthält, wurde bei der sechsmonatigen Lagerung in PE-Beuteln nicht betrachtet. Der Einfluss auf die Chloridumverteilung bei Verwendung von zwei Betonzusatzstoffen wird in dieser Arbeit nicht näher eingegangen. Mit in die Betrachtung fließen die Betone mit den Bindemitteln CEM I, CEM II/A-LL mit Kalksteinmehl und CEM III/A mit einem Hüttensandgehalt zwischen 36 bis 65 M.-%. Alle Betone sind nach derzeit noch gültigen deskriptiven Anforderungen für die Exposition Frost XF4 zugelassen. Beim Vergleich dient der reine Portlandzement CEM I als Referenz (vgl. Abb. 3-31), der CEM II/A-LL (vgl. Abb. 3-32(b)) als Abgleich der Chloridumverteilung, wenn ein nahezu inerter Betonzusatzstoff zum Bindemittel hinzugegeben wird„ und der CEM III/A (vgl. Abb. 3-21) als weiterer Abgleich für ein Bindemittel, das im Vergleich zu den anderen beiden Zementen die größte Chloridbindekapazität aufweist. Um Einflüsse aus Karbonatisierung, die die Chloridumverteilungsprozesse beeinflussen, zu minimieren, wurden die Probekörper in PE-Beuteln gelagert.

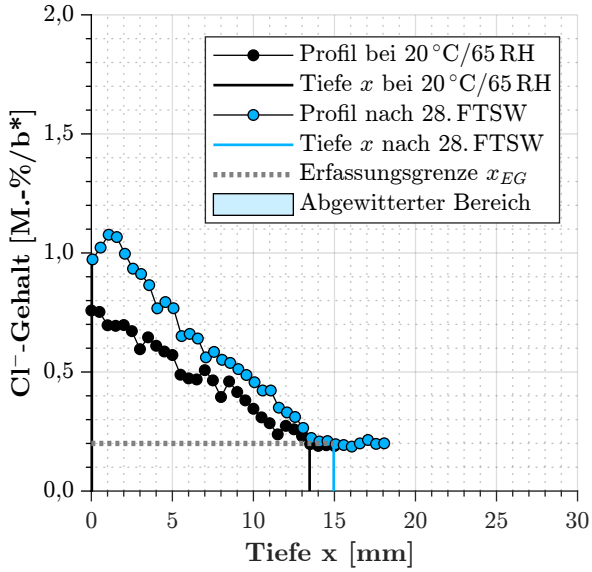


(a) $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. Analyse am 49. Herstelltag: (1d-Schalung/6d-Wasser/21d-20 °C/65 RH), 7d-Vorsättigung und 14d-Lagerung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung bzw. 28 FTSW.

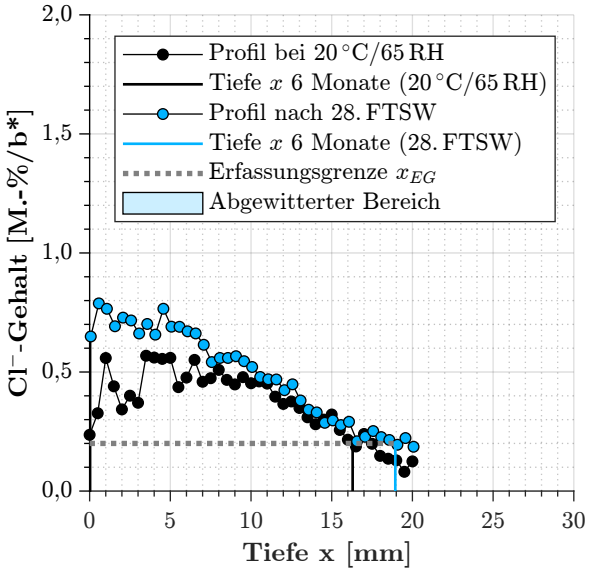


(b) $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. Analyse am 180. Herstelltag: (1d-Schalung/6d-Wasser/21d-20 °C/65 RH), 7d-Vorsättigung und 14d-Lagerung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung bzw. 28 FTSW. Anschließend 6-monatige Lagerung im Laborklima und in PE-Beuteln.

Abb. 3-31: CEM I, LP = 5,6 Vol.-%. Darstellung der Chloridprofile von befrosteten und unbefrosteten Probekörpern direkt nach Prüfende (vgl. A-8.1(b)) und nach 6 Monaten (vgl.3-31(b)).

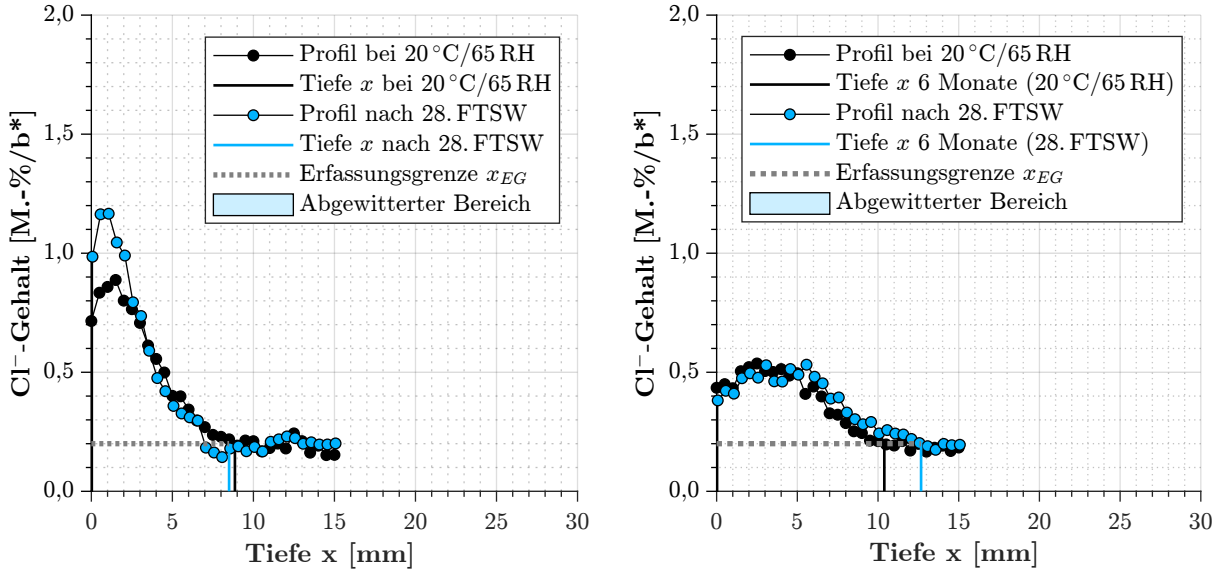


(a) $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. Analyse am 49. Herstelltag: (1d-Schalung/6d-Wasser/21d-20 °C/65 RH), 7d-Vorsättigung und 14d-Lagerung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung bzw. 28 FTSW.



(b) $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. Analyse am 180. Herstelltag: (1d-Schalung/6d-Wasser/21d-20 °C/65 RH), 7d-Vorsättigung und 14d-Lagerung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung bzw. 28 FTSW. Anschließend 6-monatige Lagerung im Laborklima und in PE-Beuteln.

Abb. 3-32: CEM II/A-LL, LP = 5,6 Vol.-%. Darstellung der Chloridprofile von befrosteten und unbefrosteten Probekörpern direkt nach Prüfende (vgl. A-8.3(b)) und nach 6 Monaten (vgl. 3-32(b)).



(a) $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. Analyse am 49. Herstelltag: (1d-Schalung/6d-Wasser/21d-20 °C/65 RH), 7d-Vorsättigung und 14d-Lagerung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung bzw. 28 FTSW.

(b) $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. Analyse am 180. Herstelltag: (1d-Schalung/6d-Wasser/21d-20 °C/65 RH), 7d-Vorsättigung und 14d-Lagerung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung bzw. 28 FTSW. Anschließend 6-monatige Lagerung im Laborklima und in PE-Beuteln.

Abb. 3-33: CEM III/A, LP = 4,8 Vol.-%. Darstellung der Chloridprofile von befrosteten und unbefrosteten Probekörpern direkt nach Prüfende (vgl. A-8.3(b)) und nach 6 Monaten (vgl.3-33(b)).

Die aus den Probekörpern unter Frost-Tausalz-Angriff ermittelten Chloridprofile zeigen gegenüber den reinen Diffusionsprobekörpern meist größere Eindringtiefen. Ursache dafür sind der höhere Chloridgehalt nach dem Frost-Tausalz-Angriff und die anschließend beschleunigten Diffusionsprozesse. Zudem gleichen sich die Chloridprofile unter Frost-Tausalz-Angriff mit der Zeit denen ohne Frostbeanspruchung an. Dies deutet darauf hin, dass die durch die Mikroeislinsenpumpe in die Gelporen eingetragenen Chloride entweder ähnlich umverteilt werden wie jene in den Kapillarporen oder dass die Gelporen nicht dauerhaft mit Chloriden gefüllt sind (vgl. hierzu auch Kapitel 3.4.4). Eine abschließende Bewertung der Chloridverteilung zwischen Gel- und Kapillarporen ist jedoch nicht möglich.

3.4 Ioneneindringen nach Frost-Tausalz-Angriff und Migration

3.4.1 Prüfkonzept des Eindringwiderstandes nach Frost-Tausalz-Angriff im RBM-Versuch

Damit ein Referenzwert vor Beaufschlagung von $NaCl$ aus der CDF-Prüfung ermittelt werden konnte, wurden Begleitprobekörper am 35. Herstelltag, parallel zum Start der Frost-Tausalz-Prüfung im Migrationstest mit $NaBr$ getestet (0-RBM-Versuch). Diese Probekörper wurden herkömmlich nach Versuchsende gespalten und die Eindringtiefen mittels Indikator $AgNO_3$ ermittelt und somit die Migrationskoeffizienten berechnet. In Kapitel 3.4.8 in Abbildung 3-52(a) sind die Migrationskoeffizienten dargestellt.

Um Betone, die zuvor durch einen Frost-Tausalz-Angriff mit Chloriden beaufschlagt wurden, im Migrationstest auf das Eindringverhalten zu untersuchen, wurden aus den Probekörpern der

CDF-Prüfung (vgl. Abb. 3-14) Zylinder gebohrt. Diese Zylinder wurden dann mit der in der CDF-Prüfung beaufschlagten Seite in die Migrationszellen eingebaut. Die zuvor erwähnten Migrationskoeffizienten vor Befrostung wurden dann den Migrationskoeffizienten nach Befrostung nach dem 14. und 28. FTSW in Abbildung 3-52(b) gegenübergestellt.

Durch die Verwendung derselben Probekörper, mit denen der Einfluss des Frost-Tausalz-Angriffes durch den Abgleich mit den Diffusionsprobekörpern in Kapitel 3.3 (vgl. in Kapitel 3.3.1 Prüfkonzept der Diffusions-/Frost-Tausalz-Probekörper) näher quantifiziert wurde, wurde ebenfalls der Eindringwiderstand im Migrationstest (RBM-Versuch, vgl. Kapitel 3.4.2) nach bereits erfolgtem Frost-Tausalz-Angriff aus der CDF-Prüfung untersucht. Somit wird der Einfluss von Streuungen nochmals minimiert, und es können neben den eigentlichen Untersuchungen zum Eindringverhalten im RBM-Versuch weitere Erkenntnisse über den Chloridtransport gewonnen werden.

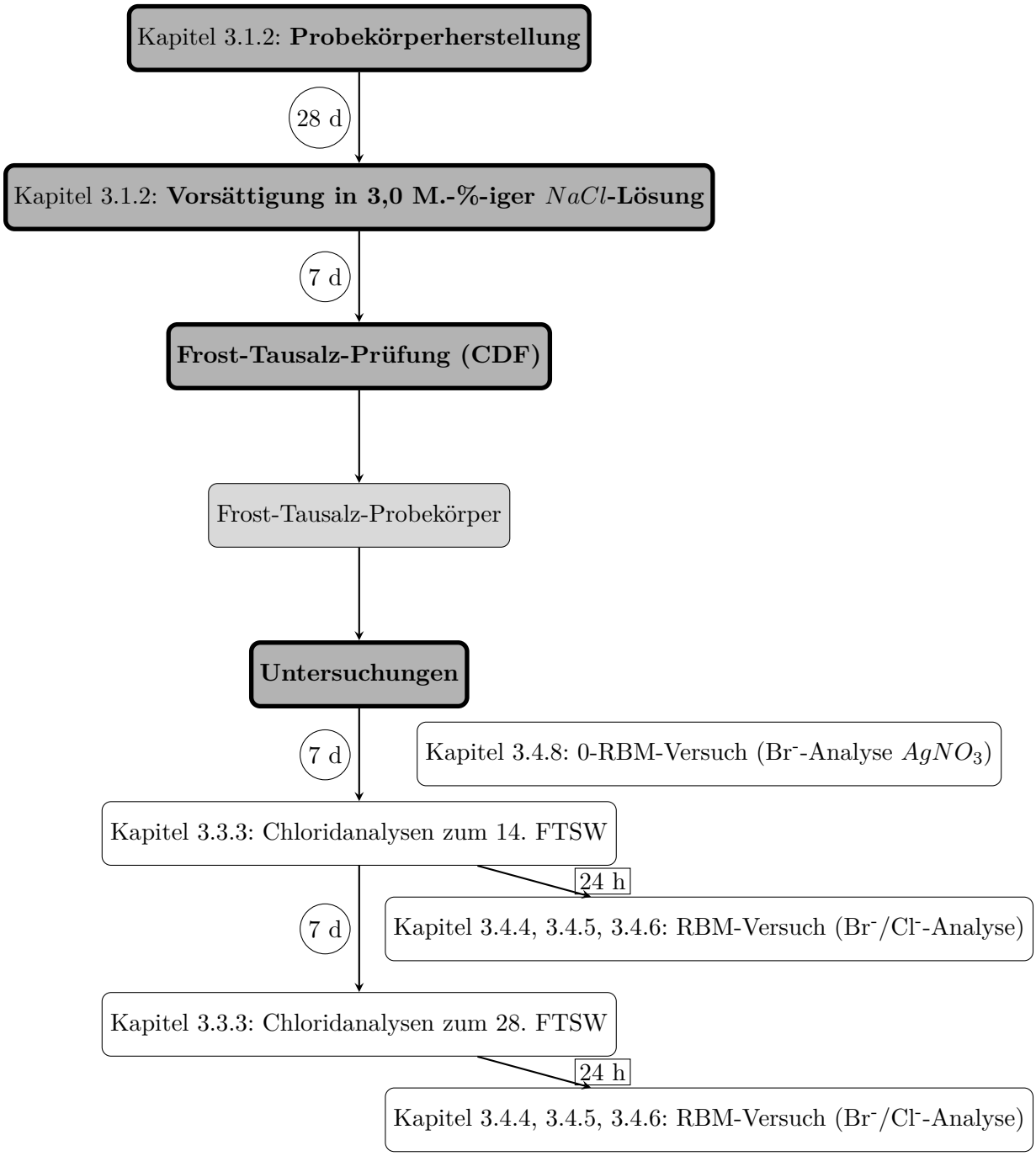


Abb. 3-34: Prüfkonzept zur Quantifizierung des Bromideindringwiderstandes im RBM-Versuch vor (0-RBM-Versuch) und nach Frost-Tausalz-Angriff (CDF-Prüfung) nach dem 14. und 28. FTSW

3.4.2 Modifikation des RCM-Tests

Der Chlorideindringwiderstand kann in recht kurzer Zeit mit dem Rapid Chloride Migration Test (≡ RCM-Test) von [Tan96] ermittelt werden. Dadurch ist es möglich, den Migrationskoeffizienten (vgl. Kapitel 3.4.8) zu berechnen, der für weitere dauerhaftigkeitsrelevante Betrachtungen verwendet wird, zu bestimmen [Geh00] [Rah16].

Um Betone, die zuvor bereits mit $NaCl$ beaufschlagt wurden, im Migrationstest auf deren

Eindringwiderstand zu prüfen, ist es notwendig, den herkömmlichen RCM-Test leicht zu modifizieren. Dadurch soll eine Differenzierung zwischen den Chloridionen, die durch die 3,0 M.-%-ige $NaCl$-Lösung im Rahmen der CDF-Prüfung, und den Bromidionen, die durch den anschließenden Migrationstest eingedrungen sind, ermöglicht werden. In [Lay06] wurde dies bereits mit Natriumiodid (≡ NaI) durchgeführt. Zusätzlich wurde ein Indikator zur Detektion von Iodid in Beton entwickelt, um eine Differenzierung zwischen Chlorid und Iodid zu ermöglichen. Aufgrund des in dieser Arbeit verwendeten Analysesystems LIBS ist kein Indikator notwendig, um verschiedene chemische Elemente zu detektieren. Ferner lassen sich eingetragene Bromidmengen nach geeigneter Kalibrierung auch quantifizieren. Somit ist ergänzend zur Bestimmung der Eindringtiefen auch die Verteilung der Bromidmaße in 2D-Darstellung möglich. Daher wurde für die Modifikation des RCM-Tests das Salz $NaBr$ verwendet. Der Test, in dem anstatt $NaCl$ das Salz $NaBr$ verwendet wurde, wird im Nachfolgenden Rapid Bromide Migration Test (≡ RBM-Test) genannt. Die Eigenschaften des Atoms Brom sind denen von Chlor noch etwas ähnlicher und in Tabelle 3-9 dargestellt. Insbesondere der Atomdurchmesser und die Solvatationszahlen, die die Anzahl der Anlagerung von Wassermolekülen um das Bromidion beschreiben, sind denen von Chlor ähnlicher als die Eigenschaften von Iod und Chlor. Somit ist mit noch geringeren Unterschieden beim Eindringverhalten im RBM-Test auszugehen. Ferner reduzieren sich die Kosten bei der Verwendung von $NaBr$ im Vergleich zu NaI um ca. den Faktor sieben ($NaBr$ 44 €/kg, NaJ 315 €/kg, Stand 11/2022).

Tab. 3-9: Eigenschaften von Chlor, Brom und Iod (VII. Hauptgruppe, Halogene) [Sch16] [Ben15] [Vol91] [HA71]

Eigenschaft	**Chlor**	**Brom**	**Iod**
Häufigkeit [M.-%]	0,19	$6{\cdot}10^{-4}$	$6{\cdot}10^{-6}$
Dichte [g/cm^3]	2,9	3,12	4,94
Atommasse [-]	35,5	79,9	126,9
Ionenradius [pm]	181	195	216
Elektronegativität	3,16	2,96	2,66
Potential E_0 [V]	1,36	1,07	0,54
Solvationszahl [-]	2-5	2-5	1,2

Um sicherzustellen, dass die vergleichbaren chemischen Eigenschaften von Brom und Chlor aus Tabelle 3-9 auch vergleichbare Ergebnisse nach dem Aufbringen des Indikators $AgNO_3$ im RBM-Test liefern, wurden Vorversuche von verschiedenen zuvor nicht mit $NaCl$ beaufschlagten Probekörpern mit unterschiedlichen Bindemittel und w/b-Werten in Anlehnung an [DIN21] untersucht. Hierzu wurde parallel zum herkömmlichen RCM-Test mit 3,0 M.-%, das Salz $NaBr$ im gleichen molaren Verhältnis von 0,5 [mol/l] (≡ 5,2 M.-% $NaBr$) im modifizierten RBM-Test (mit $NaBr$ anstatt $NaCl$) verwendet. Auch in den CDF-Versuchen betrug die Salzkonzentration 0,5 [mol/l], sodass Einflüsse aus unterschiedlichen Salzkonzentrationen, die durch die unterschiedlichen Laborprüfungen entstehen könnten, minimiert werden sollten. Da der maßge-

bende Parameter bei der Bestimmung der Migrationskoeffizienten die Eindringtiefe ist, wurden die Eindringtiefen aus den RCM- denen des RBM-Tests gegenübergestellt. Die Ermittlung der Eindringtiefen erfolgte mit dem herkömmlichen Indikatorverfahren.

Die Annahme, dass sich die Bromidionen beim Anlegen des elektrischen Feldes ähnlich wie die Chloridionen verhalten, konnte durch das Messen der Eindringtiefen bestätigt werden. Hierbei wurden in der Serie mit $NaCl$ und in der Serie mit $NaBr$ die weiss-verfärbten Bereiche auf deren Eindringtiefen gemessen. Nach den Tests wurden die gespaltenen Betonzylinder mit dem Indikator $AgNO_3$ besprüht. Unter der Anwesenheit von ausreichend freien Halogenen wie Cl oder Br bildet sich das schwerlösliche Silbersalz, welches diejenigen Bereichen, in denen ausreichend viele freie Ionen vorhanden sind, weiss verfärbt [Sch16]. Im RCM-Test bildet sich das Silbersalz $AgCl$ und im RBM-Test $AgBr$. Nach Messung der Eindringtiefen wurden die erhobenen Daten ausgewertet. In Abbildung 3-35 ist die Verwendbarkeit von $NaBr$ anstatt $NaCl$ im RBM-Test dargestellt. Es sind die arithmetischen Mittelwerte der Eindringtiefen, die durch lineare Regression miteinander verglichen wurden, dargestellt und die 95 % Konfidenzbänder angegeben. Die Konfidenzbänder sagen aus, mit welcher Wahrscheinlichkeit die wahren Werte innerhalb des Bandes liegen. Je näher die Konfidenzbänder an der Regressionsgerade liegen, desto weniger streuen die Einzelwerte der durch Messung gemittelten Eindringtiefen um den Mittelwert [FDD05]. Das Bestimmtheitsmaß der Regression beträgt $R^2 = 0{,}995$. Es kann also davon ausgegangen werden, dass die Verwendung von $NaBr$ als alternatives Salz im Migrationstest verwendet werden kann und vergleichbare Ergebnisse wie mit $NaCl$ erzielt werden. In [LK22] können Details zur Versuchsplanung, Durchführung und Auswertung in dem modifizierten RBM-Test entnommen werden.

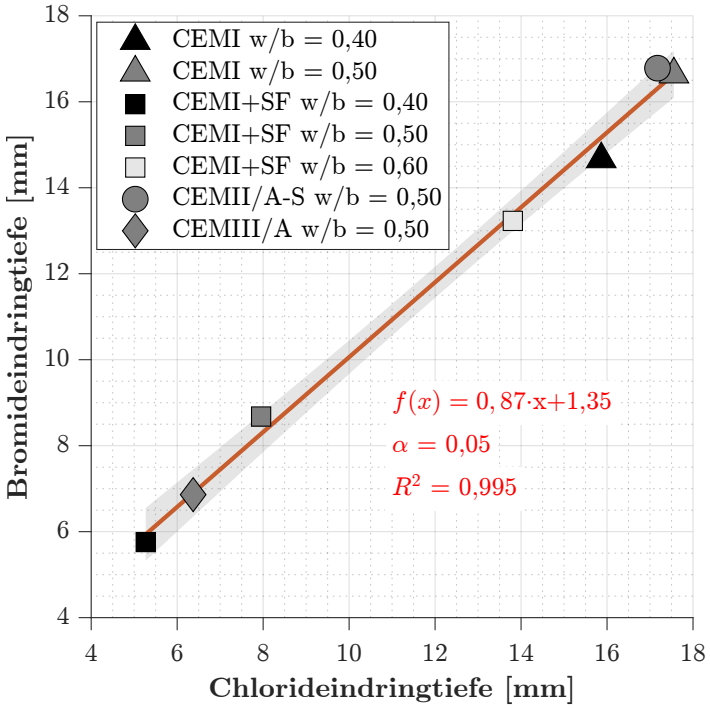


Abb. 3-35: Vergleich der mittels Indikatorlösung $AgNO_3$ (0,1 mol/l) ermittelten Eindringtiefen im RCM- und modifizierten RBM-Test mit einer Ionenkonzentration von 0,5 [mol/l] ($\equiv$ 5,2 M.-% $NaBr$) unter Angabe der linearen Regression, des Bestimmtheitsmaßes R^2 und der 95 % Konfidenzbänder bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ [LK22]

Ergänzend zu den vorgenannten Migrationsversuchen mit 0,5 [mol/l] Ionenkonzentration, wurde ein RCM- und RBM-Versuch mit 1,7 mol/l ($\equiv$ 10,0 M.-% $NaCl$ oder 17,6 M.-% $NaBr$) durchgeführt, um eventuelle Unterschiede beim Eindringverhalten von Chloriden und Bromiden in Hinblick auf Konzentrationsabhängigkeit stichprobenhaft auszuschließen. Die Eindringtiefen im RCM-Test betrugen 11,6 mm und im 0-RBM-Test 12,1 mm. Auch hier ergaben sich vergleichbare Eindringtiefen. Ein Einfluss der Salzkonzentration in Hinblick auf die Eindringtiefe beim Austausch von $NaCl$ durch $NaBr$ konnte auch hier nicht festgestellt werden. An dieser Stelle sei allerdings darauf hingewiesen, dass die durch die Eindringtiefen ermittelten Migrationskoeffizienten abhängig von der Salzkonzentration sind. So ergeben sich bei Versuchen mit Salzlösungen höherer Konzentrationen größere Migrationskoeffizienten als bei Versuchen mit geringerer Salzkonzentration. Da dies allerdings kein Untersuchungsgegenstand in dieser Arbeit ist, wurden alle RBM-Tests mit der gleichen Konzentration von 0,5 [mol/l] durchgeführt. Ein Begründungsansatz ist in Kapitel 3.4.8 zu finden.

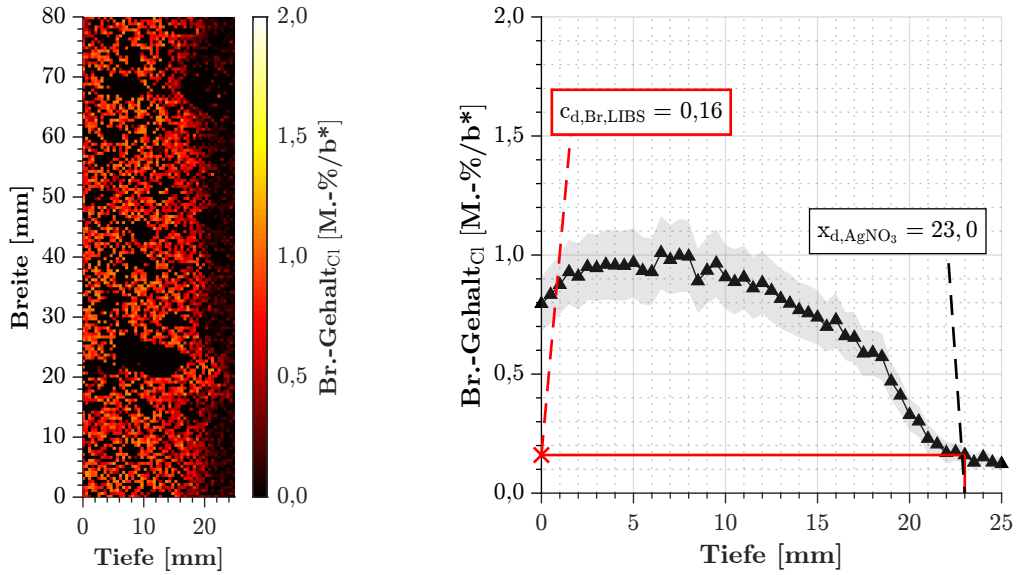
Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass der Austausch von $NaCl$ durch $NaBr$ vergleichbare Eindringtiefen im 0-RBM-Test liefert. Da wie erwähnt die gemittelte Eindringtiefe der maßgebende Parameter bei der Berechnung der Migrationskoeffizienten ist, ist somit auch eine Aussage über das Chlorideindringverhalten, das im RBM-Test ermittelt wurde, möglich.

3.4.3 Koppelung des Indikatorverfahrens mit LIBS

Vor dem Start des Frost-Tausalz-Angriffs in der CDF-Prüfung wurden die Betone (vgl. Kapitel 3.1.2 Tabelle 3-7) im 0-RBM-Test geprüft. Dadurch wurden die Eindringwiderstände vor dem Frostangriff ermittelt und der farbausschlaggebende Bromidgehalt an den zylindrischen Probekörpern bestimmt. Die Migrationskoeffizienten aus dem 0-RBM-Versuch sind in Kapitel 3.4.8 in Abbildung 3-52(a) dargestellt.

Durch die Messungen der Eindringtiefen $x_{d,AgNO_3}$, die mittels Indikatorlösung $AgNO_3$ erfolgten, konnte das Indikatorverfahren mit den Analysen aus den LIBS-Messungen im 0-RBM-Versuch gekoppelt werden. Dadurch können Betone, die zuvor bereits mit $NaCl$ im CDF-Test beaufschlagt wurden, auf deren Eindringtiefe, die sich im anschließenden RBM-Versuch ergibt, untersucht werden (vgl. auch [LK23]).

Hierzu wurde eine Zylinderhälfte mit dem Indikator $AgNO_3$ besprüht und die Eindringtiefen gemessen. Die andere Zylinderhälfte wurde mit LIBS analysiert und Bromidprofile erstellt. Die mittels Indikatorlösung gemessenen Eindringtiefen $x_{d,AgNO_3}$ (≡ farbauslösender Bromidgehalt, Annahme analog zu [Tan96]: $c_0 = 0{,}07$ [mol/l]) dienten als Eingangswert, um den Schnittpunkt aus den Bromidprofilen zu bestimmen. Somit ergibt sich der Bromidgehalt $c_{d,Br,LIBS}$ aus den LIBS-Messungen, der dem farbauschlaggebenden Bromidgehalt mittels Indikator entspricht. In Abbildung 3-36 ist das Vorgehen zur Ermittlung von $c_{d,Br,LIBS}$ exemplarisch dargestellt.

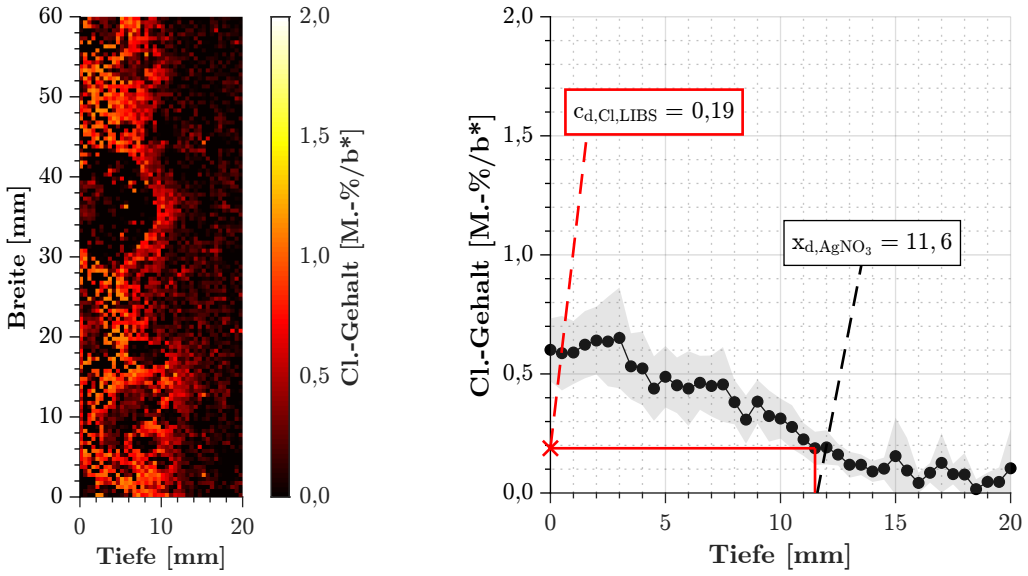


(a) 2D-Bromidverteilung. **(b)** LIBS-Bromidprofil aus (a).

Abb. 3-36: 0-RBM mit einer $NaBr$-Konzentration von 0,5 [mol/l] vor Start der CDF-Prüfung. CEM I, w/b = 0,5, LP = 10,0 Vol.-%. 2D-Bromidverteilung (a) und Bromidprofil (b). Bestimmung von $c_{d,Br,LIBS}$ durch $x_{d,AgNO_3}$ aus Indikatormethode. Angabe des 95 % Konfidenzintervalls.

Zur Absicherung des zuvor genannten Vorgehens im Migrationsversuch mit $NaBr$ wurde zusätzlich stichprobenhaft das gleiche Vorgehen in Versuchen mit $NaCl$ durchgeführt und analog der Chloridgehalt $c_{d,Cl,LIBS}$ bestimmt. Er entspricht dem Gehalt der Profile, bei dem der farbauslösende Umschlagspunkt mittels Indikatorlösung bestimmt wurde. Für den Beton mit

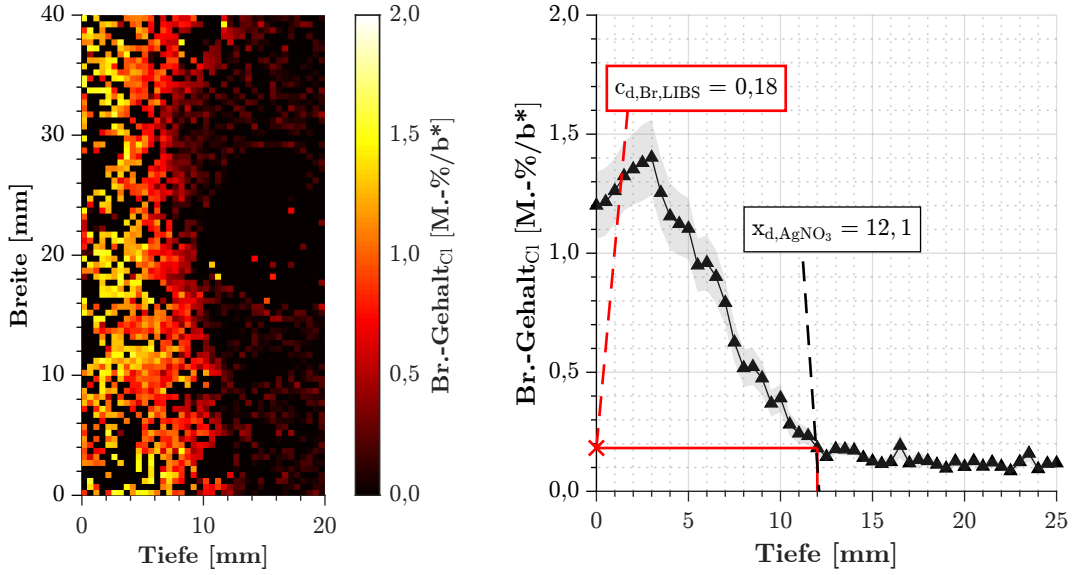
dem Bindemittel CEM I+SFA (k=0,4) und einer Konzentration von 1,7 [mol/l] (≡ 10,0 M.-% $NaCl$ oder 17,6 M.-% $NaBr$) ergab sich $c_{d,Cl,LIBS}$ zu 0,20 [M.-%/b*] , und für den Beton mit dem Bindemittel CEM II/A-S mit einer Ionenkonzentration von 0,5 [mol/l] (≡ 3,0 M.-% $NaCl$ oder 5,3 M.-% $NaBr$) ergab sich $c_{d,Br,LIBS}$ zu 0,14 [M.-%/b*] jeweils ohne Luftporen, mit einem w/b-Wert von 0,5 ermittelt. In der Abbildung 3-38 ist das Vorgehen exemplarisch dargestellt, das in einem Migrationsversuch mit $NaCl$ durchgeführt wurde.



(a) 2D-Chloridverteilung **(b)** Chloridprofil aus (a)

Abb. 3-37: 0-RCM mit einer $NaCl$-Konzentration von 1,7 [mol/l] vor Start der CDF-Prüfung. w/b = 0,5, LP = 0,9 Vol.-%. 2D-Chloridverteilung (a) und Chloridprofil (b). Bestimmung von $c_{d,Cl,LIBS}$ durch $x_{d,AgNO_3}$ aus Indikatormethode. Angabe des Integrals von $x = 0$ [mm] bis $x_{d,AgNO_3}$ und des 95 % Konfidenzintervalls.

Bevor die Untersuchungen an einer Vielzahl von Betonen im 0-RBM-Test mit $NaBr$ und einer Konzentration von 0,5 [mol/l] stattfanden, erfolgten zuvor noch Versuche mit erhöhter $NaBr$-Konzentration von 1,7 [mol/l] analog zu den Versuchen mit $NaCl$. Hier wurden ebenfalls vergleichbare Ergebnisse in Hinblick auf die beiden Salzarten und den ermittelten Kennwert $c_{d,Br,LIBS}$ festgestellt.



(a) 2D-Bromidverteilung **(b)** Bromidprofil aus (a)

Abb. 3-38: 0-RBM mit einer $NaBr$-Konzentration von 1,7 [mol/l] vor Start der CDF-Prüfung. CEM I+SFA, w/b = 0,5, LP = 0,9 Vol.-%. 2D-Bromidverteilung (a) und Bromidprofil (b). Bestimmung von $c_{d,Br,LIBS}$ durch $x_{d,AgNO_3}$ aus Indikatormethode. Angabe des 95 % Konfidenzintervalls.

Es ist zu erkennen, dass $c_{d,Cl,LIBS}$ und $c_{d,Br,LIBS}$ bei beiden Betonen vergleichbare Ionengehalte aufweisen. Die mit LIBS ermittelten Bromidgehalte in [M.-%/b*] , bei der durch die Koppelung mit der Indikatormethode ein Farbumschlag nach dem RBM-Versuch eintritt, können unabhängig von der Salzkonzentration (vgl. auch Kapitel 3.4.2) für die weiteren Untersuchungen verwendet werden.

Damit nun der Gehalt $c_{d,Br,LIBS}$ für die zu untersuchenden Betone (vgl. Kapitel 3.1.2, Tabelle 3-7) statistisch abgesichert werden kann, wurde die Stichprobengröße erhöht. Die Prüfungen fanden parallel zum Startzeitpunkt des Frost-Tausalz-Angriffes in der CDF-Prüfung statt. Somit wird, wie bereits erwähnt, der Eindringwiderstand vor Frostangriff ermittelt.

Berücksichtigt man sämtliche Betone aus Tabelle 3-7 in Hinblick auf $c_{d,Br,LIBS}$ (vgl. Abb. 3-39), so ist zu erkennen, dass die Werte normalverteilt sind und mit einem Variationskoeffizient von $CoV = 23,4[\%]$ in einem Bereich streuen, der üblich für Betonuntersuchungen ist. Der Kennwert $c_{d,Br,LIBS}$ kann verwendet werden. Im Anhang A-4 sind die Einzelwerte gelistet.

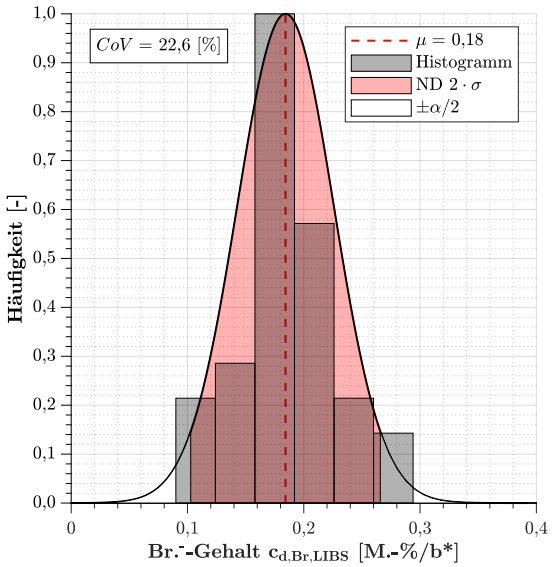


Abb. 3-39: Normalverteilung (ND = Normal Distribution) der $c_{d,\mathrm{Br,LIBS}}$-Werte (n = 3) aus Tabelle 3-7 mit dem Mittelwert μ = 0,18 [M.-%/b*], der Standardabweichung σ = 0,04 [M.-%/b*] bei einem Signifikanzniveau von α = 5 % und einem Variationskoeffizient CoV = 22,6 %. Bereich, in dem die Mittelwerte innerhalb von $\mu \pm 2 \cdot \sigma$ ($\equiv$ 95,45 %).

Durch den Kennwert $c_{d,Br,LIBS}$ können anschließend die Eindringwiderstände im RBM-Test von Betonen, die zuvor mit $NaCl$ z. B. in der CDF-Prüfung beaufschlagt wurden, ermittelt werden. Der Indikator würde sowohl unter der Anwesenheit von Bromid wie Chlorid zu einem Farbumschlag führen. Daher wäre eine Differenzierung zwischen eingetragenen Ionen aus dem Frostangriff und Ionen aus der Migration nicht möglich. Es ist nun umsetzbar, Probekörper mit unbekannten Eindringprofilen, die sich aus den Migrationstests ergeben, zu untersuchen. Es ist nicht mehr notwendig, die Eindringtiefen mittels Indikatormethode zu kennen, da nun u.a. die Tiefen mit Hilfe des Kennwerts $c_{d,Br,LIBS}$ ermittelt werden können. Ferner ist durch die Koppelung der herkömmlichen Indikatormethode mit $AgNO_3$ und den Bromidprofilen die genaue Kenntnis über den freien Ionengehalt (Cl^- oder Br^-) nicht mehr von Relevanz, da im Kennwert $c_{d,Br,LIBS}$ der von mehreren Parametern abhängige Farbumschlagspunkt enthalten ist. [Tan96] verwendet auf Basis von [ONN92] den Farbumschlagspunkt bei 0,07 [mol/l] freie Chloridionenkonzentration.

Vergleicht man den Farbumschlagspunkt c_d in [mol/l] bei der Tiefe $x_{d,AgNO_3}$ in [mm] $c_{d,Br,LIBS}$ in [M.-%/b*] aus Abbildung 3-38 qualitativ mit Abbildung 3-40, wird ersichtlich, dass sich das Vorgehen mit der herkömmlichen Methode bei Betrachtung des s-förmigen Kurvenverlaufes deckt. Durch dieses Vorgehen können Unsicherheiten bezüglich der farbausschlaggebenden Chloridkonzentration bei Verwendung des Indikators $AgNO_3$ vermieden werden. In der Regel wird davon ausgegangen, dass der Farbumschlag bei einer Chloridkonzentration von $c_d = 0,07$ [mol/l] (vgl. [Tan96] basierend auf [ONN92]) stattfindet. Die gezeigten Migrationsprofile in den Abbildungen 3-38 und 3-36 zeigen hierbei einen vergleichbaren Verlauf wie die theoretischen Migrationsprofile aus Abbildung 3-40 (vgl. auch [Tan96][Lay06][Geh00]).

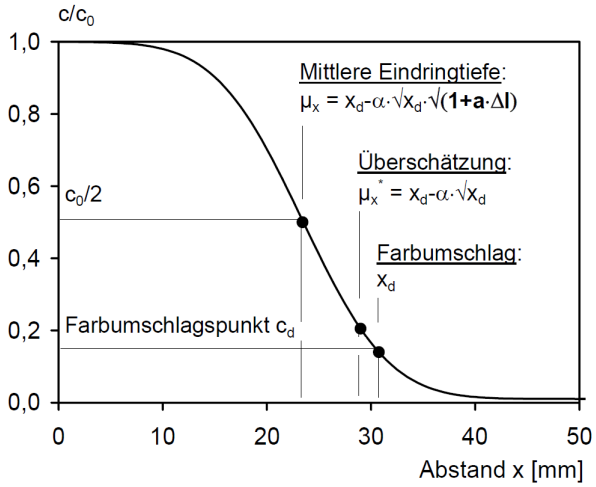


Abb. 3-40: Theoretisches Chloridprofil nach RCM-Test aus [Lay06] für den qualitativen Abgleich des Farbumschlagspunktes c_d [-] bei $x_{d,AgNO_3}$ mittels Indikator bei $c_{d,Br,LIBS}$ in [M.-%/b*] aus dem LIBS-Profilen

In den hier vorgestellten Untersuchungen werden überwiegend Betone mit künstlich zugeführten Luftporen (LP) auf die Widerstandsfähigkeit des Eindringens nach dem CDF-Test [Set] im RBM-Test getestet. Der Fokus liegt hierbei auf LP-Betone, die für den Einsatz der XF-Exposition geeignet sein sollten. Die Betone ohne künstlich eingeführte LP dienen dazu, dass durch den Frost mindestens im oberflächennahen Bereich mit hoher Wahrscheinlichkeit Gefügeschädigungen im CDF-Test entstehen. Die im CDF-Test hervorgerufenen Schädigungen des Betongefüges führen zu Rissen, die den Transport von Ionen beeinflussen. In diesen Rissen ist von Kapillartransport auszugehen.

In z. B. [KTGG17] wird der durch [Lay06] entwickelte Rapid Iodide Migration Test (≡ RIM-Test) bis auf eine Betonrezeptur an Betonen ohne künstlich zugeführte Luftporen (LP) durchgeführt. Zusammenfassend kann in Bezug auf die Widerstandsfähigkeit von Betonen im Migrationstest gesagt werden, dass der Widerstand gegenüber dem Eindringen von Iodid (≡ Chlorid) im RIM-Test bei Betonen ohne LP um bis zu 2,5 Mal verringert wird. Die getesteten Betone wurden in diesen Untersuchungen zwischen ca. zehn bis 60 Frost-Tausalz-Wechseln (FTSW) im CDF-Test mit einer 3,0 M.-%-igen $NaCl$-Lösung ausgesetzt. Die Rezeptur mit LP (CEM I, w/b = 0,45) hingegen weist keine Verschlechterung des Widerstandes im RIM-Test, der sich zuvor im CDF-Test befand, auf. Zwischen dem 40. und 60. FTSW nimmt der Migrationskoeffizient ab. Diese Beobachtung konnte in dieser Arbeit ebenfalls bei LP-Betonen bestätigt werden.

Die analytische Lösung zur Annäherung des Chloridprofils in RCM-Test ist durch [Tan96] eingeführt worden. Sie beinhaltet die Transportmechanismen Diffusion und Migration, wobei die Migration wegen der Stärke des anliegendes elektrischen Feldes deutlich überwiegt. Dieses Modell hat sich etabliert und wurde z. B. von [Lay06] weiterentwickelt. Der Grund für die Weiterentwicklung waren Abweichungen von Chloridprofilen zum analytischen Ansatz. Die Chloridprofile wurden durch Abdrehen von Zylindern nass-chemisch auf den Chloridgehalt analysiert (vgl. alternative Analysemethodik in Kapitel 3.2.1). Bei der Überlagerung der Chloridprofile mit dem

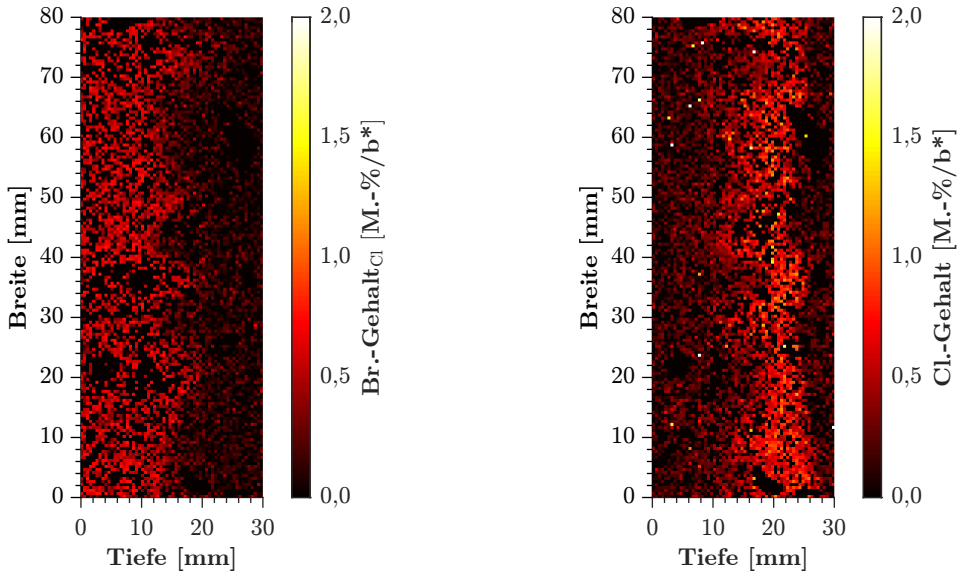
zuvor erwähnten Modellansatz stellte sich heraus, dass die Steigung der Chloridprofile von der Steigung, die durch die analytische Lösung erzeugt wird, z.T. stark abweicht. In [Lay06] kann die Anpassung durch Implementierung der Dispersivität in das von [Tan96] aufgestellte Modell nachgelesen werden.

3.4.4 Ionentransport nach Frost-Tausalz-Angriff und Migration

Durch die 2D-Analysen mit LIBS können die Probekörper aus dem CDF-Test mit nachgeschaltetem RBM-Test in Hinblick auf deren Ionentransport betrachtet werden. Hierfür werden beide Ionenarten (Cl^- und Br^-) zur Veranschaulichung in einem Profil kombiniert dargestellt.

Die Chloridionen wurden im CDF-Test und Bromidionen im anschließenden Migrationstest eingetragen. Durch die angelegte Spannung im Migrationstest werden die Chloridionen weiter ins Betoninnere migriert. Zeitgleich werden Bromidionen aus der Prüflösung des RBM-Versuches in Bereiche des Betons eingebracht, die vorher im CDF-Versuch mit der 3,0-%-igen $NaCl$-Lösung beaufschlagt wurden. Die Analysen fanden zu den Zeitpunkten des 14. und 28. FTSW statt. Durch die überlagerte Darstellung, deren Einzelergebnisse in den Anhängen A-11, A-12) dargestellt sind, kann das Eindringverhalten der Ionen aus den gekoppelten Versuchen detailliert betrachtet werden.

In Abbildung 3-41 sind die 2D-Ionenverteilungen von Br^- und Cl^- mit dem dazugehörigen kombinierten Profil in Abbildung 3-42 dargestellt. Die 2D-Darstellungen sind am selben Probekörper nach dem 14. FTSW mit nachgeschaltetem RBM-Versuch erstellt worden.



(a) Bromidverteilung **(b)** Chloridverteilung

Abb. 3-41: 14. FTSW. Bromid- (b) und Chloridverteilung (b) von demselben PK (CEM I, w/b = 0,5, LP = 10,0 Vol.-%) in 2D-Darstellung aus LIBS-Messung mit anschließenden RBM-Versuch.

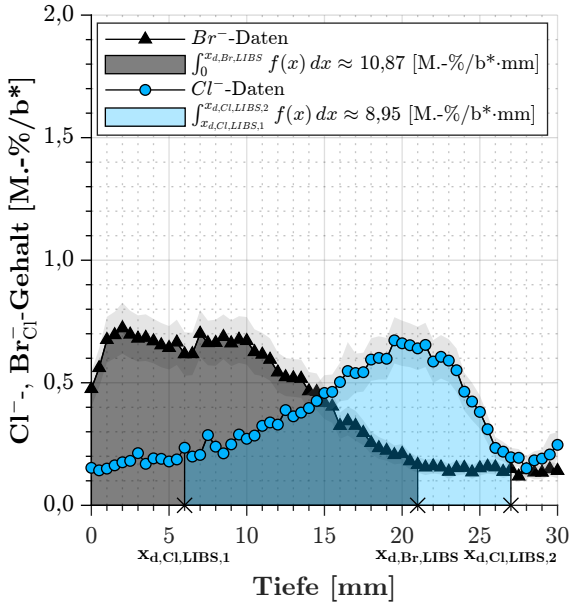
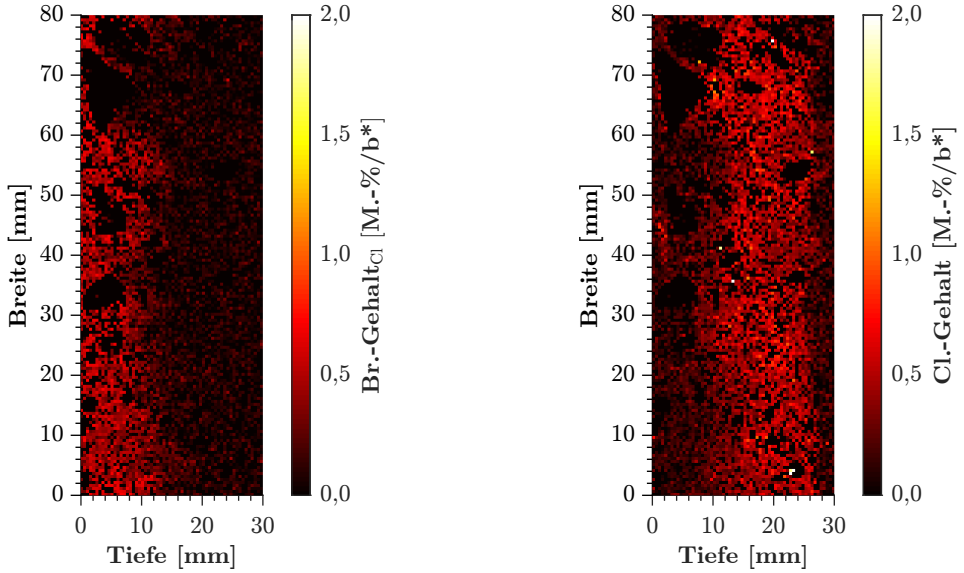


Abb. 3-42: Bromid- und Chloridprofil aus LIBS-Messung aus Abb. 3-41 nach dem 14. FTSW. Angabe der Integrale von Bromid von $x = 0$ mm bis $x_{d,Br,LIBS}$ unter Berücksichtigung von $c_{d,Br,LIBS}$ aus Abb. 3-39 und von Chlorid von $x_{d,Cl,LIBS,1}$ (linke Grenze) bis $x_{d,Cl,LIBS,2}$ (rechte Grenze) unter Berücksichtigung der Erfassungsgrenze $x_{EG} = 0,2$ [M.-%/b*] von Chlorid (vgl. Kapitel 3.2.2). Angabe des 95 % Konfidenzintervalls angegeben.

Vergleicht man die 2D-Ionenverteilungen (vgl. Abb. 3-43) und die kombinierten Profile 3-44) nach weiteren 14 FTSW, also nach dem 28. FTSW, mit denen nach dem 14. FTSW (vgl. Abb. 3-41 und Abb. 3-42), zeigen die Ergebnisse den Einfluss von Abdichtungseffekten. Es ist davon auszugehen, dass sich durch den Frost-Tausalz-Angriff Chloride in der Porenlösung anreichern, sodass die Bromidionen im anschließenden RBM-Test am Eindringen gehindert werden. Es ist im Vergleich zwischen dem 14. und 28. FTSW ferner neben der Abnahme der eingetragenen Bromidmenge zu erkennen, dass sich die Chloridverteilung zwar nicht zwangsläufig in tiefere Bereiche des Betons verlagert, aber sie sich über einen breiteren Bereich zur Oberfläche hin verteilt. Vergleicht man allerdings die eingetragene Chloridmenge, so ist eine leichte Erhöhung festzustellen.



(a) Bromidverteilung **(b)** Chloridverteilung

Abb. 3-43: 28. FTSW. Bromid- (a) und Chloridverteilung (b) von demselben PK (CEM I, w/b = 0,5, LP = 10,0 Vol.-%) in 2D-Darstellung aus LIBS-Messung mit anschließendem RBM-Versuch.

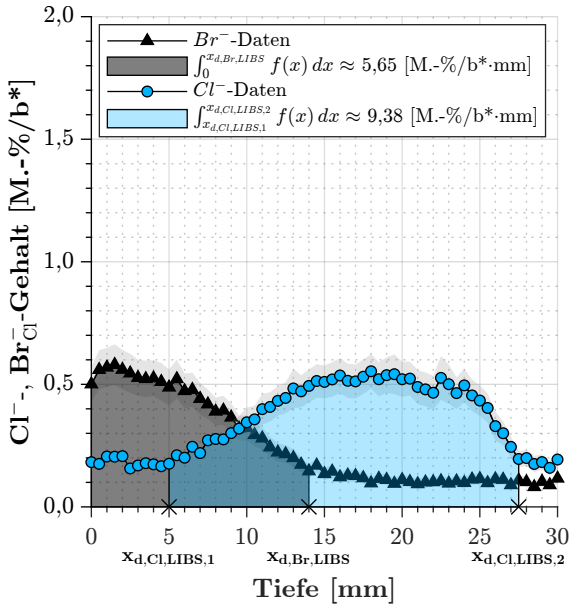


Abb. 3-44: Bromid- und Chloridprofil aus LIBS-Messung aus Abb. 3-43 nach dem 28. FTSW. Angabe der Integrale von Bromid von $x = 0$ mm bis $x_{d,Br,LIBS}$ unter Berücksichtigung von $c_{d,Br,LIBS}$ aus Abb. 3-39 und von Chlorid von $x_{d,Cl,LIBS,1}$ (linke Grenze) bis $x_{d,Cl,LIBS,2}$ (rechte Grenze) unter Berücksichtigung der Erfassungsgrenze $x_{EG} = 0,2$ [M.-%/b*] von Chlorid (vgl. Kapitel 3.2.2). Angabe des 95 % Konfidenzintervalls angegeben.

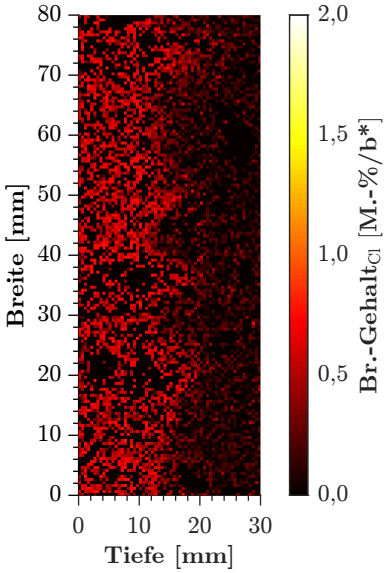
3.4.5 Bromideindringwiderstände nach Frost-Tausalz-Angriff

Der Frost-Tausalz-Angriff kann sowohl Gefügeschädigungen durch das kryogene Saugen und die Mikroeislinsenpumpe hervorrufen als auch den Eindringwiderstand, der in Migrationstests (RBM-Test) ermittelt wird, beeinflussen. Daher ist die Kenntnis der Eindringwiderstände nach

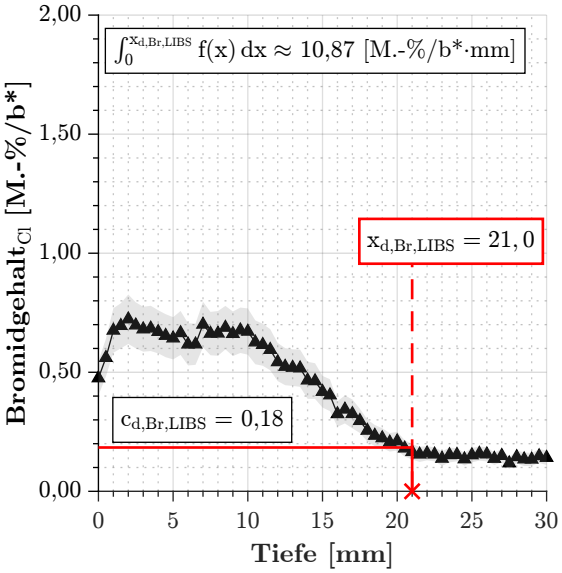
einem bereits erfolgten Frost-Tausalz-Angriff von Interesse. Diese Untersuchungen wurden an Probekörpern im RBM-Test durchgeführt. Sie wurden aus denselben Probekörpern (vgl. Kapitel 3.4.4), die sich in der CDF-Prüfung befanden, durch Kernbohrungen hergestellt, sodass der Einfluss des Frost-Tausalz-Angriffs auf den Eindringwiderstand im RBM-Test analysiert werden kann. Da sich in den Probekörpern durch den zuvor erfolgten Frost-Tausalz-Angriff Chloride befanden, wurden sie im Anschluss an die RBM-Tests auf deren Bromid- und Chloridgehalt hin analysiert. Es wurde in Kapitel 3.4.3 gezeigt, dass die Migrationsversuche gleichwertig mit $NaBr$ durchgeführt werden können. Die Aussagen, die sich aus den Migrationstests mit $NaBr$ ergeben, können gleichbedeutend auf den Chlorideindringwiderstand angewendet werden.

Mit Hilfe der Koppelung des herkömmlichen Indikatorverfahrens mit der Analysemethode LIBS (vgl. Kapitel 3.4.3) können die Bromideindringtiefen $x_{d,Br,LIBS}$ und die Bromideindringmengen $\int_0^{x_{d,Br,LIBS}} f(x)\ dx$ an Probekörpern ermittelt werden. Die Probekörper befanden sich vor dem Migrationstest in der CDF-Prüfung und wurden dort mit einer 3,0 M.-%-igen $NaCl$-Lösung beaufschlagt. Anschließend wurden aus den Probekörpern der CDF-Prüfung Zylinder herausgebohrt, die im anschließenden RBM-Versuch mit einer 3,0 M.-%-igen $NaBr$-Prüflösung auf deren Eindringwiderstände nach dem 14. FTSW und 28. FTSW getestet wurden (vgl. auch [LK23]).

In Abbildung 3-45 sind die Bromideindringwiderstände (≡ Eindringtiefe und -menge) nach dem 14. FTSW und anschließendem RBM-Versuch exemplarisch dargestellt. Die Bestimmung von $x_{\mathrm{d,Br,LIBS}}$ erfolgt durch Ermittlung des Schnittpunktes von $c_{\mathrm{d,Br,LIBS}}$ mit dem Bromidprofil aus der LIBS-Messung. Die hiermit bestimmte Eindringtiefe $x_{\mathrm{d,Br,LIBS}}$ entspricht also der herkömmlich ermittelten Eindringtiefe $x_{\mathrm{d,Br}}$ mit dem Indikator $AgNO_3$ und kann somit für die Berechnung des Migrationskoeffizienten nach [DIN21] verwendet werden. Die Bromideindringmengen wurden bis in eine Tiefe von $x_{\mathrm{d,Br,LIBS}}$ $\int_0^{x_{d,Br,LIBS}} f(x)\ dx$ berechnet.



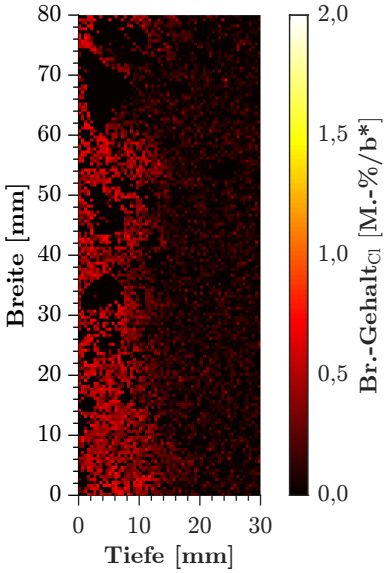
(a) 2D-Bromidverteilung.



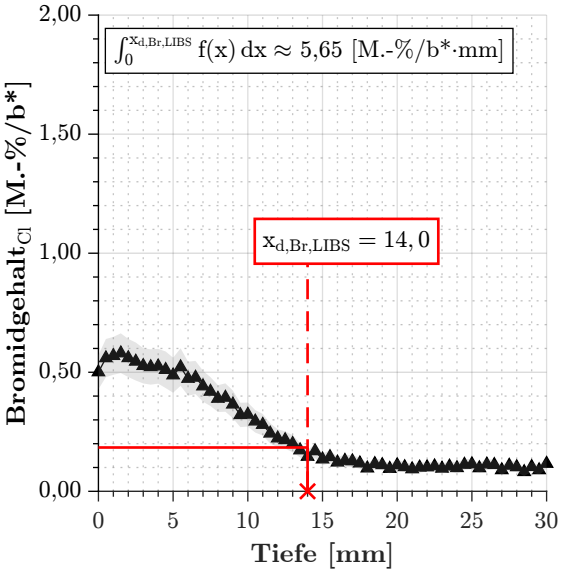
(b) Bromidprofil aus (a). Angabe der Eindringtiefe $x_{d,Br,LIBS}$ von einem PK unter Verwendung von $c_{d,Br,LIBS}$ aus Abb. 3-39. Angabe des Integrals von $x = 0$ bis $x = x_{d,Br,LIBS}$ und des 95 % Konfidenzintervalls.

Abb. 3-45: 14. FTSW. CEM I, w/b = 0,5, LP = 10,0 Vol.-% mit anschließendem RBM-Versuch.

Wird der Beton weiteren FTSW's mit $NaCl$ ausgesetzt, so ist aus Abbildung 3-46 beispielhaft zu erkennen, dass sich der Bromideindringwiderstand im RBM-Versuch erhöht. D.h. sowohl die eingetragene Bromidionenmenge als auch die Eindringtiefe verringern sich. Die Eindringtiefe nach 0 FTSW beträgt 23,0 mm, nach dem 14. FTSW 19,9 mm und nach 28 FTSW 15,4 mm.



(a) 2D-Bromidverteilung.



(b) Bromidprofil aus (a). Angabe der Eindringtiefe $x_{d,Br,LIBS}$ von einem PK unter Verwendung von $c_{d,Br,LIBS}$ aus Abb. 3-39. Angabe des Integrals von $x = 0$ bis $x = x_{d,Br,LIBS}$ und des 95 % Konfidenzintervalls.

Abb. 3-46: 28. FTSW. CEM I, w/b = 0,5, LP = 10,0 Vol.-% mit anschließendem RBM-Versuch.

Betrachtet man nun in Abbildung 3-47(a) alle untersuchten Betonsorten auf deren Bromideindringwiderstände in Hinblick auf die Eindringtiefen $x_{d,Br,LIBS}$ nach dem 14. und 28. FTSW, wird ersichtlich, dass alle Betone mit künstlich zugeführten Luftporen eine über die Dauer des Frost-Tausalz-Angriffs verminderte Eindringtiefe aufweisen. Aufgrund der Einwirkung aus den Frostzyklen kommt es in Abhängigkeit der Anzahl an FTSW zu einer Wassersättigung der Probekörper im CDF-Test. Das krygogene Saugen im oberflächennahen Bereich mit einem Rest ungefrorener $NaCl$-Lösung sorgt für den Nachschub an Flüssigkeit. Die Mikrolinsenpumpe sorgt hingegen für den Weitertransport der Flüssigkeit ins Betoninnere. Dadurch kommt es zu einer Erhöhung der Flüssigkeitssättigung im Betonprobekörper. Durch den Pumpeneffekt während der Frost-/Tauphasen gelangen vermehrt Chloride in das Porensystem. Dies führt als maßgebender Prozess zu einem Abdichtungseffekt. Durch das Angebot an Flüssigkeit mit darin gelösten Chloriden reichern sich immer mehr Chloride in den Kapillarporen an. Da die Druckunterschiede beim Frost-Tausalz-Angriff auch die Gelporenlösung zur Aufrechterhaltung des thermodynamischen Gleichgewichts aktivieren, werden die Gelporen vermutlich weiter mit Chloriden (vgl. hierzu auch Kapitel 3.3.5) und ggf. Natrium gefüllt. Das weitere Eindringen von Ionen im anschließenden RBM-Versuch ist somit mit steigender Anzahl an FTSW immer mehr gehemmt. Es können auch weitere Abdichtungsursachen wirksam werden. So können bei puzzolanischen Bindemitteln geometrische und ionogene Porenverschlusseffekte nach [Wie05] auftreten. Aufgrund der Bildung weiterer C-S-H-Phasen während der puzzolanischen Reaktion können die Querschnitte der Kapillarporen reduziert werden. Dadurch ist der weitere Transport gehemmt. Aufgrund der Reduzierung des Querschnitts kann es zu einer Wechselwirkung zwischen den Chloridionen und den elektrischen Doppelschichten an den Porenwandungen kommen, die die Transportge-

schwindigkeit von Ionen zusätzlich reduziert. Der Einfluss der voranschreitenden Hydratation zwischem dem 14. und 28. FTSW (≡ Dauer von sieben Tagen) wird als gering eingeschätzt. Zum einen beträgt das Alter der Probekörper beim 14. FTSW 42 Tage und zum anderen beträgt die Temperatur in der CDF-Prüfung im Mittel -3,33 °C (vgl. Abb. 3-9). Aufgrund der recht kurzen Abstände zwischen den Analysezeitpunkten und dem Einfluss der niedrigen Temperatur ist der Ablauf der Hydratation und die damit verbundenen Verdichtungseffekte als gering einzuschätzen. Der Hydratationsgrad kann nach Glg. 4-XV in Kapitel 4.2.1 berechnet werden. Vergleichrechnungen ergaben, dass sich der Hydratationsgrad zwischen dem 42. (≡ 14. FTSW) und 49. Herstelltag (≡ 28. FTSW) im zweiten Nachkommastellenbereich bewegt. Der Einfluss ist demnach als sehr gering anzusehen.

Der Abdichtungseffekt bei LP-Betonen durch die Frostexposition im CDF-Versuch führt in Abhängigkeit der Frostdauer zu einer verminderten Bromidmenge im Beton (vgl. auch die Integrale der elektrischen Ladungsmengen im RBM-Test aus Kapitel 3.4.7 in Tabelle 3-50(b)).

Das Eindringen im Migrationstest mit $NaBr$ ist daher aufgrund des bereits erfolgten Frost-Tausalz-Angriffes mit $NaCl$ reduziert. Dies führt zu einer Erhöhung des Bromidioneneindringwiderstandes. Der Widerstand gegenüber erneutem Bromidioneneindringen von zuvor befrosteten Betonen nimmt überwiegend aufgrund der durch die Frost-Tausalz-Wechsel hervorgerufenen Sättigung mit Wasser, in denen Chloridionen mit einer Konzentration von 0,5 [mol/l] (≡ 3,0 M.-%) gelöst sind, im RBM-Versuch zu.

Zusätzlich zur Eindringtiefe $x_{d,Br,LIBS}$ [mm] kann die eingetragene Bromidionemenge [M.-%/b*] von den untersuchten Betonen in Abbildung 3-48(a) bestimmt werden. Hierbei wird die Ionenmenge bis in die Tiefe $x_{d,Br,LIBS}$ mittels Integral nach Glg. 3-VI bestimmt.

Durch die Multiplikation des eingetragenen Bromidgehaltes [M.-%/b*] mit der Eindringtiefe $x_{d,Br,LIBS}$ [mm] werden die Integrale $\int_0^{x_{d,Br,LIBS}} f(x)\,dx$ [M.-%/b*·mm] (Glg. 3-VI) nach dem 14. und 28. FTSW berechnet. Aufgrund des kleinen Messrasters von 0,5 mm ist die Berechnung der Fläche mit Hilfe der Trapezregel ausreichend genau.

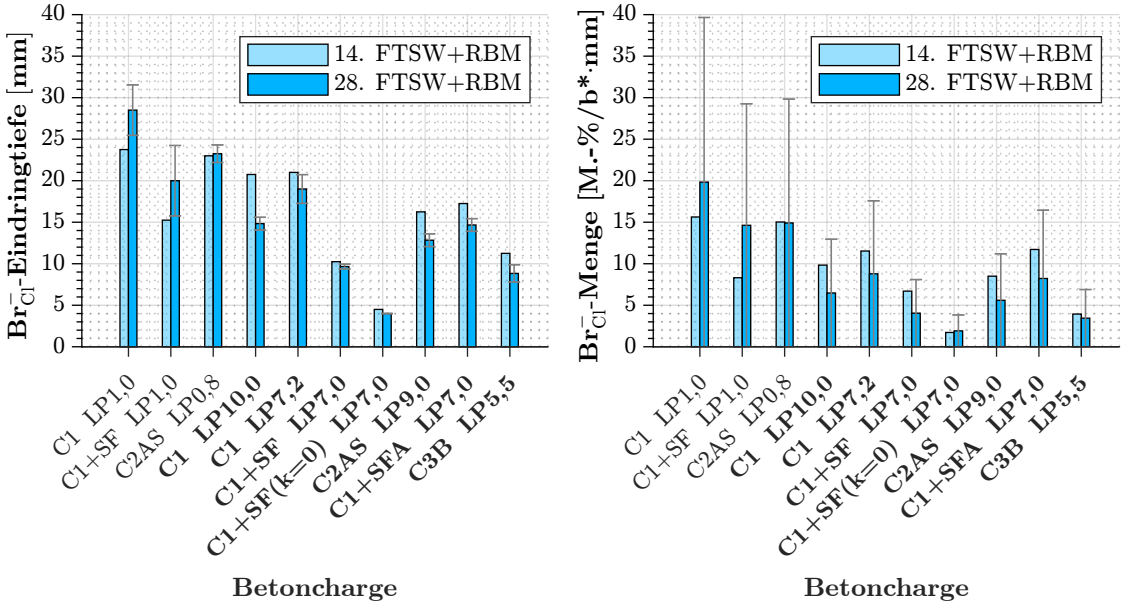
$$\int_a^b f(x)dx \approx \frac{b-a}{2}(f(a)+f(b)) \qquad \text{(Glg. 3-VI)}$$

mit:

$\int_a^b$ = eingetragene Br^-- oder Cl^--Ionenmenge [M.-%/b*·mm]
a = untere Intervallgrenze bei $x = 0$ [mm]
b = obere Intervallgrenze bei $x_{d,Br/Cl,LIBS}$ = Br.- oder Cl.-Eindringtiefe [mm]
$f(a)$ = Br^-- oder Cl^--Gehalt in der Tiefe a [M.-%/b*]
$f(b)$ = Br^-- oder Cl^--Gehalt in der Tiefe b [M.-%/b*]

Der zuvor genannte Trend von sinkenden Bromideindringtiefen bei sich erhöhender Anzahl an FTSW ist bei den Betonen mit künstlich zugeführten Luftporen bei der Bromidionenmenge ebenfalls erkennbar. Bei Betonen ohne künstlich zugeführte Luftporen ist auffällig, dass die

Streuungen in Hinblick zu LP-Betonen deutlich erhöht sind. Dies ist aufgrund der großen Gefügeschädigungen, die durch den Frost-Tausalz-Angriff hervorgerufen werden, erklärbar. Wegen der zuvor genannten Schädigungsmechanismen des kryogenen Saugens und der Mikroeislinsenpumpe wird das Gefüge im Vergleich zu LP-Betonen deutlich mehr geschädigt. Dies spiegelt sich auch in den Ultraschalllaufzeiten wider, welche ein Maß für die innere Schädigung darstellen. Da die Gefügeschädigungen von der beaufschlagten Oberfläche bis ins Innere des Betons reichen, verzerrt sich die Eindringfront sehr und somit auch die ermittelte Eindringtiefe in den Bromidprofilen. Ebenso sind die eingetragenen Bromidionemengen aufgrund unterschiedlich großer Rissweiten sehr unterschiedlich. Beides führt zu sehr streuenden Ergebnissen, das sich sowohl in den Eindringtiefen als auch in den Bromidionenmengen in Abbildung 3-47 (erste drei Beton, nicht fett gedruckt) zeigt.



(a) Eindringtiefen $x_{d,Br,LIBS}$ unter Verwendung von $c_{d,Br,LIBS}$ aus Abbildung 3-39.

(b) Eingetragene Bromidionenmengen bis in die Tiefe $x_{d,Br,LIBS}$ anhand der Integrale $\int_0^{x_{d,Br,LIBS}} f(x)\,dx$. Angabe der Standarabweichungen.

Abb. 3-47: Gegenüberstellung der Br^--Eindringtiefen Abb. 3-47(a)/-mengen Abb. 3-48(a) mit anschließenden RBM-Versuchen nach dem 14. (n = 2 je Charge) und 28. FTSW (n = 3 je Charge) von den untersuchten Betonchargen nach Tabelle 3-7.

Der Einfluss der Karbonatisierung, der während der Vorlagerung (1d-Schalung/6d-Wasser/21d-Lagerung bei 20 °C/65 RH) stattfindet, kann zumindest auf Basis von Untersuchungen im Rahmen des Forschungsprojektes „Dauerhaftigkeit von Beton nach dem Performance-Prinzip: Klassifikation Materialwiderstände, Produktionskontrolle (PC), Konformitätskriterien und -kontrolle (CC)“bei Bindemittelarten mit moderaten Hüttensandgehalten (ca. Gehalte bis CEM III/A) als gering eingeschätzt werden. Dennoch kann das Porengefüge bei hüttensandhaltigen Betonen u. a. durch diese Einflüsse aufgeweitet werden und durch einen Sprung in der Porosität zu erhöhten Abwitterungen führen (vgl. auch Kaptitel 4.1.5, Abb. 4-59) Im Labor wurden an der HCU und an zwei weiteren Instituten (KIT, VDZ) die Karbonatisierungstiefen durch die Indi-

katormethode mittels Phenolphthalein gemessen. Die Messungen fanden statt, bevor die Betone (CEM III/A) in die beschleunigte Karbonatisierungsprüfung nach [DIN] gegeben wurden. Es waren keine Eindringtiefen nach Aufbringen des Indikators Phenolphthalein messbar.

Aufgrund der nicht messbaren Carbonatisierungstiefen vor CO_2-Beaufschlagung bei 3,0 Vol.-% ist der Carbonatisierungseinfluss der Probekörper, die für die Frost-Tausalz-Untersuchungen verwendet wurden, mindestens bei Betonen mit geringen bis moderaten Hüttensandgehalten als gering einzuschätzen. Da, wie bereits erwähnt, mehrere Elemente bei den LIBS-Messungen simultan aufgezeichnet werden, wurde auch das Element Kohlenstoff betrachtet. Es zeigte sich in der Betonrandzone kein erhöhter Kohlenstoffgehalt. Dies kann neben den Carbonatisierungstiefen mittels Indikator als weiteres Indiz angesehen werden, dass wenig Carbonatisierung stattgefunden hat. In Kapitel 4.1.5 in Abbildung 4-59 wird allerdings ein physikalisches Modell modifiziert verwendet, das beim Bindemittel CEM III/B den Karbonatisierungseinfluss bei erhöhtem Hüttensandgehalt stichprobenhaft belegt.

Die genannten Ergebnisse verdeutlichen, dass der Frost-Tausalz-Angriff aus der CDF-Prüfung in Hinblick auf die Eindringwiderstände, der in den anschließenden RBM-Tests ermittelt wurde, zu keiner Verschlechterung der Dauerhaftigkeit in Hinblick auf den Bromideindringwiderstand bei LP-Betonen führt. An dieser Stelle ist wichtig anzumerken, dass die Widerstände von LP-Betonen über die Befrostungsdauer zwar zunehmen, allerdings verschlechtert sich zeitgleich der Chlorideindringwiderstand. So erhöhen sich z. B. die eingetragenen Chloridmengen mit zunehmender Anzahl an FTSW. D.h. die Betrachtung des Einflusses eines Frost-Tausalz-Angriffes auf den Bromidtransport im Rahmen des nachgeschalteten RBM-Tests muss in Kombination mit den eingetragenen Chloriden aus der zuvor erfolgten CDF-Prüfung betrachtet werden. Diese Betrachtung erfolgt in Kapitel 3.4.6.

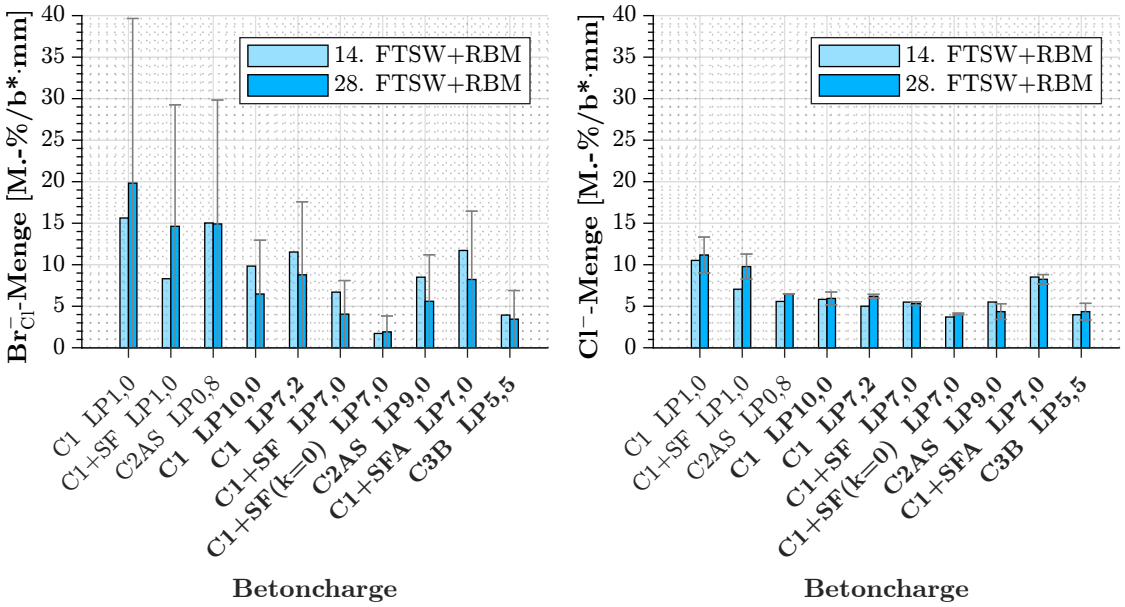
3.4.6 Chlorideindringen nach Frost-Tausalz-Angriff und Migration

Um das Chlorideindringen in Abhängigkeit von der Anzahl der FTSW im CDF-Test mit anschließendem RBM-Versuch zu betrachten, wurden nach dem 14. und 28. FTSW sowohl die eingetragenen Bromid- als auch die Chloridmengen über die Tiefe ermittelt. Wie in Kapitel 3.4.5 beschrieben, erhöhen sich die Bromideindringwiderstände bei kombinierter Beaufschlagung von $NaCl$ im CDF-Test und von $NaBr$ im darauffolgenden Migrationsversuch (vgl. Abb. 3-47).

Es ist aufgrund der Koppelung der unterschiedlichen Untersuchungen, die sich aus Frost-Tausalz-Angriff und dem anschließenden RBM-Test ergeben, notwendig, auch die eingetragenen Chloridionen in die Betrachtung mit einzubeziehen. Einhergehend mit einer Reduzierung der Bromidionenmengen (Erhöhung des Widerstandes im RBM-Test) mit zunehmender Anzahl an FTSW, erhöhen sich parallel die Chloridionenmengen. In Abbildung 3-48(a) ist zu erkennen, dass sich die Bromidionenmenge vom 14. zum 28. FTSW reduziert, wohingegen sich die eingetragene Chloridionenmenge in Abbildung 3-49(b) leicht erhöht. Die Erhöhung des Chloridanteils aus dem Frost-Salz-Angriff aus dem CDF-Test sorgt für eine Abnahme der eingetragenen Bromidionen im nachfolgenden RBM-Test.

Durch die Frost-Tausalz-Zyklen kommt es überwiegend aufgrund des Wirkens der Mikroeis-

linsenpumpe nach [SA97] zu einer Erhöhung von Chlorid in LP-Betonen, obwohl weder innere Schädigungen im Rahmen von Ultraschallmessungen noch erhebliche Schädigungen im oberflächennahen Bereich in Bezug auf das abgewitterte Material festzustellen sind. Die Probekörper ohne künstlich zugeführte LP hingegen weisen aufgrund der Mikrorissschädigungen z.T. abweichende Ergebnisse auf. Dies ist durch konvektive Einflüsse zu erklären. Während Migrationsversuches kann es zu Auswaschungen in den Rissen und Mikrorissen kommen, sodass die Chloridgehalte vor dem RBM-Test höher sind als danach.

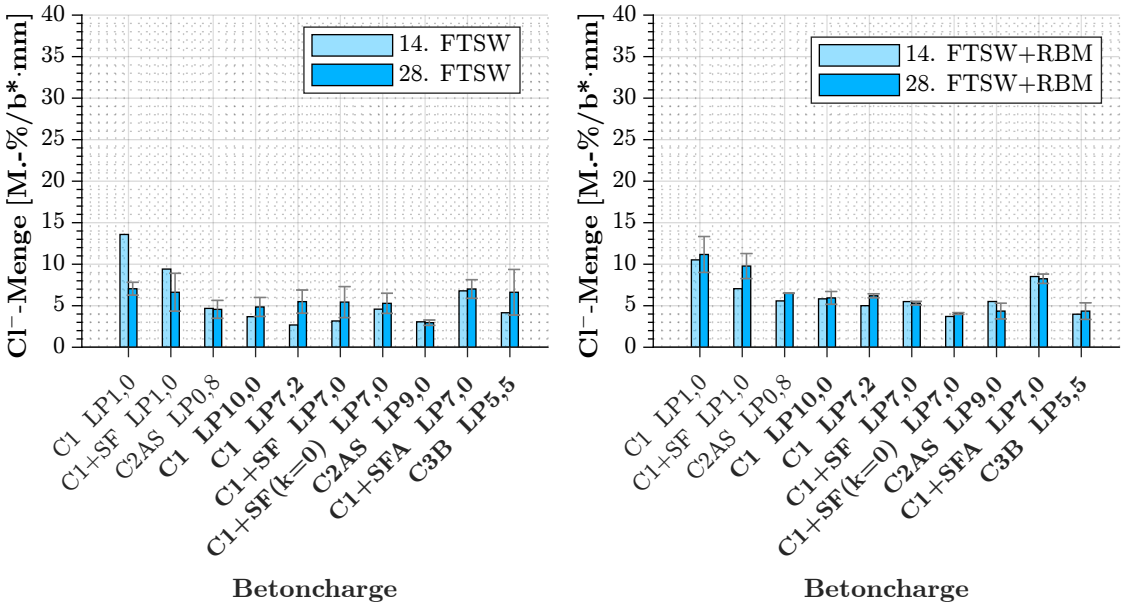


(a) Eingetragene Bromidionenmengen in [M.-%/b* · mm] bis in die Tiefe $x_{d,Br,LIBS}$ anhand der Integrale $\int_0^{x_{d,Br,LIBS}} f(x)\,dx$. Angabe der Standarabweichungen.

(b) Eingetragene Chloridionenmengen in [M.-%/b* · mm]] nach dem 14./28. FTSW mit anschließendem RBM-Test

Abb. 3-48: Gegenüberstellung der eingetragenen Bromid- (Abb. (a)) und Chloridionenmengen (Abb. 3-49(b)) nach Frost-Tausalz-Angriff im CDF-Test und anschließendem RBM-Test. Verringerung der Bromidmengen mit Erhöhung der Chloridmengen vom 14. zum 28. FTSW.

Da die Probekörper sowohl vor wie auch nach dem RBM-Test auf deren Chloridgehalt nach dem 14. und 28. FTSW analysiert wurden, muss die eingetragene Chloridmenge ähnlich sein. Daher wurden zusätzlich die Chloridmengen nach dem CDF-Test vor und nach dem RBM-Test bestimmt. In Abbildung 3-49 sind die Ergebnisse dargestellt. Sie machen deutlich, dass der RBM-Test im Anschluss an die CDF-Prüfung die detektierte Chloridmenge nicht beeinflusst.



(a) Eingetragene Chloridionenmengen in [M.-%/b* · mm] nach dem 14./28. FTSW

(b) Eingetragene Chloridionenmengen in [M.-%/b* · mm] nach dem 14./28. FTSW mit anschließendem RBM-Test

Abb. 3-49: Gegenüberstellung der eingetragenen Chloridionenmengen direkt nach der CDF-Prüfung (vor RBM-Test, Abb. 3-49(a)) und nach RBM-Test (Abb. 3-49(b)) zum 14. (n = 2 je Betoncharge) und 28. FTSW (n = 3 je Betoncharge, Angabe der Standardabweichungen). Chloridtransport durch das Anlegen des elektrischen Feldes von der Betonrandzone bis ins Innere des Betons im RBM-Test. Betonchargen nach Tabelle 3-7. Einzelergebnisse können den Anhängen A-11 und A-12 entnommen werden.

Durch den leicht erhöhten Chloridgehalt mit zunehmender Anzahl an FTSW erhöht sich demnach der Bromideindringwiderstand.

3.4.7 Stromflüsse während Migrationstest nach Frost-Tausalz-Angriff

Durch das Anlegen einer Spannung wird ein elektrisches Feld im Migrationstest erzeugt. Infolge des elektrischen Feldes werden mit Hilfe von Elektroden im Wasser gelöste, negativ geladene Teilchen wie Chlorid- oder Bromidionen (Cl^-, Br^-) zur positiv geladenen Anode migriert [Tan96] [BSL17] [Kur20]. Der Beton zwischen den Elektroden stellt hierbei den Widerstand dar. Je größer der Widerstand des Betons ist, desto kleiner ist der anfängliche Stromfluss. Die Höhe der anzulegenden Spannung U (zwischen 10 und 30 [V]) und die Laufzeit des Versuches richten sich nach der Qualität des Betons (vgl. Tabellen 1, 2, 3 in [DIN21]). Je dichter das Gefüge des Betons ist, desto größer ist sein Widerstand und somit die anzulegende Spannung und Laufzeit. Anhand der Stromflüsse können die elektrischen Ladungsmengen über die Laufzeit ermittelt werden (vgl. auch [SSPFH19]).

Die Porosität und Porenverteilung beeinflussen den Migrationswiderstand maßgebend. Sie sind stark abhängig vom verwendeten Bindemittel und w/b-Wert des Betons. Die Porosität des Betons nimmt i. A. mit steigendem w/b-Wert zu. Daher steigt der anfängliche Stromfluss bei diesen Betonen, da sich der Kapillarporenanteil erhöht und Poren untereinander vernetzt

sein können. Dies führt zu einem erhöhten elektrischen Ladungseintrag, der sich in höheren Stromflussraten messen lässt.

Um ergänzend zu Kapitel 3.4.5 die Widerstandsfähigkeit in Hinblick auf die Stromflüsse zu betrachten, wurden die Betone zu drei unterschiedlichen Zeitpunkten untersucht. Der erste Migrationstest der getesteten Betone fand zum Startzeitpunkt der CDF-Prüfung statt. Im 0-RBM-Versuch wurden die Betone vor dem Start des Frost-Tausalz-Angriffes geprüft. Die Probekörper sind beim 0-RBM-Test also nicht mit $NaCl$ beaufschlagt gewesen. Die beiden weiteren Prüfzeitpunkte waren während des Frost-Tausalz-Angriffes im Rahmen des CDF-Tests. Sie fanden nach dem 14. und 28. FTSW statt. Durch die Betrachtung der eingetragenen elektrischen Ladungsmengen zum 14. und 28. FTSW können zusätzlich zu den Ionenanalysen aus den vorherigen Kapiteln Schlussfolgerungen in Bezug auf die eingetragenen elektrischen Ladungsmengen unter dem Einfluss der Anzahl von FTSW gezogen werden.

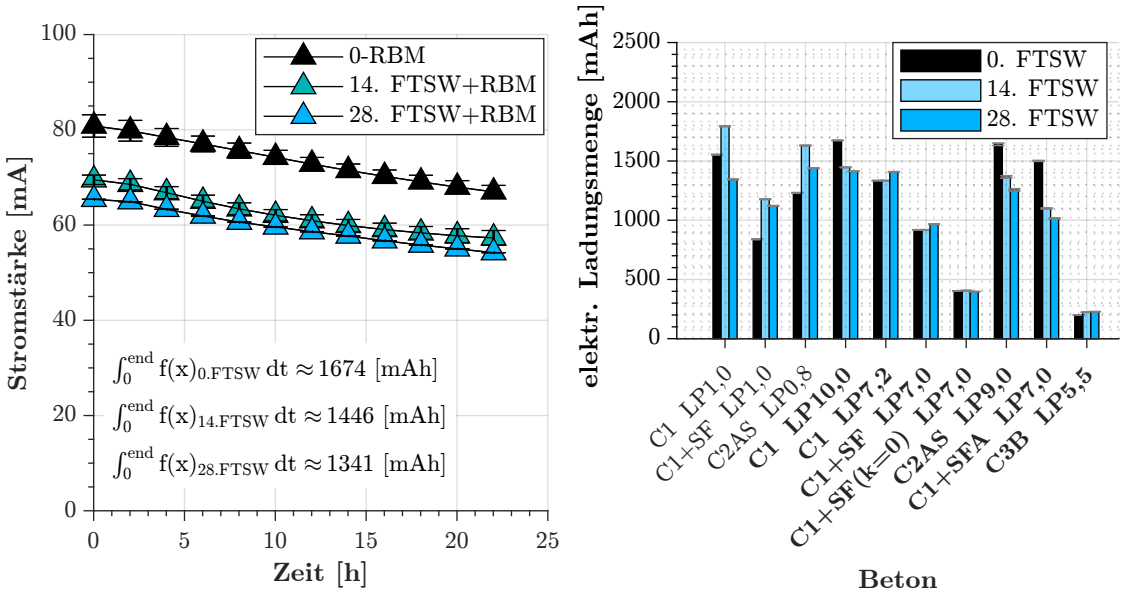
In Abbildung 3-50(a) ist zu erkennen, dass Betone im 0-RBM-Test, also vor dem Start des CDF-Tests, den höchsten Stromfluss aufweisen. Die eingetragene elektrische Ladungsmenge beträgt hier beispielsweise 1739 [mAh]. Wird der Beton nach dem 14. FTSW im RBM-Test erneut getestet, reduziert sich die Stromflussrate um ca. 14 % auf 1491 [mAh]. Eine Verdopplung der FTSW-Anzahl führt bei diesem Beton mit 10,0 Vol.% LP zu einer weiteren Abnahme. Die elektrische Ladungsmenge nach dem 28. FTSW ist mit 1469 [mAh] geringfügig weniger. In diesem Beispiel lässt sich die Tendenz ableiten, dass die steigende Anzahl an FTSW eine Erhöhung des Chloridgehaltes im LP-Beton hervorruft, die beim anschließenden RBM-Test eine Reduktion des Stromflusses und somit geringere elektrische Ladungsmengen zur Folge hat. Auch hier führen die Abdichtungseffekte wie bei den Bromidprofilen aus Kapitel 3.4.5 zur genannten Verringerung der Stromflussraten.

Unter Einbezug aller untersuchten Betone ist der Abdichtungseffekt mit zunehmender Anzahl an FTSW auch in Abbildung 3-50(b) erkennbar. Er wird durch den Frost-Tausalz-Angriff hervorgerufen. Durch die Befrostung reichern sich mit zunehmender Zyklenanzahl Chloridionen im Gefüge des Betons an. Daher verringern sich auch die Stromflüsse und somit auch die eingetragenen elektrischen Ladungsmengen.

Sogar die Betone ohne künstlich zugeführte Luftporen weisen beim Vergleich des 14. mit dem 28. FTSW eine Abnahme auf. Vor der Befrostung sind die Ladungsmengen kleiner als nach der Befrostung. Da das Betongefüge im Vergleich zum unbefrosteten Beton im 0-RBM-Versuch durch die Frostexposition geschädigt wird, steigt die Ladungsmenge zum Analysezeitpunkt des 14. FTSW's an. Erhöht man die Anzahl der FTSW's, so ist trotz Gefügeschädigung mit einhergehender Mikrorissbildung wieder eine Abnahme der elektrischen Ladungen festzustellen. Auch hier ruft der Frost-Tausalz-Angriff mit der 3-%-igen $NaCl$-Lösung einen Abdichtungseffekt hervor, sodass im Migrationsversuch die Ladungsmenge sinkt.

Die LP-Betone hingegen weisen überwiegend den zuvor erläuterten Effekt auf. D.h. die Ladungsmengen sinken mit dem Start der CDF-Prüfung und verringern sich weiter mit zunehmender Anzahl an FTSW. Die zwei Ausreißer (CEM I, LP = 7,2 Vol.-% (C1 LP7,2), CEM I+SF (C1+SF LP7,0)) in Abbildung 3-50(b) der zehn untersuchten Betone sind auf aufgrund eines Datenverlustes während der Versuchsdurchführung nicht mit in die Gesamtdeutung mit

einzubeziehen.



(a) Verlauf der Stromflüsse eines Betons CEM I, w/b = 0,5, LP = 10,0 Vol.-%. Vor Start der CDF-Prüfung im 0-RBM-Test, nach dem 14. und 28. FTSW und Berechnung der eingetragenen Ladungsmengen in [mAh]. Angabe der Standardabweichungen. n = 3.

(b) Gegenüberstellung der elektrischen Ladungsmengen aus RBM-Test. Ermittlung der Integrale durch die Stromflüsse über die Laufzeit t=end=ca. 24h. Betone nach Tabelle 3-7 mit w/b = 0,5 im 0-RBM und nach dem 14. und 28. FTSW mit anschließendem Migrationstest. Angabe der Standardabweichungen. n = 3 je Beton. CoV_{min} = 2 %, CoV_{max} = 16 %.

Abb. 3-50: Elektrische Ladungsmengen aus RBM-Test in Abhängigkeit von der Anzahl an FTSW's (0-RBM/14. FTSW+RBM/28. FTSW+RBM). Beispiel in Abb. (a). Gesamtdarstellung der Ladungsmengen in Abb. 3-50(b).

In Abbildung 3-50 (a) und (b) zeigt sich der ähnliche Trend wie bereits bei den Bromideindringwiderständen in Kapitel 3.4.5. Auch die eingetragenen elektrischen Ladungsmengen, die sich aus den Stromflüssen über die Zeit ergeben, weisen überwiegend mit steigender Anzahl an FTSW sinkende Ladungsmengen auf. Ähnlich wie bei den Bromideindringwiderständen und den ermittelten Bromidionenmengen im Kapitel 3.4.5 sorgt der Abdichtungseffekt, hervorgerufen durch den vorherigen Frost-Tausalz-Angriff für reduzierte Stromflüsse und letztendlich auch geringere Ladungsmengen.

Es ist jedoch allein auf Basis der gemessenen Stromflüsse keine sichere Aussage über die Chloridionen, die vorher in der CDF-Prüfung eingebracht wurden, möglich. Aus den Stromflüssen und den berechneten Ladungsmengen kann weder auf die Chloridionenmenge noch auf die Verteilung der Chloride in den Probekörpern geschlossen werden. Die elektrischen Ladungsmengen eignen sich nur zur ersten Einschätzung. Eine Aussage über die Widerstandsfähigkeit der bereits mit $NaCl$ beaufschlagten Betone im Migrationstest ist nicht möglich.

3.4.8 Migrationskoeffizienten vor und nach Frost-Tausalz-Angriff

Im Kapitel 3.4.3 wurde erläutert, wie der farbauslösende Bromidgehalt im 0-RBM-Versuch, also bevor die Probekörper einem Frost-Tausalz-Angriff ausgesetzt wurden, ermittelt wurde. Anhand der Koppelung der herkömmlichen Methode zur Ermittlung der Eindringtiefen mittels Indikatormethode ($AgNO_3$) mit den LIBS-Messungen können die Migrationskoeffzienten nun wie gewohnt analog mit Br^- nach Glg. 3-VII berechnet werden.

$$M_{\mathrm{nss},0,Br} = \frac{R \cdot T}{z \cdot F \cdot E} \cdot \frac{x_d - \alpha \cdot \sqrt{x_d}}{t} \qquad \text{(Glg. 3-VII)}$$

mit:

R = Gaskonstante, $8,315 \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{K \cdot mol}}\right]$

T = Absolute mittlere Temperatur beider Prüflösungen während der Migrationsprüfung bei 20 °C, 295 [K]

z = Ionenladung, für Br^-- oder Cl^--Ionen, 1 [-]

F = Faraday'sche Konstante, $9,649 \cdot 10^4 \left[\frac{\mathrm{J}}{\mathrm{V \cdot mol}}\right]$

E = Elektrische Feldstärke mit angelegter Spannung U [V], abhängig von der anfänglichen Stromstärke (30 [V] für Anfangsströme zwischen 60 und 5 [mA]) und der Höhe des Probekörpers h [m] (ca. 0,05 [m] = 50 [mm]), $\left[\frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}\right]$

x_d = $x_{d,Br} = x_{d,Br,LIBS}$, mittlere Eindringtiefe der Br^-- oder Cl^--Ionen der Probekörperhälfte mit dem Indikator $AgNO_3$ oder aus LIBS-Bromidprofil, [m]

t = Versuchslaufzeit, [s]

$$\alpha = 2 \cdot \sqrt{\frac{R \cdot T}{z \cdot F \cdot E}} \cdot \mathrm{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2 \cdot c_d}{c_0}\right) \qquad \text{(Glg. 3-VIII)}$$

mit:

$$\mathrm{erf}^{-1}\left(1 - \frac{2 \cdot c_d}{c_0}\right) \qquad \text{(Glg. 3-IX)}$$

mit:

erf^{-1} = inverse Fehlerfunktion in Abhängigkeit des Farbumschlagpunktes c_d von $AgNO_3$ mit den freien Br^-- oder Cl^--Ionen im Beton und der Br^-- oder Cl^--Konzentration in der Prüflösung c_0 (vgl. auch Abb. 3-51)

c_d = Br^-- oder Cl^--Konzentration, bei der ein Farbumschlag auftritt, $0,07 \left[\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{l}}\right]$

c_0 = Br^-- oder Cl^--Konzentration der Kaliumhydroxidlösung, 3,0 M.-% $NaCl$ oder 5,2 M.-% $NaBr$ in 0,2 $NKOH$, $0,51 \left[\frac{\mathrm{mol}}{\mathrm{l}}\right]$

In Abbildung 3-51 unter Verwendung von Glg. 3-IX werden die Werte für erf^{-1} bei Verwendung unterschiedlicher Konzentrationen c_0, bei konstantem c_d = 0,07 [mol · l^{-1}] grafisch

dargestellt. Hier wird mit Hilfe der inversen Fehlerfunktion (vgl. Abb. Glg. 3-IX) versucht, den Einfluss der Ionenkonzentration auf die Ermittlung von M_{nss} zu berücksichtigen (vgl. 3-51). Durch sich vergrößernde Werte von erf^{-1} bei sich vergrößernden Konzentrationen c_0 (z. B. 3,0 M.-% $NaCl \equiv 0,51$ [mol $\cdot$ l^{-1}], 10,0 M.-% $NaCl \equiv 1,71$ [mol $\cdot$ l^{-1}]) soll bei der Berechnung von M_{nss} der Konzentrationseinfluss berücksichtigt werden, sodass M_{nss} im Endeffekt unabhängig von der Salzkonzentration ist. Die Kurve verläuft asymptotisch einem Grenzwert entgegen. Der Wertezuwachs von erf^{-1} nimmt bei größeren Konzentrationen deutlich ab.

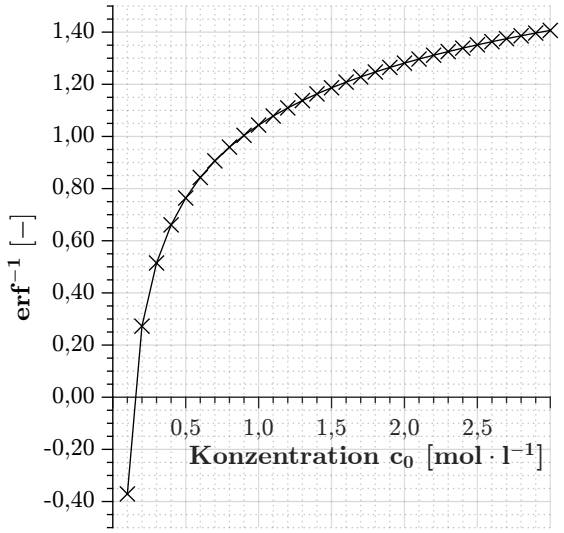


Abb. 3-51: Berechnete Werte nach Glg. 3-IX in Abhängigkeit verschiedener Br^-- oder Cl^--Konzentrationen c_0 im Bereich zwischen 0 und 3 [mol $\cdot$ l^{-1}] mit konstantem farbausschlaggebendem Umschlagspunkt c_d = 0,07 [mol $\cdot$ l^{-1}], die bei der Reaktion freier Halogene wie Cl^- oder Br^- mit $AgNO_3$ zu einem schwerlöslichem Salz $AgCl$ oder $AgBr$ reagieren.

Die Migrationskoeffizienten wurden im Migrationstest mit einem $NaBr$-Gehalt von 5,2 M.-% bestimmt. Daraus ergibt sich nach Abbildung 3-51 unter Anwendung von Glg. 3-IX für erf^{-1} mit $c_d = 0,07[mol]$ ein Wert von 0,77 [-].

Die zylindrischen Probekörper wurden nach dem ca. 24-stündigen Versuch bei 30 Volt gespalten, und die Eindringtiefen wurden mittels Indikator $AgNO_3$ ermittelt. Mit den somit ermittelten Eindringtiefen wurden die in Abbildung 3-52(a) dargestellten Migrationskoeffizienten in einem Alter von 35 Tagen ermittelt. Die Prüfungen wurden also am selben Tag an Begleitprobekörpern durchgeführt, an dem auch die CDF-Prüfung nach Vorsättigung startete (vgl. auch Prüfkonzept in Abb. 3-34). Der Beton mit dem Bindemittel CEM III/B wies aufgrund des hohen Hüttensandteils ein so dichtes Gefüge auf, dass keine Eindringtiefen gemessen werden konnten. Die Eindringtiefen wurden zwar mit LIBS gemessen, finden hier aber keinen Eingang in die Betrachtungen. Es ist ein mäßiger Trend zu erkennen, dass Betone mit sehr hohen Luftporengehalten im Vergleich zu Betonen mit geringeren oder ohne künstlich hergestellte Luftporen einen etwas höheren Migrationskoeffizienten aufweisen (vgl. in Abbildung 3-52(a) C1 LP1,0 / C1 LP10,0 / C1 LP 7,0 oder C2AS LP0,8 / C2AS LP9,0). Ansonsten verhalten sich die zehn untersuchten Betone im 0-Versuch wie erwartet. D.h. je dichter das Gefüge durch Zusatzstoffe wie Silica, Hüttensand oder Flugasche ist, desto geringer ist der Migrationskoeffizient, und der

Eindringwiderstand gegenüber Ionen erhöht sich.

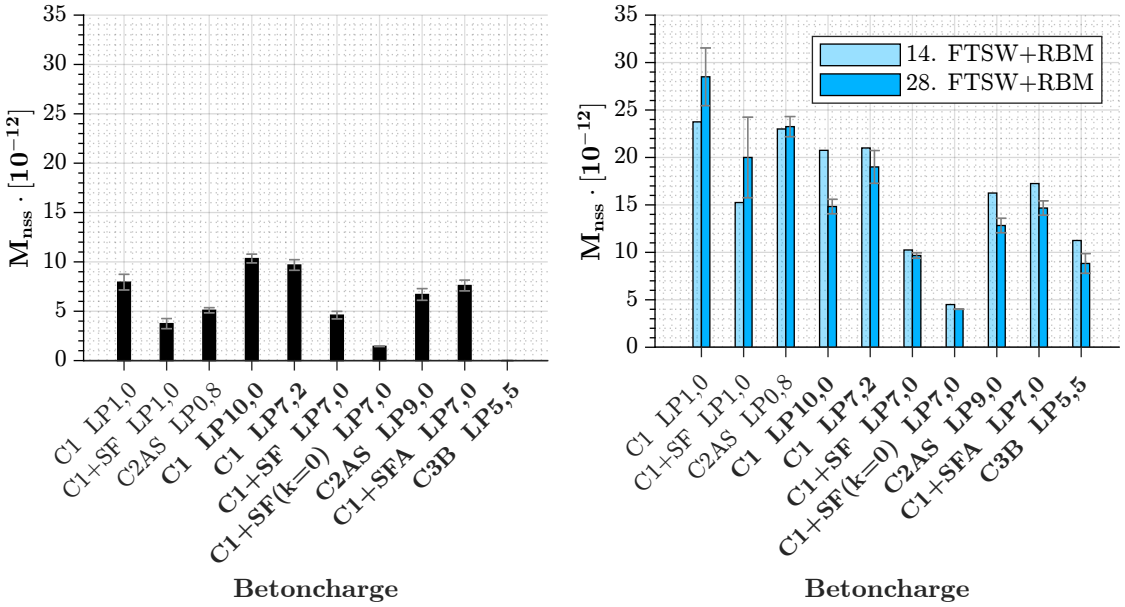
Da mit dem Frost-Tausalz-Angriff im Rahmen der CDF-Prüfung neben den Abwitterungsraten auch der relative dyanmische E-Modul und die Flüssigkeitsaufnahme während der Befrostungsdauer einhergeht, können die in diesem Kapitel dargestellten Migrationskoeffizienten in Abbildung 3-52 mit den Diagrammen in Kapitel 3.3.2 in den Abbildungen 3-15 bis 3-19 verglichen werden. Beim Abgleich von Betonen ohne und mit LP ist zuerkennen, dass der relative dynamische E-Modul bei Betonen ohne LP unter 30 [%] fällt. Ebenfalls weisen diese Betone sehr hohe Abwitterungsraten auf. Diese Betone (C1, C1+SF, C2AS) haben zum Zeitpunkt des 14. und 28. FTSW´s im Vergleich die höchsten Migrationskoeffizienten. Die Flüssigkeitsaufnahme alleine ist kein verlässliches Kriterium, um die Widerstandsfähigkeit von Betonen, die einem Frost-Tausalz-Angriff ausgesetzt sind und anschließend im RBM-Test geprüft werden, zu beurteilen. So weist z. B. der hüttensandhaltige und silicahaltige LP-Beton (C1+SF(k=0), C3B) Migrationskoeffizienten nach dem 14. und 28. FTSW von ca. $10 \cdot 10^{-12}$ [m^2/s] auf. Damit befindet sich dieser Beton im mittleren Bereich der Widerstandsfähigkeit gegenüber Frost-Tausalz-Angriff mit anschließendem RBM-Test. Die Flüssigkeitsaufnahme hingegen beträgt 7,9 [M.-%]. Damit ist das der höchste Wert der hier getesteten Betone.

Da durch den kombinierten Angriff aus dem Frost-Tausalz-Angriff des CDF-Versuches mit $NaCl$ und dem anschließenden Migrationsversuch mit $NaBr$ die Eindringtiefen nicht mehr mit dem Indikator $AgNO_3$ ermittelt werden können, werden die Eindringtiefen mit LIBS differenziert für Br^- und Cl^- ermittelt. In Kapitel 3.4.3 wird beschrieben, wie die Koppelung der beiden Analyseverfahren zur Ermittlung der Eindringtiefen im RBM-Versuch durchgeführt wurde.

Abbildung 3-52(a) stellt die Migrationskoeffizienten vor Befrostung und Abbildung 3-52(b) nach dem 14. und 28. FTSW dar. Es ist leicht zu erkennen, dass alle Migrationskoeffizienten im Vergleich vor und nach der Befrostung größer sind. Der Eindringwiderstand sinkt also im Zuge des Frost-Tausalz-Angriffes. Die Gründe hierfür sind Mikrorisse, die im Zuge des Frost-Tausalz-Angriffes entstehen, eine sich erhöhende Flüssigkeitssättigung, in der Ionen leichter wandern können, und die Mikroeislinsenpumpe, die trotz niedriger Temperaturen (« 0 °C) den Transport ins Betoninnere beschleunigt.

Beim Abgleich der Migrationskoeffizienten zwischen dem 0-RBM-Versuch, vor Frost-Tausalz-Angriff und danach (14. oder 28. FTSW), fällt auf, dass alle Migrationskoeffizienten nach Befrostung größer werden. Der Eindringwiderstand im Migrationsversuch mit dem Salz $NaBr$ nimmt im Zuge des Frost-Tausalz-Angriffs ab. Dies ist durch die Flüssigkeitsaufnahmen und den Abwitterungen zu erklären. (vgl. in Kapitel 3.3.2, Abb. 3-15 bis 3-19). Je höher die abgewitterten Mengen sind, desto größer werden die Migrationskoeffizienten M_{nss} nach Frost-Tausalz-Angriff. Das Porengefüge in der Betonrandzone wird geschädigt und es entstehen Mikrorisse die den Widerstand gegenüber Bromideindringen im anschließenden Migrationsversuch verringern.

Vergleicht man die Migrationskoeffizienten mit Blick auf die Befrostungsdauer zum 14. und 28. FTSW in Abbildung 3-52(b), so ist zu erkennen, dass sich der Eindringwiderstand wieder erhöht. Dies erscheint zunächst unplausibel. Betrachtet man jedoch ergänzend zum Bromideindringen, auch das Chlorideindringverhalten, so wird ersichtlich, dass sich die Chloridmenge mit zunehmender Zyklusanzahl erhöht. In Kapitel 3.4.5 wurde hierauf bereits eingegangen.



(a) Migrationskoeffizienten vor Befrostung (0-RBM-Versuch) ermittelt nach Glg. 3-VII mit dem Salz $NaBr$ und einer Konzentration von 0,51 [mol/l] in 0,2 $NKOH$). Bestimmung der Eindringtiefen mittels Indikator $AgNO_3$ anhand des Farbumschlages. Angabe der Standarabweichungen. Ohne Angabe von M_{nss} bei CEM III/B aufgrund zu geringer, nicht ablesbarer Eindringtiefen.

(b) Migrationskoeffizienten nach Befrostung nach dem 14. und 28. FTSW ermittelt nach Glg. 3-VII mit dem Salz $NaBr$ und einer Konzentration von 0,51 [mol/l] in 0,2 $NKOH$). Bestimmung der Eindringtiefen mit LIBS (vgl. Kapitel 3.4.3). Angabe der Standardabweichungen nur für Betone nach dem 28. FTSW, da n = 3. 14. FTSW mit n = 2.

Abb. 3-52: Gegenüberstellung der Migrationskoeffizienten aus dem 0-RBM-Versuch (vgl. Abb. 3-52(a)) mit den Migrationskoeffizienten nach Frost-Tausalz-Angriff im CDF-Test und anschließendem RBM-Test (vgl. Abb. 3-52(b)). Erhöhung der Migrationskoeffizienten vor und nach Befrostung. Verringerung der Migrationskoeffizienten zwischen dem 7. und 28. FTSW (vgl. Abb. 3-52(b) linker (hell)/rechter (dunkel) Balken je Beton.

Ein Vergleich der Migrationskoeffizienten vor Frost-Tausalz-Angriff (Abbildung 3-52(a)) mit den eingetragenen Ladungsmengen (Abbildung 3-50) zeigt, dass die Migrationskoeffizienten trotz höherer Ladungsmengen niedriger sind als nach Frost-Tausalz-Angriff (14. bzw. 28. FTSW). Dies erscheint zunächst unschlüssig, lässt sich jedoch durch Auslaugeffekte während des Frost-Tausalz-Angriffs erklären. Leitfähige Ionen werden ausgewaschen, wodurch die übertragenen Ladungsmengen abnehmen, gleichzeitig erhöhen sich jedoch die Bromidionentiefen im Migrationsversuch, die zur Berechnung des Migrationskoeffizienten herangezogen werden.

Daraus folgt, dass Beton vor Frost-Tausalz-Angriff zwar elektrisch leitender ist, zeigt aber im Migrationsversuch einen höheren Widerstand gegenüber Ioneneindringen als Beton nach Frost-Tausalz-Angriff. Dies deckt sich mit dem zuvor beschriebenen Abdichtungseffekt aus Kapitel 3.4.4.

4 Modellierung des Chloridtransports von Betonen unter Frost-Tausalz-Angriff

4.1 Ungeschädigter Bereich im Kernbeton

4.1.1 Allgemeines zur Modellierung der Chloridprofile

Über die letzten Jahrzehnte wurden unterschiedliche empirische und physikalische Modelle [Geh00] [Int06] [Kap11] [Int15] [KIS22] entwickelt, die versuchen, den Chloridtransport in Beton zu beschreiben und vorherzusagen. Die meisten dieser Modelle basieren auf dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz (vgl. auch Theorieteil Kapitel 2.2.3), das anhand einer linearen, partiellen Differentialgleichung zweiter Ordnung (vgl. Glg. 4-X) analytisch oder numerisch gelöst werden kann. Für die Beschreibung der Chloridprofile unter Frost-Tausalz-Angriff (im Nachfolgenden auch befrostete Probekörper genannt) im Rahmen der CDF-Prüfungen und parallel durchgeführten Einlagerungsversuchen (Lagerung der Probekörper bei 20 °C/65 RH in 3,0 M.-% $NaCl$, im Nachfolgenden auch unbefrostete Probekörper genannt) wird in dieser Arbeit der Ansatz I (vgl. Abb. 4-53 aus [Kap11], [NALU00]) unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses (vgl. Kapitel 4.1.6) verwendet. Das bedeutet, dass oberflächennahe Bereiche, in denen das Chloridprofil nicht mit dem Diffusionsansatz beschrieben werden kann, im Bereich des ungeschädigten Kernbetons vernachlässigt werden. Die Einflüsse in dieser sog. Konvektionszone sind geprägt durch kapillares Saugen in der Betonrandzone bis zum Erreichen der Wassersättigung [Vol91], durch Auslaugeffekte, bei denen Kationen wie Kalium, Natrium, Calcium ausgewaschen werden und somit aufgrund der positiven Ladung auch Einfluss auf den Chloridtransport nehmen können, Änderung des Porengefüges durch Carbonatisierung und damit auch verbunden Änderungen der Chloridbindekapazität in Abhängigkeit des Bindemittels.

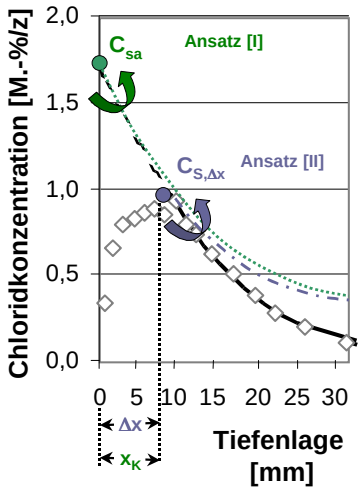


Abb. 4-53: Umgang mit den in Bezug auf das 2. Fick'schen Diffusionsgesetz abweichenden oberflächennahen Chloridkonzentrationen durch die Ansätze [I] und [II] aus [Kap11]

Ebenfalls kann in der Konvektionszone die Betonrandzone durch den Frost-Tausalz-Angriff geschädigt sein. Neben den zuvor genannten Einflüssen auf den Chloridgehalt bewirkt dies unter

Berücksichtigung der Bindemittelart und des LP-Gehaltes eine Abwitterung im oberflächennahen Bereich. Dies kann zu Mikrorissen führen, in denen der Einfluss des kapillaren Saugens aufgrund der deutlich höheren Geschwindigkeit im Vergleich zu Diffusionsprozessen dominierend ist.

Das Kurvenfitting wird nach Glg. 4-X also in Bereichen durchgeführt, die sich in tieferen Bereichen nach der Konvektionszone befinden. Ab diesem Tiefenbereich kann von einem intakten Kernbeton, der nicht von dem Frost-Tausalz-Angriff geschädigt wurde, ausgegangen werden. Durch das Kurvenfitting werden die beiden Parameter C_{Sa} und $D^I_{F2}(t)$ bestimmt. C_{Sa} beschreibt hierbei den theoretischen, zeitunabhängigen Chloridgehalt, der durch Extrapolation im Ansatz I an der Betonoberfläche berechnet wird. $D^I_{F2}(t)$ beschreibt den zeitabhängigen Chloriddiffusionskoeffizienten.

$$C(x,t) = C_{Sa} \cdot \left[1 - erf\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D^I_{F2}(t) \cdot t}}\right)\right] \qquad \text{(Glg. 4-X)}$$

mit:

$C(x,t)$	=	Chloridgehalt in Tiefe x zum Betrachtungszeitpunkt t, [M.-%/b*]
x	=	Tiefe x, in der der Cl^-–Gehalt bestimmt wird, [mm]
t	=	Betrachtungszeitpunkt t, [s]
C_{Sa}	=	theoretischer Chloridgehalt C_{Sa} an der Betonoberfläche bei $x = 0$ mm durch Extrapolation, [M.-%/b*]
$D^I_{F2}(t)$	=	effektiver Chloriddiffusionskoeffizient zum Betrachtungszeitpunkt t, [m^2/s]

Eine verbreitete Möglichkeit, das Chlorideindringen mit Hilfe des 2. Fick'schen Diffusionsgesetzes analytisch zu lösen, ist die Verwendung der komplementären Errorfunktion (vgl. Glg. 4-XI). Sie kann numerisch mit Glg. 4-XII gelöst werden.

$$erfc(z) = 1 - erf(z) = 1 - \left(\frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z e^{-t^2} dt\right) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_z^\infty e^{-t^2} dt \qquad \text{(Glg. 4-XI)}$$

$$\approx \frac{2}{\sqrt{\pi}} \cdot \sum_{n=0}^{\infty} \left(\frac{(-1)^n \cdot z^{2 \cdot n+1}}{n!(2 \cdot n+1)}\right) \qquad \text{(Glg. 4-XII)}$$

Die zuvor beschriebenen beiden Parameter werden aus Chloridrofilen an Probekörpern unter Frost-Tausalz-Angriff (CDF-Prüfung) und zeitgleich an Probekörpern aus Einlagerungsversuchen (Lagerung der Probekörper bei 20 °C/65 RH in 3,0 M.-% $NaCl$) ermittelt. Da Diffusionsprozesse u. a. maßgebend von der Temperatur abhängen, erfolgt der Vergleich der Diffusionskoeffizienten nach Ansatz I von Probekörpern unter Frost-Tausalz-Angriff und aus den Einlagerungsversuchen unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses. In Kapitel 4.1.6 wird das Vorgehen zur Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf den Diffusionskoeffizienten näher beschrieben.

Da durch die hier verwendete Methode zur Quantifizierung des tiefenabhängigen Chloridge-

haltes mittels LIBS (vgl. Kapitel 3.2.1) eine im Vergleich zur nass-chemischen Chloridgehaltsbestimmung deutlich genauere Eingrenzung der Konvektionszone (intermittierender Bereich), insbesondere in den durch Frost-Tausalz-Angriff geschädigten Bereichen, erfolgen konnte, findet Ansatz II nach [Geh00] (vgl. Abb. 4-53) keine Anwendung. Beim Ansatz II wird die x-Achse um den Konvektionsbereich nach rechts verschoben und an diese Stelle eine Ersatzoberflächenkonzentration eingeführt. Ferner wird im Zähler in Glg. 4-X von der Tiefe x die Tiefe Δx abgezogen und dann gefittet (vgl. Zitat aus [Geh00], S. 40, Abschnitt 4.1.3: „[...] Die Chloridoberflächenkonzentration wird unter Berücksichtigung des schwankenden Feuchtehaushaltes der sogenannten Konvektionszone bereits in der Ersatztiefe Δx angesetzt. [...]“). Näher wird an dieser Stelle auf Ansatz II nicht eingegangen. In Abbildung 4-53 werden die beiden Ansätze I und II aus [Kap11] qualitativ dargestellt.

Weitere Chlorideindringmodelle von Straßenbauwerken können aus [Kap11] in Tabelle 5 entnommen werden. Außerdem ist in [KIS22] (vgl. Kapitel 2, verfasst von Nilsson, Kapitelüberschrift „Models for Chloride Ingress - An Overview“) ein weiterer Überblick über bestehende Modelle dargestellt. Allen Modellen ist hierbei gemein, dass sie Vereinfachungen vornehmen, um das Chlorideindringen in Beton vorherzusagen. In diesen Modellen werden nachfolgende Einflüsse, die das Chlorideindringen beeinflussen, nicht oder vereinfacht berücksichtigt.

- Porensystem in Abhängigkeit des verwendeten Bindemittels
- Anteil von Kapillarporen und Gelporen in der Bindemittelmatrix
- über die Zeit weiter stattfindende Bindemittelreaktionen wie z. B. Voranschreiten der Hydratation
- Chloridbindung
- Porenverschlusseffekt
- Konvektionszone
- Auslaugprozesse von Ionen

4.1.2 Modellansatz Diffusion

Der Transfer von der Ohm'schen Elektrizitätsleitung und der Fourier'schen Wärmeleitung auf das 2. Fick'sche Diffusionsgesetz durch Dr. Adolf Fick im Jahre 1855 basiert nach Fick auf Experimenten, deren Mechanismen ähnlich sind (vgl. [Fic55], S. 65 ff.). Hierbei stellte er fest, dass die Bewegung von in einem Lösungsmittel dissoziierten Stoffe mit dem gleichen Ansatz wie bei der Wärmeleitung [CJ08] abgebildet werden kann. Ebenso wendete Ohm nach Aussagen von Fick das Fourier'sche Gesetz der Wärmeleitung auf die Leitung von elektrischen Strom an (vgl. [Fic55], S. 65 ff.).

Die lineare partielle Differentialgleichung zweiter Ordnung Glg. 4-X (vgl. z. B. [BSM95]) kann nicht geschlossen gelöst werden [Bro82]. Die Differentialgleichung kann mit Hilfe der Gauß'schen Fehlerfunktion (oder engl.: Errorfunktion) durch eine Reihenentwicklung gelöst werden. In [Cra76] wird detailliert auf die Lösung unter verschiedenen Randbedingungen in Hinblick auf die Stoffe, in denen Diffusionsprozesse stattfinden, eingegangen.

Daraus ergibt sich, dass durch Glg. 4-X, z. B. die drei Mechanismen Wärme-, Elektrizitätsleitung und Diffusionsprozesse mathematisch hinreichend genau beschrieben werden können. Notwendig sind Annahmen, die die beiden Randbedingungen zur Lösung der Differentialgleichung erfüllen. Die erste Annahme ist, dass zum Zeitpunkt kurz vor der Beaufschlagung mit $NaCl$ für $t = 0$ die Konzentration im Medium (z. B. Beton oder Zement) ebenfalls $c = 0$ beträgt. Die zweite Annahme ist, dass an der Beaufschlagungsseite die gleiche Konzentration c_x wie die Konzentration der Prüflösung c_x anliegt. Hier wird angenommen, dass $c_x = c_0$ ist. Der nichtstationäre Diffusionskoeffzient (engl.: non-steady state D_{nss}) kann somit unter Verwendung der Differentialgleichung berechnet werden.

Die üblichste Anwendung des analytischen Ansatzes zur Modellierung des Transportprozesses von Chlorid in Beton kann z. B. auch in [Kap11], [RG18], [Lay06], [Rah16], [Geh00] eingesehen werden. Der Ansatz bildet, ähnlich wie die Verläufe aus Migrationsversuchen, einen s-förmigen Verlauf der Chloridprofile in Tiefe x mit einem bestimmten Chloridgehalt [M.-%/b*] ab.

Die theoretischen Modelle, in denen Diffusion einen Anteil am Transport von Flüssigkeit (Wasser mit oder ohne Taumittel) beim Angriff von Frost-Tausalz-Wechseln hat, können dem Theorieteil in Kapitel 2.5.1 eingesehen werden. An dieser Stelle muss angemerkt werden, dass der Transport von Chloriden hauptsächlich durch physikalische Prozesse in Beton unter Frosteinfluss stattfindet. Diese sind nach derzeitigem Kenntnisstand das sog. kryogene Saugen in Kombination mit der Mikroeislinsenpumpe (vgl. Kapitel 2.5.1). Der hier vorgeschlagene Modellansatz zur Beschreibung der Profile, die aus der Analyse von zyklisch beaufschlagten Betonen unter Frosteinfluss in der CDF-Prüfung bestimmt wurden, wird mit Hilfe des Diffusionsansatzes durchgeführt. Er hat nicht das Ziel, sämtlich ablaufende Prozesse vollumfänglich abzubilden.

Es kann also das Chloridprofil, wobei auf der Einwirkungsseite die Chloridkonzentration und auf der Widerstandsseite die Güte des Betons in Grenzen berücksichtigt wird, durch die Vereinfachung der Differentialgleichung, die im Allgemeinen als 2. Fick'sches Diffusionsgesetz bekannt ist, im Rahmen eines Kurvenfittings nachgeahmt werden. In (Glg. 4-X) ist die Gleichung dargestellt. In [Klo74] wird angemerkt, dass sogar Diffusionsprozesse am Anfang mit Hilfe des noch viel simpleren Wurzel-Zeit-Gesetzes beschrieben werden können, obwohl ein komplett anderer Transportmechanismus wirksam ist.

Durch die Veränderung der gesuchten Fitvariablen, bestehend aus der extrapolierten Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} in [M.-%/b*] und dem Diffusionskoeffizienten nach Ansatz I $D^I_{F2}(t)$ in [$\cdot 10^{-12}$ m^2/s], wird durch das Minimieren der Abstandsquadrate von den Daten x (= tiefenabhängiger Chloridgehalt [mm] in [M.-%/b*] zum Analysezeitpunkt t in [s]) mit Hilfe des Levenberg-Marquardt´s Algorithmus in $MATLAB$ solange iteriert, bis die Abstände nicht mehr kleiner werden und das Optimum erreicht ist. Die Güte oder Qualität des Fits wird auch in dieser Arbeit analog z. B. zur DIN EN 12390-11 [DIN15] mit dem Bestimmtheitsmaß R^2 gewertet. Mit $R^2 \leq 0{,}95$ wird angenommen, dass der Fit das jewelige Chloridprofil ausreichend beschreibt. Es gibt auch andere Methoden, die Güte des Fit's zu beschreiben, wie z. B. das gewichtete Bestimmtheitsmaß.

Nach einem ähnlichen Schema wird in dieser Arbeit für den Bereich des intakten Kernbetons ohne Frostschäden vorgegangen. Der Kernbeton, in dem keine Gefügeschädigungen durch

Frost vorhanden sind, wird in den Chloridprofilen ab Erreichen des Maximums des Peaks definiert. In den durch Frost geschädigten Bereichen wird ein anderer Ansatz, der vereinfacht das 1. Fick'sche Gesetz als Modellgrundlage gebraucht, als Modifikation von [Nil22] verwendet. Dieser Modellansatz wird im nachfolgenden Kapitel 4.2.2 näher erläutert und angewendet.

Beim Vergleich der Probekörper, die bei 20 °C/65 RH für die gleiche Dauer wie die CDF-Probekörper (bis zum 28. FTSW) bei siebentägigem Vorlagern in 3,0 M.-%-iger $NaCl$-Lösung lagerten, fällt auf, dass sich die Chloridprofile nach dem 14. oder 28. FTSW, unabhängig von der Expositionsart (befrostet oder unbefrostet) zunächst augenscheinlich ähneln. Trotz der Unterschiede der Transportmechnismen der unbefrosteten und befrosteten Probekörper können die Chloridprofile, die aus den unterschiedlichen Expostitionsarten (mit und ohne Frost-Tausalz-Angriff) ergeben, hinreichend genau mit dem empirisch-physikalischen Ansatz, der sich aus dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz ergibt, abgebildet werden. Die zuvor beschriebene Differentialgleichung lässt sich auch auf diesen Fall ausreichend genau anwenden.

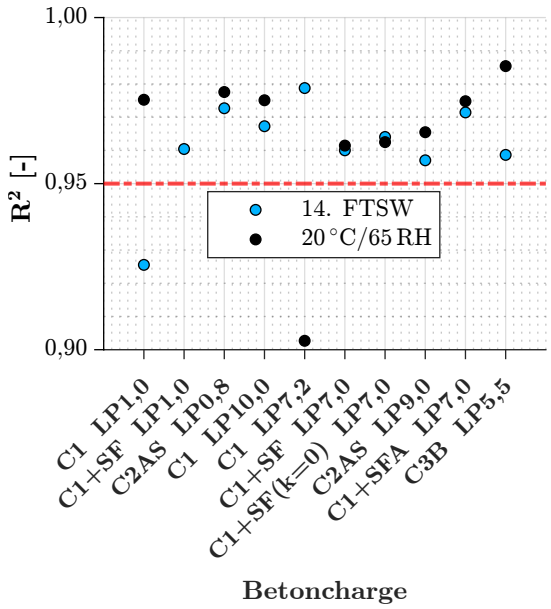
Der Schadensmechanismus, der nach neueren Erkenntnissen [Mül21] durch die Koppelung des kryogenen Saugens [LH15] und der Mikroeislinsenpumpe [SA97] genauer als bisher [Lin98] oder [SA97] beschrieben werden kann, führt durch die im Wasser gelösten Chloridionen zu einem Transport in den Beton. Im Theorieteil werden die Schadensmechanismen und damit einhergehenden frostbedingten Transportmechanismen näher beschrieben. Der Transport der Chloride durch Diffusion erfolgt durch einen Konzentrationsunterschied. Die Konzentration ist an der beaufschlagten Seite des Betons höher. In diesem Bereich befinden sich u. a. mehr Chloridionen. Aufgrund der stochastischen (rein zufälligen) Ausrichtung der Chloridionen treffen sie in Bereichen mit höherer Konzentration öfter zusammen als in Bereichen mit niedrigerer Konzentration. Somit verteilen sich die Chloridionen von der Beaufschlagungsseite ins Innere. Dies geschieht solange, bis ein Konzentrationsausgleich vorherrscht und das zufällige Zusammentreffen der Chloridionen zu keiner weiteren Verteilung der Chloridionen in den Beton mehr führt.

4.1.3 Validierung des Diffusionsansatzes von Betonen unter Frost-Tausalz-Angriff

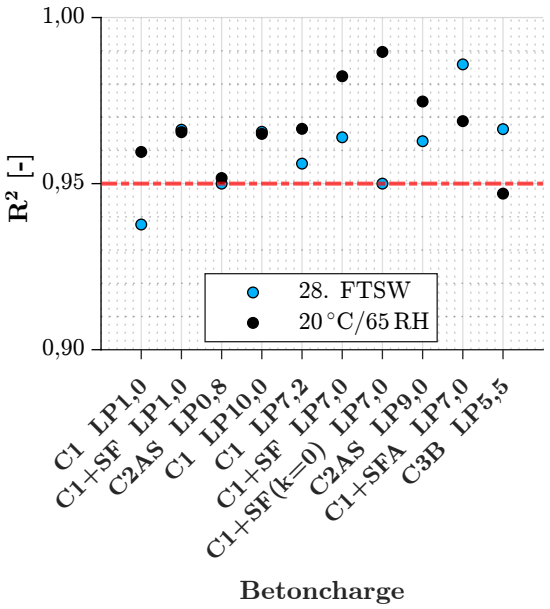
Um die Eignung der linearen partiellen Differentialgleichung zweiter Ordnung (vgl. z B.[BSM95]) bei der Anwendung auf die hier ermittelten Chloridprofile nachzuweisen, wird nach DIN EN 12390-11 [DIN15] das Bestimmtsheitsmaß R^2 verwendet. Für R^2 ist gefordert, dass es mindestens 0,95 beträgt.

Mit Hilfe des Grubbs-Tests (vgl. z. B. [DIN02]) wird das Bestimmtheitsmaß R^2 verwendet, um die Probekörper auf Ausreißer zu testen, die im vereinfachten Diffusionsversuch (Vorsättigung für 7d, anschließend Lagerung bei 20 °C/65 RH parallel zu den CDF-Probekörpern) mit 3,0 M.-%-iger $NaCl$-Lösung beaufschlagt wurden. Da der Grubbs-Test eine Normalverteilung für die Anwendung voraussetzt, wird zunächst auf Normalverteilung getestet. Der arithmetisch gemittelte Stichprobenumfang der untersuchten Betonchargen liegt bei n = 30. Diese ergeben sich aus den Versuchen nach einer Lagerungszeit parallel zu dem 14. FTSW (10 Chargen), dem 28. FTSW (10 Chargen) und aus dem Projekt (10 Chargen). Der Ausreißertest wird mit den gemittelten Bestimmtheitsmaßen durchgeführt, da somit die Streuungen der einzelnen Messungen

mit gewichtet werden, anstatt sie zuvor in Einzelbetrachtungen ggf. auszuschließen.



(a) Gegenüberstellung von befrosteten (14. FTSW) und unbefrosteten PK (Lagerung bei 20 °C/65 RH). n = 2 je Charge.



(b) Gegenüberstellung von befrosteten (28. FTSW) und unbefrosteten PK (Lagerung bei 20 °C/65 RH). n = 3 je Charge.

Abb. 4-54: Qualität des Modellansatzes $D^I_{F2}(t)$ nach dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz durch Angabe des Bestimmtheitsmaßes R^2 nach DIN EN 12390-11 [DIN15]

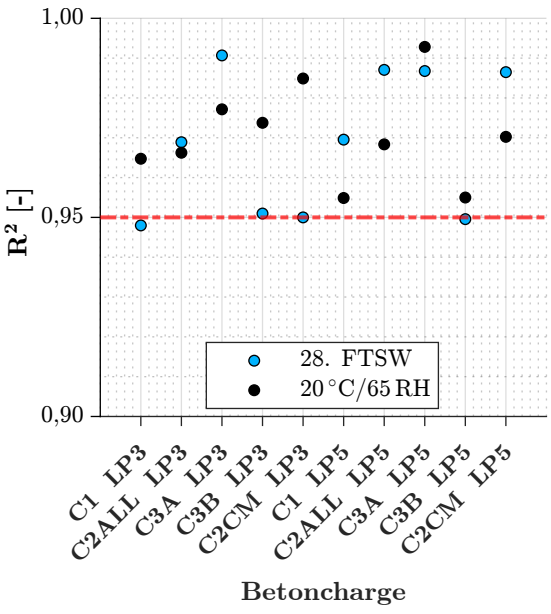


Abb. 4-55: Qualität des Modellansatzes $D^I_{F2}(t)$ nach dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz von befrosteten (28. FTSW) und unbefrosteten PK (Lagerung bei 20 °C/65 RH). Grenzwert für $R^2 = 0{,}95$ nach DIN EN 12390-11 [DIN15]. n = 1 je Charge.

Der Modellansatz zur Beschreibung der Chloridprofile ist sowohl für Probekörper mit als auch ohne Frost-Tausalz-Angriff anwendbar, da das Bestimmtheitsmaß nach [DIN15] überwiegend R^2

$\geq$ 95 % beträgt.

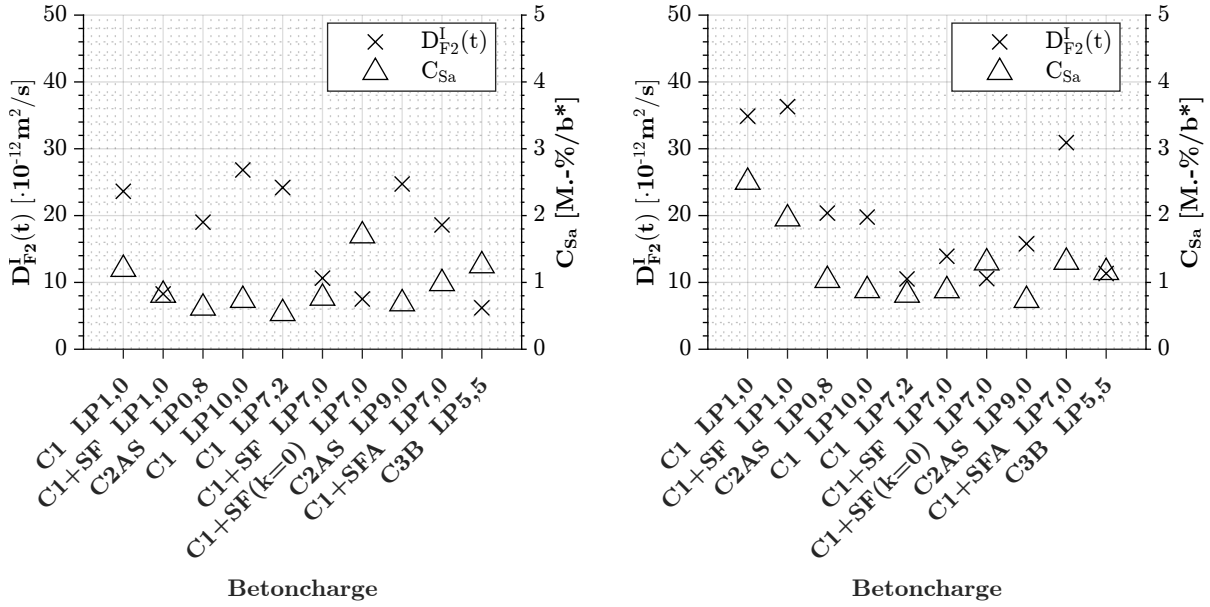
Eine Aussnahme bildet Beton mit dem hüttensandhaltigem Bindemittel CEM III/B. Beim diesem Beton kann die Carbonatisierung in der Betonrandzone zur Vergröberung des Porengefüges führen. Durch die Bildung von Kieselgel, das durch die Reaktion von im Porenwasser dissoziierten CO_2 mit *C-S-H*-Phasen des hydratisierten Zementes entstehen kann, wird das ehemals recht feine Porengefüge in größere Porenbereiche verschoben [Ant17]. In dem karbonatisierten Bereich ist ein im Vergleich zum unkarbonatisierten Bereich gröberes Porengefüge vorhanden. Dadurch kann mehr taumittelhaltiges gefrierendes Wasser in die porösere Struktur während der FTSW eindringen und dadurch zu vermehrten Abwitterungen führen.

Diese Beobachtung kann ebenfalls mit den Chloridprofilen nach 28 FTSW bestätigt werden. Der Verlauf des Profils folgt der Modellierung mittels 2. Fick'schem Diffusionsgesetz und auch im Vergleich zu den anderen Profilen mit unterschiedlichen Bindemitteln nicht zufriedenstellend.

4.1.4 Einfluss der Expositionsart und Dauer auf den Diffusionskoeffizienten

Die Untersuchungen der CDF-Prüfung und Probekörper, die in derselben Zeit bei 20 °C/65 RH gelagert wurden, wurden nach [BAW12] (vgl. auch [Set][DIN17]) durchgeführt. D. h. die Probekörper wurden für einen Tag in der Schalung, bei 20 ° weitere sechs Tage (7. Herstelltag)) unter Wasser und bis zum Erstbeaufschlagungszeitpunkt mit 3,0 %-iger $NaCl$-Lösung für 21 Tage (28. Herstelltag) im Laborklima bei 20 °C/65 RH mit einer durchschnittlichen CO_2-Konzentration von 400 ppm (engl.: Parts per Million, in Bezug auf das Luftvolumen) gelagert. Anschließend wurden die Probekörper für weitere sieben Tage (35. Herstelltag) zum kapillaren Saugen für das das C in der CDF-Prüfung (engl.: Capillary Suction of Deicing Chemicals and Freeze-thaw Test) steht, gegeben. Durch die siebentägige Vorsättigung in der Prüflösung sollen die Probekörper so weit vorgesättigt werden, dass im Anschluss an das kapillare Saugen überwiegend Einflüsse aus Diffusion oder Einflüsse aus den FTSW in Hinblick auf den Chloridtransport in Beton vorhanden sind. Durch das kapillare Saugen gelangen Chloridionen im Vergleich zur Diffusion oder zum Frost-Tausalz-Angriff in sehr kurzer Zeit in den Beton. Die durchgeführten Chloridanalysen zu den Zeitpunkten des 14. und 28. FTSW oder die zeitlich gleich lang gelagerten Probekörper bei 20 °C/65 RH beinhalten beide in gleicher Weise die durch kapillares Saugen eingetragene Chloridionenmenge, sodass die Untersuchungsergebnisse in Hinblick auf die ermittelten Chloriddiffusionskoeffizienten hohe Werte annehmen. Durch das kapillare Saugen wird ein Chloridprofil erhalten, das für die LIBS-Analysen geeignet war, um weitere Schlussfolgerungen mit Blick auf den Einfluss des Frost-Tausalz-Angriffs auf den Chloridtransport in Beton zu ziehen. Die angegebenen Chloriddiffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ sind also mit dem Einfluss des kapillaren Saugens zu verstehen, das verantwortlich für die nachfolgend recht hohen Werte im Vergleich zu reinen Diffusionsversuchen ist.

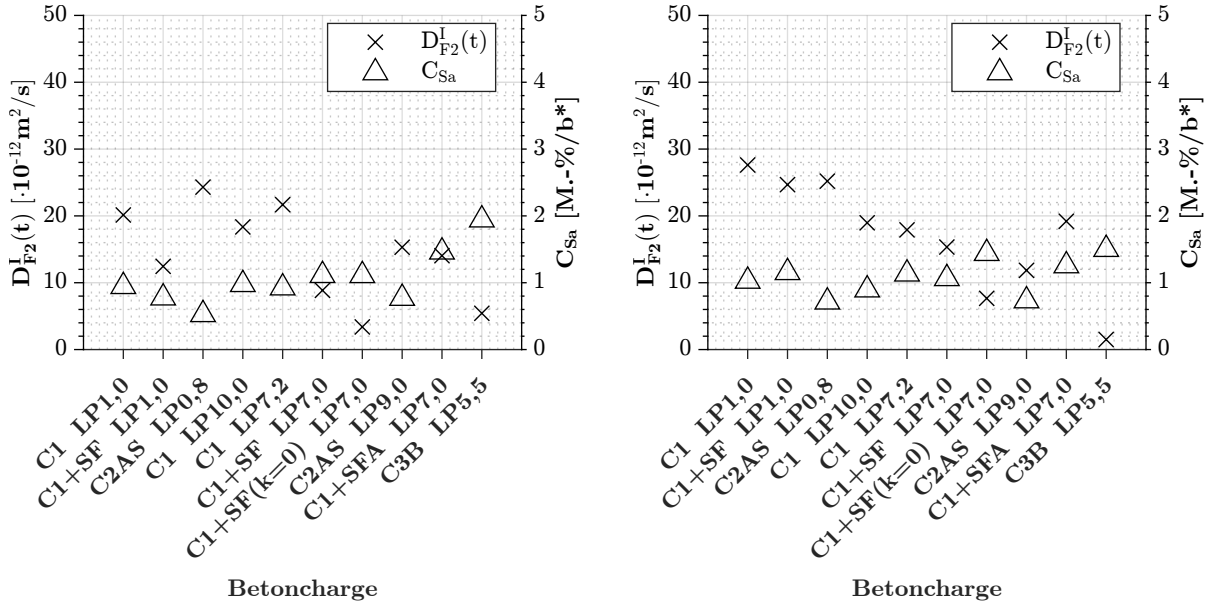
Nachfolgend in Abbildung 4-56 sind die Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ und extrapolierten Oberflächenchloridkonzentrationen C_{Sa} nach dem 14. FTSW bzw. Lagerung bei 20 °C/65 RH dargestellt.



(a) 7d bei 20 °C/65 RH **(b)** 7d (14. FTSW) CDF-Prüfung.

Abb. 4-56: Darstellung der Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ und der extrapolierten Oberflächenchloridkonzentrationen C_{Sa} nach Glg. 4-X ohne Berücksichtigung des Temperatureinflusses. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung und 7d je nach Expositionsart in 4-56(a) bei 20 °C/65 RH oder 4-56(b) für 7d (14. FTSW).

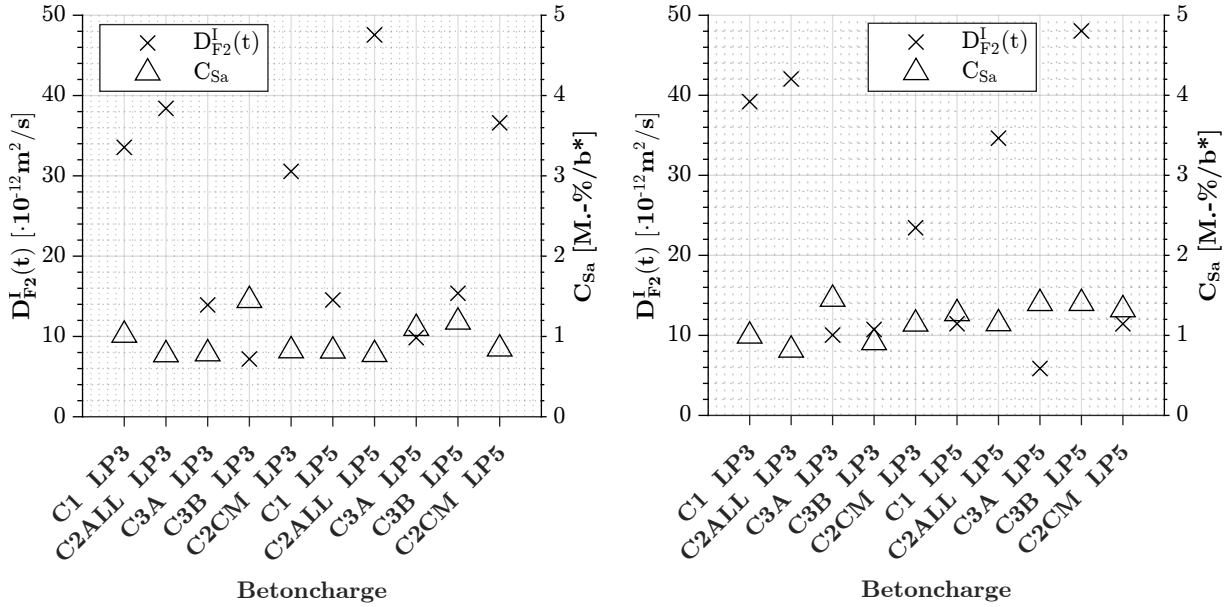
Nachfolgend in Abbildung 4-57 sind die Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ und extrapolierten Oberflächenchloridkonzentrationen C_{Sa} nach dem 28. FTSW bzw. Lagerung bei 20 °C/65 RH dargestellt.



(a) 14d bei 20 °C/65 RH **(b)** 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung.

Abb. 4-57: Darstellung der Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ und der extrapolierten Oberflächenchloridkonzentrationen C_{Sa} nach Glg. 4-X ohne Berücksichtigung des Temperatureinflusses. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung und 7d je nach Expositionsart in 4-56(a) bei 20 °C/65 RH oder 4-56(b) für 14d (28. FTSW).

Nachfolgend in Abbildung 4-58 sind die Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ und extrapolierten Oberflächenchloridkonzentrationen C_{Sa} nach dem 28. FTSW bzw. Lagerung bei 20 °C/65 RH von weiteren Betonen aus einem Forschungsprojekt dargestellt.



(a) $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d Lagerung bei 20 °C/65 RH.

(b) $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung.

Abb. 4-58: Darstellung der Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ und der extrapolierten Oberflächenchloridkonzentrationen C_{Sa} nach Glg. 4-X.

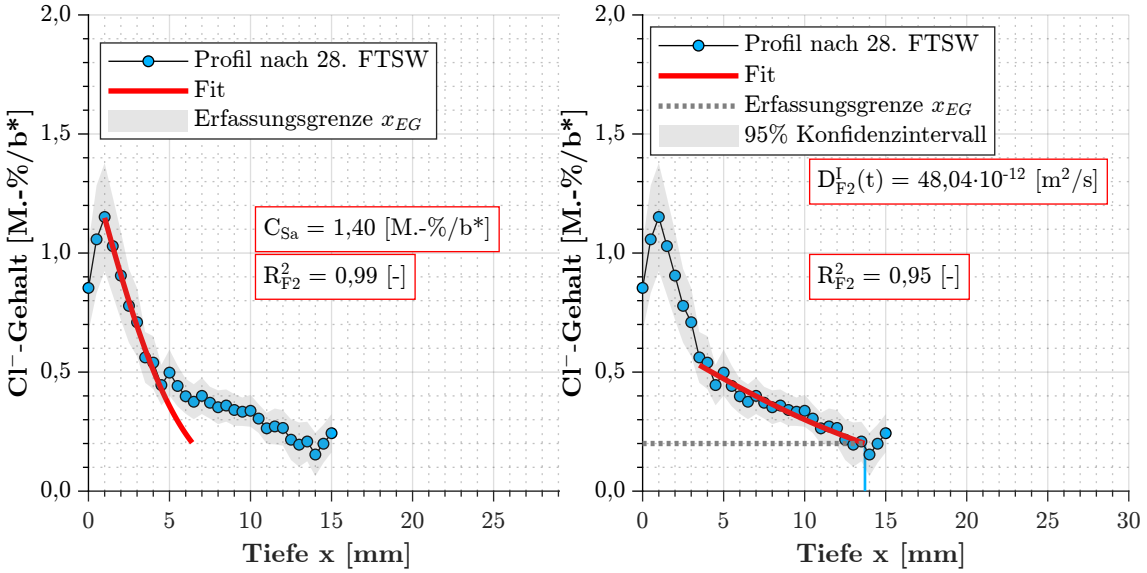
4.1.5 Vergleich der Diffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentration

Um die Abhängigkeiten von $D^I_{F2}(t)$ und C_{Sa} auch nach weiteren 14 FTSW zu betrachten, sind in Abbildung 4-58 wieder die zuvor genannten Fitvariablen mit Blick auf den Frosteinfluss unter Verwendung des emprisch-physikalischen und vereinfachten Diffusionsansatzes (vgl. Glg. 4-X) für unbefrostete und befrostete Betone dargestellt. Die zugehörigen Chloridprofile mit den Fitvariablen können den Anhängen A-13, A-14 und A-15 entnommen werden.

Auffällig ist zum einen der hohe Diffusionskoeffizient nach 28 FTSW vom Beton mit CEM II/A-LL (Kalksteinmehl von 6-20 M.-%) und mit CEM III/B (Hüttensandgehalt von 66-80 M.-%) mit LP-Gehalten von ca. 5 Vol.-% in Abbildung 4-58. Der Grund für den hohen Diffusionskoeffizient des Betons mit CEM II/A-LL ist auf die überwiegend inerten Bestandteile des Betonzusatzstoffes Kalksteinmehl zurückzuführen. Zwar kann es zur sog. Keimbildung der Kalkbestandteile im hydratisierenden Zement kommen, allerdings überwiegt der nicht-reaktive Teil des Betonzusatzstoffes mit Blick auf den Chlorideindringwiderstand in der CDF-Prüfung. Durch die Beimengung von Kalksteinmehl entstehen weniger *C-S-H*-Phasen während der Hydratation. Dies führt zu einem gröberen Porengefüge und letztendlich zu einem verminderten Chlorideindringwiderstand. Hinzu kommt, dass die Chloridbindekapazität ebenfalls verringert ist. Die Chloridbindeplätze sind im Vergleich zu Bindemitteln mit z. B. Hüttensand schneller abgesättigt. Dies trägt eben-

falls zu einer Erhöhung der Chloride unter Frosteinfluss bei.

In Abbildung 4-59 4-59(a) und 4-59(b) ist daher die Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} im karbonatisierten Bereich und $D^I_{F2}(t)$ im unkarbonatisierten Bereich in zwei Schritten ermittelt worden. Aufgrund der erhöhten Porosität, der damit verbundenen Erhöhung der Frostschädigung im karbonatisierten Bereich und der sprunghaften Reduzierung der Porosität im nicht karbonatisierten Bereich findet der Diffusionsansatz für CDF-Betone über die komplette Chlorideindringtiefe beim CEM III/B keine Gültigkeit. Diese Erkenntnis deckt sich mit Ergebnissen bzgl. der Schadensmechanismen bei FTSW nach [Mül21] und des Einflusses der Nachbehandlung auf die Betonrandzone unter Frosteinfluss nach [Ehr17].



(a) 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung **(b)** 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung

Abb. 4-59: CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 5,6 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$ Lösung.

Die Werte von $D^I_{F2}(t)$ folgen augenscheinlich keinem klaren Trend. Die Werte für die Chloridoberflächenkonzentration allerdings schon. Hier scheint es, dass die durch Extrapolation erhaltenen Werte für C_{Sa} bei den Betonen nach dem 28. FTSW leicht höher sind. Um dies mittels Statistik zu unterstreichen, wird in Abbildung 4-60 der Kruskal-Wallis-Test [KW52] durchgeführt.

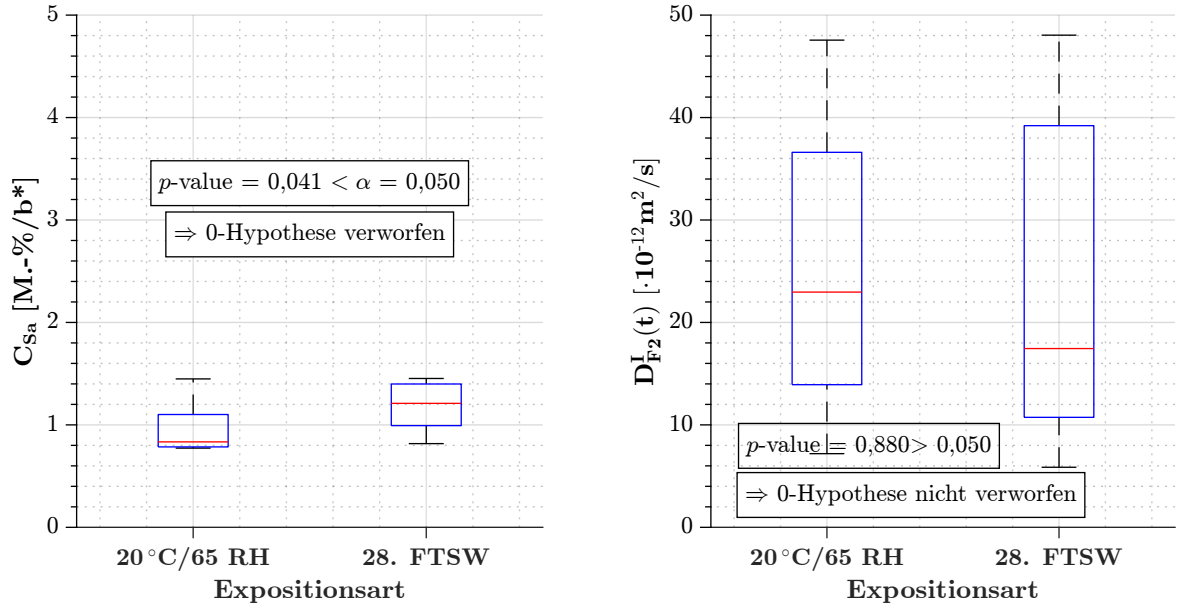
Aufgrund der Strichprobenmenge von n = 10 je für $D^I_{F2}(t)$ (vgl. Abb. 4-60(b)) wie auch für C_{Sa} (vgl. Abb. 4-60(a)), die zu gering ist, um auf Normalverteilung zu testen und anschließend beispielsweise mittels t-test (vgl. [Bee07]) die Merkmale 20 °C/65 RH und 28. FTSW zu testen, ob ein statistisch signifikanter Unterschied vorliegt oder nicht, wird der genannte Kruskal-Wallis-Test Test gewählt. Er hat u. a. nicht die Voraussetzung, dass die ermittelten Werte normalverteilt sein müssen, um ihn anwenden zu können [Pfa68].

Der mit $MatLAB$ bestimmte $p - value$ gibt die Wahrscheinlichkeit bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit oder anders ausgedrückt, bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5$ % an, ob die

0-Hypothese abgelehnt oder angenommen wird. Ist der $p - value$ kleiner als α, so wird die 0-Hypothese abgelehnt. Die 0-Hypothese sagt aus, dass die Stichprobe einer Grundgesamtheit entstammen und vergleichbar sind. Die beiden untersuchten Merkmale $D^I_{F2}(t)$ und C_{Sa}, die bei 20 °C/65 RH und 28. FTSW ermittelt wurden, wurden auf Signifikanz bei $\alpha = 5$ % getestet. Je kleiner der $p-value$ ist, desto wahrscheinlicher ist es, dass die Merkmale unterschiedlich sind und nicht einer Grundgesamtheit entstammen. Sie sind dann mit einer gewissen Wahrscheinlichkeit nicht vergleichbar.

Für C_{Sa} mit $p - value = 0{,}04 < \alpha = 0{,}05$ lässt sich ein leicht statistisch signifikanter Unterschied ableiten, für $D^I_{F2}(t)$ mit $p - value = 0{,}88 > \alpha = 0{,}05$ nicht. Es ist zu beachten, dass diese statistische Betrachtung lediglich einer groben Orientierung dienen soll und zeigen soll, ob die gefitteten Werte in Hinblick auf den Frosteinfluss im Vergleich zu den Probekörpern, die nicht befrostet wurden, unterschiedlich sind, da dies auf den ersten Blick schwer zu erkennen ist.

Ferner sind die gefitteten Werte bei unterschiedlichen Temperaturniveaus bestimmt worden, die an dieser Stelle noch nicht eingearbeitet sind und im Folgenden berücksichtigt werden. Die Temperatur hat einen entscheidenden Einfluss auf die Diffusionsgeschwindigkeit. Die Modellierung des durch Labormessungen bestimmten Chloridprofils kann, wie zuvor erwähnt, hinreichend genau mit dem zweiten Fick'schen Diffusionsmodell zum jeweiligen Prüftermin (14. und 28. FTSW) abgebildet werden. Die Diffusionskoeffizienten der bei 20 °C/65 RH gelagerten Probekörper werden mit Hilfe der Arrhenius-Gleichung angepasst und auf das Temperaturniveau mit den damit einhergehenden verlangsamenden Transportprozessen gebracht.



(a) Test auf Gleichheit von gefitteten C_{Sa}-Werten von bei 20 °C/65 RH gelagerten und nach dem 28. FTSW analysierten Probekörpern. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.

(b) Test auf Gleichheit von gefitteten $D^I_{F2}(t)$-Werten von bei 20 °C/65 RH gelagerten und nach dem 28. FTSW analysierten Probekörpern. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.

Abb. 4-60: Kruskal-Wallis-Test, ob Unterschiede bei unbefrosteten und befrosteten Stichproben mit n = 10 je Expositionsart vorliegen oder nicht. Boxplot und Angabe der Wahrscheinlichkeit $p - value$ bei einem Signifikanzniveau von α = 5 % für Fitvariablen C_{Sa} und $D^I_{F2}(t)$ zur Annahme oder Ablehnung der 0-Hypothese. 0-Hypothese = die Stichproben entstammen der gleichen Grundgesamtheit.

4.1.6 Berücksichtigung des Temperatureinflusses

Da die Bewegung von Molekülen auch temperaturabhängig ist, muss beim Vergleich der Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ von befrosteten und unbefrosteten Probekörpern die Molekülbewegung berücksichtigt werden (vgl. auch Kapitel 2.3.1). Bei höheren Temperaturen bewegen sich im Allgemeinen Teilchen schneller. Auch die physikalischen und chemischen Prozesse, wie z. B. das zufällige Zusammenstoßen von Teilchen am Ort mit einer gewissen Konzentration hin zu einem Ort mit niedrigerer Konzentration (Diffusion, physikalisch), oder Hydratationsprozesse im erhärtenden Beton (Bildung von C-S-H-Phasen, chemisch) sind Temperaturabhängigkeiten unterworfen. Verallgemeinert kann gesagt werden, dass Prozesse bei kalten (< 0 °C) Temperaturen deutlich langsamer ablaufen als bei höheren Temperaturen [Vol91], [PSE81], [Rau92]. In z. B. [Bro82] wurde innerhalb der Temperaturbereiche von 15 bis 30 $C°$ Zementscheiben aus Portlandzement untersucht. In diesem Temperaturbereich kann demnach davon ausgegangen werden, dass sowohl Einflüsse aus voranschreitender Hydratation wie auch auf Diffusionsprozesse in Hinblick auf den Chloridtransport in Beton verhältnismäßig gering sind. Der Temperaturverlauf in Kapitel 3.1.1 kann Abbildung 3-9 entnommen werden. Auf Basis der Datenpunkte aus [DIN17] wurde linear interpoliert und die gemittelte Temperatur berechnet. Sie beträgt ca. -3,33 °C.

In [YASS08] wurden auf die gleiche Weise Diffusions- (und Migrationskoeffizienten) in den

Temperaturstufen 5, 20 und 40 °C ermittelt. Die Tendenz abnehmender Diffusionskoeffizienten bei sinkender Temperatur ist ebenfalls gezeigt worden.

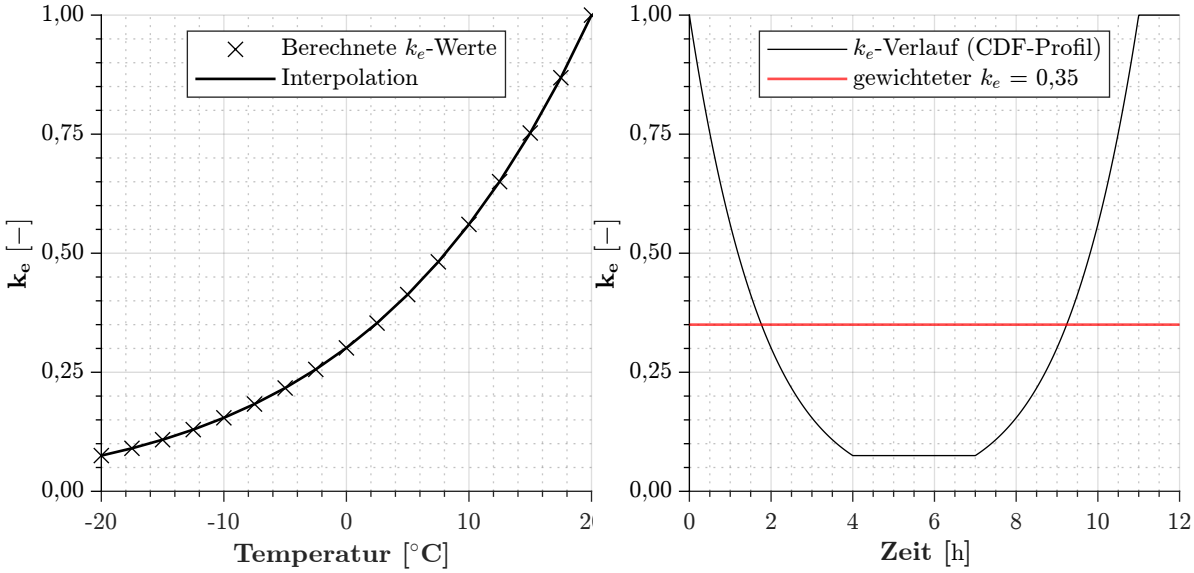
Um den Vergleich der Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ von den Probekörpern aus der CDF-Prüfung mit denen, die parallel bei 20 °C/65 RH gelagert wurden, zu ziehen, müssen diese Diffusionskoeffizienten angepasst werden. In Abbildung 4-61 ist der Temperaturverlauf aus der CDF-Prüfung und die Faktoren k_e zur Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf die Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ bei den 20 °C/65 RH gelagerten Probekörpern angegeben. Mit Hilfe von Arrhenius und dem daraus resultierenden Ansatz in Glg. 4-XIII zur Berücksichtigung der Temperatur wird ein einheitenloser Temperaturfaktor k_e in Abhängigkeit vom Temperaturverlauf gebildet. [Geh00] hat unter Verwendung von Daten aus [PSE81] und [Rau92] mit Hilfe des Programms $STRUREL$ den Faktor k_e als stochastische Variable berechnet. Hierbei wurden Mittelwerte und Standardabweichungen verwendet. Ferner wurde der Parameter b_e statistisch zu $\mu = 4800K$ mit einer Standardabweichung von $\sigma = 700K$ bestimmt. Grundlage hierfür waren ebenfalls Daten aus [PSE81].

$$k_e = e^{b_e \cdot \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T_{ist}}\right)} \qquad \text{(Glg. 4-XIII)}$$

mit:

k_e	=	Temperaturfaktor (Übertragungsparameter) k_e [-]
e	=	Euler'sche Zahl e [-]
b_e	=	Konstante $b_e = 4800\,[K]$, nach [Rau92]. Faktor a durch [Geh00] $2130 \leq b_e \leq 5500\,[K]$; nach [PSE81] durch [Geh00] $3500 \leq b_e \leq 5900\,[K]$
T_{ref}	=	Referenztemperatur [K], $293\,[K]$ ($\equiv 20°C$)
T_{ist}	=	Betontemperatur [K]

Durch Verwendung von Glg. 4-XIII können somit die ermittelten Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ ermittelt werden. Dadurch werden die parallel zur CDF-Prüfung gelagerten Probekörper bei 20 °C/65 RH angeglichen und vergleichbar gemacht. Da die Temperaturfaktoren oder auch Übertragungsparameter exponentiell verlaufen, wurde k_e in Abhängigkeit vom Temperaturprofil aus Abbildung 3-9 gewichtet. D. h. bei größeren Temperaturen gehen die daraus berechneten größeren k_e-Faktoren auch mit größerem Gewicht mit ein. Die zeitliche Temperaturabhängigkeit kann Abbildung 4-61 entnommen werden. Somit wird vereinfacht ein über das CDF-Profil in Abhängigkeit der Zeit gemittelter k_e-Faktor bestimmt. Er dient als Grundlage für den Vergleich der Diffusionskoeffizienten der bei 20 °C/65 RH gelagerten Probekörper mit den Diffusionskoeffizienten der Probekörper (vgl. Kapitel 4.1.4) aus der CDF-Prüfung.



(a) Verlauf von k_e über den Temperaturverlauf der CDF-Prüfung.

(b) Verlauf von k_e über einen FTSW-Temperaturverlauf der CDF-Prüfung nach [DIN17] oder [BAW12]. Angabe des mittleren, gewichteten k_e-Faktors.

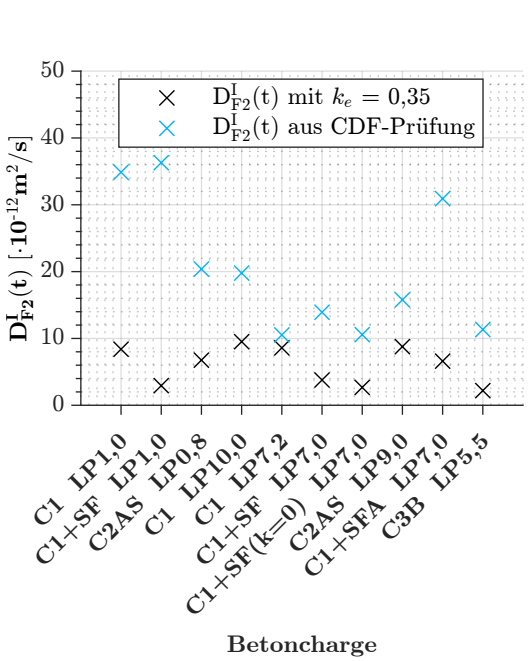
Abb. 4-61: Gegenüberstellung der temperatur- 4-61(a) und zeitabhängigen 4-61(b) k_e-Temperaturfaktoren nach Glg. 4-XIII.

4.1.7 Temperatureinfluss auf die Diffusionskoeffizienten

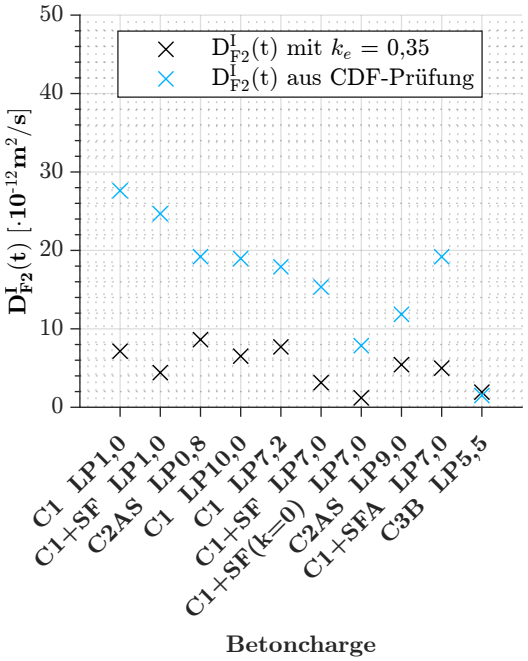
Die Temperatur hat u. a. maßgeblichen Einfluss auf den Chloridtransport in Beton durch Diffusion. Im Allgemeinen kann gesagt werden, dass höhere Temperaturen zur Beschleunigung von Diffusionsprozessen führen. [PSE81] hat u. a. in Temperaturbereichen von 7 °C bis ca. 45 °C für einen CEM I, w/b = 0,5 effektive Diffusionskoeffzienten bei 7 °C von ca. $2{,}07 \cdot 10^{-9}$ [cm^2/s] bis $18{,}36 \cdot 10^{-9}$ [cm^2/s] bei ca. 45 °C bestimmt.

Um den Chloridtransport von befrosteten (CDF-Prüfung) und unbefrosteten (Lagerung bei 20 °C/65 RH) Probekörpern in Hinblick auf die ermittelten Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ nach Glg. 4-X unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses zu vergleichen, werden die Diffusionskoeffizienten aus den Einlagerungsversuchen mit dem gewichteten, mittleren k_e-Temperaturfaktor aus Kapitel 4.1.6 (Glg. 4-XIII) multipliziert. Somit werden die Probekörper, die bei Normklima lagerten, auf das Temperaturniveau der CDF-Probekörper gebracht.

Die Diffusionskoeffizienten von Betonen, die nach dem 14. und 28. FTSW bestimmt wurden, müssen an die Diffusionskoeffizienten, die parallel bei 20 °C/65 RH gelagert wurden, mit Blick auf den Temperatureinfluss angepasst werden, um den Einfluss des Frostes auf Chloridtransport in Beton bei Betrachtung der Diffusionskoeffizienten zu analysieren.



(a) Diffusionskoeffizienten nach dem 14. FTSW bzw. Einlagerungsversuchen 20 °C/65 RH.



(b) Diffusionskoeffizienten nach dem 28. FTSW bzw. Einlagerungsversuchen 20 °C/65 RH.

Abb. 4-62: Gegenüberstellung der Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ nach Glg. 4-XIII unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses durch den gewichteten k_e-Temperaturfaktor.

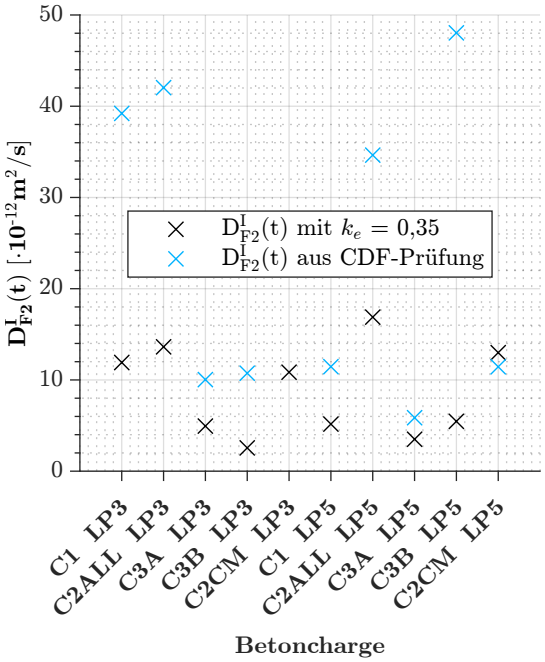


Abb. 4-63: Gegenüberstellung der Diffusionskoeffizienten (Projekt) $D^I_{F2}(t)$ nach Glg. 4-XIII unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses durch den gewichteten k_e-Temperaturfaktor nach dem 28. FTSW bzw. Einlagerungsversuchen 20 °C/65 RH.

Nach Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf die Diffusionskoeffizienten von Betonen ohne Frost-Tausalz-Angriff ist erkennbar, dass sämtliche Diffusionskoeffizienten nach Frost-

Tausalz-Angriff größer sind. Dies bedeutet, dass der Chloridtransport unter diesen Bedingungen schneller verläuft.

4.2 Geschädigter Bereich in der Betonrandzone

4.2.1 Berechnung der Porosität und des Hydratationsgrads

In der Betonrandzone ist die Porosität erhöht. [Röh12] nennt Gründe, die mit dem Betoneinbau, dem Verdichten, Verdunstungseffekten, Nachbehandlungsart und -dauer sowie thermischen Gradienten vom äußeren Bereich zum Betoninneren zusammenhängen. In [Ehr17] wird u. a. vertieft auf den Einfluss der Austrocknung, der zu erhöhter Porosität führt, und den Frost-Tausalz-Widerstand in der Betonrandzone eingegangen.

In Anlehnung an [Pow56], dessen Ergebnisse auch in [Bro04] zusammenfassend in Hinblick auf die Porositäten dargestellt sind, stellt [Röh12] u. a. drei Formeln vor, mit denen sich die Volumenanteile im Zementstein berechnen lassen. Die maßgebenden Porositäten im Zementstein, die durch die Formeln berechnet werden können, beziehen sich auf den nicht hydratisierten Zement, das Gelvolumen und die Kapillarporosität. Hierbei spielt die Kapillarporosität bei Betonen die größte Rolle, da hier der Transportprozess wie das kapillare Saugen, welches im Vergleich zur Diffusion deutlich schneller abläuft, den größten Beitrag zum Chloridtransport in Beton leistet. Betrachtet man Betone unter Frosteinfluss, tragen Gelporen beim Transportprozess, der durch das Frostsaugen hervorgerufen wird, ebenfalls zum Chloridteintrag in Beton bei. Näheres kann dem Theorieteil in Kapitel 2.5.1 entnommen werden.

Da in dem hier vorgestellten Vorschlag zur Modellierung des ansteigenden Chloridgehalts bis zum Peakmaximum nicht auf den Transportprozess von Chlorid unter Frosteinfluss im ungeschädigten Beton, sondern im geschädigten Bereich eingegangen wird, beziehen sich die nachfolgenden Betrachtungen nur auf die Kapillarporosität. Diese ist neben anderen Einflüssen wie Auslaugprozessen und Karbonatisierung maßgeblich verantwortlich für Frostschädigungen wie Abwitterungen oder Gefügeschädigungen in der Betonrandzone.

Die Kapillarporosität $\mathcal{E}_{KP}$ wird nach Glg. 4-XIV unter Berücksichtigung des Hydratationsgrades nach [Röh12] berechnet. Die Berechnung der Porositäten erfolgt auf Grundlage der Bindemittelzusammensetzungen in Hinblick auf deren Klinkerbestandteil. Hieraus lassen sich Gelbildungsfaktoren bestimmen, die die Kapillarporosität (vgl. Glg. 4-XIV) hervorrufen. Zur Berechnung der Kapillarporosität ist der Hydratationsgrad notwendig. Er wird indirekt mit Hilfe der Hydratationswärme ermittelt. Da die Hydratation nach [Röh12] bekanntermaßen sehr lange (> 100 Jahre) voranschreitet und vermutlich keinem Ende entgegenstrebt, wird der maximal mögliche Hydratationsgrad (vgl. α_{max} in Glg. 4-XV) ermittelt und mit dem aktuellen Hydratationsgrad nach eq:Hydratationsgrad multipliziert. Somit wird das Nichterreichen eines Endwertes in Hinblick auf den finalen Hydratationsgrad brücksichtigt. Man erhält somit den zeitabhängigen Hydratationsgrad $\alpha(t)$ zum gewünschten Analysezeitpunkt.

$$\mathcal{E}_{KP} = \frac{V_{WO} - (\eta_G - 1) \cdot \alpha(t) \cdot V_Z}{V_{WO} + V_Z + V_{GK,0/2} + V_{LP}} \qquad \text{(Glg. 4-XIV)}$$

mit:

$\mathcal{E}_{KP}$ = Kapillarporosität bezogen auf Beton oder Mörtel, nicht Zementstein [Vol.-%]

V_{WO} = Zugabewasservolumen aus Stoffraumrechnung [dm^3]

η_G = Gelbildungsfaktor. Gibt den Volumenzuwachs gegenüber unhydratisiertem Zement an
[−] (siehe Anhang A-16, Tabelle A-16.2)

$\alpha(t)$ = Hydratationsgrad [%] nach Glg. 4-XV

V_Z = Volumen des Zementes (Bindemittels) aus Stoffraumrechnung [dm^3]

$V_{GK,0/2}$ = Volumen der Gesteinskörnungsfraktion (0/2 [mm]) aus Stoffraumrechnung [dm^3], mit der Annahme, dass im oberflächennahen Bereich keine grobe GK vorhanden ist

V_{LP} = Volumen der Luft inkl. künstlich zugeführter Luftporen aus Stoffraumrechnung [dm^3]

Der zeitabhängige Hydratationsgrad kann u. a. indirekt mit Hilfe der frei werdenden Hydratationswärme beschrieben werden. Die zum Zeitpunkt t entstehende Hydratationswärme $Q(t)$ kann nach [Röh12] durch Glg. 4-XV berechnet werden. Setzt man nun die zeitabhängige Hydratationswärme $Q(t)$ ins Verhältnis zur maximal möglichen Hydratationswärme Q_{max}, so kürzt sich Q_{max} heraus und der aktuelle Hydratationsgrad zum Zeitpunkt t kann nach Glg. 4-XV bestimmt werden.

$$\alpha(t) = \alpha_{max} \cdot \frac{Q_{max} \cdot e^{\left[A \cdot \left(\frac{t}{t_k}\right)^B\right]}}{Q_{max}} = \alpha_{max} \cdot e^{\left[A \cdot \left(\frac{t}{t_k}\right)^B\right]} \qquad \text{(Glg. 4-XV)}$$

mit:

$\alpha(t)$ = Zeitabhängiger Hydratationsgrad, [-]

e = Exponentialfunktion, [-]

α_{max} = $1-e^{(-3{,}8\cdot(w/b))}$: Maximal möglicher Hydratationsgrad [-], nach [Röh12] (siehe auch [Wal99])

w/b = Wasser-/Bindemittel-Wert aus Stoffraumrechnung

Q_{max} = Maximale Hydratationswärme nach [Röh12] [J/g] (siehe Anhang, Tabelle A-16.1)

A = Faktor nach [Röh12] (siehe Anhang A-16, Tabelle A-16.1)

B = Faktor nach [Röh12] (siehe Anhang A-16, Tabelle A-16.1)

t = Aktueller Analysezeitpunkt, [h]

t_k = Zeitpunkt zu Q_{max} (siehe Anhang A-16, Tabelle A-16.1)

4.2.2 Modellvorschlag im durch Frost geschädigten Bereich

Das 2. Fick'sche Diffusionsgesetz geht davon aus, dass der Chloridgehalt von der beaufschlagten Betonoberfläche bis ins Betoninnere abnimmt. Eine Modellierung eines Peaks, bei dem im oberflächennahen Bereich ein Anstieg und dann ein Abflachen des Chloridprofils zu erkennen ist, ist somit nicht möglich. Um den ansteigenden Chloridgehalt bis zum Maximum des Peaks in den Chloridprofilen im Bereich der Konvektionszone abzubilden, stellte [Nil22] (siehe auch [KIS22])

auf der ICCRRR2022 (6th International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting) ein vereinfachtes Modell für Bereiche, in denen Auslaugprozesse stattfinden, vor. Die Motivation hierfür waren systematisch ausgewertete Daten von [FSW$^+$22], die hauptsählich die Mikrostruktur des Betons von Meereswasserbauwerken im oberflächennahen Bereich untersuchten. Ferner wurden Chloridprofile durch Abschleifen in Stufen von ca. 4 mm Breite in der Betonrandzone gewonnen. In tieferliegenderen Bereichen wurden Scheiben von den Bohrkernen mit einer wassergekühlten Säge abgeschnitten und zermahlen. Anschließend wurde das Mehl nass-chemisch u. a. auf seinen Chloridgehalt untersucht. Hieraus wurden in [FSW$^+$22] diverse Chloridprofile in [M.-%/b], also Chloridgehalt auf die Betonmasse, erstellt. Analog zu den in [FSW$^+$22] gezeigten Profilen sind auch die Profile unter Frost-Tausalz-Angriff im Rahmen der CDF-Prüfung zu verstehen. Jedoch wird im Nachfolgenden aufgrund der unterschiedlichen Exposition das Modell von [Nil22] auf frostbelastete Betone erweitert, da sich die im Modell genannten Parameter zur Modellierung des ansteigenden Peaks von Chloridporfilen, die ausgelaugt wurden, auf Betone, die unter Frosteinfluss stehen, übertragen werden können.

Mit Hilfe des 1. Fick'schen Gesetzes und unter Verwendung eines tiefenabhängigen, linearen zunehmenden Chloridgehaltes und Bindemittelgehaltes sowie abnehmender Porosität in der durch Frost geschädigten Betonrandzone kann im ersten Schritt Glg. 4-XVII ein Ansatz für den Bereich bis zum Maximum des Peaks der Chloridprofile vorgestellt werden. Die Berechnung findet in seinem Ansatz numerisch durch die Finite-Elemente-Methode statt. Dadurch werden mit dem 1. Fick'schen Diffusionsgesetz an den Punkten der diskretisierten Gitterpunkte die Werte der Funktion angenähert. An den benachbarten Punkten erfolgt die Bestimmung der Werte durch eine kleine Schrittweite und Verwendung des 1. Fick'schen Diffusionsgesetzes. Je kleiner die Schrittweite ist, desto genauer ist die Approximation.

Dieses Vorgehen kann auch für den durch Frost-Tausalz-Angriff geschädigten Bereich und die Verwendung der analytischen Lösung in Hinblick auf die tiefenabhängige Chloridkonzentration angewendet werden. Die Lösung erfolgt also in einer Schrittweite von 0,5 mm (LIBS-2D-Messraster, unter Berücksichtigung der Inhomogenitäten im Analysebereich, da bei der LIBS-Messung die zu analysierende Oberfläche in x-,y-Richtung kaum zerstört wird vgl. z. B. [DGZ23]). Im oberflächennahen Bereich ist die Porosität erhöht. Die Schädigungstiefe kann auf Basis der abgewitterten Mengen [g/m^2] unter Anwendung der Gleichung zur Ermittlung der abgewitterten Höhen (vgl. (Glg. 3-IV)) abgeschätzt werden. Ist die abgewitterte Höhe > ca. 0,5 mm, so kann davon ausgegangen werden, dass die Änderung der Porosität in diesem halben Millimeter nicht durch Frosteinfluss geändert wurde, da genug Expansionsraum für das gefrierende Wasser zur Verfügung stand. Andernfalls wäre es u. a. zu Abwitterungen gekommen.

Aufgrund der Abwitterungen im oberflächennahen Bereich verringert sich der Bindemittelgehalt. [Nil22] nimmt in der Betonrandzone ca. 1/4 des Bindemittelgehaltes aus dem Betonentwurf an. Diese Annahme wird aufgrund fehlender Angaben in [Nil22] übernommen und aufgrund des Frosteinflusses auf ca. 1/4 des Bindemittelgehaltes aus der Stoffraumrechnung ohne Nachweis verringert. Der Bindemittelgehalt wird von der Betonrandzone linear bis zum Maximum des Peaks auf den Gehalt aus dem Betonentwurf erhöht. Die Erhöhung ist hierbei abhängig vom zur Verfügung stehenden Messraster. Das Raster beträgt in dieser Arbeit 0,5 mm.

In Kapitel 4.2.1 wird beschrieben, wie die Porosität unter Berücksichtigung des zeitabhängigen Hydratationsgrades berechnet wird. Die tiefenabhängige Porosität $p(x)$ in Glg. 4-XVII wird dabei wie der zuvor genannte Bindemittelgehalt als sich linear verkleinernd angesetzt. Um die Frischbetonkennwerte zur Ermittlung der Porosität zu verwenden, bezieht sich die somit ermittelte Porosität nicht auf den Zementstein, sondern auf den Beton. Die Gesteinskörnung wird also mit berücksichtigt. Dadurch ergeben sich in Abhängigkeit vom Volumen der Gesteinskörnung verhältnismäßig geringere Porositäten.

Der Oberflächenchloridgehalt $C_s(x)$ wird in [Nil22] nach Glg. 4-XVII berechnet. Hierbei findet die freie Chloridkonzentration c_f, die der anstehenden Chloridkonzentration der Prüflösung aus der CDF-Prüfung (3,0 M.-% $NaCl$-Lösung) entspricht, die Chloridbindekapazität $\frac{\partial c_f}{\partial c_x}$, der tiefenabhängige Bindemittelgehalt $B(x)$ und die tiefenabhängige Porosität $p(x)$ Eingang.

$$C_s(x)_{FTSW} = C_f \cdot \frac{\partial c_f}{\partial c_x} \cdot B(x) + C_f \cdot p(x) \qquad \text{(Glg. 4-XVI)}$$

mit:

$C_s(x)$	=	Linearer, tiefenabhängiger Chloridgehalt [M.-%/b*]
x	=	Tiefe x im Bereich bis zum Peak, [mm]
C_f	=	Freier Chloridgehalt [kg/m^3]. Entspricht der Prüflösungskonzentration: 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung = 30 [kg/m^3] $\rightarrow$ Cl^- = 30 [kg/m^3] $\cdot$ [35,45 mol/58,44 mol] = 18,20 [kg/m^3]
$\frac{\partial c_f}{\partial c_x}$	=	Chloridbindekapazität [kg/m^3]
B_x	=	Tiefenabhängiger Bindemittelgehalt, [kg/m^3]
p_x	=	Tiefenabhängige Porosität, [-]

Da der nach Glg. 4-XVII Oberflächenchloridgehalt $C_s(x)$ und der extrapolierte Oberflächenchloridgehalt C_{Sa}, ermittelt durch den physikalisch-empirischen Ansatz nach Glg. 4-X, voneinander abweichen, wird das Delta zwischen den beiden unterschiedlichen Oberflächenchloridgehalten bis zum Maximum des Peaks aus dem Chloridprofil über die Tiefe angeglichen, sodass sich beide Ansätze im Maximum des Peaks gleichen.

$$C_s(x)_{FTSW} = C_f \cdot \frac{\partial c_f}{\partial c_x} \cdot B(x) + C_f \cdot p(x) - (C_s(x) - C_{Sa}) \cdot \frac{x_0}{x_{Peak}} \qquad \text{(Glg. 4-XVII)}$$

mit:

$C_s(x)_{FTSW}$	=	Linearer, tiefenabhängiger Chloridgehalt nach n-tem FTSW, [M.-%/b*]
x	=	Tiefe x im Bereich bis zum Peak [mm]
C_f	=	Freier Chloridgehalt [kg/m^3]. Entspricht der Prüflösungskonzentration: 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung = 30 [kg/m^3] $\rightarrow$ Cl$^-$ = 30 [kg/m^3] $\cdot$ [35,45 mol/58,44 mol] = 18,20 [kg/m^3]
$\frac{\partial c_f}{\partial c_x}$	=	Chloridbindekapazität [kg/m^3]
B_x	=	Tiefenabhängiger Bindemittelgehalt, [kg/m^3]
p_x	=	Tiefenabhängige Porosität, [-]
$C_s(x)$	=	Tiefenabhängiger Chloridgehalt, [M.-%/b*]
C_{Sa}	=	Extrapolierter Oberflächenchloridgehalt nach Glg. 4-X
x_0	=	Beaufschlagungsoberfläche, [mm]
x_{Peak}	=	Tiefe bei maximalem Peak des Chloridprofils, [mm]

Die Einflüsse aus dem geschädigten Bereich sind im Parameter $C(x)_{FTSW}$ enthalten. Durch Einsetzen von $C(x,t)_{FTSW}$ an Stelle der Oberflächenchloridkonzentration $C(x)_{Sa}$ aus dem bekannten Kurvenfitting kann nun der Verlauf im durch Frost geschädigten Verlauf in Glg. 4-XVIII abgeschätzt und modelliert werden.

$$C(x,t)_{FTSW} = C_s(x)_{FTSW} \cdot \left[1 - erf\left(\frac{x}{2 \cdot \sqrt{D^I_{F2}(t) \cdot t}}\right)\right] \qquad \text{(Glg. 4-XVIII)}$$

mit:

$C(x,t)_{FTSW}$	=	Tiefenabhängiger Chloridgehalt zum Analysezeitpunkt, [M.-%/b*]
x	=	Tiefe x, in denen der Cl^--Gehalt bestimmt wird, [mm]
t	=	Betrachtungszeitpunkt, [s]
$C(x)_{FTSW}$	=	Durch Glg. 4-XVII berechneter Chloridgehalt bis Peakmaximum
$D^I_{F2}(t)$	=	Effektiver Chloriddiffusionskoeffizient, zum Betrachtungszeitpunkt t aus Kurvenfitting, [$\cdot$ 10^{-12} m^2/s]

5 Zusammenfassung

Das Ziel dieser Arbeit war es, den Einfluss des Frost-Tausalz-Angriffs auf den Chloridtransport in Beton mit einem modifizierten Diffusionsansatz zu erfassen. Durch die Kombination verschiedener Laborversuche und geeigneter Analysemethoden wurde dieser Einfluss quantifiziert und anhand von 2D-Darstellungen sowie Ionenprofilen (Cl^-, Br^-) visualisiert. Somit wurden Diffusionskoeffizienten von Betonen mit unterschiedlichen Bindemittelzusammensetzungen sowohl unter Frost-Tausalz-Angriff als auch – unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses – aus unbefrosteten Chloridprofilen ermittelt und miteinander verglichen. Die Eignung des Diffusionsmodells im Kernbeton von befrosteten Betonen wurde über das Bestimmtheitsmaß ($R^2 \geq 95\ \%$) nachgewiesen.

Der Frost-Tausalz-Angriff wurde durch die CDF-Prüfung (Capillary suction of Deicing Solution and Freeze-thaw Test) simuliert. Parallel und unter gleichen Vorlagerungsbedingungen (kapillares Saugen) wurden Vergleichsprobekörper hergestellt, die nicht befrostet wurden.

Der Einfluss des Frost-Tausalz-Angriffs auf den Eindringwiderstand von Beton im Schnellmigrationstest konnte durch den Austausch des Salzes $NaCl$ durch $NaBr$ an Zylindern, die aus den CDF-Probekörpern gewonnen wurden, untersucht werden. Es zeigte sich, dass bei LP-Betonen mit geringen Gefügeschädigungen der Eindringwiderstand im Migrationsversuch mit $NaBr$ in der Regel erhöht ist, da die Dichtigkeit durch zuvor in der CDF-Prüfung eingetragene Chloridionen gesteigert wird. Gleichzeitig steigt jedoch der Chloridgehalt (Eindringtiefe und -menge) mit zunehmender Dauer des Frost-Tausalz-Angriffs.

Die Ermittlung der Ionengehalte von Cl^- und Br^- erfolgte mittels LIBS (Laser-Induzierte Breakdown-Spektroskopie). Durch die Kopplung des Indikatorverfahrens mit $AgNO_3$ im Schnellmigrationstest und den LIBS-Profilen konnten die Ionengehalte bei kombinierter Beaufschlagung aus der CDF-Prüfung und dem Schnellmigrationstest quantifiziert werden.

Die Modellierung der Chloridprofile des Kernbetons von Betonen unter Frost-Tausalz-Angriff sowie von Betonen, die im Laborklima bei 20 °C/65 RH gelagert wurden, erfolgte mithilfe des 2. Fick'schen Diffusionsgesetzes. Die Profile wurden durch eine lineare partielle Differentialgleichung angenähert.

Obwohl auch u. a. Hydratationsfortschritt, Chloridbindung und Carbonatisierung den Transportprozess beeinflussen, zeigte sich unter Frost-Tausalz-Angriff ein beschleunigter Chloridtransport mit erhöhten Eindringtiefen und -mengen. Der Vergleich der Profile nach rund 180 Tagen luftdichter Lagerung zeigte zudem, dass befrostete Probekörper teilweise schneller Chloride ins Innere umverteilen und sich ihre Profile langfristig denen unbefrosteter Probekörper annähern. Mithilfe der Fluoreszenzmikroskopie konnten Gefügeschädigungen in der Betonrandzone quantifiziert und mit den Chloridprofilen abgeglichen werden. Ein direkter Bezug zur Schädigungstiefe war jedoch nicht möglich.

Zusätzlich zu den Laboruntersuchungen und Modellansätzen, die auch einen Vorschlag zum Umgang mit durch Frost-Tausalz-Angriff geschädigten Bereichen enthalten, werden im Ausblick erste Überlegungen zu FEM-Modellierungen im Rahmen von zwei Abschlussarbeiten vorgestellt.

6 Ausblick

6.1 FEM-Modell: Chloridtransport durch Diffusion

Im Rahmen der Bearbeitung der hier vorliegenden Arbeit wurde in einer Abschlussarbeit von [Rok20] (Download über Hochschulbibliotheksseite) zunächst versucht, den Diffusionsprozess, die Bindemittelmatrix und die darin eingebettete Gesteinskörnung mit Hilfe der FEM abzubilden. Die Modellierung wurde an Versuchsreihen von Betonen, die mit CEM I hergestellt wurden, validiert. Die Versuchsreihen bestanden aus zwei unterschiedlichen Bindemitteln (CEM I, CEM I+SF). Die Balken mit den Abmessungen 70x15x15 [cm] wurden bis zur Erstbeaufschlagung mit 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung unter Wasser gelagert. Die Erstbeaufschlagung fand am 14., 28. und 91. Tag nach der Betonherstellung statt und wurde je Zeitpunkt für eine Dauer von ca. einem halben Jahr mit $NaCl$-Lösung beaufschlagt. Anschließend erfolgte die Erstellung von Chloridprofilen analog zur Analysemethode, wie in der restlichen hier vorliegenden Arbeit (vgl. auch Kapitel 3.2.1).

Durch die nachfolgend stichpunktartig gelisteten Inhalte konnte ein Ansatz erstellt werden, den Chloridtransport in Beton unter Frost-Tausalz-Angriff (vgl. nachfolgendes Kapitel 6.2) als ersten Vorschlag in FEM zu modellieren.

Nachfolgende Inhalte wurden in das FEM-Diffusionsmodell implementiert und mit Chloridprofilen aus Beton, hergestellt mit CEM I, validiert:

- zeitabhängiger Hydratationsgrad
- Porosität
- Tortuosität
- Chloridbindung
- Kontaktzone der Gesteinskörnung mit dem Zementstein
- Porenverschlusseffekt

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass das FEM-Diffusionsmodell, basierend auf dem 2. Fick'schen Diffusionsmodell, bei Beaufschlagungsdauern mit 3,0-%-iger $NaCl$-Lösung von größer als 130 Tagen verwendet werden kann, um die Chloridprofile zu simulieren.

Die somit gewonnenen Erkenntnisse konnten für die Weiterentwicklung eines ersten Ansatzes für die FEM-Modellierung von Beton unter Frost-Tausalz-Angriff und des Schnellmigrationstests (vgl. nachfolgendes Kapitel 6.2) verwendet werden.

6.2 FEM-Modell: Chloridtransport unter Frost-Tausalz-Angriff

Wie in Kapitel 6.1 beschrieben, wurden die Erkenntnisse aus der FEM-Modellierung über den diffusionsgesteuerten Chloridtransport in Beton für die Weiterentwicklung des FEM-Modells über den Chloridtransport unter Frost-Tausalz-Angriff und den Schnellmigrationstest in einer weiteren Abschlussarbeit [Pri21] (Download über Hochschulbibliothek) verwendet.

Für die FEM-Modellierungen des Chloridtransportes unter Frost-Tausalz-Angriff (CDF-Prüfung) und des Schnellmigrationstests wurden dieselben Probekörper wie aus den Kapiteln 3 und 4 verwendet.

Es stellte sich während der Entwicklung des FEM-Modells über den Chloridtransport unter Frost-Tausalz-Angriff heraus, dass nachfolgende Parameter maßgebenden Einfluss auf die Qualität in Bezug auf die im Labor ermittelten Eindringtiefen mit den Eindringtiefen des FEM-Modells haben.

- zeitabhängiger Hydratationsgrad
- Porosität
- Temperatureinfluss nach Arrhenius

In der Abschlussarbeit wird ein neuer Kennwert eingeführt, der sich aus dem Unterschied der Chlorideindringtiefen von Probekörper mit und ohne Frost-Tausalz-Angriff, bezogen auf die CDF-Versuchslaufzeit (7 oder 14 Tage), ergibt. Er wird in [Pri21] als Geschwindigkeitsfeld u_y in [m/s] bezeichnet und als konvektiver Bestandteil im Rahmen des Chloridtransportes in Beton in die FEM-Modellierung implementiert. Die Berechnung erfolgt durch die Differenz $\Delta x_{Frost-Dif}$ der Chlorideindringtiefen von den Probekörpern unter Frost-Tausalz-Angriff mit den Probekörpern aus den Diffusionsversuchen. Er beschreibt die Geschwindigkeit des Chlorideindringens, das der Frost-Tausalz-Angriff verursacht.

Die in der Abschlussarbeit vorgeschlagene Variante (Variante 4: Berücksichtigung des Hydratationsgrades bis zum 35. Herstelltag und des variablen Arrheniusfaktors, der in Abhängigkeit des Temperaturverlaufes (vgl. Abb. 3-9) in der CDF-Prüfung ermittelt wurde) weist nach dem 14. (7. Tag in CDF-Prüfung) und 28. (14. Tag in CDF-Prüfung) FTSW, Abweichungen von - 29,2 % bis + 49,9 % bezogen auf die im Labor ermittelten Chlorideindringtiefen auf. d. h. die durch FEM-Modellierung simulierten Eindringtiefen im Vergleich zu den Eindringtiefen, die durch die Chloridprofile ermittelt wurden, werden z. T. als zu gering (negative prozentuale Abweichung) wie auch als zu hoch (positive prozentuale Abweichung) prognostiziert. Hier lässt sich mindestens ein Trend erkennen. Bei Betonen, die mit SFA (Flugasche) oder mit SF (Silikastaub) hergestellt wurden, werden durch die FEM-Modellierung größere Eindringtiefen ermittelt als im Labor. Dies ist wohl auf die unzureichende Abbildung des real vorliegenden Porengefüges und der damit einhergehenden höheren Gefügedichtheit zurückzuführen.

Es ist anzumerken, dass beide genannten FEM-Modelle (vgl. Kapitel 6.1, 6.2) nicht Anspruch auf die vollumfängliche Simulation des Frost-Tausalz-Angriffes und den damit verbundenen Chloridtransport in Beton haben. Sie sind als weiterer Baustein für ergänzende Überlegungen zu verstehen.

Weiterführende Literatur für FEM-Ansätze können [Kle12][WU14][And19][Ste00][Cel][Eri21] entnommen werden.

6.3 Einfluss des Frost-Tausalz-Angriffes auf die Lebensdauerprognose

Die Verwendbarkeit der linearen, partiellen Differentialgleichung zweiter Ordnung (2. Fick'sches Diffusionsgesetz, vgl. Kapitel 4.1.2, 4.1.3, Glg. 4-X) außerhalb der Konvektionszone und in Bereichen ohne durch Frost-Tausalz-Wechsel hervorgerufene Gefügeschädigung sollte im Rahmen von systematisch erhobenen Bauwerksdaten an Infrastrukturbauwerken wie Brücken bestätigt

werden. Hierbei sollten u. a. Daten aus Wetterstationen verwendet werden, um den Temperatureinfluss auf den Chloridtransport in Beton unter Frost-Tausalz-Angriff näher zu erfassen. Ebenso sollte der Einfluss des Frost-Tausalz-Angriffes auf die Chloridbindekapazität nochmals systematisch untersucht werden, um die bindemittelabhängige Porosität im Rahmen der voranschreitenden Hydratation und den damit verbundenen Einfluss auf den Chloridtransport genauer zu erfassen.

Sollte sich bei der Validierung von Bauwerksdaten herausstellen, dass der anwenderfreundliche Diffusionsansatz verwendet werden kann, könnten die bestehenden Modelle für die Prognose der Lebensdauer von Stahlbetonbauwerken um den Anteil des Frost-Tausalz-Angriffes ergänzt werden. Bisher findet dieser Anteil keine direkte Berücksichtigung, obwohl er den Chloridtransport in Beton im Vergleich zu Betonen ohne Frost-Tausalz-Angriff begünstigt und somit die Lebensdauer herabsetzt.

Eine andere Möglichkeit, den Chloridtransport in Beton vollumfänglicher zu beschreiben, wäre die Weiterentwicklung von FEM-Modellen (vgl. Kapitel 6.1, refsubsubsec:Ansatz eines FEM-Modells über den Chloridtransport unter Frost-Tausalz-Angriff). Hierzu ist allerdings die Kenntnis der unterschiedlich wirkenden material- und expositionsbedingten Einflüsse auf den Chloridtransport in Beton von Interesse, um belastbare und praxistaugliche FEM-Modelle bereitzustellen.

An dieser Stelle sei der freundliche Hinweis von Univ.-Prof. Dr. Dr. Max J. Setzer angemerkt, dass der Temperatureinfluss im Rahmen des Frost-Tausalz-Angriffes das elektrische Potential in porösen Medien wie Beton beeinflussen kann. Durch die damit einhergehenden unterschiedlichen Potentiale können Einflüsse auf negativ geladene Chloridionen vorhanden sein. In Abhängigkeit der Porosität kann somit ein weiterer Einfluss auf den Chloridtransport in Beton vorhanden sein. Es könnte in weiteren Betrachtungen versucht werden, den Umfang dieses Einflusses zu quantifizieren.

6.4 Migrationstest

Der Schnellmigrationstest zur Bestimmung des Widerstandes gegenüber Salz wie $NaCl$ oder $NaBr$, der durch den nicht stationären Migrationskoeffizienten M_{nss} beschrieben wird, wird mit der Formel Glg. 3-VII (vgl. Kapitel 3.4.8) berechnet.

Eigene Versuche deuten darauf hin, dass die Migrationskoeffizienten M_{nss} trotz Berücksichtigung durch die inversen Fehlerfunktion (vgl. Abb. 3-51) beim gleichen Beton, aber höheren Salzkonzentrationen größer sind.

Ferner wird bei der Berechnung von Glg. 3-IX angenommen, dass der farbausschlaggebende Chloridgehalt c_d konstant bei 0,07 $[mol \cdot l^{-1}]$ liegt. In [Tan96] wird der vorgenannte Wert festgelegt. Es wird u. a. [ONN92] zitiert. Hier werden weitere Einflüsse auf den Umschlagspunkt diskutiert. Dies kann in Abhängigkeit von der Porenlösung des Betons und weiteren Einflüssen auf den Umschlagspunkt von $AgNO_3$ unter Anwesenheit von freien Chloridionen nochmals systematisch untersucht werden, um im besten Falle quantifizierbare Aussagen über den farbausschlaggebenden Umschlagspunkt c_d bei Verwendung von $AgNO_3$ treffen zu können.

Anhang

A-1 Fluoreszenzmikroskopie

Herstellung von Probekörpern für die Fluoreszenzmikroskopie:

- Herstellung von Betonscheiben ca. 146 x 70 x 150 [mm] durch Sägung der Probekörper (vgl. Abb. 3-13 und 3-14) aus den Frost-Tausalz- und Diffusions-Versuchen mit einer Betonsäge
- weiterer Zuschnitt auf ca. 50 x 50 x 15 [mm] mittels Feinsäge zur Minimierung der Vibrationen, die das Gefüge weiter schädigen können
- Trocknung der Würfel bei 105 °C bis zur Massekonstanz
- Tränkung der Würfel in einem niedrigviskosen Duromer auf Epoxidharzbasis. Epoxidharz wurde zuvor mit fluoreszierendem Pulver vermengt
- Lagerung der Würfel in einen Exsikkator mit Vakuumpumpe (Asynchroner Elektromotor: 50 Hz, 80 W, 230 V, 0,98 A, 1440 U/min). Laufzeit der Vakuumpumpe erfolgte solange, bis keine Bläschen mehr an der Oberfläche des fluoreszierenden Epoxidharzes, in dem die Würfel untergetaucht waren, aufstiegen (Dauer ca. 20 Minuten)
- 24-stündige Erhärtung der getränkten Würfel
- Gewinnung der 30 x 30 x 30 [mm] großen Probekörper für die Fluoreszenzmikroskopie mittels Feinsäge. Schnittfläche rechtwinklig zur befrosteten bzw. unbefrosteten, aber mit $NaCl$ beaufschlagten Betonoberfläche.
- Schleifen der Schnittflächen in vier Stufen. Erzeugung der Analysefläche durch wassergekühltes Planschleifen in den Stufen 125, 75, 54, 18 μm
- Fluoreszenzmikroskopie der Analyseflächen mit Mikroskop Leica Typ: 020-520.701 DMLM/P mit UV-Licht und digitaler Bildübertragung an einen PC
- Zusammensetzen der stückweise gewonnenen Bilder mittels Software

A-2 LIBS–Kalibrierpresslinge

Tab. A-2.1: Herstellung von $NaBr$-Kalibrierpresslingen für LIBS zur Bestimmung des Bromidgehaltes im Beton

(a) Zementleim nach dem Vermengen mit $NaBr$, CEM I und Wasser (frisch)

ZEMENTLEIM FRISCH		
Probe [Nr.]	theor. Br^--Gehalt [M.-%]	Br^--Gehalt inkl. gebundenem H_2O [M.-%]
NaBr_01	0,000	0,000
NaBr_02	0,100	0,165
NaBr_03	0,250	0,412
NaBr_04	0,500	0,824
NaBr_05	0,750	1,236
NaBr_06	1,000	1,648
NaBr_07	1,500	2,472
NaBr_08	2,000	3,297
NaBr_09	2,500	4,121
NaBr_10	3,000	4,945

(b) Zementleim nach dem Vermengen mit $NaBr$, CEM I und Wasser (frisch)

ZEMENTLEIM FRISCH			
Probe [Nr.]	$NaBr$-Salzeinwaage [g]	Maße Beutel [g]	Maße Beutel + Zementleim (200g Zement + 100g Wasser) [g]
NaBr_01	0,000	3,500	303,500
NaBr_02	0,330	3,500	303,830
NaBr_03	0,824	3,500	304,324
NaBr_04	1,648	3,500	305,148
NaBr_05	2,472	3,500	305,972
NaBr_06	3,297	3,500	306,797
NaBr_07	4,945	3,500	308,445
NaBr_08	6,593	3,500	310,093
NaBr_09	8,241	3,500	311,741
NaBr_10	9,890	3,500	313,390

(c) Zementleim nach 14-tägiger Hydratation und Ofentrocknung mit $NaBr$, CEM I und Wasser (fest)

ZEMENTLEIM FEST nach 14 Tagen			
Probe [Nr.]	Maße nach 105°C [g]	evap. H_2O [g] = [%]	chem. H_2O [g] = [%]
NaBr_01	230,800	69,200	30,800
NaBr_02	234,100	66,230	33,770
NaBr_03	235,200	65,624	34,376
NaBr_04	233,600	68,048	31,952
NaBr_05	234,300	68,172	31,828
NaBr_06	235,900	67,397	32,603
NaBr_07	236,400	68,545	31,455
NaBr_08	237,500	69,093	30,907
NaBr_09	240,600	67,641	32,359
NaBr_10	238,200	71,690	28,310

*Bezogen auf Bindemittel inklusive verdampfbarem und chem. gebundenem H_2O
[1] $NaBr$-Zugabe in Anmachwasser, rechnerische Berücksichtigung des gebundenen H_2O´s

(d) Berechnung der Br^--Gehalte nach Ofentrocknung unter Berücksichtigung des verdampfbaren Wasseranteils und der eingewogenen $NaBr$-Massen. Angabe des relativen Fehlers bezogen auf den theoretischen Br-Gehalt aus Tabelle A-2.1

BERECHNUNG			
Probe [Nr.]	Br^--Gehalt [M. − $\%\frac{\mathrm{Br}}{\mathrm{CEM+H_2O-evap.H_2O+NaBr}}$]	$w/z_{105°C}$ [−]	rel. Fehler [%]
NaBr_01	0,000	0,154	0,0
NaBr_02	0,109	0,169	9,2
NaBr_03	0,271	0,172	8,5
NaBr_04	0,544	0,160	8,8
NaBr_05	0,811	0,159	8,1
NaBr_06	1,070	0,163	7,0
NaBr_07	1,591	0,157	6,1
NaBr_08	2,098	0,155	4,9
NaBr_09	2,572	0,162	2,9
NaBr_10	3,096	0,142	3,2
		mittlerer rel. Fehler	**5,9**

A-3 Einfluss auf den Chloridgehalt mit LIBS

Tab. A-3.1: Einfluss der Probekörpervorbereitung auf den LIBS-Chloridgehalt. Spaltung (Bruch), trockenes oder nasses Sägen der Probekörper

	LIBS [Cl.-M.-%/b*]	berechneter Cl.-Gehalt [Cl.-M.-%/b*]	SD [Cl.-M.-%/b*]	CoV [%]	Abw. $\frac{\text{nass o. trocken}}{\text{Bruch}}$ [%]
PK1 Bruch	0,17	0,60	0,19	26,21	n.v.
PK1 nass	0,64	0,60	0,15	23,90	9,83
PK1 trocken	0,53	0,60	0,16	30,97	25,45
PK3 Bruch	0,45	0,32	0,14	30,03	n.v.
PK3 nass	0,42	0,32	0,15	35,64	6,82
PK3 trocken	0,37	0,32	0,12	33,93	19,14
PK4 Bruch	1,02	0,88	0,21	20,66	n.v.
PK4 nass	0,94	0,88	0,17	17,93	8,35
PK4 trocken	0,85	0,88	0,19	22,21	16,89

A-4 Vergleich von RCM, RBM und Indikatormethode

Tab. A-4.1: Vergleich des Migrationsversuches mit $NaCl$ und $NaBr$ zur Bestimmung des LIBS-Gehaltes beim Umschlagspunkt mittels Indikatormethode.

(a) RCM-Versuch: Bestimmung von $c_{d,Cl,LIBS}$ bei $x_{d,Cl}$ aus Indikatormethode beim Farbumschlagpunkt

Parameter [-]	$\mathbf{c_{d,Cl,LIBS}}$ **[M.-%/b*]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Cl}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Cl}}$ **[M.-%/b*]**
Mittelwert	0,20	9,56	0,71
SD	0,07	1,90	0,16
CoV [%]	32,3	19,9	22,0

(b) RBM-Versuch: Bestimmung von $c_{d,Br,LIBS}$ bei $x_{d,Br}$ aus Indikatormethode beim Farbumschlagpunkt

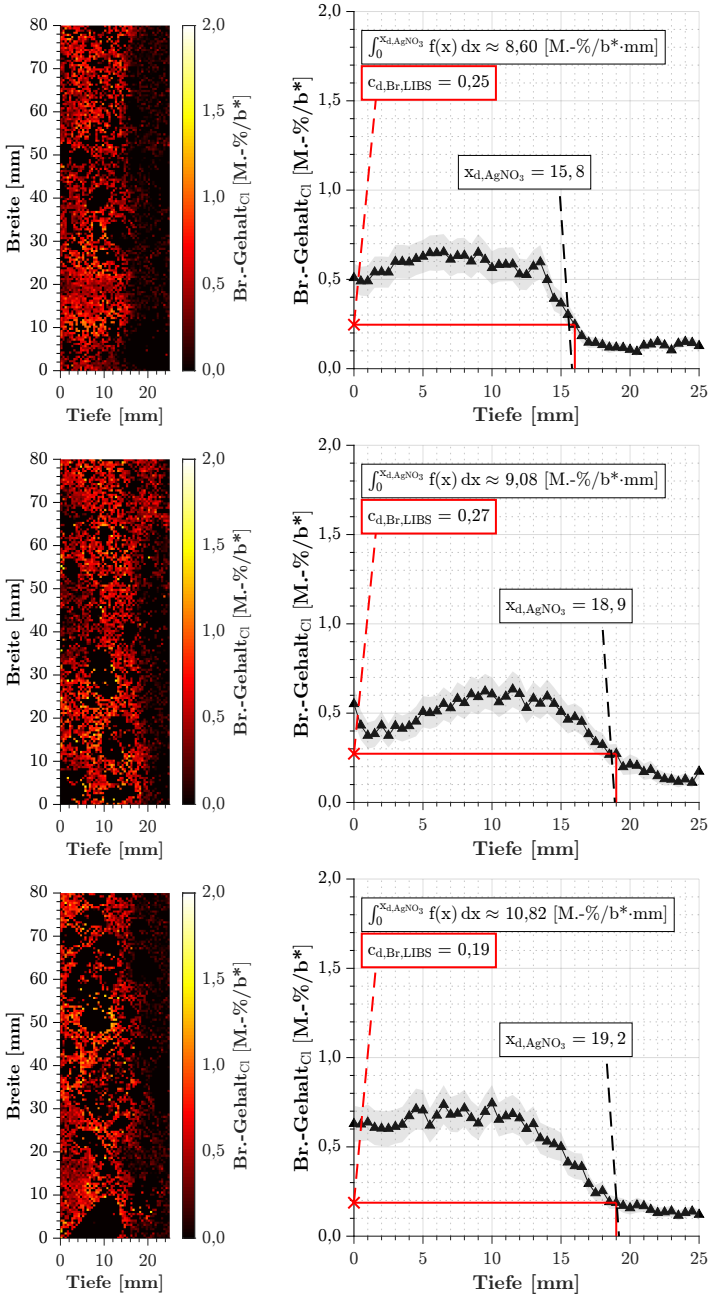
Parameter [-]	$\mathbf{c_{d,Br,LIBS}}$ **[M.-%/b*]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Mittelwert	0,14	7,91	0,68
SD	0,03	3,26	0,25
CoV [%]	23,9	41,3	37,2

A-5 Farbumschlagspunkt mit LIBS im 0-RBM

Tab. A-5.1: 0-RBM: Bestimmung des LIBS-Bromidgehaltes beim Umschlagspunkt mittels Indikatormethode.

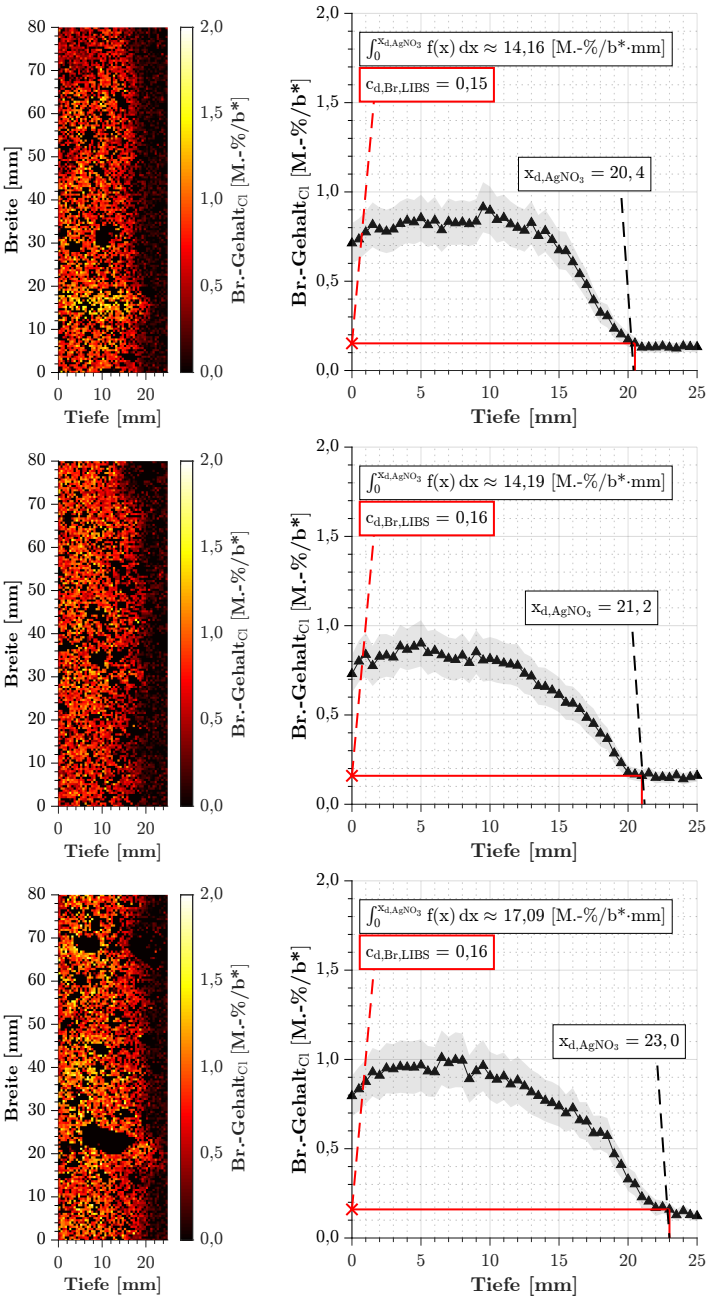
(a) 0-RBM-Versuch: Bestimmung von $c_{d,Br,LIBS}$ mit LIBS beim Umschlagspunkt $x_{d,Br}$ aus Indikatormethode beim Farbumschlagpunkt. CEM I, LP = 1,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{c_{d,Br,LIBS}}$ **[M.-%/b*]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Mittelwert	17,97	0,24	9,94	0,72
SD	1,88	0,05	1,24	0,10
CoV [%]	10,5	21,8	12,5	14,0



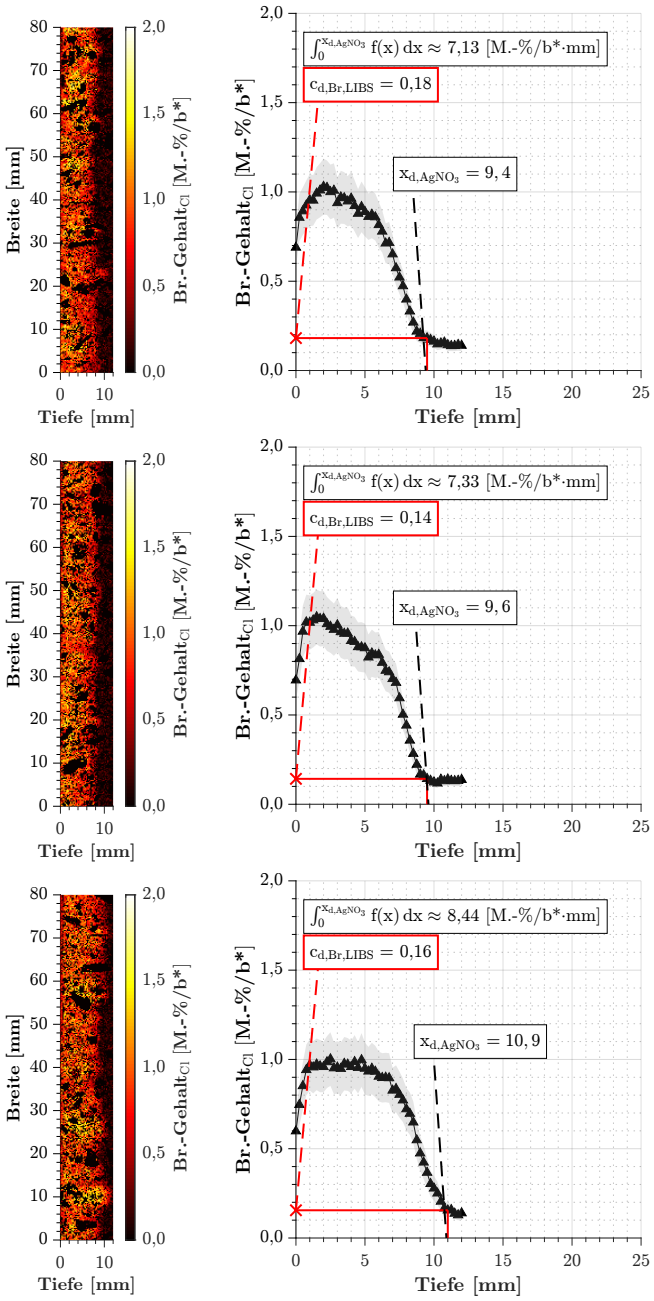
(b) 0-RBM-Versuch: Bestimmung von $c_{d,Br,LIBS}$ mit LIBS beim Umschlagspunkt $x_{d,Br}$ aus Indikatormethode beim Farbumschlagpunkt. CEM I, LP = 10,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ [mm]	$\mathbf{c_{d,Br,LIBS}}$ [M.-%/b*]	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ [M.-%/b*·mm]	$\mathbf{max_{Br}}$ [M.-%/b*]
Mittelwert	21,53	0,16	15,36	0,96
SD	1,33	0,00	1,79	0,08
CoV [%]	6,2	2,9	11,7	8,7



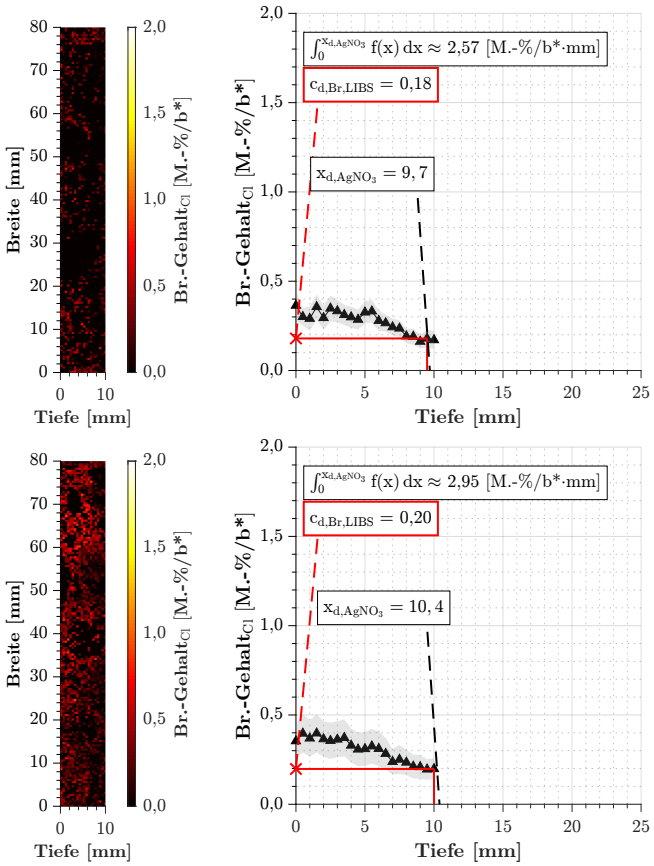
(c) 0-RBM-Versuch: Bestimmung von $c_{d,Br,LIBS}$ mit LIBS beim Umschlagspunkt $x_{d,Br}$ aus Indikatormethode beim Farbumschlagpunkt. CEM I+SF (k=1,0), LP = 7,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ [mm]	$\mathbf{c_{d,Br,LIBS}}$ [M.-%/b*]	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ [M.-%/b*·mm]	$\mathbf{max_{Br}}$ [M.-%/b*]
Mittelwert	9,97	0,16	7,71	1,04
SD	0,81	0,02	0,77	0,02
CoV [%]	8,2	12,5	10,0	1,8



(d) 0-RBM-Versuch: Bestimmung von $c_{d,Br,LIBS}$ mit LIBS beim Umschlagspunkt $x_{d,Br}$ aus Indikatormethode beim Farbumschlagpunkt. CEM II/AS, LP = 0,8 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{c_{d,Br,LIBS}}$ **[M.-%/b*]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Min.	9,70	0,18	2,59	0,36
Max.	10,00	0,20	3,01	0,40
Mittelwert	9,85	0,19	2,8	0,38

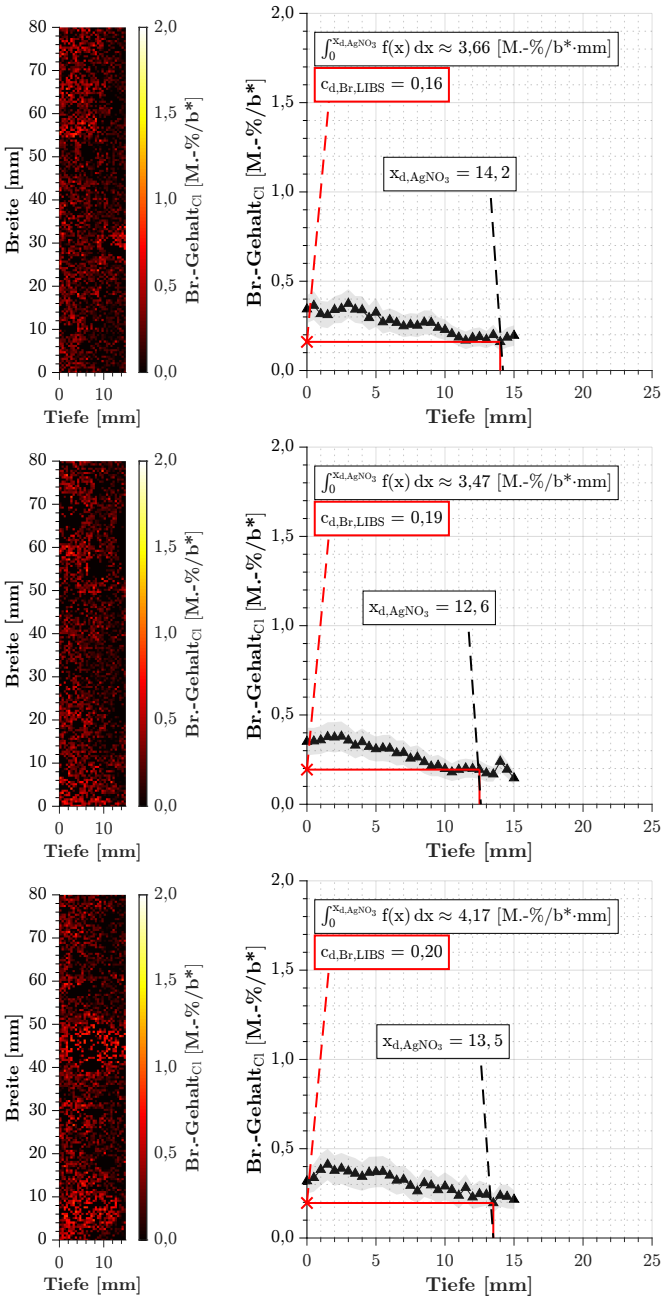


Nicht lesbar

Nicht lesbar

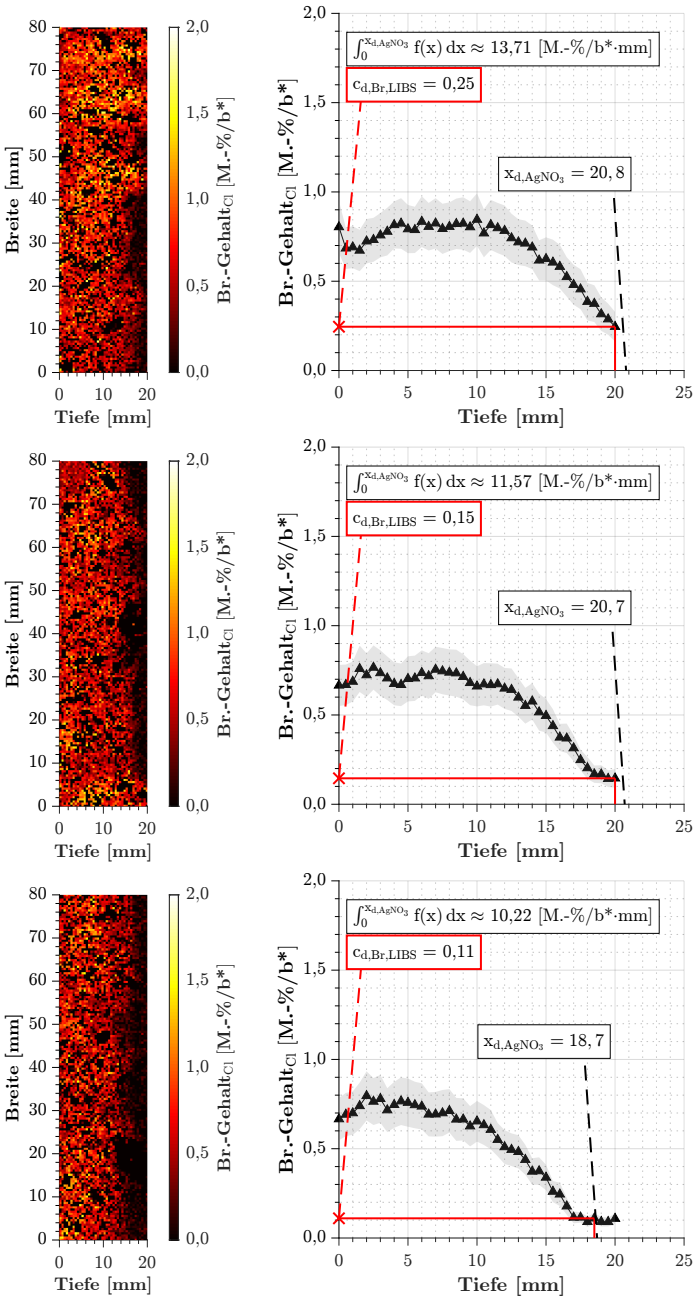
(e) 0-RBM-Versuch: Bestimmung von $c_{d,Br,LIBS}$ mit LIBS beim Umschlagspunkt $x_{d,Br}$ aus Indikatormethode beim Farbumschlagpunkt. CEM II/AS, LP = 9,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ [mm]	$\mathbf{c_{d,Br,LIBS}}$ [M.-%/b*]	$\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx$ [M.-%/b*·mm]	$\mathbf{max_{Br}}$ [M.-%/b*]
Mittelwert	13,40	0,18	3,94	0,41
SD	0,80	0,02	0,58	0,04
CoV [%]	6,0	10,9	14,8	10,5



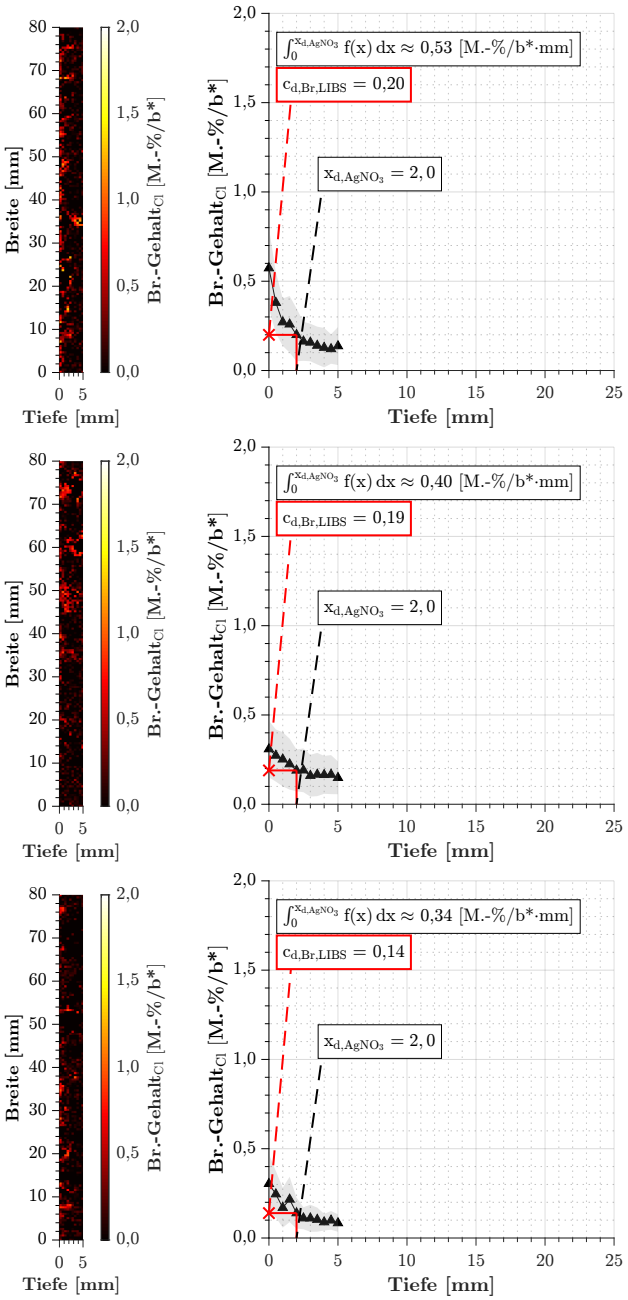
(f) 0-RBM-Versuch: Bestimmung von $c_{d,Br,LIBS}$ mit LIBS beim Umschlagspunkt $x_{d,Br}$ aus Indikatormethode beim Farbumschlagpunkt. CEM I, LP = 7,2 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ [mm]	$\mathbf{c_{d,Br,LIBS}}$ [M.-%/b*]	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ [M.-%/b*·mm]	$\mathbf{max_{Br}}$ [M.-%/b*]
Mittelwert	19,80	0,19	12,07	0,80
SD	1,56	0,03	0,92	0,04
CoV [%]	7,9	13,5	7,7	5,3



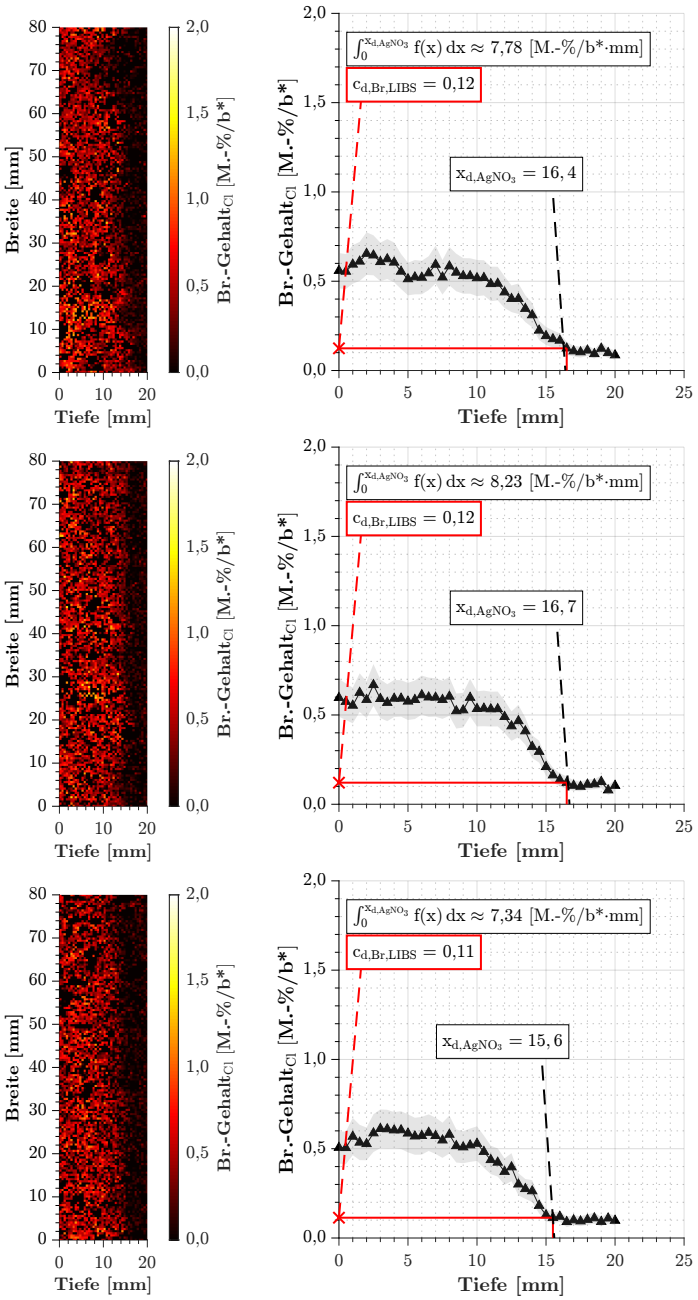
(g) 0-RBM-Versuch: Bestimmung von $c_{d,Br,LIBS}$ mit LIBS beim Umschlagspunkt $x_{d,Br}$ aus Indikatormethode beim Farbumschlagpunkt. CEM III/B, LP = 5,5 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ [mm]	$\mathbf{c_{d,Br,LIBS}}$ [M.-%/b*]	$\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx$ [M.-%/b*·mm]	$\mathbf{max_{Br}}$ [M.-%/b*]
Mittelwert	2,00	0,22	0,43	0,42
SD	0,00	0,06	0,10	0,15
CoV [%]	0,0	28,5	22,7	34,7



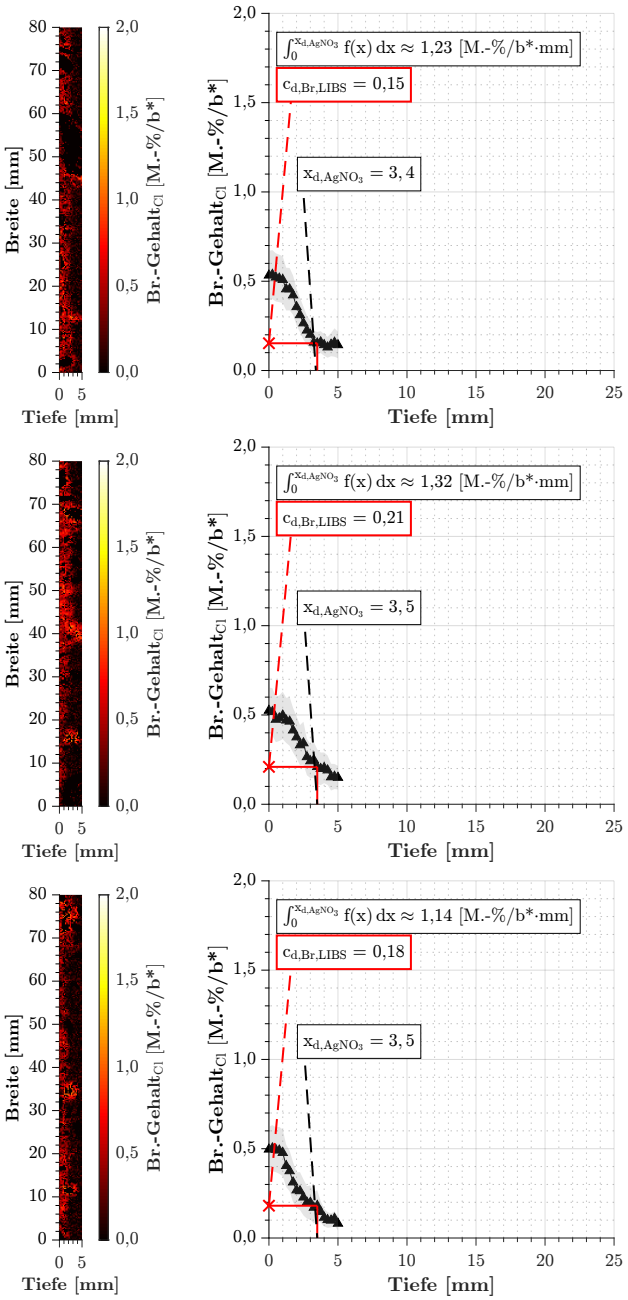
(h) 0-RBM-Versuch: Bestimmung von $c_{d,Br,LIBS}$ mit LIBS beim Umschlagspunkt $x_{d,Br}$ aus Indikatormethode beim Farbumschlagpunkt. CEM I+SFA (k=0,4), LP = 7,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ [mm]	$\mathbf{c_{d,Br,LIBS}}$ [M.-%/b*]	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ [M.-%/b*·mm]	$\mathbf{max_{Br}}$ [M.-%/b*]
Mittelwert	15,37	0,17	7,81	0,66
SD	0,71	0,01	0,47	0,02
CoV [%]	4,6	5,6	6,0	3,7



(i) 0-RBM-Versuch: Bestimmung von $c_{d,Br,LIBS}$ mit LIBS beim Umschlagspunkt $x_{d,Br}$ aus Indikatormethode beim Farbumschlagpunkt. CEM I+SF (k=0,0), LP = 7,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ [mm]	$\mathbf{c_{d,Br,LIBS}}$ [M.-%/b*]	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ [M.-%/b*·mm]	$\mathbf{max_{Br}}$ [M.-%/b*]
Mittelwert	3,33	0,20	1,26	0,53
SD	0,29	0,01	0,09	0,02
CoV [%]	8,7	7,5	7,4	4,0

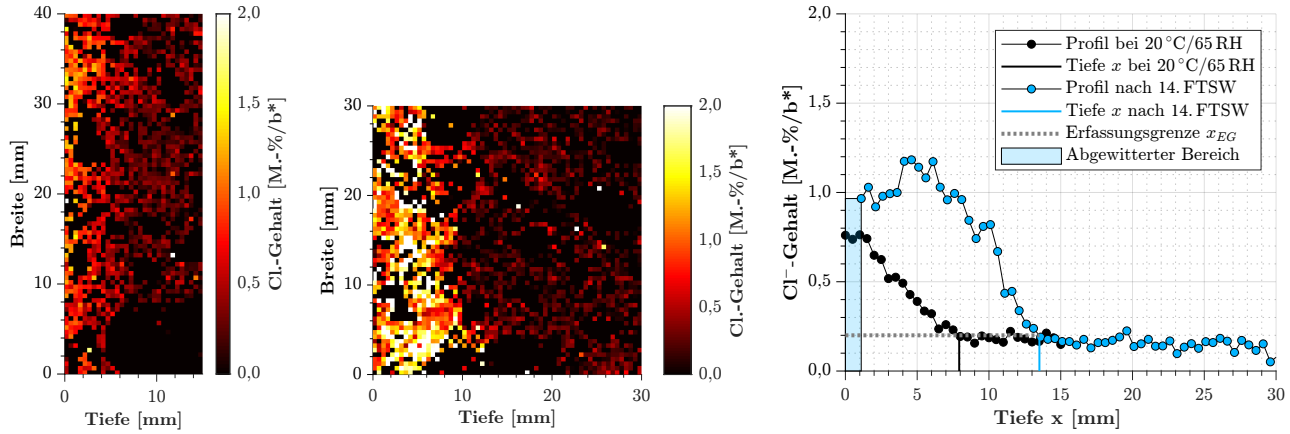


A-6 2D-LIBS und Chloridprofile nach 14. FTSW bzw. 20 °C/65 RH

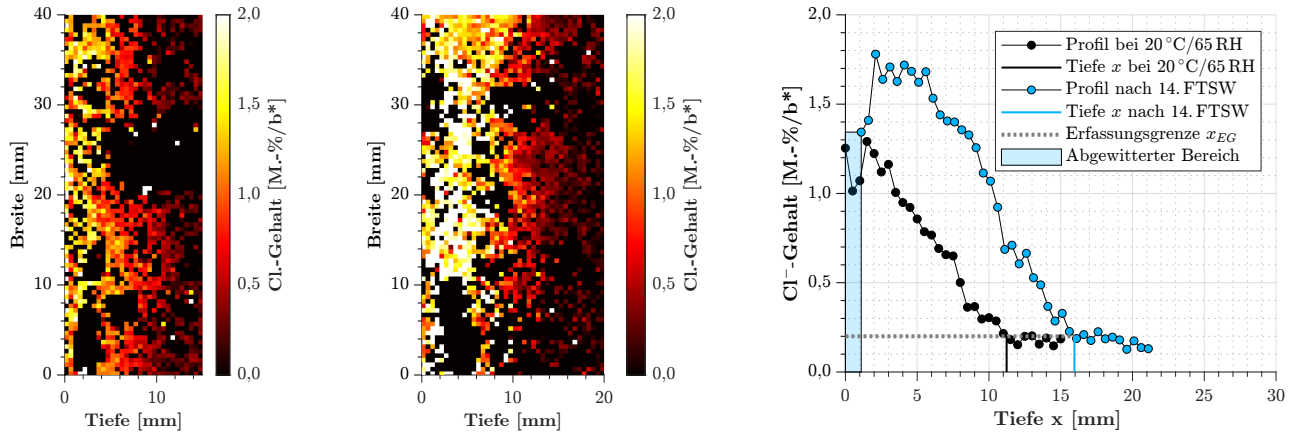
Tab. A-6.1: 14. FTSW: 2D-LIBS und Chloridprofile aus Einlagerung und CDF-Prüfung vor Migration.

(a) CEM I, LP = 1,0 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH (links), nach dem 14. FTSW aus CDF-Prüfung (mittig) und die daraus erstellten Chloridprofile (rechts) mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

PK1.2 (links-Einlagerung), PK1.1(mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)

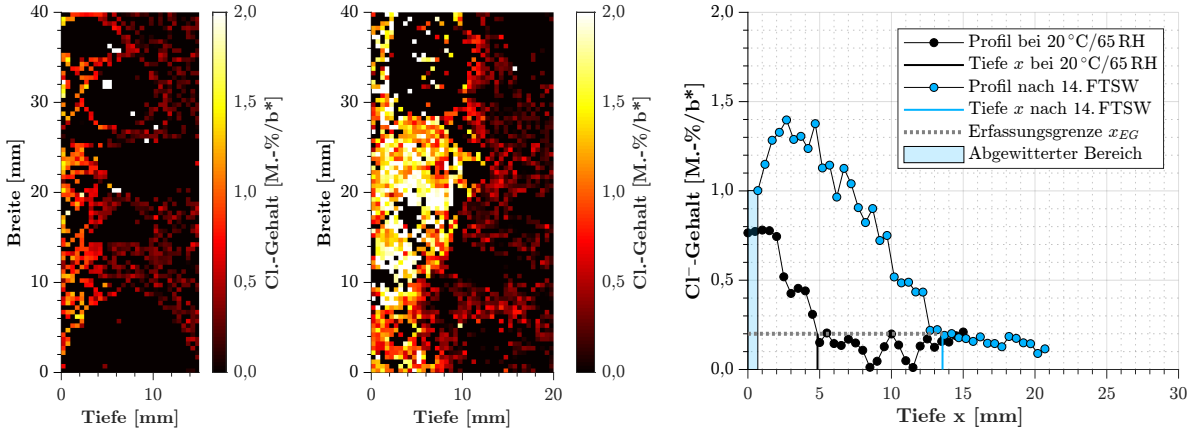


PK2.2 (links-Einlagerung), PK2.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)

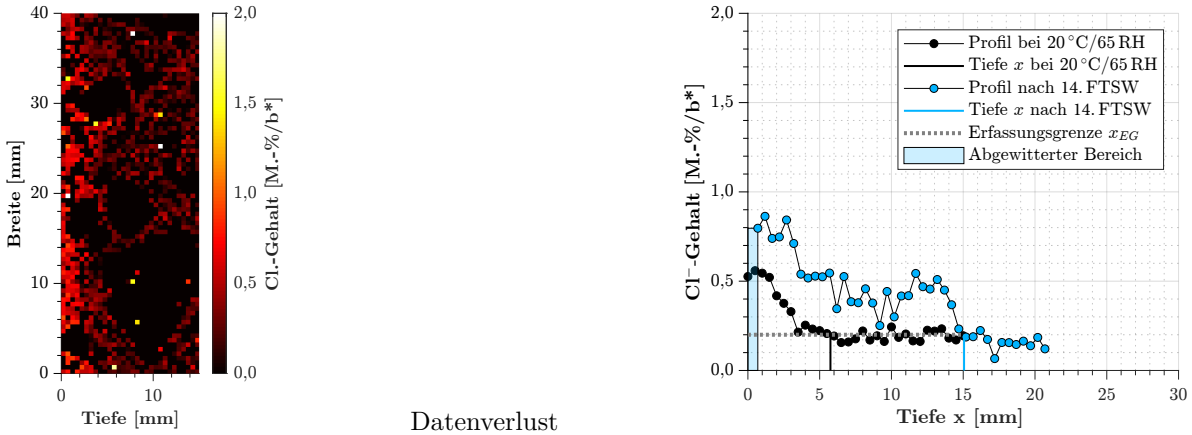


(b) CEM I+SF, LP = 1,0 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH (links), nach dem 14. FTSW aus CDF-Prüfung (mittig) und die daraus erstellten Chloridprofile (rechts) mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

PK22.2 (links-Einlagerung), PK22.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)



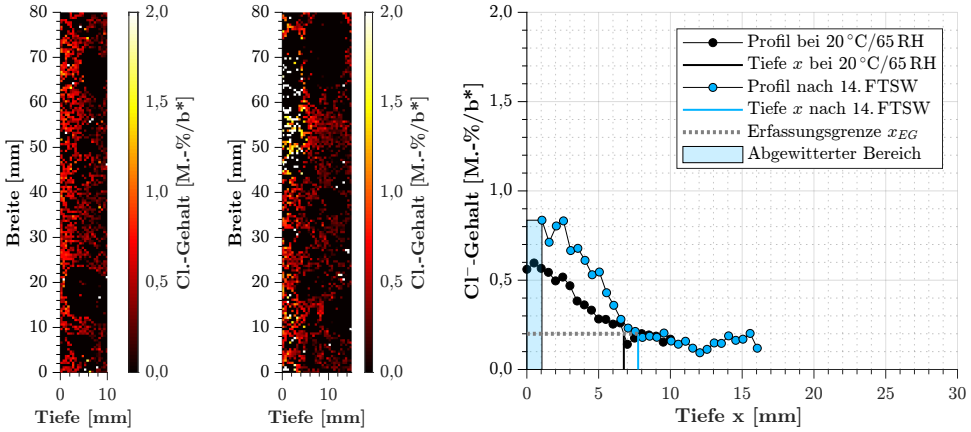
PK23.2 (links-Einlagerung), PK23.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)



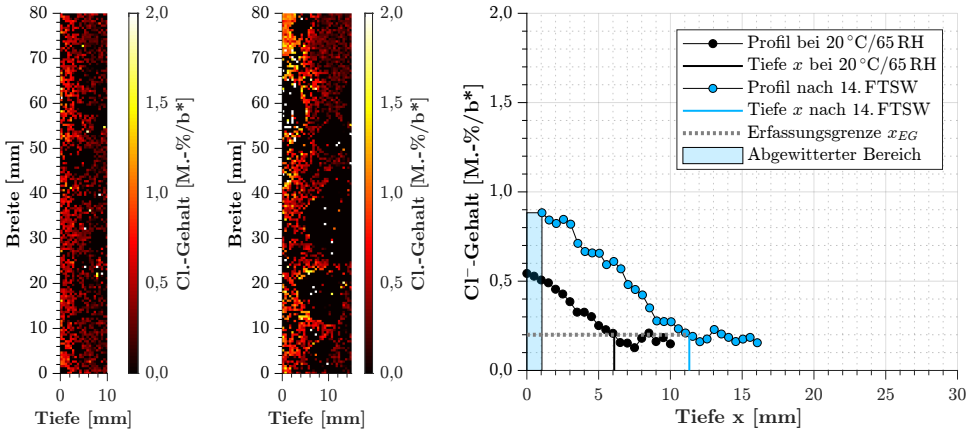
Datenverlust

(c) CEM II/A-S, LP = 0,8 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH (links), nach dem 14. FTSW aus CDF-Prüfung (mittig) und die daraus erstellten Chloridprofile (rechts) mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

PK1.2 (links-Einlagerung), PK1.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)

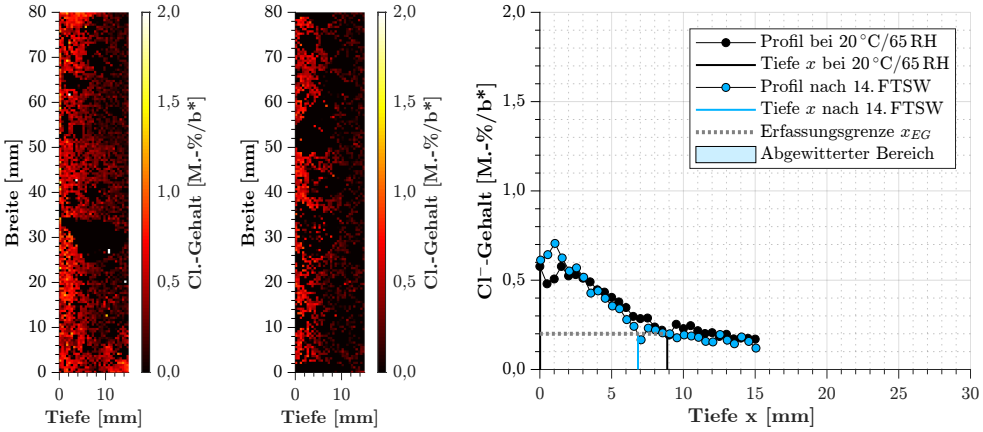


PK2.2 (links-Einlagerung), PK2.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)

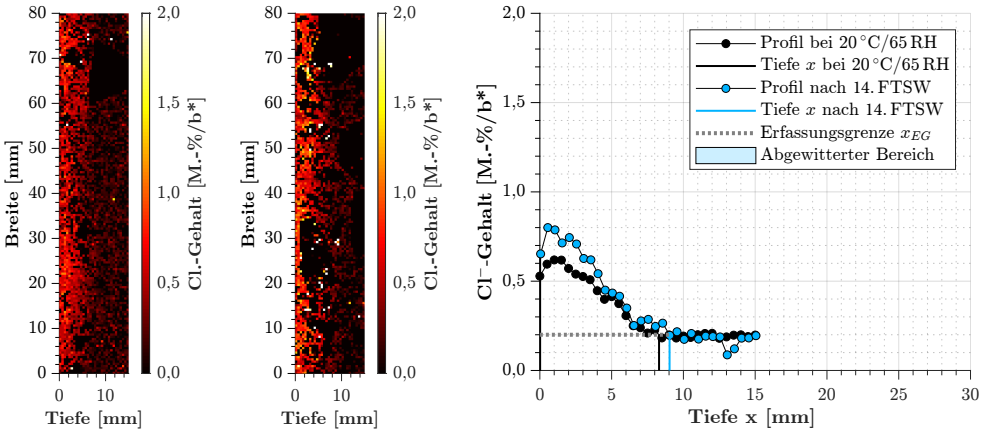


(d) CEM I, LP = 10,0 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH (links), nach dem 14. FTSW aus CDF-Prüfung (mittig) und die daraus erstellten Chloridprofile (rechts) mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

PK1.2 (links-Einlagerung), PK1.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)

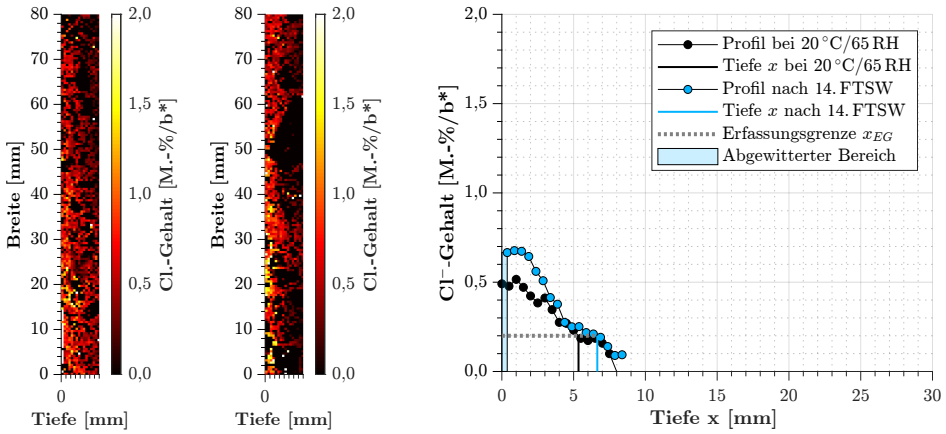


PK2.2 (links-Einlagerung), PK2.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)

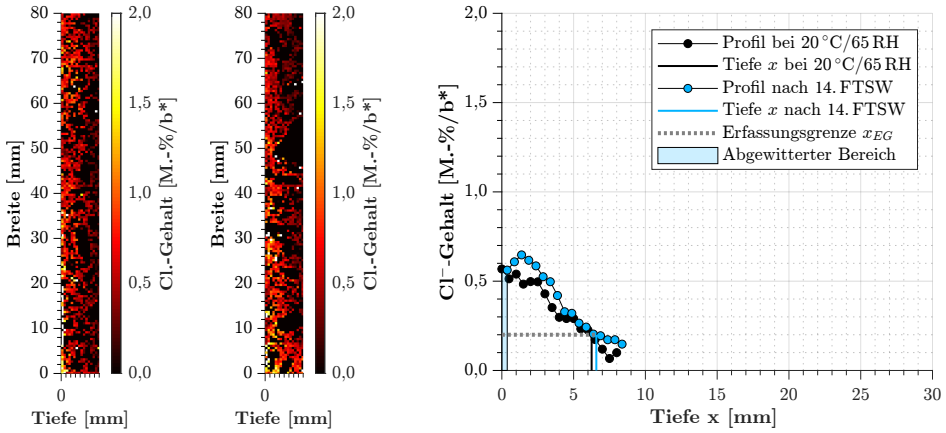


(e) CEM I, LP = 7,2 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH (links), nach dem 14. FTSW aus CDF-Prüfung (mittig) und die daraus erstellten Chloridprofile (rechts) mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

PK1.2 (links-Einlagerung), PK1.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)

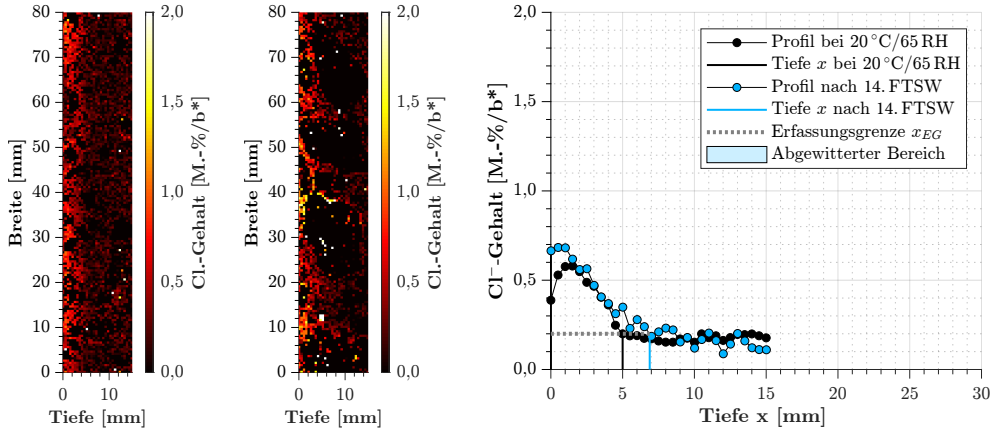


PK2.2 (links-Einlagerung), PK2.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)

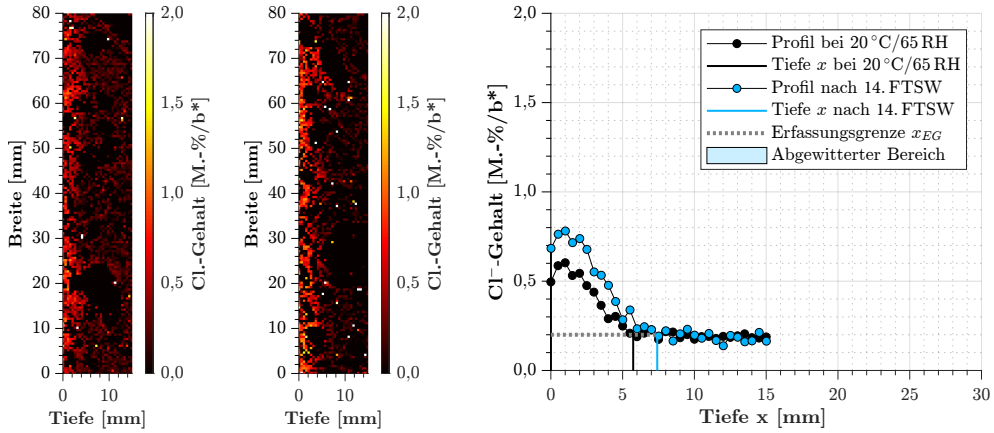


(f) CEM I+SF, LP = 7,0 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH (links), nach dem 14. FTSW aus CDF-Prüfung (mittig) und die daraus erstellten Chloridprofile (rechts) mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

PK13.2 (links-Einlagerung), PK13.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)

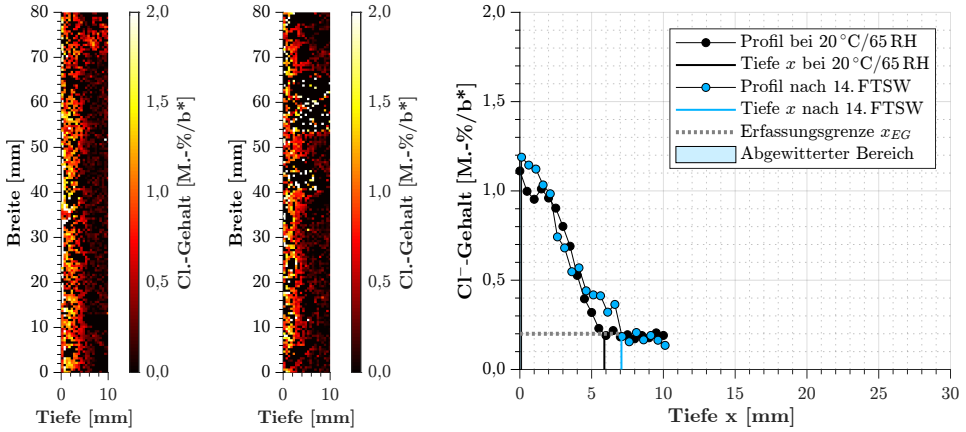


PK14.2 (links-Einlagerung), PK14.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)

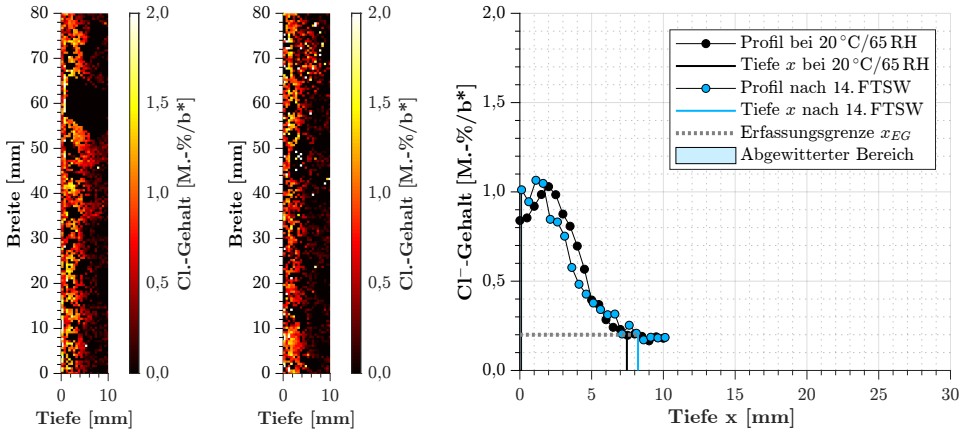


(g) CEM I+SF, LP = 7,0 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH (links), nach dem 14. FTSW aus CDF-Prüfung (mittig) und die daraus erstellten Chloridprofile (rechts) mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

PK7.2 (links-Einlagerung), PK7.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)

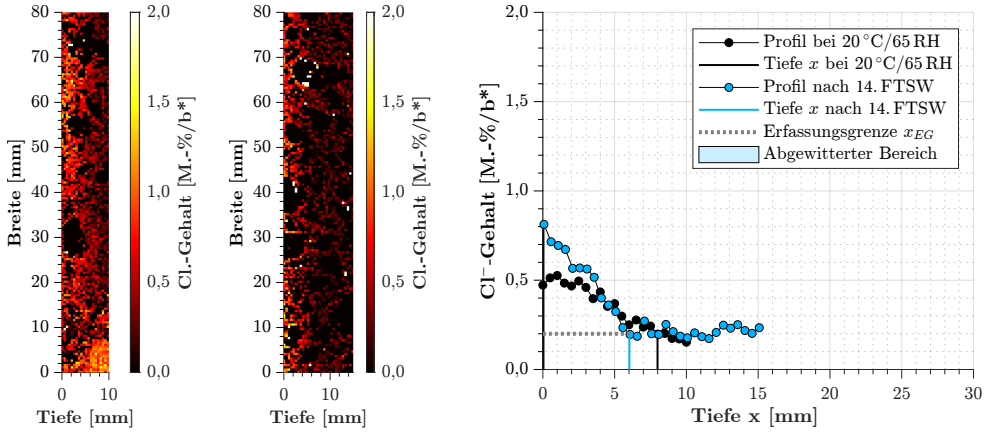


PK8.2 (links-Einlagerung), PK8.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)

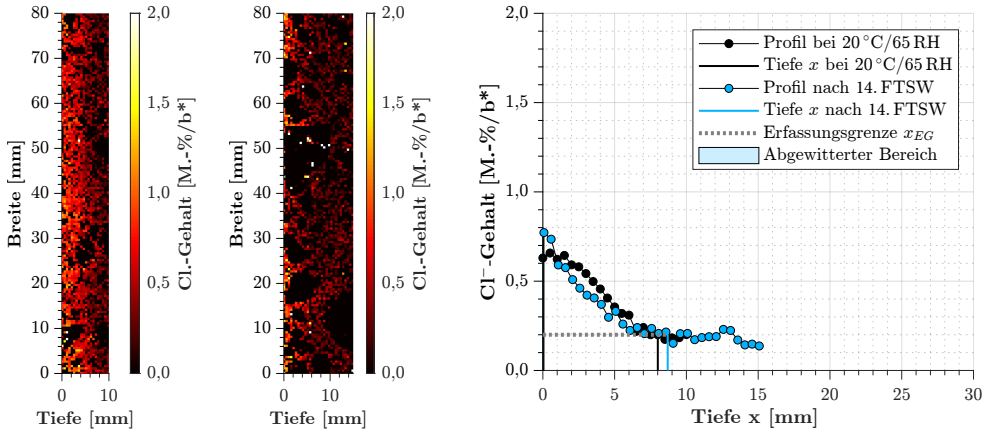


(h) CEM II/A-S, LP = 9,0 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH (links), nach dem 14. FTSW aus CDF-Prüfung (mittig) und die daraus erstellten Chloridprofile (rechts) mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

PK13.2 (links-Einlagerung), PK13.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)

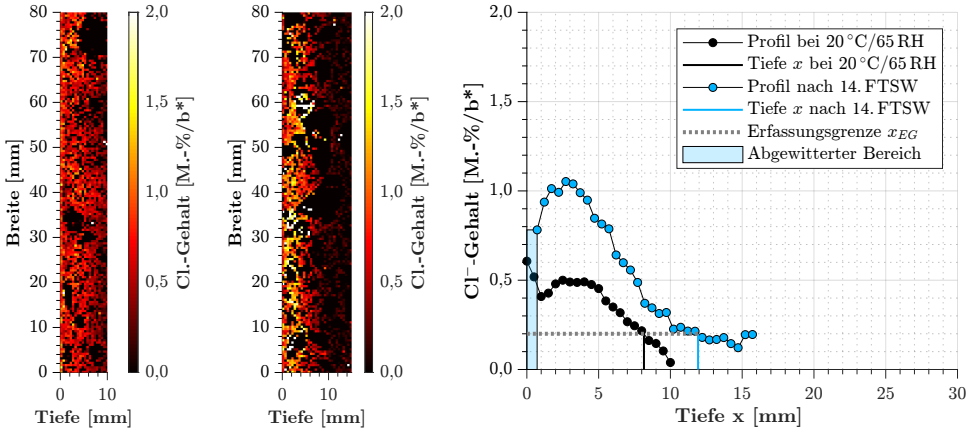


PK14.2 (links-Einlagerung), PK14.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)

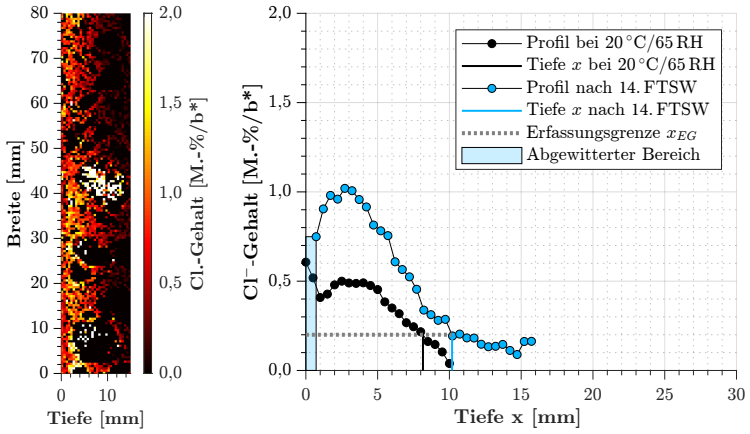


(i) CEM I+SFA, LP = 7,0 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH (links), nach dem 14. FTSW aus CDF-Prüfung (mittig) und die daraus erstellten Chloridprofile (rechts) mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

PK1.2 (links-Einlagerung), PK1.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)



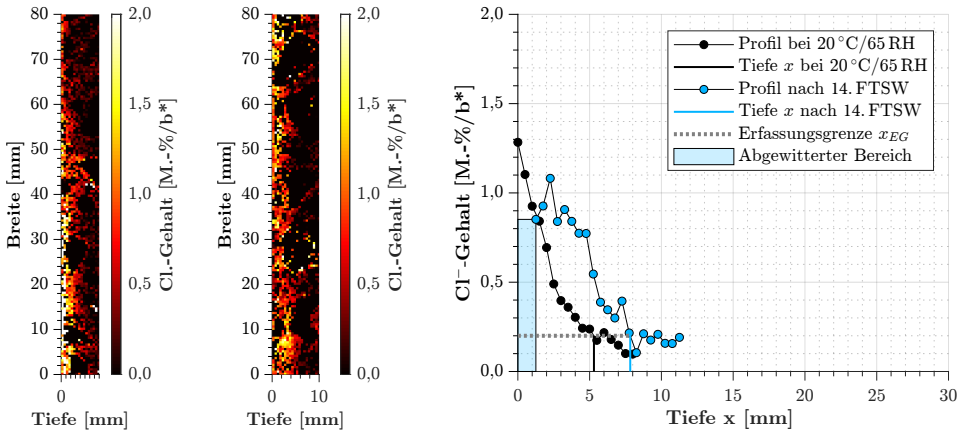
PK8.2 (links-Einlagerung), PK8.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)



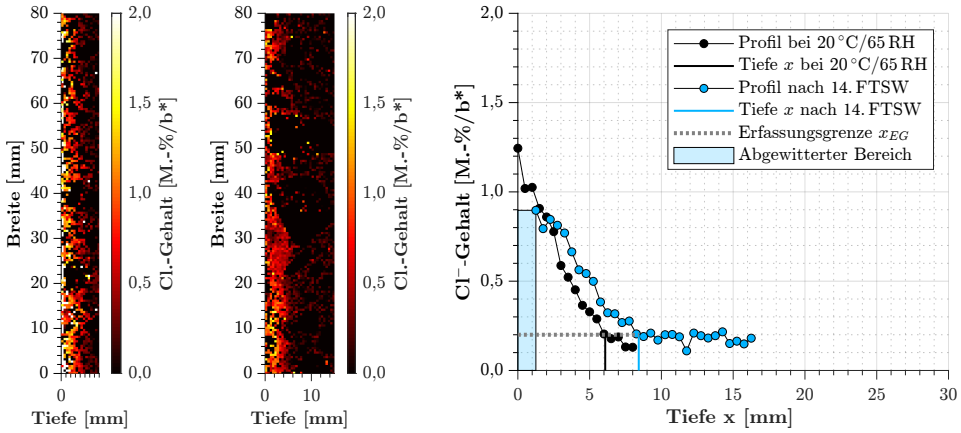
Datenverlust

(j) CEM III/B, LP = 5,5 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH (links), nach dem 14. FTSW aus CDF-Prüfung (mittig) und die daraus erstellten Chloridprofile (rechts) mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

PK7.2 (links-Einlagerung), PK7.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)



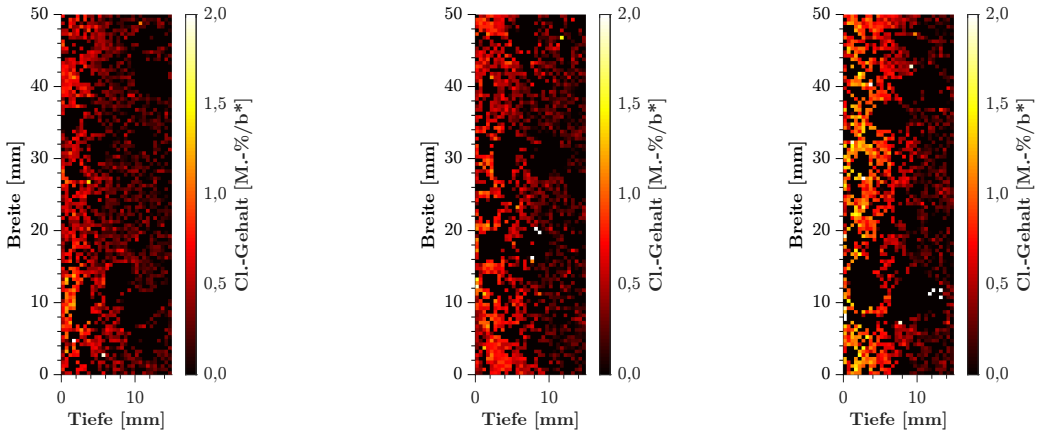
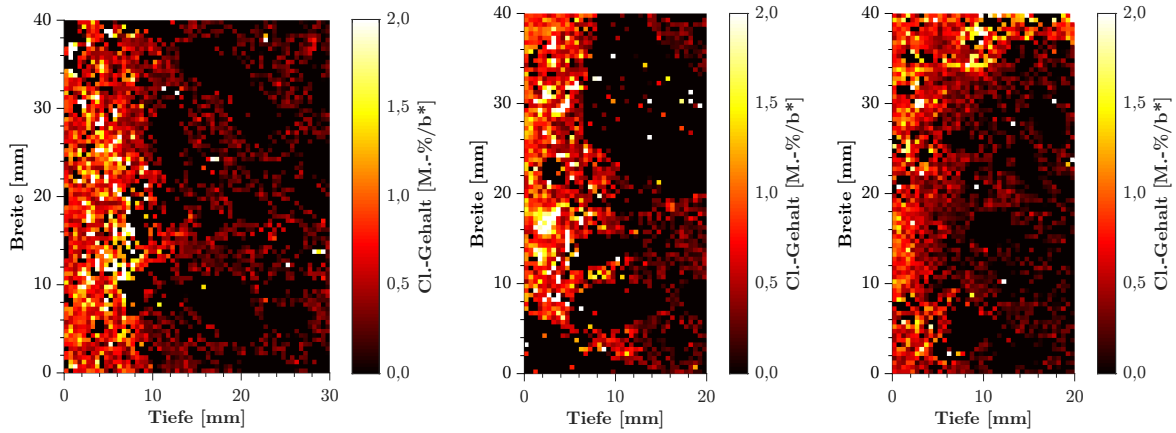
PK8.2 (links-Einlagerung), PK8.1 (mittig-CDF), Chloridprofile (rechts)



A-7 2D-LIBS und Chloridprofile nach 28. FTSW bzw. 20 °C/65 RH

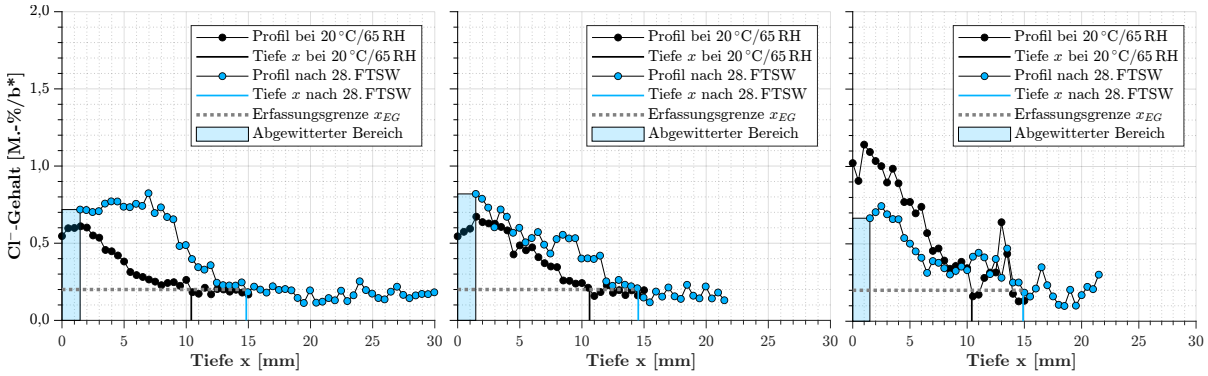
Tab. A-7.1: 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH, nach dem 28. FTSW aus CDF-Prüfung und die daraus erstellten Chloridprofile mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung.

(a) CEM I, LP = 1,0 Vol.-%, w/b = 0,5. Teil 1 der Darstellung.

PK3.2 (links-Einlagerung), PK4.2 (mittig-Einlagerung), PK5.2 (rechts-Einlagerung)

PK3.1 (links-CDF), PK4.1 (mittig-CDF), PK5.1 (rechts-CDF)


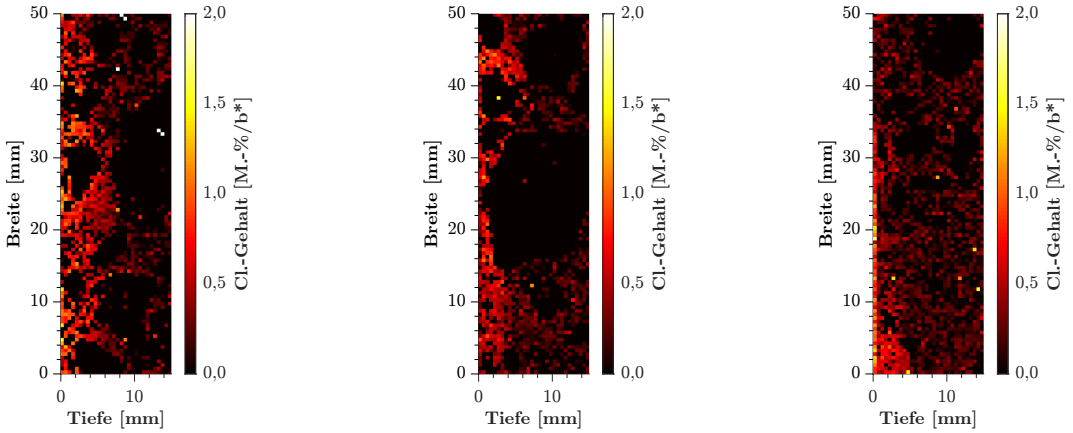
(b) CEM I, LP = 1,0 Vol.-%, w/b = 0,5. Teil 2 der Darstellung.

Chloridprofile aus den o.g. PK von links nach rechts

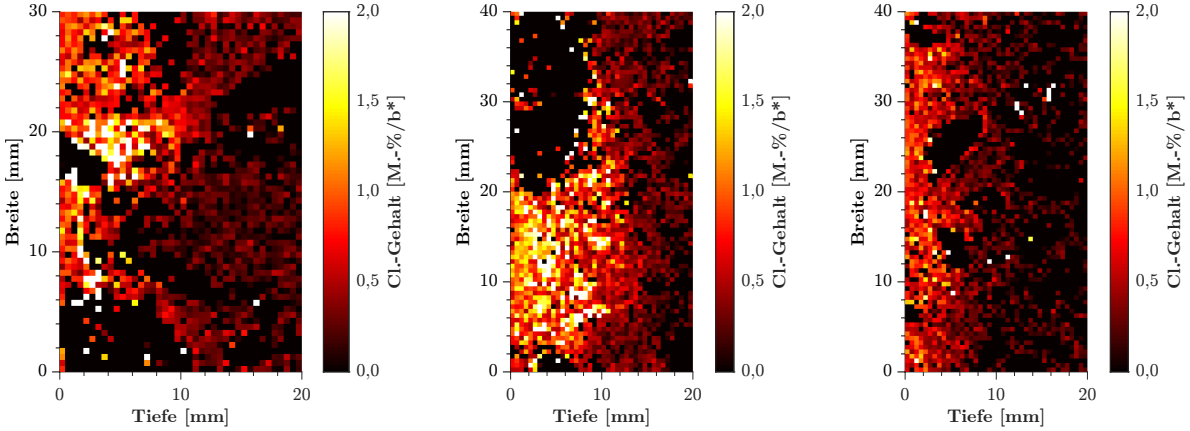


(c) CEM I+SF, LP = 1,0 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH, nach dem 28. FTSW aus CDF-Prüfung und die daraus erstellten Chloridprofile mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

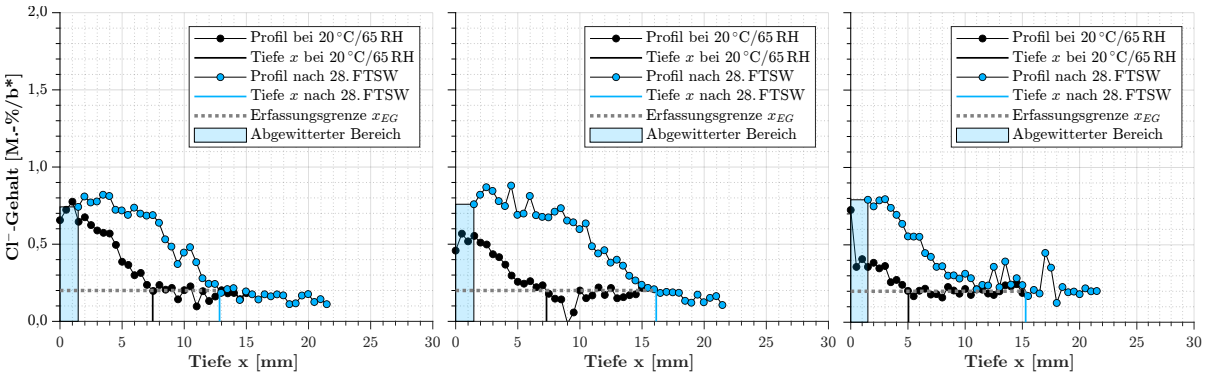
PK24.2 (links-Einlagerung), PK25.2 (mittig-Einlagerung), PK26.2 (rechts-Einlagerung)



PK24.1 (links-CDF), PK25.1 (mittig-CDF), PK26.1 (rechts-CDF)

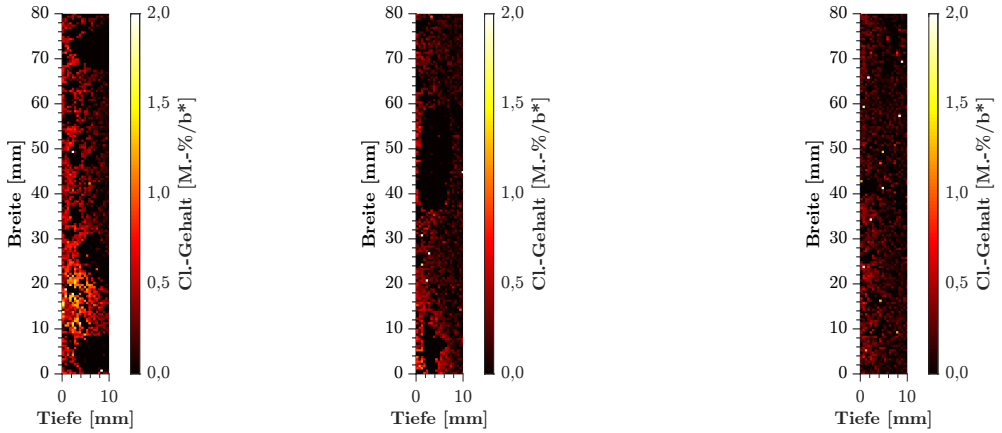


Chloridprofile aus den o.g. PK von links nach rechts

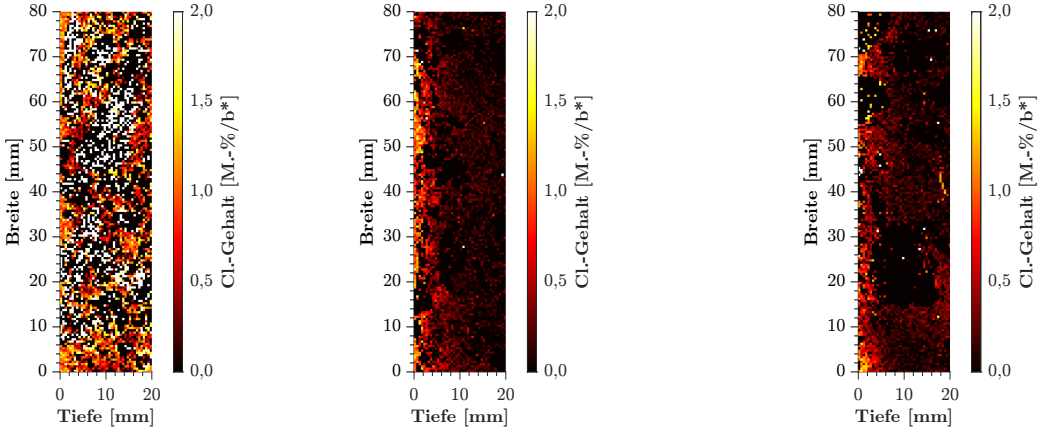


(d) CEM II/A-S, LP = 0,8 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH, nach dem 28. FTSW aus CDF-Prüfung und die daraus erstellten Chloridprofile mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

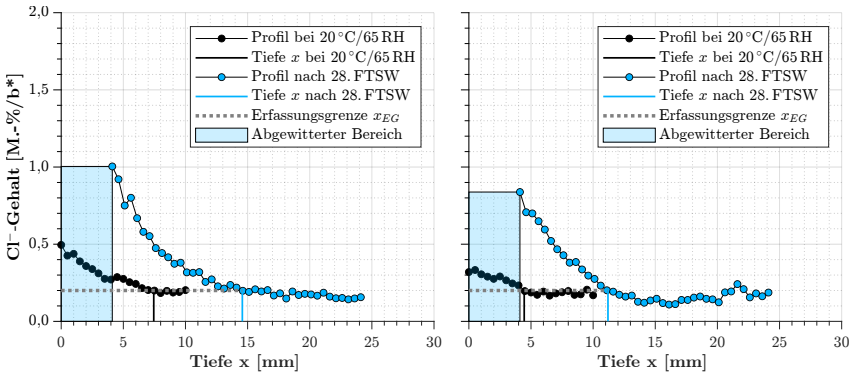
PK3.2 (links-Einlagerung), PK4.2 (mittig-Einlagerung), PK5.2 (rechts-Einlagerung)



PK3.1 (links-CDF), PK4.1 (mittig-CDF), PK5.1 (rechts-CDF)



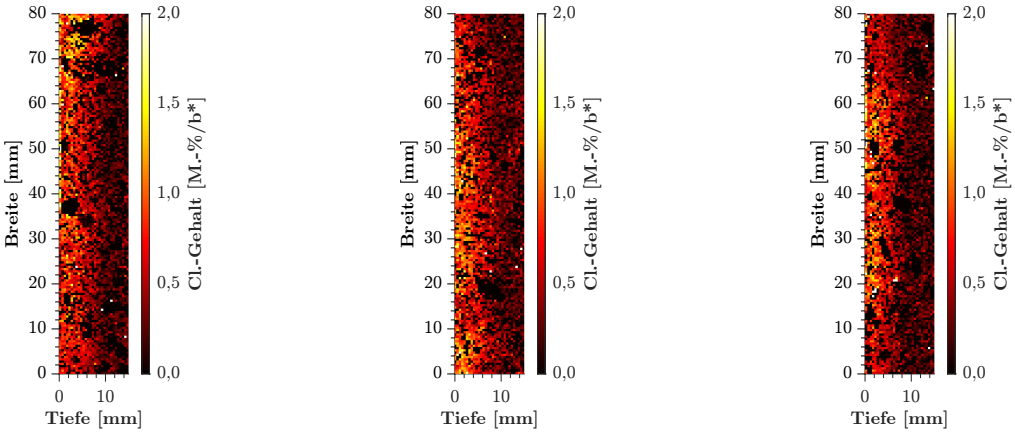
Chloridprofile aus den o.g. PK von links nach rechts



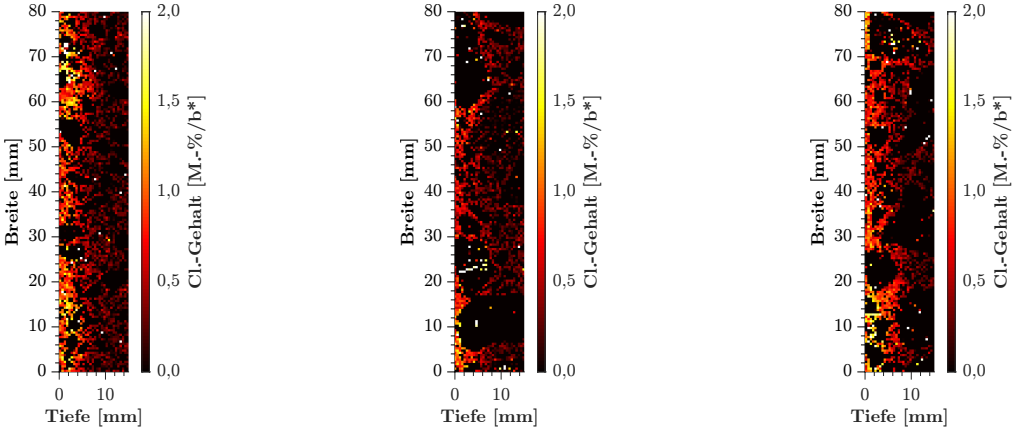
Nicht auswertbar

(e) CEM I, LP = 10,0 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH, nach dem 28. FTSW aus CDF-Prüfung und die daraus erstellten Chloridprofile mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

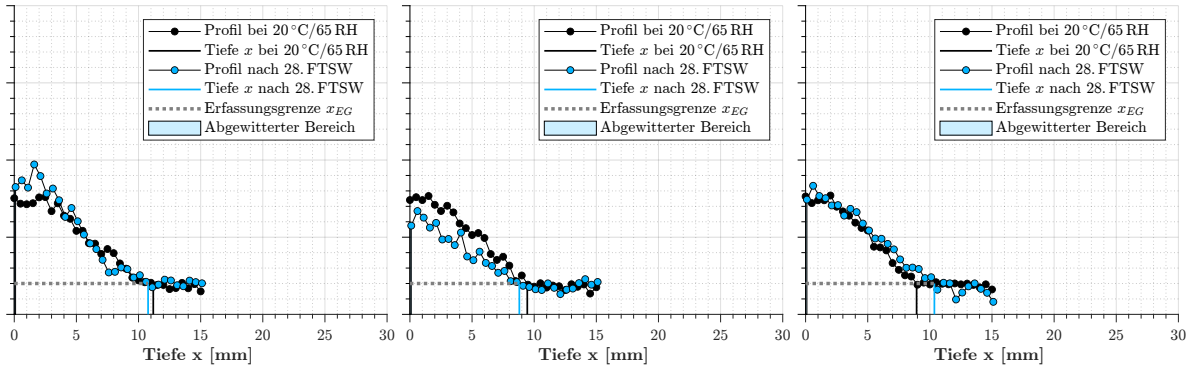
PK3.2 (links-Einlagerung), PK4.2 (mittig-Einlagerung), PK5.2 (rechts-Einlagerung)



PK3.1 (links-CDF), PK4.1 (mittig-CDF), PK5.1 (rechts-CDF)

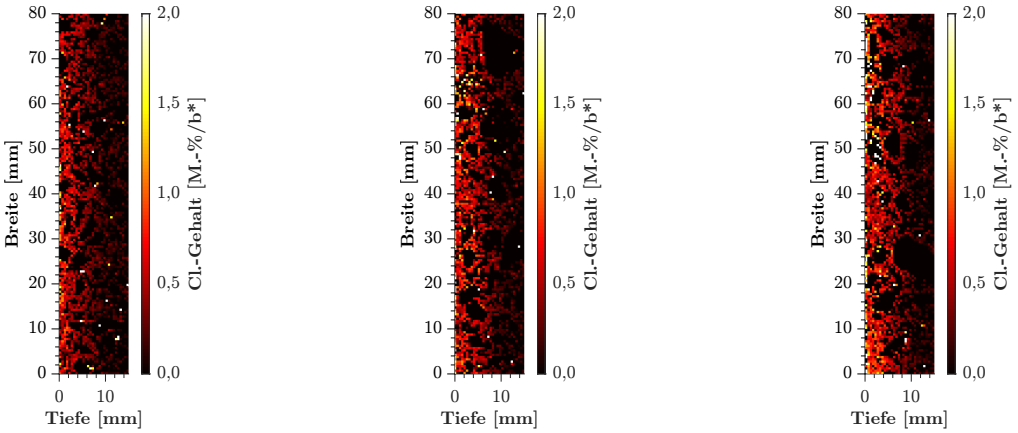


Chloridprofile aus den o.g. PK von links nach rechts

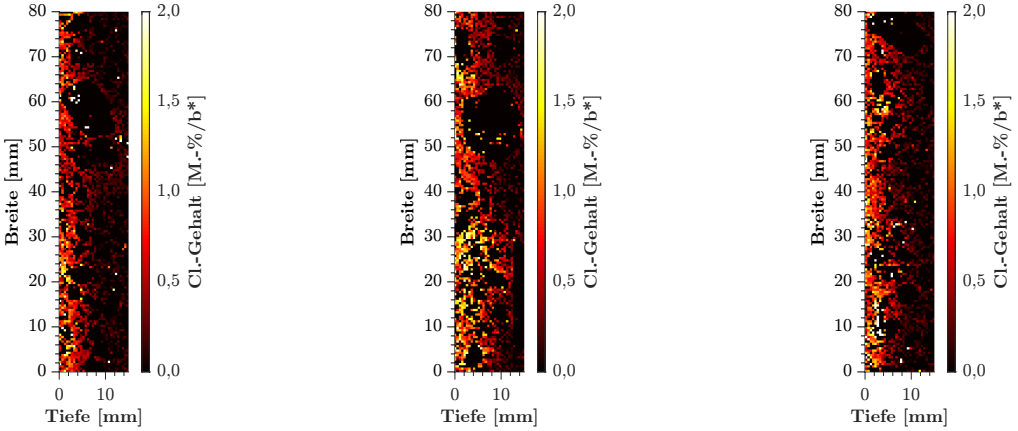


(f) CEM I, LP = 7,2 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH, nach dem 28. FTSW aus CDF-Prüfung und die daraus erstellten Chloridprofile mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

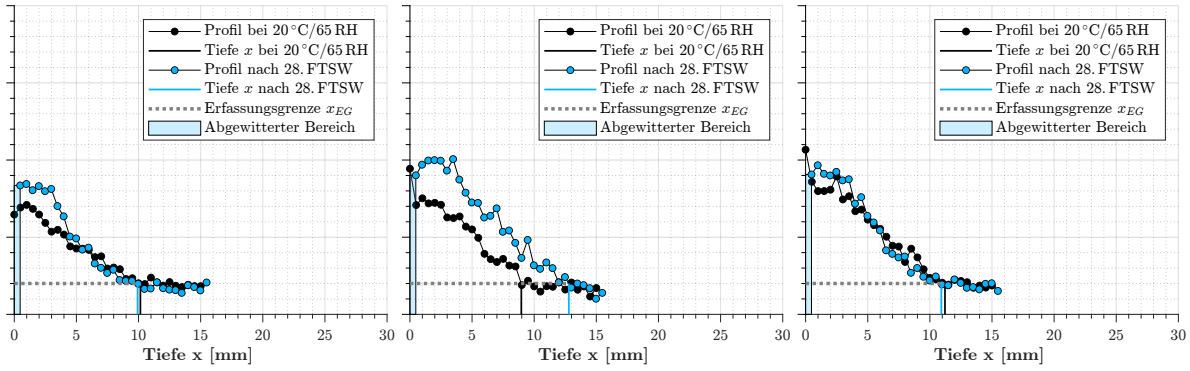
PK3.2 (links-Einlagerung), PK4.2 (mittig-Einlagerung), PK5.2 (rechts-Einlagerung)



PK3.1 (links-CDF), PK4.1 (mittig-CDF), PK5.1 (rechts-CDF)

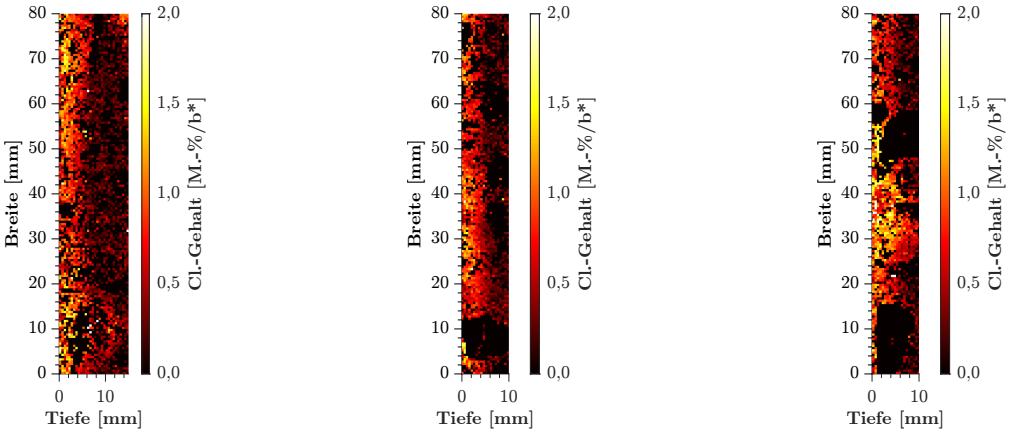


Chloridprofile aus den o.g. PK von links nach rechts

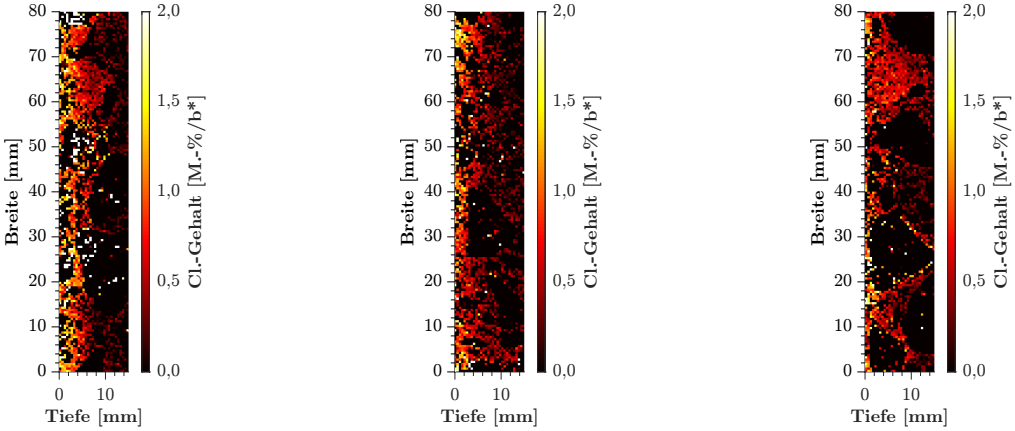


(g) CEM I+SF, LP = 7,0 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH, nach dem 28. FTSW aus CDF-Prüfung und die daraus erstellten Chloridprofile mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

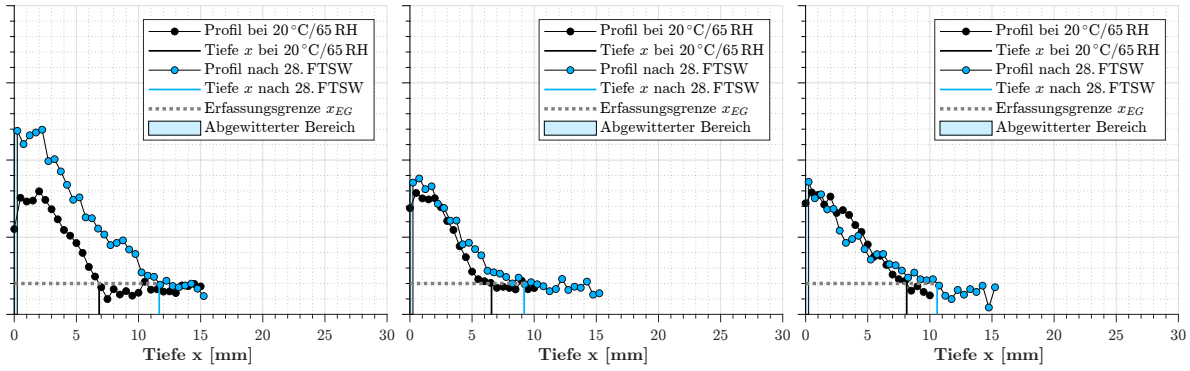
PK15.2 (links-Einlagerung), PK16.2 (mittig-Einlagerung), PK17.2 (rechts-Einlagerung)



PK15.1 (links-CDF), PK16.1 (mittig-CDF), PK17.1 (rechts-CDF)

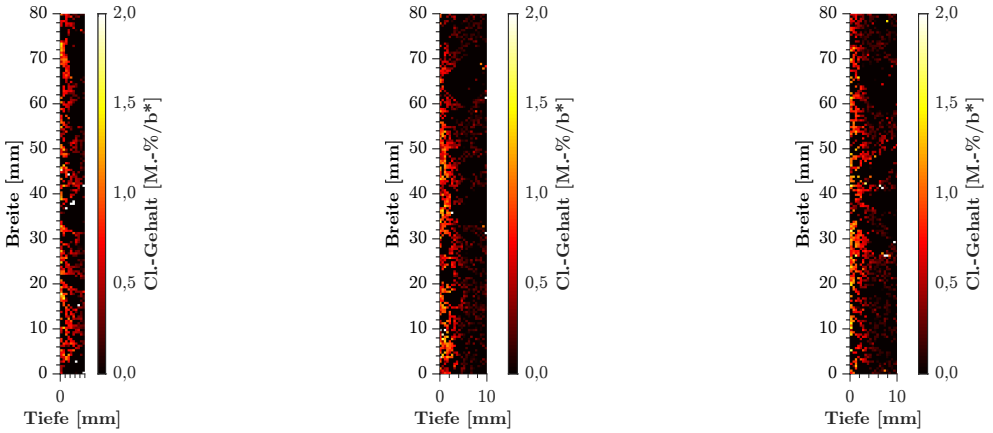


Chloridprofile aus den o.g. PK von links nach rechts

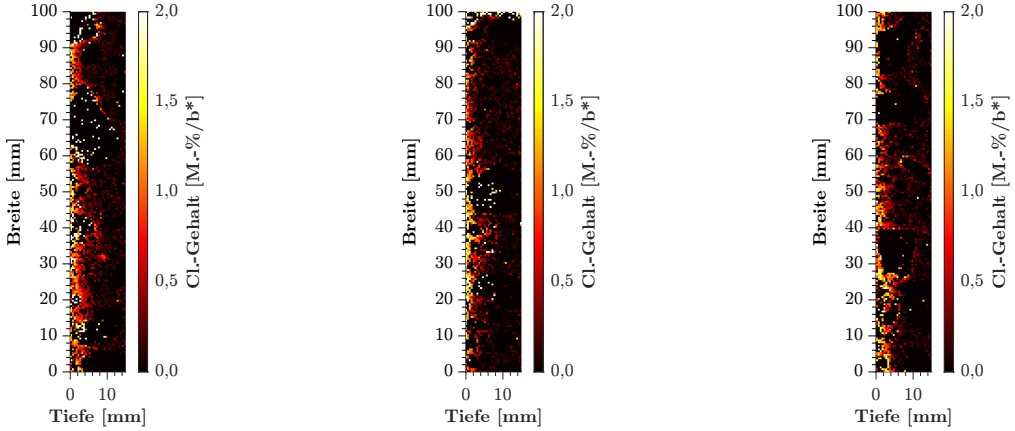


(h) CEM I+SF (k=0), LP = 7,0 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH, nach dem 28. FTSW aus CDF-Prüfung und die daraus erstellten Chloridprofile mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

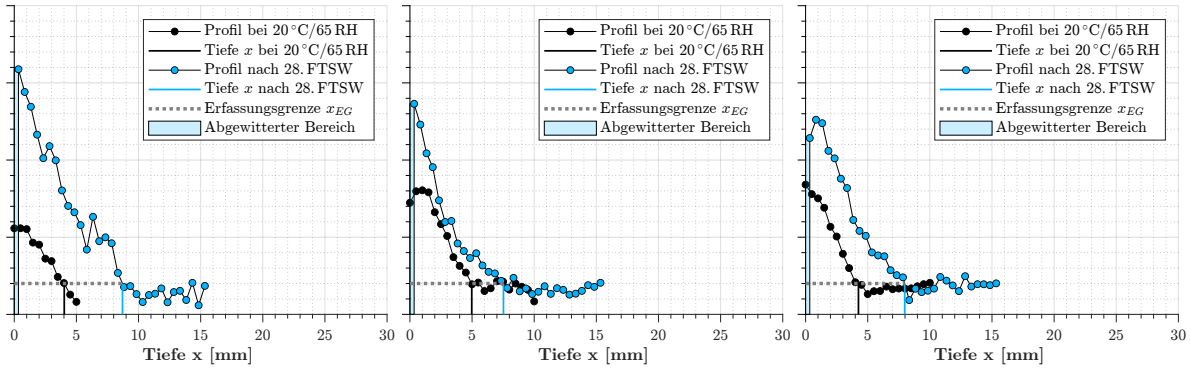
PK9.2 (links-Einlagerung), PK10.2 (mittig-Einlagerung), PK11.2 (rechts-Einlagerung)



PK9.1 (links-CDF), PK10.1 (mittig-CDF), PK11.1 (rechts-CDF)

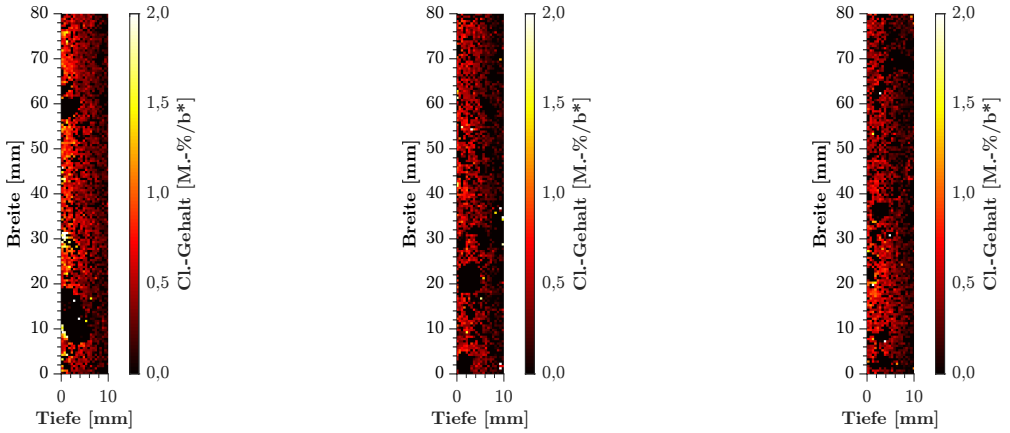


Chloridprofile aus den o.g. PK von links nach rechts

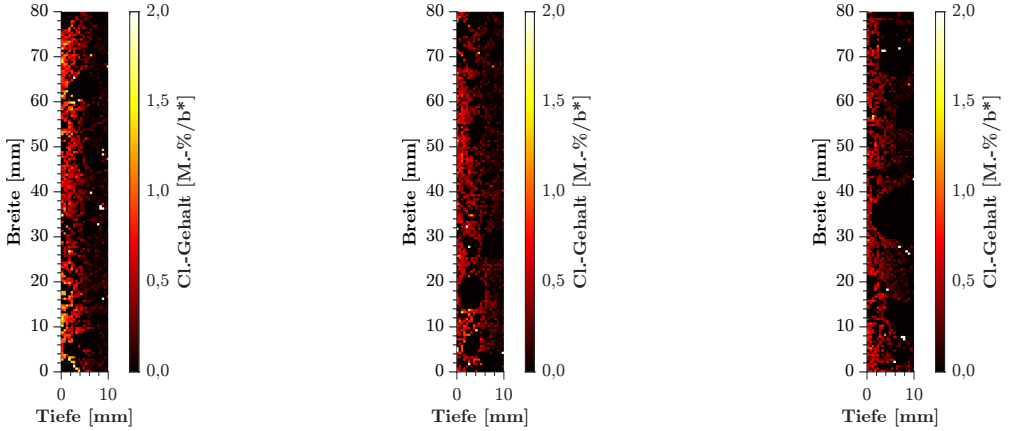


(i) CEM II/A-S, LP = 9,0 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH, nach dem 28. FTSW aus CDF-Prüfung und die daraus erstellten Chloridprofile mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

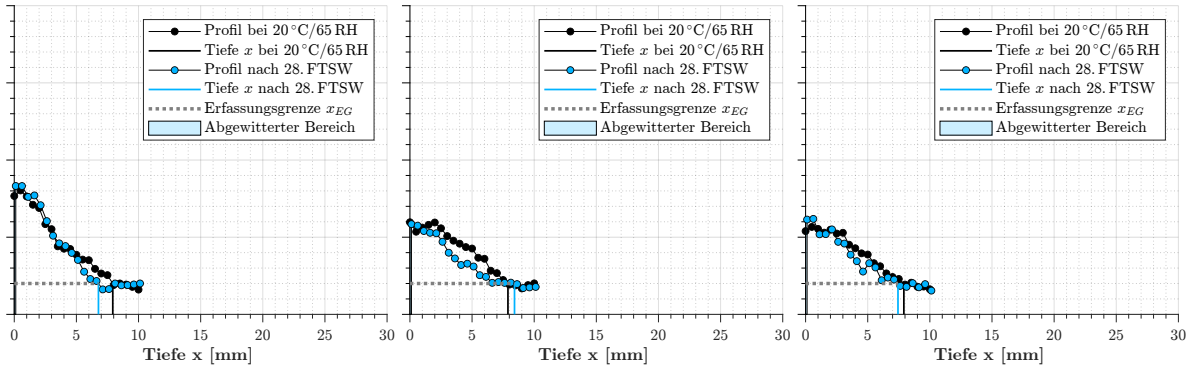
PK15.2 (links-Einlagerung), PK16.2 (mittig-Einlagerung), PK17.2 (rechts-Einlagerung)



PK15.1 (links-CDF), PK16.1 (mittig-CDF), PK17.1 (rechts-CDF)

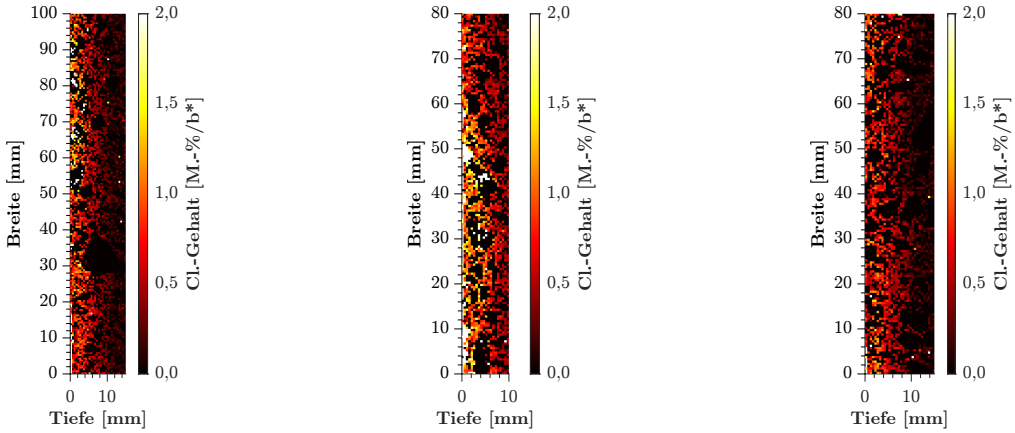


Chloridprofile aus den o.g. PK von links nach rechts

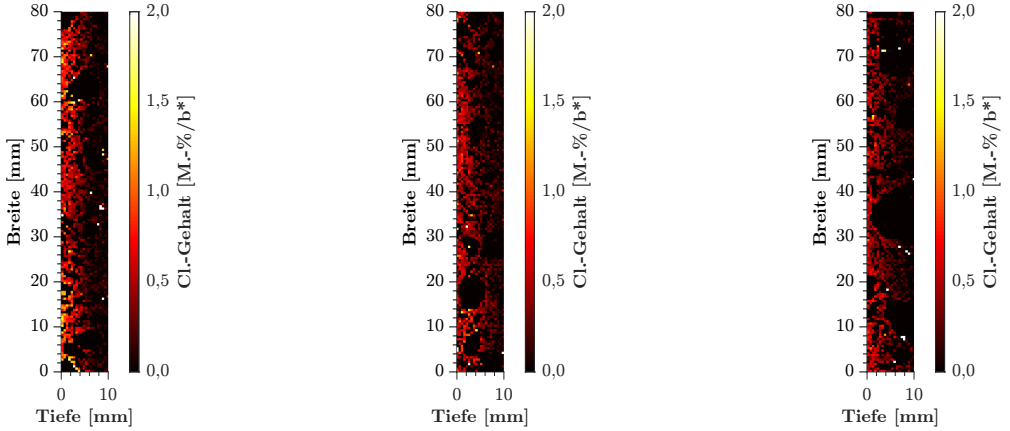


(j) CEM I+SFA, LP = 7,0 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH, nach dem 28. FTSW aus CDF-Prüfung und die daraus erstellten Chloridprofile mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

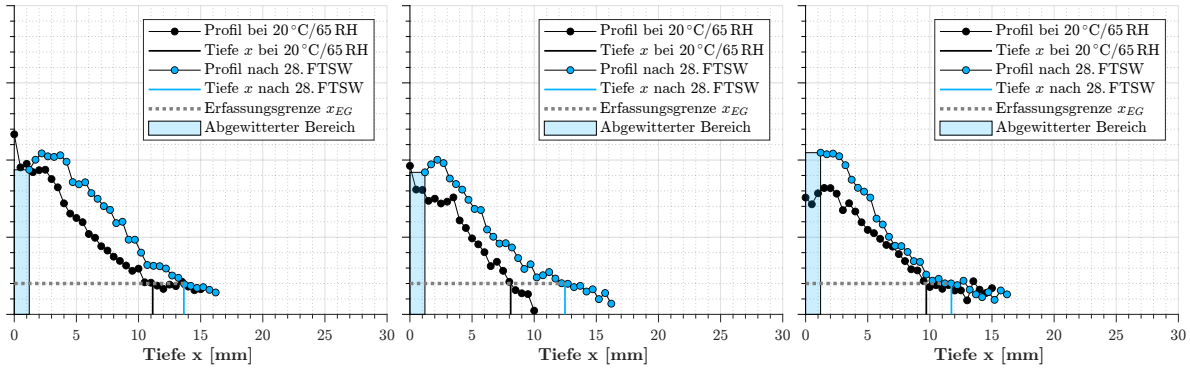
PK3.2 (links-Einlagerung), PK4.2 (mittig-Einlagerung), PK5.2 (rechts-Einlagerung)



PK3.1 (links-CDF), PK4.1 (mittig-CDF), PK5.1 (rechts-CDF)

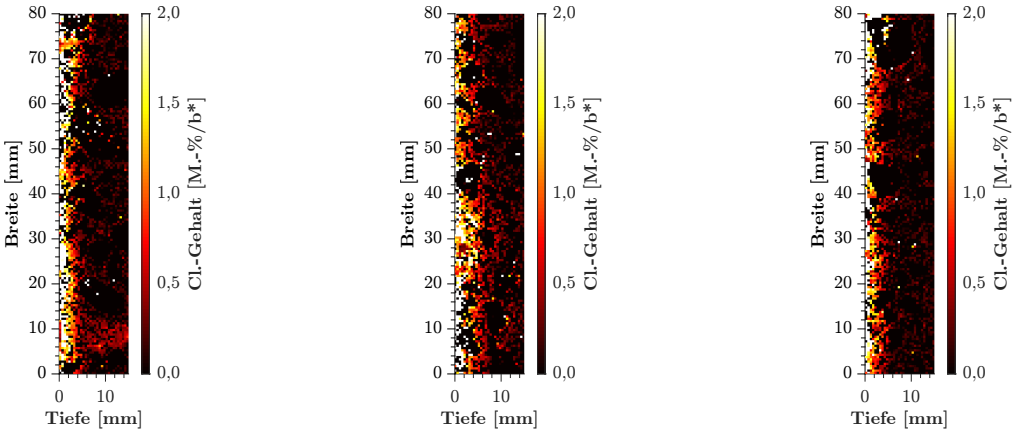


Chloridprofile aus den o.g. PK von links nach rechts

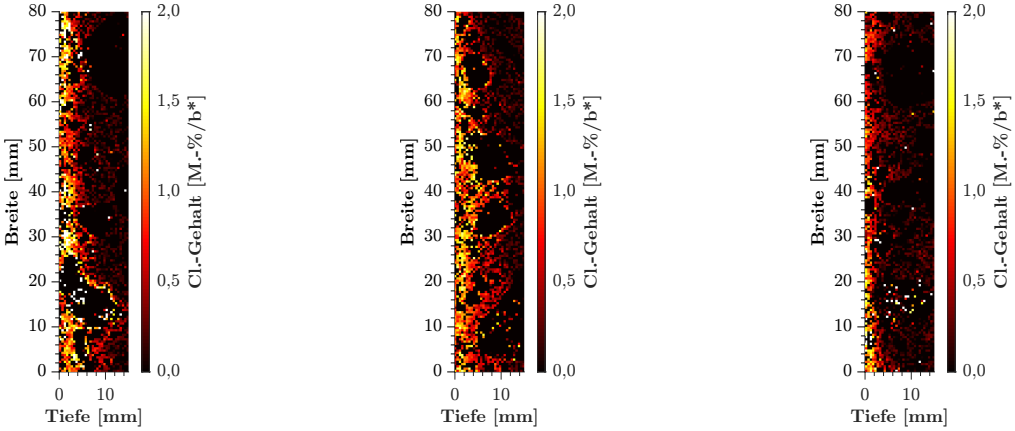


(k) CEM III/B, LP = 5,5 Vol.-%, w/b = 0,5, A/B16 Splitt. 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH, nach dem 28. FTSW aus CDF-Prüfung und die daraus erstellten Chloridprofile mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung

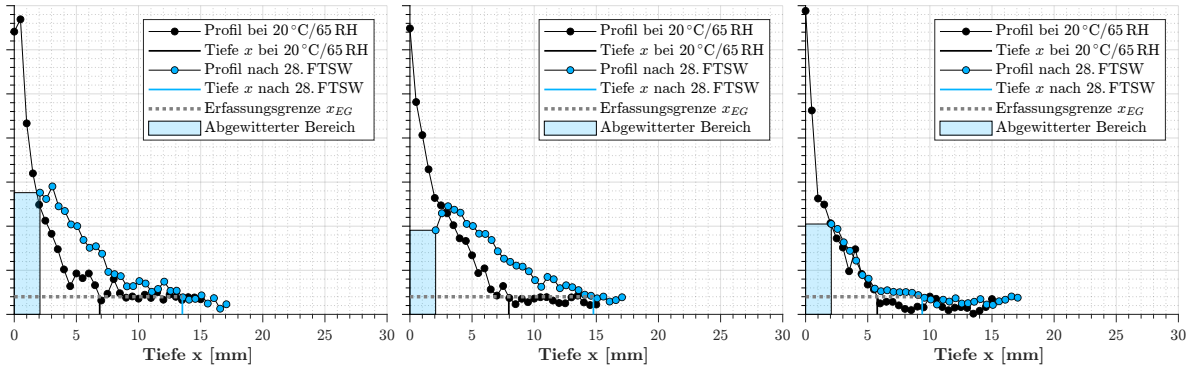
PK9.2 (links-Einlagerung), PK10.2 (mittig-Einlagerung), PK11.2 (rechts-Einlagerung)



PK9.1 (links-CDF), PK10.1 (mittig-CDF), PK11.1 (rechts-CDF)

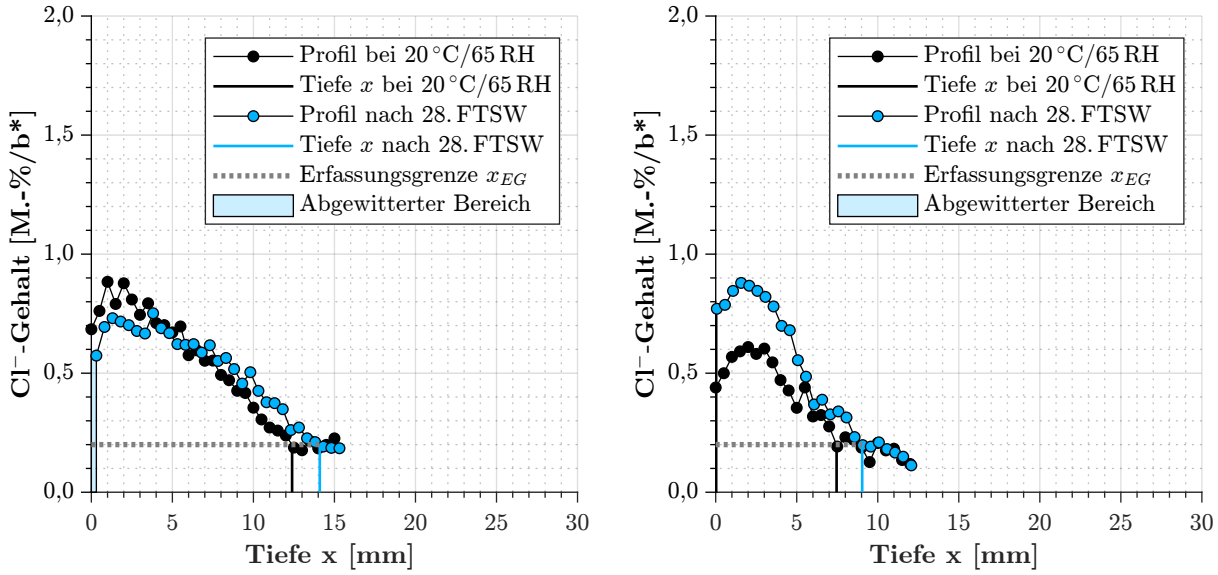


Chloridprofile aus den o.g. PK von links nach rechts



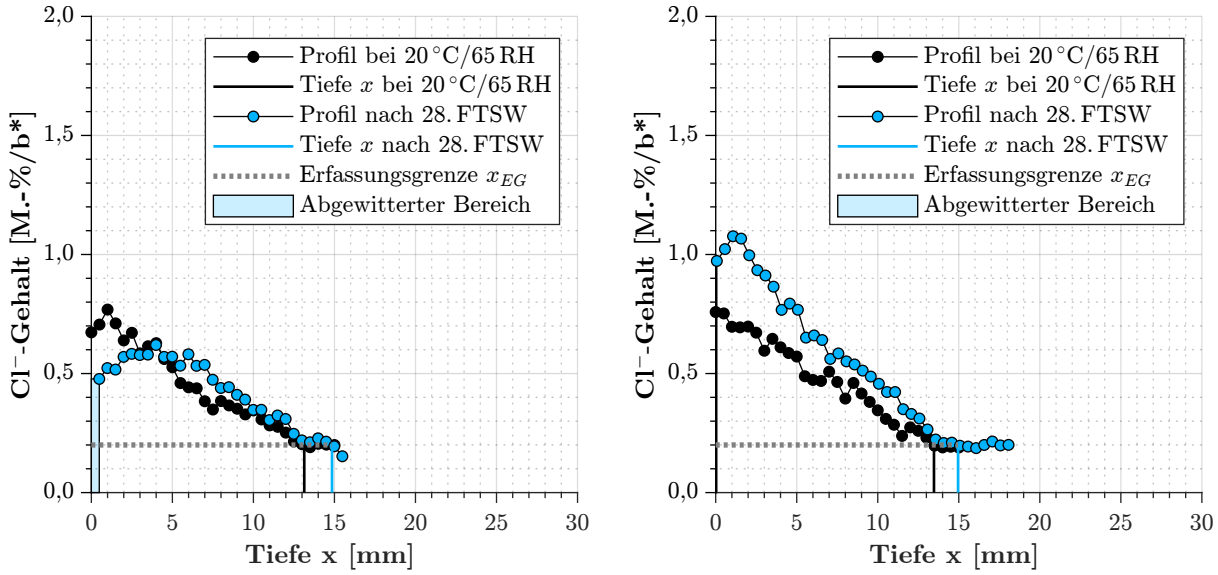
A-8 Chloridprofile nach 28. FTSW (Projekt) bzw. 20 °C/65 RH

Abb. A-8.1: 28. FTSW (Projekt): 2D-LIBS-Darstellungen und Chloridprofile aus Einlagerung und CDF-Prüfung vor Migration.



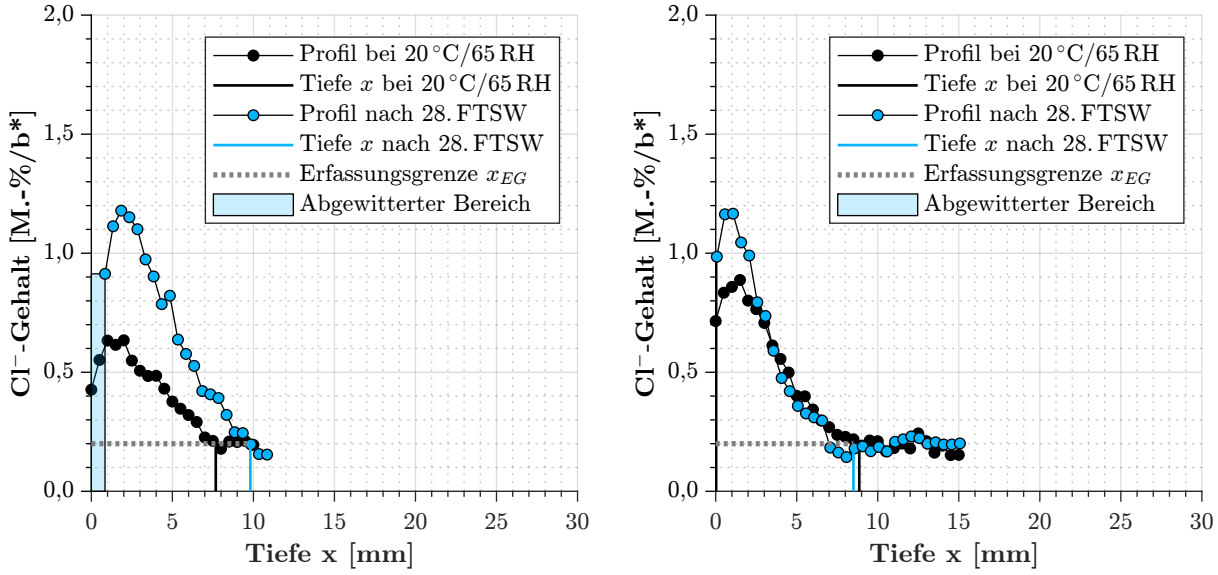
(a) LP = 3,6 Vol.-% **(b)** LP = 5,6 Vol.-%

Abb. A-8.2: CEM I, w/b = 0,5, A/B16, Kies. Darstellung der Chloridprofile mit den Chlorideindringtiefen x und der Erfassungsgrenze x_{EG} von LIBS. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung. Darstellung der abgewitterten Bereiche.



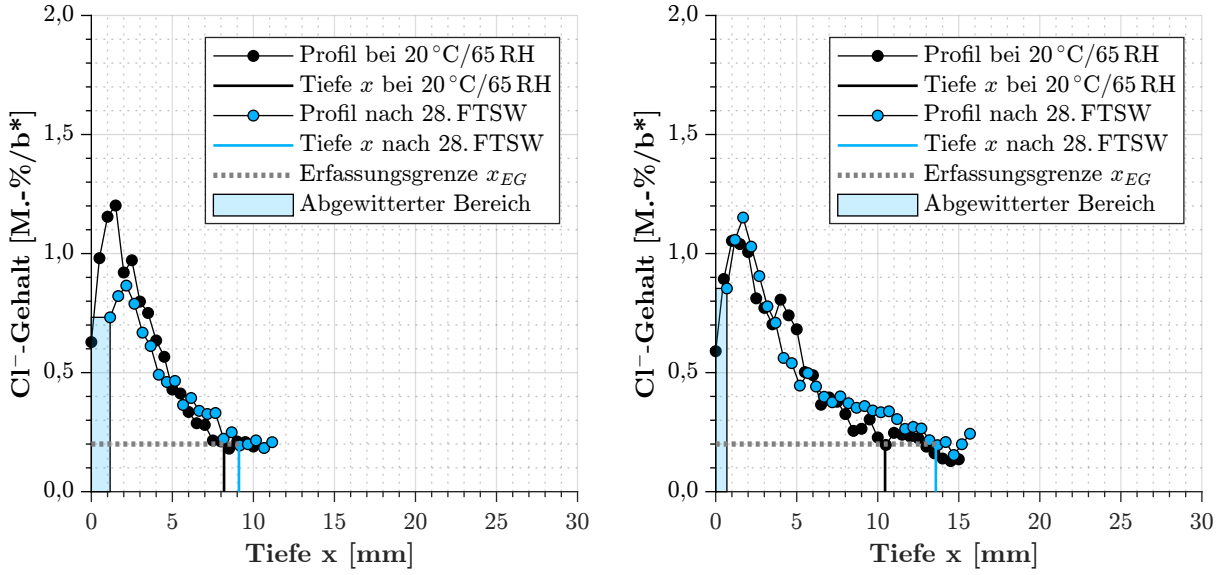
(a) LP = 3,4 Vol.-% **(b)** LP = 5,6 Vol.-%

Abb. A-8.3: CEM II/A-LL, w/b = 0,5, A/B16, Kies. Darstellung der Chloridprofile mit den Chlorideindringtiefen x und der Erfassungsgrenze x_{EG} von LIBS. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung. Darstellung der abgewitterten Bereiche.



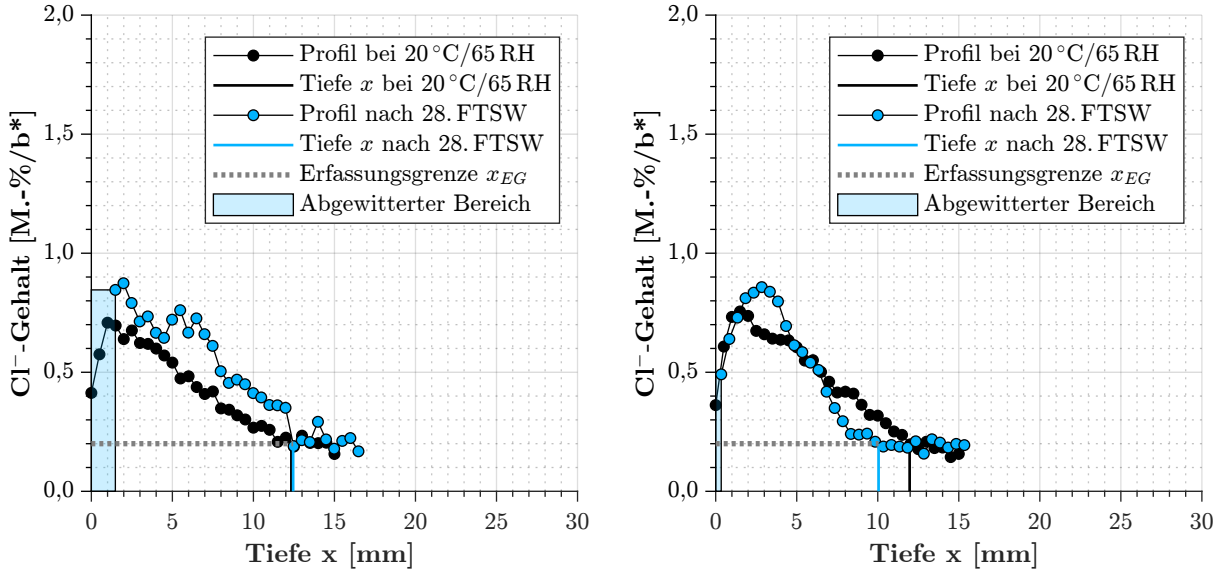
(a) LP = 3,4 Vol.-% **(b)** LP = 5,6 Vol.-%

Abb. A-8.4: CEM III/A, w/b = 0,5, A/B16, Kies. Darstellung der Chloridprofile mit den Chlorideindringtiefen x und der Erfassungsgrenze x_{EG} von LIBS. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung. Darstellung der abgewitterten Bereiche.



(a) LP = 3,4 Vol.-% **(b)** LP = 5,6 Vol.-%

Abb. A-8.5: CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16, Kies. Darstellung der Chloridprofile mit den Chlorideindringtiefen x und der Erfassungsgrenze x_{EG} von LIBS. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung. Darstellung der abgewitterten Bereiche.



(a) LP = 3,4 Vol.-%

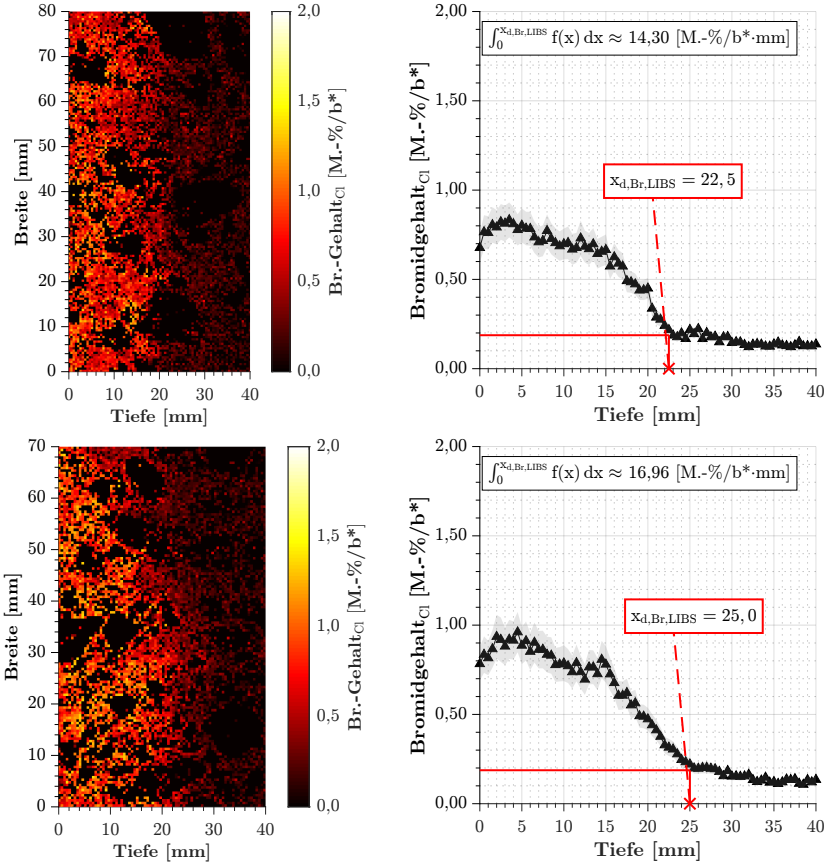
(b) LP = 5,6 Vol.-%

Abb. A-8.6: CEM II/C-M, w/b = 0,5, A/B16, Kies. Darstellung der Chloridprofile mit den Chlorideindringtiefen x und der Erfassungsgrenze x_{EG} von LIBS. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung. Darstellung der abgewitterten Bereiche.

A-9 2D-LIBS Darstellungen und Bromidprofile nach 14. FTSW+RBM

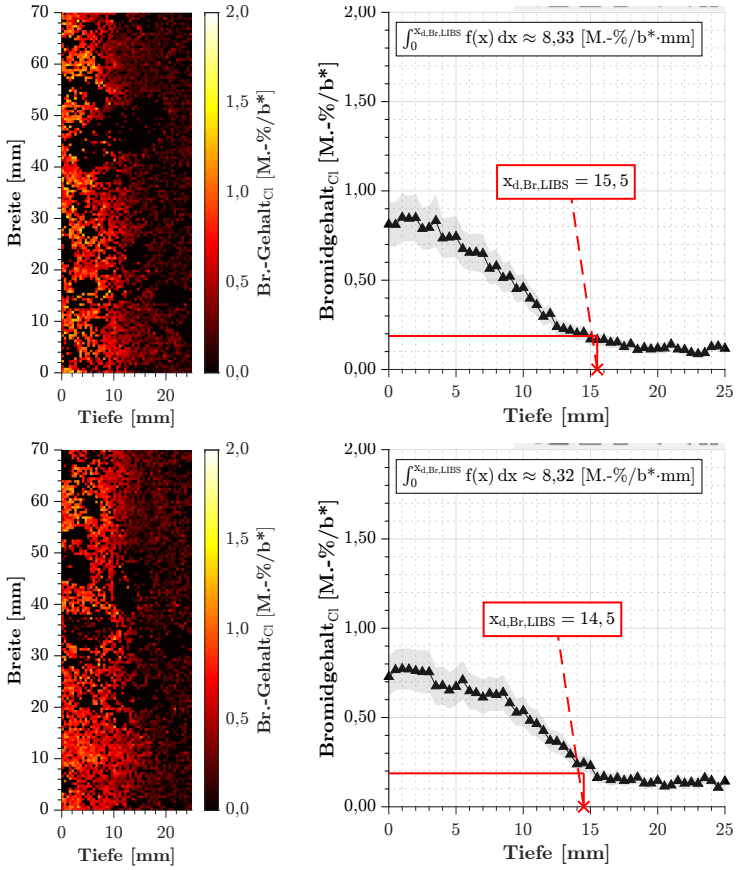
(a) 14. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEMI, LP = 1,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Min.	22,50	14,30	0,83
Max.	25,00	16,96	0,96
Mittelwert	23,75	15,63	0,90



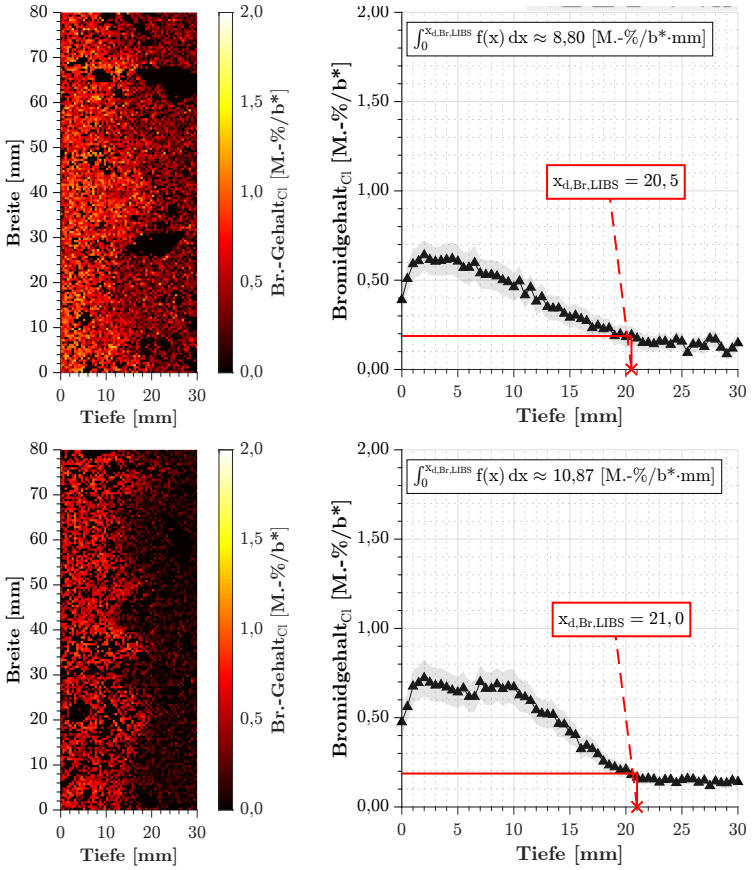
(b) 14. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEM I+SF, LP = 1,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Min.	15,00	8,30	0,79
Max.	15,50	8,33	0,88
Mittelwert	15,25	8,32	0,83



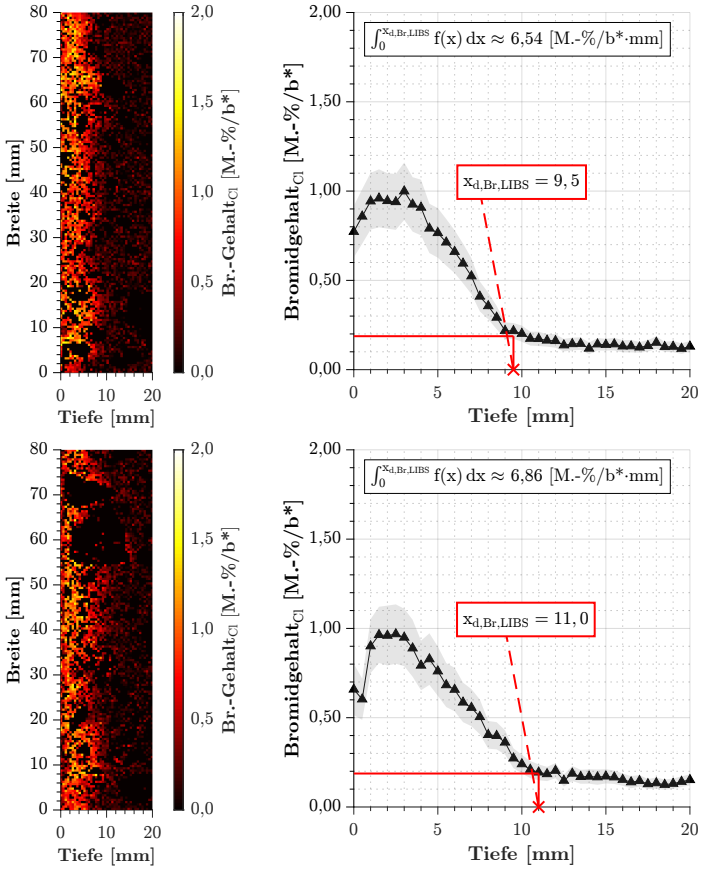
(c) 14. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEMI, LP = 10,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Min.	20,50	8,80	0,64
Max.	21,00	10,87	0,72
Mittelwert	20,75	9,84	0,68



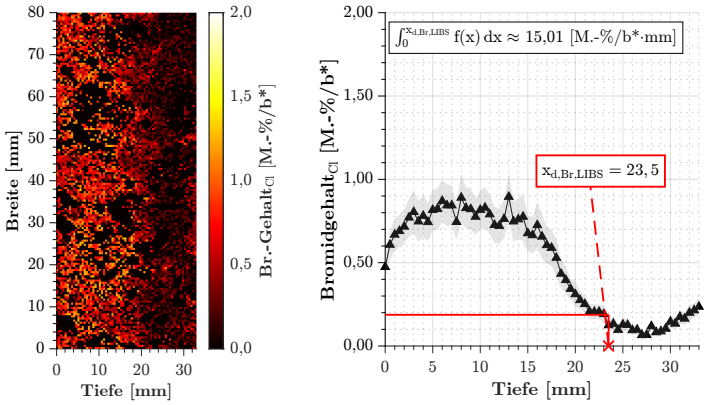
(d) 14. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEMI+SF (k=1,0), LP = 7,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Min.	9,50	6,54	0,97
Max.	11,00	6,86	1,00
Mittelwert	10,25	6,70	0,98



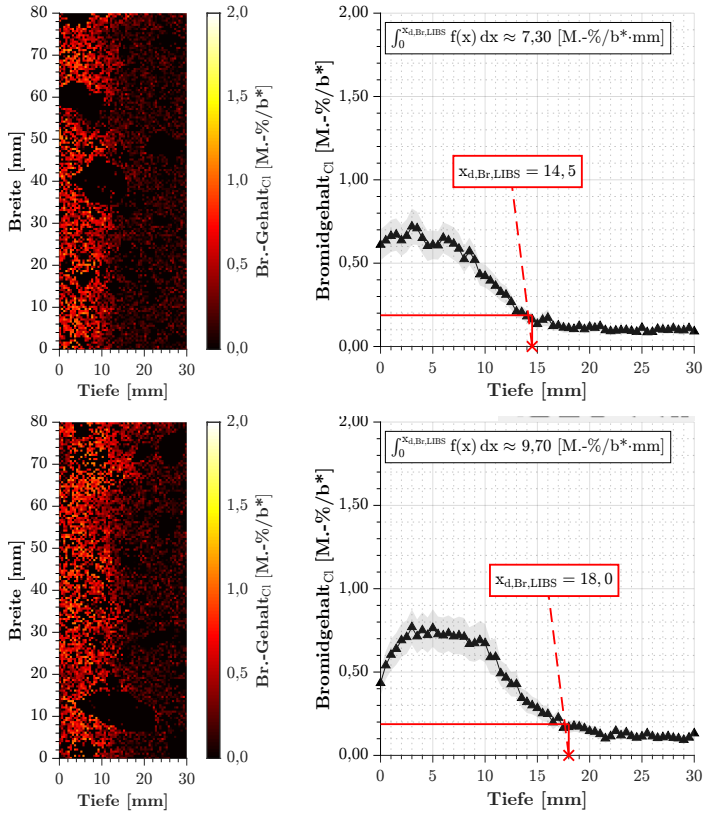
(e) 14. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEMII/AS, LP = 0,8 Vol.-%

$x_{d,Br}$ [mm]	$\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx$ [M.-%/b*·mm]	max_{Br} [M.-%/b*]
23,00	15,03	0,94



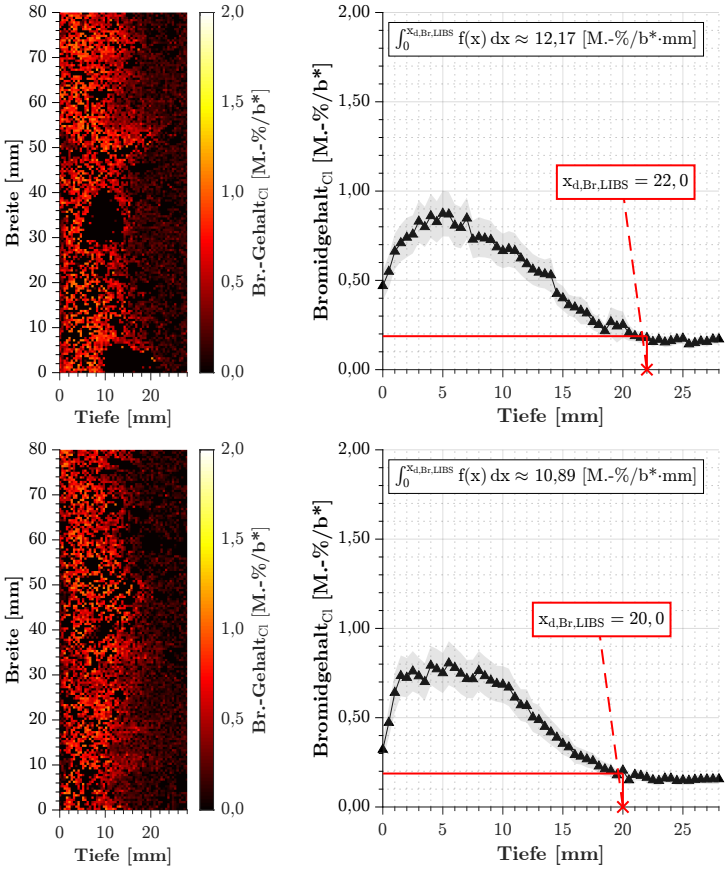
(f) 14. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEM II/AS, LP = 9,0 Vol.-%

Parameter [-]	$x_{d,Br}$ [mm]	$\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx$ [M.-%/b*·mm]	max_{Br} [M.-%/b*]
Min.	14,50	7,30	0,72
Max.	18,00	9,70	0,77
Mittelwert	16,25	8,50	0,74



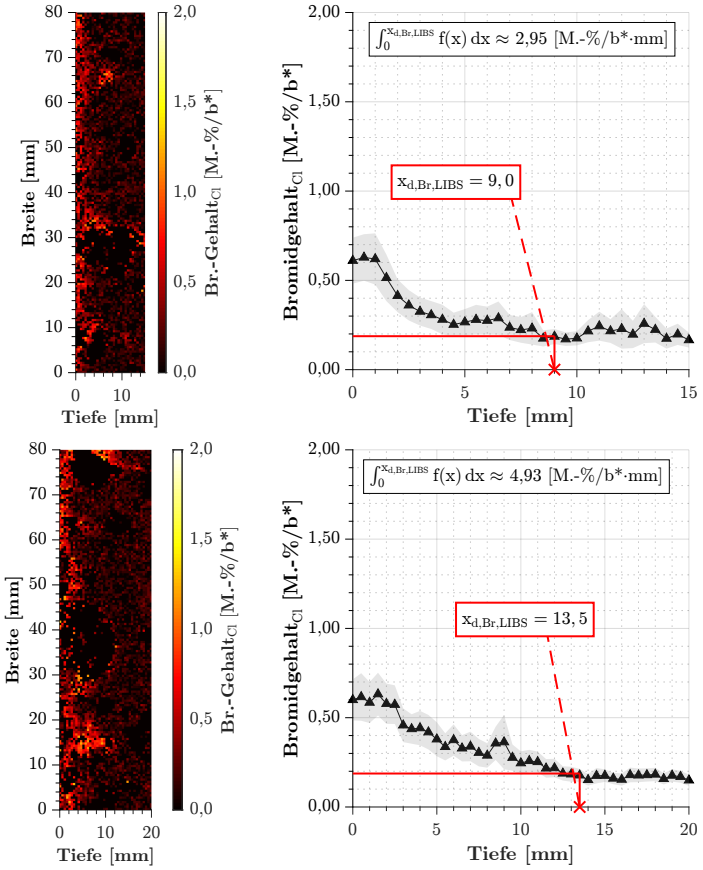
(g) 14. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEMI, LP = 7,2 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Min.	20,00	10,89	0,81
Max.	22,00	12,17	0,87
Mittelwert	21,00	11,53	0,84



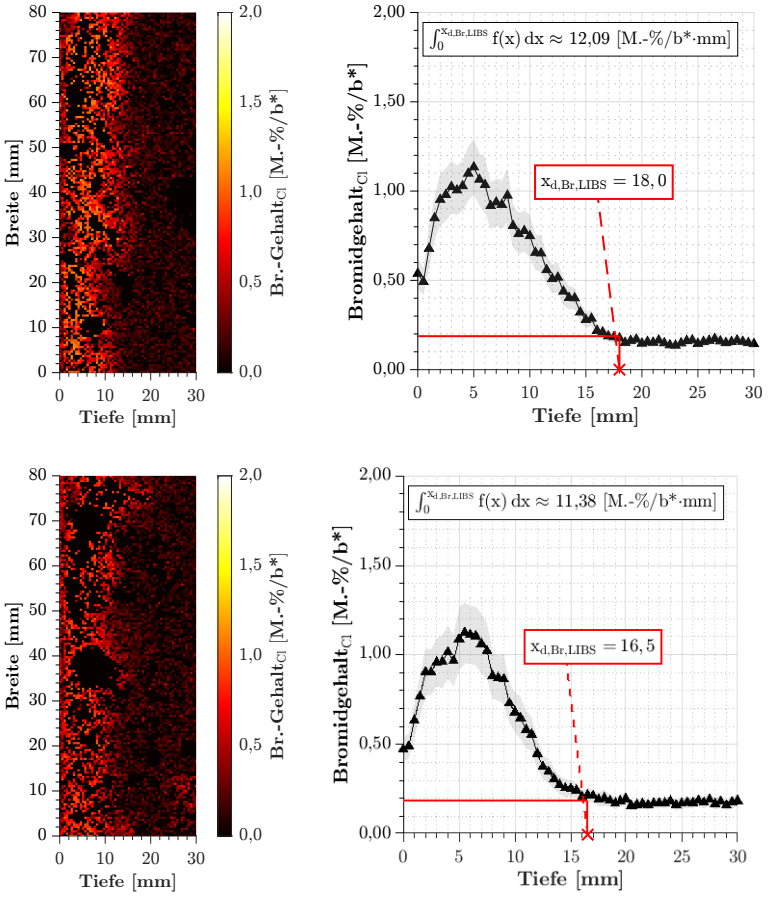
(h) 14. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEMIII/B, LP = 5,5 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Min.	9,00	2,95	0,63
Max.	13,50	4,93	0,63
Mittelwert	11,25	3,94	0,63



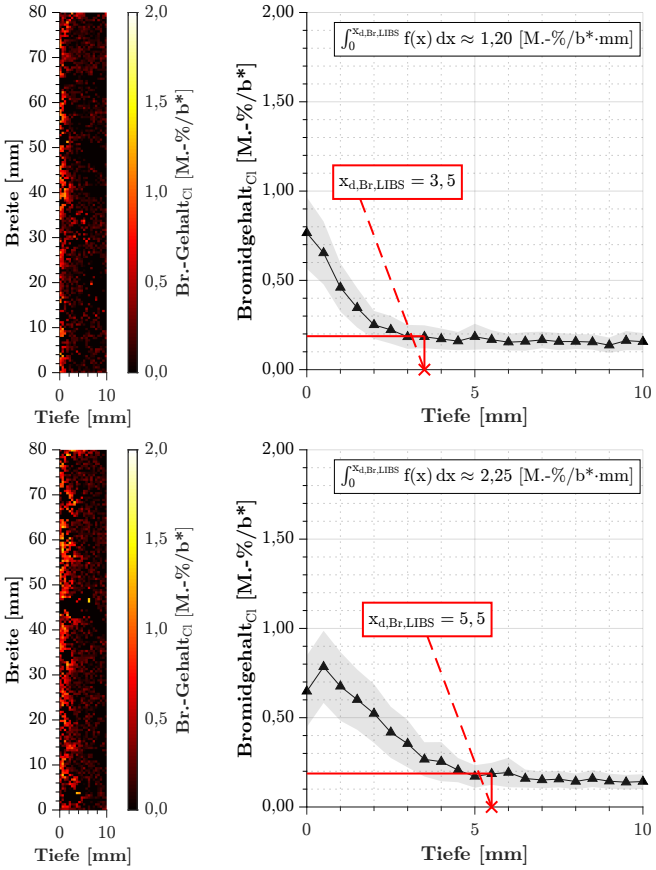
(i) 14. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEMI+SFA (k=0,4), LP = 7,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Min.	16,50	11,41	1,10
Max.	18,00	12,03	1,13
Mittelwert	17,25	11,72	1,12



(j) 14. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEMI+SF (k=0,0), LP = 7,0 Vol.-%

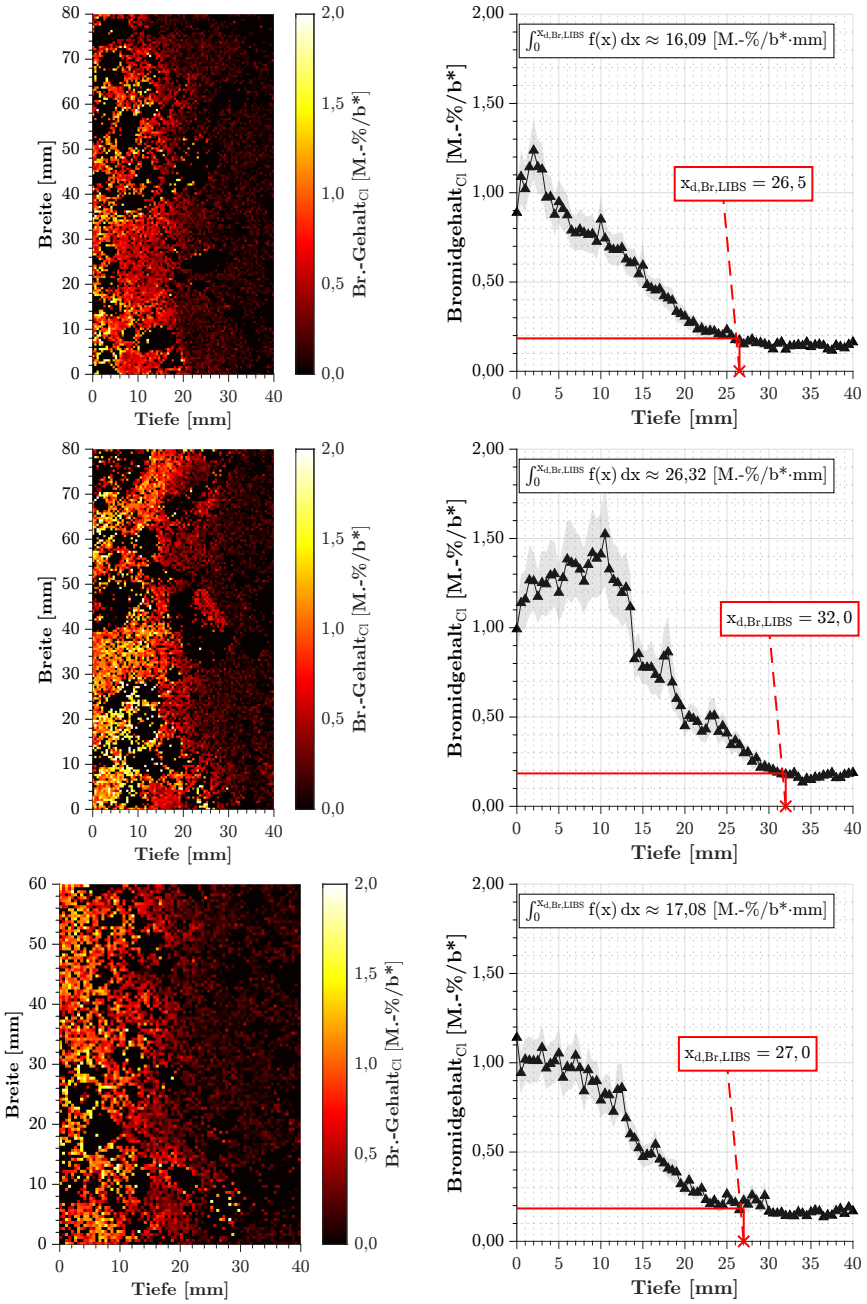
Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Min.	3,50	1,20	0,77
Max.	5,50	2,25	0,78
Mittelwert	4,50	1,73	0,78



A-10 2D-LIBS Darstellungen und Bromidprofile nach 28. FTSW+RBM

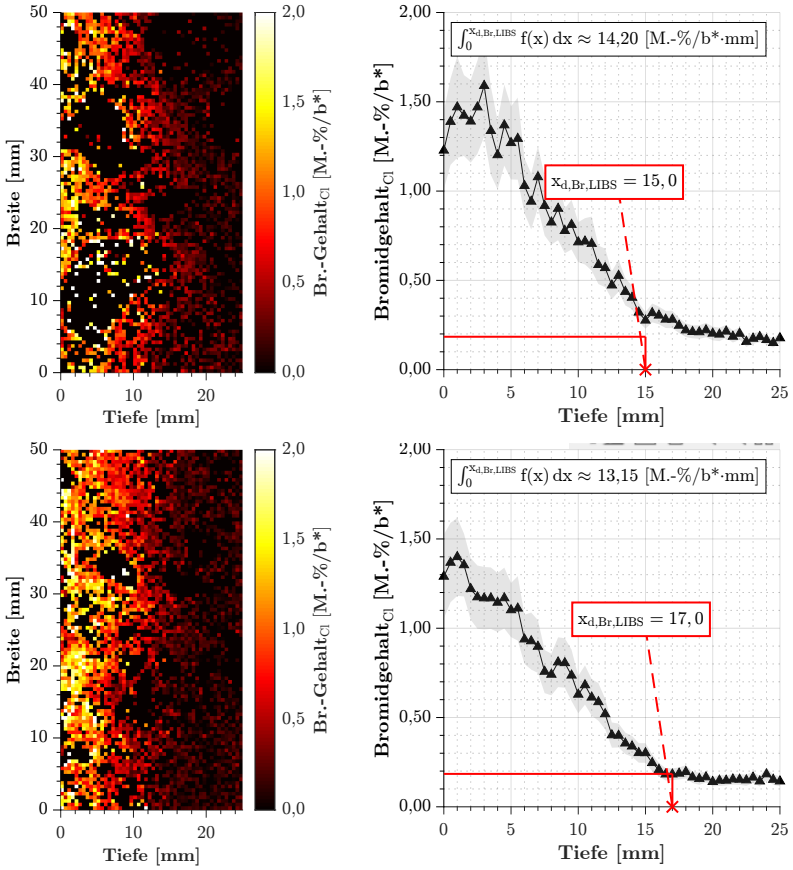
(a) 28. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEMI, LP = 1,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Mittelwert	28,50	19,83	1,30
SD	3,04	5,64	0,20
CoV [%]	10,67	28,46	15,31



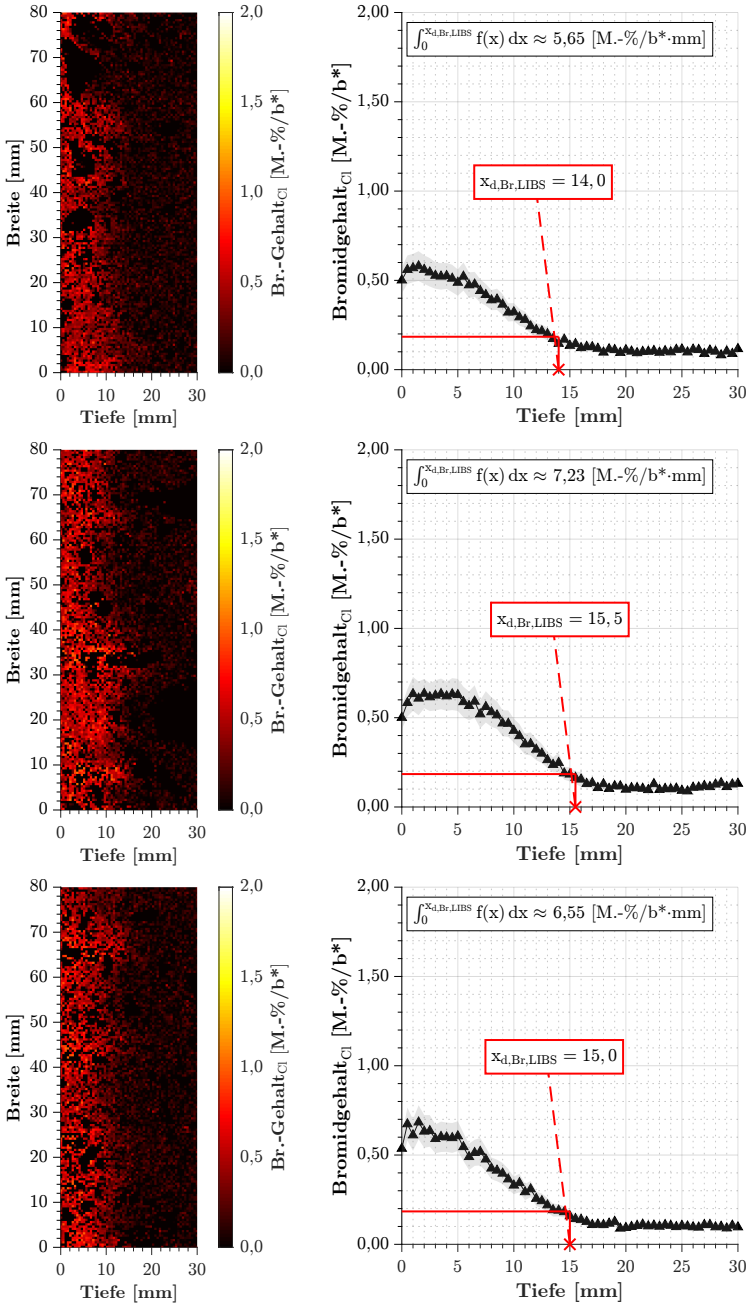
(b) 28. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEM I+SF, LP = 1,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Min.	15,00	13,15	1,40
Max.	17,00	14,20	1,59
Mittelwert	16,00	13,68	1,49



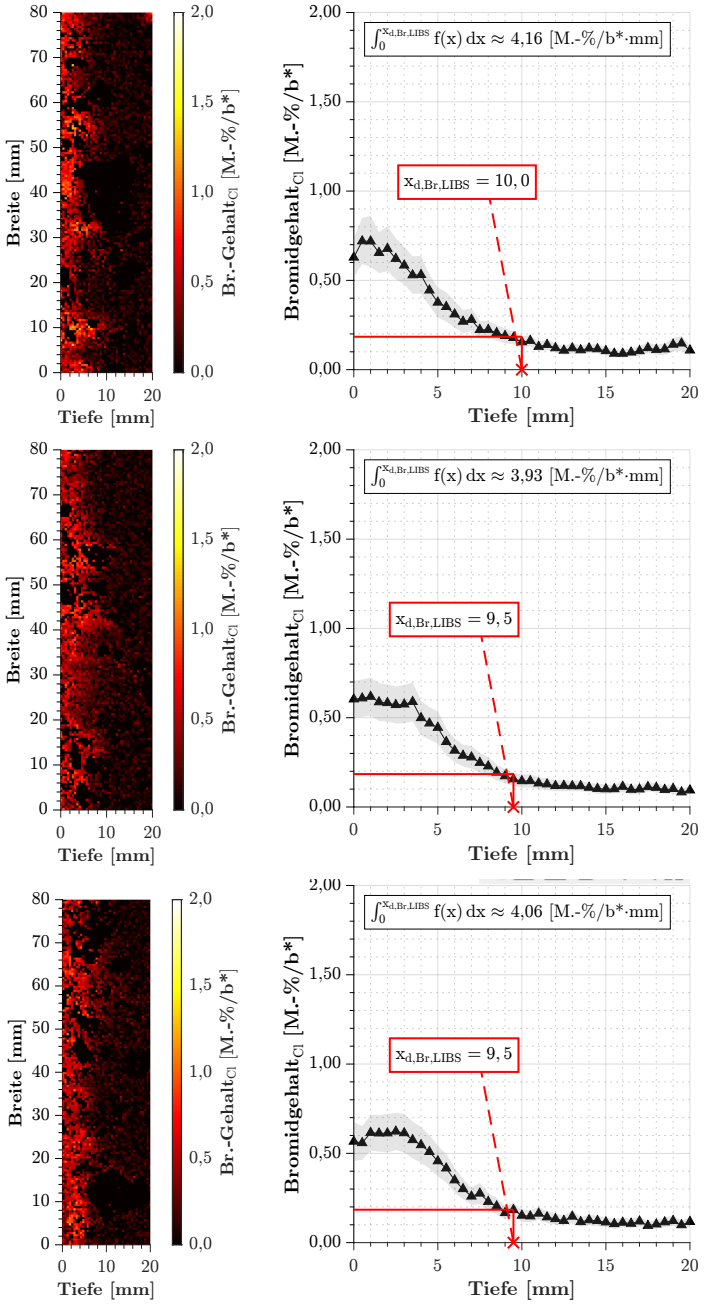
(c) 28. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEMI, LP = 10,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Mittelwert	14,83	6,48	0,63
SD	0,76	0,79	0,05
CoV [%]	5,15	12,19	8,18



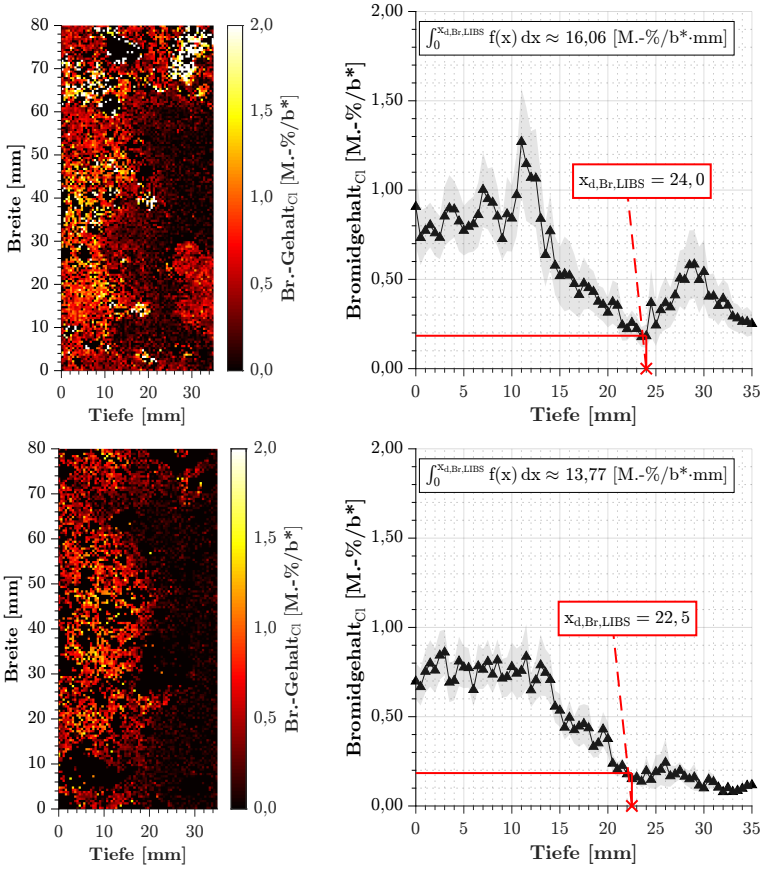
(d) 28. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEM I+SF (k=1,0), LP = 7,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Mittelwert	9,67	4,05	0,65
SD	0,29	0,12	0,06
CoV [%]	2,99	2,88	8,79



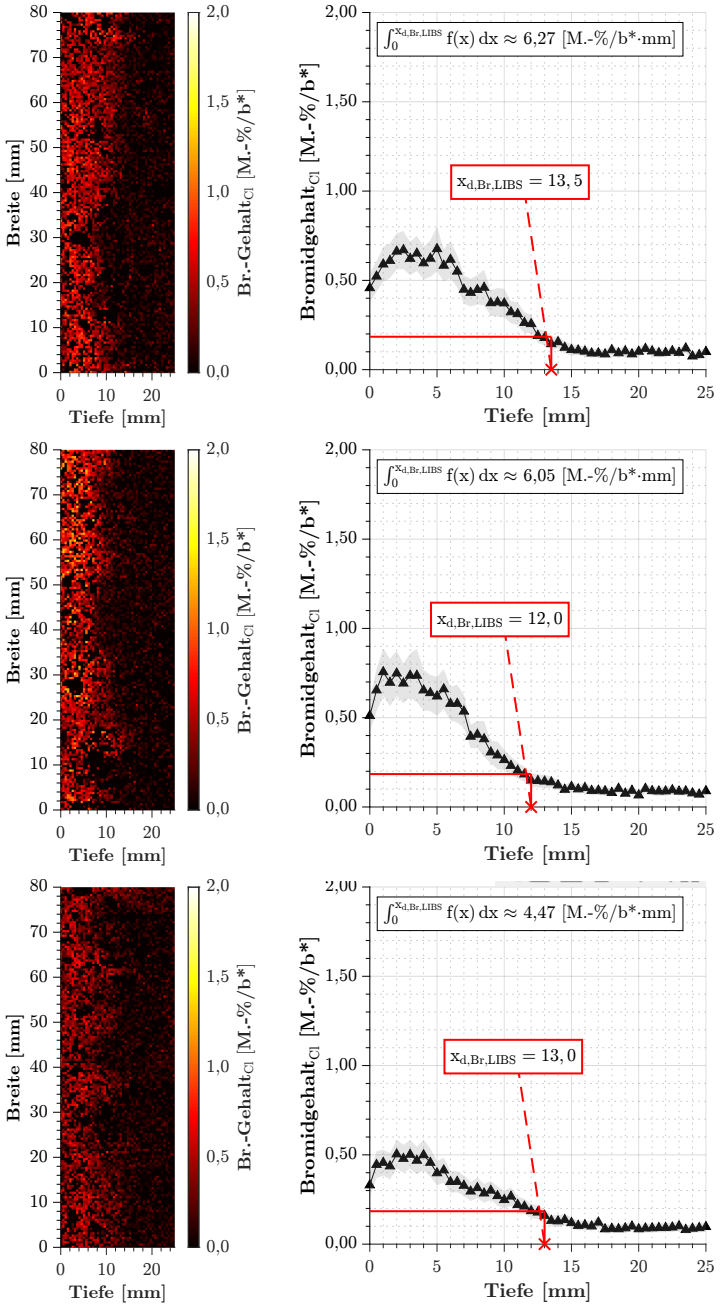
(e) 28. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEMII/AS, LP = 0,8 Vol.-%

	$\mathbf{x_{d,Br}}$ [mm]	$\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx$ [M.-%/b*·mm]	$\mathbf{max_{Br}}$ [M.-%/b*]
Min.	22,50	13,77	0,86
Max.	24,00	16,06	1,27
Mittelwert	23,25	14,91	1,07



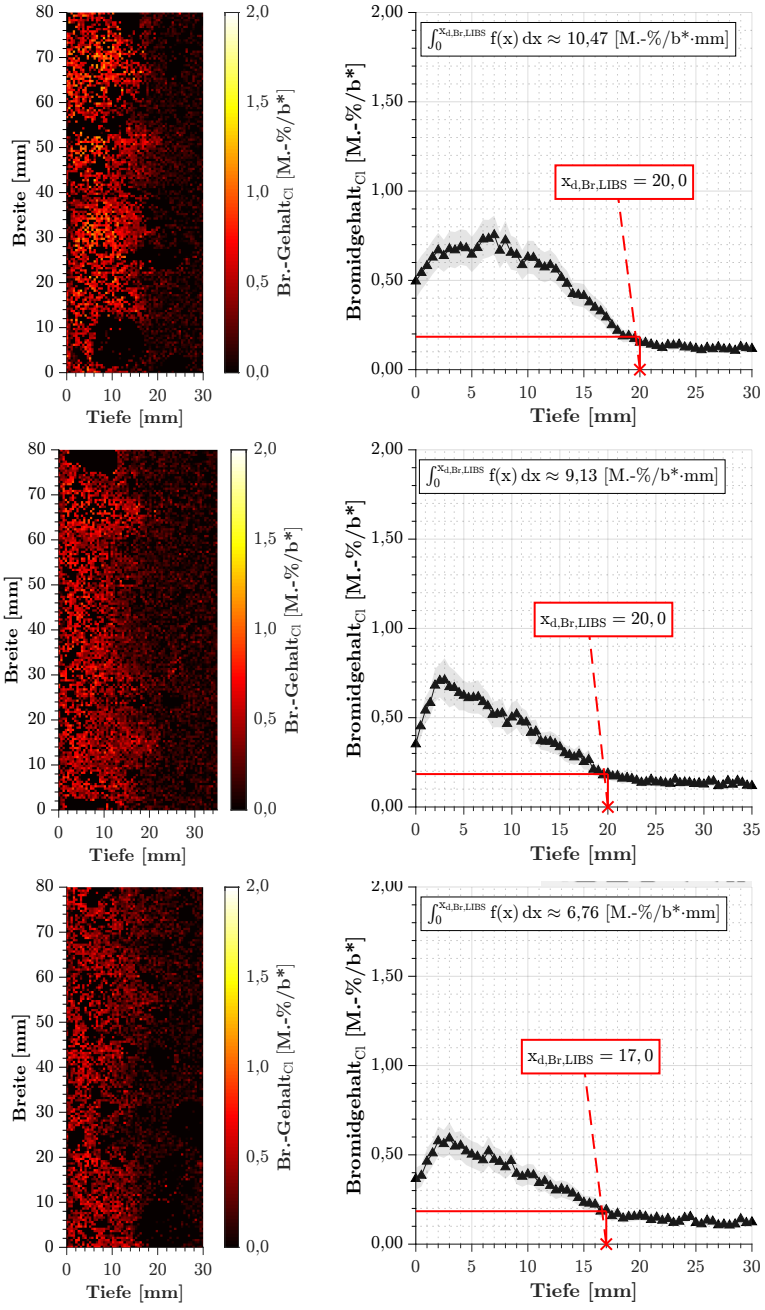
(f) 28. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEM II/AS, LP = 9,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Mittelwert	12.83	5.60	0.65
SD	0.76	0.98	0.13
CoV [%]	5.95	17.58	19.99



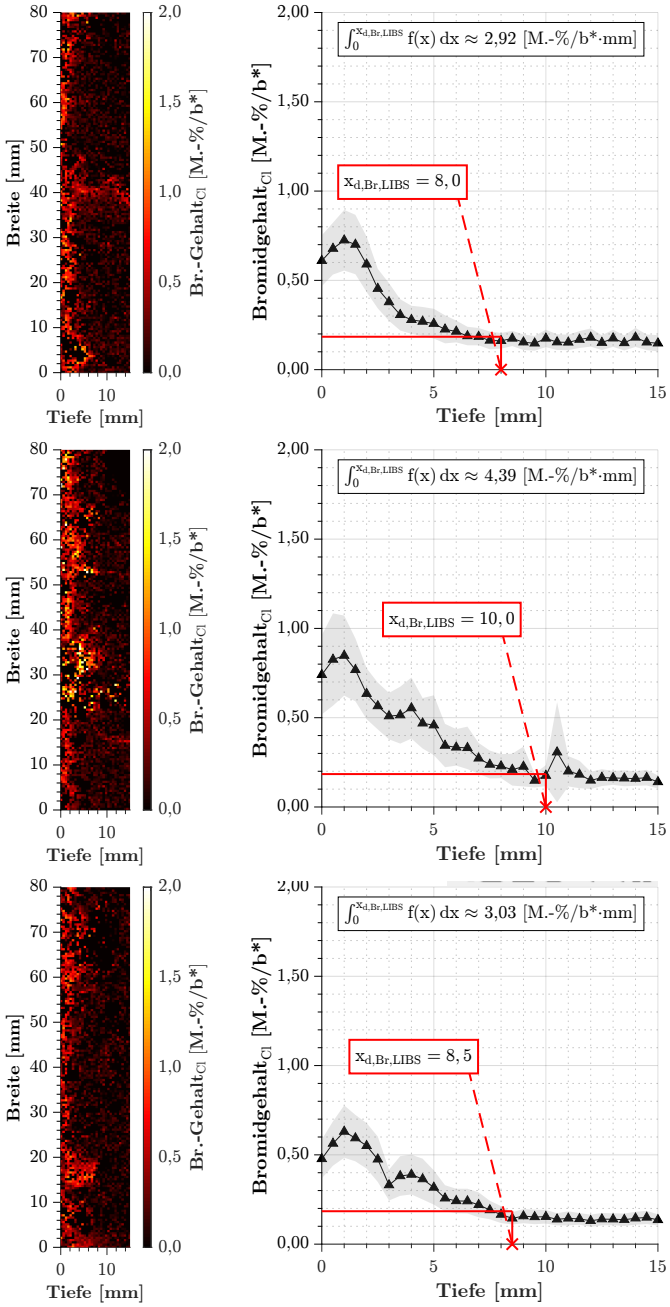
(g) 28. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEM I, LP = 7,2 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Mittelwert	19,00	8,79	0,69
SD	1,73	1,88	0,08
CoV [%]	9,12	21,41	12,18



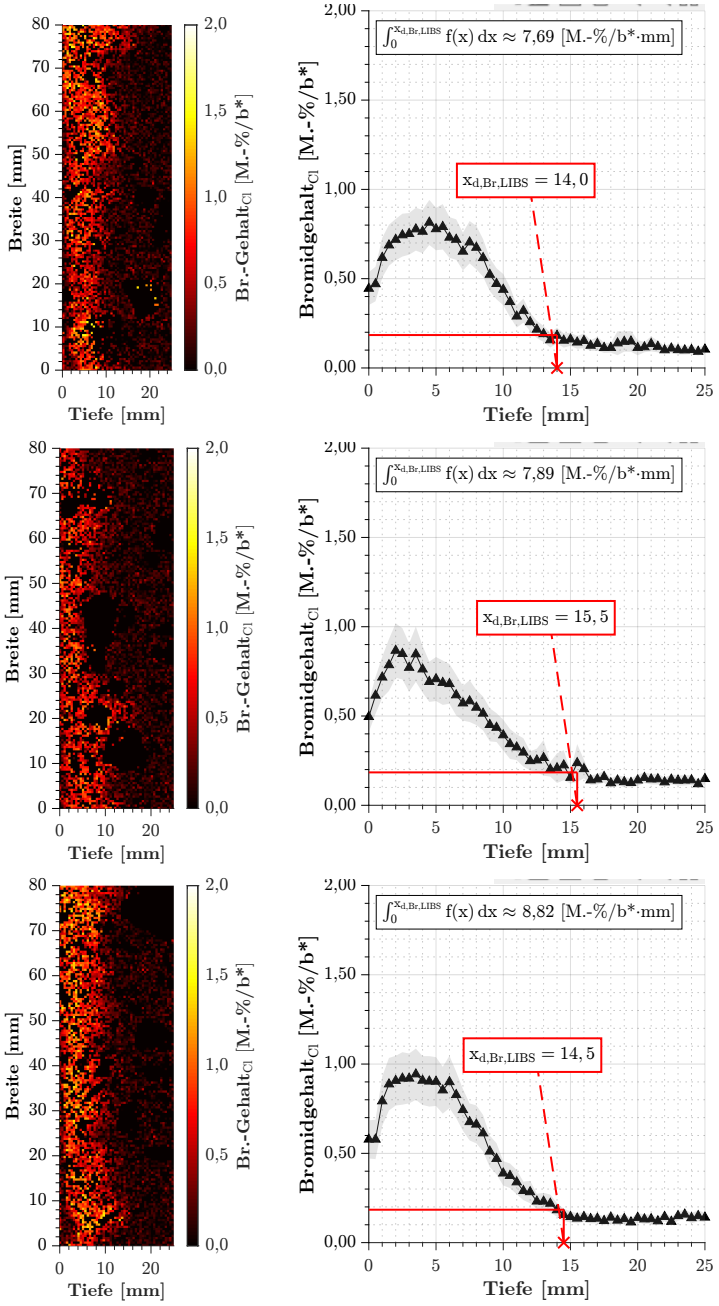
(h) 28. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEM III/B, LP = 5,5 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Mittelwert	8,83	3,45	0,73
SD	1,04	0,82	0,11
CoV [%]	11,78	23,67	14,84



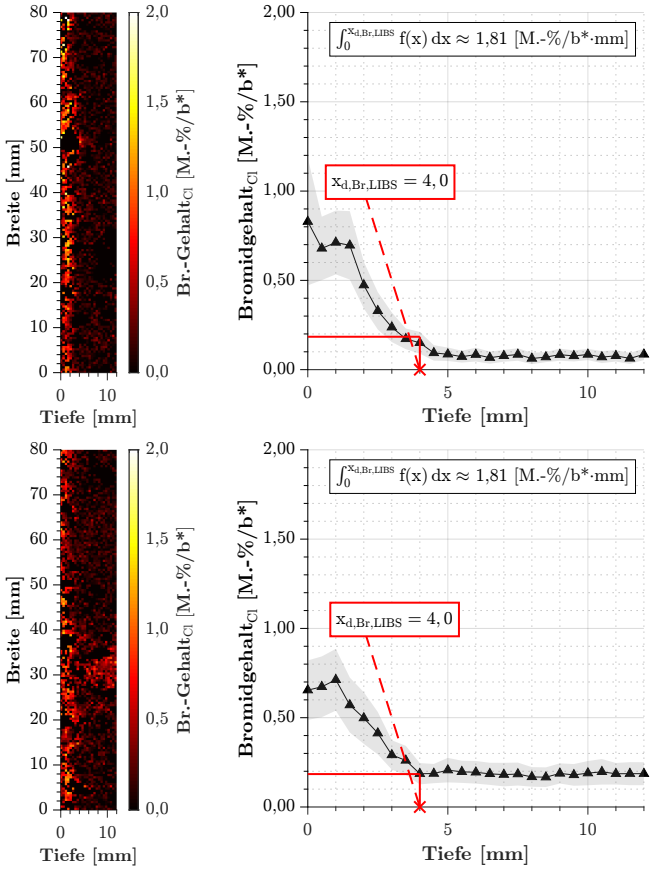
(i) 28. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEM I+SFA (k=0,4), LP = 7,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Mittelwert	14,67	8,23	0,88
SD	0,76	0,52	0,06
CoV [%]	5,21	6,32	6,33



(j) 28. FTSW (CDF) mit anschließendem Migrationsversuch (RBM): LIBS 2D-Darstellung und Bromidprofil. CEMI+SF (k=0,0), LP = 7,0 Vol.-%

Parameter [-]	$\mathbf{x_{d,Br}}$ **[mm]**	$\mathbf{\int_0^{x_{d,Br}} f(x)dx}$ **[M.-%/b*·mm]**	$\mathbf{max_{Br}}$ **[M.-%/b*]**
Min.	4,00	1,81	0,71
Max.	4,00	2,02	0,89
Mittelwert	4,00	1,92	0,80

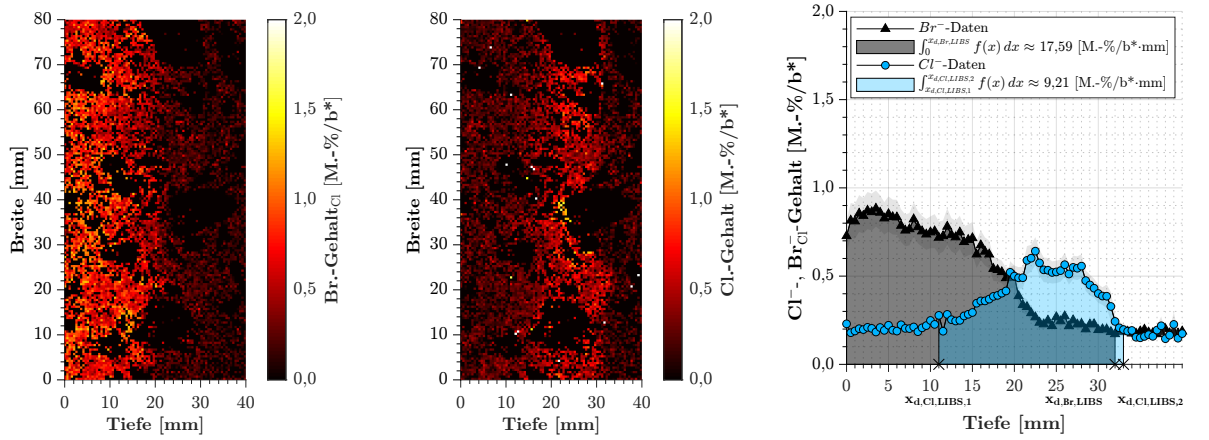


A-11 Kombinierte Br⁻-, Cl⁻-Darstellungen nach 14. FTSW+RBM

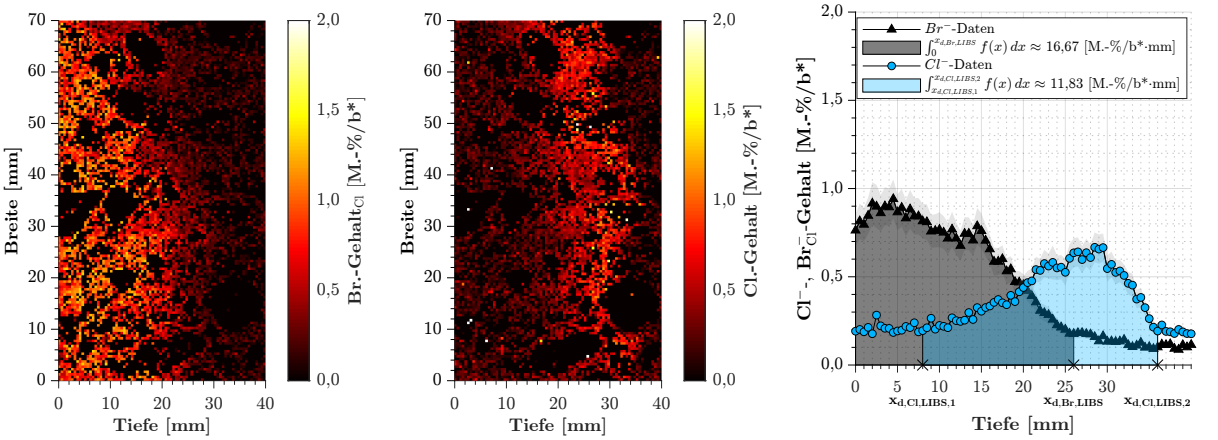
Tab. A-11.1: 14. FTSW+RBM-kombinierte Darstellung. 2D-Darstellungen von Br^- (links) und Cl^- (mittig) und Ionenprofile (rechts) nach dem 14. FTSW mit anschließenden RBM-Test.

(a) CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK1

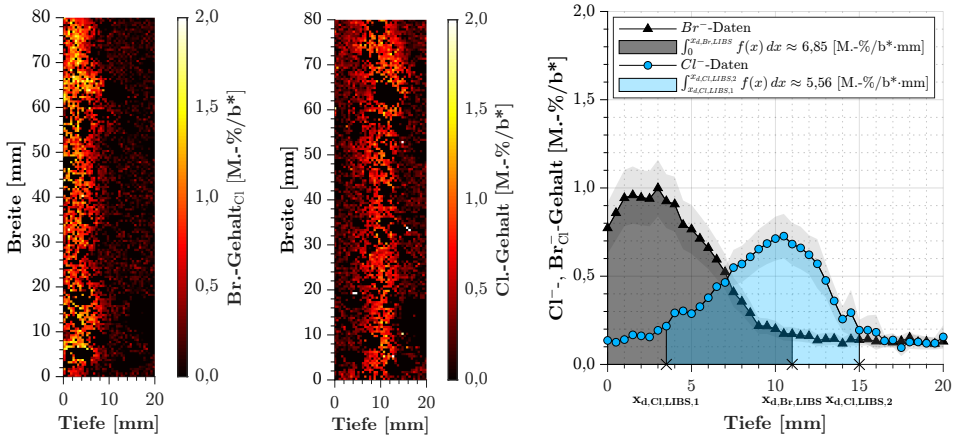


PK2

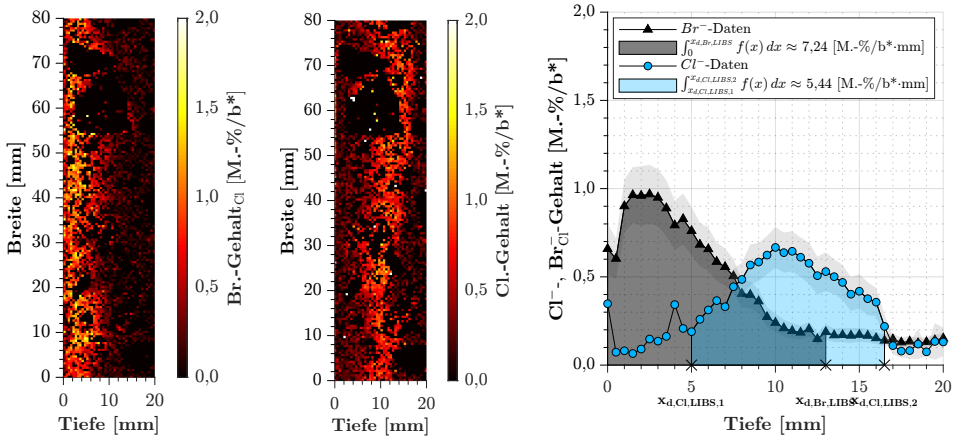


(b) CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK13

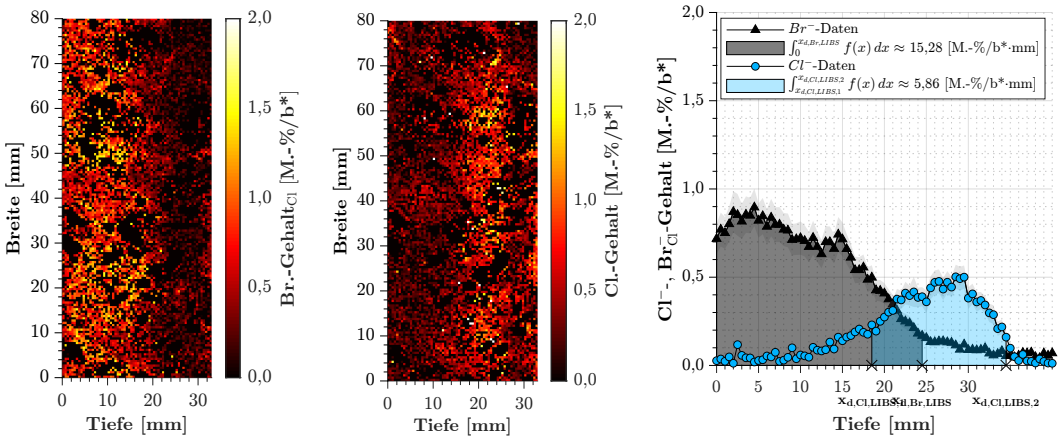


PK14



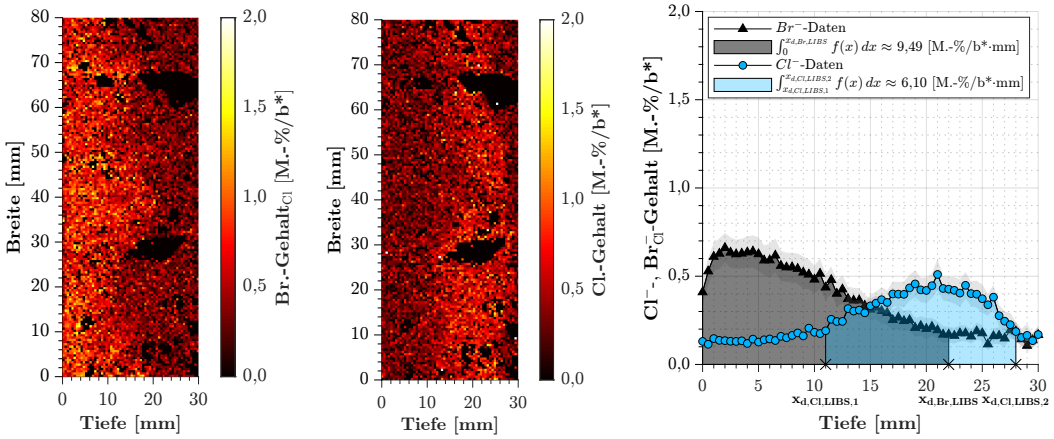
(c) CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 0,8 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK2

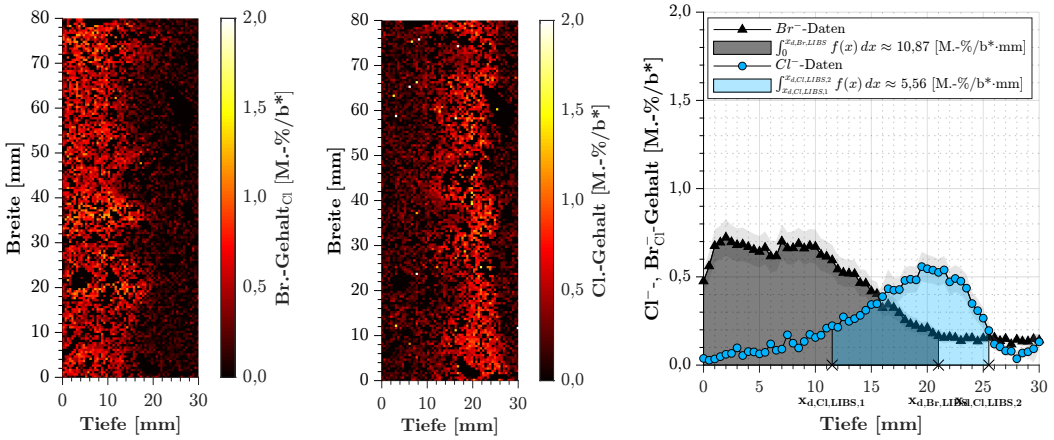


(d) CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 10,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK1

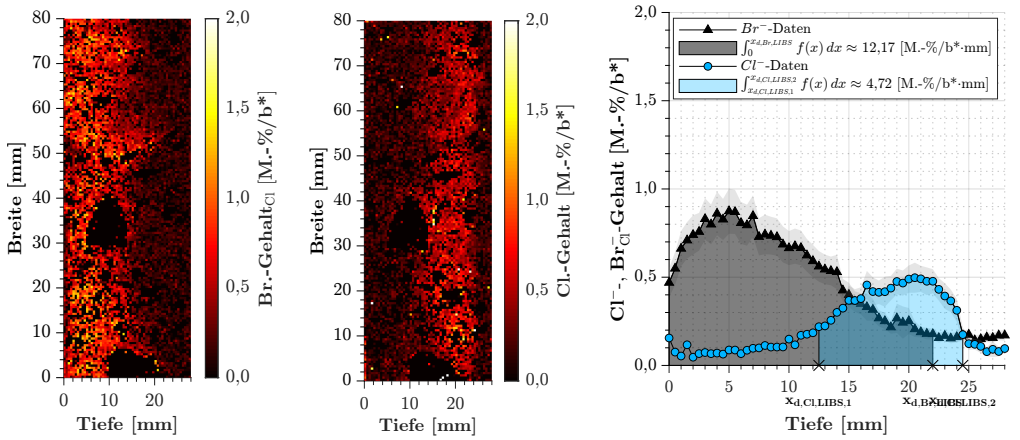


PK2

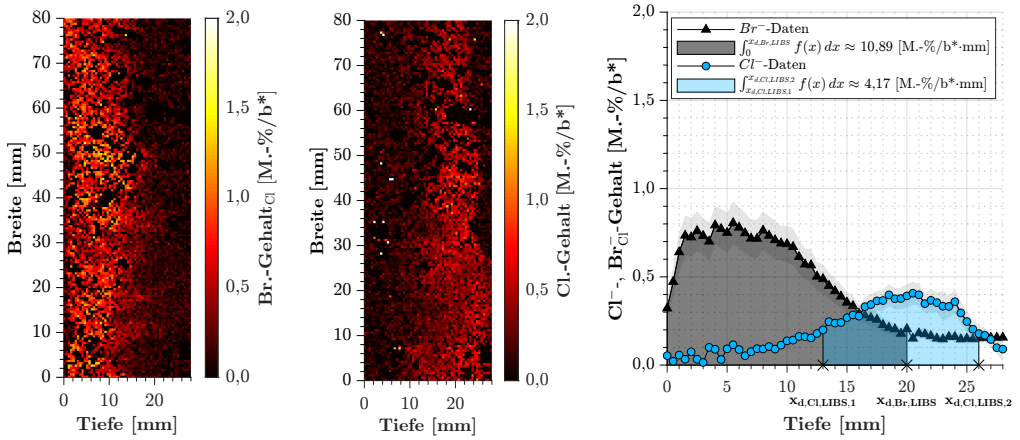


(e) CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 10,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK1

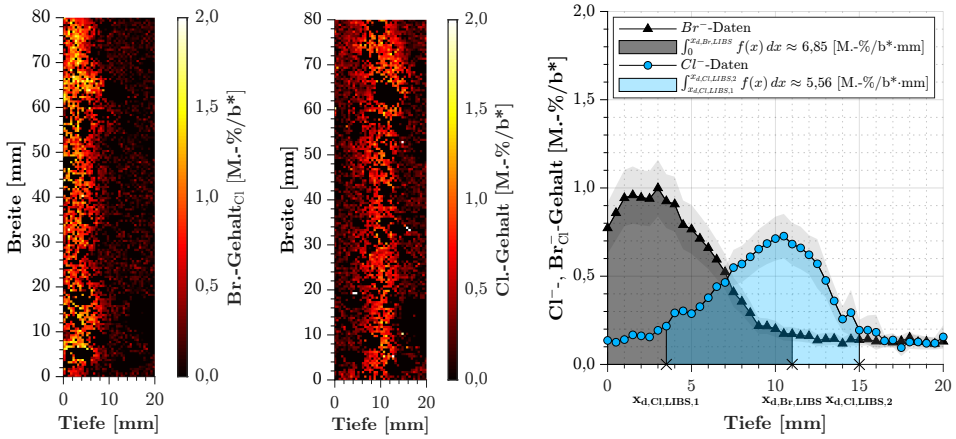


PK2

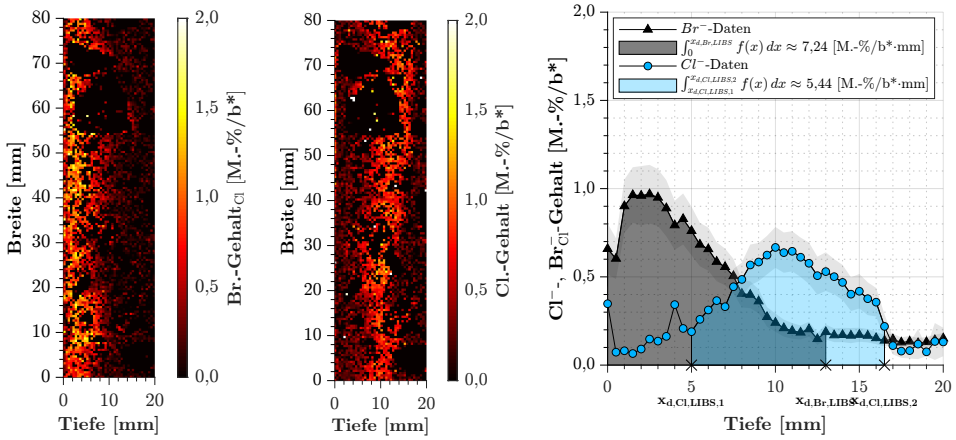


(f) CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 10,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK13

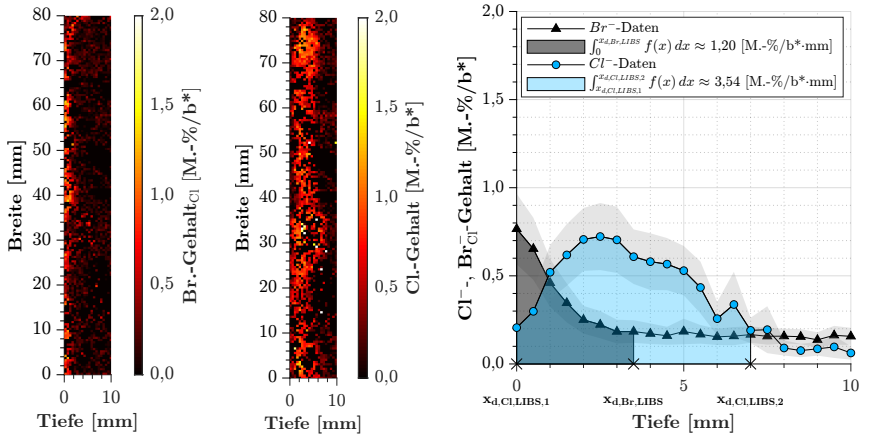


PK14

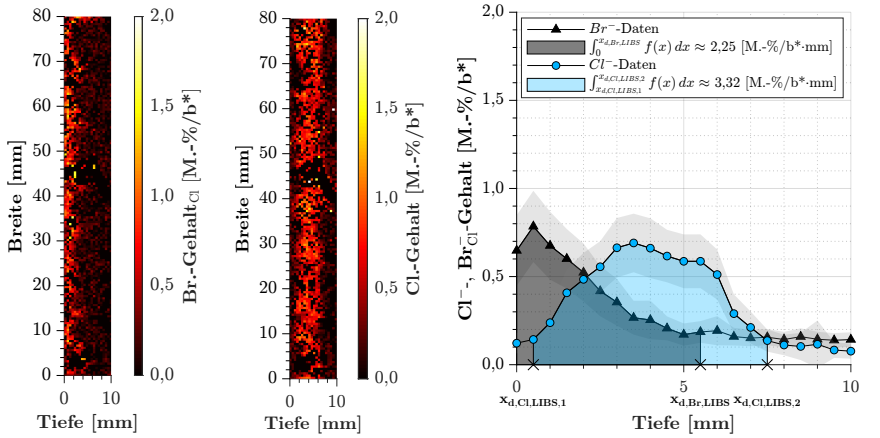


(g) CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK7

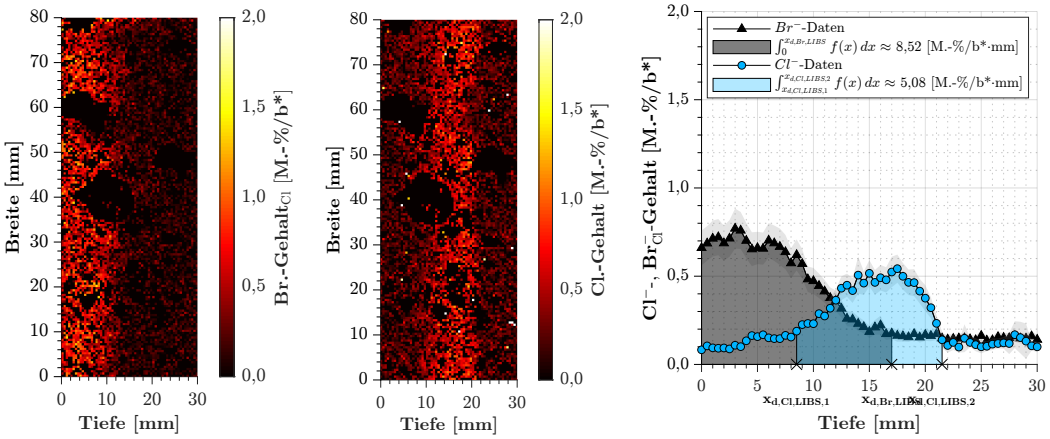


PK8

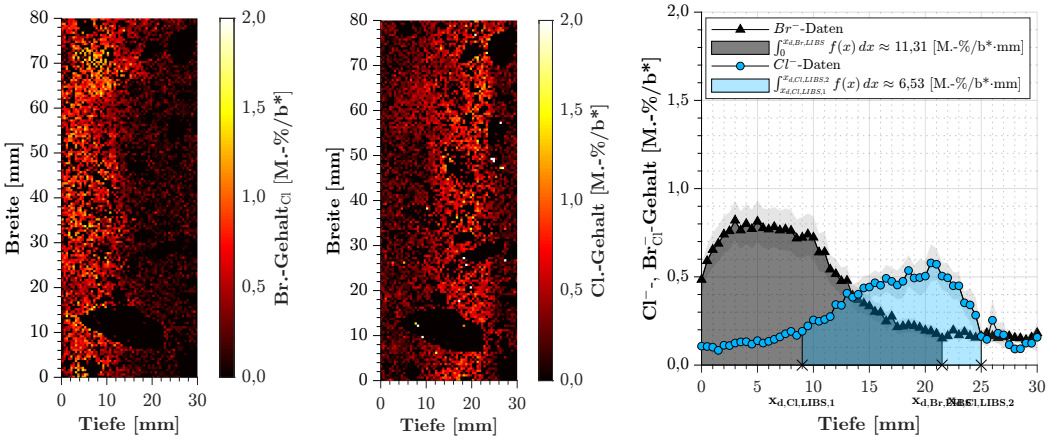


(h) CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 9,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK13

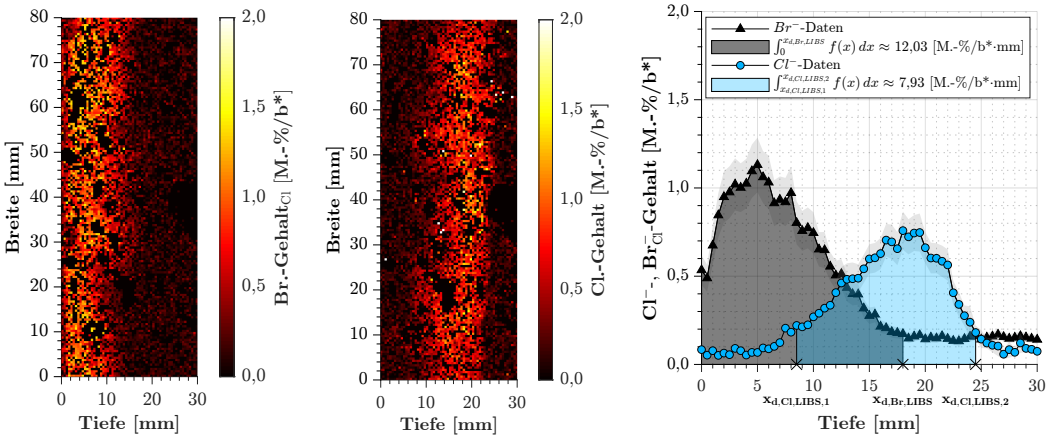


PK14

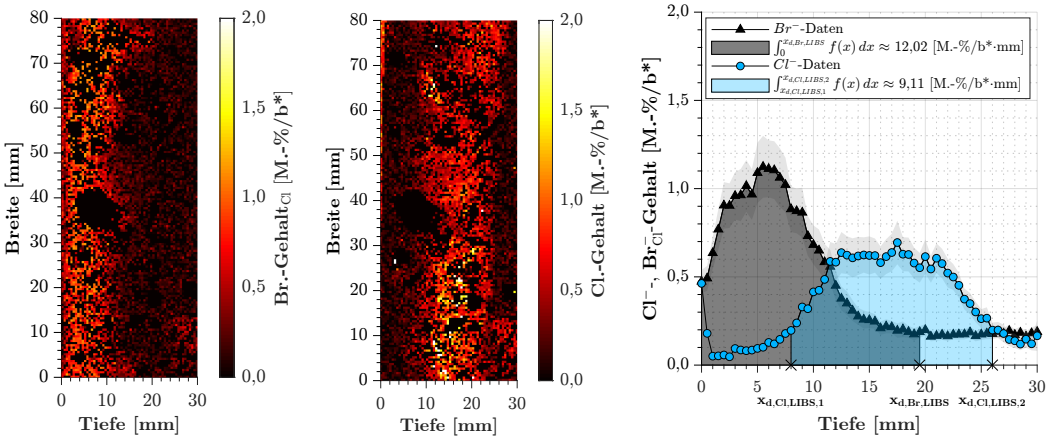


(i) CEM I+SFA, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK1

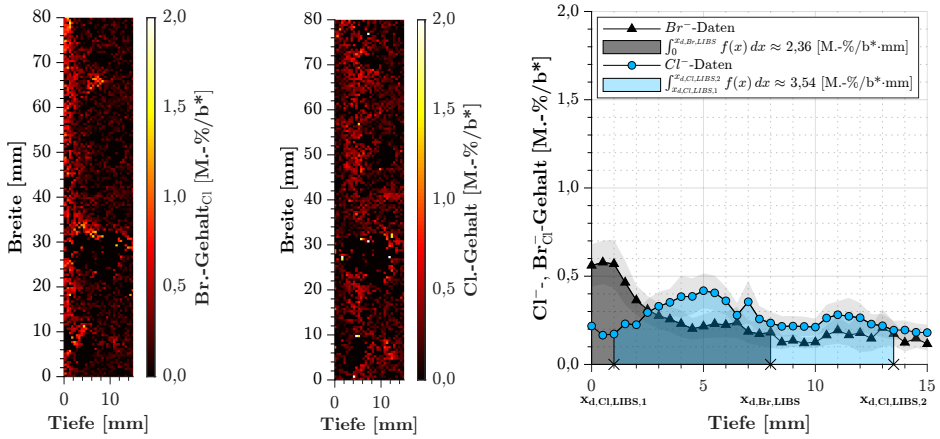


PK2

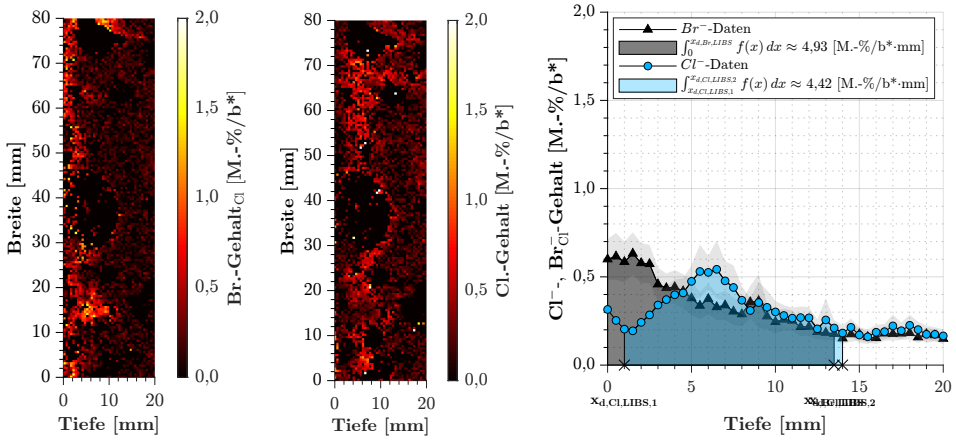


(j) CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK8



PK9

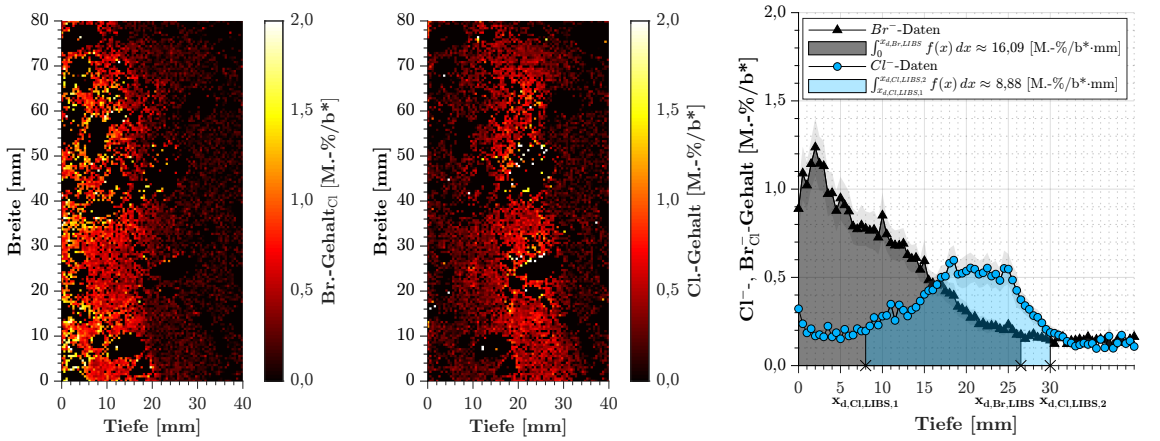


A-12 Kombinierte Br⁻-, Cl⁻-Darstellungen nach 28. FTSW+RBM

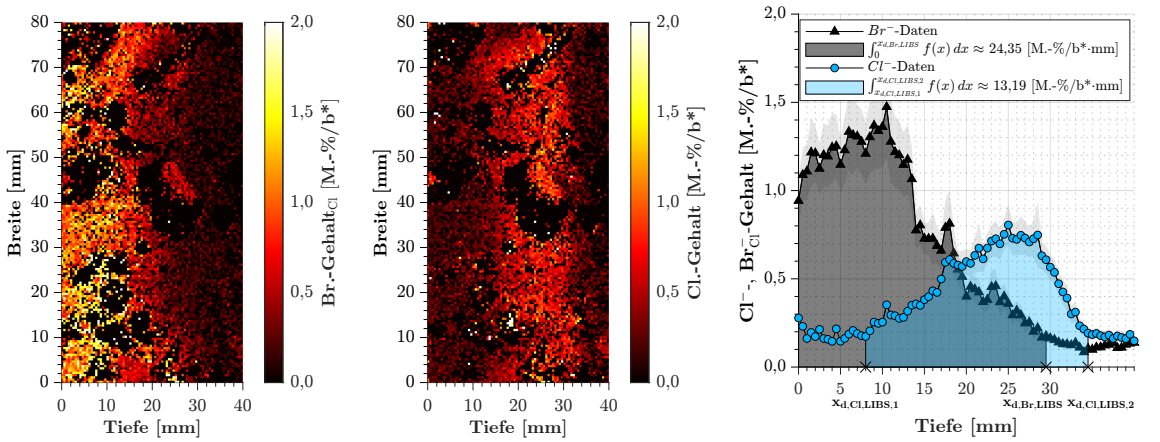
Tab. A-12.1: 28. FTSW+RBM-kombinierte Darstellung. 2D-Darstellungen von Br^- (links), Cl^- (mittig) und Ionenprofile (rechts) nach dem 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test.

(a) CEMI, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 28. FTSW mit anschließendem RBM-Test. Teil 1 der Darstellung.

PK3

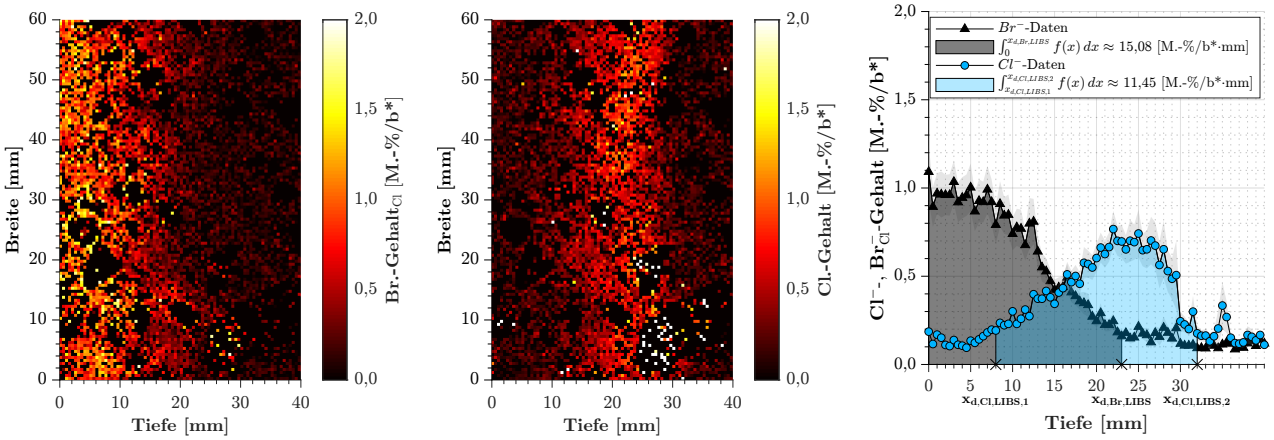


PK4



(a) CEMI, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 28. FTSW mit anschließendem RBM-Test. Teil 2 der Darstellung.

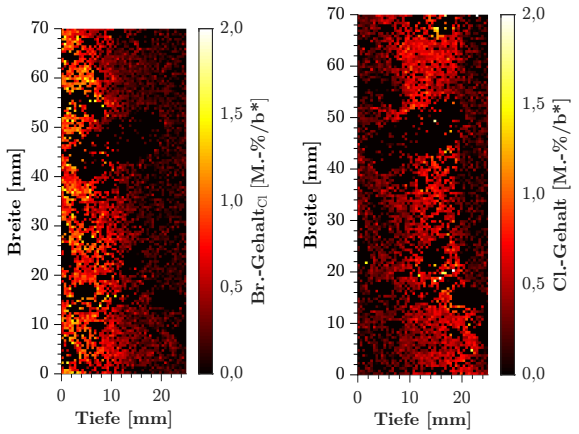
PK5



(a) CEMI, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 28. FTSW mit anschließendem RBM-Test. Teil 1 der Darstellung.

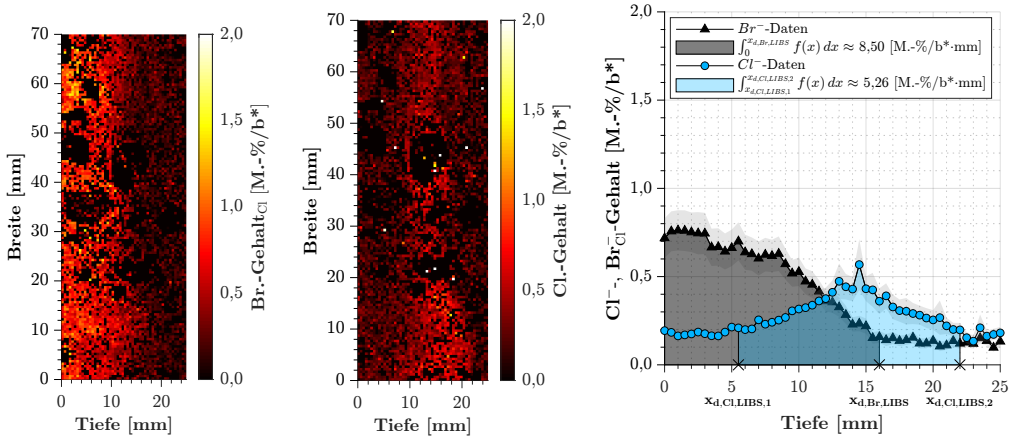
(b) CEMI+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK1



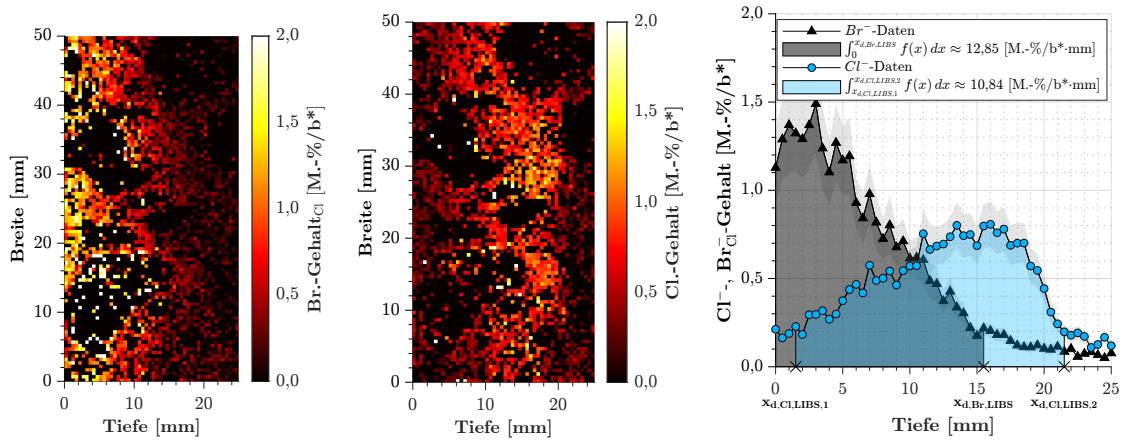
Keine Daten

PK2

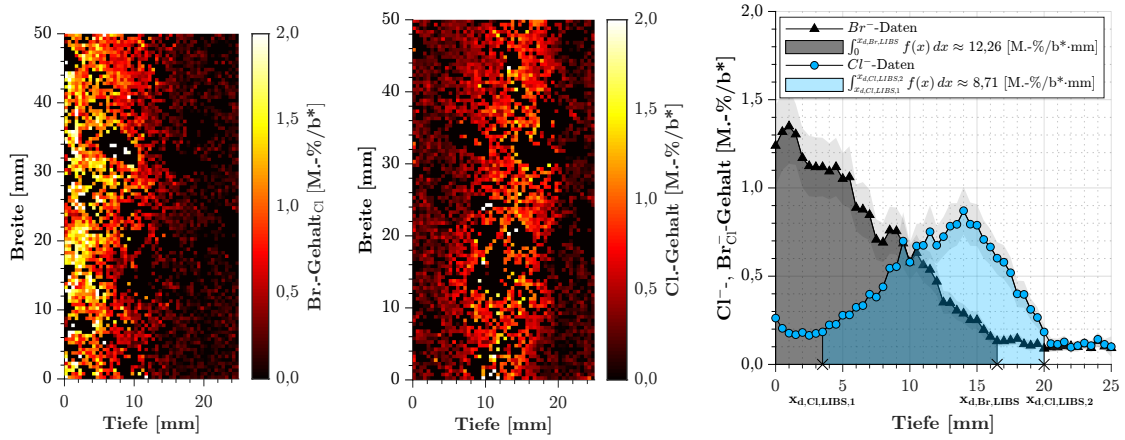


(c) CEMI+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 28. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK3



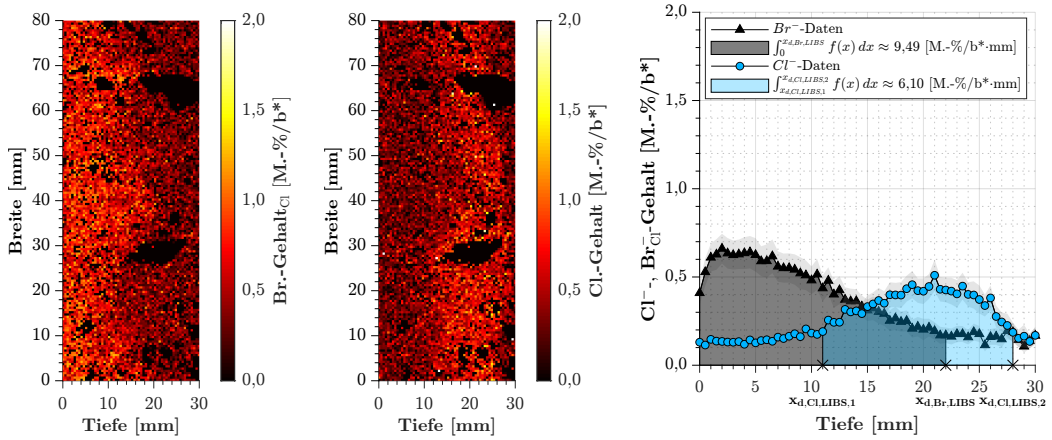
PK4



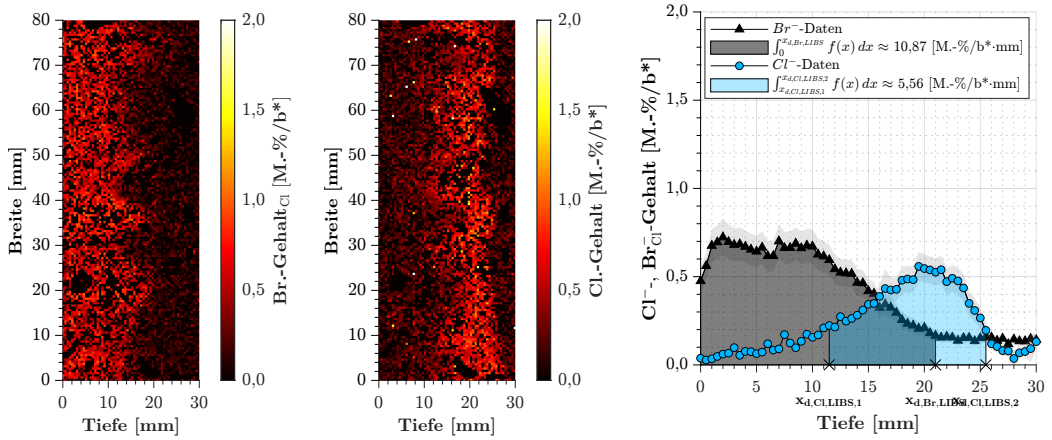
Tab. A-12.4: 28. FTSW+RBM-kombinierte Darstellung. 2D-Darstellungen von Br^-(links)- und Cl^- (mittig) und Ionenprofile nach dem 14. FTSW mit anschließenden RBM-Test.

(a) CEMI, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 10,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK1

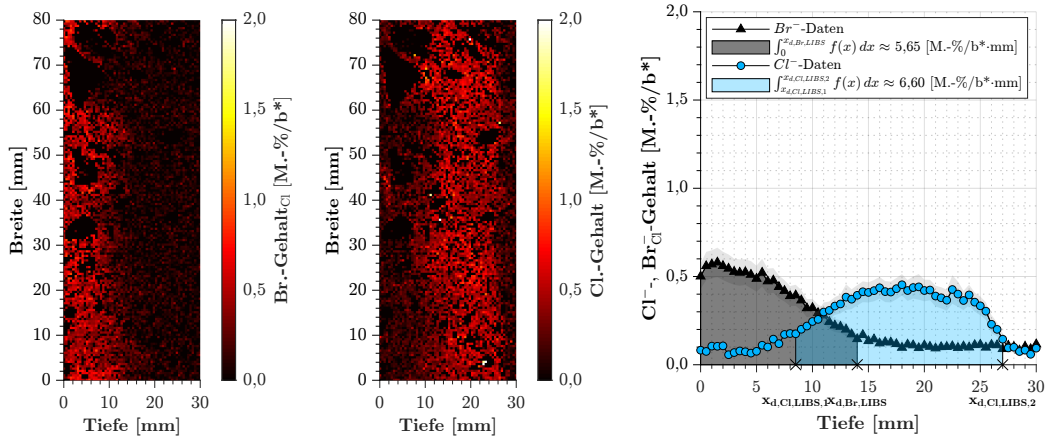


PK2

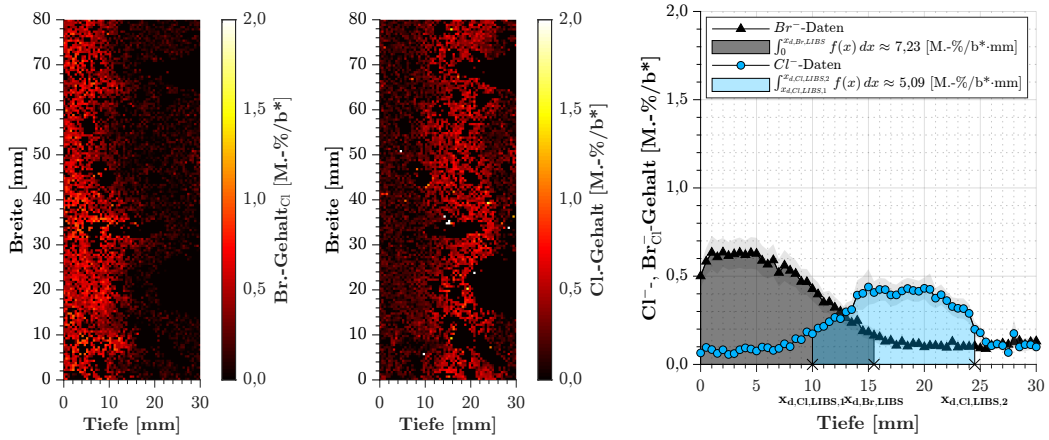


(b) CEMI, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 10,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 28. FTSW mit anschließendem RBM-Test

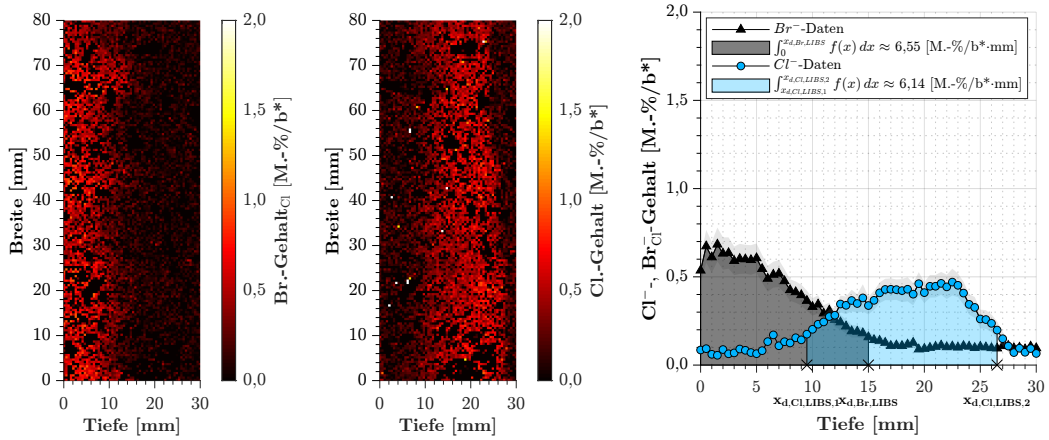
PK3



PK4

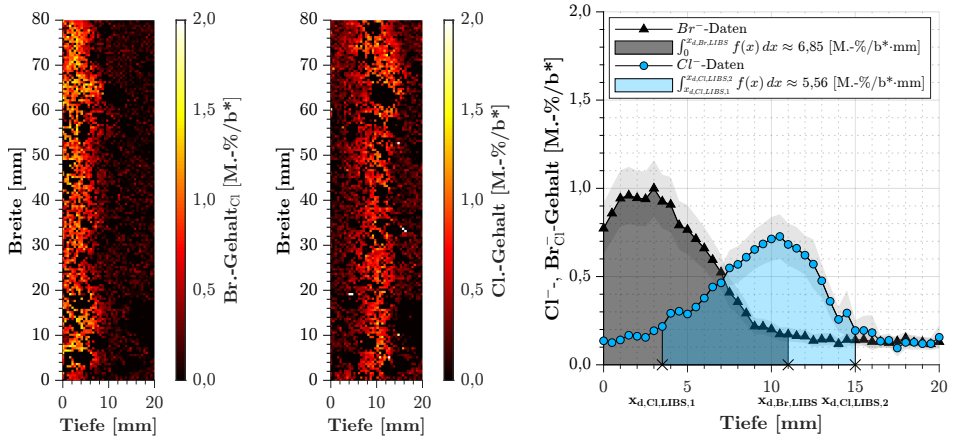


PK5

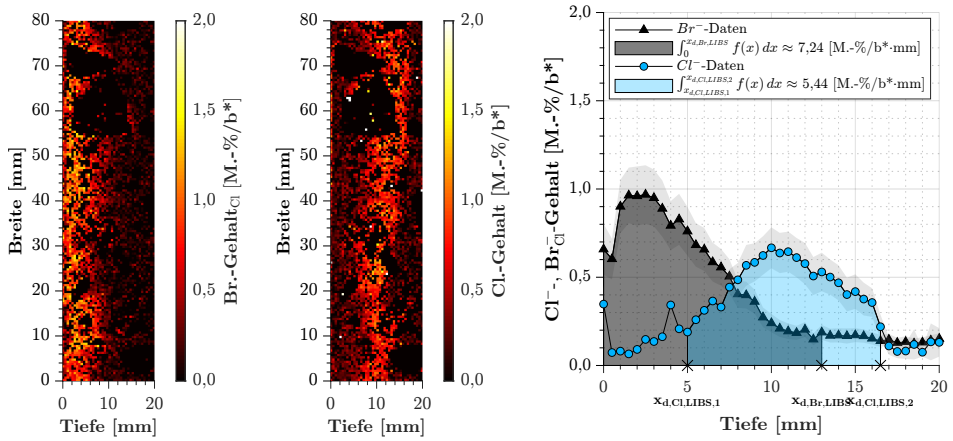


(c) CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK1

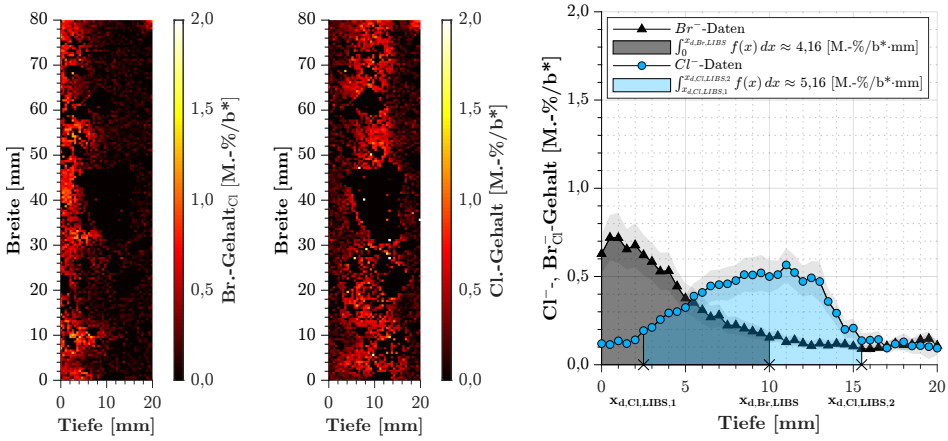


PK2

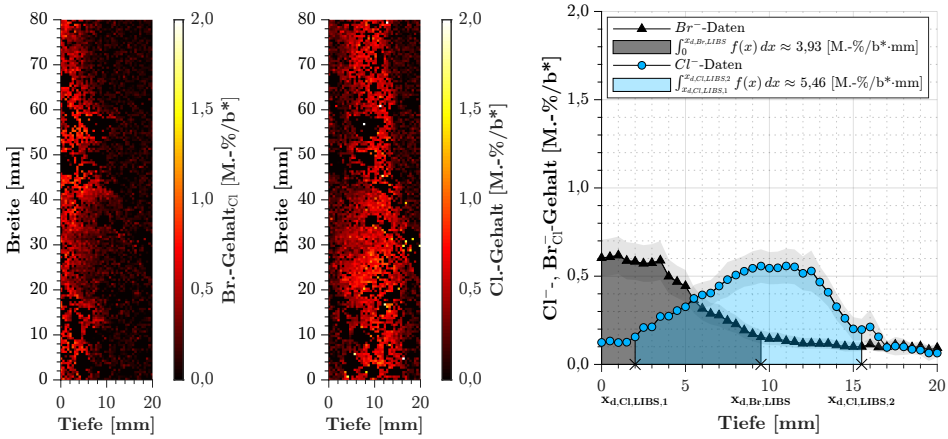


(d) CEMI+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 28. FTSW mit anschließendem RBM-Test

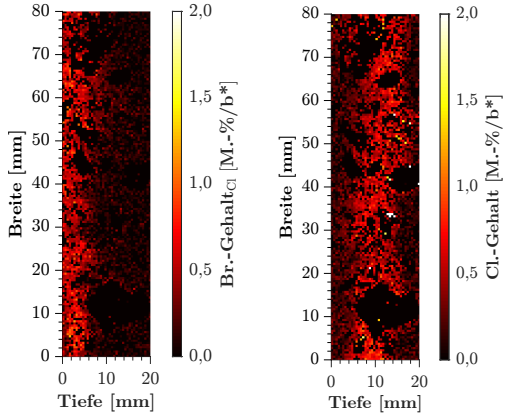
PK3



PK4



PK5



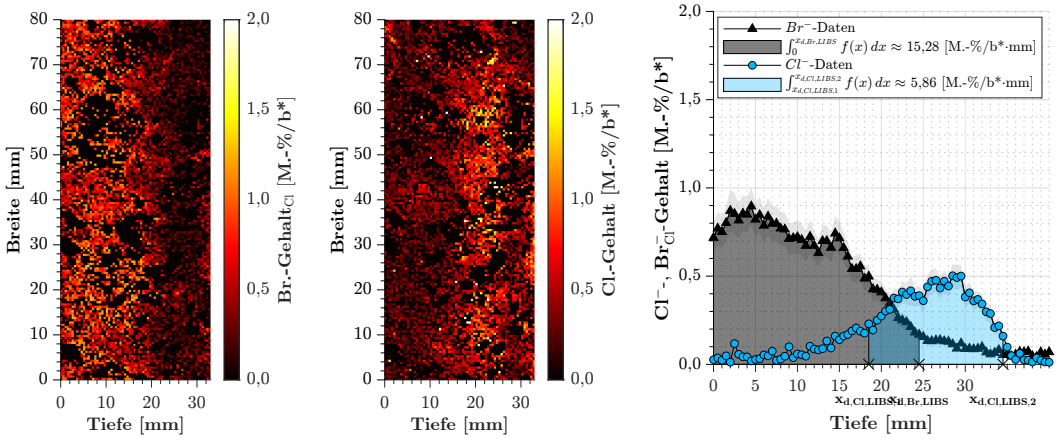
Keine Daten

(e) CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 0,8 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK1

Keine Daten

PK2

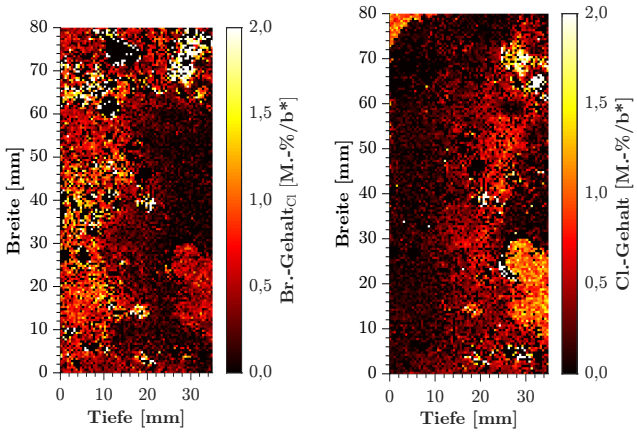


(f) CEMIIAS, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 0,8 Vol.-%. Chlorideindringen nach 28. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK3

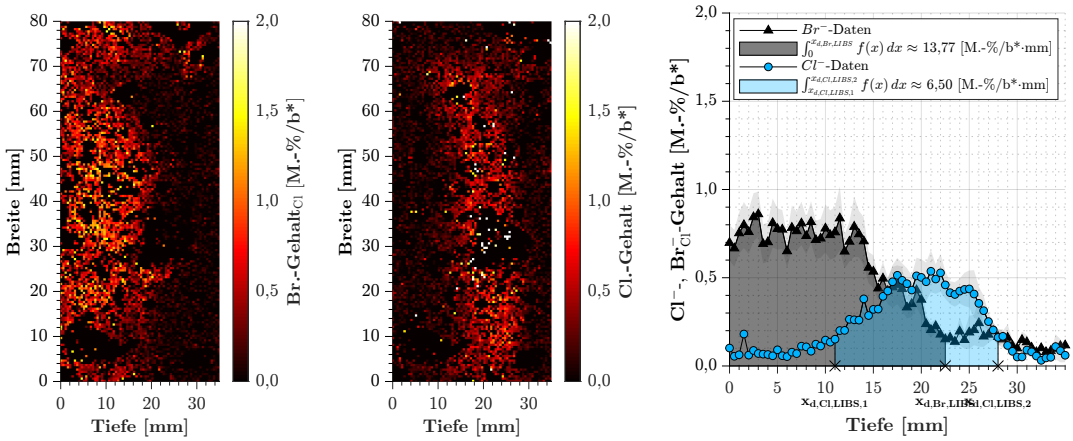
Keine Daten

PK4



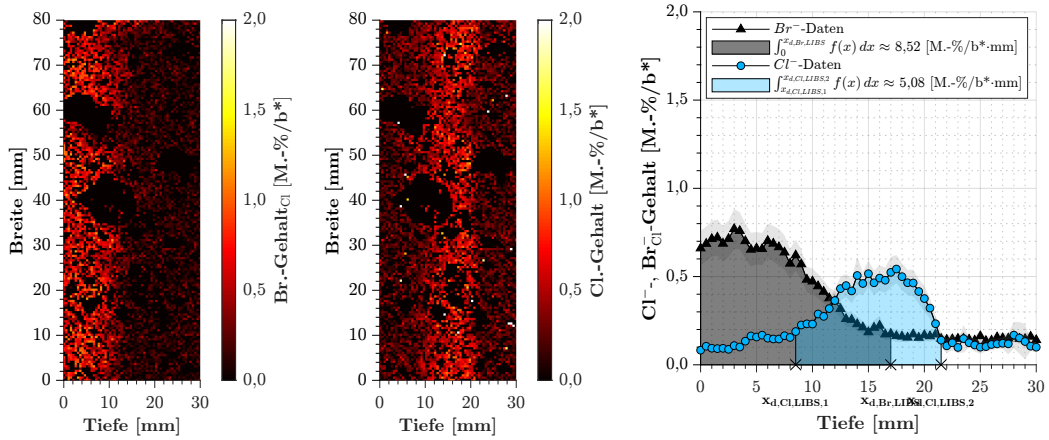
Keine Daten

PK5

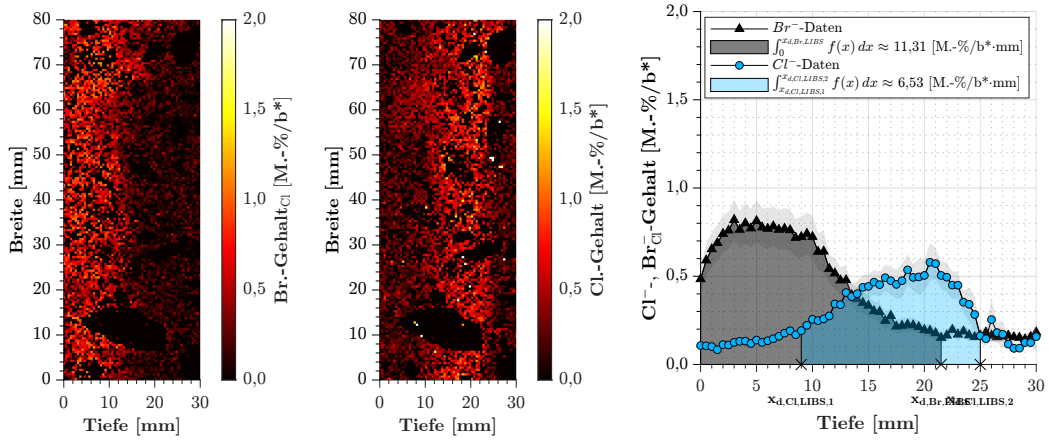


(g) CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 9,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK1

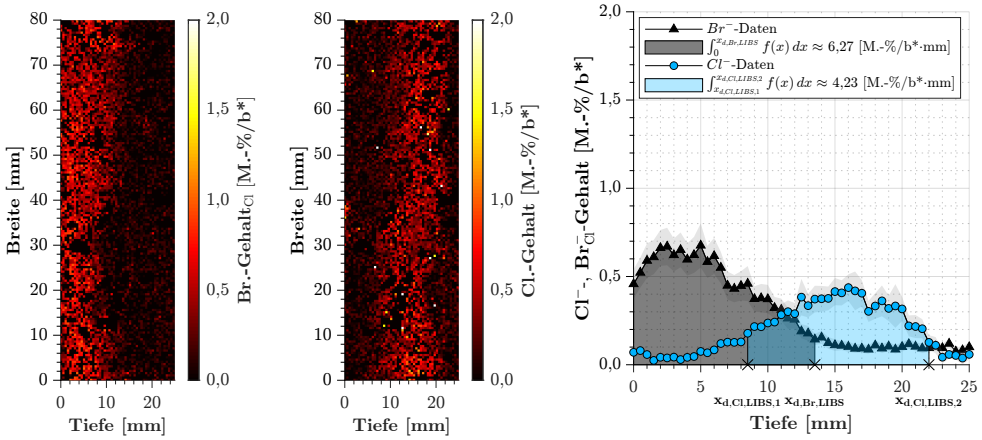


PK2

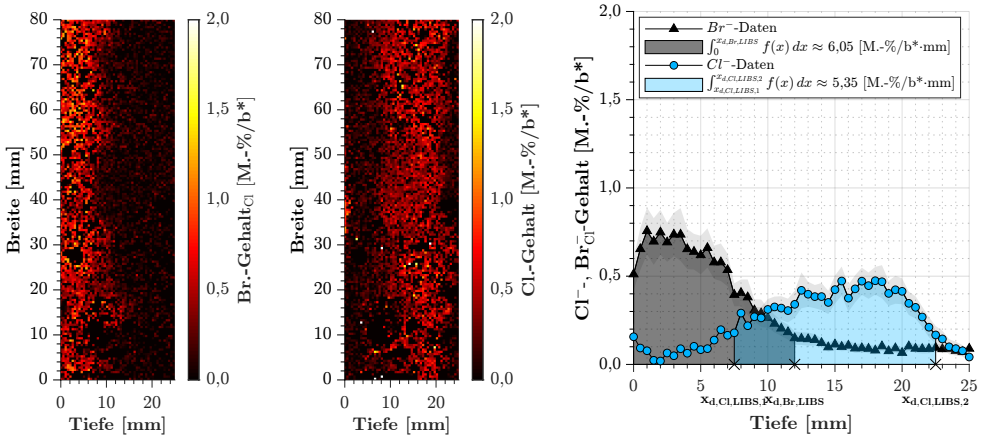


(h) CEMIIAS, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 9,0 Vol.-%. Chlorideindringen nach 28. FTSW mit anschließendem RBM-Test

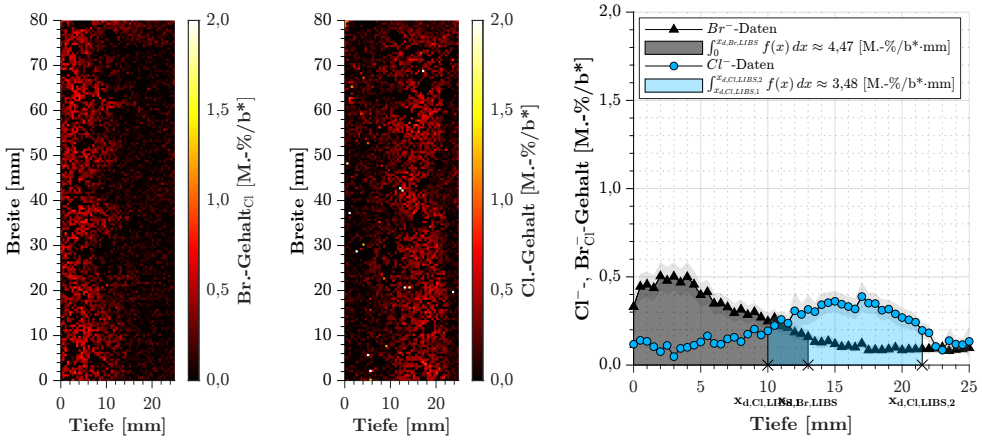
PK3



PK4

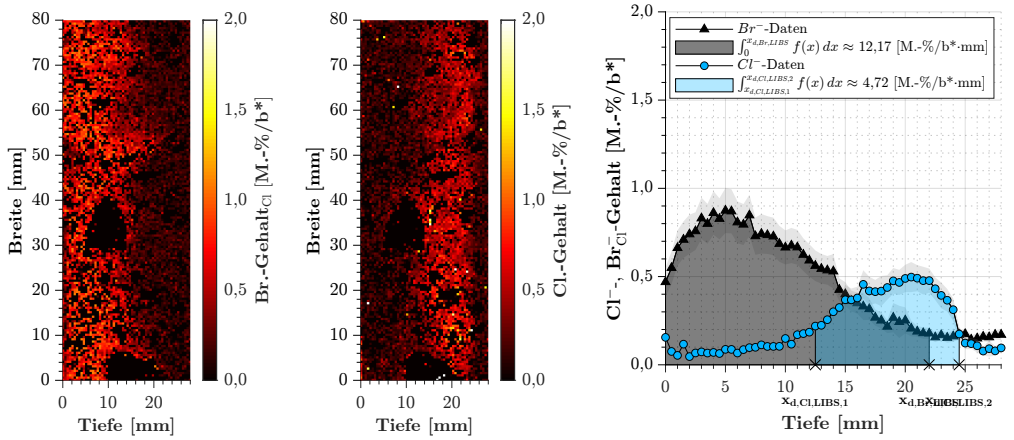


PK5

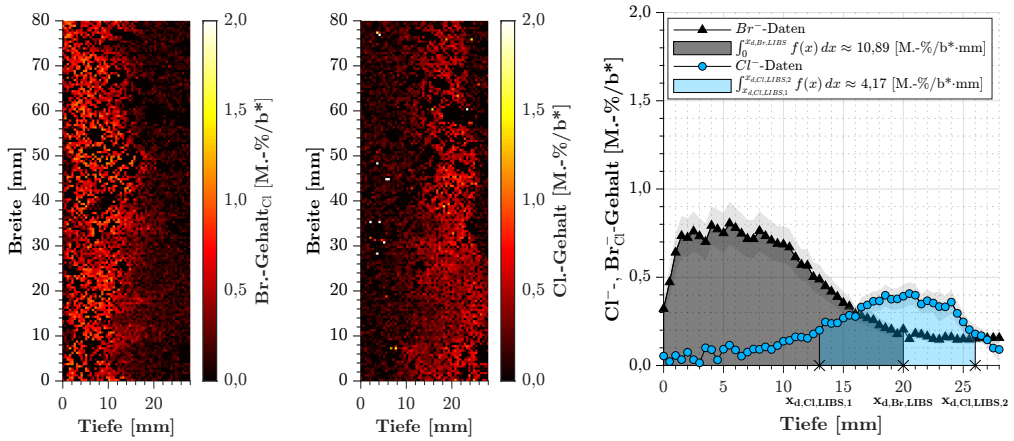


(i) CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,2 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK1

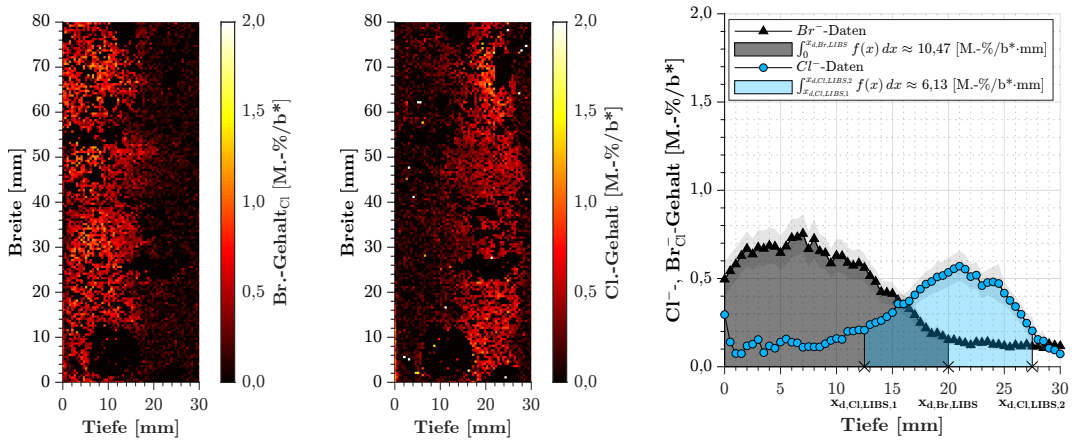


PK2

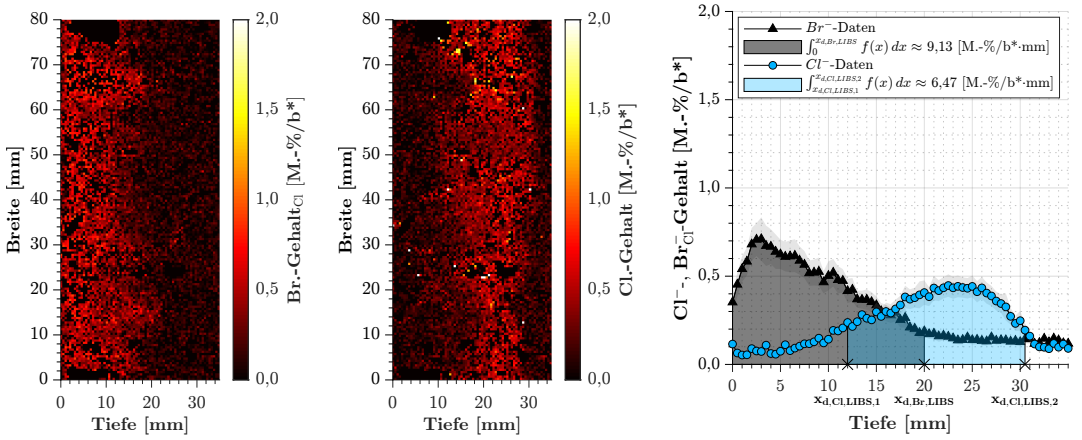


(j) CEMI, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,2 Vol.-%. Chlorideindringen nach 28. FTSW mit anschließendem RBM-Test

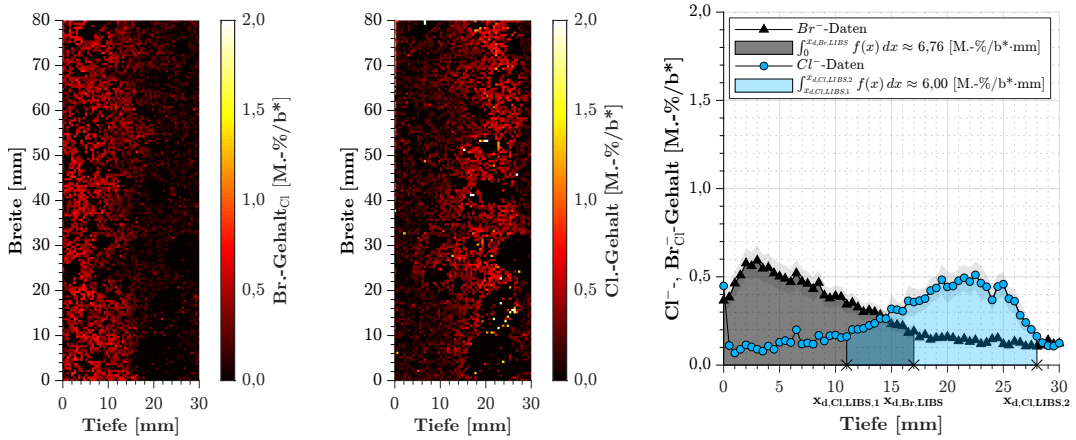
PK3



PK4

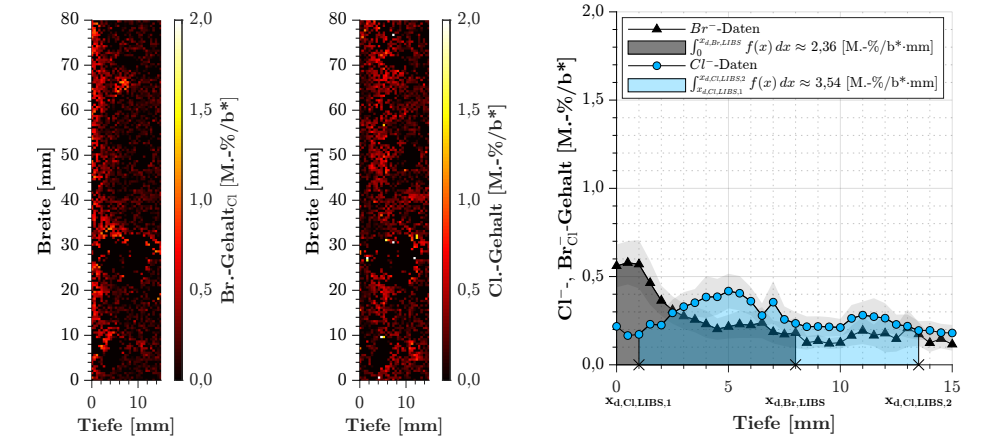


PK5

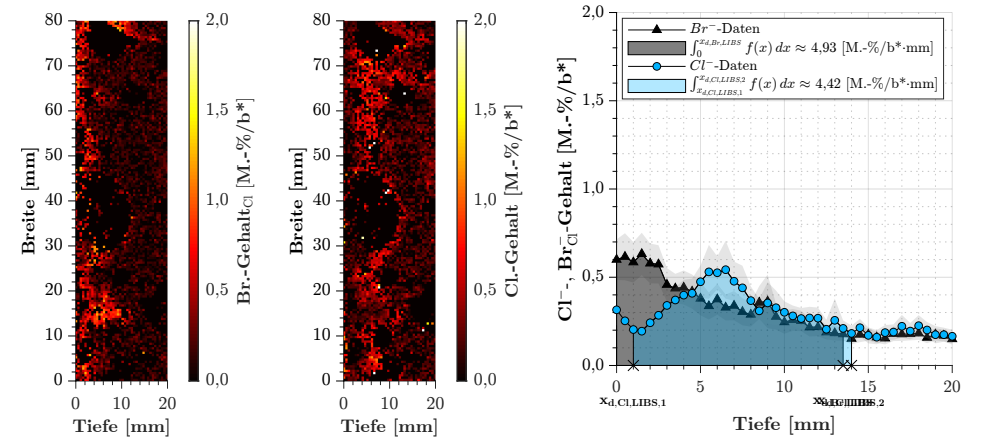


(k) CEMIIIB, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK1

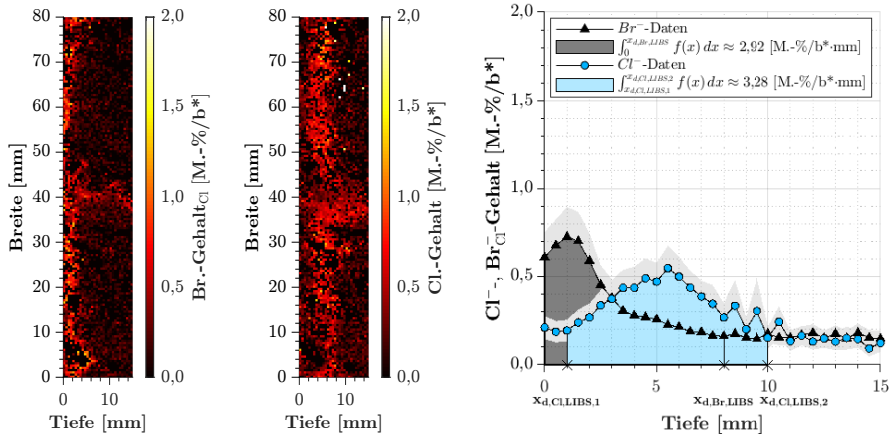


PK2

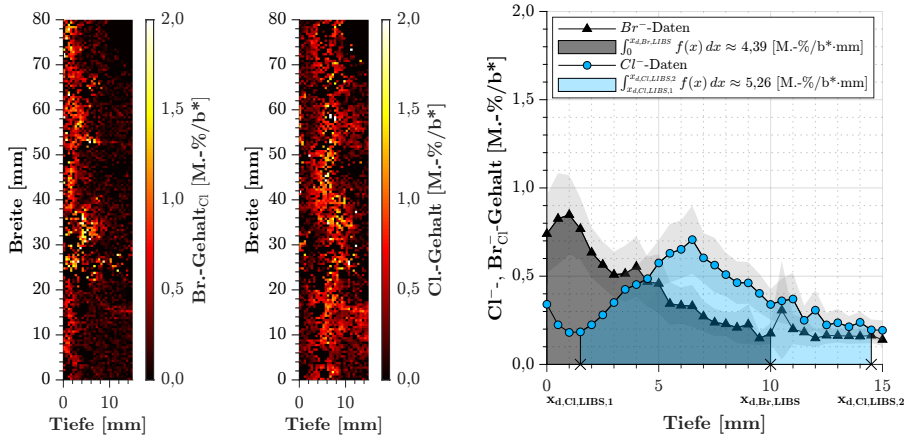


(I) CEMIIIB, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Chlorideindringen nach 28. FTSW mit anschließendem RBM-Test

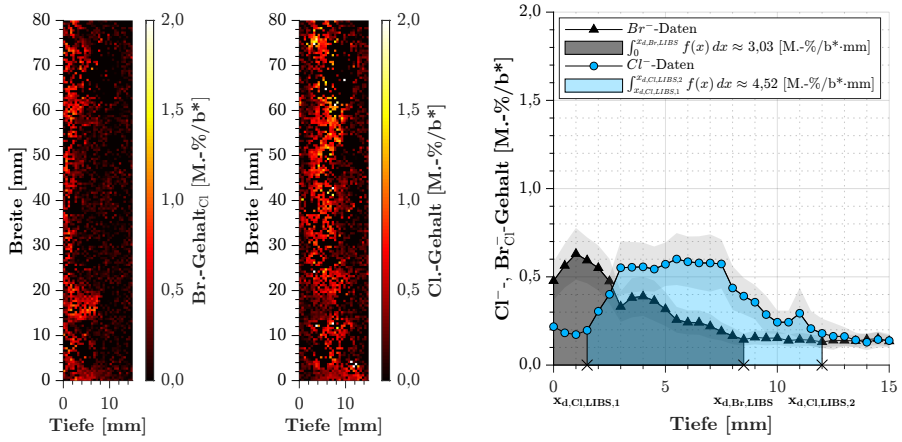
PK3



PK4

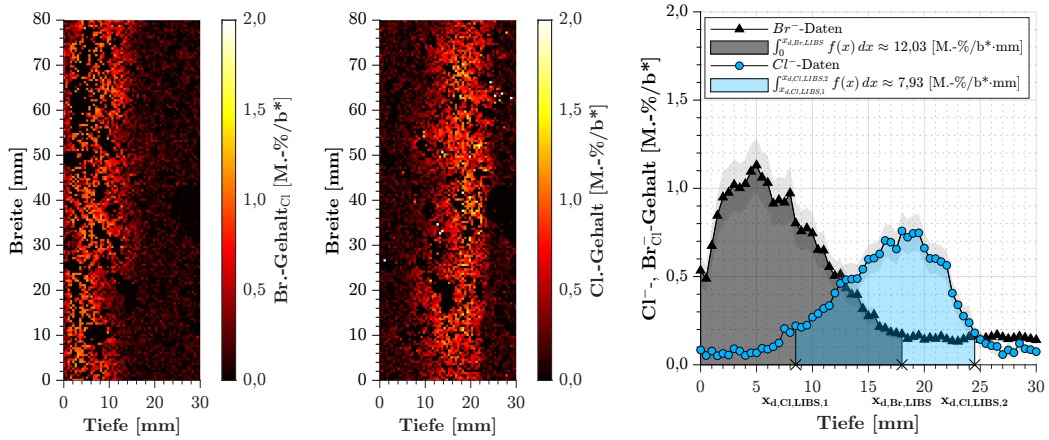


PK5

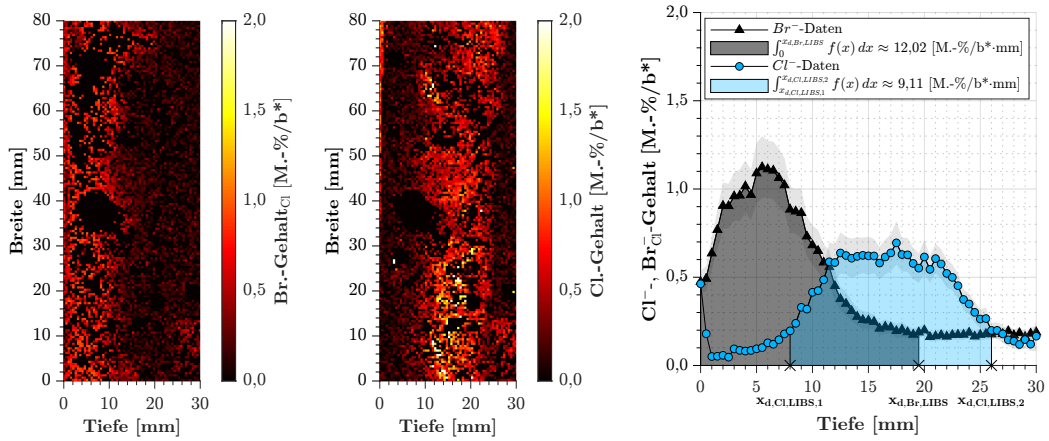


(m) CEMI+SFA, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK1

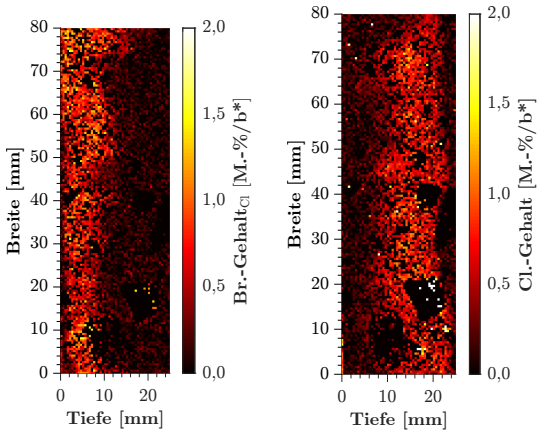


PK2



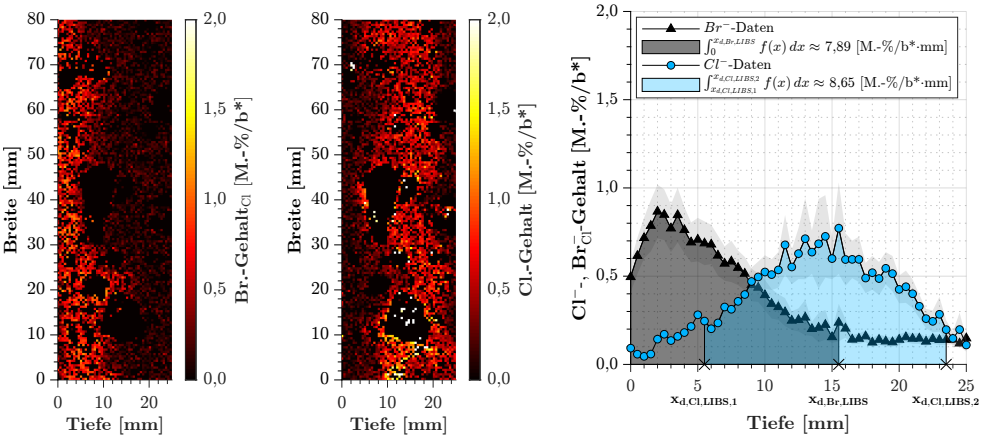
(n) CEMI+SFA, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7 Vol.-%. Chlorideindringen nach 28. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK3

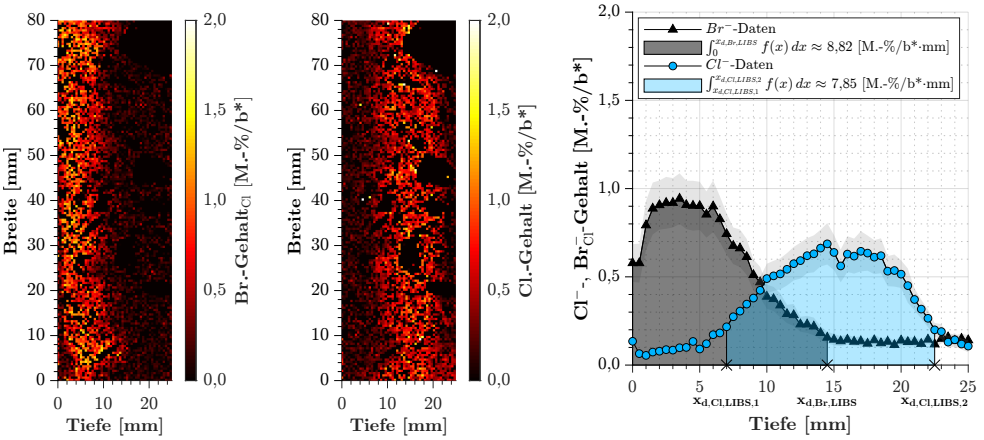


Keine Daten

PK4

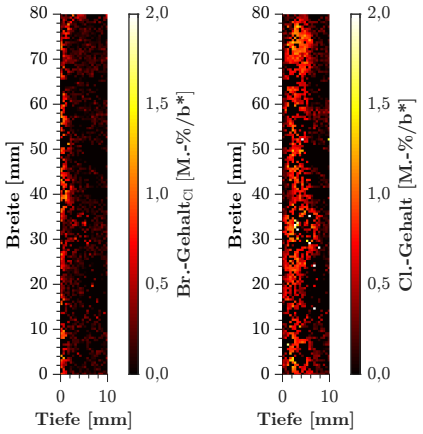


PK5



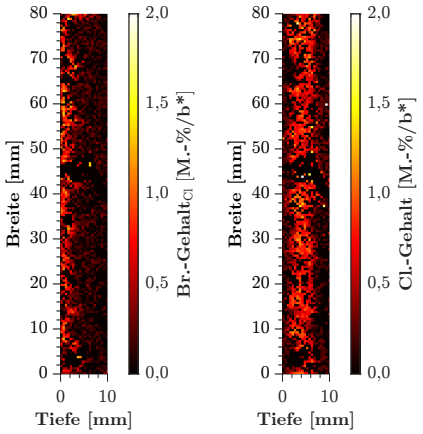
(o) CEMI+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Chlorideindringen nach 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test

PK1



Keine Daten

PK2



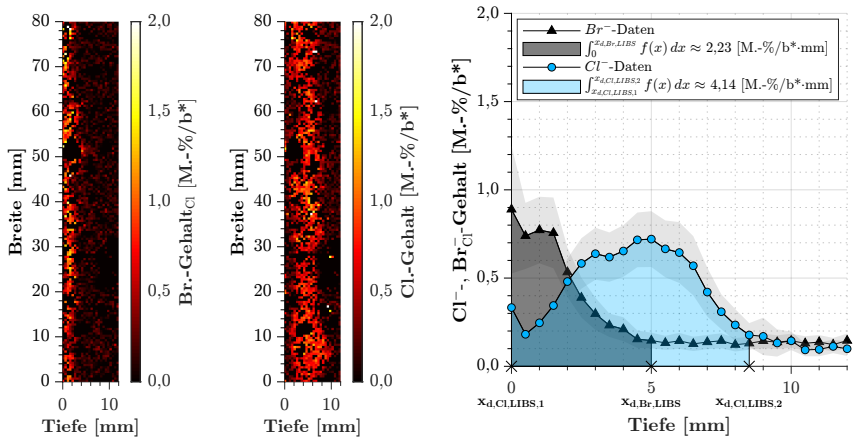
Keine Daten

(p) CEMI+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Chlorideindringen nach 28. FTSW mit anschließendem RBM-Test

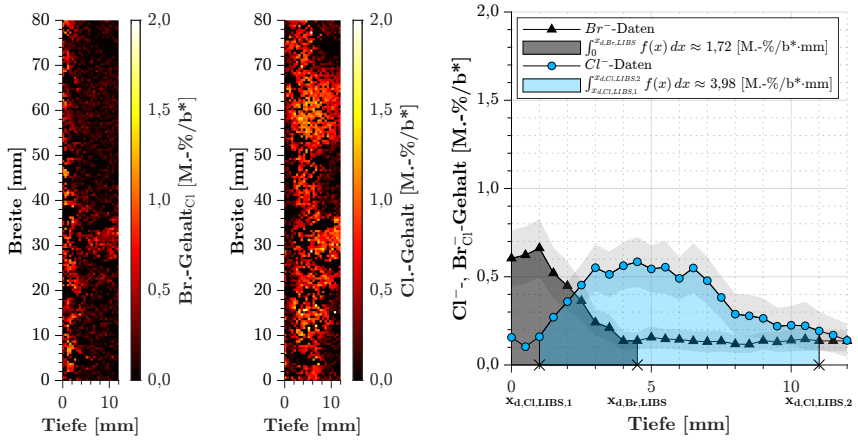
PK3

Keine Daten

PK4

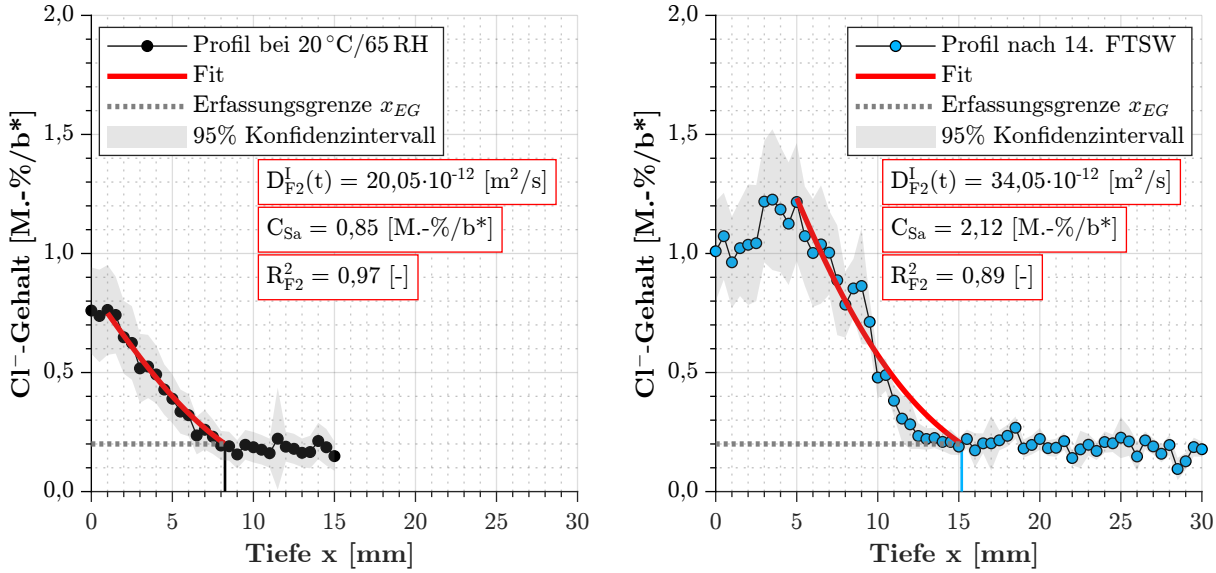


PK5



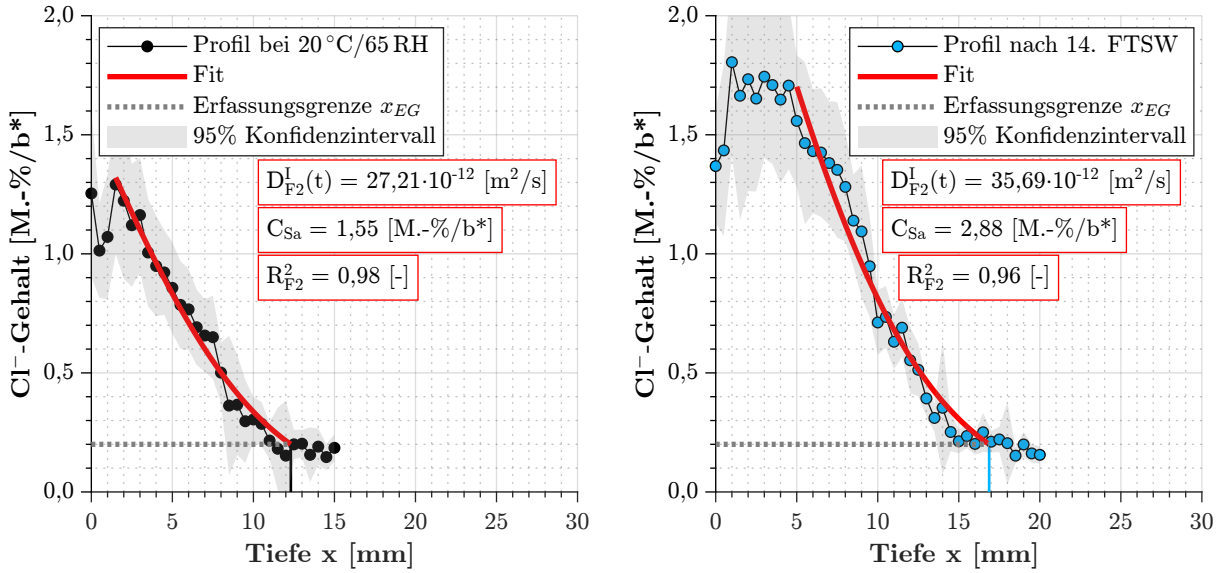
A-13 Fitting nach 14. FTSW bzw. 20 °C/65 RH

Fitting nach 14. FTSW und Einlagerung: Diffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentrationen. 2D-Darstellungen mit LIBS vgl. Anhang A-6.



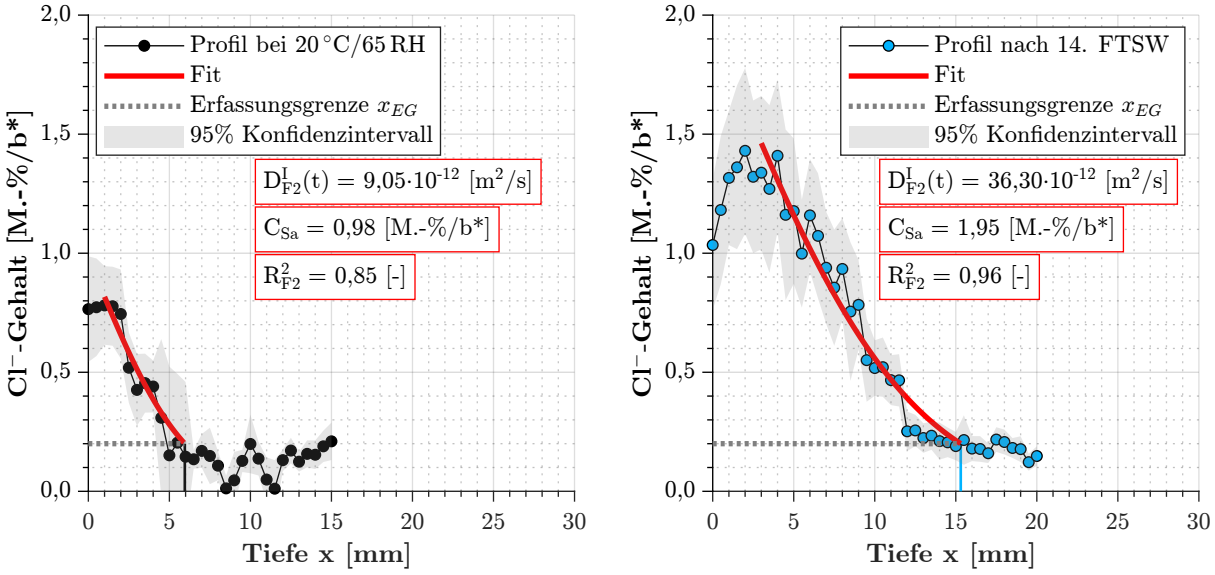
(a) PK1.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK1.1, 14. FTSW (CDF)

Abb. A-13.1: CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK2.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK2.1, 14. FTSW (CDF)

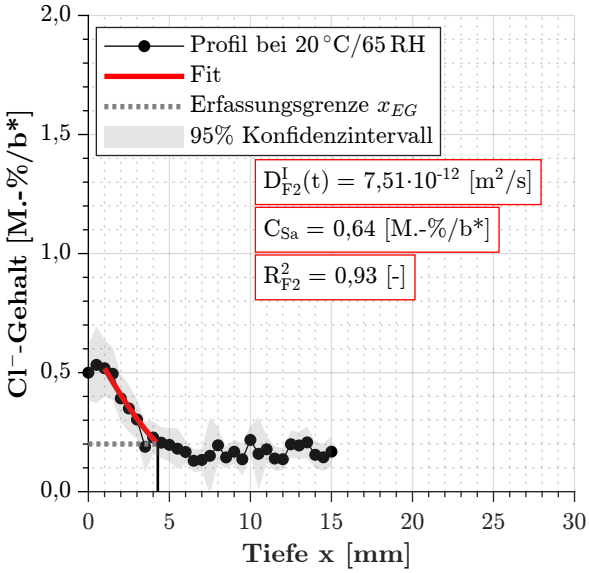
Abb. A-13.2: CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK22.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

(b) PK22.1, 14. FTSW (CDF)

Abb. A-13.3: CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.

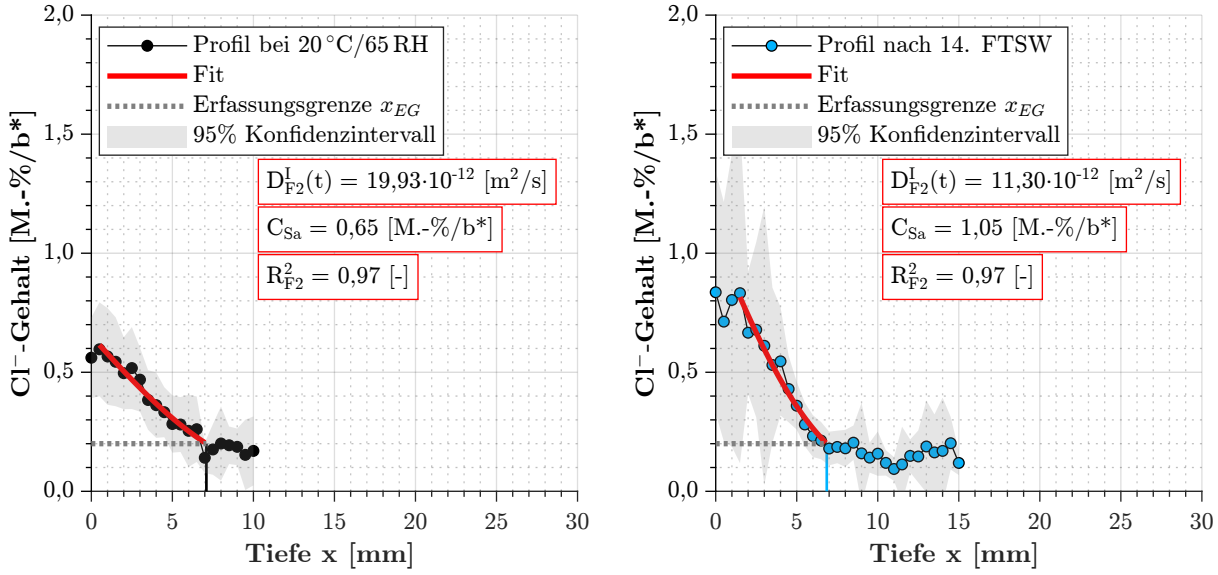


(a) PK23.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

Datenverlust

(b) PK23.1, 14. FTSW (CDF)

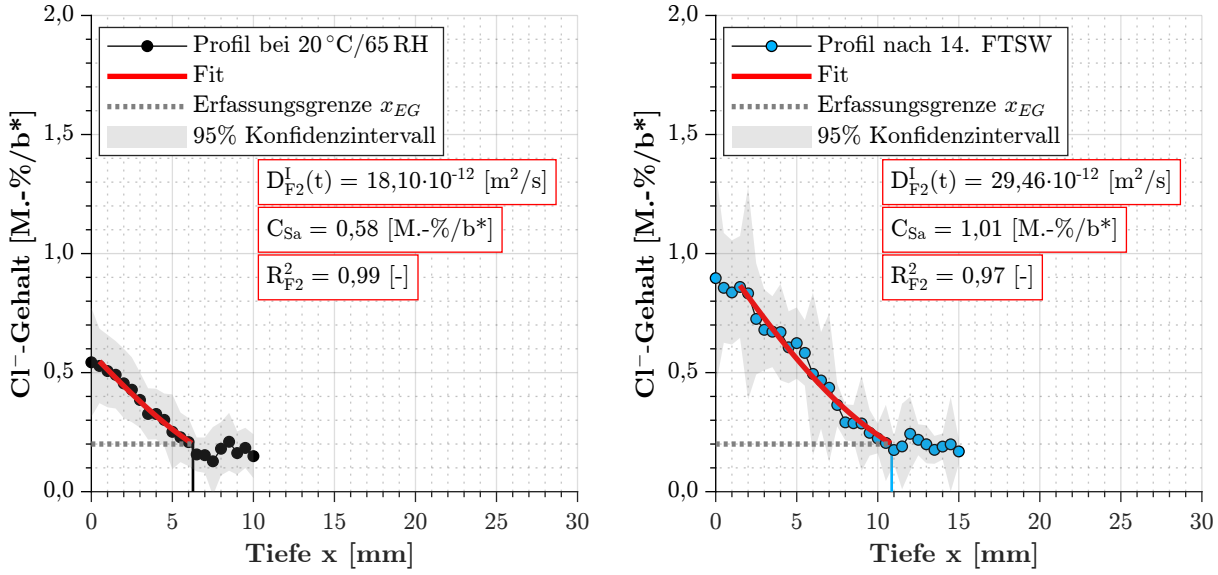
Abb. A-13.4: CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK1.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

(b) PK1.1, 14. FTSW (CDF)

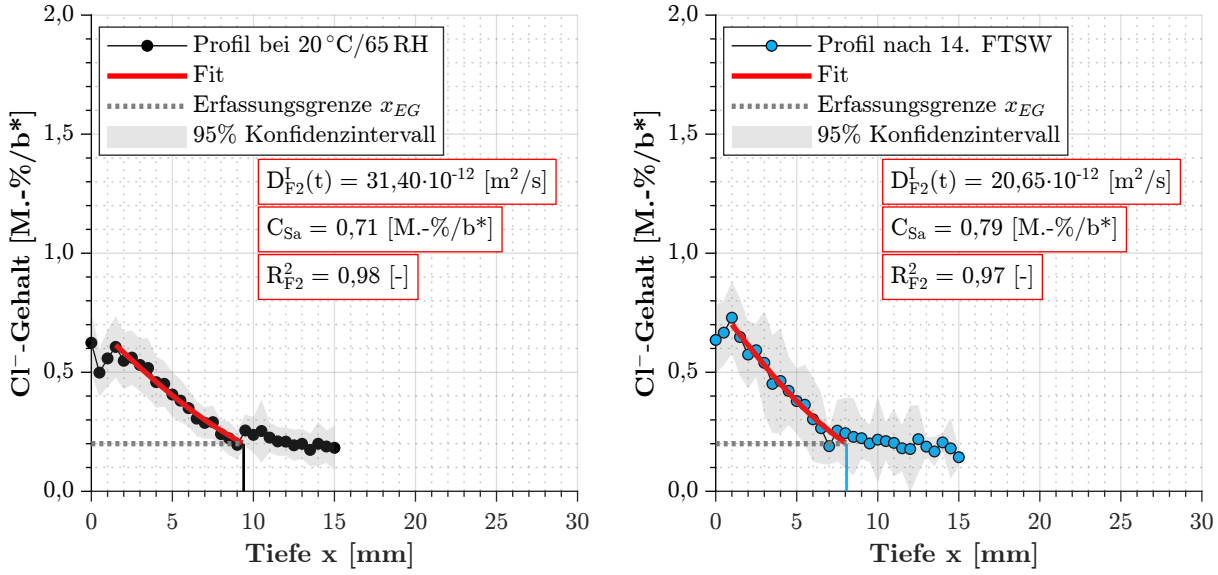
Abb. A-13.5: CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 0,8 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK2.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

(b) PK2.1, 14. FTSW (CDF)

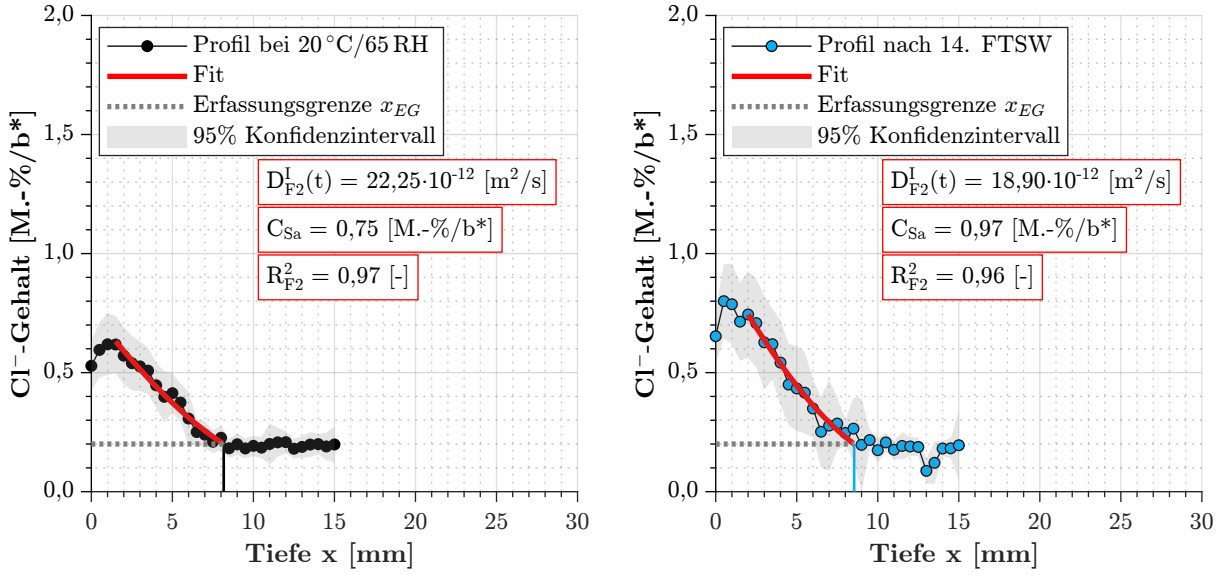
Abb. A-13.6: CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 0,8 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK1.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

(b) PK1.1, 14. FTSW (CDF)

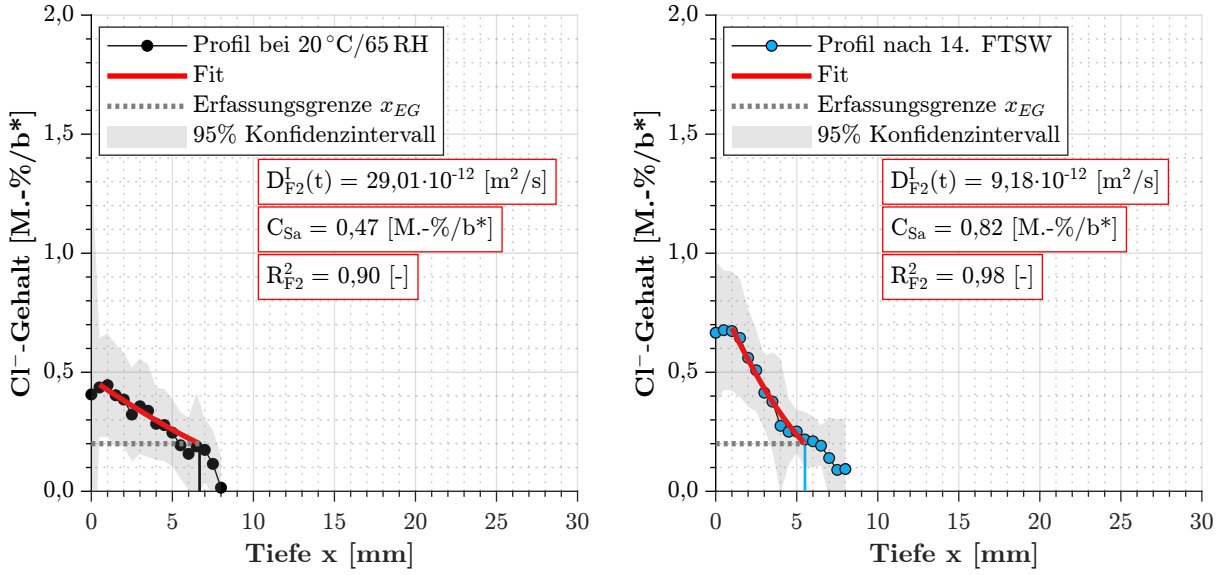
Abb. A-13.7: CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 10,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK2.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

(b) PK2.1, 14. FTSW (CDF)

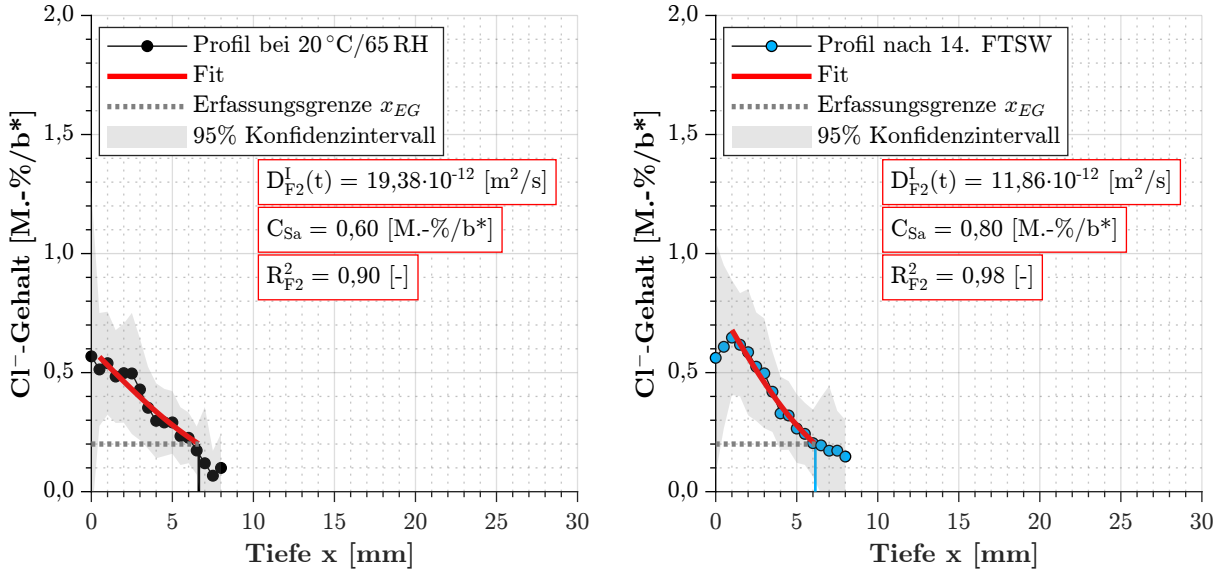
Abb. A-13.8: CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 10,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK1.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

(b) PK1.1, 14. FTSW (CDF)

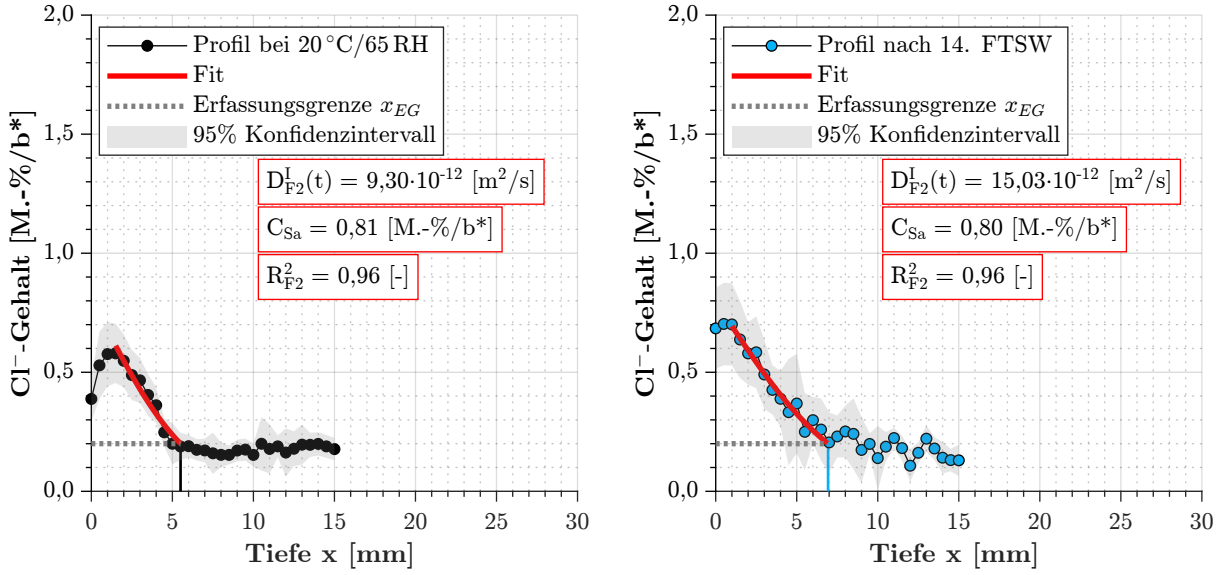
Abb. A-13.9: CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,2 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK2.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

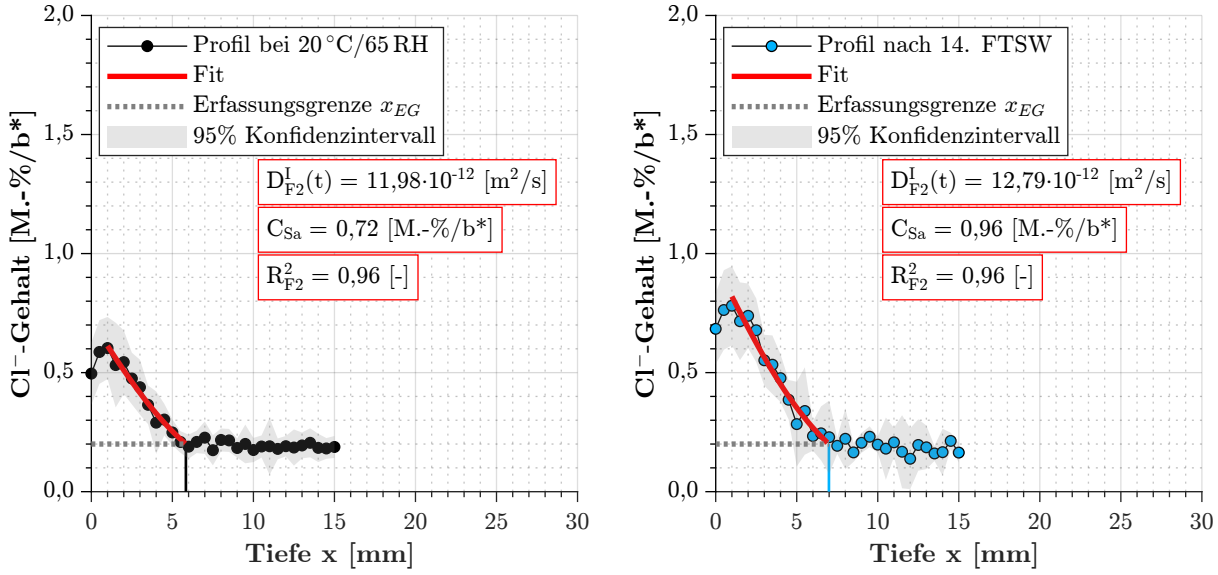
(b) PK2.1, 14. FTSW (CDF)

Abb. A-13.10: CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,2 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



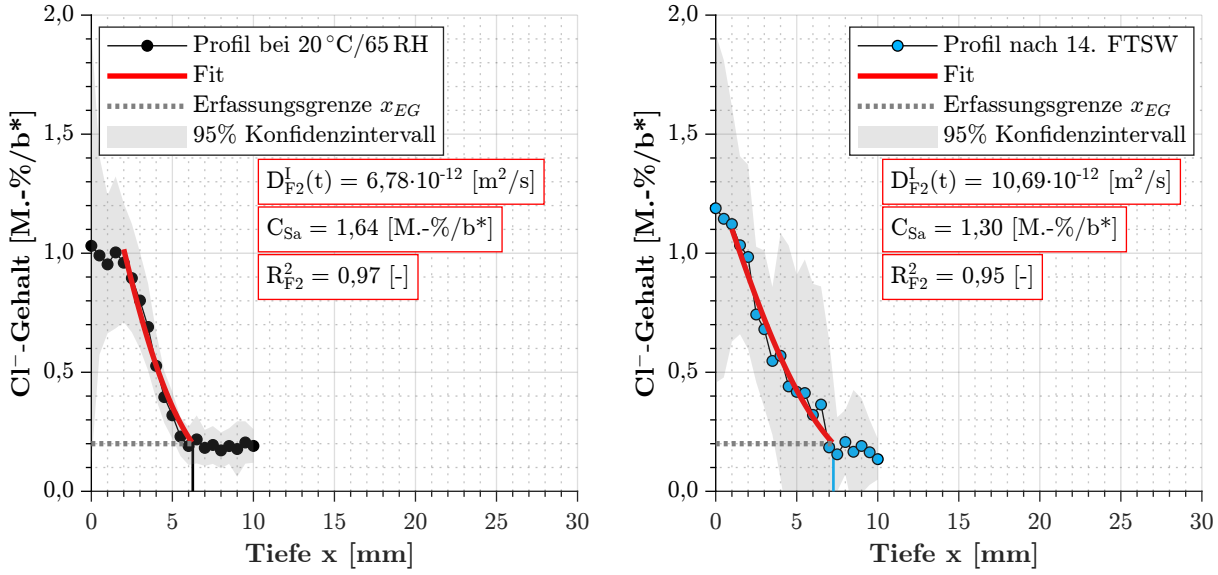
(a) PK13.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK13.1, 14. FTSW (CDF)

Abb. A-13.11: CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



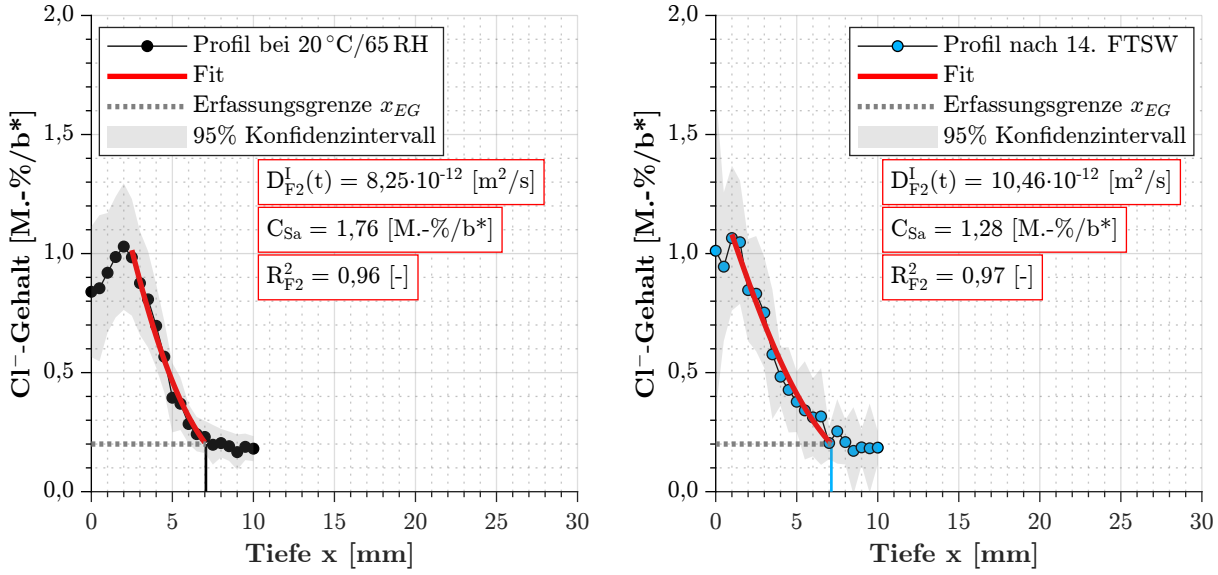
(a) PK14.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK14.1, 14. FTSW (CDF)

Abb. A-13.12: CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



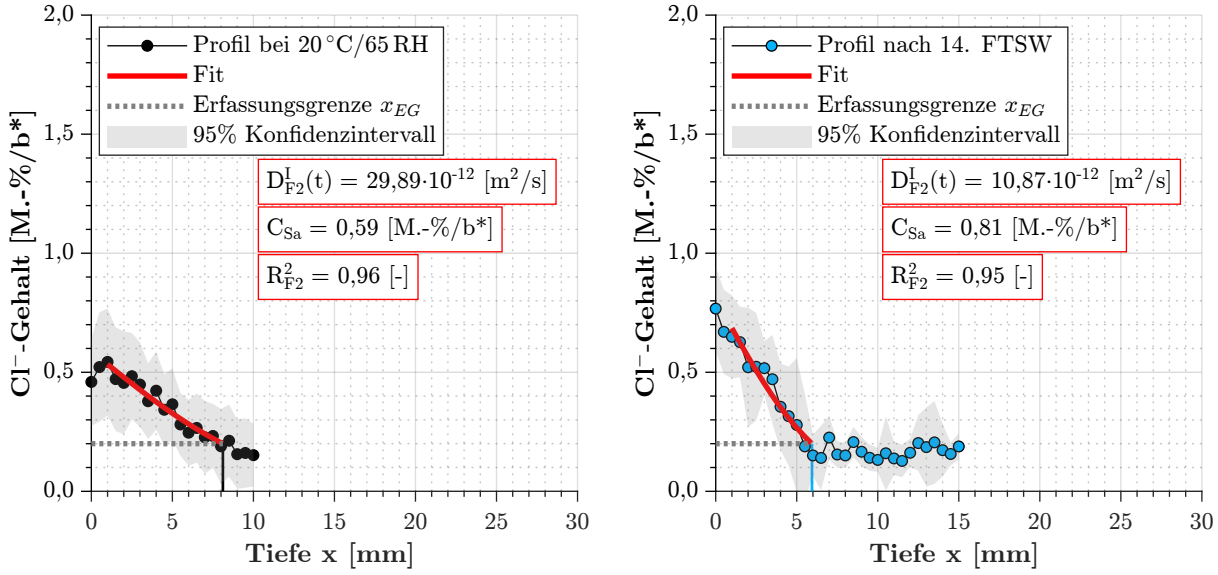
(a) PK7.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK7.1, 14. FTSW (CDF)

Abb. A-13.13: CEM I+SF (k=0), w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK8.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK8.1, 14. FTSW (CDF)

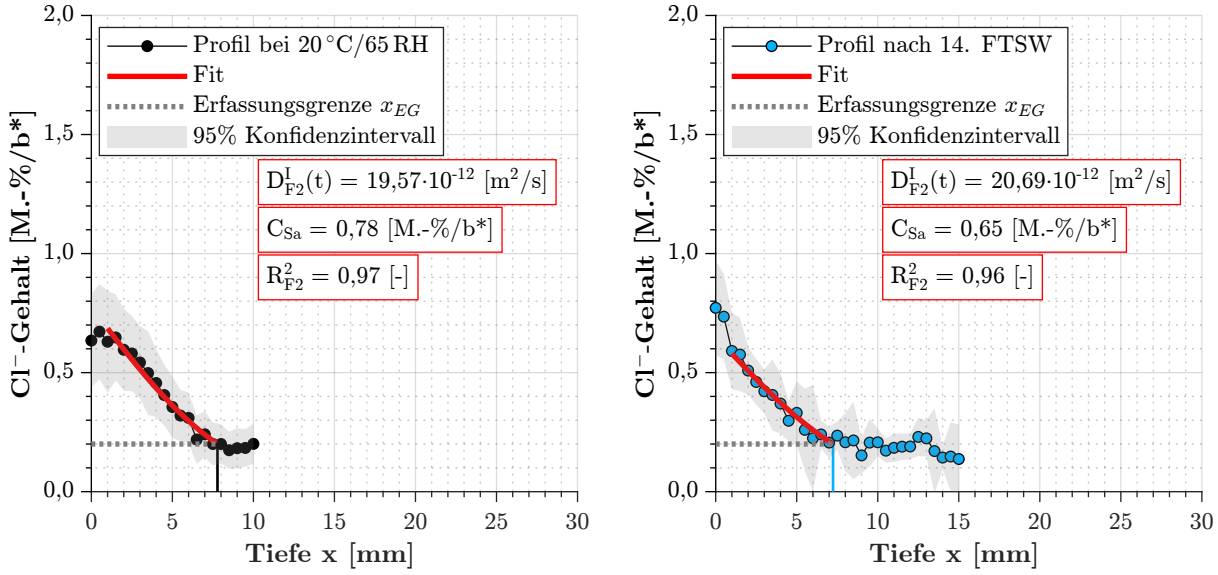
Abb. A-13.14: CEM I+SF (k=0), w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK13.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

(b) PK13.1, 14. FTSW (CDF)

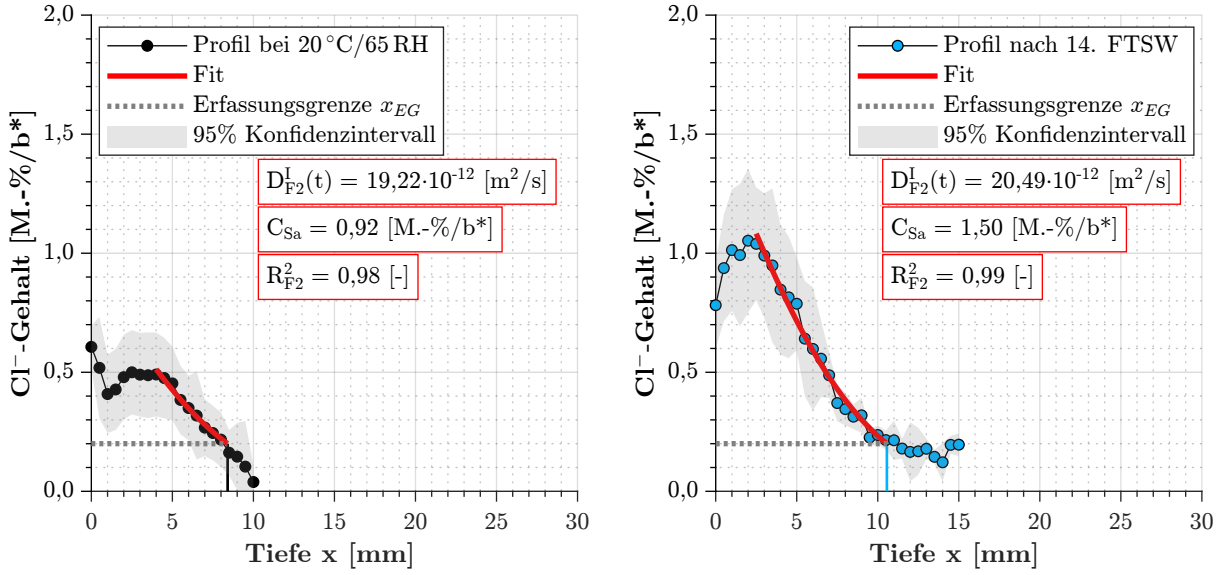
Abb. A-13.15: CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 9,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK14.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

(b) PK14.1, 14. FTSW (CDF)

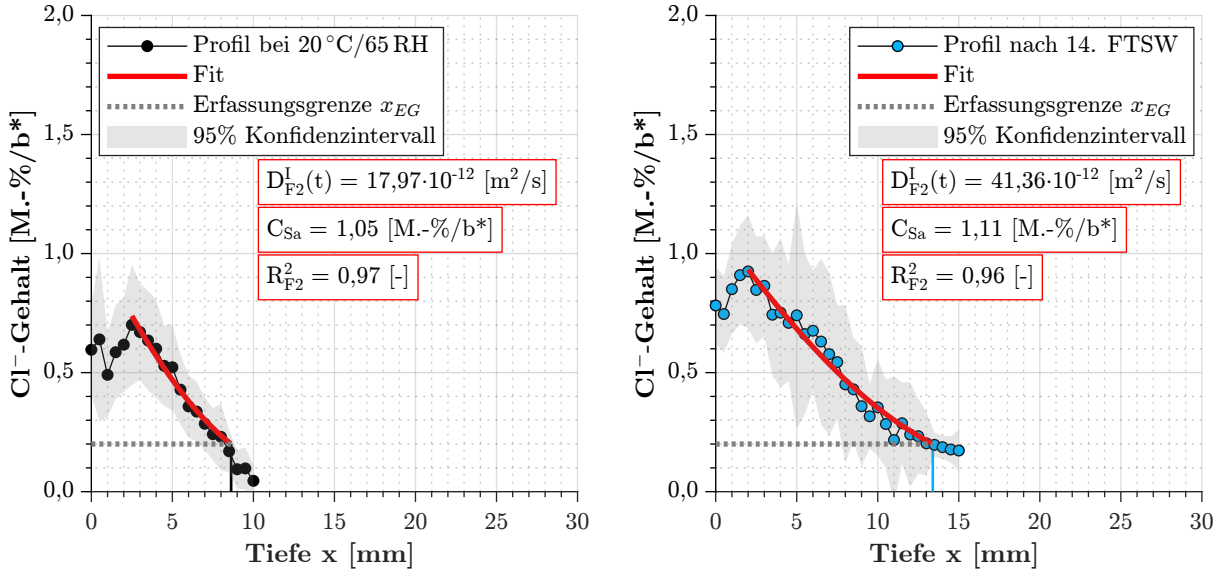
Abb. A-13.16: CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 9,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK1.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

(b) PK1.1, 14. FTSW (CDF)

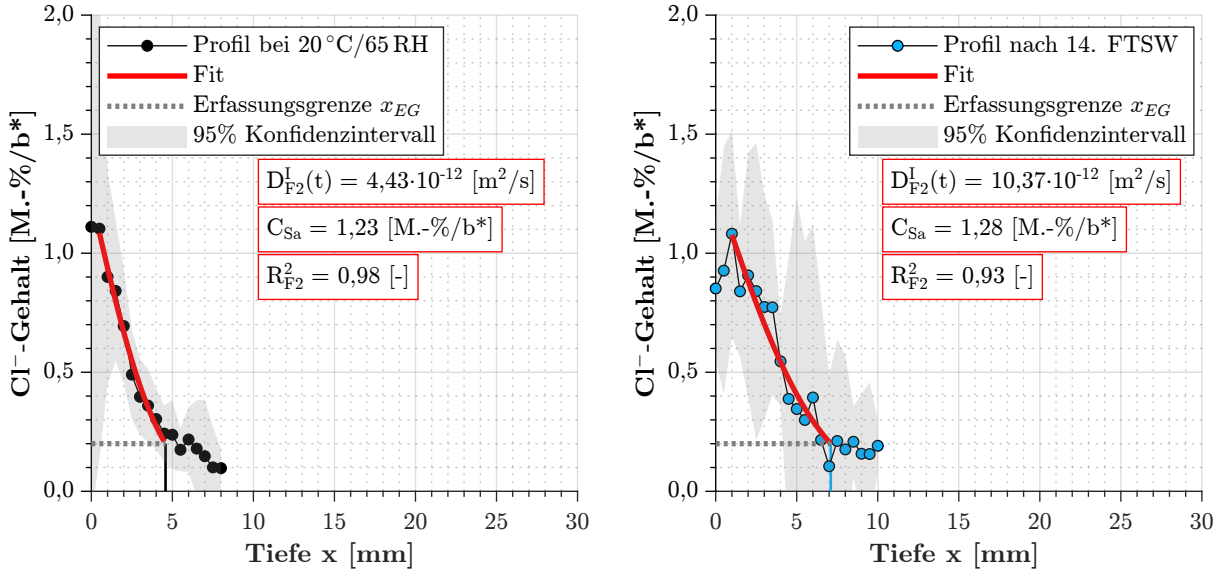
Abb. A-13.17: CEM I+SFA, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK2.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

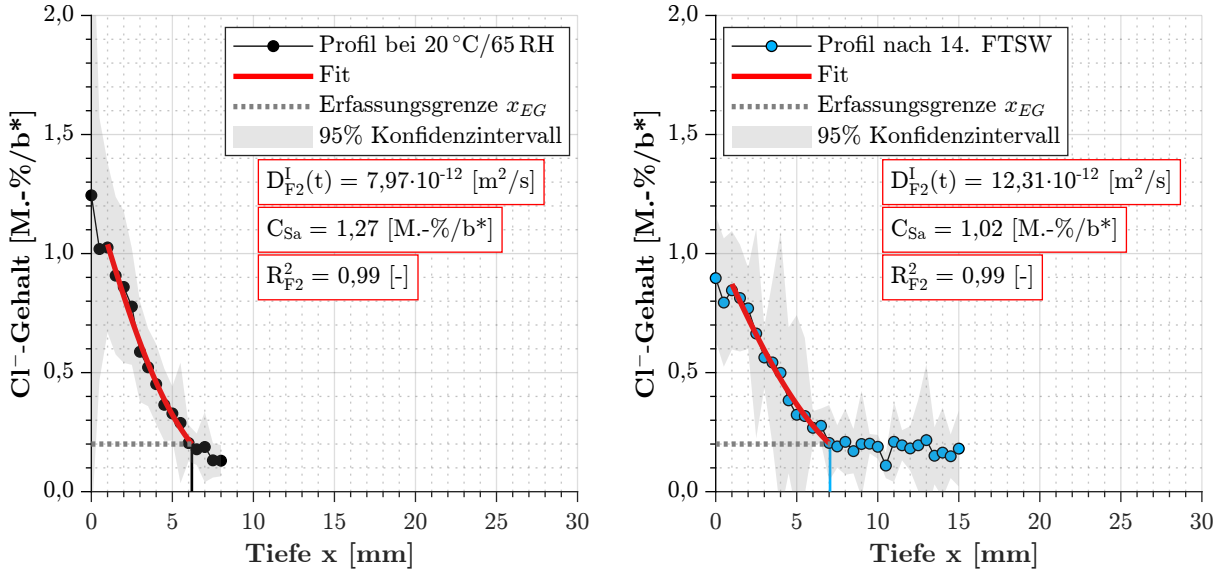
(b) PK2.1, 14. FTSW (CDF)

Abb. A-13.18: CEM I+SFA, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK7.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK7.1, 14. FTSW (CDF)

Abb. A-13.19: CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.

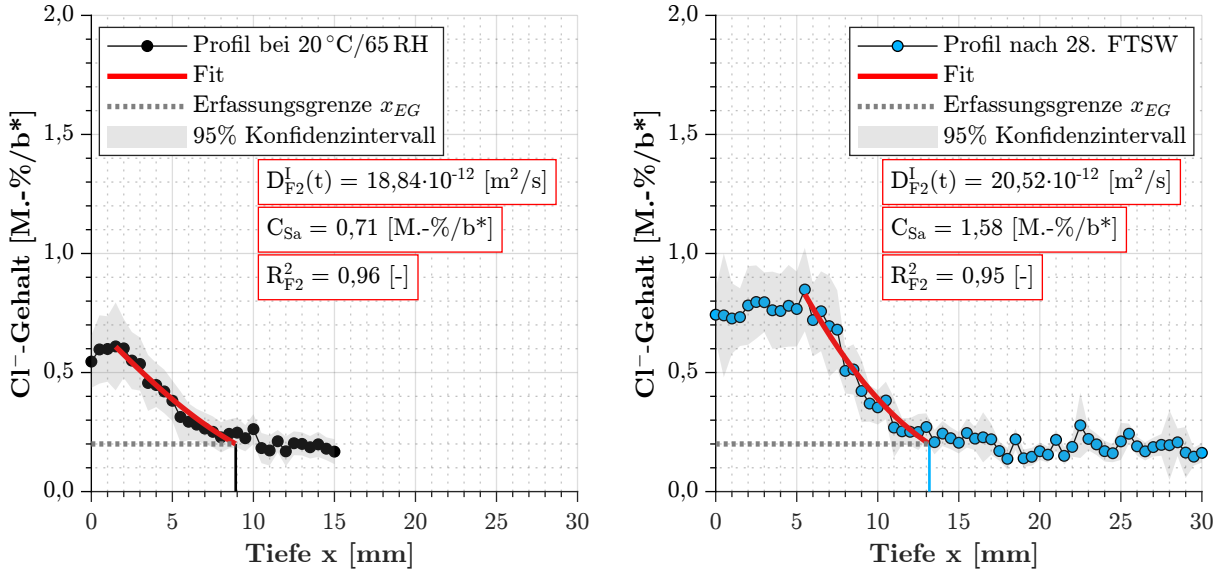


(a) PK8.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK8.1, 14. FTSW (CDF)

Abb. A-13.20: CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.

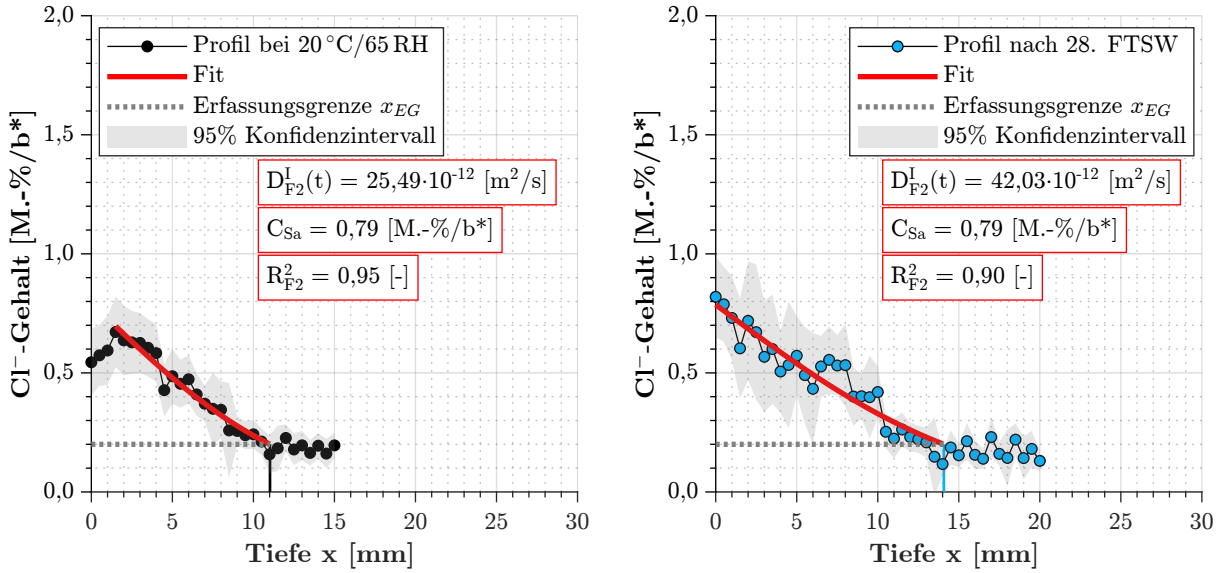
A-14 Fitting nach 28. FTSW bzw. 20 °C/65 RH

Fitting nach 28. FTSW und Einlagerung: Diffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentrationen. 2D-Darstellungen mit LIBS vgl. Anhang A-7.



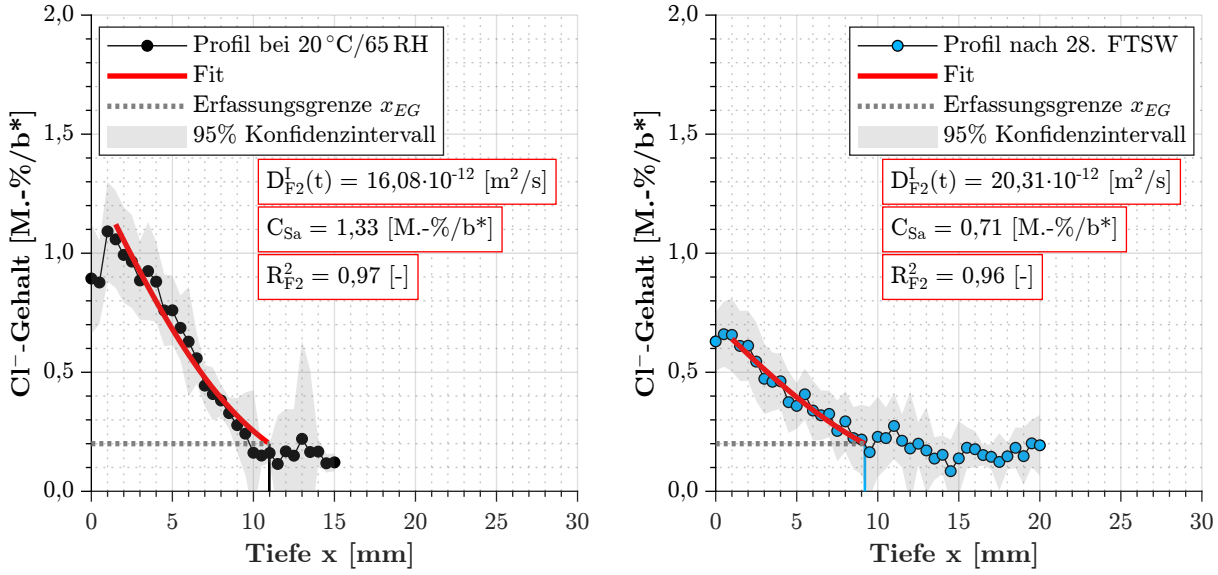
(a) PK3.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK3.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.1: CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK4.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK4.1, 28. FTSW (CDF)

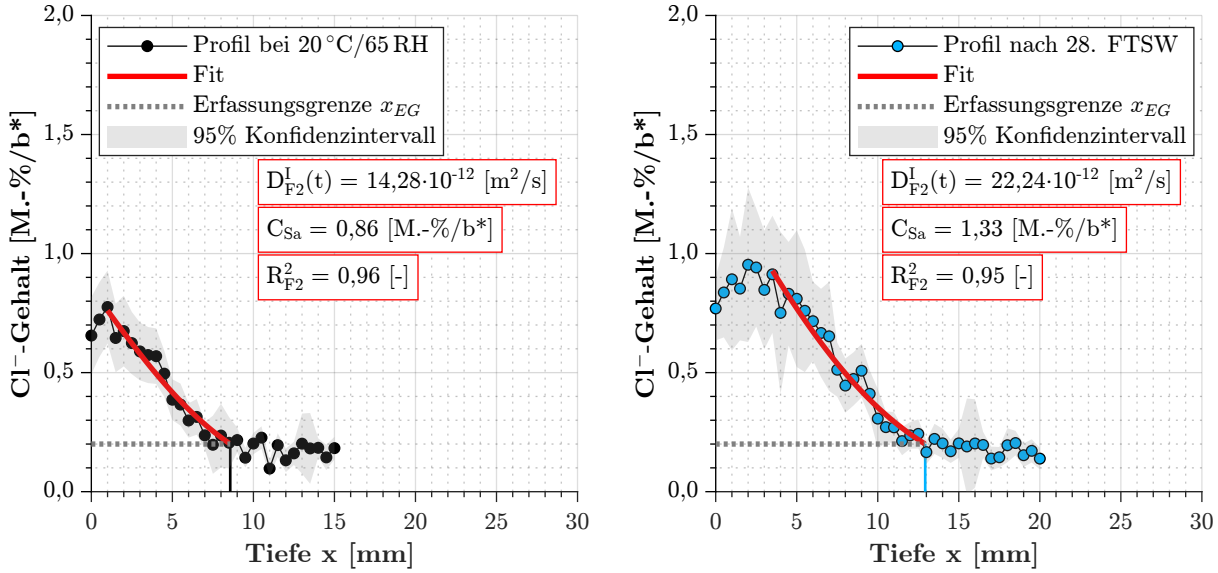
Abb. A-14.2: CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK5.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

(b) PK5.1, 28. FTSW (CDF)

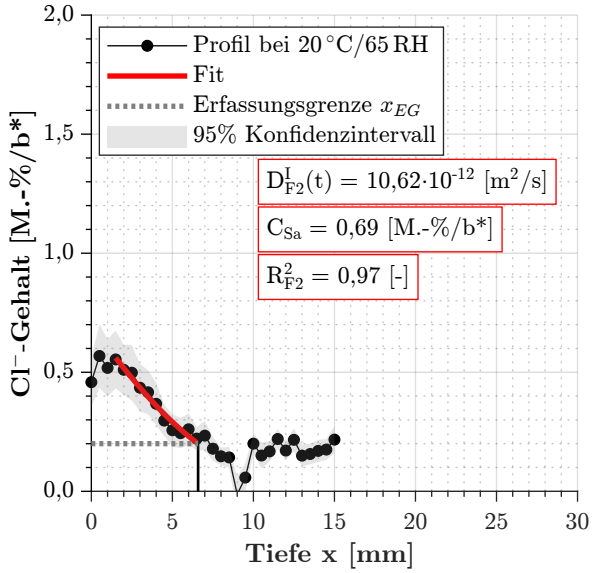
Abb. A-14.3: CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



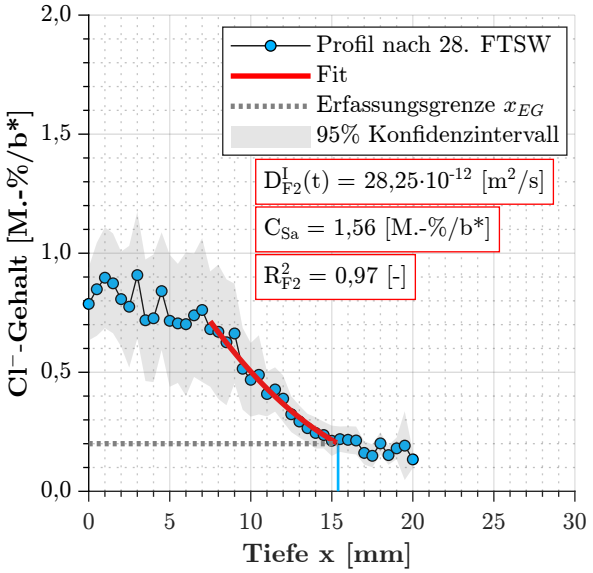
(a) PK24.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

(b) PK24.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.4: CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK25.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

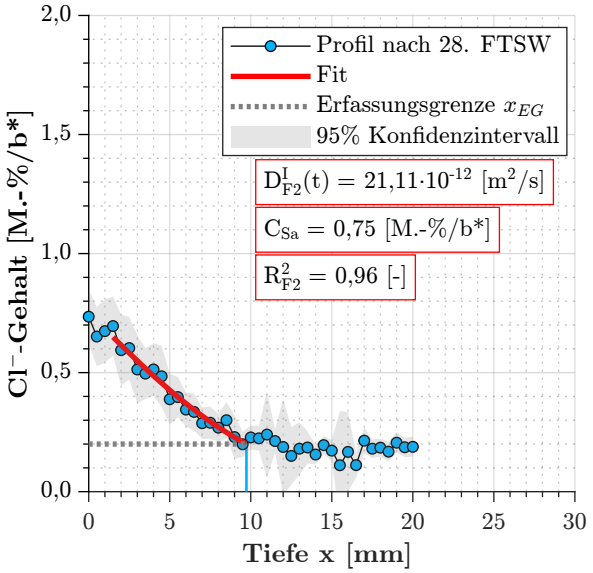


(b) PK25.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.5: CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.

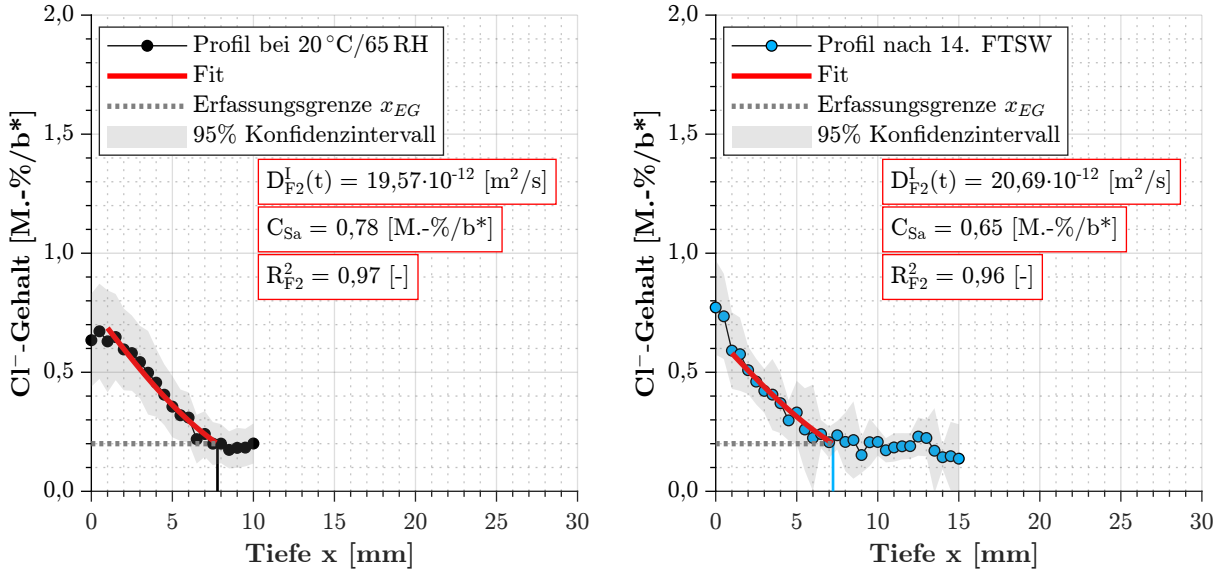
Nicht zum Fitten geeignet.

(a) PK26.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH



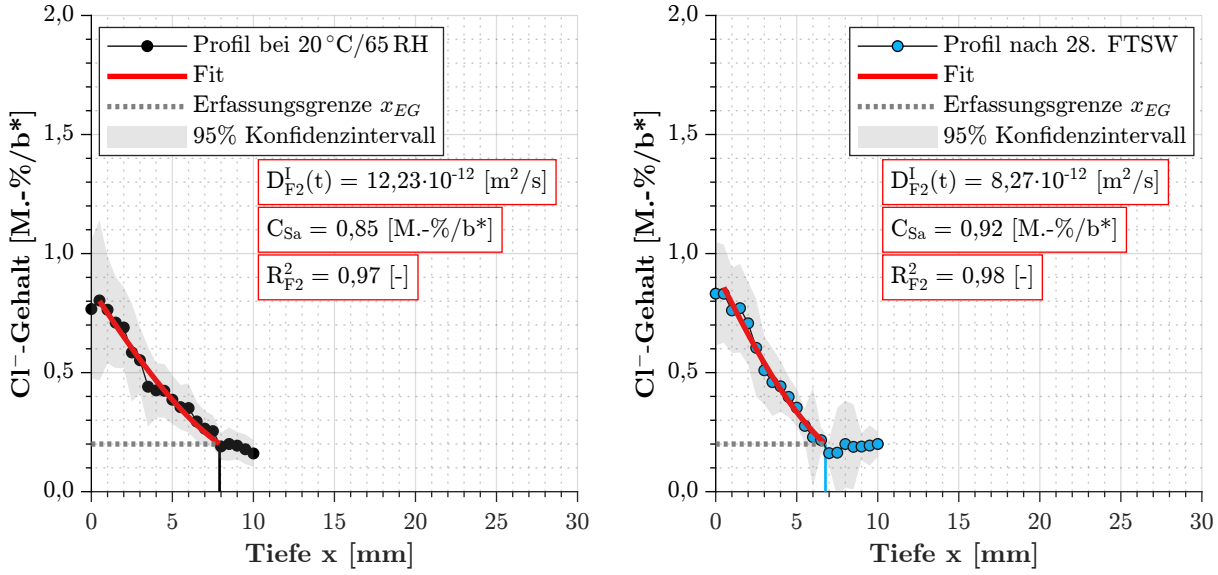
(b) PK26.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.6: CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



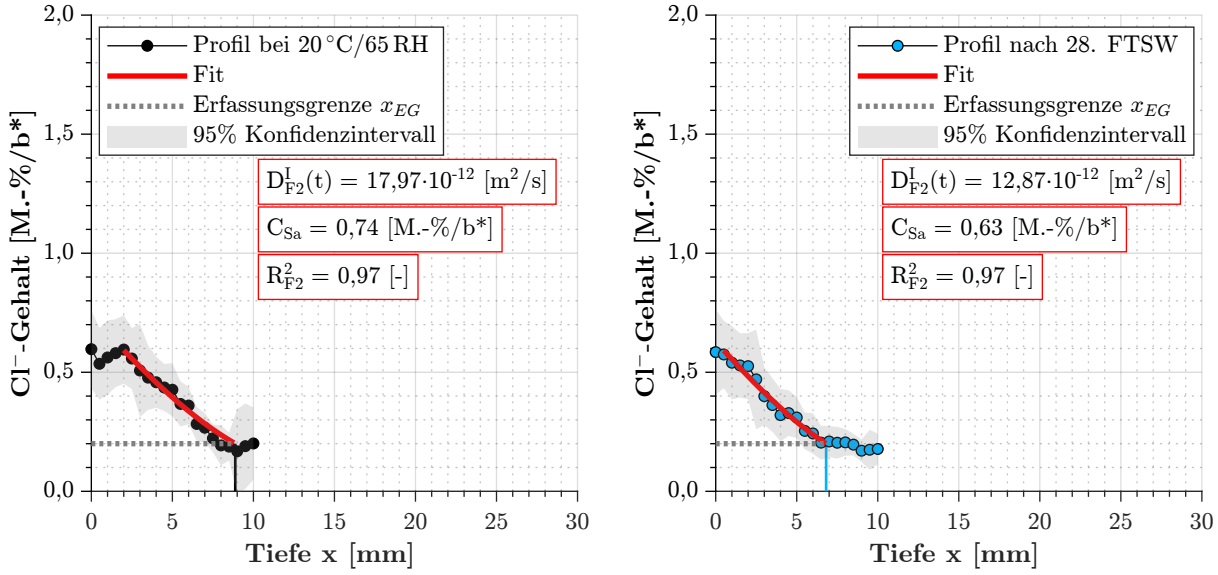
(a) PK14.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK14.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.7: CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 0,8 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



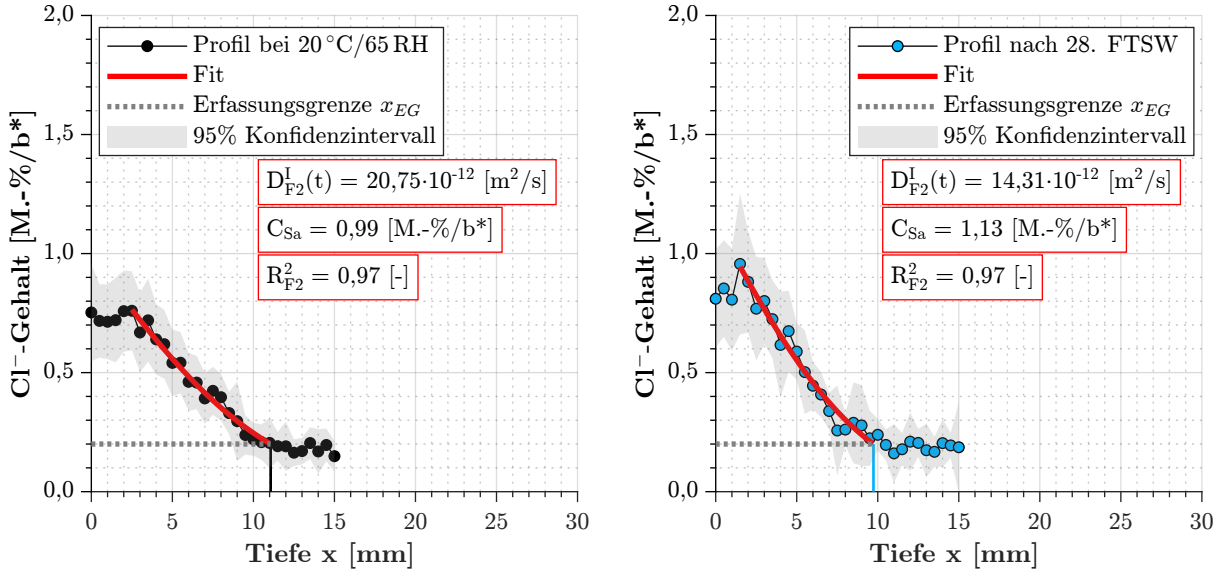
(a) PK15.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK15.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.8: CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 0,8 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



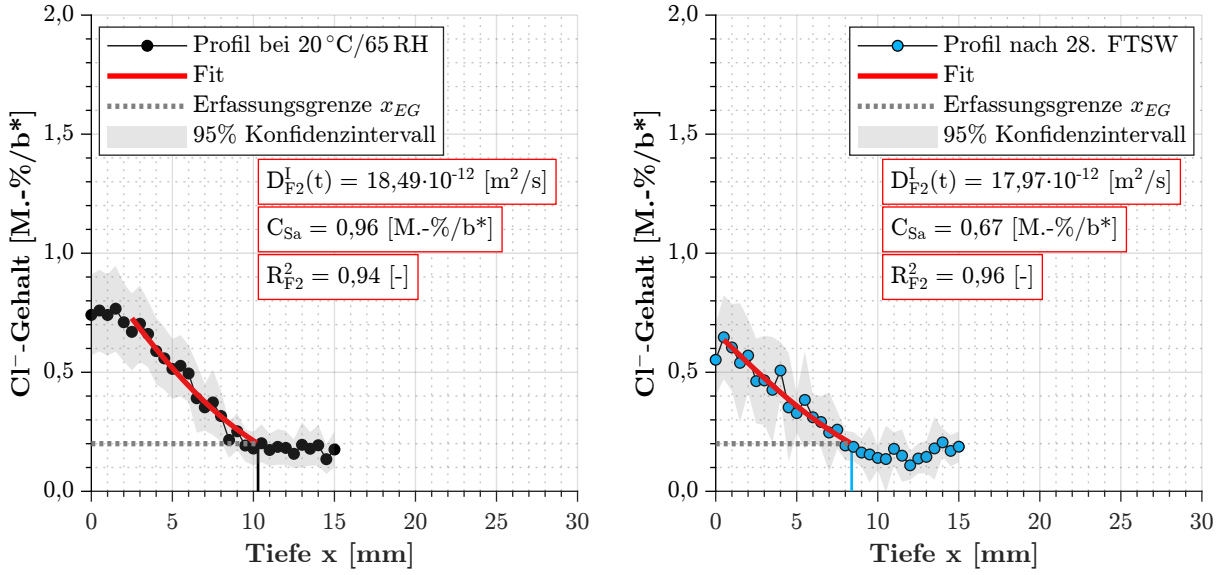
(a) PK16.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK16.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.9: CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 0,8 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



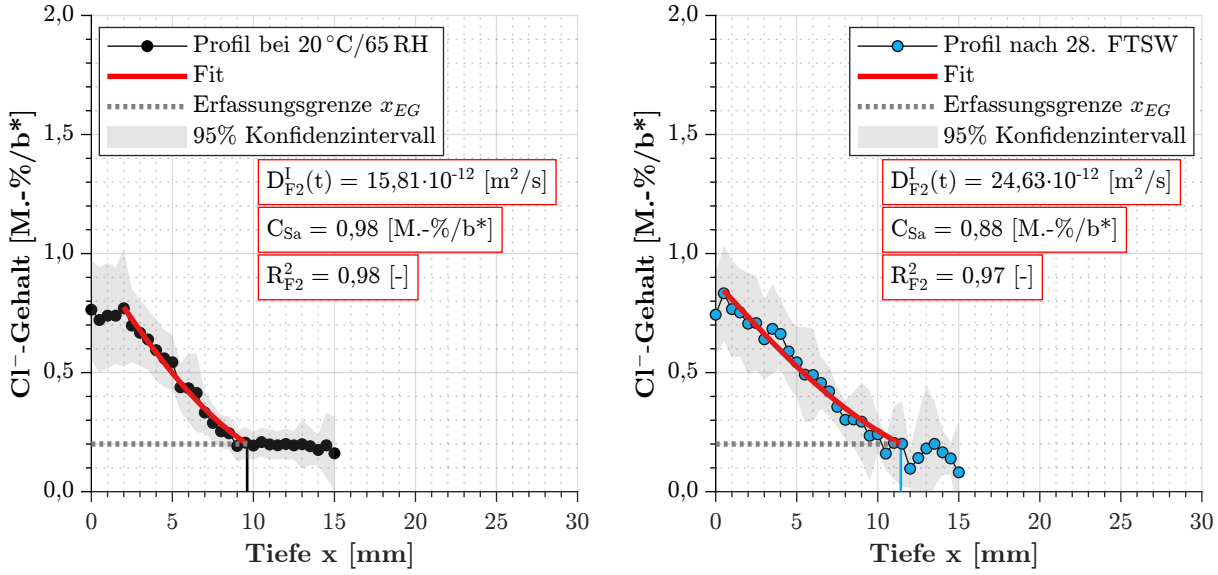
(a) PK3.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK3.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.10: CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 10,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



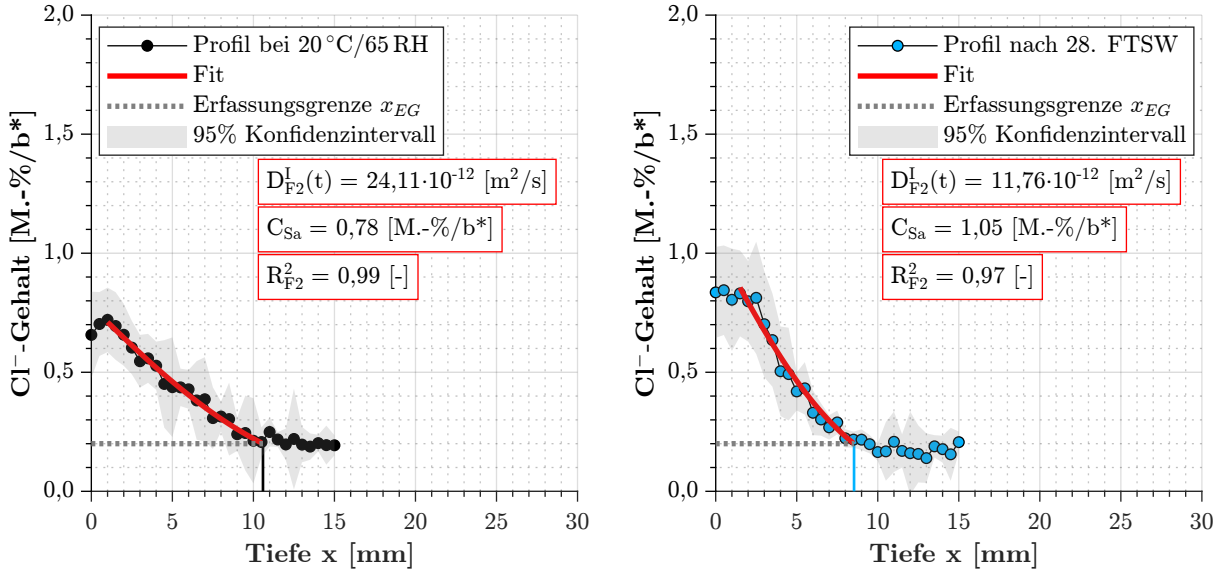
(a) PK4.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK4.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.11: CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 10,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK5.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK5.1, 28. FTSW (CDF)

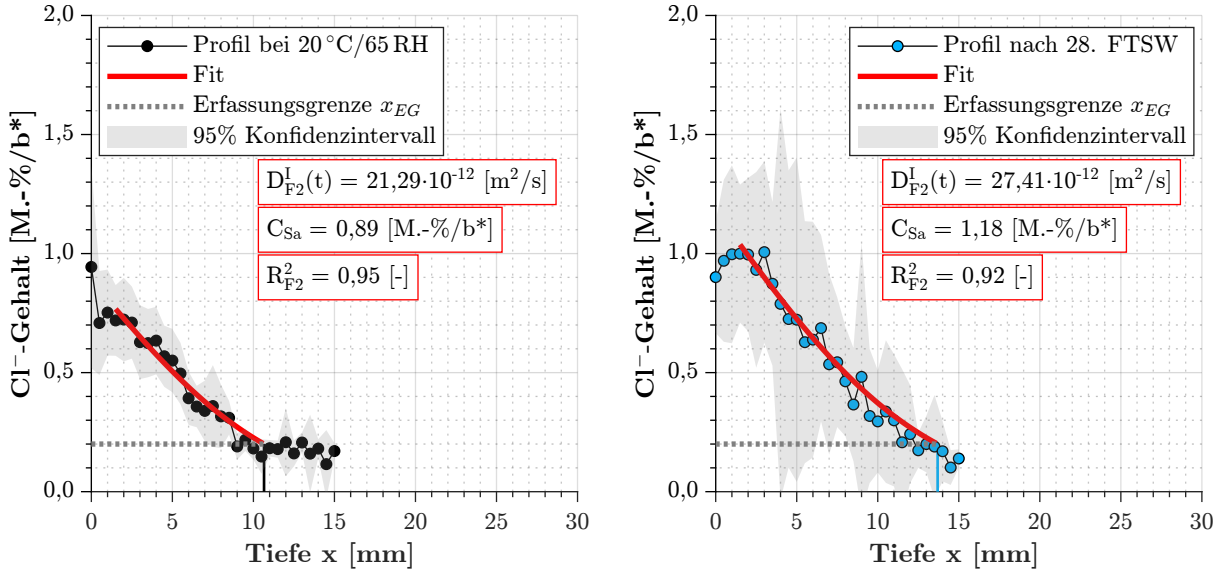
Abb. A-14.12: CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 10,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK3.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

(b) PK3.1, 28. FTSW (CDF)

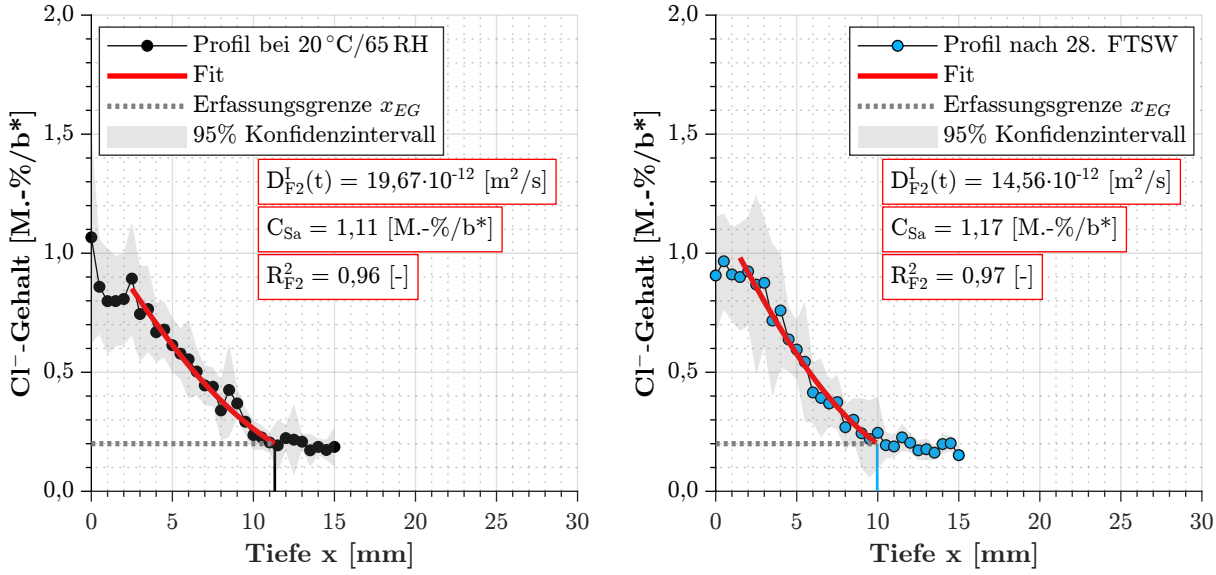
Abb. A-14.13: CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,2 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK4.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

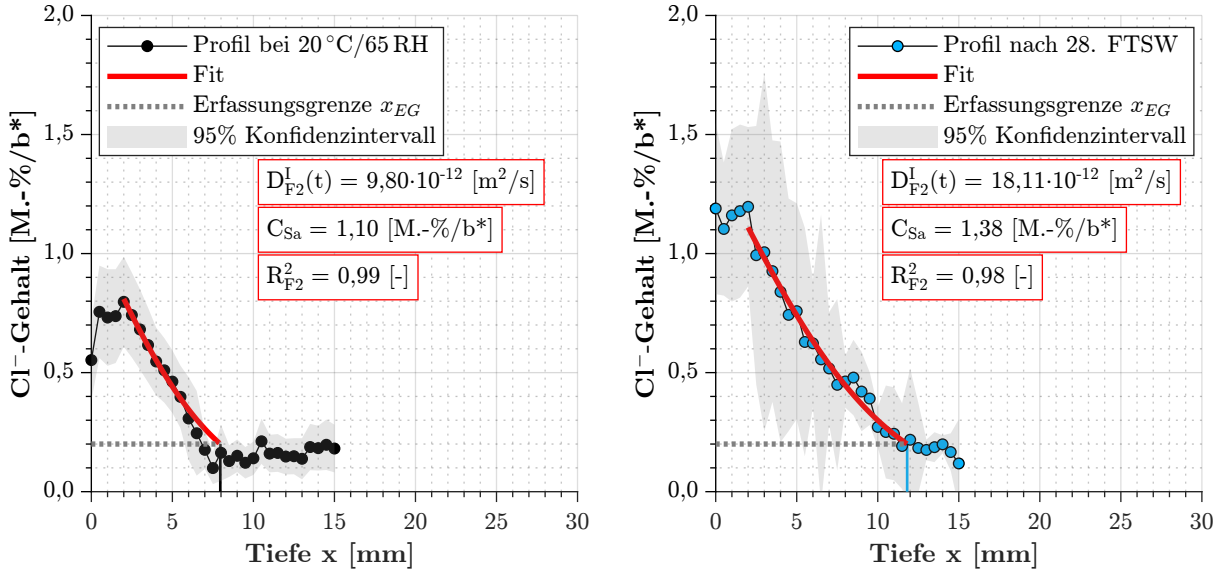
(b) PK4.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.14: CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,2 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



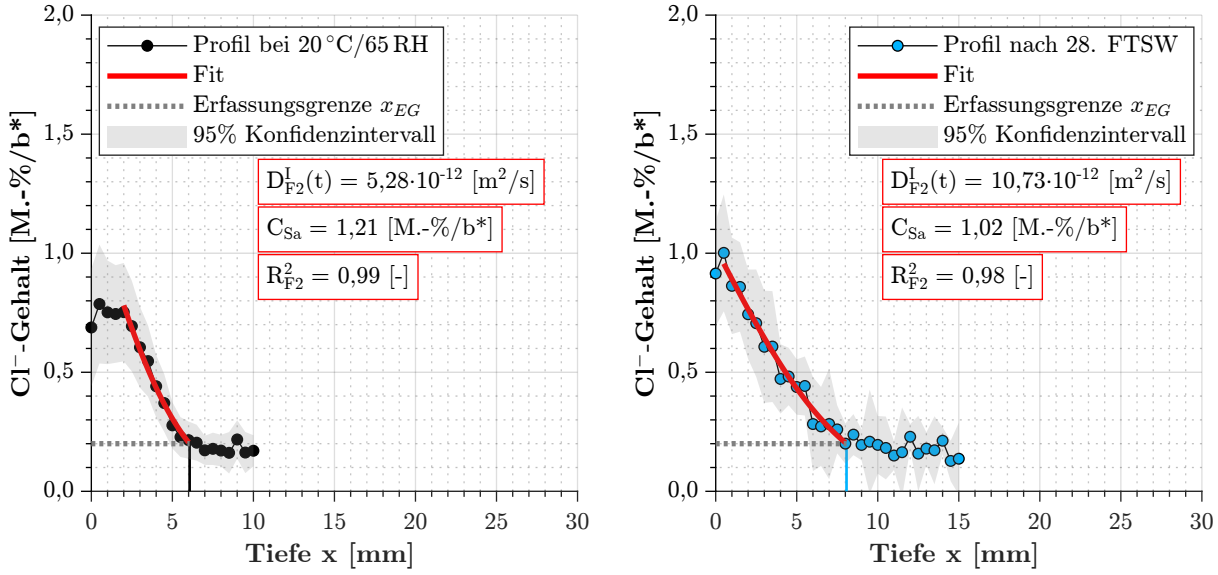
(a) PK5.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK5.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.15: CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,2 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



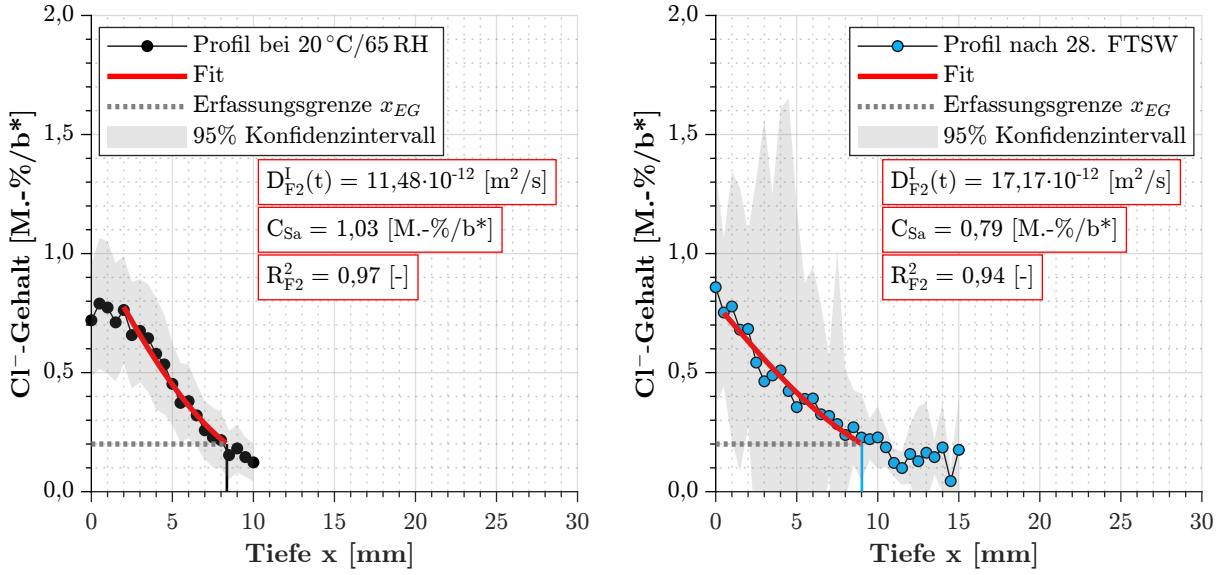
(a) PK15.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK15.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.16: CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK16.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK16.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.17: CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.

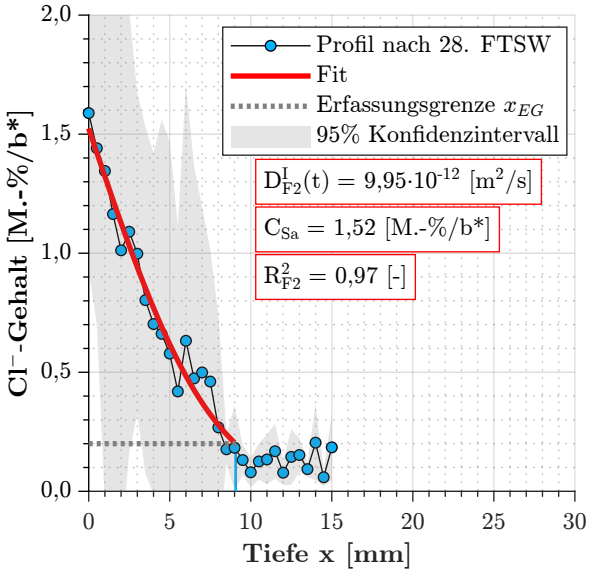


(a) PK17.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK17.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.18: CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.

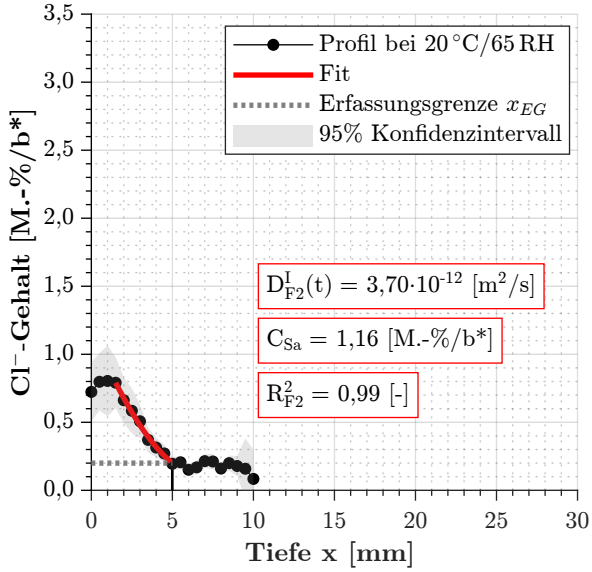
Nicht zum Fitten geeignet.

(a) PK9.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

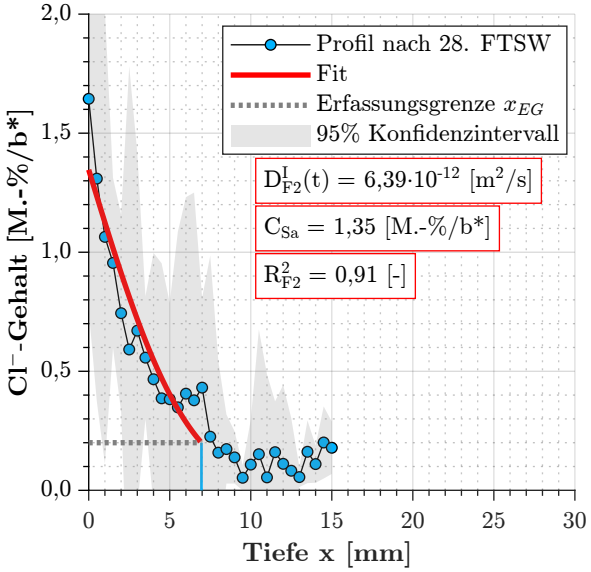


(b) PK9.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.19: CEM I+SF (k=0), w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.

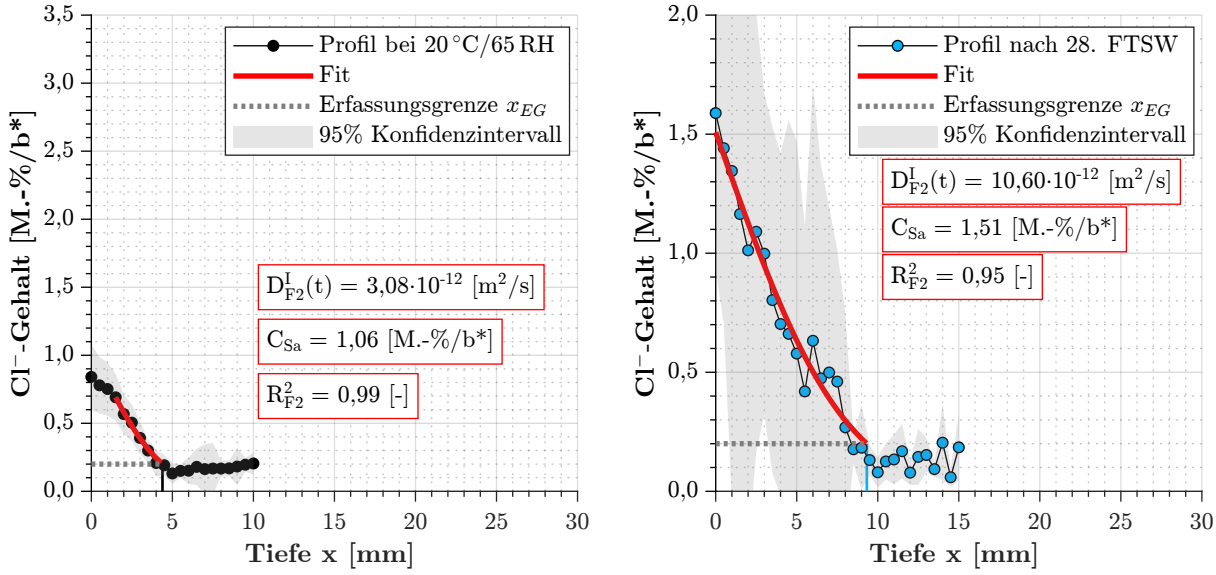


(a) PK10.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH



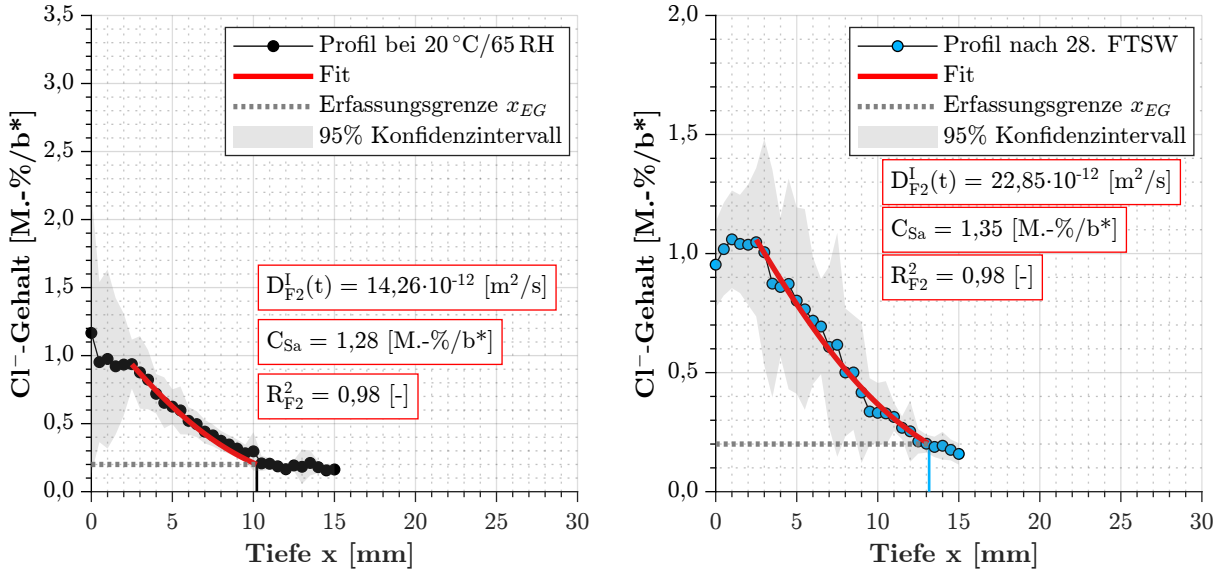
(b) PK10.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.20: CEM I+SF (k=0), w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



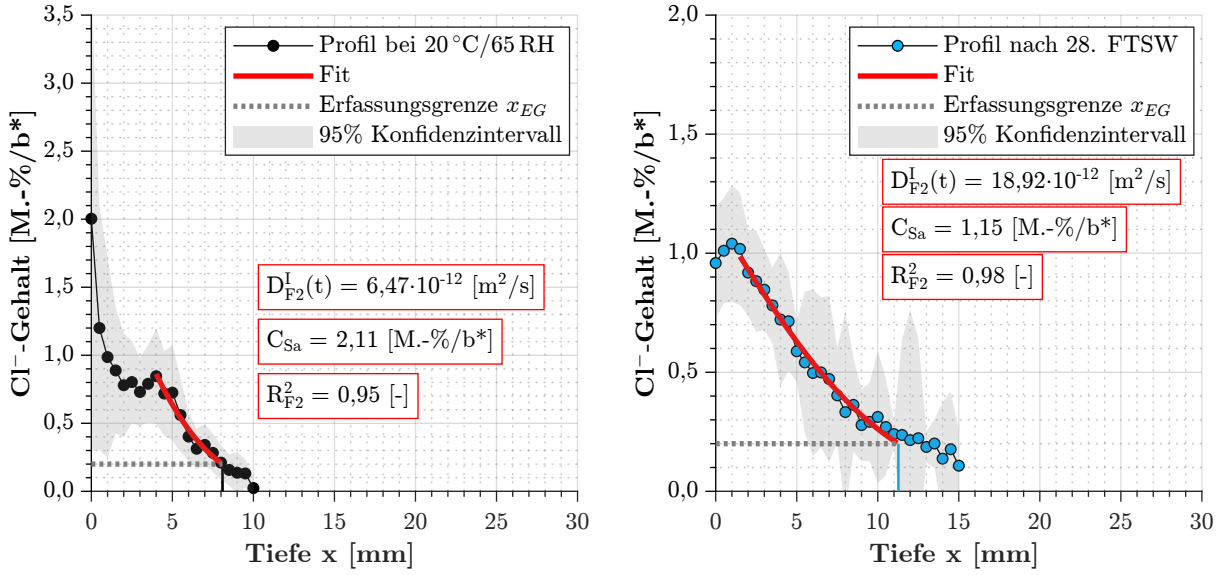
(a) PK11.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK11.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.21: CEM I+SF (k=0), w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



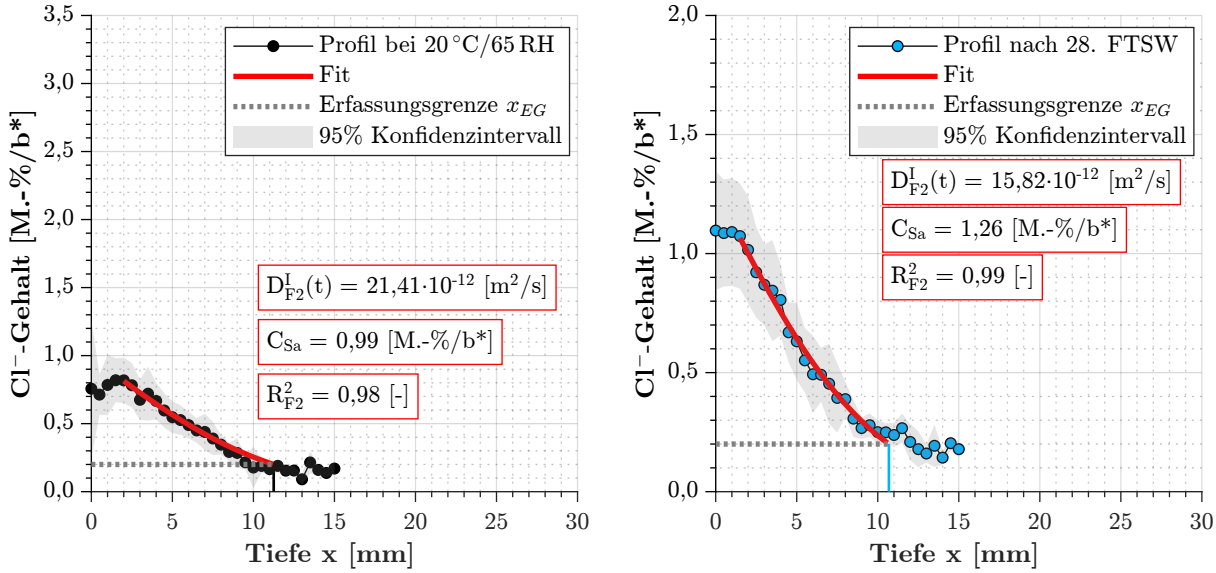
(a) PK3.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK3.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.22: CEM I+SFA, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



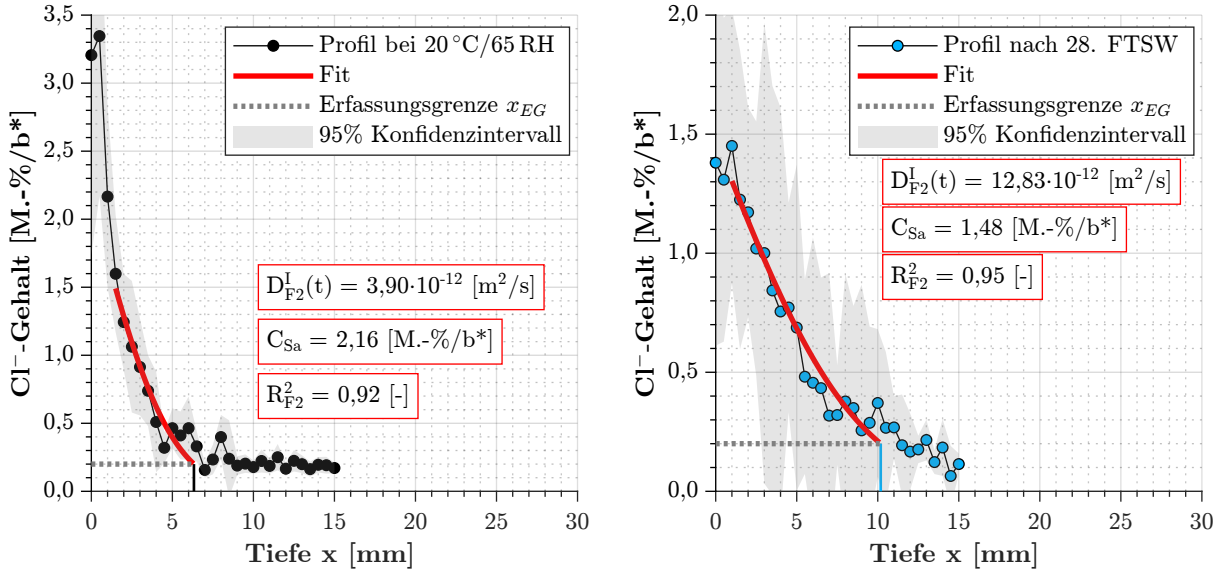
(a) PK4.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK4.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.23: CEM I+SFA, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK5.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** PK5.1, 28. FTSW (CDF)

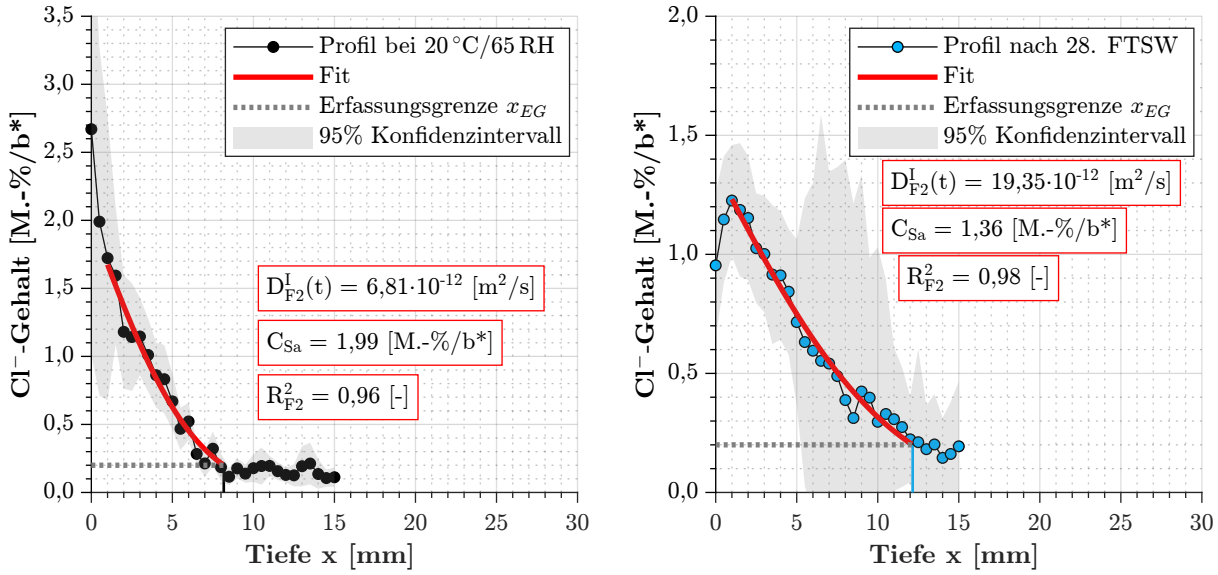
Abb. A-14.24: CEM I+SFA, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK9.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

(b) PK9.1, 28. FTSW (CDF)

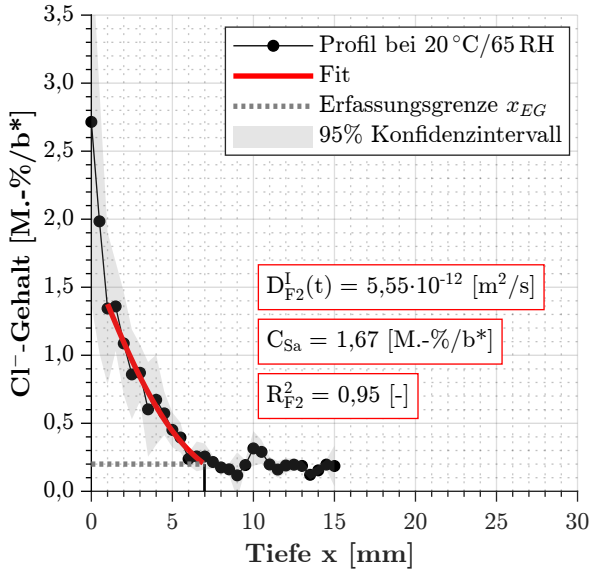
Abb. A-14.25: CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. **Aufgrund sprunghaften Wechsels der Porosität innerhalb der Betonrandzone ist das Diffusionsmodell zu hinterfragen, vgl. Ansatz in Abbildungen A-14.27 und A-14.28**



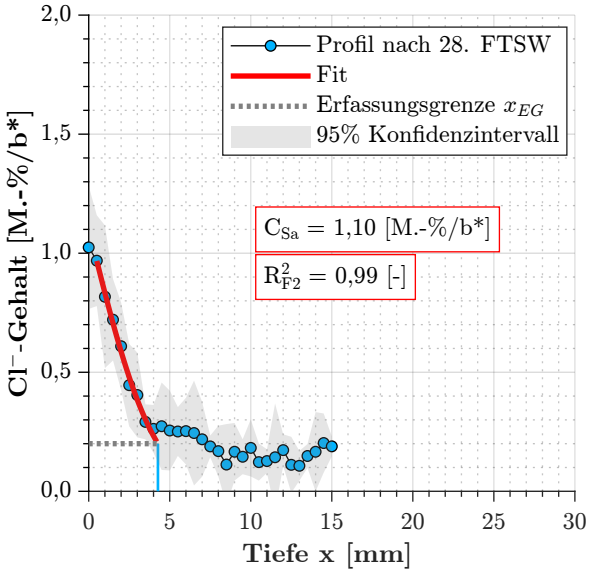
(a) PK10.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

(b) PK10.1, 28. FTSW (CDF)

Abb. A-14.26: CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. **Aufgrund sprunghaften Wechsels der Porosität innerhalb der Betonrandzone ist das Diffusionsmodell zu hinterfragen, vgl. Ansatz in Abbildungen A-14.27 und A-14.28**

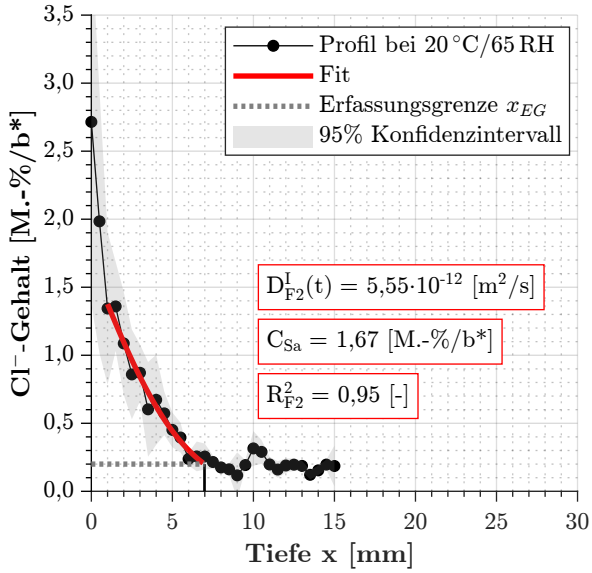


(a) PK11.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH

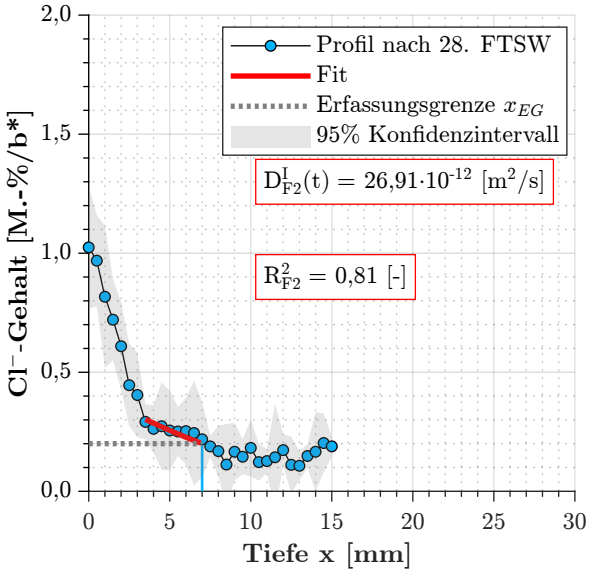


(b) PK11.1, 28. FTSW (CDF), karbonatisierter Bereich, **Ansatz durch Aufteilung in unkarbonatisierten Bereich in der Betonrandzone und unkarbonatisierten Bereich etwas tiefer im Inneren**

Abb. A-14.27: CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^{I}_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$-Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7 Tage Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) PK11.2, Einlagerung bei 20 °C/65 RH



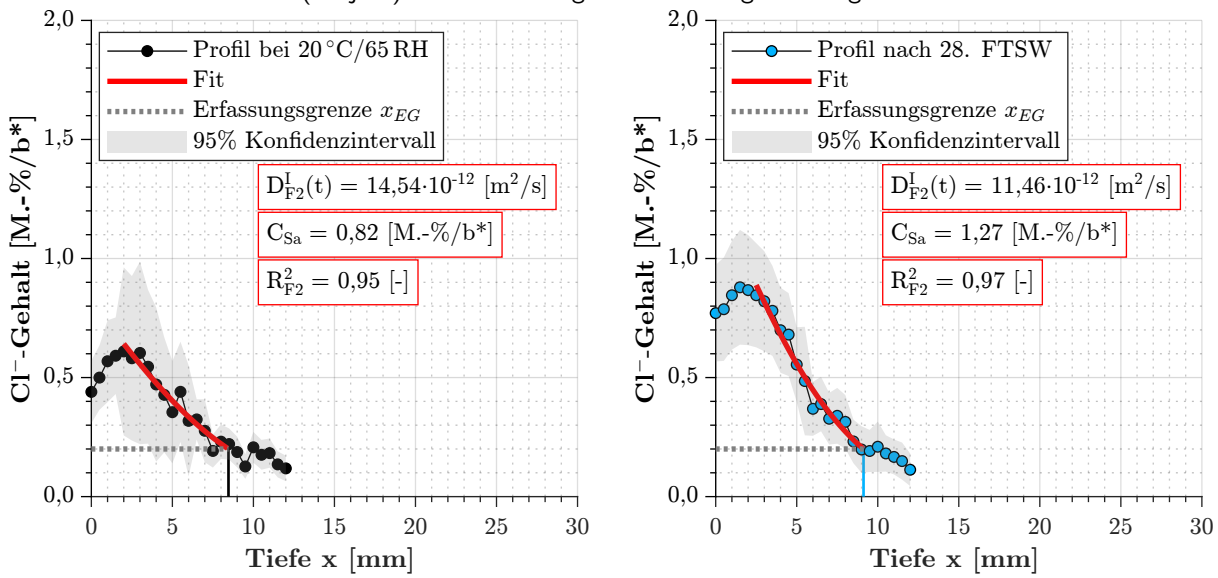
(b) PK11.1, 28. FTSW (CDF), unkarbonatisierter Bereich, **Ansatz durch Aufteilung in unkarbonatisierten Bereich in der Betonrandzone und unkarbonatisierten Bereich etwas tiefer im Inneren**

Abb. A-14.28: CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.

A-15 Fitting nach 28. FTSW bzw. 20 °C/65 RH (Projekt)

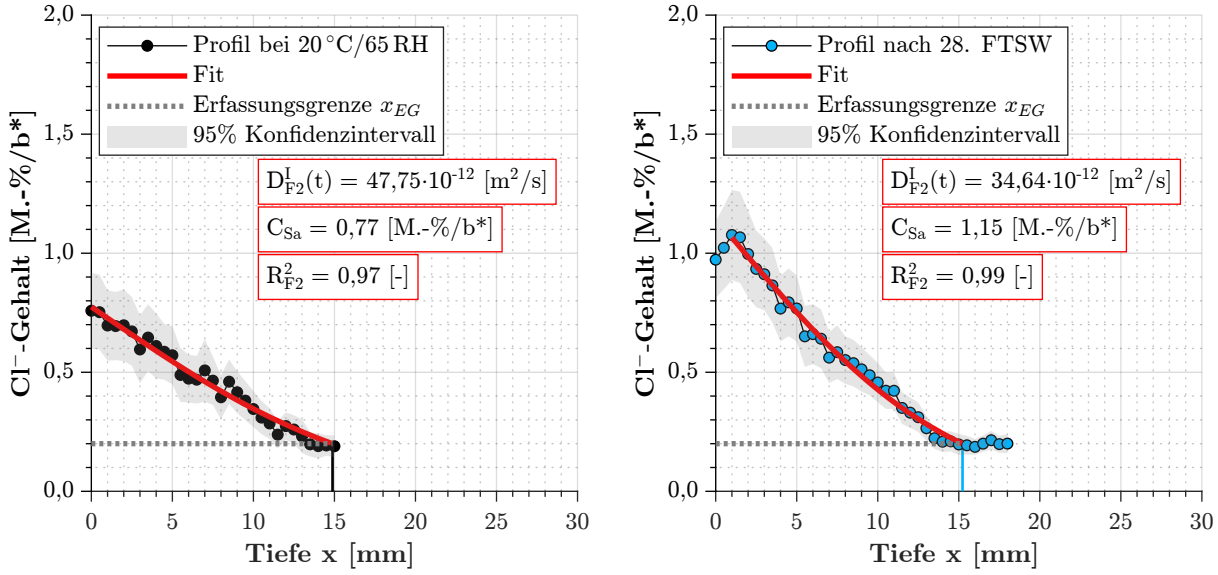
Fitting nach 28. FTSW und Einlagerung: Diffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentrationen. 2D-Darstellungen mit LIBS vgl. Anhang A-8.

Abb. A-15.1: Fitting nach 28. FTSW und Einlagerung: Diffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentrationen (Projekt). 2D-Darstellungen mit LIBS vgl. Anhang A-8



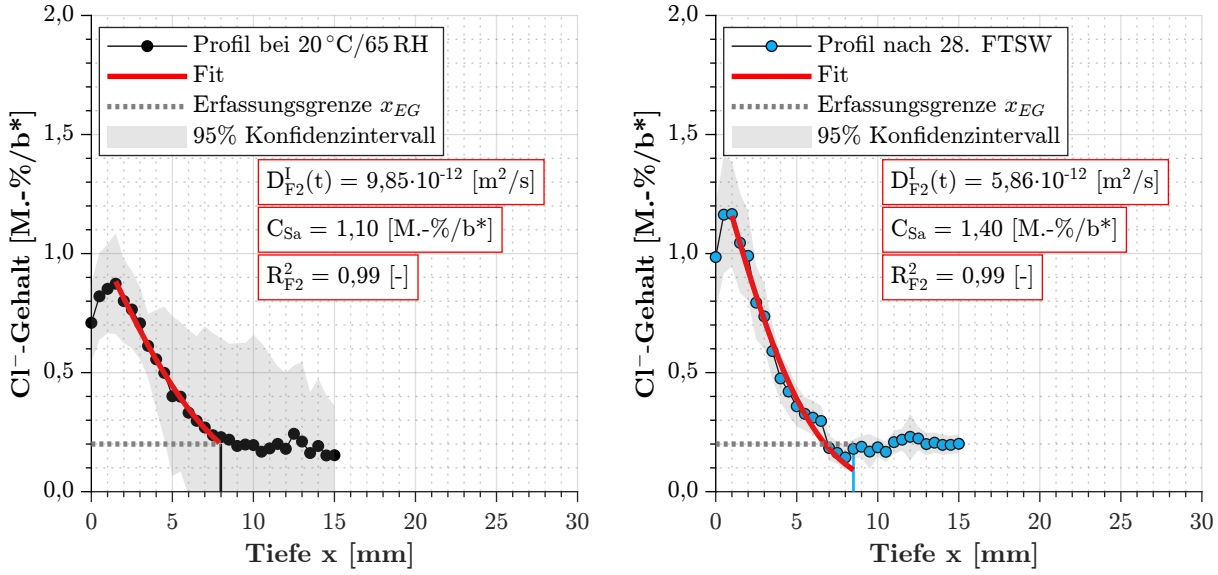
(a) Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** 28. FTSW (CDF)

Abb. A-15.2: CEM I, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 5,6 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^{I}_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



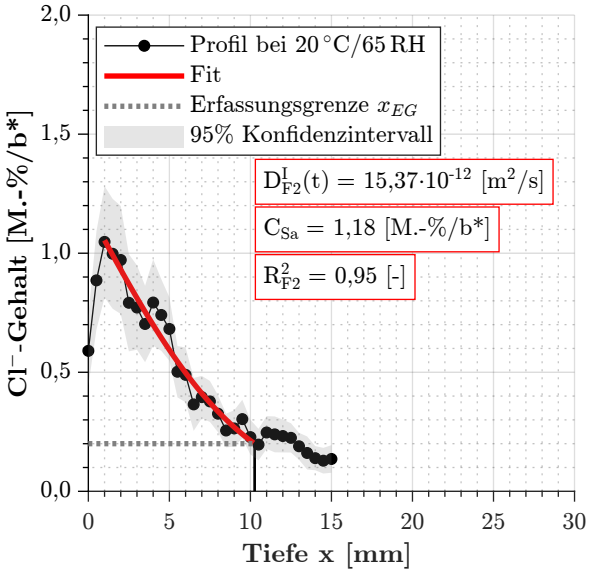
(a) Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** 28. FTSW (CDF)

Abb. A-15.3: CEM II/A-LL, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 5,6 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.

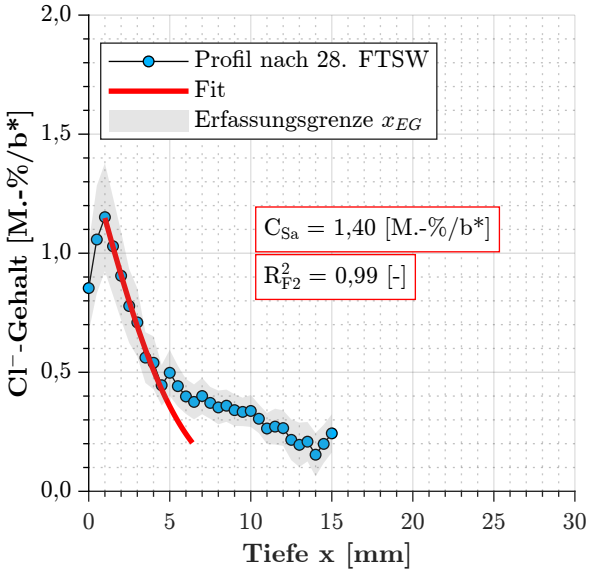


(a) Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** 28. FTSW (CDF)

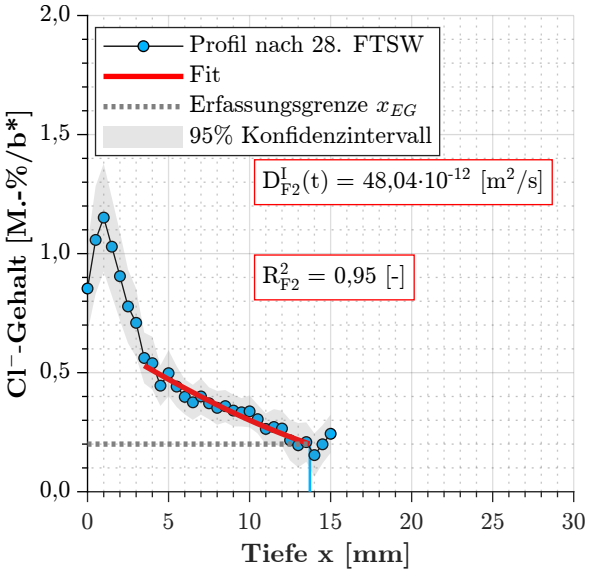
Abb. A-15.4: CEM III/A, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 5,6 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) Einlagerung bei 20 °C/65 RH

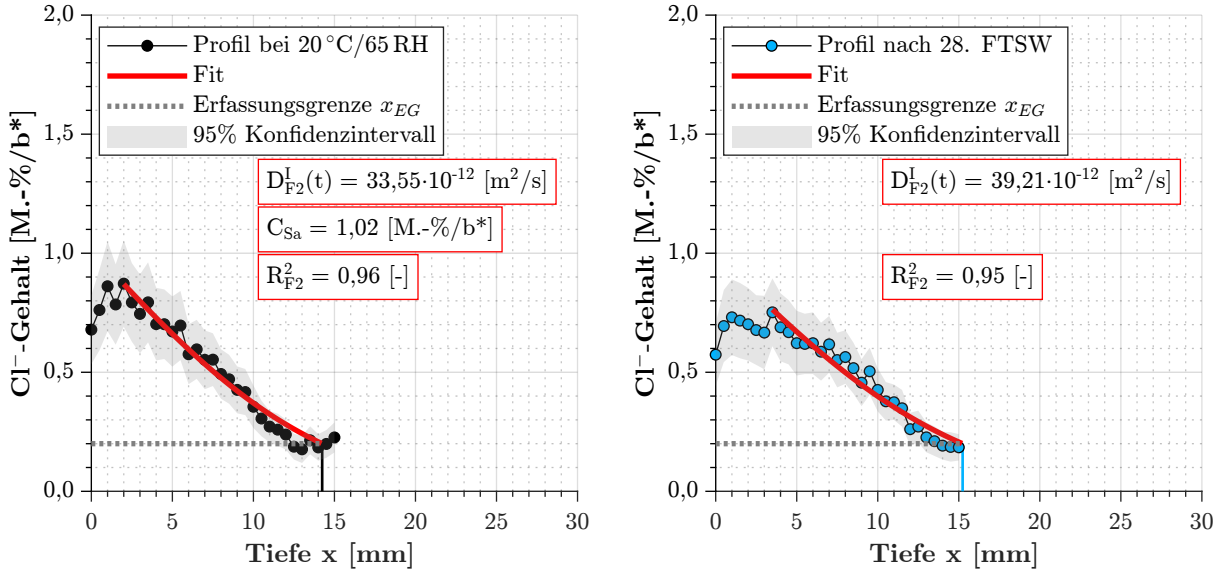


(b) 28. FTSW (CDF)



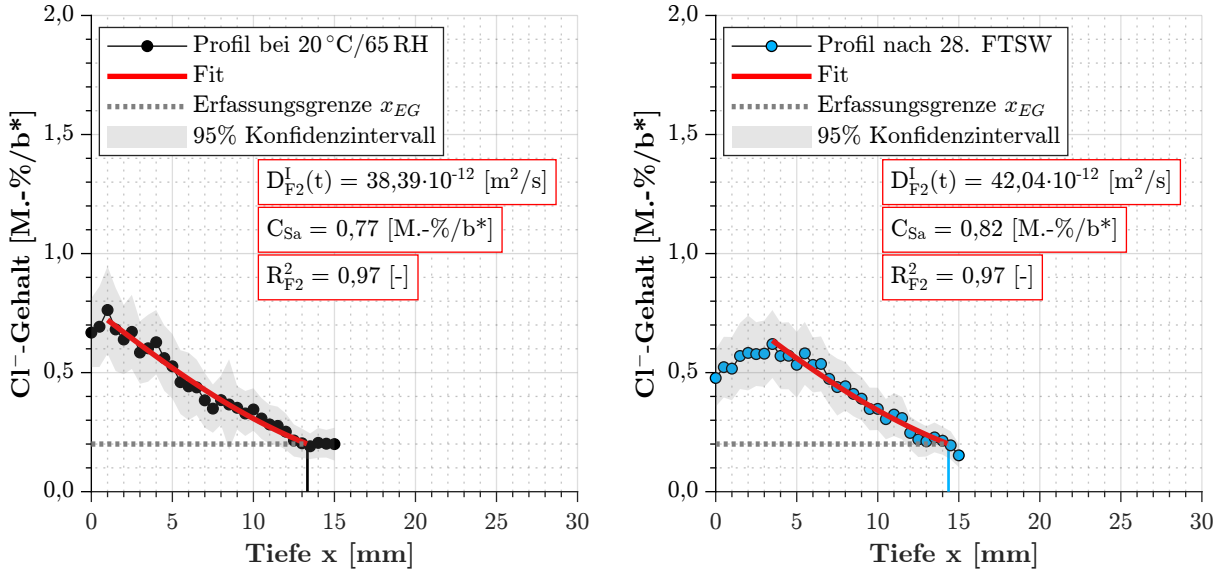
(c) 28. FTSW (CDF)

Abb. A-15.5: CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 5,6 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



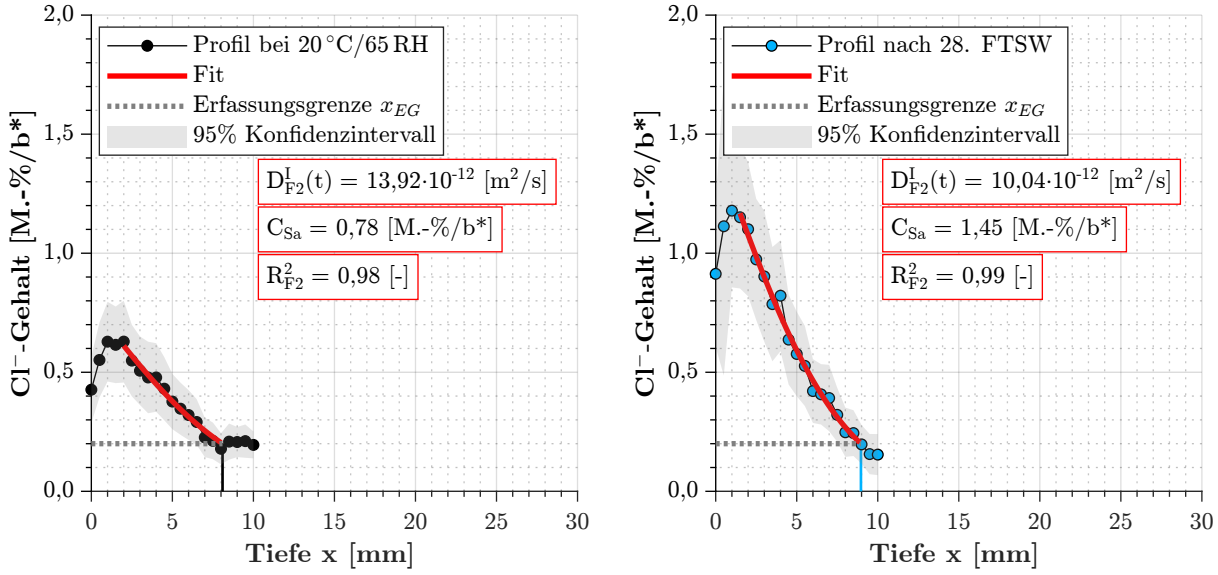
(a) Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** 28. FTSW (CDF)

Abb. A-15.6: CEM I, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 3,6 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



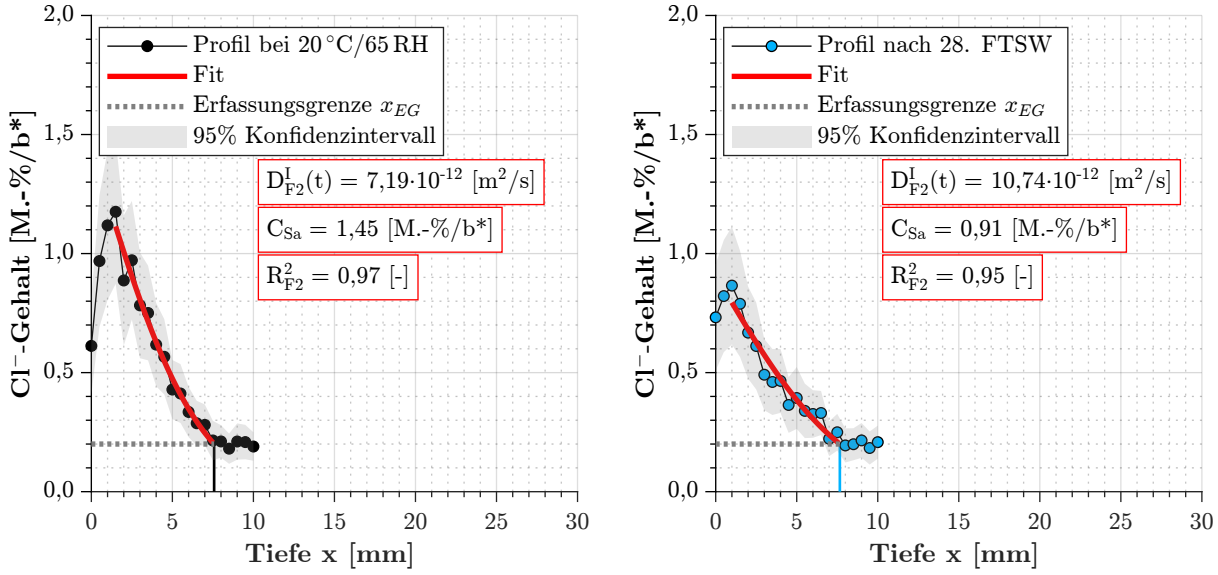
(a) Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** 28. FTSW (CDF)

Abb. A-15.7: CEM II/A-LL, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 3,4 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



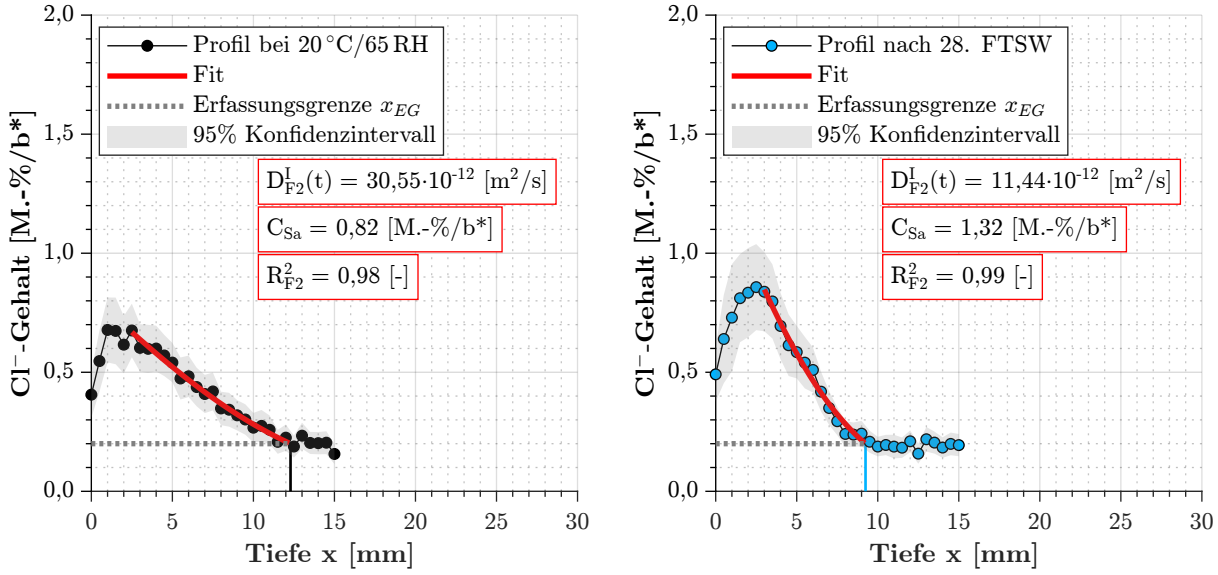
(a) Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** 28. FTSW (CDF)

Abb. A-15.8: CEM III/A, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 3,2 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



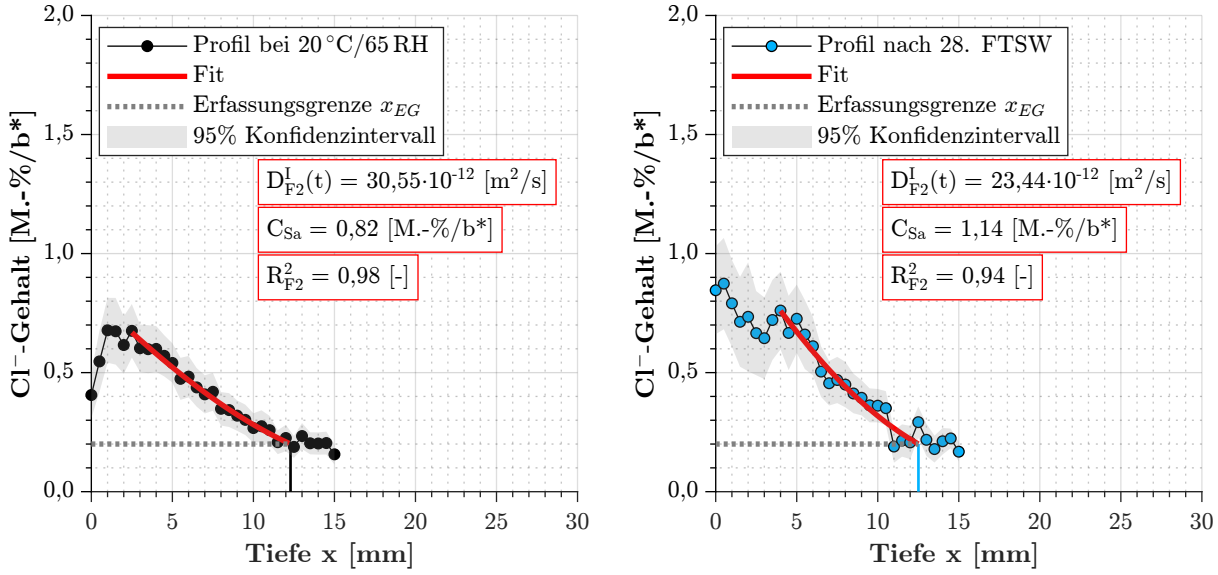
(a) Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** 28. FTSW (CDF)

Abb. A-15.9: CEMIII/B, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 3,2 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** 28. FTSW (CDF)

Abb. A-15.10: CEM II/C-M, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 5,4 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.



(a) Einlagerung bei 20 °C/65 RH **(b)** 28. FTSW (CDF)

Abb. A-15.11: CEMII/C-M, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 3,5 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung.

A-16 Porosität und des Hydratationsgrades nach [Röh12]

Beiwerte zur Bestimmung der Porosität und des Hydratationsgrades nach [Röh12]. (vgl. Kapitel 4.2.1 Glg. 4-XV)

Tab. A-16.1: Maximale Hydratationswärme Q_{max} und Faktoren A,B sowie die Dauer t_k für die maximale Hydratationswärme für Formel Glg. 4-XV in Kapitel 4.2.1 entnommen aus [Röh12] zur rechnerischen Bestimmung des Hydratationsgrades.

Bindemittel [**J/g**]	Q_{max} [-]	A [-]	B [-]	t_k [**h**]
CEM I 42,5 R	450	– 1,60	– 0,73	11,0
CEM I 32,5 R	450	– 1,83	– 0,70	13,0
CEM II/A 42,5 R	420	– 1,78	– 0,78	12,0
CEM II/A 32,5 R	420	– 2,10	– 0,75	15,0
CEM II/B-S 32,5 R (30 % Hüttensand)	400	– 1,55	– 0,70	8,9
CEM III/A 42,5 N	380	– 1,90	– 0,85	13,0
CEM III/A 32,5 N (55 – 60 % Hüttensand)	380	– 2,30	– 0,80	13,0
CEM III/B 42,5 N	360	– 1,68	– 0,86	16,0
CEM III/B 32,5 N	360	– 1,82	– 0,75	18,0
CEM III/B 42,5 – LH/HS/NA	360	– 2,20	– 0,78	13,0
CEM III/B 32,5 – LH/HS/NA	360	– 2,20	– 0,72	14,0

vgl. Kapitel 4.2.1 Glg. 4-XIV

Tab. A-16.2: Anteile des Gelbildungsfaktors η_G in Abhängigkeit der Klinkerbestandteile für die Berechnung der Porosität in Kapitel 4.2.1 Glg. 4-XIV. Werte für η_G entnommen aus [Röh12].

Bestandteil [-]	CEMI 42,5 R[1] [**M.-%**]	η_G aus [Röh12] [-]
C_3S	61,0	2,2
C_2S	19,0	2,1
C_3A	9,2	2,7
C_4AF	7,8	2,1
SFA (25%)	0	2,5
SFA (50%)	0	5,2
HS	0	2,3
SF	0	1,8

[1] Abfrage der Zusammensetzung der Klinkeranteile von Lafarge Holcim im Rahmen einer Bachlorarbeit (Hr. Rokoß). Mittelwert aus dem Zeitraum von 07/2017 bis 06/2018

vgl. Kapitel 4.2.1 Glg. 4-XIV

Tab. A-16.3: Berechnung des Gelbildungsfaktors η_G für ausgewählte Zementarten nach DIN EN 197-1 [DIN11]. Wichtung der Gelbildungsfaktoren nach Tabelle A-16.2 mit η_G aus [Röh12]. Bestandteile der Zemente vom Zementhersteller oder aus [Ben14].

Zementart [-]	η_G in Anlehnung an [Röh12] [**M.-%**]
CEM I 32,5 R	2,16
CEM I 42,5 R	2,13
CEM II/B-S 32,5 R	2,19
CEM II/B-V	2,26
CEM II/B-W	2,26
CEM III/A 32,5 N	2,22
CEM III/A 42,5 N	2,22

Abbildungsverzeichnis

1-1 Zustandsnoten von Brücken an Bundesfernstraßen in Deutschland nach DIN 1076. Grafik erstellt durch die Statistiken der BASt, vgl. [Haa09] und jahresbezogene Brückenstatistiken der BASt. . . . 1

1-2 Grafik von [Ang18] . . . 2

1-3 Aufbau der Arbeit . . . 4

2-4 Dreistoffdiagramm von $CaO, SiO_2, Al_2O_3 + Fe_2O_3$ in [M.-%]. Zusammensetzung der Klinkerbestandteile im Vergleich zu Sekundärrohstoffen und Aschen von Sekundärbrennstoffen. Grafik aus [Sch02] . . . 5

2-5 Schematische Darstellung der kapillaren Steighöhe einer Flüssigkeit von einem Feststoff mit guter Benetzbarkeit der Oberfläche (z. B. Kapillarpore in Bindemittelmatrix) und Angabe des Randwinkels ϑ. Grafik nach [Klo74] . . . 10

2-6 Ab- und Desorptionsisotherme in Abhängigkeit des Porenradius r_K (obere x-Achse), der relativen Luftfeuchte (untere x-Achse), des Feuchtegehalts im Beton (linke y-Achse) und des ungebundenen sowie gebundenen Wassers (rechts y-Achse). Angabe des hygroskopischen und überhygroskopischen Bereiches. Grafik aus [Ste00] in Anlehnung an [Kie83] . . . 17

2-7 Schematischer Verlauf der Sorptionssisotherme in (a) aus [Kap11] und der daraus folgenden Wassersättigung in (b) unter Verwendung von [Wit92] . . . 18

2-8 Binäres Phasendiagramm H_2O-$NaCl$. Grafik aus [Mül21] . . . 19

3-9 Temperaturverlauf der CDF-Prüfung nach [DIN17] unter Angabe der mittleren Temperatur über die Laufzeit eines FTSW's (12h) . . . 28

3-10 Druckfestigkeiten der Betone aus Tabelle 3-7 und Angabe der Standardabweichung. n = 3, $\mathrm{CoV_{Mittel}}$ = 4,3 % . . . 32

3-11 Mit LIBS gemessene Chloridverteilung senkrecht zur Rissflanke als Falschfarbenbild und als Chloridprofil in Höhe des gelb markierten Bereichs mit gemitteltem Chloridgehalt über den Bohrdurchmesser von 20 mm aus [KLI20] . . . 33

3-12 Prüfkonzept zur Quantifizierung von Chlorid in Beton unter Frost-Tausalz-Angriff (CDF-Prüfung) durch Abgleich mit Diffusionsprobekörpern . . . 37

3-13 Schematische Darstellung eines Probekörpers ohne Frost-Tausalz-Angriff. . . . 38

3-14 Schematische Darstellung eines Probekörpers nach Frost-Tausalz-Angriff. . . . 38

3-15 CEM I, LP = 1,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-15(a)) und CEM I+SF, LP = 1,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-15(b)), Darstellung der Flüssigkeitsaufnahme [M.-%] auf der x-Achse zu den jeweiligen Messzeitpunkten zum n-ten FTSW (n = 0, 8, 14, 18, 24, 28), des rel. dynamischen E-Moduls (RDM) [-] auf der linken y-Achse und der abgewitterten Mengen (Abwitterungen) im CDF-Test auf der rechten y-Achse. Angabe der Standardabweichungen als Fehlerbalken. . . . 42

3-16 CEM II/A-S, LP = 1,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-16(a)) und CEM I, LP = 10,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-16(b)), Darstellung der Flüssigkeitsaufnahme [M.-%] auf der x-Achse zu den jeweiligen Messzeitpunkten zum n-ten FTSW (n = 0, 8, 14, 18, 24, 28), des rel. dynamischen E-Moduls (RDM) [-] auf der linken y-Achse und der abgewitterten Mengen (Abwitterungen) im CDF-Test auf der rechten y-Achse. Angabe der Standardabweichungen als Fehlerbalken. . . . 42

3-17 CEM I, LP = 7,2 Vol.-% (vgl. Abb. 3-17(a)) und CEM I+SF, LP = 7,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-17(b)), Darstellung der Flüssigkeitsaufnahme [M.-%] auf der x-Achse zu den jeweiligen Messzeitpunkten zum n-ten FTSW (n = 0, 8, 14, 18, 24, 28), des rel. dynamischen E-Moduls (RDM) [%] auf der linken y-Achse und der abgewitterten Mengen (Abwitterungen) im CDF-Test auf der rechten y-Achse. Angabe der Standardabweichungen als Fehlerbalken. 43
3-18 CEM I+SF (k=0), LP = 7,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-18(a)) und CEM II/A-S, LP = 9,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-18(b)), Darstellung der Flüssigkeitsaufnahme [M.-%] auf der x-Achse zu den jeweiligen Messzeitpunkten zum n-ten FTSW (n = 0, 8, 14, 18, 24, 28), des rel. dynamischen E-Moduls (RDM) [%] auf der linken y-Achse und der abgewitterten Mengen (Abwitterungen) im CDF-Test auf der rechten y-Achse. Angabe der Standardabweichungen als Fehlerbalken. 44
3-19 CEM I+SFA, LP = 7,0 Vol.-% (vgl. Abb. 3-19(a)) und CEM III/B, LP = 5,5 Vol.-% (vgl. Abb. 3-19(b)), Darstellung der Flüssigkeitsaufnahme [M.-%] auf der x-Achse zu den jeweiligen Messzeitpunkten zum n-ten FTSW (n = 0, 8, 14, 18, 24, 28), des rel. dynamischen E-Moduls (RDM) [%] auf der linken y-Achse und der abgewitterten Mengen (Abwitterungen) im CDF-Test auf der rechten y-Achse. Angabe der Standardabweichungen als Fehlerbalken. 44
3-20 Darstellung der Chlorideindringtiefen x aus den Chloridprofilen A-6 bis A-8 von befrosteten Betonen und unbefrosteten Betonen, die zeitgleich bei 20 °C/65 RH lagerten. Darstellung der abgewitterten Bereiche bei Betonen nach dem 14. und 28. FTSW. Betone nach Tabelle 3-7. 48
3-21 $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung bzw. Lagerung bei 20 °C/65 RH. Darstellung der abgewitterten Bereiche bei Betonen nach dem 28. FTSW. n = 1 je Charge und Expositionsart. 49
3-22 Darstellung der Chloridionenmengen bis in die Tiefe x nach Abbildung 3-20. Betone nach Tabelle 3-7. 51
3-23 Darstellung der Chloridionenmengen bis in die Tiefe x nach Abbildung 3-20. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung bzw. Lagerung bei 20 °C/65 RH. n = 1 je Charge und Expositionsart. . 52
3-24 Darstellung des maximalen Chloridgehaltes je Betoncharge und Expositionsart aus den Chloridprofilen in den Anhängen A-6. Betone nach Tabelle 3-7. 53
3-25 Darstellung des maximalen Chloridgehaltes je Betoncharge und Expositionsart aus den Chloridprofilen A-7. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung bzw. Lagerung bei 20 °C/65 RH. n = 1 je Charge und Expositionsart. 54
3-26 Schädigungstiefe ermittelt durch Fluoreszenzmikroskopie für Betone mit einem LP-Gehalt von ca. 5 Vol.-% (y-Achse) und 3 Vol.-% (x-Achse). Die Gefügeschädigungstiefe wurde nach (28. FTSW) bestimmt. 55
3-27 Ermittlung der Tiefen mittels Fluoreszenzmikroskopie. Messbreite: ca. 30 mm, Messraster: 1 mm, n (Anzahl der Messungen) = 30 je PK. Messung bis zum weissen Rand, welcher der Eindringtiefe des niedrigviskosen fluoreszierenden Expoxidharzes entspricht. 56
3-28 Gegenüberstellung der gemittelten Schädigungstiefe mittels Fluoreszenzmikroskopie mit den Maxima (Peaks) aus den Chloridprofilen A-8 nach dem 28. FTSW für Betone mit 3 Vol.-% (vgl. Abb. 3-28(a)) und 5 Vol.-% (vgl. Abb. 3-28(b)) LP-Gehalt. Angabe der Standardabweichungen für die Fluoreszenzmikroskopie. n = 1 für Chloridprofile. . 58

3-29 Überlagerung der gemittelten mit Fluoreszenzmikroskopie ermittelten Tiefen mit den LIBS-Chloridprofilen. 59
3-30 Überlagerung der gemittelten mit Fluoreszenzmikroskopie ermittelten Tiefen mit den LIBS-Chloridprofilen. 59
3-31 CEM I, LP = 5,6 Vol.-%. Darstellung der Chloridprofile von befrosteten und unbefrosteten Probekörpern direkt nach Prüfende (vgl. A-8.1(b)) und nach 6 Monaten (vgl.3-31(b)). 61
3-32 CEM II/A-LL, LP = 5,6 Vol.-%. Darstellung der Chloridprofile von befrosteten und unbefrosteten Probekörpern direkt nach Prüfende (vgl. A-8.3(b)) und nach 6 Monaten (vgl. 3-32(b)). 61
3-33 CEM III/A, LP = 4,8 Vol.-%. Darstellung der Chloridprofile von befrosteten und unbefrosteten Probekörpern direkt nach Prüfende (vgl. A-8.3(b)) und nach 6 Monaten (vgl.3-33(b)). 62
3-34 Prüfkonzept zur Quantifizierung des Bromideindringwiderstandes im RBM-Versuch vor (0-RBM-Versuch) und nach Frost-Tausalz-Angriff (CDF-Prüfung) nach dem 14. und 28. FTSW 64
3-35 Vergleich der mittels Indikatorlösung $AgNO_3$ (0,1 mol/l) ermittelten Eindringtiefen im RCM- und modifizierten RBM-Test mit einer Ionenkonzentration von 0,5 [mol/l] (≡ 5,2 M.-% $NaBr$) unter Angabe der linearen Regression, des Bestimmtheitsmaßes R^2 und der 95 % Konfidenzbänder bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5\%$ [LK22] . . 67
3-36 0-RBM mit einer $NaBr$-Konzentration von 0,5 [mol/l] vor Start der CDF-Prüfung. CEM I, w/b = 0,5, LP = 10,0 Vol.-%. 2D-Bromidverteilung (a) und Bromidprofil (b). Bestimmung von $c_{d,Br,LIBS}$ durch $x_{d,AgNO_3}$ aus Indikatormethode. Angabe des 95 % Konfidenzintervalls. 68
3-37 0-RCM mit einer $NaCl$-Konzentration von 1,7 [mol/l] vor Start der CDF-Prüfung. w/b = 0,5, LP = 0,9 Vol.-%. 2D-Chloridverteilung (a) und Chloridprofil (b). Bestimmung von $c_{d,Cl,LIBS}$ durch $x_{d,AgNO_3}$ aus Indikatormethode. Angabe des Integrals von $x = 0$ [mm] bis $x_{d,AgNO_3}$ und des 95 % Konfidenzintervalls. 69
3-38 0-RBM mit einer $NaBr$-Konzentration von 1,7 [mol/l] vor Start der CDF-Prüfung. CEM I+SFA, w/b = 0,5, LP = 0,9 Vol.-%. 2D-Bromidverteilung (a) und Bromidprofil (b). Bestimmung von $c_{d,Br,LIBS}$ durch $x_{d,AgNO_3}$ aus Indikatormethode. Angabe des 95 % Konfidenzintervalls. 70
3-39 Normalverteilung (ND = Normal Distribution) der $c_{d,\mathrm{Br,LIBS}}$-Werte (n = 3) aus Tabelle 3-7 mit dem Mittelwert $\mu = 0{,}18$ [M.-%/b*], der Standardabweichung $\sigma = 0{,}04$ [M.-%/b*] bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5$ % und einem Variationskoeffizient $CoV = 22{,}6$ %. Bereich, in dem die Mittelwerte innerhalb von $\mu \pm 2 \cdot \sigma$ (≡ 95,45 %). 71
3-40 Theoretisches Chloridprofil nach RCM-Test aus [Lay06] für den qualitativen Abgleich des Farb- umschlagspunktes c_d [-] bei $x_{d,AgNO_3}$ mittels Indikator bei $c_{d,Br,LIBS}$ in [M.-%/b*] aus dem LIBS-Profilen 72
3-41 14. FTSW. Bromid- (b) und Chloridverteilung (b) von demselben PK (CEM I, w/b = 0,5, LP = 10,0 Vol.-%) in 2D-Darstellung aus LIBS-Messung mit anschließenden RBM-Versuch. 73

3-42 Bromid- und Chloridprofil aus LIBS-Messung aus Abb. 3-41 nach dem 14. FTSW. Angabe der Integrale von Bromid von $x = 0$ mm bis $x_{d,Br,LIBS}$ unter Berücksichtigung von $c_{d,Br,LIBS}$ aus Abb. 3-39 und von Chlorid von $x_{d,Cl,LIBS,1}$ (linke Grenze) bis $x_{d,Cl,LIBS,2}$ (rechte Grenze) unter Berücksichtigung der Erfassungsgrenze $x_{EG} = 0,2$ [M.-%/b*] von Chlorid (vgl. Kapitel 3.2.2). Angabe des 95 % Konfidenzintervalls angegeben. 74
3-43 28. FTSW. Bromid- (a) und Chloridverteilung (b) von demselben PK (CEM I, w/b = 0,5, LP = 10,0 Vol.-%) in 2D-Darstellung aus LIBS-Messung mit anschließendem RBM-Versuch. 75
3-44 Bromid- und Chloridprofil aus LIBS-Messung aus Abb. 3-43 nach dem 28. FTSW. Angabe der Integrale von Bromid von $x = 0$ mm bis $x_{d,Br,LIBS}$ unter Berücksichtigung von $c_{d,Br,LIBS}$ aus Abb. 3-39 und von Chlorid von $x_{d,Cl,LIBS,1}$ (linke Grenze) bis $x_{d,Cl,LIBS,2}$ (rechte Grenze) unter Berücksichtigung der Erfassungsgrenze $x_{EG} = 0,2$ [M.-%/b*] von Chlorid (vgl. Kapitel 3.2.2). Angabe des 95 % Konfidenzintervalls angegeben. 75
3-45 14. FTSW. CEM I, w/b = 0,5, LP = 10,0 Vol.-% mit anschließendem RBM-Versuch. 77
3-46 28. FTSW. CEM I, w/b = 0,5, LP = 10,0 Vol.-% mit anschließendem RBM-Versuch. 78
3-47 Gegenüberstellung der Br^--Eindringtiefen Abb. 3-47(a)/-mengen Abb. 3-48(a) mit anschließenden RBM-Versuchen nach dem 14. (n = 2 je Charge) und 28. FTSW (n = 3 je Charge) von den untersuchten Betonchargen nach Tabelle 3-7. 80
3-48 Gegenüberstellung der eingetragenen Bromid- (Abb. (a)) und Chloridionenmengen (Abb. 3-49(b)) nach Frost-Tausalz-Angriff im CDF-Test und anschließendem RBM-Test. Verringerung der Bromidmengen mit Erhöhung der Chloridmengen vom 14. zum 28. FTSW. 82
3-49 Gegenüberstellung der eingetragenen Chloridionenmengen direkt nach der CDF-Prüfung (vor RBM-Test, Abb. 3-49(a)) und nach RBM-Test (Abb. 3-49(b)) zum 14. (n = 2 je Betoncharge) und 28. FTSW (n = 3 je Betoncharge, Angabe der Standardabweichungen). Chloridtransport durch das Anlegen des elektrischen Feldes von der Betonrandzone bis ins Innere des Betons im RBM-Test. Betonchargen nach Tabelle 3-7. Einzelergebnisse können den Anhängen A-11 und A-12 entnommen werden. 83
3-50 Elektrische Ladungsmengen aus RBM-Test in Abhängigkeit von der Anzahl an FTSW's (0-RBM/14. FTSW+RBM/28. FTSW+RBM). Beispiel in Abb. (a). Gesamtdarstellung der Ladungsmengen in Abb. 3-50(b). 85
3-51 Berechnete Werte nach Glg. 3-IX in Abhängigkeit verschiedener Br^-- oder Cl^--Konzentrationen c_0 im Bereich zwischen 0 und 3 [mol · l^{-1}] mit konstantem farbausschlaggebendem Umschlagspunkt $c_d = 0,07$ [mol · l^{-1}], die bei der Reaktion freier Halogene wie Cl^- oder Br^- mit $AgNO_3$ zu einem schwerlöslichem Salz $AgCl$ oder $AgBr$ reagieren. 87
3-52 Gegenüberstellung der Migrationskoeffizienten aus dem 0-RBM-Versuch (vgl. Abb. 3-52(a)) mit den Migrationskoeffizienten nach Frost-Tausalz-Angriff im CDF-Test und anschließendem RBM-Test (vgl. Abb. 3-52(b)). Erhöhung der Migrationskoeffizienten vor und nach Befrostung. Verringerung der Migrationskoeffizienten zwischen dem 7. und 28. FTSW (vgl. Abb. 3-52(b) linker (hell)/rechter (dunkel) Balken je Beton. 89
4-53 Umgang mit den in Bezug auf das 2. Fick'schen Diffusionsgesetz abweichenden oberflächennahen Chloridkonzentrationen durch die Ansätze [I] und [II] aus [Kap11] 90
4-54 Qualität des Modellansatzes $D^I_{F2}(t)$ nach dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz durch Angabe des Bestimmtheitsmaßes R^2 nach DIN EN 12390-11 [DIN15] 95

4-55 Qualität des Modellansatzes $D^I_{F2}(t)$ nach dem 2. Fick'schen Diffusionsgesetz von befrosteten (28. FTSW) und unbefrosteten PK (Lagerung bei 20 °C/65 RH). Grenzwert für $R^2 = 0{,}95$ nach DIN EN 12390-11 [DIN15]. n = 1 je Charge. 95
4-56 Darstellung der Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ und der extrapolierten Oberflächenchloridkonzentrationen C_{Sa} nach Glg. 4-X ohne Berücksichtigung des Temperatureinflusses. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung und 7d je nach Expositionsart in 4-56(a) bei 20 °C/65 RH oder 4-56(b) für 7d (14. FTSW). 97
4-57 Darstellung der Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ und der extrapolierten Oberflächenchloridkonzentrationen C_{Sa} nach Glg. 4-X ohne Berücksichtigung des Temperatureinflusses. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung und 7d je nach Expositionsart in 4-56(a) bei 20 °C/65 RH oder 4-56(b) für 14d (28. FTSW). 97
4-58 Darstellung der Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ und der extrapolierten Oberflächenchloridkonzentrationen C_{Sa} nach Glg. 4-X. 98
4-59 CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 5,6 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$ Lösung. 99
4-60 Kruskal-Wallis-Test, ob Unterschiede bei unbefrosteten und befrosteten Stichproben mit n = 10 je Expositionsart vorliegen oder nicht. Boxplot und Angabe der Wahrscheinlichkeit $p - value$ bei einem Signifikanzniveau von $\alpha = 5$ % für Fitvariablen C_{Sa} und $D^I_{F2}(t)$ zur Annahme oder Ablehnung der 0-Hypothese. 0-Hypothese = die Stichproben entstammen der gleichen Grundgesamtheit. 101
4-61 Gegenüberstellung der temperatur- 4-61(a) und zeitabhängigen 4-61(b) k_e-Temperaturfaktoren nach Glg. 4-XIII. 103
4-62 Gegenüberstellung der Diffusionskoeffizienten $D^I_{F2}(t)$ nach Glg. 4-XIII unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses durch den gewichteten k_e-Temperaturfaktor. . . . 104
4-63 Gegenüberstellung der Diffusionskoeffizienten (Projekt) $D^I_{F2}(t)$ nach Glg. 4-XIII unter Berücksichtigung des Temperatureinflusses durch den gewichteten k_e-Temperaturfaktor nach dem 28. FTSW bzw. Einlagerungsversuchen 20 °C/65 RH. 104
A-8.1 28. FTSW (Projekt): 2D-LIBS-Darstellungen und Chloridprofile aus Einlagerung und CDF-Prüfung vor Migration. 148
A-8.2 CEM I, w/b = 0,5, A/B16, Kies. Darstellung der Chloridprofile mit den Chlorideindringtiefen x und der Erfassungsgrenze x_{EG} von LIBS. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung. Darstellung der abgewitterten Bereiche. 148
A-8.3 CEM II/A-LL, w/b = 0,5, A/B16, Kies. Darstellung der Chloridprofile mit den Chlorideindringtiefen x und der Erfassungsgrenze x_{EG} von LIBS. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung. Darstellung der abgewitterten Bereiche. 148
A-8.4 CEM III/A, w/b = 0,5, A/B16, Kies. Darstellung der Chloridprofile mit den Chlorideindringtiefen x und der Erfassungsgrenze x_{EG} von LIBS. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung. Darstellung der abgewitterten Bereiche. 149

A-8.5 CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16, Kies. Darstellung der Chloridprofile mit den Chlorideindringtiefen x und der Erfassungsgrenze x_{EG} von LIBS. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung. Darstellung der abgewitterten Bereiche. 149
A-8.6 CEM II/C-M, w/b = 0,5, A/B16, Kies. Darstellung der Chloridprofile mit den Chlorideindringtiefen x und der Erfassungsgrenze x_{EG} von LIBS. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung, 14d (28. FTSW) CDF-Prüfung. Darstellung der abgewitterten Bereiche. 150
A-13.1 CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 200
A-13.2 CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 200
A-13.3 CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 201
A-13.4 CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 201
A-13.5 CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 0,8 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 202
A-13.6 CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 0,8 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 202
A-13.7 CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 10,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 203
A-13.8 CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 10,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 203
A-13.9 CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,2 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 204

A-13.10 CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,2 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 204
A-13.11 CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 205
A-13.12 CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 205
A-13.13 CEM I+SF (k=0), w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 206
A-13.14 CEM I+SF (k=0), w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 206
A-13.15 CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 9,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 207
A-13.16 CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 9,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 207
A-13.17 CEM I+SFA, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 208
A-13.18 CEM I+SFA, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 208
A-13.19 CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 209
A-13.20 CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 14 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 209

A-14.1 CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 210
A-14.2 CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 210
A-14.3 CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 211
A-14.4 CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 211
A-14.5 CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 212
A-14.6 CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 1,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 212
A-14.7 CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 0,8 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 213
A-14.8 CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 0,8 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 213
A-14.9 CEM II/A-S, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 0,8 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 214
A-14.10 CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 10,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 214
A-14.11 CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 10,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 215

A-14.12 CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 10,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 215
A-14.13 CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,2 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 216
A-14.14 CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,2 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 216
A-14.15 CEM I, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,2 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 217
A-14.16 CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 217
A-14.17 CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 218
A-14.18 CEM I+SF, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 218
A-14.19 CEM I+SF (k=0), w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 219
A-14.20 CEM I+SF (k=0), w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 219
A-14.21 CEM I+SF (k=0), w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 220
A-14.22 CEM I+SFA, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 220

A-14.23 CEM I+SFA, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 221
A-14.24 CEM I+SFA, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 7,0 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 221
A-14.25 CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. **Aufgrund sprunghaften Wechsels der Porosität innerhalb der Betonrandzone ist das Diffusionsmodell zu hinterfragen, vgl. Ansatz in Abbildungen A-14.27 und A-14.28** 222
A-14.26 CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. **Aufgrund sprunghaften Wechsels der Porosität innerhalb der Betonrandzone ist das Diffusionsmodell zu hinterfragen, vgl. Ansatz in Abbildungen A-14.27 und A-14.28** 222
A-14.27 CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$-Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7 Tage Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 223
A-14.28 CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16 Splitt, LP = 5,5 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 224
A-15.1 Fitting nach 28. FTSW und Einlagerung: Diffusionskoeffizienten und Oberflächenchloridkonzentrationen (Projekt). 2D-Darstellungen mit LIBS vgl. Anhang A-8 225
A-15.2 CEM I, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 5,6 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 225
A-15.3 CEM II/A-LL, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 5,6 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 226
A-15.4 CEM III/A, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 5,6 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 226
A-15.5 CEM III/B, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 5,6 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 227

A-15.6 CEM I, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 3,6 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 228
A-15.7 CEM II/A-LL, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 3,4 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 228
A-15.8 CEM III/A, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 3,2 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 229
A-15.9 CEMIII/B, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 3,2 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 229
A-15.10 CEM II/C-M, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 5,4 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 230
A-15.11 CEMII/C-M, w/b = 0,5, A/B16, Kies, LP = 3,5 Vol.-%. Darstellung der gefitteten Chloridprofile. Fitvariablen: Diffusionskoeffizient $D^I_{F2}(t)$ und die extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration C_{Sa} nach Glg. 4-X. $NaCl$ Beaufschlagungsdauer: 21 Tage. 7d Vorsättigung in 3,0 M.-% $NaCl$-Lösung. 230

Tabellenverzeichnis

2-1 Hauptbestandteile (Auszug) von Bindemitteln nach [DIN11], Oxid- und Baustoffschreibweise in Anlehnung an [Ben15]. Reaktionsart 1: hydraulisch, Reaktionsart 2: latenthydraulisch, zusätzliche alkalische Aktivierung notwendig (z. B. durch $Ca(OH)_2$), Bildung ähnlicher Produkte wie die *C-S-H*-Phasen bei der hydraulischen Reaktionsart, Reaktionsart 3: puzzolanisch, Umsetzung von $Ca(OH)_2$ mit H_2O unter Bildung zusätzlicher *C-S-H*-Phasen, Reaktionsart 4: (nahezu) inert 7

2-2 Einteilung der möglichen Porenarten im erhärteten Beton mit qualitativer Angabe des Einflusses auf Transportprozesse in die Bindemittelmatrix (-: wenig Einfluss, +: großer Einfluss) in Anlehnung an [Röh12] 8

2-3 Klassifikation der Poren in Abhängigkeit vom hydraulischen Radius R_H in der erhärteten Bindemittelmatrix in Anlehnung an [SA97] [Sin82] [Mül21] 9

2-4 Materialbedingte Einflüsse auf den Chloriddiffusionskoeffizienten. - bremsend, + beschleunigend. 12

2-5 Expositionsbedingte Einflüsse auf den Chloriddiffusionskoeffizienten. - bremsend, + beschleunigend. 12

2-6 Anforderungen an die Luftporenkennwerte nach [FGS23] 14

3-7 Betonrezepturen für CDF- und Einlagerungsprüfungen mit anschließendem RBM-Test, A/B16, Splitt, w/b = 0,50, F3, Betone mit künstlich eingeführten Luftporen unter Verwendung von LP-Bildnern in **fett** 30

3-8 Betonrezepturen für CDF- und Einlagerungsprüfungen mit, A/B16, Kies, w/b = 0,50, F3 (Projekt) 31

3-9 Eigenschaften von Chlor, Brom und Iod (VII. Hauptgruppe, Halogene) [Sch16] [Ben15] [Vol91] [HA71] 65

A-2.1 Herstellung von *NaBr*-Kalibrierpresslingen für LIBS zur Bestimmung des Bromidgehaltes im Beton 115

A-3.1 Einfluss der Probekörpervorbereitung auf den LIBS-Chloridgehalt. Spaltung (Bruch), trockenes oder nasses Sägen der Probekörper 117

A-4.1 Vergleich des Migrationsversuches mit *NaCl* und *NaBr* zur Bestimmung des LIBS-Gehaltes beim Umschlagspunkt mittels Indikatormethode. 117

A-5.1 0-RBM: Bestimmung des LIBS-Bromidgehaltes beim Umschlagspunkt mittels Indikatormethode. 118

A-6.1 14. FTSW: 2D-LIBS und Chloridprofile aus Einlagerung und CDF-Prüfung vor Migration. 127

A-7.1 2D-LIBS Darstellung von Einlagerungsversuchen bei 20 °C/65 RH, nach dem 28. FTSW aus CDF-Prüfung und die daraus erstellten Chloridprofile mit Darstellung des abgewitterten Bereiches bei PK aus der CDF-Prüfung. 137

A-11.1 14. FTSW+RBM-kombinierte Darstellung. 2D-Darstellungen von Br^- (links) und Cl^- (mittig) und Ionenprofile (rechts) nach dem 14. FTSW mit anschließenden RBM-Test. 170

A-12.1 28. FTSW+RBM-kombinierte Darstellung. 2D-Darstellungen von Br^- (links), Cl^- (mittig) und Ionenprofile (rechts) nach dem 14. FTSW mit anschließendem RBM-Test. . . 180

A-12.4 28. FTSW+RBM-kombinierte Darstellung. 2D-Darstellungen von Br^-(links)- und Cl^- (mittig) und Ionenprofile nach dem 14. FTSW mit anschließenden RBM-Test. 184

A-16.1 Maximale Hydratationswärme Q_{max} und Faktoren A,B sowie die Dauer t_k für die maximale Hydratationswärme für Formel Glg. 4-XV in Kapitel 4.2.1 entnommen aus [Röh12] zur rechnerischen Bestimmung des Hydratationsgrades. 231
A-16.2 Anteile des Gelbildungsfaktors η_G in Abhängigkeit der Klinkerbestandteile für die Berechnung der Porosität in Kapitel 4.2.1 Glg. 4-XIV. Werte für η_G entnommen aus [Röh12]. 231
A-16.3 Berechnung des Gelbildungsfaktors η_G für ausgewählte Zementarten nach DIN EN 197-1 [DIN11]. Wichtung der Gelbildungsfaktoren nach Tabelle A-16.2 mit η_G aus [Röh12]. Bestandteile der Zemente vom Zementhersteller oder aus [Ben14]. 232

Literatur

[And19] Andreas Kelder: *Simulation des Chlorid-Haushaltes in porösen Medien am Beispiel von Beton*. Innsbruck, Universität Innsbruck, Masterarbeit, 2019

[Ang18] Angst, Ueli M.: Challenges and opportunities in corrosion of steel in concrete. In: *Materials and Structures* 51 (2018), Nr. 1. – ISSN 1359–5997

[Ant17] Antons, Udo: *Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit hydrophober Schichten im Beton mittels NMR*, RWTH Aachen University, Dissertation, 2017

[Arn43] Arnfeldt, H.: *Skador pa betongvagar uppkomna genom saltbehandling vintertid: Damage on concrete pavements by wintertime salt treatment*. Stockholm, Meddelande, 1943

[BAW12] BAW: *Merkblatt Frostprüfung von Beton (MFB)*. Karlsruhe, 2012

[BAW19] BAW: Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbau-werken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC). (2019)

[BB20] Bechmann, Wolfgang ; Bald, Ilko: *Einstieg in die Physikalische Chemie für Naturwissenschaftler*. 7th ed. 2020. 2020 (Studienbücher Chemie). – ISBN 978–3–662–62034–2

[Bec23] Becker, Felix: *Untersuchungen zum Austrocknungsverhalten von chloridhaltigem Beton und Folgen für die Korrosionsaktivität des Betonstahls*, Rheinland-Pfälzische Technische Universität Kaiserslautern-Landau, Diss., 2023

[Bee07] Beers, Kenneth J.: *Numerical methods for chemical engineering: Applications in Matlab*. Cambridge and New York : Cambridge University Press, 2007. – ISBN 978–0–511–25650–9

[Ben14] Benedix, Roland: *Bauchemie für das Bachelor-Studium: Modern - kompetent - kompakt*. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2014 http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-2093-8. – ISBN 978–3–8348–1349–7

[Ben15] Benedix, Roland: *Bauchemie: Einführung in die Chemie für Bauingenieure und Architekten*. 6. Wiesbaden : Springer Vieweg, 2015 (Lehrbuch). http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04144-1. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-658-04144-1. – ISBN 978–3–658–04143–4

[BFJ+16] Binnewies, Michael ; Finze, Maik ; Jäckel, Manfred ; Schmidt, Peer ; Willner, Helge ; Rayner-Canham, Geoffrey: *Allgemeine und Anorganische Chemie*. 3., vollständig überarbeitete Auflage. Berlin : Springer Spektrum, 2016. – ISBN 978–3–662–45067–3

[Bod93] Bodnar, R. J.: Revised equation and table for determining the freezing point depression of H2O-Nacl solutions. In: *Geochimica et Cosmochimica Acta* 57 (1993), Nr. 3, S. 683–684. – ISSN 00167037

[Bre19] Breit, Wolfgang: *Kritischer korrosionsauslösender Chloridgehalt: Grenzwerte, Empfehlungen*. München, 29.09.2019 (4. Münchner Bausymposium)

[Bro82] Brodersen, H. A.: *Zur Abhängigkeit der Transportvorgänge verschiedener Ionen im Beton von Struktur und Zusammensetzung in Beton*. 1982

[Bro04] Brouwers, H.J.H.: The work of Powers and Brownyard revisited: Part 1. In: *Cement and Concrete Research* 34 (2004), Nr. 9, S. 1697–1716. – ISSN 00088846

[BS90] Beddoe, R. E. ; Setzer, M. J.: *Änderung der Änderung der Zementsteinstruktur durch Chlorideinwirkung.* Essen, Universität - Gesamthochschule, Forschungsbericht aus dem Fachbereich Bauwesen Heft 48, 1990

[BSL17] Breitkopf, Cornelia (Hrsg.) ; Swider-Lyons, Karen (Hrsg.): *Springer handbook of electrochemical energy.* Berlin and Heidelberg : Springer, 2017 (Springer Handbooks). – ISBN 978–3–662–46657–5

[BSM95] Bronštejn Ilja N. ; Semendjaev, Konstantin A. ; Musiol, Gerhard: *Taschenbuch der Mathematik.* 2., überarb. und erw. Aufl. Thun and Frankfurt am Main : Deutsch, 1995. – ISBN 3–8171–2002–8

[Byf86] Byfors, K.: Chloride binding in cement paste. In: *Swedish Cement and Concrete Research Institute* (1986), S. S.27–38

[CAA99] Castellote, M. ; Andrade, C. ; Alonso, C.: Chloride-binding isotherms in concrete submitted to non-steady-state migration experiments. In: *Cement and Concrete Research* 29 (1999), Nr. 11, S. 1799–1806. – ISSN 00088846

[Cel] Celebi, Ayhan R.: *Chloridumverteilung in Beton nach Applikation eines Oberflächenschutzsystems: Anwendungsgrenzen des Instandsetzungsverfahrens 7.7.* Kaiserslautern, Technischen Universität Kaiserslautern, Dissertation

[CJ08] Carslaw, Horatio S. ; Jaeger, J. C.: *Conduction of heat in solids.* 2. ed., reprinted. Oxford : Clarendon Press, 2008 (Oxford science publications). – ISBN 9780198533689

[COL44] COLLINS, A. R.: The destruction of concrete by frost. In: *Journal of the Institution of Civil Engineers* 23 (1944), Nr. 1, S. 29–41

[Cra76] Crank, John: *The mathematics of diffusion.* 2. ed., reprint. Oxford : Clarendon Press, 1976. – ISBN 0198533446

[CW13] Chen, Xudong ; Wu, Shenxin: Influence of water-to-cement ratio and curing period on pore structure of cement mortar. In: *Construction and Building Materials* 38 (2013), Nr. 1, S. 804–812. `http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2012.09.058`. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2012.09.058. – ISSN 09500618

[Dau06] Dauberschmidt, Christoph: *Untersuchungen zu den Korrosionsmechanismen von Stahlfasern in chloridhaltigem Beton*, RWTH Aachen Universität, Dissertation, 2006

[Deu89] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton: *Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton.* Berlin and Köln, 1989

[DGZ23] DGZfP_B14: *Quantifizierung von Chlorid in Beton mit der laserinduzierten Plasmaspektroskopie (LIBS) (Quantification of Chloride in Concrete with Laser-Induced Plasma Spectroscopy (LIBS)).* 2023

[DIN] DIN EN12390_12: *DIN EN 12390-12:2020-04, Prüfung von Festbeton - Teil 12: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton - Beschleunigtes Karbonatisierungsverfahren; Deutsche Fassung EN 12390-12:2020.* Berlin,

[DIN02] DIN 53804-1: *Statistische Auswertungen-Teil 1: Kontinuierliche Merkmale.* 2002

[DIN08] DIN32645: *DIN 32645:2008-11, Chemische Analytik_- Nachweis-, Erfassungs- und Bestimmungsgrenze unter Wiederholbedingungen_- Begriffe, Verfahren, Auswertung.* Berlin, 2008

[DIN10] DIN Fachbericht 100: *Beton – Zusammenstellung von DIN EN 206-1 Beton – Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität und DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.* 2010

[DIN11] DIN EN 197-1: *Cement – Part 1: Composition, specifications and conformity criteria for common cements.* 2011

[DIN15] DIN EN 12390-11: *DIN EN 12390-11:2015-11, Prüfung von Festbeton_- Teil_11: Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton_- Einseitig gerichtete Diffusion; Deutsche Fassung EN_12390-11:2015.* Berlin, 2015

[DIN17] DIN CEN/TS 12390-9: *DIN CEN/TS 12390-9:2017-05, Prüfung von Festbeton_- Teil_9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand_- Abwitterung; Deutsche Fassung CEN/TS_12390-9:2016.* Berlin, 2017

[DIN21] DIN EN 12390-18: *Testing hardened concrete – Part 18: Determination of the chloride migration coefficient.* 2021

[Ehr17] Ehrhardt, Dirk: *Zum Einfluss der Nachbehandlung auf die Gefügeausbildung und den Frost-Taumittelwiderstand der Betonrandzone*, Bauhaus-Universität Weimar, Diss., 2017

[Erb86] Erbaydar, Seref: *Eisbildung, Volumendilatationen und Wassertransport Im Gefüge von Beton bei Temperaturen bis -60 °C*, Dissertation, 1986

[Eri21] Eriksson, Daniel: *TRITA-ABE-DLT.* Bd. 2111: *Multiphase models for freeze-thaw actions and mass transport in concrete hydraulic structures.* Stockholm : KTH Royal Institute of Technology, 2021. – ISBN 978–91–7873–832–8

[Fag73] Fagerlund, Göran: *Critical Degrees of Saturation at Freezing of Porous and Brittle Materials*, The Lund Institute of Technology, Diss., 1973

[Fag77a] Fagerlund, G.: The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. In: *Materials and Structures* 10 (1977), Nr. 4, S. 217–229. – ISSN 1359–5997

[Fag77b] Fagerlund, G.: The international cooperative test of the critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. In: *Materials and Structures* 10 (1977), Nr. 4, S. 231–253. – ISSN 1359–5997

[Fag93] Fagerlund, G.: *The critical spacing factor: preliminary version*, Lund University, Report 7058, 1993

[Fag96] Fagerlund, G.: Predicting the Service Life of Concrete Exposed to Frost Action Through a Modelling of the Water Absorption Process in the Air-Pore System. In: Jennings, Hamlin (Hrsg.) ; Kropp, Jörg (Hrsg.) ; Scrivener, Karen (Hrsg.): *The Modelling of Microstructure and its Potential for Studying Transport Properties and Durability.* Dordrecht : Springer Netherlands, 1996. – ISBN 978–90–481–4653–6, S. 503–537

[Fag04] Fagerlund, G.: *A Service Life Model for Internal Frost Damage in Concrete.* Schweden, Lund Institute of Technology, Report TVBM-3119, 2004

[FDD05] Funk, Werner ; Dammann, Vera ; Donnevert, Gerhild: *Qualitätssicherung in der analytischen Chemie: Anwendungen in der Umwelt-, Lebensmittel- und Werkstoffanalytik, Biotechnologie und Medizintechnik.* 2., vollständig überarbeitete und erw. Aufl. Weinheim : Wiley-VCH, 2005. – ISBN 3–527–31112–2

[FGS23] FGSV: *Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen*. Bd. 818: *Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton : M LP Beton*. Ausgabe 2023. Köln : FGSV Verlag, 2023. – ISBN 978–3–86446–356–3

[Fic55] Fick, Adolf: Ueber Diffusion. In: *Annalen der Physik und Chemie* 170 (1855), Nr. 1, S. 59–86. – ISSN 00033804

[FSW+22] Fjendbo, Simon ; Sørensen, Henrik E. ; Weerdt, Klaartje de ; Jakobsen, Ulla H. ; Geiker, Mette R.: Correlating the development of chloride profiles and microstructural changes in marine concrete up to ten years. In: *Cement and Concrete Composites* 131 (2022), Nr. 5, S. 104590. – ISSN 09589465

[GD15] Greve-Dierfeld, Stefanie M.: *Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit XC-exponierter Stahlbetonbauteile*. München, Technische Universität München, Dissertation, 2015

[Geh00] Gehlen, Christoph: *Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken: Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion*. Berlin [u.a.], Diss., 01.01.2000

[GHJE11] Gagné, Richard ; Houehanou, Ernesto ; Jolin, Marc ; Escaffit, Pascale: Study of the relationship between scaling resistance and sorptivity of concrete. In: *Canadian Journal of Civil Engineering* 38 (2011), Nr. 11, S. 1238–1248. – ISSN 0315–1468

[GLM11] Gehlen, Christoph ; Lowke, Dirk ; Milachowski, Charlotte: *Berichte der Bundesanstalt für Strassenwesen B, Brücken- und Ingenieurbau*. Bd. 84: *Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2): Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.460/2008/DRB*. Hannover and Bremerhaven : Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek and Wirtschaftsverl. NW Verl. für Neue Wiss, 2011 `https://edocs.tib.eu/files/e01fn14/797169202.pdf`. – ISBN 9783869181806

[Got19] Gottlieb, Cassian: *Einfluss der Korngröße auf die quantitative Elementanalyse heterogener, mineralischer Werkstoffe mittels der laserinduzierten Plasmaspektroskopie*, Universitätsbibliothek der TU Clausthal, Diss., 2019

[HA71] Hinton, James F. ; Amis, Edward S.: Solvation numbers of ions. In: *Chemical Reviews* 71 (1971), Nr. 6, S. 627–674. – ISSN 0009–2665

[Haa09] Haardt, P.: Brücken an Bundesfernstraßen - Schutz und Instandsetzung im Regelungsbereich der ZTV-ING. In: *beton* (12/2009), Nr. 12, S. S. 558–562

[Has14] Hasholt, Marianne T.: Air void structure and frost resistance: a challenge to Powers' spacing factor. In: *Materials and Structures* 47 (2014), Nr. 5, S. 911–923. – ISSN 1359–5997

[Hel61] Helmuth, R.A: Dimensional Changes of Hardened Portland Cement Pastes Caused by Temperature Changes. In: *Highway Research Board* (1961), Nr. Proc. 60

[Hof18] Hofmann, Andreas: *Physical Chemistry Essentials*. Cham : Springer International Publishing, 2018. – ISBN 978–3–319–74166–6

[Int06] *Bulletin / International Federation for Structural Concrete Model code*. Bd. 34: *Model code for service life design*. Lausanne : International Federation for Structural Concrete, 2006. – ISBN 2–88394–074–6

[Int15] *Bulletin / International Federation for Structural Conrete State-of-the-art report.* Bd. 76: *Benchmarking of deemed-to-satisfy provisions in standards: Durability of reinforced concrete structures exposed to chlorides ; state-of-the-art report*. Lausanne, Switzerland : Fédération internationale du béton, May 2015. – ISBN 978–2–88394–116–8

[Irb19] Irbe, Linda: *Rolle des Aluminiums in C-A-S-H bei chemischem Angriff auf Beton*, Technische Universität München, Dissertation, 2019

[Kap11] Kapteina, G.: *Modell zur Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Verkehrsbauwerken.* München, Technische Universität München, Dissertation, 2011

[Kau04] Kaufmann, Josef P.: Experimental identification of ice formation in small concrete pores. In: *Cement and Concrete Research* 34 (2004), Nr. 8, S. 1421–1427. – ISSN 00088846

[KDR99] Klemt, K. ; Dörr, J. ; Riedl. S.: A method to visualize mechnical microcracks injecting fluorescent epoxy resin. In: *Darmstadt concrete: annual journal on concrete and concrete structures* 1999 (1999), Nr. 14

[Kie83] Kiessl, Kurt: *Kapillarer und dampfförmiger Feuchtetransport in mehrsichtigen Bauteilen: rechnerische Erfassung und bauphysikalische Anwendung.* Essen, Universität-Gesamthochschule, Dissertation, 1983

[KIS22] Koenders, Eddie ; Imamoto, Kei-ichi ; Soive, Anthony: *Benchmarking Chloride Ingress Models on Real-life Case Studies—Marine Submerged and Road Sprayed Concrete Structures.* Bd. 37. Cham : Springer International Publishing, 2022. – ISBN 978–3–030–96421–4

[Kle12] Klein, Bernd: *FEM: Grundlagen und Anwendungen der Finite-Element-Methode im Maschinen- und Fahrzeugbau.* 9., verbesserte und erw. Aufl. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag, 2012 (Studium). – ISBN 978–3–8348–2134–8

[KLI20] Kapteina, Gesa ; Langer, Christoph ; Illguth, Marcus: Anwendungsmöglichkeiten der LIBS–Analyse für Stahlbeton. In: *Bautechnik* 97 (2020), Nr. 1, S. 32–40. – ISSN 0932–8351

[Klo74] Klopfer, Heinz: *Wassertransport durch Diffusion in Feststoffen: Insbesondere in Baustoffen, Kunststoffen, Beschichtungen: Zugl.: Stuttgart, Univ., Habil.-Schr., 1972.* Wiesbaden : Bauverl., 1974. – ISBN 3–7625–0383–4

[KTGG17] Kessler, Sylvia ; Thiel, Charlotte ; Grosse, Christian U. ; Gehlen, Christoph: Effect of freeze–thaw damage on chloride ingress into concrete. In: *Materials and Structures* 50 (2017), Nr. 2, S. 63. – ISSN 1359–5997

[Kur20] Kurzweil, Peter: *Angewandte Elektrochemie.* Wiesbaden : Springer Fachmedien Wiesbaden, 2020. – ISBN 978–3–658–32420–9

[KW52] Kruskal, William H. ; Wallis, W. A.: Use of Ranks in One-Criterion Variance Analysis. In: *Journal of the American Statistical Association* 47 (1952), Nr. 260, S. 583. `http://dx.doi.org/10.2307/2280779`. – DOI 10.2307/2280779. – ISSN 01621459

[Lay06] Lay, Sascha: *Abschätzung der Wahrscheinlichkeit tausalzinduzierter Bewehrungskorrosion - Baustein eines Systems zum Lebenszyklusmanagement von Stahlbetonbauwerken.* München, Technical University of Munich, Dissertation, 2006

[LH15] Liu, Zhichao ; Hansen, Will: A Hypothesis for Salt Frost Scaling in Cementitious Materials. In: *Journal of Advanced Concrete Technology* 13 (2015), Nr. 9, S. 403–414. – ISSN 1346–8014

[LH16] Liu, Zhichao ; Hansen, Will: Moisture uptake in concrete under freezing–thawing exposure. In: *Magazine of Concrete Research* 68 (2016), Nr. 12, S. 619–631. – ISSN 0024–9831

[Lin98] Lindmark, Sture: *Report TVBM*. Bd. 1017: *Mechanisms of salt frost scaling of Portland cement-bound materials: Studies and hypothesis*. Lund, 1998. – ISBN 91–628–3285–9

[LK22] Langer, Christoph ; Kapteina, Gesa: Testing the Bromide penetration resistance of concrete: substitution of NaCl by NaBr in Rapide Chloride/Bromide Migration Test (RCM/RBM). In: *MATEC Web of Conferences* 364 (2022), S. 02022

[LK23] Langer, Christoph ; Kapteina, Gesa: Frosteinfluss auf den Chloridtransport in Beton – Kennwerte. In: *ce/papers* 6 (2023), Nr. 6, S. 1205–1213. `http://dx.doi.org/10.1002/cepa.2953`. – DOI 10.1002/cepa.2953. – ISSN 2509–7075

[Lud96] Ludwig, Horst-Michael: *Zur Rolle von Phasenumwandlungen bei der Frost- und FrostTausalz-Belastung von Beton*, Dissertation, 1996

[MGG+18] Millar, S. ; Gottlieb, C. ; Günther, T. ; Sankat, N. ; Wilsch, G. ; Kruschwitz, S.: Chlorine determination in cement-bound materials with Laser-induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) – A review and validation. In: *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 147 (2018), Nr. 7, S. 1–8. – ISSN 0584–8547

[Mil] Millar, Steven: *Zur ortsaufgelösten Quantifizierung von Chlorid in Beton mit der laserinduzierten Plasmaspektroskopie*

[MKW19] Millar, S. ; Kruschwitz, S. ; Wilsch, G.: Determination of total chloride content in cement pastes with laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS). In: *Cement and Concrete Research* 117 (2019), S. 16–22. – ISSN 00088846

[ML17] Müller, M. ; Ludwig, H.-M.: Glue spall: Ein geeignetes Modell für den Frost-Tausalz-Angriff? In: *Beiträge zur 5. DAfStb-Jahrestagung mit 58. Forschungskolloquium - Forschungskolloquium Band 1* (2017)

[MLE19] Müller, Matthias ; Ludwig, Horst-Michael ; Ehrhardt, Dirk: Frost–Tausalz–Angriff auf Beton. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2019), Nr. 6, S. 392–400. – ISSN 0005–9900

[MNH09] Müller, S. (Hrsg.) ; Nolting, U. (Hrsg.) ; Haist, M. (Hrsg.): *Dauerhafter Beton - Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung: Symposium, 6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Universität Karlsruhe (TH), 12. März 2009*. Hannover and Karlsruhe : Technische Informationsbibliothek u. Universitätsbibliothek, Universitätsverlag, 2009. – ISBN 978–3–86644–341–9

[MPBT99] Marchand, J. ; Pigeon, M. ; Bager, D. ; TALBOT, C.: Influence of cloride solution concentration on deicer salt scaling deterioration of concrete. In: *ACI Materials Journal* 96 (1999), Nr. 4, S. 429–435

[Mül21] Müller, Matthias: *Frost-Tausalz-Angriff auf Beton - Neue Erkenntnisse zum Schadensmechanismus*, Bauhaus-Universität Weimar and F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde, Dissertation, 2021

[NALU00] Nilsson, L. O. ; Andersen, A. ; Luping, T. ; Utgennant, P.: Chloride ingress data from field exposure in a Swedish road environment. In: *Department of Buildings and Materials* 2000 (2000), Nr. P-00:5

[Nil22] Nilsson, Lars-Olof: Chloride profiles with a peak – why and what are the consequences for predictions? In: *MATEC Web of Conferences* 364 (2022), Nr. 4, S. 02024

[NV11] Neroth, Günter ; Vollenschaar, Dieter: *Wendehorst Baustoffkunde: Grundlagen - Baustoffe - Oberflächenschutz ; mit 363 Tabellen*. 27., vollständig überarbeitete Auflage. Wiesbaden : Vieweg+Teubner Verlag / Springer Fachmedien Wiesbaden GmbH Wiesbaden, 2011. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9919-4. http://dx.doi.org/10.1007/978-3-8348-9919-4. – ISBN 978–3–8351–0225–5

[ONN92] Otsuki, N. ; Nagataki, S. ; Nakashita, K.: Evaluation of AgNO3 Solution Spray Method for Measurement of Chloride Penetration into Hardened Cementitious Matrix Materials. In: *ACI materials journal : a journal of the American Concrete Institute* (1992), Nr. Vol. 89, No. 6, S. 587–592

[PB48] Powers, T. C. ; Brownyard, T. L.: *Bulletin*. Bd. 22: *Studies of the Physical Properties of Hardened Portland Cement Paste*. Vol. 43. Chicago : JOURNAL OF THE AMERICAN CONCRETE INSTITUTE, 1948

[PCHM65] Powers, T. C. ; Copeland, L. E. ; Hayes, J. C. ; Mann, H. M.: Permeability of Portland cement paste. (1965)

[Pfa68] Pfanzagl, Johann: *Allgemeine Methodenlehre der Statistik: Höhere Methoden unter besonderer Berücksichtigung der Anwendungen in Naturwissenschaften, Medizin und Technik*. Bd. 2. De Gruyter, 1968. – ISBN 9783111681979

[PH53] Powers, T. C. ; Helmuth, R. A.: Theory of Volume Changes in Hardened Portland-Cement Paste During Freezing. (1953), S. 285–297

[Pig14] Pigeon, M.: *Durability of Concrete in Cold Climates*. CRC Press, 2014. http://dx.doi.org/10.1201/9781482271447. http://dx.doi.org/10.1201/9781482271447. – ISBN 9780429177644

[PKI21] Pourbozorgi Langroudi, Pakdad ; Kapteina, Gesa ; Illguth, Marcus: Automated Distinction between Cement Paste and Aggregates of Concrete Using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. In: *Materials (Basel, Switzerland)* 14 (2021), Nr. 16. – ISSN 1996–1944

[Pow45] Powers, T. C.: *A working hypothesis for further studies of frost resistance*. Vol. 16 No. 4. Detroit, Michigan : MMMM, 1945. – ISBN 1111111111

[Pow56] Powers, T. C.: The physical Structure and engineering properties of concrete_Powers. (1956)

[Pow65] Powers, T. C.: *Mechanism of Frost Action in Concrete*. College Park, MD United States 20742, University of Maryland, Diss., 1965

[Pri21] Prischtscheptschuk, Manuel: *Modellierung eines Frostangriffes auf Beton als Zweischichtsystem mittels FEM auf Basis von empirischen Daten aus CDF und modifizierten Migrationsprüfungen*, HafenCity Universität Hamburg, Masterarbeit, 2021. https://repos.hcu-hamburg.de/handle/hcu/910

[PSE81] Page, C. L. ; Short, N. R. ; El Tarras, A.: Diffusion of chloride ions in hardened cement pastes. In: *Cement and Concrete Research* 11 (1981), Nr. 3, S. 395–406. – ISSN 00088846

[PW49] Powers, T. C. ; Willis, T. F.: The Air Requirement of Frost-Resistant Concrete. In: *Proceedings of the Highway Research Board 29:184-211* (1949)

[Rah16] Rahimi, Amir: *Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung.* München, Technische Universität München, Dissertation, 2016

[Rau92] Raupach, Michael: *Deutscher Ausschuß für Stahlbeton.* Bd. 433: *Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton: Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss.* Berlin : Beuth, 1992. – ISBN 3–410–65633–2

[RG08] Rucker-Gramm, Petra: *Modellierung des Feuchte- und Salztransports unter Berücksichtigung der Selbstabdichtung in zementgebundenen Baustoffen.* München, Technische Universität München, Dissertation, 2008

[RG10] Rucker-Gramm, Petra: *Modellierung des Feuchte- und Salztransports unter Berücksichtigung der Selbstabdichtung in zementgebundenen Baustoffen.* München, Technische Universität München, Dissertation, 2010

[RG18] Rahimi, Amir ; Gehlen, Christoph: Semiprobabilistische Dauerhaftigkeitsbemessung von Stahlbetonbauten unter Chlorideinwirkung. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 113 (2018), Nr. 1, S. 13–21. `http://dx.doi.org/10.1002/best.201700062`. – DOI 10.1002/best.201700062. – ISSN 00059900

[Ric69] Richartz, W.: Die Bindung von Chlorid bei der Zementerhärtung. In: *Zement Kalk Gips* (1969), Nr. Heft 10, S. 447–456

[Röh12] Röhling, Stefan: *Betonbau: Band 2 - Hydratation - junger Beton - Festbeton.* Stuttgart : Fraunhofer IRB-Verl., 2012. – ISBN 978–3–8167–8645–0

[Rok20] Rokoss, Nils-Christian: *Entwicklung eines FEM - Diffusionsmodells für Chloridtransport in Beton*, HafenCity Universität Hamburg, Bachelorarbeit, 2020. `https://repos.hcu-hamburg.de/handle/hcu/909`

[Rös18] Röser, F.: *Über die Reaktivität von Betonzusatzstoffen-Ein versuchsbasiertes Hydratationsmodell-.* Darmstadt, TU Darmstadt, Dissertation, 2018

[SA97] Setzer, M. ; Auberg, Rainer: *RILEM proceedings.* Bd. 34: *Frost resistance of concrete: Proceedings of the International RILEM Workshop on Resistance of Concrete to Freezing and Thawing with or without De-icing Chemicals, University of Essen, September 22-23, 1997.* 1st ed. London and New York : E & FN Spon, 1997. – ISBN 0419229000

[Sch02] Schneider, M. (.: *Zement-Taschenbuch.* Düsseldorf : Verlag Bau und Technik, 2002. – ISBN 978–3764004279

[Sch16] Schweda, E.: *Jander/Blasius anorganische Chemie I.* 18. Stuttgart : Hirzel Verlag, 2016. – ISBN 978–3–7776–2567–6

[Set] *CDF Test – Test method for the freeze-thaw resistance of concrete - tests with sodium chloride solution (CDF)*

[Set99] Setzer, M. J.: Micro ice lens formation and fost damage. In: *RILEM* (1999), Nr. Minneapolis Workshop in Frost Damage in Concrete, S. 1–15

[Set02] Setzer, M. J.: Development of the micro-ice-lens model. In: *International RILEM Workshop on Frost Resistance of Concrete* (2002), Nr. Pro024, S. 133–145

[Sin82] Sing, K. S. W.: Reporting physisorption data for gas/solid systems with special reference to the determination of surface area and porosity (Provisional): Pure and Applied Chemistry, 54(11), 2201-2218. (1982)

[Sny65] Snyder, M. J.: Protective Coatings to Prevent Deterioration of Concrete by deicing Chemicals. In: *National Cooperative Highway research Program* (1965), Nr. Report 16

[SS91a] Siebel, E. ; Sprung, S.: Einfluß des Kalksteins im Portlandkalksteinzement auf die Dauerhaftigkeit von Beton. In: *beton* (1991), Nr. 3, S. 113–117

[SS91b] Siebel, E. ; Sprung, S.: Einfluß des Kalksteins im Portlandkalksteinzement auf die Dauerhaftigkeit von Beton. In: *beton* (1991), Nr. 4, S. 185–188

[SSPFH19] Stengel, Thorsten ; Schiessl-Pecka, Angelika ; Feuerecker, Josef ; Himsel, Katharina: Modifizierung des RCM–Tests zur Optimierung der Messpräzision, Versuchsdauer und Wirtschaftlichkeit. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 114 (2019), Nr. 10, S. 737–746. – ISSN 00059900

[Ste00] Steffens, Alexander: *Bericht / Institut für Statik Technische Universität Braunschweig.* Bd. 90: *Modellierung von Karbonatisierung und Chloridbindung zur numerischen Analyse der Korrosionsgefährdung der Betonbewehrung: Zugl.: Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2000*. Braunschweig : Inst. für Statik Techn. Univ. Braunschweig, 2000. – ISBN 3926031921

[Stu97] Studer, W.: Internal comparative tests on frost deicing salt resistance. In: *International Workshop on the Resistance of Concrete to Scaling Due to Freezing in* (1997), S. 259–270

[Tab16] Taber, S.: The growth of crystals. In: *American Journal of Science* 41 (1916), Nr. 4, S. 532–556

[Tab29] Taber, S.: Frost heaving. In: *The Journal of Geology* 37 (1929), S. 428–461

[Tan96] Tang, Luping: *Chloride Transport in concrete - Measurement and Prediction.* Göteborg, Chalmers University of Technology, Dissertation, 1996

[TLG20] Thiel, C. ; Lomakovych, V. ; Gehlen, C.: Freeze-Thaw Deicing salt Attack on Concrete: Towards Engineering Modelling. In: *XV International Conference on Durability of Building Materials and Components* (2020)

[TN93] Tang, Luping ; Nilsson, Lars-Olof: Chloride binding capacity and binding isotherms of OPC pastes and mortars. In: *Cement and Concrete Research* 23 (1993), Nr. 2, S. 247–253. – ISSN 00088846

[Tri89a] Tritthart, Josef: Chloride binding in cement I. Investigations to determine the composition of porewater in hardened cement. In: *Cement and Concrete Research* 19 (1989), Nr. 4, S. 586–594. – ISSN 00088846

[Tri89b] Tritthart, Josef: Chloride binding in cement II. The influence of the hydroxide concentration in the pore solution of hardened cement paste on chloride binding. In: *Cement and Concrete Research* 19 (1989), Nr. 5, S. 683–691. – ISSN 00088846

[Tuu82] Tuutti, Kyösti: *Corrosion of steel in concrete.* Stockholm, Lund University, Dissertation, 1982

[VK56] Verbeck, G. J. ; Klieger, P.: Studies of 'salt' scaling of concrete. In: *Highway Research Board Bulletin* (1956), Nr. 150

[Vol91] Volkwein, A.: *Untersuchungen über das Eindringen von Wasser und Chlorid in Beton.* München, Technical University of Munich, Dissertation, 1991

[VS07a] Valenza, John J. ; Scherer, George W.: Mechanism for salt scaling of a cementitious surface. In: *Materials and Structures* 40 (2007), Nr. 3, S. 259–268. – ISSN 1359–5997

[VS07b] Valenza, John J. ; Scherer, George W.: A review of salt scaling: I. Phenomenology. In: *Cement and Concrete Research* 37 (2007), Nr. 7, S. 1007–1021. – ISSN 00088846

[VS07c] Valenza, John J. ; Scherer, George W.: A review of salt scaling: II. Mechanisms. In: *Cement and Concrete Research* 37 (2007), Nr. 7, S. 1022–1034. – ISSN 00088846

[VWG+23] Völker, Tobias ; Wilsch, Gerd ; Gornushkin, Igor B. ; Kratochvilová, Lucie ; Poříz-ka, Pavel ; Kaiser, Jozef ; Millar, Steven ; Galbács, Gábor ; Palásti, Dávid J. ; Ja-novszky, Patrick M. ; Eto, Shuzo ; Langer, Christoph ; Kapteina, Gesa ; Illguth, Marcus ; Götz, Jenny ; Licht, Marina ; Raupach, Michael ; Elhamdaoui, Ismail ; Sab-sabi, Mohamad ; Bouchard, Paul ; Nagli, Lev ; Gaft, Michael ; Raichlin, Yosef ; Fernández-Menéndez, Luis J. ; Méndez-López, Cristina ; Bordel, Nerea ; Gottlieb, Cassian ; Bohling, Christian ; Finotello, Riccardo ; L'Hermite, Daniel ; Quéré, Céline ; Lierenfeld, Matthias B.: Interlaboratory comparison for quantitative chlorine analysis in cement pastes with laser induced breakdown spectroscopy. In: *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* 202 (2023), Nr. 9, S. 106632. – ISSN 0584–8547

[Wal99] Waller, Vincent: *Relations entre composition des betons, exothermie en cours de prise et resistance en compression.* Paris, l'École Nationale des Ponts et Chaussées, Dissertation, 1999

[Wee21] Weerdt, Klaartje de: Chloride binding in concrete: recent investigations and recognised knowledge gaps: RILEM Robert L'Hermite Medal Paper 2021. In: *Materials and Structures* 54 (2021), Nr. 6. – ISSN 1359–5997

[Wie05] Wiens, Udo: *Deutscher Ausschuss für Stahlbeton im DIN Deutsches Institut für Normung e.V.* Bd. 551: *Zur Wirkung von Steinkohlenflugasche auf die chloridinduzierte Korrorion von Stahl in Beton: Zugl.: Aachen, Techn. Hochsch., Diss., 2004*. 1. Aufl. Berlin : Beuth, 2005. – ISBN 3410657517

[Wit79] Wittmann, F. H.: Feuchtigkeitsaufnahme und Feuchtigkeitstransport in porösen Baustoffen. In: *Bautenschutz und Bausanierung* (1979), Nr. Vol. 2, Nr. 4, S. 115–124

[Wit92] Wittmann, F. H.: Porosität und Feuchtigkeitsgehalt. In: *WTA- Schriftenreihe* (1992), Nr. 3., S. 1–22

[WU14] Wang, Licheng ; Ueda, Tamon: Mesoscale Modeling of Chloride Penetration in Unsaturated Concrete Damaged by Freeze-Thaw Cycling. In: *Journal of Materials in Civil Engineering* 26 (2014), Nr. 5, S. 955–965. – ISSN 0899–1561

[YASS08] Yuan, Qiang ; Audenaert, Katrien ; Shi, Caijun ; Schutter, Geert de: Effect of temperature on transport of chloride ions in concrete. In: Alexander, Mark (Hrsg.) ; Beushausen, Hans-Dieter (Hrsg.) ; Dehn, Frank (Hrsg.) ; Moyo, Pilate (Hrsg.): *Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting II.* CRC Press, 2008. – ISBN 978–0–415–46850–3, S. 159–160

[Yen15] Yener, Engin: A new frost salt scaling mechanism for concrete pavements based on brine rejection from ice layer adhered to concrete surface. In: *Road Materials and Pavement Design* 16 (2015), Nr. 1, S. 89–100. – ISSN 1468–0629

[YSG+18] Yang, Xiaolong ; Shen, Aiqin ; Guo, Yinchuan ; Zhou, Shengbo ; He, Tianqin: Deterioration mechanism of interface transition zone of concrete pavement under fatigue load and freeze-thaw coupling in cold climatic areas. In: *Construction and Building Materials* 160 (2018), Nr. 1, S. 588–597. – ISSN 09500618

[ZG96] Zhang, Tiewei ; Gjørv, Odd E.: Diffusion behavior of chloride ions in concrete. In: *Cement and Concrete Research* 26 (1996), Nr. 6, S. 907–917. http://dx.doi.org/10.1016/0008-8846(96)00069-5. – DOI 10.1016/0008–8846(96)00069–5. – ISSN 00088846

[ZWV+17] Zhang, Peng ; Wittmann, Folker H. ; Vogel, Michael ; Müller, Harald S. ; Zhao, Tiejun: Influence of freeze-thaw cycles on capillary absorption and chloride penetration into concrete. In: *Cement and Concrete Research* 100 (2017), Nr. 2, S. 60–67. – ISSN 00088846

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Einheit	Kurzerläuterung
1/k	[-]	Relative Ergebnisunsicherheit zur Charakterisierung der Bestimmungsgrenze nach DIN 32645
a_0	[m]	Mittelwert aus 5 PK, lange Seite des CDF-PK
Abb.	[-]	Abbildung
$AgBr$	[-]	Silberbromid
$AgCl$	[-]	Silberchlorid
Al_2O_3	[-]	Aluminium(III)-oxid
$AgNO_3$	[-]	Silbernitrat, Indikator für Halogene wie Cl^-, Br^-
α	[-]	Signifikanzniveau (Fehler 1. Art) nach DIN 32645
β	[-]	Signifikanzniveau (Fehler 2. Art) nach DIN 32645
CDF	[-]	Frost-Tausalzprüfung, zyklische Frost-Tausalz-Wechsel (FTSW) (engl.: Capillary suction of Deicing Solution and Freeze-thaw Test)
CEM	[-]	Nomenklatur für Zement nach DIN EN 197 (engl.: Cement)
b_0	[m]	Mittelwert aus 5 PK, kurze Seite des CDF-PK
Br	[-]	Bromid
c_0	[mol/l]	Cl^- oder Br^--Konzentration der Kaliumhydroxydlösung Indikator $AgNO_3$ stattfindet
c_d	[mol/l]	Farbumschlag mit $AgNO_3$ bei einer Cl^- oder Br^--Konzentration 0,07 [mol/l]
$c_{d,Br,LIBS}$	[M.-%/b*]	farbauschlaggebender Bromidgehalt mit LIBS
$c_{d,Cl,LIBS}$	[M.-%/b*]	farbauschlaggebender Chloridgehalt mit LIBS
C_2S	[-]	Dicalciumsilicat (Baustoffsymbol: Belit)
C_3S	[-]	Tricalciumsilicat (Baustoffsymbol: Alit)
C_3A	[-]	Tricalciumaluminat (Baustoffsymbol: Aluminat)
C_4AF	[-]	Calciumaluminatferrit (Baustoffsymbol: Ferrit)
Cl	[-]	Chlorid
K	[-]	Calcium
CaO	[-]	ungelöschter Kalk Calciumoxid
$CaCO_3$	[-]	Calciumcarbonat, Kalkstein
$Ca(OH)_2$	[-]	Calciumhydroxid (Baustoffbez.: Portlandit)
CoV	[%]	Variationskoeffizient, (Coefficient of Variation)
C_{Sa}	[M.-%/b*]	Extrapolierte Oberflächenchloridkonzentration nach Ansatz I zum Betrachtungszeitpunkt t
C-S-H-Phasen	[-]	Calciumsilicathydrate
DGL	[-]	Differentialgleichung
DGZfP	[-]	Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung e.V.
d. h.	[-]	das heisst
$D^I_{F2}(t)$	[m^2/s]	effektiver Chloriddiffusionskoeffizient zum Betrachtungszeitpunkt t
DIN	[-]	Deutsches Institut für Normung e. V.

Fortsetzung des Abkürzungsverzeichnisses

Abkürzung	Einheit	Kurzerläuterung
E	[V/m]	Elektrische Feldstärke in Abhängigkeit der Probekörperhöhe
EN	[-]	Europäische Normung
erf^{-1}	[-]	inverse Fehlerfunktion in Abhängigkeit des Farbumschlagpunktes c_d und der Cl^-- oder Br^--Konzentration c_0
etc.	[-]	und Weiteres (lat.: et cetera)
F	[J/(V·mol)]	Faraday'sche Konstante, 9,649$cdot10^4$
Fe_2O_3	[-]	Eisen(III)-oxid
FEM	[-]	Finite-Elemente-Methode
g	[g]	Gramm
FTSW	[-]s	Frost-Tausalz-Wechsel
h	[h]	Versuchslaufzeit des Migrationstests in Stunden
H	[-]	kapillare Steighöhe H
$h_{Frost,n}$	[m]	berechnete, abgewitterte Höhe nach dem n-ten FTSW
HS	[-]	Hüttensand (Baustoffsymbol: H, HÜS)
H_2O	[-]	Wasser
i. d. R.	[-]	in der Regel
$\int_a^b$	[M.-%/b*] o. [mAh]	Intervall der Br^--, Cl^--Mengen o. Stromflüsse mit den Intervallgrenzen a und b
K	[-]	Kalium
kg	[kg]	Kilogramm
l	[dm^3 o. l]	Liter
L	[-]	Kalksteinmehl (Baustoffsymbol: L), TOC < 0,5 M.-%
LL	[-]	Kalksteinmehl (Baustoffsymbol: L), TOC < 0,2 M.-%
LIBS	[-]	Laser-Induzierte Breakdown Spektroskopie
LP	[Vol.-%]	künstlich eingeführte Luftporen im Beton
m^3	[m^3]	Kubikmeter
M.	[-]	Masse
mA	[mA]	Stromstärke während Migrationstest in Milliampere
m_n	[kg/m^2]	abgewitterten Masse pro m^2 aus der CDF-Prüfung
$m_{Randzone}$	[kg/m^2]	Massen in der Betonrandzone vom Bindemittel, H_2O und GK_{Fein}
$M_{Frost,n}$	[kg]	Masse durch Multiplikation der abgewitterten Masse m_n mit der Prüffläche ($a_0 \cdot b_0$) [m^2] beim n-ten FTSW
M_{nss}	[$\cdot 10^{-12}$ m^2/s]	instationärer Migrationskoeffizient (engl.: non-study state)
N	[-]	Äquivalentkonzentration bzw. Stoffmengenkonzentration bezogen auf Äquivalente bzw. Äquivalentmengen (Normalität)

Fortsetzung des Abkürzungsverzeichnisses

Abkürzung	Einheit	Kurzerläuterung
Na	[-]	Natrium
$NaBr$	[-]	Salz Natriumbromid
$NaCl$	[-]	Salz Natriumchlorid
NaI	[-]	Salz Natriumiodid
ND	[-]	Normalverteilung (engl.: Normal Distribution)
NIST	[-]	National Institute of Standards and Technology
PE	[-]	Polyetylen
pH-Wert	[0 bis 14]	Wasserstoffionen-Konzentration (lat.: potentia Hydrogenii)
PK	[-]	Probekörper
Picometer	[$\cdot 10^{-12}$ m]	Ionenradius in Billionstel eines Meters
R	[J/(K·mol)]	Gaskonstante, 8,315
R^2	[-]	Bestimmtheitsmaß
RBM-Test	[-]	Schnellmigration mit dem Salz $NaBr$
RH	[%]	relative Luftfeuchtigkeit, maximale Wasserdampfmenge, die die Luft bei einer bestimmten Temperatur aufnehmen kann (engl.: Relative Humidity)
RCM-Test	[-]	Schnellmigration mit dem Salz $NaCl$
RDM	[%]	Relativer dynamischer E-Modul aus CDF-Prüfung
R_K	[m]	Kapillarradius
$\rho_{Randzone}$	[kg/m^3]	berechnete Rohdichte
SF	[-]	Silicastaub (Silica Fume) (Baustoffsymbol: D)
SFA	[-]	Steinkohleflugasche (Baustoffsymbol: kieselsäurereich (V), kalkreich (W))
σ		Standardabweichung in Abhängigkeit der Messeinheit
SiO_2	[-]	Siliciumdioxid
t	[s]	Versuchslaufzeit des Migrationstests in Sekunden
T	[K]	Absolute mittlere Temperatur
ϑ	°	Randwinkel $Theta$ des Wassers in der Kapillare
TOC	[-]	organischer Kohlenstoffgehalt (engl.: Total Organic Carbon)
u. a.	[-]	unter anderem
v. a.	[-]	vor allem
Vol.	[-]	Volumen
V	[V]	Spannung (Volt)
$V_{Randzone,n}$	[m^3]	Volumen des Probekörpers nach dem n-ten FTSW
w_f	[M.-%]	Materialfeuchte
w/b (z)-Wert	[-]	Verhältnis Wasser zu Bindemittel (Zement), hier: immer mit b, da z.T. Zusatzstoffe selbst beigemengt wurden
x	[mm]	Cl^- oder Br^--Eindringtiefe mit LIBS

Fortsetzung des Abkürzungsverzeichnisses

Abkürzung	Einheit	Kurzerläuterung
x_d	[mm]	mittlere Eindringtiefe der Cl^- oder Br^--Ionen mit dem Indikator $AgNO_3$
$x_{d,Br,LIBS}$	[mm]	mittlere Eindringtiefe der Br^--Ionen aus LIBS Bromidprofil
$x_{d,Cl,LIBS}$	[mm]	mittlere Eindringtiefe der Cl^--Ionen aus LIBS Chloridprofil
$x_{d,AgNO_3}$	[mm]	Cl^- oder Br^--Eindringtiefe mit dem Indikator $AgNO_3$
x_{EG}	[-]	Erfassungsgrenze von Cl^-, Br^- mit LIBS nach DIN 32645
z	[-]	Ionenladung, für Cl^- oder Br^--Ionen, 1
z. B.	[-]	zum Beispiel
z. T.	[-]	zum Teil