

Kombination von Prüfmethoden zum Nachweis des Widerstands gegen Frost- Tausalzbeanspruchung und Chlorideindringung für performance-optimierte Betone

Masterarbeit
von
Robert Thomas Lality

Technische Universität Graz

Fakultät für Bauingenieurwissenschaften

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

Graz, im Mai 2016

EIDESSTATTLICHE ERKLÄRUNG

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

Graz, am

.....

(Unterschrift)

STATUTORY DECLARATION

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

.....

date

.....

(signature)

Kurzfassung

Anhand von unterschiedlichen Prüfmethode und Versuchsaufbauten wird die Kombinierbarkeit der Prüfung der Frost-Tausalzbeständigkeit gemäß dem CDF-Test (XF) mit der Prüfung des Chlorideindringwiderstandes nach Nordtest 443 (XD) an einem nach ÖNORM entworfenem B5 Referenzbeton und zweier Ökobetonarten außerhalb der aktuellen Norm mit variierenden Rezepturen untersucht. Außerdem wird die Beständigkeit der Ökobetonarten gegenüber den Umwelteinflüssen (Frost mit Tausalz- und reiner Chloridangriff) geprüft und relativ zur Performance des Referenzbetons dargestellt.

Für jedes der beiden Prüfzenarien, die Frost-Tausalzprüfung und der Chlorideindringtest, werden im praktischen Teil der Arbeit Versuche durchgeführt und das Chlorideindringverhalten wird mit mehreren Analysemethoden untersucht. Zu diesen Methoden gehören die Flüssigprobenanalyse mittels Ionenchromatografie, die optische Eindringtiefe darstellung mit Silbernitrat, die Chloridprofilanalyse an Bohrmehlen aus mehreren Tiefenstufen und zuletzt die Chloridprofilanalyse an Dünnschliffen mit einer Mikrosonde. Bei der Flüssigprobenanalyse handelt es sich um eine Adaptierung des von Park et al [1] publizierten Kurzzeitdiffusionstests (STIT), bei dem von dem Chlorid-Ionenverbrauch der Lösung auf das Diffusionsverhalten der Proben Rückschlüsse gezogen werden.

Mit der Chloridprofilanalyse nach den Bohrmehlentnahmen können an den Proben, die drei Monate in NaCl gelagert wurden, ähnlich hohe Konzentrationen wie bei den CDF-Testproben (21-Tage in der gleichen Lösung) gemessen werden, obwohl die Diffusionskoeffizienten unterschiedlich sind. Zusätzlich sind andere Mechanismen, wie die Eislinsepumpe, für die ähnlichen Chloridprofile verantwortlich.

Mit Hilfe der Analyse der Bohrmehlproben kann außerdem auf die Chloridkonzentration an der Color change boundary (Farbumschlagsgrenze) der mit Silbernitrat besprühten Betonproben geschlossen werden.

Der modifizierte Kurzzeitdiffusionstest (STIT) kann keine brauchbaren Ergebnisse im Bezug auf das Eindringverhalten der Chlorid-Ionen liefern. Darum sind einzelne Parameter untersucht worden, die für das Ergebnis verantwortlich sind.

In all den unterschiedlichen praktischen Prüfmethode zeichnet sich trotz der geringen Anzahl an untersuchten Proben und der Teils hohen Streuung ein sehr deutlicher Trend ab: Der Ökobeton 1 und besonders der Ökobeton 2 mit seinen Hüttensandanteilen bietet gegenüber dem Referenzbeton einen erhöhten Chlorideindringwiderstand sowie eine höhere Frost-Tausalzbeständigkeit. Dieser Trend hinsichtlich der Chlorideindringung ist beim CDF-Test und beim Nordtest 443 ersichtlich.

Abstract

Based on various test methods and setups a reference B5 concrete series and two eco-concrete series with different composition are examined for their freeze-thaw with de-icing salt resistance, and for their chloride penetration characteristics. The results are then compared to each other. Furthermore it was investigated, if the CDF-Test (freeze-thaw with de-icing salt) and the Nordtest 443 (accelerated chloride penetration) can be combined.

For each of these mentioned performance characteristics a custom test setup is built to probe the concrete samples with the following test methods: an ionchromatography analysis of solutions, an optical quantification of the surface chloride penetration with AgNO_3 , a chloride profile analysis of bore dust extracted of several depth steps from the concrete samples and the analysis of thin sections with a microprobe. The aforementioned analysed solution is part of a modified test method called Short Term Diffusion Test conducted by Park et al [1]. With this method they have determined the diffusion coefficient by extracting small amounts of chloride solution over a period of days from a volume in which the concrete samples were placed into and measuring the declining chloride concentration of this solution.

The chloride profile analysis of the CDF-Test samples and of the 3 month old chloride penetration samples yield near identical chloride concentration levels. This is despite the very different mechanisms acquiring these concentrations as observed by the varying diffusion coefficients of the samples.

It is possible to calculate the chloride concentration levels of the colour change boundary of the split and with AgNO_3 sprayed samples with the data acquired from the analysed bore dust samples. The custom short term diffusion test yields no significant results, leading to the investigation of some parameters that may have caused the results.

In all conducted tests of this study there was one obvious trend: Ecological Concretes perform better in freeze-thaw with de-icing salt scenarios and their diffusion rates are also slower, especially for those eco-concretes with blast furnace slag as ingredient. This certain trend for the chloride penetration results is seen in the CDF-Test setup and in the accelerated chloride penetration setup.

Danksagung

An dieser Stelle bedanke ich mich bei allen Personen, die mich während meiner Diplomarbeit mit Rat und Tat unterstützt haben.

Für die Betreuung von universitärer Seite bedanke ich mich bei Herrn DI Dr.techn. Joachim Juhart für das Ermöglichen dieser spannenden Arbeit und bei Frau Claudia Baldermann, MSc., die oft für Fragen und Antworten zur Seite stand.

Letztlich gebührt meiner Familie der größte Dank.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand der Technik und der Wissenschaft	2
2.1	Chloride im Beton	2
2.1.1	Konvektion - Kapillartransport.....	2
2.1.2	Diffusion	3
2.1.3	Migration	4
2.1.4	Mikroeislinen/Mikroeseislinenpumpe	5
2.2	Prüfmethoden	7
2.2.1	CDF-Test – Prüfverfahren des Frost-Tau-Widerstands von Beton – Prüfung mit Taumittel-Lösung.....	7
2.2.2	Nordtest 443 Accelerated Chloride Penetration	9
2.2.3	Nordtest 492 Chloride Migration from Non-Steady-State Migration Experiments 10	
2.2.4	Neuer Kurzzeit-Diffusionstest (STIT)	12
2.3	Analytische Methoden	13
2.3.1	Ionenchromatografie.....	13
2.3.2	Mikrosonde	15
3	Material und Methodik	20
3.1	Probenherstellung und Vorbereitung	23
3.2	Angewandter CDF-Test	25
3.3	Angewandter beschleunigter Chlorideindringungstest	26
3.4	Probenvorbereitung und Bohrmehlgewinnung für die Analysen.....	28
3.5	Auswahl der Berechnungsgrundlage zur Bestimmung der Chlorid-Diffusionskoeffizienten	32
3.5.1	Chlorideindringung bei Verkehrsbauwerken nach Kapteina.....	32
3.5.2	Chlorideindringung bei Meeresbauwerken nach Gehlen Qlopüö+Ä.....	33
3.5.3	Neuer Kurzzeit Diffusionstest	34
3.5.4	Nordtest 443 Accelerated Chloride Penetration	35
3.6	Untersuchung der Fehlerquellen und Verbesserungsvorschläge.....	35
3.6.1	Leitfähigkeitsmessung und Abwitterungsmasse.....	35
3.6.2	Flüssigprobenanalyse.....	36
3.6.3	Bohrmehlanalyse	36

3.6.4	Mikrosondeanalyse.....	37
4	Auswertung der Ergebnisse.....	38
4.1	CDF-Test nach BAW Richtlinie.....	38
4.1.1	Leitfähigkeitsmessung der Lösung	38
4.1.2	Abwitterungsmasse	39
4.1.3	Spaltzugfestigkeit.....	40
4.1.4	Eindringtiefe darstellung mit Silbernitrat	41
4.1.5	Flüssigprobenentnahme (IC)	42
4.1.6	Bohrmehlanalyse (IC).....	45
4.1.7	Mikrosondenanalyse.....	48
4.2	Angewandter beschleunigter Chlorideindringungstest	53
4.2.1	Leitfähigkeitsmessung	54
4.2.2	Spaltzugfestigkeit.....	54
4.2.3	Eindringtiefe darstellung mit Silbernitrat	55
4.2.4	Flüssigprobenentnahme (IC)	57
4.2.5	Bohrmehlanalyse - Chloridprofile.....	58
4.2.6	Mikrosonde	62
5	Diskussion	69
5.1	Bewertung der Analysen.....	69
5.1.1	Leitfähigkeitsmessung	69
5.1.2	Eindringtiefe darstellung mit Silbernitrat	70
5.1.3	Lösungsentnahme	71
5.1.4	Bohrmehlanalyse	72
5.1.5	Mikrosondenanalyse.....	72
5.2	Vergleich 1: CDF-Test und beschleunigtes Chlorideindring-verfahren.....	77
5.3	Vergleich 2: Angewandtes Chlorideindringverfahren und neuer Kurzzeitdiffusionstest (STIT).....	80
5.4	Korrelation der mechanischen Kennwerte.....	81
6	Fazit	83
7	Literaturverzeichnis	85
8	Abbildungsverzeichnis	88
9	Tabellenverzeichnis	92
10	Anhang.....	93

1 Einleitung

In einem laufenden Forschungsprojekt werden „Ökobetone“ am Institut für Materialprüfung und Baustofftechnologie der TU Graz für unterschiedliche Anwendungsbereiche und entsprechende Expositionsklassen entwickelt. Im Gegensatz zu konventionellen Rezepturen substituiert die „Ökobetonmischung“ einen großen Anteil des Portlandzementes und des Portlandkompositzementes mit inerten oder reaktiven Zusatzstoffen (z. B.: Kalkmehl und Hüttensand), und erreicht mit dieser Herangehensweise ein niedrigeres Treibhauspotenzial, sowie einen niedrigen Primärenergiebedarf. Da die Zementindustrie für etwa 5% des globalen CO₂-Ausstoßes verantwortlich ist [2] [3], wird versucht, Zementmenge und damit verbunden, Kohlendioxid einzusparen. Die Zusammensetzung der erwähnten Betonsorten liegen deutlich außerhalb der von der ÖNORM EN 206 [4] spezifizierten Grenzwerte (W/B-Wert und Bindemittelmenge). Statt dem deskriptiven Konzept der genannten Norm mit einem Mindestbindemittelgehalt und maximalen W/B-Wert zu folgen, ist der Nachweis der gleichen oder besseren Leistungsfähigkeit zu erbringen. In der Literatur [5] nennt sich dies ein "Equivalent Concrete Performance Concept" (ECPC), das einen Vergleich zwischen einem nach Norm hergestellten Beton mit einem Beton variierender Rezeptur, aber mit gleichem Anwendungszweck, anstellt. Vergleichsparameter sind üblicherweise die Festigkeit bzw. die Dauerhaftigkeit.

Um nun die Leistungsfähigkeit einzelner Sorten objektiv beurteilen zu können, bedarf es geregelte Prüfverfahren für:

- Karbonatisierung (XC1-XC4)
- Eintrag von Chloriden in den Beton (XD1-XD3)
- Betonangriff durch Frost mit und ohne Taumittel (XF1-XF4)
- Betonangriff durch chemischen Angriff aus der Umgebung (XA1-XA3) und
- Betonangriff durch Verschleißbeanspruchung (XM1-3)

Für alle aufgezählten Expositionsklassen sind nun Reihen von Betonproben je Sorte herzustellen, um sie zu vergleichen.

Da gewisse Abläufe und auftretende physikalische Effekte bei der Frostprüfung mit Tausalz (CDF-Test, XF2 und XF4) und der reinen Chloridprüfung (Diffusionstest, XD) sehr ähnlich sind, bietet es sich an, nach Möglichkeiten zu suchen, um diese Prüfmethoden zu kombinieren. Das aus der erwähnten Kombination resultierende Potenzial einer Verkürzung der Testlaufzeit, sowie eine reduzierte Anzahl an benötigten Serien von Probewürfeln ist eine Motivationsquelle für die Master-Arbeit. Zudem soll die Arbeit zum Verständnis der im Beton ablaufenden physikalischen und chemischen Mechanismen beitragen und auch neue Erkenntnisse der den entsprechend der Betonsortenkurzbezeichnung „B5“ der ÖNORM B4710-1 spezifizierten Ökobetone im Vergleich zu den Referenzbetonen im Bezug auf den Chlorideintrag bringen. Die Arbeit beinhaltet eine Literaturrecherche, Laborversuche sowie eine Auswertung der analytischen Methode.

2 Stand der Technik und der Wissenschaft

Dieses Kapitel behandelt alle physikalischen Erscheinungen und die speziellen Prüfmethode, die für den Überblick der gesamten Arbeit von Relevanz sind. Um ein allgemeines Verständnis von dem Eindringen der Chlorid-Ionen in den Beton zu erhalten, wurden die Begriffe Diffusion, Kapillarwirkung, Konvektion und Konzentrationsmigration recherchiert, erläutert und im Fall der Diffusion die Interaktionen und aber auch Unterschiede zur Konvektion in den nachfolgenden Punkten dargestellt. Im Anschluss sind die Vorgehensweisen der zwei Prüfmethode, die im Labor zum Einsatz kamen, exzerpiert.

2.1 Chloride im Beton

Der Betonbau gehört zu den dauerhaften und gleichzeitig leistungsfähigen Lösungen im Bauwesen. Ein wichtiger Aspekt, der maßgebend die Langlebigkeit beeinflusst, ist die Passivierung des Betonstahls. Umgeben vom alkalischen Milieu ($\text{pH} = 12,5 - 13,5$) des Betons bildet sich eine Oxidschicht auf dem Bewehrungsstahl, ähnlich der von Aluminium, Chrom oder Zink, die das Oxidieren des Stahls zu Eisenoxid fast zur Gänze stoppt. Ist diese Schutzschicht im Bauteil durch äußeren Einfluss beeinträchtigt, beginnt der Stahl erneut zu rosten. Einer der Angriffe, die solche Schädigungsprozesse aktivieren können, ist die **chlorid-induzierte Korrosion**. Dabei dringen Chlorid-Ionen als Lösung immer tiefer in den Beton ein, bis an der Bewehrungsebene eine ausreichend hohe Ionen-Konzentration für eine Oxidation vorhanden ist [6] [7]. Die Chloridbindekapazität kann im geringen Maße die Korrosion des Stahls verzögern, da nur freie Chlorid-Ionen zur Schädigung beitragen. Um die Chloride chemisch binden zu können, sind Aluminat-Phasen (C_3A und C_4AF) nötig. Aus der Reaktion der genannten Phasen mit der Cl-Lösung entsteht das Friedelsche Salz (=stabilste Cl-Phase im Beton) und darüber hinaus Trichlorhydrat. [6]

Jene Transportmechanismen, die einen Eintrag von Chlorid in das Bauteil hervorrufen können und für die Prüfmethode eine wichtige Rolle spielen, sind:

- Kapillarität
- Diffusion
- Permeation (in manchen Fällen ident zu Diffusion)
- Chlorid-Immigration
- Konvektion
- Mikroislinsenbildung und Mikroislinsenpumpe
- Einbau von Gesteinskörnungen mit gebundenem Chlorid

In den folgenden Unterkapiteln werden einige der erwähnten Prozesse genauer erläutert.

2.1.1 Konvektion - Kapillartransport

Die chemischen Reaktionen, die zur Erhärtung des Betons unterschiedlicher Sorten (Leichtbeton, Ökobeton, ultra-hochfester Beton - UHPC) führen, verhalten sich aufgrund des gleichen hydraulisch-bindenden Ausgangsmaterials (Zement) ident. Verschiedene Zusatzmittel können viele Parameter eines Betons (z. B. Verarbeitbarkeit) steuern, so auch

die Porosität, die auf bis zu 1,5% des Gesamtvolumens gesenkt werden kann. Genau diese nicht zu vermeidenden Poren im Beton, aktivieren in nasser Umgebung das kapillare Saugen, das Lösungen bis zum Erreichen des Sättigungsgrades des Porensystems aufnimmt. Veranschaulichend kann eine Pore als ein zylindrisches Volumen mit sehr kleinem Durchmesser dargestellt werden, an der das Wasser unter dem Einfluss der Grenzflächenspannung „hinaufklettert“. Die maximale kapillare Steighöhe oder Eindringtiefe ist erreicht, wenn die Zugkraft an der Grenzfläche gleich der entgegengesetzten Kraft des Eigengewichts ist [7] [8].

Kapteina [7] stellte fest, dass das vereinfachte Modell mit Zylindern zwar leichter zu verstehen ist, jedoch sich für die Beschreibung des Verhaltens im Beton weniger eignet. Dieser besitzt als Werkstoff ein Porensystem mit verschiedenen großen Radien und Geometrien. Zusätzlich kann der Beton das Wasser aus den Kapillarporen in die Gelporen umlagern, die darauffolgend quellen, und so den Transport im Gefüge reduzieren bzw. auch unterbrechen. Mechanismen dieser Art tragen dazu bei, dass das vereinfachte Schema der kapillaren Steighöhe (1) eine höhere Wasseraufnahmegeschwindigkeit gegenüber dem reellen Wert errechnet. [7]

$$h = \frac{2\sigma \cdot \cos\delta}{r \cdot g \cdot \rho} \quad (1)$$

mit

- σ Oberflächenspannung des Wassers
- δ Randwinkel des Wassers gegen den Feststoff
- r Radius der Kapillare
- g Erdbeschleunigung
- ρ Dichte des Wassers

Auf den Werkstoff Beton bezogen, bedeutet Konvektion allgemein einen Transport von gelösten Ionen mit dem eindringenden Wasser, dass entweder durch den Hydratationszog von jungen Betonen stattfindet oder über die anfangs beschriebene Kapillarwirkung von erhärteten Betonen geschieht [6]. Letzterer Mechanismus kommt bei den verwendeten Prüfungen zu tragen, bei der das Hauptaugenmerk auf die gelösten Chlorid-Ionen gelegt wird. Ist das kapillare Saugen der oberflächennahen Poren abgeschlossen (Sättigungszustand), wechselt der Beförderungsmechanismus zur nachfolgend erläuterten Diffusion.

2.1.2 Diffusion

Physikalisch betrachtet ist die Diffusion eine Durchmischung mehrerer Stoffe (z.B.: Gase, Flüssigkeiten) durch die gleichmäßige Verteilung von Teilchen (z.B.: Atome, Moleküle Ladungsträger) über eine bestimmte Zeitperiode. Es bewegen sich bei unterschiedlich hoher Teilchenkonzentration in einem Medium Moleküle entlang eines Konzentrationsgradienten proportional in Richtung der geringeren Teilchendichte, bis sich ein Gleichgewicht einstellt. Der Transportmechanismus ist bei stationären, zeitlich konstanten Bedingungen im ersten Fick'schen Diffusionsgesetz (adaptiertes Wärmeleitungsgesetz) beschrieben. Bezeichnend für

das proportionale Verteilungsverhalten steht der Diffusionskoeffizient, der als inverser Diffusionswiderstand verstanden werden kann. Sind zeitlich und örtlich variable Konzentrationen vorhanden, gilt das zweite Fick'sche Diffusionsgesetz. [7] [9]

Bei Betonen ist zu beachten, dass instationäre Bedingungen (=zeitlich und örtliche Konzentrationsunterschiede) auch dann herrschen, wenn die Chloridbindekapazität des Betonbauteils nicht erschöpft ist. Das bedeutet, dass über eine Messperiode hinweg keine reduzierte Chlorid-Ionenaufnahme festgestellt werden kann. [7]

Das Diffundieren von Chloriden und deren Menge ist stark vom Feuchtegehalt des Betonbauteils abhängig, da es bei einem System, das aus nicht mit Wasser beaufschlagten Kapillarporen besteht, zu keinem Eindringen von Chloriden kommen kann. In diesem Zusammenhang spielt auch die relative Luftfeuchte eine Rolle – steigt ihr Gehalt auf über 50%, werden Poren mit Radien $<1\mu\text{m}$ mit Wasser gefüllt. Dieser Effekt wird als Kapillarkondensation bezeichnet und nimmt mit zunehmender Größe der Porenradien ab. Betone mit niedrigem Wasser/Bindemittelwert (W/B-Wert) verfügen über eine höhere Wahrscheinlichkeit der Sättigung der Poren, da die Porosität geringer gegenüber Betonsorten mit höherem W/B-Wert ist und die Porenradien auch entsprechend kleiner ausfallen. [7]

Zusätzlich gibt es geometrische Eigenschaften von Betonelementen, die Einfluss auf die Diffusion von Chloriden [7] haben:

- Verteilung der Porenradien und die Porosität des Zementsteins – größere Poren beschleunigen den Transport
- Poröse Kontaktzonen zwischen dem Zementstein und der Gesteinskörnung – bevorzugter Transportweg von Chloriden; kann durch Zugabe gewisser Zusatzstoffe (z.B.: Flugasche = Füllereffekt) gemindert werden
- Tortuosität oder die Gewundenheit des Porensystems – Diffusion kann nicht den kürzesten Weg beschreiten

Bei den verwendeten Prüfschemen (CDF-Test, Diffusionstest) dieser Arbeit ist festzuhalten, dass die Diffusion nicht ohne Lösungskontakt auskommt, somit entsteht in beiden Prüfabläufen zuerst Konvektion. Ohne des anfänglichen oder kontinuierlichen Chlorideintrags durch Konvektion findet keine Diffusion statt.

2.1.3 Migration

Im Gegensatz zur Diffusion tritt eine Chloridmigration nur im Rapid-Chloride-Migration-Test (RCM) oder einem ähnlichen Verfahren unter künstlichem Einfluss auf. Durch Anlegen einer Spannung des im Wasser eingetauchten Probekörpers wird in dem erwähnten Verfahren eine elektrochemische Reaktion hervorgerufen, bei der sowohl Chlorid-Ionen als auch Ionen anderer Herkunft von der Lösung beschleunigt in die Betonprobe wandern. Aus diesem Verfahren ist anschließend ein Diffusionskoeffizient errechenbar, indem die im Vorhinein bestimmte Menge an freien Ionen in der Lösung nachträglich gemessen und die Differenz über die Zeit bestimmt wird. Zahlenmäßig liegt der Migrationskoeffizient immer über den Koeffizienten aus der Diffusion, da dieser Vorgang in der Kürze der Testdauer nicht in einen Gleichgewichtszustand übergeht – man spricht von einem instationärer Zustand. Eine

Korrelation oder Umrechnung des Wertes aus der Ionenmigration wird nötig, mit der ein realitätsnaher Diffusionswiderstand für eine Betonsorte angegeben werden kann. [10] [11]

2.1.4 Mikroislinsen/Mikroislinsenpumpe

Die letzte erwähnte physikalische/chemische Möglichkeit, wie Wasser in einen Betonkörper eindringt, ist der von Setzer [12] beschriebene Effekt der Mikroislinsenbildung. Im folgenden Absatz sind die Bedingungen, Einflussgrößen und deren Verhaltensweisen auf Mikroebene beschrieben.

Je geringer die vorhandenen Porenradien, desto mehr senkt sich der in den Gelporen auftretende Gefrierpunkt ab, dass im Maximalfall -60°C betragen kann. Dies liegt an der Oberflächenwechselwirkung der Zementsteinmatrix mit dem Porenwasser bzw. dem Poreneis. Dabei nimmt die freie Oberflächenenergie mit der Bildung von Eis zu. Hohe Drücke in der Matrix sind das Resultat, aber auch ein gleichzeitiges Vorkommen aller drei Aggregatzustände (Phasen) des Wassers im Porensystem, das als Tripelpunkt beschrieben ist. Um diesen Effekt physikalisch einwandfrei zu beschreiben und die Druckunterschiede berechnen zu können, nutzte Setzer [12] ein thermodynamisches Modell, in dem er Kriterien für ein Gleichgewicht der chemischen und mechanischen Potentiale festlegt, die, bei simultanem Auftreten mehrerer Phasen, es zu erfüllen gilt. Der eigentliche Ablauf der Eislinnenbildung sieht wie folgt aus:

Es findet ein Abkühlen der Temperatur statt, dass einen Druckunterschied zwischen den wassergesättigten Poren und deren Umfeld hervorruft (Abbildung 1 rechtes oberes Bild). Das im Gel befindliche Wasser wird rausgepresst (negativer Druck in der Pore) und lässt es schwinden. Ungebundenes Wasser wandert entweder direkt zu größeren Eispartikel oder evaporiert und friert an diesen Eislinnen an (Abbildung 1 linkes unteres Bild). Durch ein stetiges Erwärmen sinkt der Druck in den Gelporen wiederum und das Gel vergrößert sein Volumen. Dieses Quellen wird aber nicht vom im Eis gefrorenen Wasser abgedeckt und sucht sich neue Ressourcen außerhalb (Abbildung 1 rechtes unteres Bild). Ist eine große Menge an Wasser in unmittelbarer Nähe vorhanden, wird es aufgenommen – folglich verhält sich das System bei wiederkehrender Hebung und Senkung der Temperatur wie eine Pumpe, dass die Wassersättigung ständig erhöht und die Eislinnen damit füttert. Solange keine kritische Minimaltemperatur erreicht wird, bei der das Gelwasser ebenfalls erstarrt, kann der Vorgang nicht gestoppt werden. Als Veranschaulichung dient die Abbildung 1, die die wesentlichen Verhaltensmuster anhand eines vereinfachten Porensystem darstellt. [12] [13]

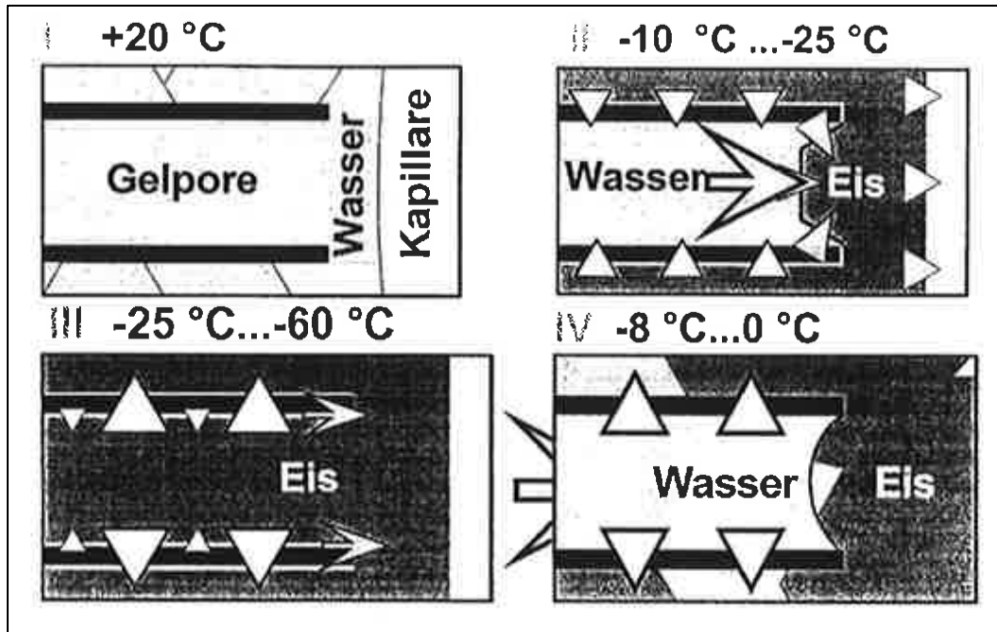


Abbildung 1 Schema der Eislinsenpumpe [12]

Überschreitet die Porenlösung den Sättigungsgrad von 4%, richten weitere geringe Mengen zusätzlichen Wassers sehr schnell Schäden an. Bis zu diesem Schwellwert ist aber die Volumsvergrößerung des Eises für die Matrix von geringer Relevanz. Weiters erwähnte Setzer [12] im Zusammenhang mit der Volumsausdehnung, dass die Stoffmatrix nicht unendlich starr sei. [12] [13]

Abschließend ist ein Diagramm (Abbildung 2) aus Setzers [12] abgebildet, dass anhand von Temperatur und Druck die Hystereseschleife der Ausdehnung und im kleineren Ausmaß der Kontraktion darstellt. [12] [13]

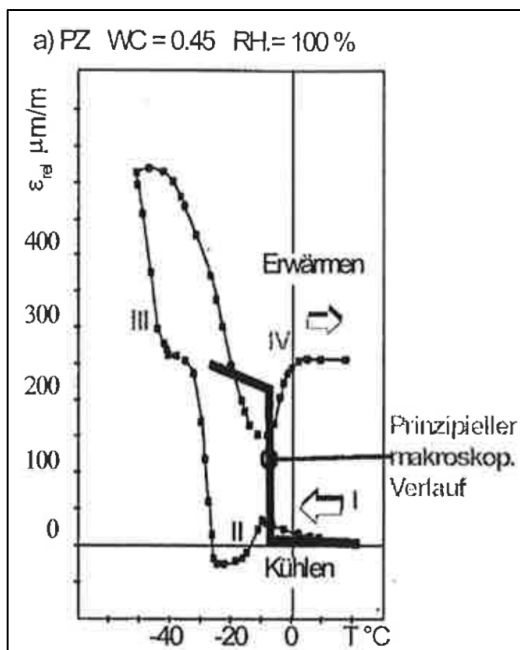


Abbildung 2 Hystereseschleife einer Eislinsenbildung [12]

2.2 Prüfmethoden

In den nachfolgenden drei Kapiteln werden die normierten Prozedere beschrieben. Abweichungen von den erwähnten Prüfungsaufbauten und der Methodik sind im Kapitel 3 behandelt. Der letzte Punkt befasst sich im Anschluss mit einem Vorschlag aus der Literatur, die den Chlorideindringungstest beschleunigen könnte.

2.2.1 CDF-Test – Prüfverfahren des Frost-Tau-Widerstands von Beton – Prüfung mit Taumittel-Lösung

Capillary suction of De-icing solution and Freeze thaw test, kurz CDF-Test, ist ein Verfahren, bei dem Betonproben auf den Widerstand gegen Frost mit Taumittelleinsatz geprüft werden. Eine Menge von mindestens fünf Probekörpern mit einer Seitenlänge von 15 cm und einer Höhe von 50 bis 150 mm werden hergestellt, für 24 ± 2 Stunden nachbehandelt und für weitere 6 Tage (= 7 Tage alt) in Leitungswasser bei ca. 20°C gelagert. Im Anschluss sind die Würfel bis zu den Vorbereitungen trocken (20°C bei 65% relativer Luftfeuchte) aufzubewahren. [14] Um die Realität gut zu simulieren, soll die Prüffläche eines jeden Exemplars eine geschalte, abgezogene, gesägte oder andere Oberflächeneigenschaft aufweisen und frei von Trennmitteln, sowie eben sein. Die im Vorfeld erwähnte Trockenlagerung dauert 21 Tage und geschieht in einer Klimakammer mit durchgehend 20°C und 65% Luftfeuchte. Setzer et al [14] empfiehlt eine ständige Überwachung des Gewichtsverlustes der einzelnen Proben während dieser Zeit. Zwei bis sieben Tage vor Ende der Trockenlagerung werden die Seitenflächen aller Betonelemente mit einem lösungsmittelfreien Epoxidharz oder Aluminium-Butyl-Klebeband abgedichtet. Beim Erreichen des 28-Tage-Alters sind alle Prüfkörper mit ihrer Prüffläche nach unten zeigend in einen Prüfbehälter aus Edelstahl auf Abstandhaltern mit einer Höhe von 10mm zu legen und eine 3%-Chloridlösung bis zu einem Pegel von ca. 15mm einzufüllen. Anschließend sollen die Proben in den verschlossenen Behältern für weitere 7 Tage bei 20°C lagern, um den Einfluss des kapillaren Saugens am Ende dieser Zeitspanne ausschließen zu können. Dabei ist auf den Pegel zu achten und bei unerwartet hohen auftretendem Saugvermögen zusätzlich Flüssigkeit nachzufüllen. Am Ende der Vorsättigung werden die Prüfbehälter für 3 Minuten in ein Ultraschallbad getaucht, um jegliche Verschmutzung an der Prüffläche zu lösen. Die verunreinigte Lösung mit dem Material wird verworfen und nicht erfasst. In Abbildung 3 ist der beschriebene Behälter, der für die Lagerung bei Vorsättigung verwendet wird, abgebildet. [14]

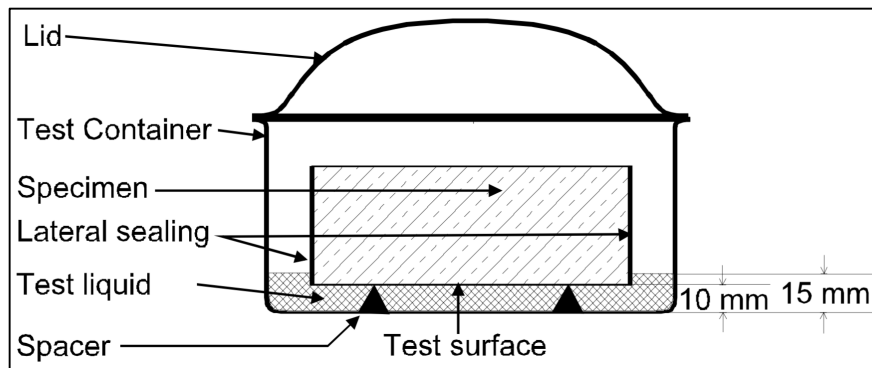


Abbildung 3 Schematische Darstellung eines normierten Behälters mit Chloridlösung [14]

Jeder Probenbehälter bekommt eine neue Lösung und wird anschließend ohne Deckel aber mit den Probekörpern in den Klimaschrank gestellt. Dieser startet bei einer Temperatur von +20°C, die über die nächsten 4 Stunden linear auf -20°C reduziert wird und für weitere 3 Stunden bei dem Endwert gehalten wird. Im Anschluss wird über 4 Stunden die Temperatur mit einer Heizrate konstant von 10K/h auf +20°C gesteigert und für eine Stunde gehalten. Simultan mit dem Start der thermischen Lastwechsel ist in einen der Probengefäße ein Temperaturfühler (Genauigkeit von +/- 0,5 °C) installiert, der die Temperaturfluktuation überwacht. Alle Teilzeiten aufaddiert dauert ein Zyklus 12 Stunden. Die Kühltruhe mit den Probekörpern mit deren offenen Behältern ist in Abbildung 4 dargestellt. [14]

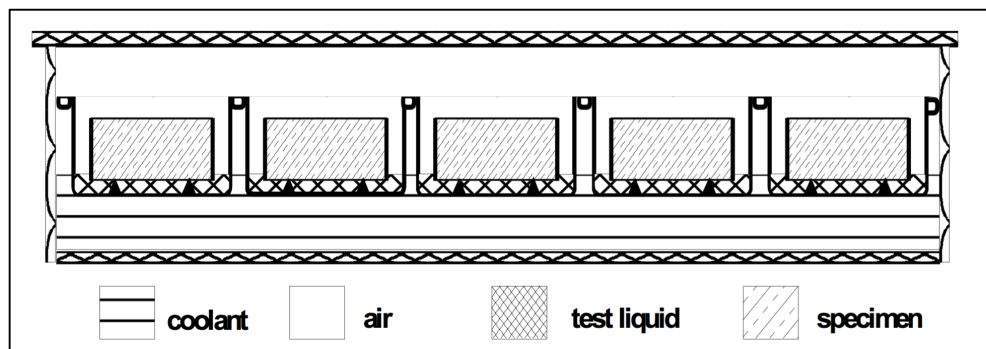


Abbildung 4 Schematische Darstellung einer Kühltruhe mit Proben [14]

Nach 14 bzw. 28 Frost-Tauwechseln, wenn in der Kammer mindestens 15°C herrschen, werden die Proben entnommen und für weitere drei Minuten in das Ultraschallbad gelegt. Danach wird das Wasser mit der enthaltenen Abwitterungsmasse in einen Papierfilter geleert. Die Würfel stellt man im Anschluss in die nun gereinigten Behälter zurück und füllt neue Chloridlösung bis zur vorgeschriebene Höhe ein. Bevor die Filter mit der Abwitterungslösung in Berührung kommen, sind sie mit 0,01g Genauigkeit abzuwiegen, um die Tara des Filters festzustellen. Die nun beaufschlagten Papiere gelangen für 24 Stunden in eine auf 110°C eingestellte Trockenkammer, die dann nach einer zusätzlichen Stunde bei 20°C abwägbar sind. Diese Abwitterungsmassen in g werden auf die Prüffläche bezogen, was dann als Resultat für diesen Test dient. Alle Zyklen akkumuliert ergeben die gesamte Masse, die nach 28 Frost-Tau-Wechsel abwittert [g/m^2]. Übersteigt die Verhältniszahl von Abwitterung zu Fläche die Widerstandsgrenze von 1500 g/m^2 , kommt es zum Ausschluss der Probe. [14]

2.2.2 Nordtest 443 Accelerated Chloride Penetration

Der Chlorideindringwiderstand unter alleiniger Einwirkung von Taumitteln in einer Lösung wird bei diesem Test erhoben. Wie in den nachfolgend beschriebenen Methoden [15] [1] spricht auch hier der NT Build 443 [16] eine Empfehlung für zylindrische Probeformen aus. Wahlweise kann die Probe aus einer Bohrkernentnahme eines Bauwerks entstammen oder als geschalter Zylinder aus dem Betonwerk stammen. Beide Varianten müssen jedoch folgende Anforderungen erfüllen:

- Frei von Rissen oder Hohlräumen
- Ein Mindestalter vergleichbar mit einem 28 Tage alten bei 20°C nachbehandelten Beton
- Durchmesser von mindestens 75 mm, aber nicht weniger als das dreifache Größtkorn nebeneinander gelegt, der angewandten Sieblinie
- 100 mm Länge
- und mindestens drei Probekörper

Betreffend der Bohrkernoption sind die entnommenen Proben auf eine Gesamtlänge von 70 mm zu kürzen, von denen weitere 10mm der geschalteten Oberfläche, mit einer Diamantkreissäge nass geschnitten, wegfallen. [16]

Die geschalteten Zylinder sollen in zwei Hälften geteilt und in Kunststoffcontainer, der mit einer Calciumhydroxid-Lösung gefüllt ist, eingetaucht werden. Dies minimiert den Effekt der Karbonatisierung. 24 Stunden später geschieht die Erfassung aller Massen der oberflächentrockenen Probekörper. Der Tauchvorgang wird so oft wiederholt, bis sich das Gewicht nicht mehr als 0,1% pro Zyklus (=Massenkonstanz) ändert. Ist der vorherige Schritt abgeschlossen, sind die Würfel bei Raumtemperatur zu trocknen, um sie anschließend vollseitig, mit Polyurethan oder Epoxidharz abzudichten. Einzig die gesägte Seite muss frei von einer abdichtenden Schicht bleiben. Nach Erhärten der ca. 1 mm dicken Abdichtungsschicht fängt der Eintauch- und Abwägevorgang an, bis sich wieder ein Porenwassergleichgewicht einstellt. [16]

Jeweils von der Gesamtlänge des präparierten Bohrkerns oder der nicht verwendeten Hälfte des geschalteten Zylinders werden 20mm dicke Scheiben für später folgende Tests abgeschnitten. Nach Abschluss der Vorarbeiten sind die ofentrockenen Probekörper in Behälter zu stellen, die anschließend mit der Chloridlösung (165g NaCl/l, 23°C), in einem Verhältnis von 20/80 (Prüffläche zu Einfüllvolumen), zu befüllen sind. Laut NT Build 443 [16] darf die Lagerung in dem Salzwasser minimal 35 Tage dauern, jedoch spätestens nach 5 Wochen ist ein Lösungswechsel einzuplanen. Ebenfalls sollten einmal pro Woche alle Prüfbehälter geschüttelt werden. [16]

Im Anschluss an die Lagerung wird das Bohrmehl von den Prüfkörpern entnommen, indem parallel zur Prüffläche ein Schaber auf der Oberfläche des rotierenden Zylinders Druck ausübt. Acht Messschichten sind Voraussetzung, wobei die Abstände je nach erwarteter Eindringung selbst zu wählen sind. [16]

Von den 20mm dicken Scheiben die im Vorfeld von den Proben entfernt wurden, sind ebenfalls Mehlproben zu entnehmen. Dabei wird das Material gebrochen, bis es durch ein 1 mm Sieb passt.

Der Chloridgehalt wird mit Hilfe einer Säure festgestellt, in einem Diagramm mit zugehöriger Tiefenstufe dargestellt und mit folgender Formel berechnet: [16]

$$C(x, t) = C_S \cdot (C_S - C_i) \cdot \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_e \cdot t}}\right) \quad (2)$$

mit:

$C(x, t)$ Chloridkonzentration zum Messzeitpunkt in der gemessenen Tiefe

C_S Randbedingung der beaufschlagten Oberfläche

C_i Ausgangskonzentration gemessen am Betonkörper

x Messtiefe

D_e Effektiver Chloridtransportkoeffizient

t Messzeit

erf Fehlerfunktion

2.2.3 Nordtest 492 Chloride Migration from Non-Steady-State Migration Experiments

Ähnlich der vorhergehenden Testmethode besteht die Möglichkeit einer Verwendung von Bohrkernen wie auch geschalteten Elementen. In beiden Fällen liegt die Präferenz bei zylindrischen Formen mit 100x50 mm (D/h) oder 100x100 mm für Bohrkerne. Wie in 2.1.4 erwähnt sind die Resultate nicht direkt mit dem aus den Nordtest Build 443 oder aus ähnlichen Prüfverfahren erhaltenen Diffusionskoeffizienten vergleichbar. [15]

Bohrkerne, die zu testen sind, sollen von den Abmessungen her den geschalteten Proben entsprechen und müssen wie im vorgegebenen Schneidplan (in Scheiben und Zylinder der Chlorid-belasteten Seite) bearbeitet werden. Obwohl das Kühlwasser der Kreissäge einen Einfluss auf den Ein- oder Austrag von Chloriden im Beton hat, wird das Nassschneiden empfohlen. Sind die Oberflächen der Betonzylinder nach dem erwähnten Bearbeitungsschritt trocken, gelangen sie in einen Unterdruckbehälter mit einem festgelegten Druck von 10-50 mBar. Für vier Stunden soll das Druckniveau konstant bleiben und nach 75% der Zeit wird eine Kalziumhydroxid-Lösung in den Behälter gefüllt. Im Anschluss sind die Proben unter atmosphärischen Druck für weitere 16 bis 20 Stunden in den Kisten mit der Lösung zu lagern. Die notwendigen Elektrolyse-Lösungen sind im Vorfeld vorzubereiten – 100g NaCl mit 900g Wasser für die Kathode und 12g NaOH in einem Liter entionisiertem Wasser aufgelöst für die Anode. Die Würfel sind mit einem Gummischlauch (100x150 D/h) zu überziehen und mit zwei Klemmrings zu fixieren. Könnte durch unregelmäßige Oberflächen eine Undichtigkeit an den Seitenwänden entstehen, sind diese gegebenenfalls mit Silikon als Dichtungsmittel zu bearbeiten. Nach diesem Schritt sind die Proben in den Versuchsbehälter zu stellen, der mit der kathodischen Flüssigkeit gefüllt ist. In jeden Probenwürfel mit dem passenden „Gummisocken“ wird 300ml der anodischen Lösung eingefüllt und jeweils die Anode und Kathode mit der Stromversorgung verbunden. Der Versuchsaufbau ist nun abgeschlossen und die einzelnen Schritte sind in der Abbildung 5 nachvollziehbar dargestellt. [15]

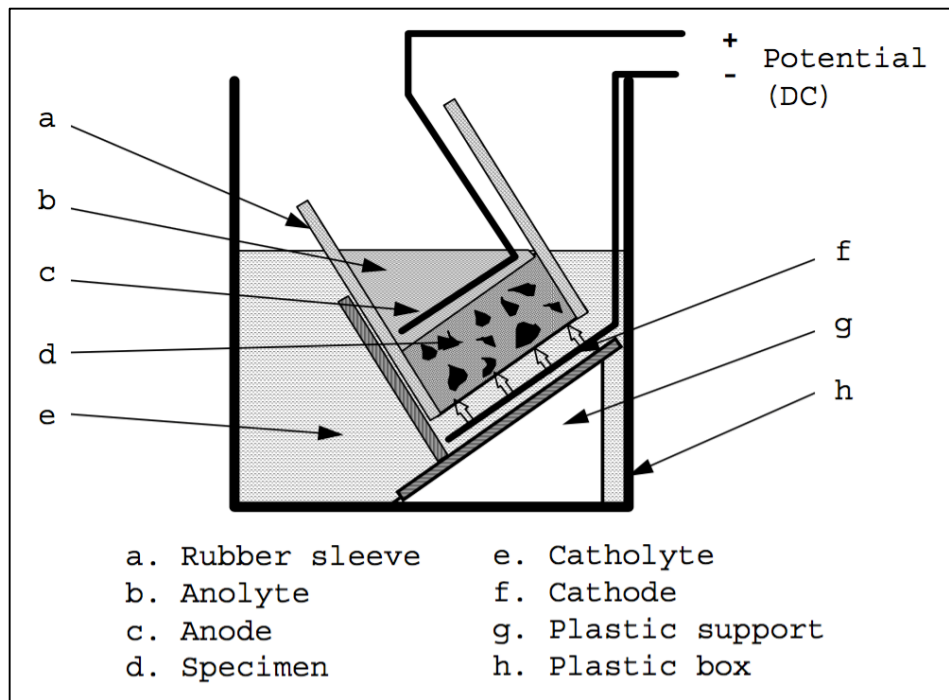


Abbildung 5: Schematische Darstellung eines RCM Prüfaufbaus [15]

Der eigentliche Test startet, indem eine Spannung von 30V an den Kreislauf gelegt und Temperatur, Spannung und Stromstärke während des Testlaufs beobachtet werden. Im Vorfeld ist die Temperatur jeder einzelnen anodischen Lösung in den „Socken“ zu messen. Außerdem darf keine der gemessenen Temperaturen im Testdurchlauf 20-25°C überschreiten. Je nach Stromstärke (in mA angegeben) richtet sich die Dauer nach einem in der Literatur angegebenen Datenblatt von minimal 6 bis maximal 96 Stunden. [15]

Mit Erreichen der notwendigen Zeit für die Elektrolyse wird der Versuch zurückgebaut, die Proben gespalten und mit Silbernitrat besprüht. An fünf Stellen ist in bestimmten Abständen die Eindringtiefe des Chlorids zu dokumentieren. Mit der in NT Build 492 [15] festgelegten und unten dargestellten vereinfachten Formel (3) kann der Chloridmigrationskoeffizient bestimmt werden. [15]

$$D_{NSSM} = \frac{0,0239(273+T)L}{(U-2)t} \left(x_d - 0,0238 \sqrt{\frac{(273+T)L x_d}{U-2}} \right) \quad (3)$$

wobei:

D_{NSSM} : instationärer Migrationskoeffizient in $\times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$;

U: absoluter Wert der angelegten Spannung in V;

T: Durchschnittswert der Anfangs- und Endtemperatur in der anodischen Lösung in °C;

L: Dicke des Probekörpers in mm;

x_d : Mittelwert der Eindringtiefe in mm;

t: Testdauer in Stunden, ist.

2.2.4 Neuer Kurzzeit-Diffusionstest (STIT)

Im Jahr 2014 vorgestellt, versucht der Short-Term Immersion Test (STIT) die besten Eigenschaften der beiden im Vorfeld erwähnten Verfahren zu kombinieren. Einerseits wird die kurze Prüfzeit des RCM (NT Build 492) [15] angestrebt und andererseits das realitätsbezogene Eindringverhalten von Chlorid-Ionen des stationären Chlorideindringungstests (NT Build 443) [16] verlangt. [1]

Zylindrische Proben mit den Dimensionen 100 x 2000 mm (D/h) werden geschalt, betoniert, für einen Tag an der Luft ausgehärtet, ausgeschalt, bei 20°C für weitere 28 Tage in Calciumhydroxidlösung nachbehandelt, beide Enden abgeschnitten und in drei Stücke mit jeweils einer Länge von 50 mm getrennt. Ähnlich dem Nordtest 443 ist der Sättigungsgrad der Betonzylinder mit Hilfe der $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -Lösung zu maximieren, bis sich die Masse der oberflächentrockenen Prüflinge einpendelt. Mit einem Alter von 29 Tagen nach dem Teilen in 50mm hohe Stücke werden niedrige verschließbare Acrylrohre aufgesetzt und alle Oberflächen bis auf jene, auf der das Rohr aufgesetzt ist, mit einem Dichtmittel aus Silikon versiegelt. In Abbildung 6 ist der beschriebene Aufbau dargestellt. Der eigentliche Test startet mit dem Befüllen des Rohrs. Laut Park et al. [1] empfiehlt sich eine Chloridlösung mit einem Gehalt von 21g/l und eine 15mm Füllhöhe (ca. 106ml). Über den Zeitrahmen von 14 Tagen bei konstant 20°C Raumtemperatur werden 0,5ml Lösungsproben entnommen. Die Menge der Entnahme ist stark begrenzt, da der ganze Versuch nur mit einem geringen Gesamtvolumen an Lösung auskommt. Es ist zu beachten, dass am Anfang des Versuchs eine größere Chloridaufnahmekapazität besteht, nach dem sich die Probenentnahmezeitpunkte richten: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 7, 10, 14 Tage. Mit Beendigung der Testreihe werden die entnommenen und mit dem Faktor 10 verdünnten Lösungen mit einer ionenselektiven Elektrode über Potenzialdifferenz gemessen. [1]

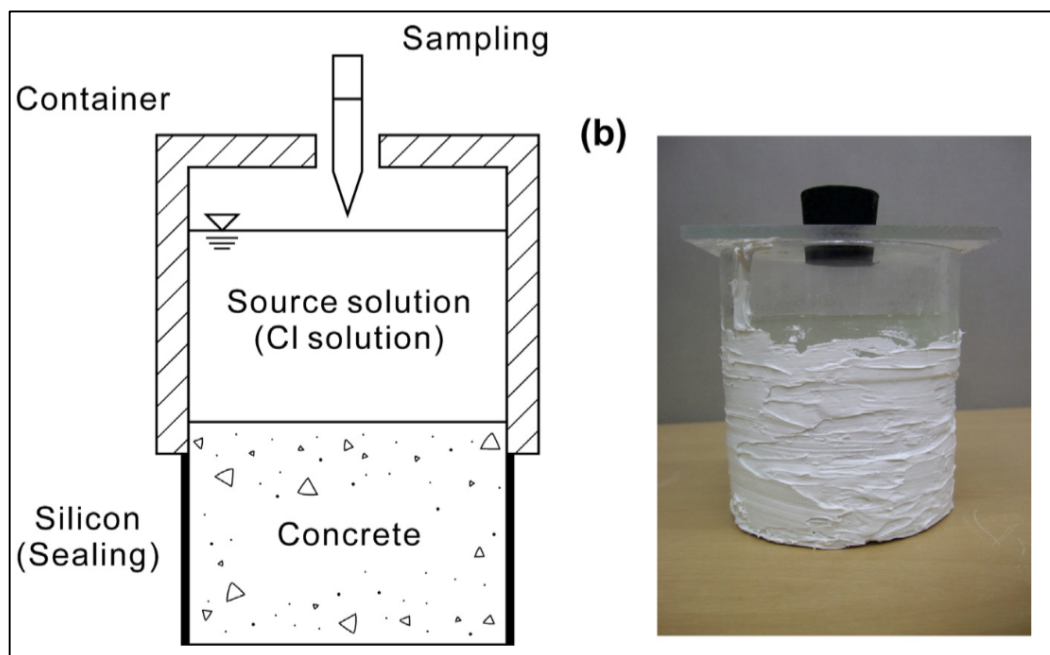


Abbildung 6 Prüfaufbau STIT [1]

Das Prinzip und die dahinterliegende Mathematik erklärt sich wie folgt:

Die Ausgangsproben sind voll gesättigt, sodass dies eine instationäre Diffusion nach dem 2. Fick'schen Gesetz voraussetzt. Die Veränderung der Chlorid-Ionenanzahl in der Lösung ist die Hauptvariable und stellt den Eindringwiderstand dar. Weiters ist die Chloridlösung über die festgelegte Konzentration als erste Randbedingung klar definiert. Grundsätzlich ist das Chloridbindeverhalten nichtlinear und tritt für lange Zeit in einem Ungleichgewichtszustand auf. Mit der verwendeten Konzentrationslösung (2,1 g/l bzw. 21 g/l) wird davon ausgegangen, dass das Verhältnis der freien und gebundenen Chlorid-Ionen schneller in einen Gleichgewichtszustand übergeht und das sich Bindeverhalten auf ein lineares vereinfachen lässt. Ebenfalls geht Park et al [1] davon aus, dass über die Kürze von 14 Tagen der Diffusionskoeffizient vereinfachend konstant zu betrachten ist. Kurioserweise wird im mathematischen Modell die Entnahme der Probenflüssigkeiten vernachlässigt, da die Autoren mit der niedrigen einstelligen Prozentgehaltveränderung argumentieren. [1]

Die Formel der Chloridkonzentrationsveränderung sieht wie folgt aus:

$$C_{source}(t) = C_{source}(0) \cdot \exp \left[D_{ST} \cdot \frac{t}{h^2} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left[\left(D_{ST} \cdot \frac{t}{h^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (4)$$

wobei:

$C_{source}(t)$	Chloridkonzentration in der Lösung zu gegebener Messzeit t
$C_{source}(0)$	Ausgangskonzentration der NaCl-Lösung
exp	Exponentialfunktion
D_{ST}	Tatsächlicher Diffusionskoeffizient (ST Short term aber mit Berücksichtigung des zweiten Fick'schen Gesetzes)
t	Messzeitpunkt
h	Höhe der eingefüllten Lösung
erfc	= (1-erf(x)) Fehlerfunktion

2.3 Analytische Methoden

In diesem Unterpunkt sind die zwei chemischen Verfahren zur Auswertung von Lösungen bzw. Feststoffen beschrieben, die in Kapitel 3 zur Anwendung kommen.

2.3.1 Ionenchromatografie

Probenentnahmen der Lösung fanden sowohl im CDF-Test als auch in den Diffusionsprüfungen statt (siehe Kapitel 3.2 und 3.3). Aus diesem Anlass wird die Funktionsweise des Analyseverfahrens in diesem Punkt zusammengefasst.

Die Ionenchromatografie ist als Überbegriff zu verstehen und unterteilt sich in folgende Varianten mit unterschiedlichen Aufbauten und Eignungskategorien:

- Ionenaustausch-Chromatografie (HPIC)
- Ionenausschluss-Chromatografie (HPICE)
- Ionenpaar-Chromatografie (MPIC)
- Reversed-phase-Chromatography (RPC)

Zur Verwendung kam für beide Analysen das Gerät der Marke Dionex (ICS 3000), das nach dem Ionenaustausch-Prinzip (engl. High Performance Ion Chromatography) mit Leitfähigkeitsdetektion funktioniert und nachfolgend mit grafischer Unterstützung (Abbildung 7 und Abbildung 8) beschrieben ist. [17]

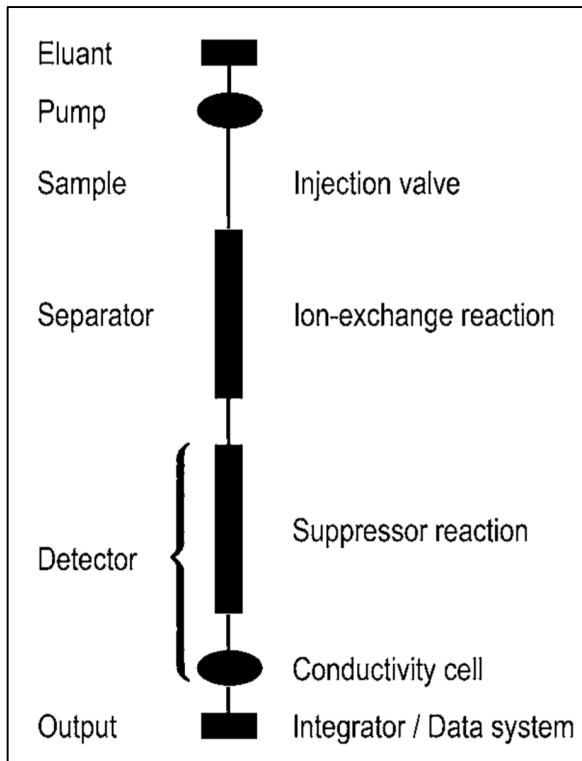


Abbildung 7 Schematischer Aufbau eines Ionenchromatografen [17]

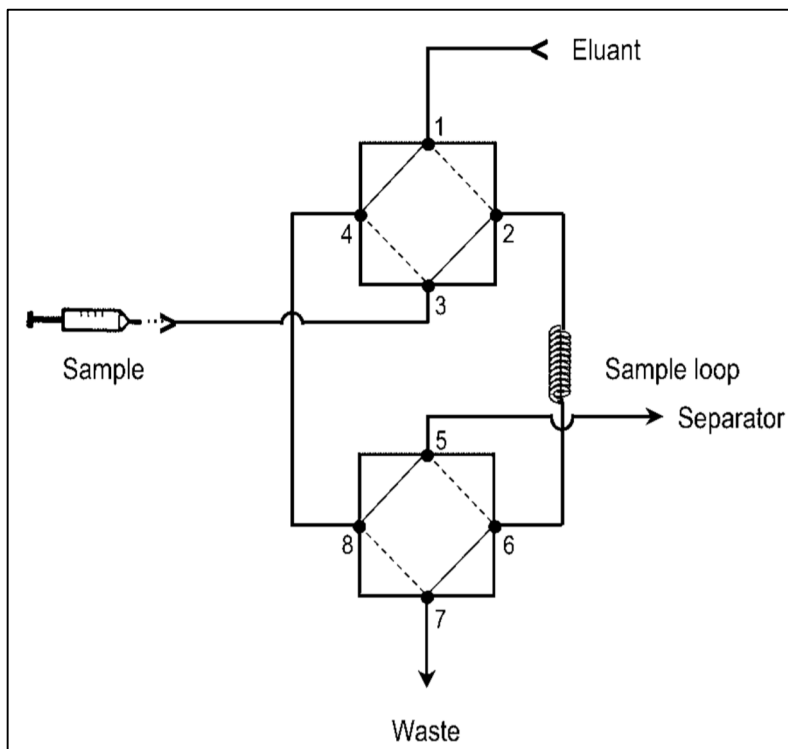


Abbildung 8 Vergrößerte Darstellung der Injektion als Schleifenaufbau [17]

Eine möglichst impulsfreie Pumpe bewegt das Eluat mit der zu analysierenden Flüssigkeit durch den gesamten Chromatografen. Das bewegte Gemisch wird als mobile Phase bezeichnet. Das Einführen der Probe erfolgt mit Hilfe des in Abbildung 8 gezeigten Schleifeninjektors. Die Probenschleife wird bei atmosphärischen Druck mit der gewünschten Lösung gefüllt, ehe das Dreiwegeventil in die andere Position gestellt wird, um es in der mobilen Phase zum Trennsystem (stationäre Phase) zu transportieren. Das eben genannte Trennsystem besteht aus Trennsäulen, deren Material (Tefzec, Epoxidharz und Polyetheretherketon, etc.), nach der zu trennenden Lösung und gewünschten Qualität der Analyse ausgewählt wird. Der Detektor quantifiziert kontinuierlich das zu untersuchende Material. Häufig wird dabei ein Leitfähigkeitsdetektor genommen, aber auch UV/Vis-, amperometrische und Fluoreszenz-Detektoren finden alternativ Anwendung. Im ersteren Fall besteht die Option, ein Supressorsystem mit der Leitfähigkeitszelle zu kombinieren, um die hohe Grundleitfähigkeit des verwendeten Eluats (z.B.: Elektrolyte) chemisch zu vermindern und gleichzeitig die zu prüfende Lösung in einen höher leitenden Zustand zu bringen. Das Eluat ist eine Substanz, die im Anwendungsfall bei Chloriden hilft, Ionen zu trennen, allgemein aber nach der zu trennenden Substanz gewählt wird. Alle chromatografischen Signale werden auf einer Weg-Zeit-Skala aufgezeichnet, die wie Kurven mit steilen oder flachen Anstieg und Abfall mit definierten Spitzen dargestellt sind. Als Ergebnis kann die Fläche unter den Kurven und die Höhe der Peaks bestimmt werden. Abbildung 9 zeigt beispielhaft eine auszuwertende Kurve von sieben anorganischen Ionen. [17]

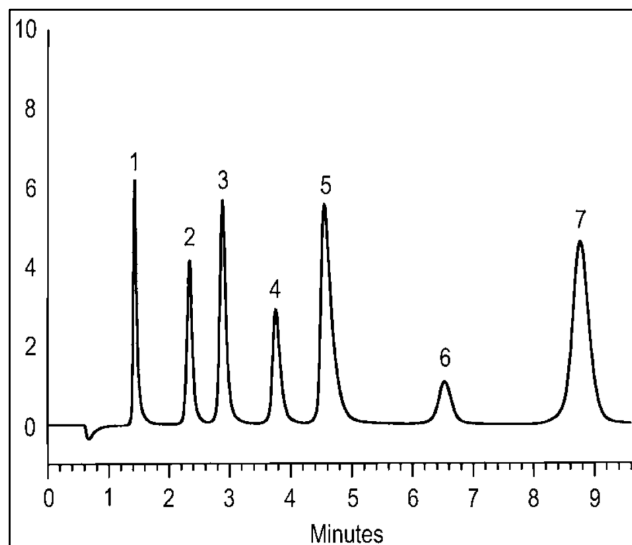


Abbildung 9 Auswertung von sieben anorganischen Anionen [17]

2.3.2 Mikrosonde

Die vorbereiteten und dünn geschliffenen Prismen aus den CDF- und Diffusionsversuchen sind am Electron Microprobe Laboratory der Montan Universität Leoben untersucht worden. Die dort situierte Elektronenmikrosonde des Typs JEOL JXA 8200 Superprobe gehört einem Konsortium deren Mitglieder aus der Karl-Franzens-Universität Graz, der Technischen Universität Graz und der Montanuniversität Leoben besteht.

Die Mikrosondenanalyse ist im Allgemeinen ein wellenlängen- und/oder energiedisperses Verfahren bei der ein Elektronenstrahl auf den gewählten festen Probekörper gerichtet wird, um das darauffolgend angeregte Röntgenstrahlenspektrum ablesen und Elemente identifizieren zu können. [18]

Der Aufbau der Sonde sieht wie folgt aus:

- Elektronenpistole
- Elektronenlinse(n)
- Blende(n)
- Strahlenscanner
- Optisches Mikroskop
- Vakuumpumpe
- Wellenlängendispersionspektrometer (WDS)
- Probenhalterung

Die Elektronenpistole (Electron-gun) ist verantwortlich für die Generierung von Elektronen, indem ein 0,1 mm dünner, gebogener Wolframfaden auf 2700 K erhitzt wird. Durch den hohen thermischen Einfluss einer typischen Eingangsgröße von 10-30 KV überwinden Elektronen die negative Potenzienschwelle und bewegen sich vom Faden weg. Ein mit variierendem Abstand darunter sitzender „Wehnelt“ (Gitter) begrenzt die Strahlenrichtung und Strahlenfläche durch ein negatives Potenzial. Höhere Drahttemperaturen vergrößern den erzeugten Brennfleck (Focus Spot) und reduzieren die Lebenserwartung des Drahtes. Abbildung 10 und Abbildung 11 zeigen den beschriebenen Aufbau. [18]

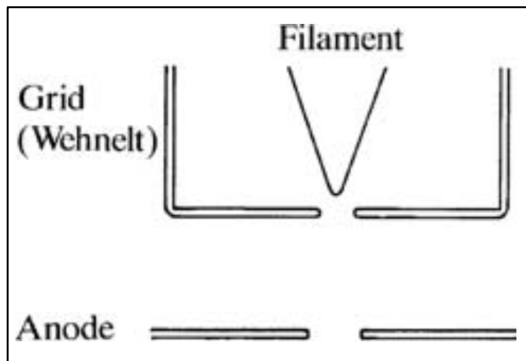


Abbildung 10 Schnitt durch Wehnelt, „Wolframhaarnadel“ und Anode [18]

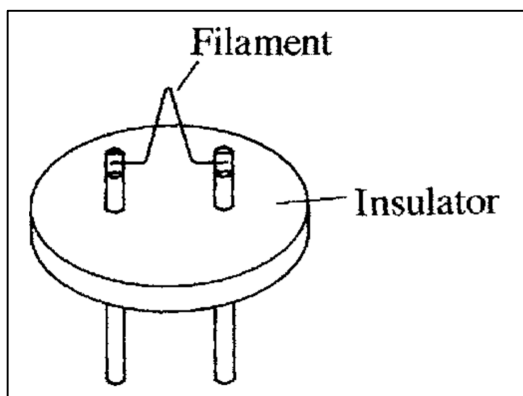


Abbildung 11 Schematische Darstellung des Glühfadens auf einem Isolator mit darunterliegender Kathode [18]

Bestehend aus Kupferspulen und einer Eisenabschirmung projiziert die sogenannte Linse (siehe Abbildung 12) ein entmagnetisiertes Bild der Ausgangsquelle auf die Oberfläche der Probe. Linsen können vergrößern und verkleinern indem die Stromstärken in den Spulen variiert wird. [18]

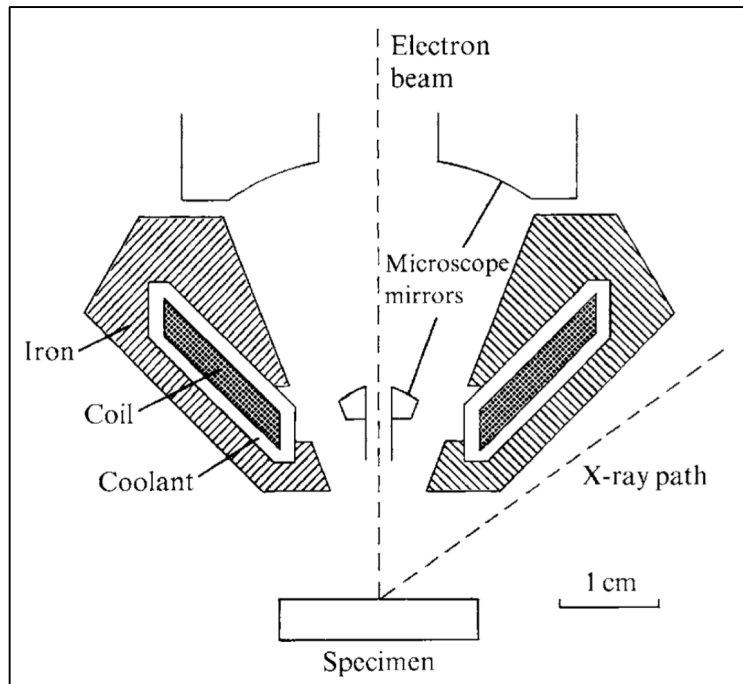


Abbildung 12 Platzsparende Linse einer Mikrosonde

Die Aufgabe der Blenden an der untersten Linse, falls mehrere vorhanden sind, ist die Einschränkung des Strahldurchmessers, um sphärische Unschärfe (Aberration) zu vermeiden. [18]

Meist in der untersten Linse eingebaut, erzeugen Elektronendetektoren Bilder beim Abtasten der Oberfläche. Dieser digitale Abtastvorgang wird von einem DAC (Digital Analog Konverter) als analoges Signal ausgegeben, um darauffolgend von einem ADC zurück in digitale Daten zu wandeln, die es der Hardware ermöglichen, die Datensätze zu speichern. [18]

Ein optisches Mikroskop mit eingebautem Spiegel hilft die Proben zu justieren und während des Elektronenbeschusses zu beobachten. Um während des Betriebes der Mikrosonde vor Beschädigungen der Elektronenquelle zu schützen, sind Vakuumpumpen installiert die einen absoluten Druck von 10^{-5} mbar innerhalb des Gerätes und den getrennten Isolierkammern für die Pistole, Probenhalterung und Wellenlängenspektrometer aufrechterhalten. [18]

Das letzte Modul an der Sonde ist das Wellenlängenspektrometer (Wavelength-dispersive spectrometer).

An einem oder mehreren Kristallen wird durch Beugung der Röntgenstrahlung diese in ihre spektralen Bestandteile zerlegt. Jedes Element hat eine spezifische spektrale Wellenlänge auf die der Kristall eingestellt wird. Das Gesetz von Bragg (5) beschreibt genau diesen Beugungsvorgang:

$$n\lambda = 2d \sin \theta \quad (5)$$

Dabei erhöhen sich Weglängen bei einer Reflektion der Welle um ein ganzzahliges Vielfaches der Wellenlängen. Röntgenstrahlen, die mit bekannter Wellenlänge auf Atomschichten treffen

und reflektiert werden, haben immer den spezifischen Braggwinkel θ . Als Abstand zwischen den Atomschichten dient d . Reflektionen erster Ordnung ($n=1$) besitzen die größte Intensität und werden hauptsächlich zur Bestimmung verwendet. Aus der Gleichung lässt sich auch die eigentliche Limitierung des Systems feststellen, da die Wellenlängenbandbreite (für $n=1$) vom gegebenen Gitterebenenabstand $2d$ der Atomschichten begrenzt ist. Erhöht man nun die Anzahl der Kristalle in gewissen Abständen, ist es möglich ein gewünschtes Band an Wellenlängen abzudecken. [18]

Nachfolgend werden die Interaktionen oder Verhaltensmuster der emittierten Elektronen einer aktiven Mikrosonde mit der Oberfläche der Probekörper näher erläutert:

- Starre Zerstreuung – Entsendete Elektronen mit einem Energiegehalt von 5-30 keV verteilen die Energie im Gitter des Stoffes und werden dadurch gestoppt. Die Bremskraft ist von der Dichte und der zurückgelegten Strecke abhängig
- Elektronenreichweite – Die gemessene Gerade vom Eintritt bis zum Liegenbleiben des Elektrons
- Elastische Zerstreuung – Basiert auf der Ablenkung der Elektronen durch die starke Anziehungskraft eines Atomkerns
- Rückstreuung (Backscattered Electrons BSE) – Nach dem Eindringen in die Probe besteht die Möglichkeit, dass das Elektron mit der ursprünglichen Energie in einem Winkel $>90^\circ$ wieder austritt. Dieses Verhalten ist stark von der Kernzahl und der Ablenkungsfähigkeit abhängig. Siehe Abbildung 13.
- Sekundärelektronenemission (SE) – Beim Auftreffen und auch Rückstreuen von Elektronen können sich in den obersten (Nanometer-) Schichten Elektronen lösen. Die sogenannten Sekundärelektronen sind durch ihren wesentlich niedrigeren Energiegehalt leicht von den rückgestreuten Elektronen zu differenzieren. Siehe Abbildung 13.
- Röntgenspektren – Unter Elektronenbeschuss entstehen Röntgenspektren durch zwei unterschiedliche Mechanismen. Einerseits lässt sich ein kontinuierliches Spektrum durch die Interaktionen der Elektronen mit den Atomkernen darstellen. Alternativ sind charakteristische Spektren ablesbar, wenn Elektronen zwischen unterschiedliche Energieniveaus springen. Siehe Abbildung 14

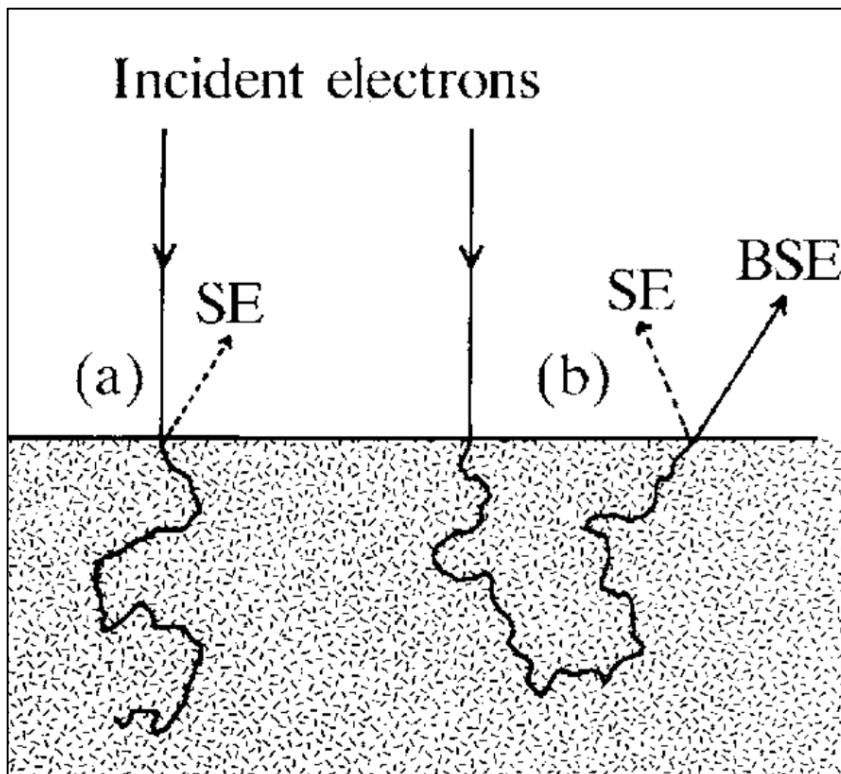


Abbildung 13 Unterscheidung von Secondary Electrons und Backscattered Electrons

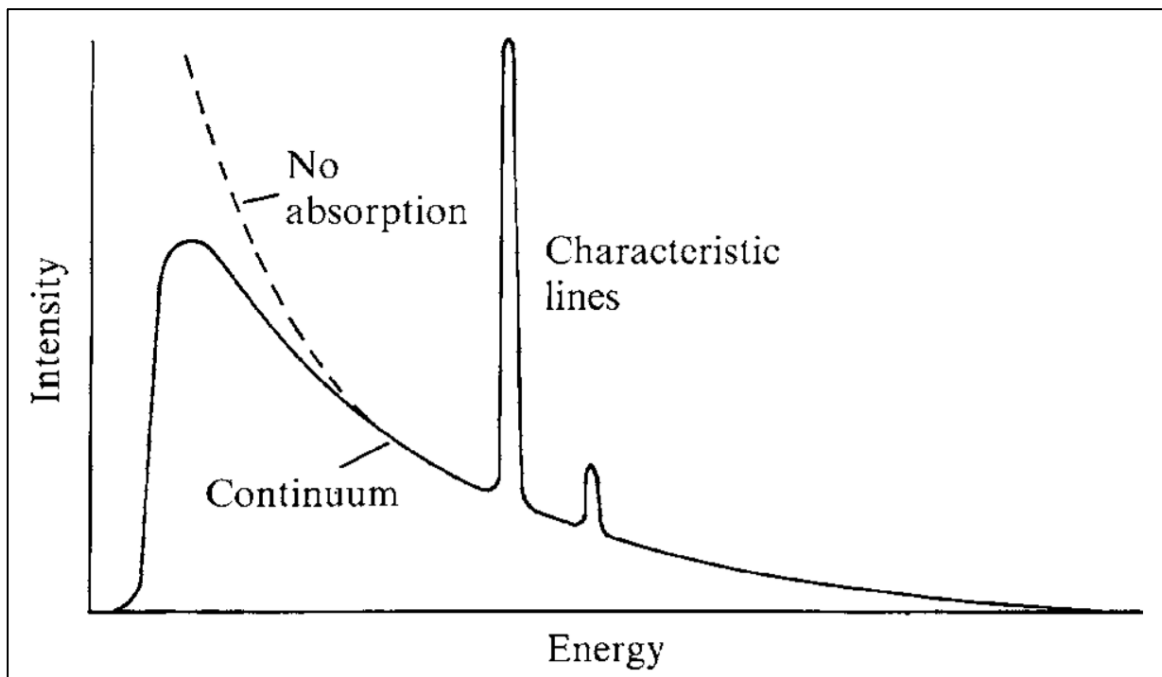


Abbildung 14 Röntgenspektrenunterscheidung

Die Elektronenmikrosonde erzeugt als Ergebnis Spektren, die Aussagen zum gesamten chemischen Aufbau des zu untersuchenden Bereiches liefern. Zusätzlich ist eine grafische Darstellung (Mapping) jedes einzelnen Elements möglich.

3 Material und Methodik

Auf den folgenden Seiten sind die Vorgehensweisen, Protokolle und Analysemethoden zu den zwei verwendeten Prüfverfahren (CDF-Test und Chlorideindringungstest) zusammengefasst. Einzelne Vergleiche zwischen den in Kapitel 2 beschriebenen standardisierten Verfahren und den tatsächlichen Ausführungen werden ebenso dargestellt.

Folgend ist die genaue Aufschlüsselung der Zusammensetzung und der im Vorfeld bestimmten mechanischen Eigenschaften der für diese Versuche verwendeten Rezepturen tabellarisch angeführt. Für jede Betonkurzbezeichnung (B2 und B5) gliedern sich die Tabellen in diese drei Kategorien:

- Die Mischung; in der der Name der Rezeptur mit den Mengen kg pro m³ der verwendeten Zement, Zusatzstoff, Gesteinskörnung, Wasser und Zusatzmittel aufgezählt wird.
- Die Frischbetoneigenschaften; in der die Frischbetondichte sowie das Ausbreitmaß zu zwei Zeitpunkten und der Luftgehalt – ebenfalls mit mehreren Zeitpunkten angeführt sind
- Und die Festbetoneigenschaften, zu denen die Druckfestigkeit (charakteristische und gemessene Mittel nach einem bzw 28 Tagen) aber auch die Porosität (Gesamt- und offene Poren) zählen.

Tabelle 1 Eigenschaften der B5 Betone

B5 Betone										
Mischung [kg/m ³]										
Kurzbezeichnung	Expositionsklasse	B5 Ref	B5 Öko1 ¹			B5 Öko2 ²				
Bez.	int. Bez.	E108	E109	E111	E110	E112				
Rezeptur		RB5-009	OB5-XXXIV-001			OB5-XXXV-001				
Anzahl [-]		10	10			10				
Zement	CEM II/A-M(S-L) 42,5 R*	396,7	0,0			0,0				
	CEM I 52,5 R**	0,0	302,6			289,1				
Zusatzstoff 1	Kalkstein [fein]	0,0	139,7			66,7				
Zusatzstoff 2	Dolomit [sehr fein]	0,0	23,3			22,4				
Zusatzstoff 3	Hüttensand [k=0,8]	0,0	0,0			66,8				
Zusatzmittel 1	Fließmittel 1	1,46	4,10			4,30				2,00
Zusatzmittel 3	Luftporenbildner	0,066	0,119			0,092				0,090
Zugabe Wasser		188,7	160,4			183,5				
Gesteinskörnung 1	GK 0/1	453,2	454,8			446,5				
Gesteinskörnung 2	GK 1/4	696,7	699,1			686,3				
Gesteinskörnung 3	GK 4/8	332,1	333,3			327,1				
Gesteinskörnung 4	GK 8/16	347,4	335,5			329,4				
Leimvolumen ohne Luft [kg/m ³]		339,3	341,9			342,0				346,2
W/B-Wert [-]		0,48	0,54			0,54				0,54
W/Pm-Wert [-]		0,42	0,31			0,39				
Frischbetoneigenschaften, geprüft nach ONR 23303										
Frischbetonrohichte		2416	2453			2420				
Luftgehalt	15 min	8,0	4,2			4,4				8,0
	45 min	3,8	4,4			5,0				4,0
Ausbreitmaß	15 min	49,0	49,0			54,0				52,5
	45 min	41,0	42,0			48,0				45,0
Festbetoneigenschaften, Druckfestigkeiten geprüft nach ONR 23303, Porosität geprüft nach EN 1936										
char. Druckfestigkeit f_{ek} entspricht		C30/37								
mittlere. Druckfestigkeit f_{cm} 1d		20,1				30,6				21,5
mittlere. Druckfestigkeit f_{cm} 28d		54,0				63,1				63,5
offene Porosität		14,9				12,9				12,9
Gesamtporosität		20,9				18,5				19,1

*) CEM II/A-M(S-L) 42,5 R: laut Hersteller 80 % Klinkeranteil, ca. 10 % Hüttensandanteil, 5 % Kalksteinanteil, 5 % Nebenbestandteile

***) CEM I 52,5 R: laut Hersteller 95 % Klinkeranteil und 5 % Nebenbestandteile

1) CEM I/ Kalkstein/ Dolomit im Verhältnis 65/ 30/ 5 % mit einem Klinkeranteil von 62 % bezogen auf die Feinstoffe ohne Gesteinskörnung

2) CEM I/ Kalkstein/ Dolomit/ Hüttensand im Verhältnis 65/ 15/ 5/ 15 % mit einem Klinkeranteil von 62 % bezogen auf den Feinstoffanteil ohne Gesteinskörnung

Tabelle 2 Eigenschaften der B2 Betonsorten

B2 Betone			
Mischung [kg/m ³]			
Kurzbezeichnung		Expositionsklasse	
		B2 - XC3/XD2Xf1XA1L/SB	
		B2 Ref	B2 Öko ¹
Bez.		int. Bez.	
		141	146
Rezeptur		RB2-027	OB2-XXXIV-011
Anzahl [#]		2	2
Zement	CEM I 52,5 R	250-203/15	0
	CEM II (A-S) 52,5N*	251-203/15	333,3
			0
Zusatzstoff 1	Kalkstein fein	218-237/14	0
Zusatzstoff 2	Dolomit extrem fein	257-240/15	0
Zusatzstoff 3	Hüttensand	201-033/15	0
Zusatzmittel 1	Fließmittel 2		1,6
Zusatzmittel 3	Luftporenbildner	238/671-14	0
Zugabe Wasser			166,1
Wasser GK			0
			52,1
Gesteinskörnung 1	GK 0/4	252-203/15	697,7
Gesteinskörnung 2	GK 4/8	253-203/15	330,1
Gesteinskörnung 3	GK 8/16	254-203/15	716,4
Recycling	GK 0/16	255-203/15	92,6
Leimvolumen ohne Luft [kg/m ³]			304
W/B-Wert [-]			0,5
W/Pm-Wert [-]			0,45
Frischbetoneigenschaften, geprüft nach ONR 23303			
Frischbetonrohddichte		[kg/m ³]	2338
Luftgehalt 15 min		[%]	3,6
Ausbreitmaß 15 min			41
30 min			38
Festbetoneigenschaften, Druckfestigkeiten geprüft nach ONR 23303, Porosität geprüft nach EN 1936			
char. Druckfestigkeit f_{ck}			C30/37
mittlere. Druckfestigkeit f_{cm} 1d		[N/mm ²]	22
mittlere. Druckfestigkeit f_{cm} 28d			17,4
offene Porosität		[%]	14,2
Gesamtporosität			20,9
			14,1
			20,4

*) CEM II (A-S) 52,5 N: laut Hersteller 80 % Klinkeranteil, 14 % Hüttensandanteil, 5 % Nebenbestandteile und 1 % unbekannt

1) CEM I/ Kalksteinmehl/ Dolomitsteinmehl/ Hüttensand im Verhältnis 62,5/ 20/ 7,5/ 10 %

3.1 Probenherstellung und Vorbereitung

Wie aus der Tabelle 1 in Kapitel 3 zu entnehmen ist, wurden Würfel unterschiedlicher Serien hergestellt. Im Gegensatz zum Nordtest 443 [16] und gleich dem von Setzer et al [14] bestimmten Verfahren haben alle verwendeten Probenwürfel eine Seitenlänge von 150 mm. Höhenmäßig unterscheiden sich die Quader des CDF-Tests (E108, E109, E110) mit einer Höhe von 70 mm von den Würfeln der beiden Chlorideindringungstests (E108, E111, E112 und 141, 146) mit deren Höhe von 150 mm jedoch. Nach 22 und 26 Tagen der Trockenlagerung in einem klimatisierten Raum mit konstanten 20°C und 65% relativer Luftfeuchte wurden die Proben (für den CDF-Test 4 pro Rezeptur und für den Chlorideindringungstest 6 pro Serie) entnommen, gewogen, an den Seitenwänden der zu beaufschlagenden Prüffläche mit einem Alu-Butyl-Klebeband versehen, erneut gewogen und fotografiert. In Abbildung 15 und Abbildung 16 sind die fertig vorbereiteten Proben in Prüfoberflächen-Ausrichtung abgebildet. Es sei hervorgehoben, dass im CDF-Test eine geschalte natürliche Oberfläche als Prüffläche zu verwenden ist, während der Nordtest 443 eine geschnittene Fläche vorschreibt. Die verwendeten Würfel des zu einem späteren Zeitpunkt gestarteten zweiten Chlorideindringungstest (141, 146) wurden, im Gegensatz zu den anderen beiden Verfahren, vollflächig an den mit Seitenwänden mit Silikon umhüllt und abgedichtet, siehe Abbildung 17.



Abbildung 15 Geschalte Probenoberfläche eines CDF-Test-Würfels mit einer Seitenlänge von 150 mm und seitlich aufgeklebten Alu-Butyl-Band



Abbildung 16 Geschnittene Probenoberfläche eines Chlorideindringungstest-Würfels mit einer Seitenlänge von 150 mm und noch ohne Butylklebeband

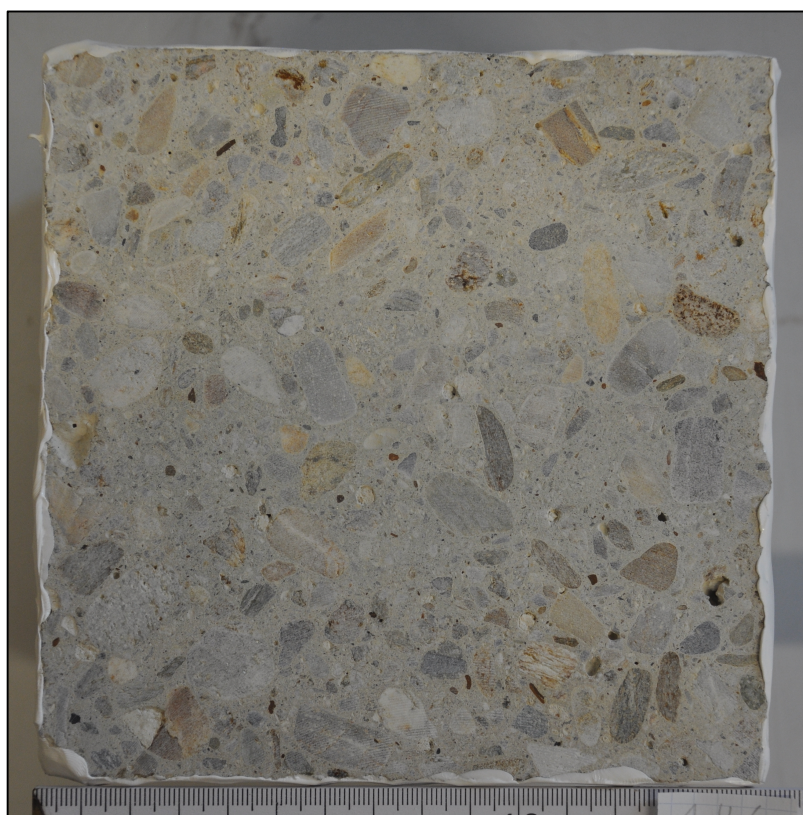


Abbildung 17 Geschnittene Probenoberfläche eines Diffusionswürfels des späteren Chlorideindringungstests mit kleineren Boxen und der im Bild ersichtlichen Silikonabdichtung

3.2 Angewandter CDF-Test

Ausgehend von den fertig vorbereiteten Probewürfeln wurden diese im Anschluss auf 5 mm hohen Abstandhalter [19] in die dafür vorgesehenen, gereinigten Edelstahlbehälter gelegt. Jeder Behälter erhielt die zum Inhalt passende Beschriftung (4x E108 = A1-A4, 4x E109 = B1-B4, 4x E110 = C1-C4). Darauffolgend ist die für die Vorsättigung notwendige Chloridlösung (3 M%) auf einen Pegel von 10 mm eingefüllt worden. Dieser Arbeitsschritt unterscheidet sich von den Vorgaben Setzers CDF-Tests [14], da jener 10 mm Abstandhalter und 15 mm Pegelstand verlangt.

Nach Beendigung des Einfüllvorganges wurden alle Gefäße mit Deckel versehen und für 7 Tage vorgesättigt, um den Einfluss der im Vorfeld erwähnten Kapillarwirkung während des Frost-Tauzykluses zu minimieren. Über die gesamte Vorsättigungsperiode gab es eine Unterbrechung, bei der alle Proben aus den entsprechenden Prüfbehältern entnommen, nasse Oberflächen mit saugfähigem Papier abgetrocknet und die gesättigten Massen der Betonproben mit einer Waage gemessen wurden. Somit sind zwei Messwerte (5 und 7 Tage) für die Wasseraufnahme protokolliert worden. Am siebten Tag der Vorsättigung wurden alle Probengefäße für drei Minuten offen in ein Ultraschallbad gelegt, um die Betonproben von der allenfalls auftretenden Abwitterung zu befreien. Weiterführend fand eine Entnahme, Reinigung, oberflächliche Trocknung und das Abwägen der Proben, sowie ein Lösungswechsel der Probenbehälter statt.

Anschließend startete die Frost-Tau-Belastung mit dem Einlegen der offenen Probenbehälter in die Frost-Taukammer, wie in Abbildung 18 ersichtlich. Der Apparat ist über die Dauer von jeweils vier Stunden auf den von Setzer [14] vorgeschriebenen Heiz- und Kühlwert von 10K/h und einer minimalen Temperatur von -25°C bzw. Maximaltemperatur von $+25^{\circ}\text{C}$ eingestellt. Die 5°C Differenz an den Einstellgrenzwerten resultieren aus dem Verlangen nach den zu erreichenden Kerntemperaturen der Proben von $\pm 20^{\circ}\text{C}$. Ein Temperaturfühler eingelegt in die Chloridlösung unter einer Betonprobe protokolliert über die Prüfzeit die erreichten Temperaturen und dient als Anhaltspunkt für die Kerntemperaturen. Ausgangstemperatur ist aufgrund der Trockenlagerung und der im Labor herrschenden 20°C auch jener Wert. Nach Schließung der Frost-Tau-Kammer startet der in Kapitel 2.2.1 beschriebene Frost-Tauwechsel (FTW).

Acht FTW später und bei einer minimal benötigten Kerntemperatur von 15°C wurden die Probenbehälter aus der Kammer entnommen und erneut in ein Ultraschallbad gelegt. Zwei der vier Betonproben pro Reihe (E108, E109, E110) sind anschließend aus den Behältern entnommen worden, um die Leitfähigkeit des Wassers für eine spätere Auswertung festzuhalten und um eine Wasserprobe für die Analyse mittels Ionenchromatografie (Kapitel 3.4) zu entnehmen. Diesen Schritten folgend wurden alle Probenoberflächen über den dazugehörenden Behältern gereinigt, damit keine auf der Oberfläche des Betons haftenden Reste der Abwitterungsmasse verloren gehen, und in eine neue Schüssel geleert. Während die Würfel in die Gefäße mit frischer Chloridlösung eingelegt und wieder zurück in die Frost-Tau-Kammer gestellt wurden, sind die in der Lösung schwimmenden Abwitterungsmassen in den Schüsseln 24 Stunden lang in einem Ofen bei 110°C und Dauer vom Fluid befreit worden. Die im Vorfeld bestimmten Tara der leeren Schalen waren für die Quantifizierung der

Abwitterungsmenge in [g] nötig. Der ganze Ablauf wurde für den 16., 22. und 28. Zyklus wiederholt, mit der Ausnahme, dass die Proben nach den letzten Entnahmen nicht mehr in die Probengefäße mit neuer Chloridlösung gelegt wurden. Mit der Protokollierung der letzten Abwitterungsmassen war der eigentliche CDF-Test beendet.



Abbildung 18 CDF-Proben in der Kältekammer

3.3 Angewandter beschleunigter Chlorideindringungstest

Drei Versuchsreihen (E108, E111, E112) mit je sechs Würfeln (außer E112 mit 5 Würfeln) starteten nach den Vorbereitungen eine Woche versetzt zu den CDF-Tests, da die letzten beiden Reihen zu einem späteren Zeitpunkt hergestellt wurden und aus diesem Grund das notwendige Alter noch nicht besaßen. Pro Betonrezeptur wurde ein verschließbarer Kunststoffbehälter mit den Innenmaßen 360 mm x 580 mm bereitgestellt, gereinigt und beschriftet. Auf den selben Abstandhaltern (5 mm) wie im vorangegangenen Test wurden die Betonproben platziert. Die notwendige Menge an 3%er Chloridlösung wurde auf das Maß vom CDF-Test [19] abgestimmt. Bei 6 bzw. 5 zu verdrängenden Körpern in einer Box mit einer Grundfläche von 0,2117 m² und der zu erreichenden Füllhöhe von 1 cm benötigt man 1,44 l bei 6 bzw. 1,55 l bei 5 Würfeln. Die einzufüllende Menge an Lösung wird bei weiteren Entnahmen einzelner Probenkörper entsprechend angepasst.

Da eine Vergleichbarkeit zu dem neuen Kurzzeit-Diffusionstest [1] (siehe Kapitel 2.2.4) angestrebt wird, sind in den ersten drei Wochen am 1., 2., 5., 6., 7., 12., 14. und 21. Tag Lösungsproben entnommen worden. Die Entnahmezeitpunkte, Menge und Dauer

unterschieden sich geringfügig von denen Parks [1], da auch eine höhere Konzentration (2,1% zu 3%) der Lösung verwendet wurde. Der größte Unterschied liegt im Vergleich zum Originalversuch [1] darin, dass die zylindrischen Proben einzeln mit einem dicht auf den Betonelementen sitzenden Behälter ausgestattet sind und die Chloridlösung einen hydrostatischen Druck auf die beaufschlagte Oberfläche ausübt. Die vom Institut verwendete Methode hingegen verwendet kapillares Saugen mit anschließender Diffusion als primären Transportmechanismus. Es wurden auch zusätzliche Leitfähigkeitsmessungen im Zuge der Lösungsentnahme protokolliert. Nach dem ersten Monat in der Lösung sind jeweils zwei Würfel pro Reihe (mit Ausnahme von E112, ein Exemplar) entnommen und die Chloridlösung aller Boxen ausgetauscht worden.

Ab Beendigung des letzten Schrittes geschieht ein Lösungsaustausch einmal monatlich und eine Entnahme von jeweils zwei Probenwürfel pro Reihe im dritten und sechsten Monat. Auch wird die Bohrmehlentnahme und das Schneiden der Prismen, sowie die Eindringtiefenbestimmung in den erwähnten Abständen durchgeführt.

Weitere Vorgehensweisen zur Proben- und Datengewinnung wird im nachfolgendem Kapitel beschrieben.

Im späteren Verlauf wurde zusätzlich zum laufenden Test ein weiterer Chlorideindringungstest, bestehend aus zwei neuen Mischungen (B2 Referenz und Ökobeton) mit jeweils zwei Würfel pro Serie (141 und 146, siehe Kapitel 3), zusätzlich zum laufenden Test in speziell angefertigten Behältern (siehe Abbildung 19) gestartet. Der Unterschied zum ersten Durchgang liegt in einzelnen Details wie:

- zwei statt sechs Würfel pro Kiste – führt zu weniger gegenseitiger Beeinflussung
- keine Öffnung der Boxen während der Probenentnahme, da ein Schlauchsystem eingebaut wurde – mit dichtem System muss keine Evaporationsmenge gegengerechnet werden
- Entnahmemenge von 6 ml auf 2 ml verringert
- Entnahmezeitpunkte fanden am 0., 1., 2., 6., 7., 8., 9., 10., 13., 14., 21., und 28. Tag statt.
- Seitliche, vollflächige Abdichtung der Proben mit Silikonmasse

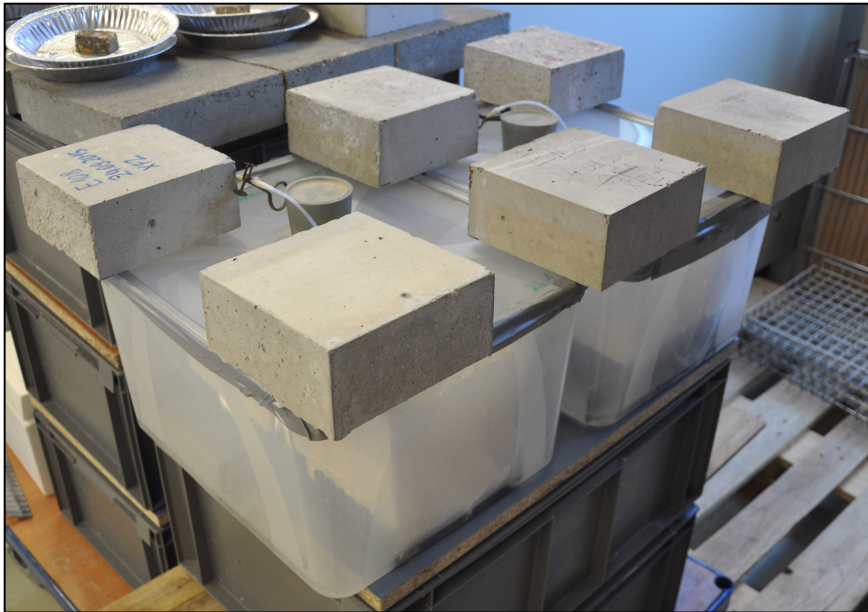


Abbildung 19 Neuer verbesserter Chlorideindringungstest mit kleineren Boxen auf den großen Boxen des ersten Chlorideindringungstest

3.4 Probenvorbereitung und Bohrmehlgewinnung für die Analysen

Nachfolgend werden die angewandten Methoden zur Gewinnung von Bohrmehl und die Vorbereitung der Proben für die Analysen näher erläutert.

Den Anfang machte die Bohrmehlentnahme der CDF- und B5-Chlorideindringungstestproben. Ein vertikal eingespannter Bohrhämmer (siehe Abbildung 21) hat auf vier voreingestellten Tiefenstufen (5, 10, 20 und 25 mm) sechs bis acht Löcher gebohrt, um an den jeweiligen Stufen 1 mm Bohrmehl zu entnehmen. Ein Problem stellten die abwitterungsbedingten variierenden Höhen der Oberfläche bei den CDF-Proben dar. Da aber bei jeder Probe im Vorfeld die Maße aller Seiten genommen wurden, konnte eine durchschnittliche Originalhöhe für jeden Würfel einzeln eingestellt werden, die als Ausgangshöhe diente. Nach jeder Bohrstufe wurden alle Löcher und der Bohrkopf gereinigt, um den Einfluss des bis zu diesem Zeitpunkt entstandenen Bohrmehls zu minimieren. Darauf folgend wurde 1 mm in die Tiefe gebohrt, der Würfel auf einem Blatt Papier umgedreht und mit einem Pinsel das an den Bohrwänden haftende Mehl „ausgebürstet“. Der letzte Schritt lag im Messen und Notieren der Bohrmehlentnahmetiefen jedes Bohrlochs. Für alle Proben fand die Abnahme der Bohrtiefe an der Bohrwand statt. Somit ist die tiefste Stelle des verwendeten konischen Bohrers, die 2,8 mm unter der angegebenen Höhe liegt, nicht berücksichtigt. Anhand der Abbildung 24 ist die Entnahmestufe grafisch dargestellt.

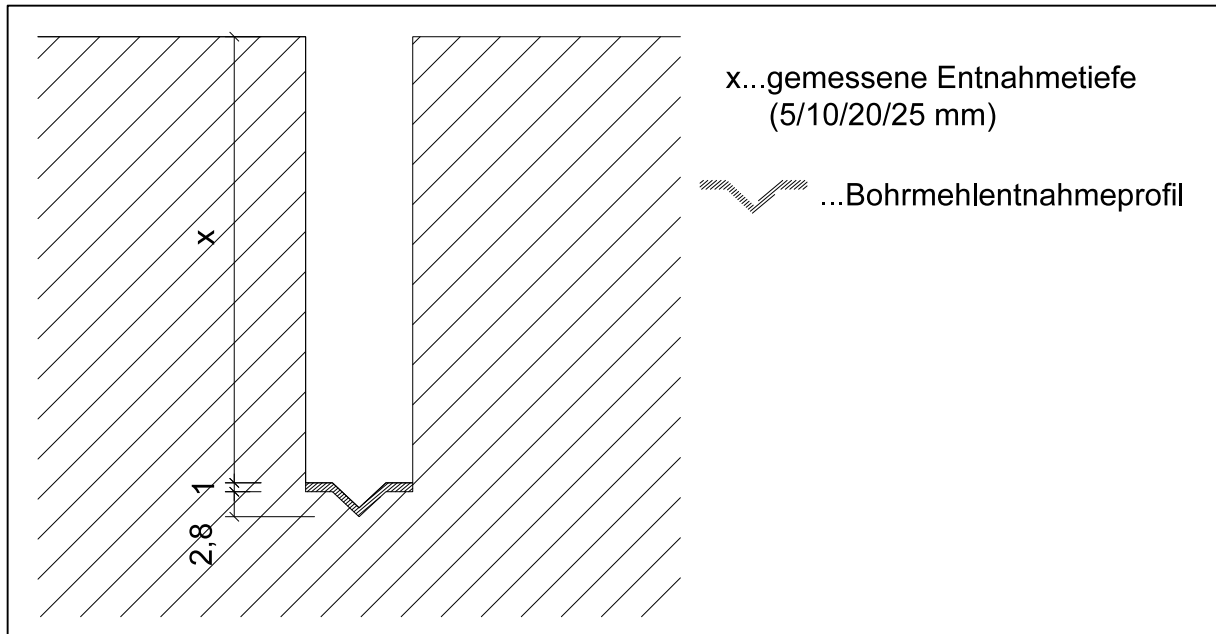


Abbildung 20 Bohrmehlentnahmepprofil mit konischem Bohrkopf

Nachfolgend wurde aus den bis zu acht Löchern pro Tiefe der Mittelwert gebildet und als Tiefenstufe(n) in den Chloridkonzentrationskurven der Kapitel 4.1.6 und 4.2.5 verwendet.

Entnommene Bohrmehlproben wurden mit einer 2%igen Salpetersäuren-Lösung verdünnt und mit Reinstwasser auf einen Verdünnungsfaktor von 700 verdünnt und filtriert, um mit dem Ionenchromatografen den gebundenen Chloridgehalt bestimmen zu können (Kapitel 2.3.1). Eine niedrigere Verdünnung hätte in diesem Falle die Säulen des Chromatografen beschädigen können.

Als zweite Möglichkeit zur Informationsgewinnung diente der Spaltzug in Kombination mit einer 0,1 mol Silbernitrat-Lösung (CDF-Test und beschleunigte Chlorideindringung der B5 Betone). Die zuvor gebohrten, aber auch die für die Bohrmehl-Entnahme nicht herangezogenen Proben wurden maschinell gespalten und direkt im Anschluss mit der Silbernitrat-Lösung besprüht, um den Zeitraum für eine Karbonatisierung der Oberfläche minimal zu halten. Das in den Proben vorhandene Chlorid fällt zu Silberchlorid aus und ist optisch hell oder weißlich zu charakterisieren, während Zonen, bis zu denen die Cl-Ionen noch nicht vorgedrungen sind sich bräunlich verfärben (Silberhydroxid). Dieser Prozess der Verfärbung wird durch die vorhandene UV-Strahlung beschleunigt [6]. Dadurch lassen sich die unterschiedlichen Eindringtiefen in einer Ebene zwar sehr gut darstellen, jedoch werden nur freie Chlorid-Ionen mit dem Silbernitrat gebunden. Wie aus Abbildung 22 ersichtlich ist, wurden Fotos aller gespaltenen Exemplare erzeugt und Eindringtiefen oder auch Farbumschlagsgrenzen und Color-change-boundary genannt an drei oder vier relevanten Stellen abgelesen. Bei manchen Proben konnte man eine Fehlfunktion des Alu-Butyl-Klebebands feststellen, dass zu seitlichem nach oben Saugen der Chloridlösung führte.

Die während des laufenden CDF- und beider Chlorideindringungstests entnommenen Lösungsproben bilden die dritte Möglichkeit zur Darstellung einer Chloridaufnahme und werden ebenfalls mit der Ionenchromatografie auf den Cl-Gehalt ausgewertet.

Bevor die Nassproben mittels der Ionenchromatografie auf ihren Chlorid-Gehalt hin untersucht wurden, war aufgrund der sehr hohen Leitfähigkeit von ~ 45 mS/cm (Grenze IC = 1000 μ S/cm)

und dem hohen pH-Wert von über 12 eine Verdünnung mit Reinstwasser aller Proben um den Faktor 1000 notwendig.

Für die Analyse mit der Mikrosonde (Kapitel 2.3.2), das letzte angewandte Testschema, waren folgende Vorbereitungen notwendig:

Aus den Probenwürfel wurden Prismen mit den Maßen 45x20x20 mm (zumeist trocken) geschnitten. Ein Nassschneiden an der falschen Stelle (z. B. der zukünftig untersuchten Oberfläche) hätte zu einer Auswaschung der Chloride geführt. Weiters wurden alle Oberflächen der Prismen mit einem Epoxidharz behandelt, für vier Minuten bei 20°C und 400 mBar in eine Unterdruckkammer gestellt und nach der Herausnahme für 12 Stunden im Labor getrocknet. Fertig vorbereitete Prismen wurden im nächsten Schritt auf transparente Glasplättchen geklebt und zu Dünnschliffen verarbeitet (Abbildung 23), um direkt danach mit der Mikrosonde untersucht zu werden. Die verwendete Mikrosonde vom Typ JEOL JXA 8200 besitzt fünf WDS (Wave-length dispersive spectrometer) und einen EDS Detektor. Folgende Parameter, Einstellungen und Bauteile wurden für die Elementmappings verwendet:

- Filament – 15 kV Spannung und 30 nA Stromstärke
- Detektorkristall (CI) vom Typ PETH
- Bezeichnung der charakteristischen Röntgenstrahlung – K alpha 1
- Typische Mappingsgrößen 525 x 500 und 450 x 450 mit 0,04 x 0,04 mm Pixelgröße
- Quantitative Auswertung der Mappings mittels Tugtupite als Standard

Eine Auswertung aller gewonnenen Resultate ist im Kapitel 4 und deren Unterpunkte dargestellt.

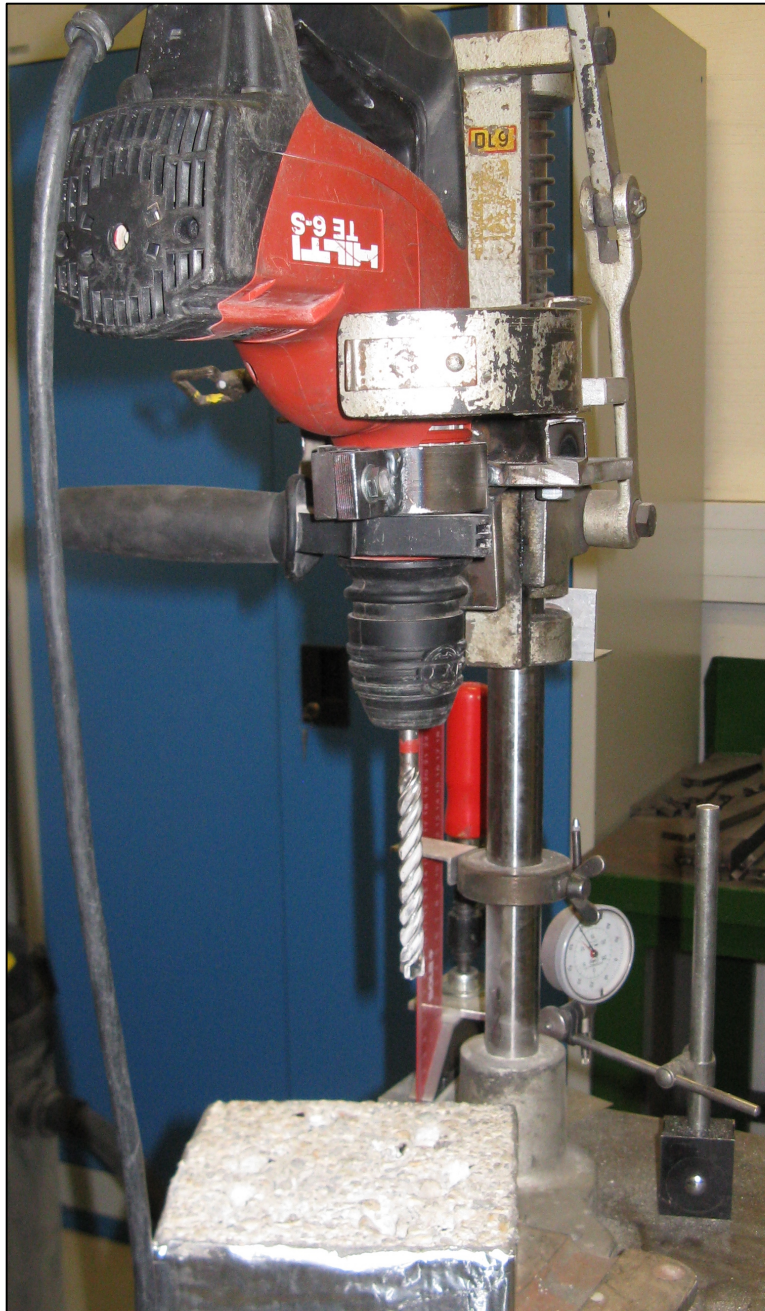


Abbildung 21 Bohrvorrichtung zur Entnahme des Bohrmehls, Indikatorring mit Winkel ermöglicht präzise Bohrstufeneinstellungen

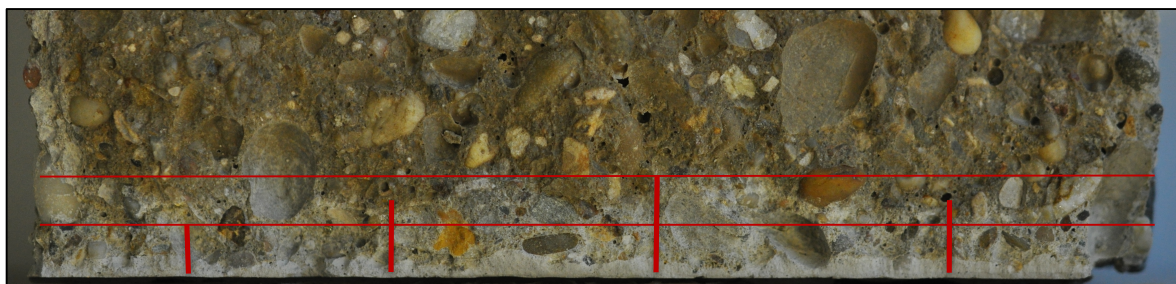


Abbildung 22 Silbernitrat appliziert auf einer gespaltenen Oberfläche, chlorid-ionenbeeinflusste Stellen sind hell/gräulich dargestellt



Abbildung 23 Aufnahme eines Teilbereichs eines Dünnschliffpräparats unter 40x Vergrößerung mit einer Seitenlänge von 40 x 20 mm

3.5 Auswahl der Berechnungsgrundlage zur Bestimmung der Chlorid-Diffusionskoeffizienten

Die Wahl des entsprechenden Berechnungsmodells zur Bestimmung des Chlorid-diffusionskoeffizienten spielt eine große Rolle zur sachgemäßen Abbildung der im Kapitel 4 folgenden Ergebnisse. Im Speziellen wird der erwähnte Koeffizient aus der Chlorid-Ionenkonzentration hergeleitet, die mit Hilfe des Ionenchromatografen an Flüssigproben aus den Lösungsentnahmen und den aufbereiteten Bohrmehlproben bestimmt wurden. Folgende Berechnungsvarianten wurden näher betrachtet:

3.5.1 Chlorideindringung bei Verkehrsbauwerken nach Kapteina

Kapteina [7] führt in ihrer Arbeit mehrere Modelle zur Berechnung der Chloridkonzentration an. Das nachfolgend Angeführte eignet sich speziell für Verkehrsbauwerke von ihr als „AiF“-Modell bezeichnet.

$$C(x, t) = (C_{S, \Delta x} - C_{ini}) \cdot \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t_{exp}}} \right] + C_{ini} \quad (6)$$

mit:

$C(x,t)$	Gesamtchloridgehalt im Beton zum Alter t in einem Abstand zur Betonoberfläche x [M%/t]
$C_{S,dx}$	Chloridkonzentration in der Tiefe Δx in Abhängigkeit der anstehenden Chlorideinwirkung [M%/t]
C_{ini}	Grundchloridgehalt, eingebracht durch Ausgangsstoffe [M%/t]
x	Tiefenlage, ausgehend von der Betonoberfläche [mm]
Δx	Tiefenbereich, der, durch ggf. intermittierende Chlorideinwirkung bedingt, vom Fick'schen Verhalten abweichende Chloridkonzentrationen zeigt [mm]
t	Betonalter [a]
t_{exp}	Expositionszeit [a]
erf	Gauss'sche Fehlerfunktion, auch Fehlerfunktion [-]
$D_{app}(t)$	scheinbarer Chloriddiffusionskoeffizient von Beton [mm ² /a]

$D_{app}(t)$ wiederum errechnet sich wie folgt:

$$D_{app}(t) = \frac{\left[\frac{D_{RCM,t=28d} - D_{RCM,t=\infty}}{(1-\alpha-\beta)} \left(\left(\frac{t_0}{t} \right)^{(\alpha-\beta)} \cdot t - t_0 \right) + \frac{D_{RCM,\infty}}{(\alpha-\beta)} \left(\left(\frac{t_0}{t} \right)^\beta \cdot t - t_0 \right) \right] \cdot k_t \cdot k_T \cdot k_{RH}}{t - t_0} \quad (7)$$

mit

$D_{RCM,t=28d}$	Chloridmigrationskoeffizient zum Alter von $t = 28$ Tagen [mm ² /a]
$D_{RCM,t=\infty}$	Chloridmigrationskoeffizient im unendlichen Alter [mm ² /a]
t_0	Referenzalter [a] meist 28 Tage
α	hydratationsbedingter Altersexponent [-]
β	Altersexponent zur Berücksichtigung von Nass-Trocken-Wechsel und weitere Einflüsse aus der Umwelt [-]
k_T	Übertragungsparameter, um Abweichungen zwischen Chloridmigrationskoeffizienten, die unter beschleunigten Bedingungen (Rapid Chloride Migration - D_{RCM}) ermittelt werden, und dem effektiven Diffusionskoeffizienten, der im Labor durch Einlagerungsversuche bestimmt wird, zu berücksichtigen [-]
k_t	Parameter zu Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit [-]
k_{RH}	Parameter zu Berücksichtigung der Abhängigkeit von der relativen Luftfeuchte [-]

Aus den Variablen ist zu entnehmen, dass das angeführte Berechnungsmodell auf einen Einsatz außerhalb der Laborbedingungen abzielt. Zusätzlich kommen Parameter (z.B. k_T) und Migrationskoeffizienten zum Einsatz, die Bezug auf den Nordtest 492 Rapid Chloride Migration [15] nehmen und für den aktuellen Testablauf nicht zur Verfügung standen.

3.5.2 Chlorideindringung bei Meeresbauwerken nach Gehlen

Ebenfalls von Kapteina [7] angeführt beschreibt dieses Modell die Chlorideindringung bei Meeresbauwerken.

$$C(x, t) = C_{S, \Delta x} \left[1 - \operatorname{erf} \frac{x - \Delta x}{2 \cdot \sqrt{D_{ef, C}(t) \cdot t}} \right] \quad (8)$$

mit

$C(x, t)$	Gesamtchloridgehalt im Beton zum Alter t in einem Abstand zur Betonoberfläche x [M%/t]
$C_{S, \Delta x}$	Chloridkonzentration in der Tiefe Δx in Abhängigkeit der anstehenden Chlorideinwirkung [M%/t]
x	Tiefenlage, ausgehend von der Betonoberfläche [mm]
Δx	Tiefenbereich, der, durch ggf. intermittierende Chlorideinwirkung bedingt, vom Fick'schen Verhalten abweichende Chloridkonzentrationen zeigt [mm]
t	Betonalter [a]
erf	Gauss'sche Fehlerfunktion, auch Fehlerfunktion [-]
$D_{ef, C}(t)$	Effektiver Chloriddiffusionskoeffizient von Beton zum Beobachtungszeitpunkt t [mm ² /a]

$D_{ef, C}(t)$ errechnet sich wie folgt

$$D_{ef, C}(t) = k_e \cdot D_{RCM, 0} \cdot k_t \cdot A(t) \quad (9)$$

mit

$D_{RCM, 0}$	Chloridmigrationskoeffizient nach RCM-Methode von wassergesättigtem Beton an definiert hergestellten und vorgelagerten Probekörpern im Alter von 28 Tagen [mm ² /a]
k_t	Übertragungsparameter, um Abweichungen zwischen Chloridmigrationskoeffizienten, die unter beschleunigten Bedingungen ermittelt werden, und Diffusionskoeffizienten, die unter natürlichen Bedingungen z. B. im Labor bestimmt werden, berücksichtigen zu können [-]
k_e	Variable zur Berücksichtigung der Temperaturabhängigkeit des effektiven Chloriddiffusionskoeffizienten [-]

Dieses Modell ist unter den gleichen Gesichtspunkten wie das Vorhergehende auszuschließen, da kein Rapid Chloride Migration Test zur Verfügung stand.

3.5.3 Neuer Kurzzeit Diffusionstest

Wie in Kapitel 2.2.4 beschrieben, wird auch dieser Formelapparat nicht verwendet, da alle Proben aus den Chlorideindringungstests und dem CDF-Test in Lösung lagen und kein vertikaler Wasserdruck auf die einzelnen Betonkörper ausgeübt wurde. Es wurde bewusst auf den Wasserdruck verzichtet, da eine Kompatibilität zwischen der Frost-Tausalzprüfung (CDF-Test) und dem Chlorideindringungstest gesucht wurde. [1]

$$C_{source}(t) = C_{source}(0) \cdot \exp \left[D_{ST} \cdot \frac{t}{h^2} \right] \cdot \operatorname{erfc} \left[\left(D_{ST} \cdot \frac{t}{h^2} \right)^{\frac{1}{2}} \right] \quad (10)$$

mit

$C_{\text{source}}(t)$	Chloridkonzentration in der Lösung zu gegebener Messzeit t [M%/t]
$C_{\text{source}}(0)$	Ausgangskonzentration der NaCl-Lösung [M%/t]
exp	Exponentialfunktion [-]
D_{ST}	Tatsächlicher Diffusionskoeffizient (ST Short term aber mit Berücksichtigung des zweiten Fick'schen Gesetzes) [mm^2/a]
t	Messzeitpunkt [a]
h	Höhe der eingefüllten Lösung [mm]
erfc	= $(1-\text{erf}(x))$ Fehlerfunktion [-]

3.5.4 Nordtest 443 Accelerated Chloride Penetration

Wie in Kapitel 2.2.2 angeführt, beschreibt dieses System eine ähnliche Methodik wie der verwendete Aufbau für die Chlorideindringungstests der B5 und B2 (modifizierte Version) Betone. Für das Kapitel 4 wird diese Formel zur Berechnung der Diffusionskoeffizienten verwendet. Im Detail wird der gesuchte Wert D_e durch das „fitten“ der Funktion (11) mit Hilfe einer nicht-linearen Regressionsanalyse ermittelt. Das Berechnungsmodell wurde mit MS Excel ausgeführt. Die Iteration der beiden Variablen C_s und D_e der Gleichung sind nötig bis die geringste Summe des Fehlerquadrats zwischen der Funktion und den tatsächlichen Messpunkten entsteht, während die restlichen Werte im Labor bestimmt werden.

$$C(x, t) = C_s - (C_s - C_i) \cdot \text{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4 \cdot D_e \cdot t}}\right) \quad (11)$$

mit:

$C(x, t)$	Chloridekonzentration zum Messzeitpunkt in der gemessenen Tiefe [M%/t]
C_s	Randbedingung der beaufschlagten Oberfläche [M%/t],
C_i	Ausgangskonzentration gemessen am Betonkörper [M%/t]
x	Messtiefe [mm]
D_e	Effektiver Chloridtransportkoeffizient [mm^2/a]
t	Messzeit [a]
erf	Fehlerfunktion [-]

3.6 Untersuchung der Fehlerquellen und Verbesserungsvorschläge

Für zukünftige Testreihen werden in diesem Kapitel die aus den praktischen Versuchen gewonnenen Erfahrungen und auch Verbesserungsvorschläge angeführt.

3.6.1 Leitfähigkeitsmessung und Abwitterungsmasse

Um ein aussagekräftiges Ergebnis für die Eindringung von Chloriden bilden zu können, sind mindestens 3 Messpunkte notwendig, die im Fall des CDF-Tests schwer realisierbar sind, ohne den Testablauf massiv durch Unterbrechungen der Frost-Tauzyklen abzuändern. In diesen Fällen wurden ausschließlich Messungen nach gewissen FTW-Zyklen genommen und mit der Ausgangslösung verglichen, da nach den Zyklen auch die Chloridlösung erneuert

wurde. In der Leitfähigkeitsmessung gab es, wie in Kapitel 4.1.1 erwähnt wird, je einen Ausreißer, während der Messung in der Lösung enthaltenen Abwitterungsmassen zurückzuführen ist.

Bei den beschleunigten Chlorideindringversuchen gab es Probleme mit dem Gewicht der Behälter. Jede dieser Kunststoffkisten hatte in der Ausgangskonfiguration sechs Würfel, die jeweils ungefähr 8 kg wogen, enthalten. Da der Pegel der Chloridlösung in den Volumina mit 1,5 cm zu niedrig für das Leitfähigkeitsmessgerät war, ist der erwähnte Behälter von zwei Personen vom Stapel runtergehoben und in eine Schräglage gebracht worden. Dabei kann es durch ein zu abruptes Abstellen zu einem Austritt der Chloridlösung kommen, was das Ergebnis eventuell negativ beeinflusst.

3.6.2 Flüssigprobenanalyse

Ein großer Einflussfaktor bei der Entnahme spielte das vorherige Spülen der Entnahmespritzen. Da in den Spritzen nach der Benützung am darauffolgenden Tag Ablagerungen von Salzkristallen sichtbar waren, ist der Einfluss durch das tägliche Spülen mit der Chloridlösung minimiert worden.

Nachdem die Lösungsentnahmen beendet waren, mussten die Proben für die Untersuchung mit dem Ionenchromatografen (IC) vorbereitet werden. Dies geschah mit der Verdünnung der Proben in zwei Schritten auf einen Faktor von 1000. Gerade bei den B2 Proben stellte sich dieser Verdünnungsprozess als sehr heikel dar, weil nur 2 ml pro Probe wenig Spielraum für Fehler einräumte. Ein weiteres Problem war bei der ersten Verdünnung (B5 und B2) auf den Faktor 100, dass im Becherglas die eingefüllte Probenmenge von 0,5g sehr schnell evaporierte und dadurch ein Zeitdruck entstand. Die zwei Verdünnungsschritte sind wegen den zu hohen Konzentrationen und des zu hohen pH-Werts der Proben, der die Grenzwerte des IC übersteigt, notwendig.

3.6.3 Bohrmehlanalyse

Für ein gutes Ergebnis sind über den ganzen Entnahmeprozess und später auch beim Verdünnen der Proben ist eine hohe Präzision, eine reinliche Handhabung sowie ein lückenloses Protokoll für ein gutes Ergebnis eine Grundvoraussetzung. Folgende Aspekte sollten bei einer zukünftigen Durchführung bzw. Auswertung jedoch beachtet werden:

- Für eine bessere Darstellung des auftretenden Chloridprofils einzelner Würfel empfiehlt es sich eine feinere Abstufung der Bohrmehlentnahmetiefen zu wählen, zum Beispiel 5-10-15-20-25 mm. Dadurch ist auch eine bessere Vergleichbarkeit der unterschiedlich alten Probenreihen gegeben.
- Es sollten größere Bohrdurchmesser und weniger Bohrlöcher in Betracht gezogen werden. Für die in diesem Rahmen durchgeführten Probenentnahmen mussten im Durchschnitt 7 Bohrungen pro Probenkörper mit einem 12 mm Bohrkopf vollzogen werden, um die gewünschte Entnahmemenge von mehr als 1 g pro Bohrstufe zu erreichen. Bei schlechter Positionierung kann es dazu kommen, dass für das

daraufliegende Herausschneiden der Quader für die Mikrosondenanalyse keine relevante Fläche mehr vorhanden ist.

3.6.4 Mikrosondenanalyse

Bei der Auswertung der Ausgabeprotokolle ist es von höchster Priorität, dass die Datensätze mit den Scans verglichen und die Chloridkonzentrationstabellen pixelgenau auf die Eindringtiefen kontrolliert und nachbearbeitet werden. Nur unter diesen Umständen ist es möglich das reale Verhalten genau darzustellen. Wie in Kapitel 4.1.7 erwähnt, ist die Darstellung eines Konzentrationsgradienten in direktem Vergleich mit den Chlorideindringungstests optisch nicht so eindeutig beurteilbar, da die Zerstörung durch die Frost-Tauzyklen eine Gefügezerstörung hervorruft, in die das Epoxidharz eindringen kann. Das erwähnte Harz beinhaltet Chloride und ist in der Lage das Ergebnis zu beeinflussen. Weiters ist zu beachten, dass die verwendete Mikrosonde vier Eckpunkte zum Eingrenzen der analysierbaren Fläche benötigt, die im Falle der CDF-Proben wegen der zum Teil mangelhaften Probenpräparation schwer zu justieren waren. Ebenfalls im Kapitel 4.2.6 aufgezeigt, ist es bei der Probe des Ökobeton 2 zu einer sehr unebenen Schnittfläche gekommen, dass zu zwei sehr kleinen Dünnschliffflächen reduziert wurden. Die Konsequenz daraus war eine zu geringe Analysefläche. Zu einem gewissen Grad war das auf die hohe Anzahl an Bohrlöchern zurückzuführen, die einen fragilen Bereich für die Entnahme der Quader übrigließen, dennoch besaß auch die Präzision des Probenherstellers einen Einfluss auf das Resultat.

Der letzte erwähnte Punkt betrifft den Vergleich der Bohrmehlproben mit denen der Mikrosonde: Es ist wünschenswert, dass in zukünftigen Mikrosondentests gleich tiefe Quader ausgeschnitten werden, wie es mit der maximalen Bohrstufe erreicht wird, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Denn während die Proben der Bohrmehlergebnisse bis zu einer Tiefe von 25 mm durchgeführt wurden, ist im Fall der Mikrosonde der Bereich je nach Probe im besten Fall bis 20 mm abgedeckt.

4 Auswertung der Ergebnisse

Aus den Kapitel 3.1 bis einschließlich 3.4 beschriebenen Verfahren folgen die ausgewerteten Ergebnisse.

4.1 CDF-Test nach BAW Richtlinie

Für die drei Prüfreihe (Referenzbeton, Ökobeton 1 und Ökobeton 2 – siehe Kapitel **Error! Reference source not found.**) sind die Resultate aus den Versuchen chronologisch nach der Auswertung aufgelistet und beschrieben.

4.1.1 Leitfähigkeitsmessung der Lösung

Nach dem achten Frost-Tauwechsel (FTW) wurden die Proben aus dem Schrank entnommen und für einen Lösungswechsel vorbereitet. Im Anschluss zum Ultraschallbad und vor dem Abspülen der Probekörper wurde die Leitfähigkeit der Lösung der ersten und vierten Probenschale mit einer Leitfähigkeitselektrode bestimmt. Dieser Vorgang wurde für die Ausgangslösung sowie für den 14., 22. und 28. FTW wiederholt. In den Diagrammen Abbildung 24 und Abbildung 25 wurde die Leitfähigkeit auf der vertikalen Achse gegenüber des jeweiligen FTW auf der horizontalen Achse gestellt.

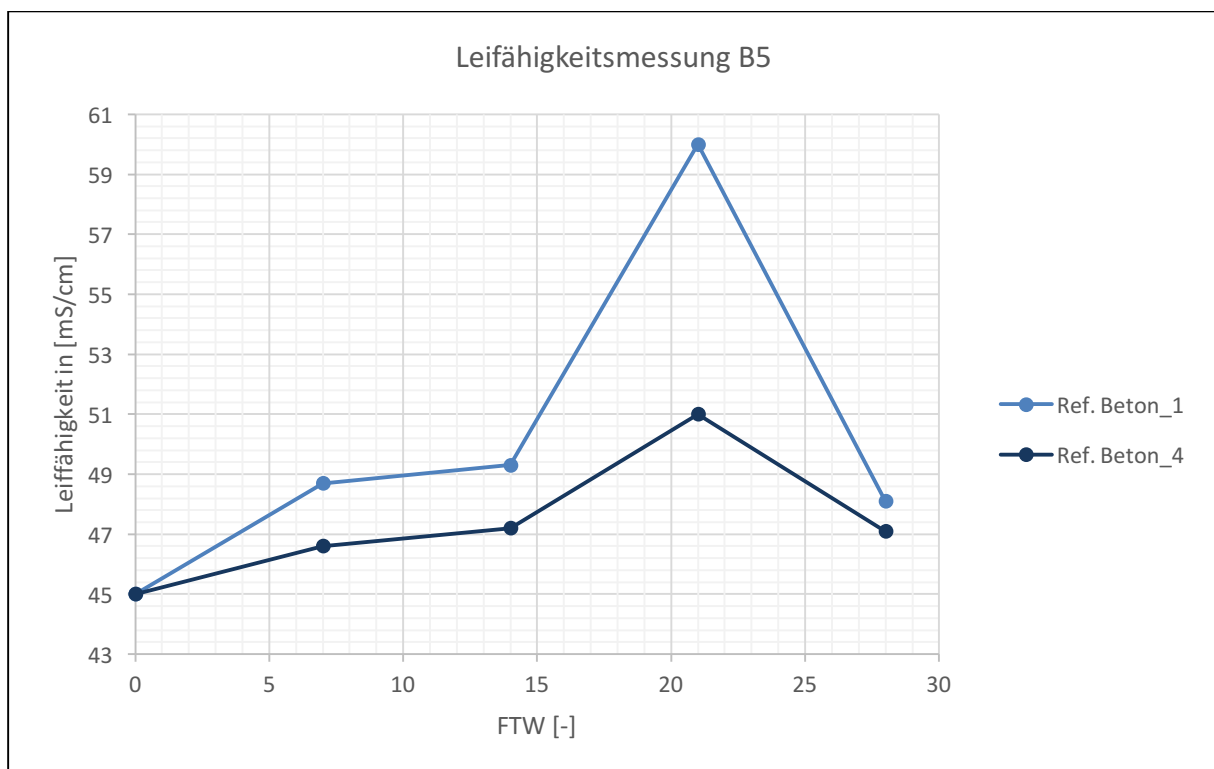


Abbildung 24 Leitfähigkeit der Lösungen B5

Die Ausgangsleitfähigkeit wurde bei allen Proben mit 45 mS/cm gemessen. Das Leitfähigkeitsmessgerät stellt die Gesamtleitfähigkeit der Lösung dar und nicht nur die von den gesuchten Cl- Ionen.

Im Allgemeinen sieht man einen Trend zur Erhöhung der Leitfähigkeit der Proben mit der Zeit. Zusätzlich sind bei allen Reihen Ausreißer (>50 mS/cm) zu vernehmen. Eine Erklärung für diese Spitzen kann die erhöhte Abwitterungsmasse gegenüber der vorigen FTW-Messung sein, wie es bei beiden abgebildeten Referenzbetonproben der Fall war. Bei dem 14. Frost-Tauwechsel witterten 9,89 g bzw. 13,48 g für die Proben 1 und 4 ab, während nach dem 22. FTW 12,15 g und 16,94 g gemessen wurden. Jedoch widerlegen beide Proben der Ökobeton 2 Reihe diese Annahme, da zwar hohe Abwitterungsmassen gewogen wurden, jedoch nicht die absolute größte Menge oder auch kein gravierender Anstieg zur vorigen Einwaage vorhanden war. Für eine bessere Darstellung wurden Mittelwerte der einzelnen Proben unter den Reihen gebildet.

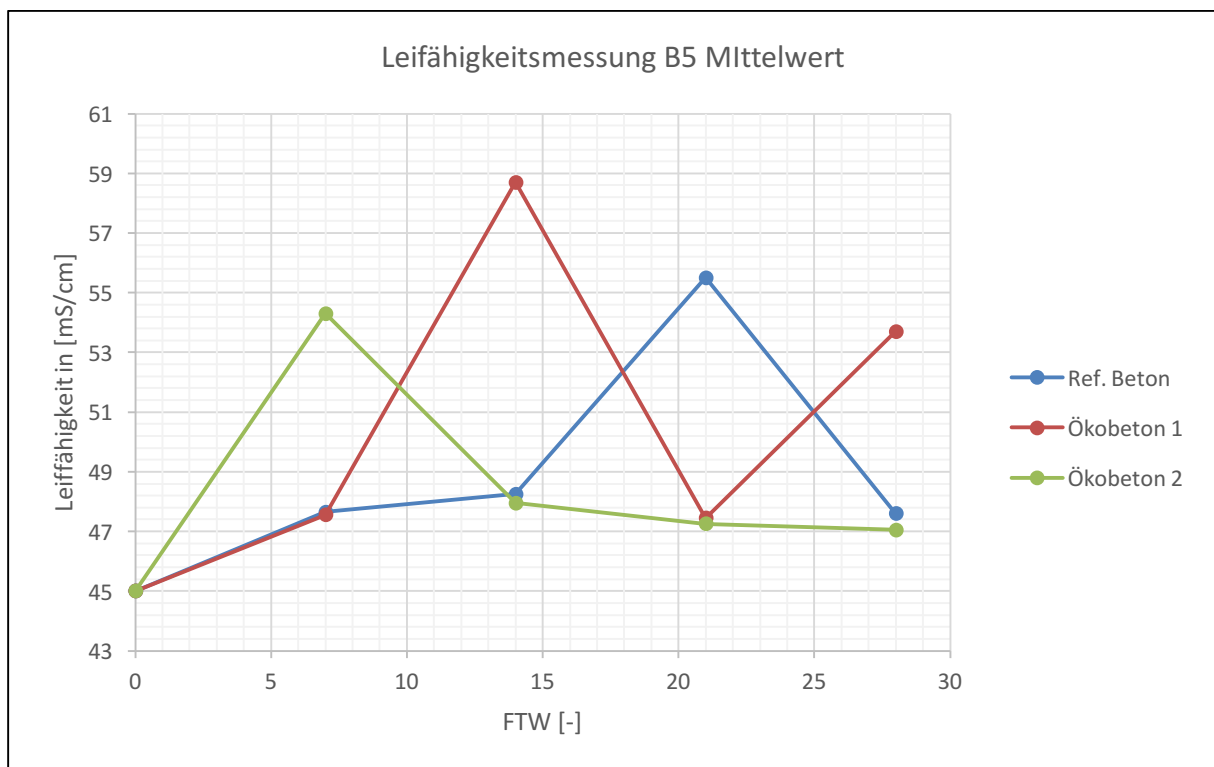


Abbildung 25 Mittelwerte der Leitfähigkeit der Probenreihen

Es ist ersichtlich (Abbildung 25), dass alle drei Reihen zu unterschiedlichen Belastungszyklen Spitzenwerte produzieren. Einerseits kann nicht eindeutig ausgeschlossen werden, dass eine Fehlmessung die Folge dieser Sprünge ist. Andererseits ist trotz der großen Ausreißer die Leitfähigkeit vom 7. bis zum 28. FTW nicht signifikant gestiegen.

4.1.2 Abwitterungsmasse

Mit jedem Lösungswechsel wurde auch die bis zu diesem Zeitpunkt entstandene Abwitterungsmasse bestimmt. Ist kein Maximalwert für die Abwitterung vereinbart, gibt das BAW-Blatt [19] den Wert mit 1500 g/m² an, der für XF4 bestimmt ist. Dieser darf im Regelfall nicht überschritten werden, da aber die B5 Betone eine niedrigere Qualifikation nämlich XF2 besitzen gilt hier die Ausnahme. Folgend ist die Zunahme der absoluten gemittelten Abwitterungsmassen in g/m² gegenüber der Anzahl der Frost-Tauwechsel (FTW) geplottet.

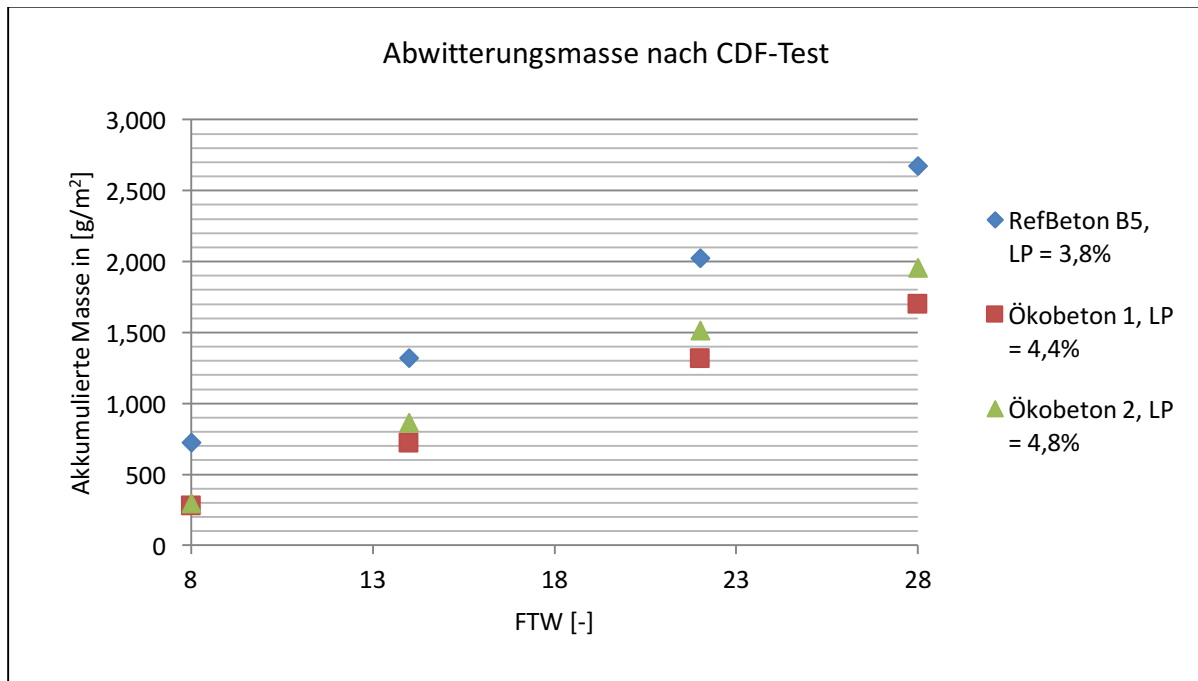


Abbildung 26 Akkumulierte Mittelwerte der Abwitterungsmassen pro FTW

Wie im Diagramm Abbildung 26 ersichtlich übersteigen alle drei Reihen den Wert von 1500 g/m² deutlich, der in diesem Fall als Grenze nicht relevant ist. Während beide Ökobetonreihen (E109 und E110) zum Zeitpunkt des 8. FTWs annähernd gleiche Mengen an abgewitterter Masse verlieren, verhält sich der Ökobeton 1 ohne Hüttensandanteile (siehe Kapitel 3) im späteren Verlauf deutlich besser. Insgesamt besitzt der Referenzbeton eine wesentlich höhere Abwitterungsmasse als beide Ökobetone. Die Luftporengehalte des jeweiligen Frischbetons (Alter: 45 min.) unmittelbar vor der Probenkörperherstellung betragen für den Referenzbeton 3,8 %, für den Ökobeton 1 = 4,4 % und für den Ökobeton 2 = 4,8 %. Beide Ökobetone wiesen ähnlich hohe Werte auf. Eine Gefügeverdichtung durch die hydraulische Wirkung von Hüttensand ist erst ab einem Alter von >56 Tagen und bei besonders feuchter bzw. Wasserlagerung der Proben zu erwarten.

4.1.3 Spaltzugfestigkeit

Nach der Beendigung der 28 Frosttauzyklen und der Bohrmehlentnahme wurde die jeweilige Spaltzugfestigkeit der Würfel bestimmt.

Tabelle 3 Mittlere Spaltzugfestigkeit der Probenreihen (E108, E109, E110) nach 28 Frost-Tauzyklen

Spaltzugfestigkeit in [N/mm ²] (Mittelwert von 4 Proben pro Reihe)			
	Referenzbeton B5	Ökobeton 1	Ökobeton 2
f _{ctm} [N/mm ²]	3,7	5	4,7
f _{ctm} /f _{cm,28d} [-]	0,069	0,079	0,074

Der Ökobeton 1 besitzt zum Referenzbeton eine um 27 % erhöhte mittlere Spaltzugfestigkeit, während der Ökobeton 2 sogar eine 35 prozentige Steigerung erzielt (siehe Tabelle 3). Für das Verhältnis der Spaltzugfestigkeit zu der mittleren Druckfestigkeit nach 28 Tagen sind die letztgenannten Werte aus der Tabelle 1 in Kapitel **Error! Reference source not found.** zu entnehmen.

4.1.4 Eindringtiefendarstellung mit Silbernitrat

Im Anschluss zur Spaltzugfestigkeitsbestimmung folgte das Aufsprühen der Silbernitratlösung auf einer Hälfte der gebrochenen Probekörper.

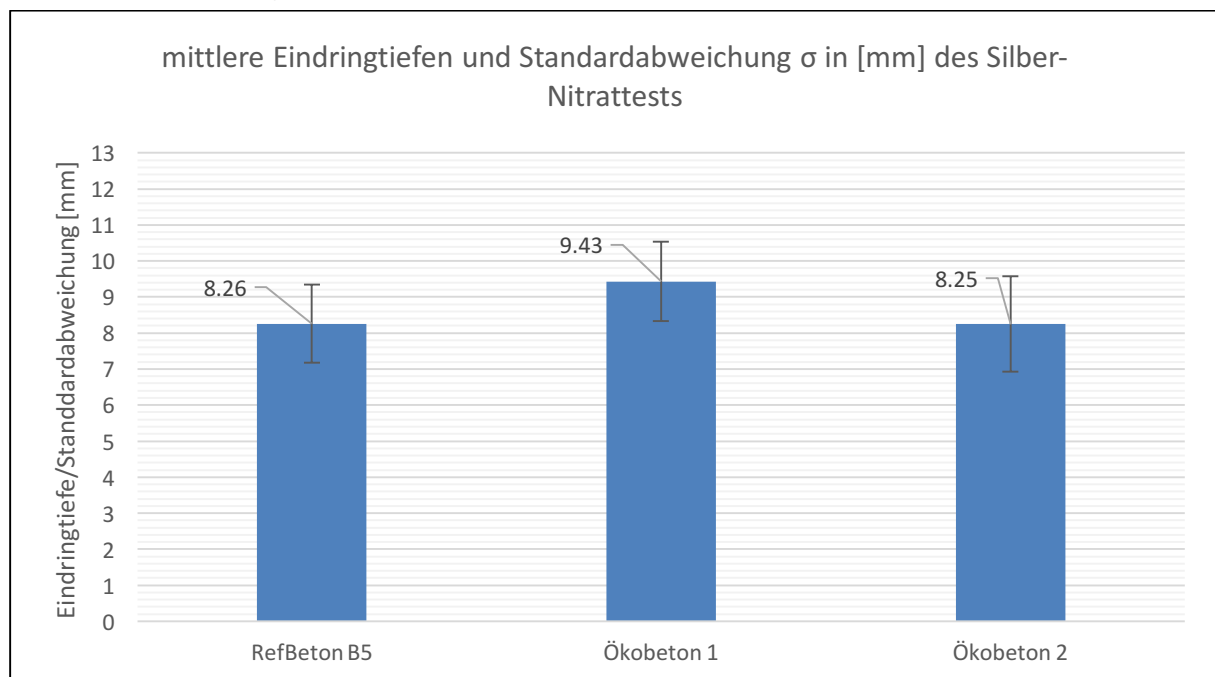


Abbildung 27 Mittlere Eindringtiefe von Chlorid des Referenzbetons und der beiden Ökobetone nach 28 Frost-Tauzyklen

Die Eindringtiefe (Color change boundary - CCB) von Chlorid des Ökobetons 2 liegt auf dem Niveau des Referenzbetons (Abbildung 27). Im Mittel übertrifft der Ökobeton 1 ohne Anteile von Hüttensand bei der Farbumschlagsgrenze (CCB) um ca. 1,2 mm. Die Standardabweichung der Eindringtiefe an den gewählten Messpunkten liegt bei dem Referenzbeton bei 1,08 mm, bei der Variante Ökobeton 1 bei 1,09 mm und an der dritten Reihe bei 1,33 mm. In Kapitel 4.1.6 wurden die gemittelten Eindringtiefen als Farbumschlagsgrenzen (Color-change-boundary) in die Curve-Fitting-Diagramme (Abbildung 33, Abbildung 34, Abbildung 35) eingetragen und die nötige freie Chloridkonzentration ermittelt, bei der die Oberfläche nach dem Aufsprühen des Silbernitrats seine Farbe ändert. Die daraus ermittelten Konzentrationen sind an dieser Stelle kurz in folgender Tabelle 4 zusammengefasst.

Tabelle 4 Farbumschlagsgrenzwerte der Chloridkonzentration der CDF-Proben

Ermittelte Konzentration der Farbumschlagsgrenzen in [M%] der CDF Proben			
	Referenzbeton	Ökobeton 1	Ökobeton
Eindringtiefe (CCB) [mm]	8,26	9,43	8,25
CCB-Konzentration [M%]	0,12	0,06	0,095

4.1.5 Flüssigprobenentnahme (IC)

Simultan zur Leitfähigkeitsmessung wurden auch Flüssigproben der Lösungen aus den Behältern 1 und 4 vom Referenzbeton, Ökobeton 1 und Ökobeton 2 (E108, E109, E110) entnommen. Nach der Verdünnung und anschließenden Untersuchung im Ionenchromatografen (IC) wurde die Lösung auf Natrium- und Chlorid-Ionen ausgewertet. Auf der vertikalen Achse in Abbildung 28 ist die Chloridkonzentration aufgetragen, die dem jeweiligen Lösungswechsel nach den entsprechenden Frost-Tauwechsel (FTW) gegenübersteht.

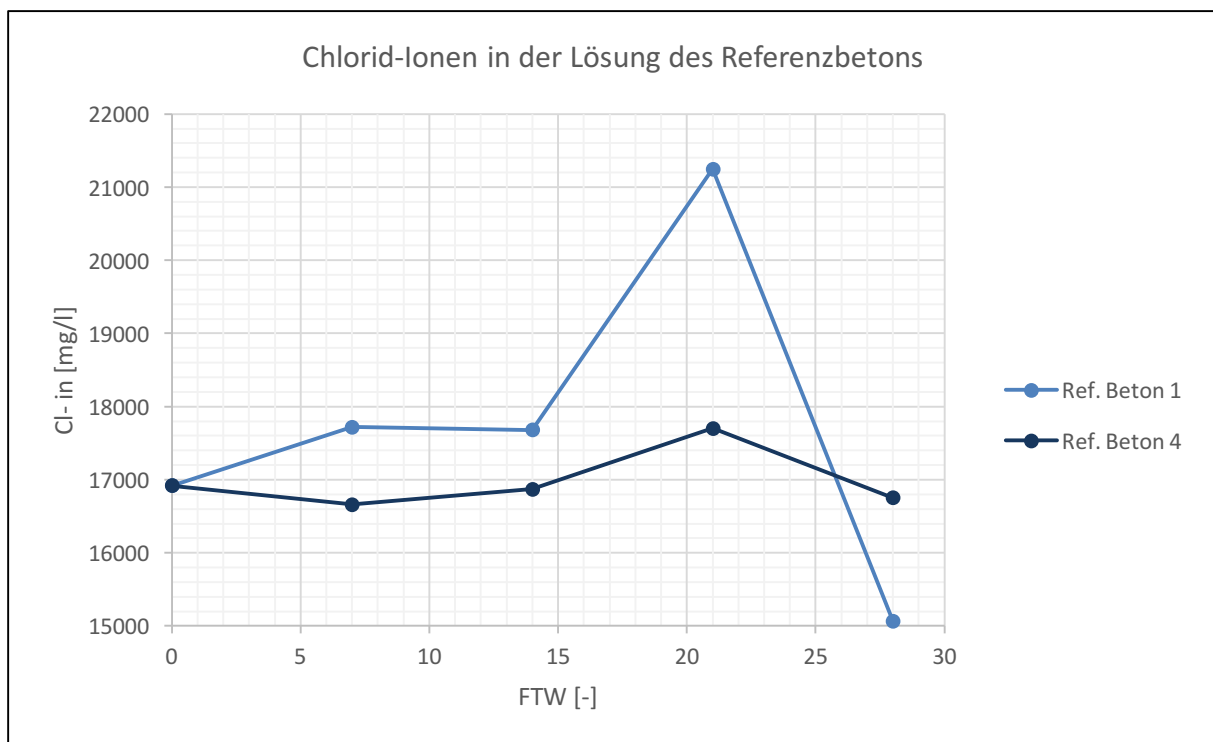


Abbildung 28 Chlorid-Ionenkonzentration der Lösung des Referenzbetons B5 (CDF-Test)

Es ist ein ähnlicher Trend zu der Leitfähigkeitsmessung des Referenzbetons auszumachen. Auch bei diesen Ergebnissen in Abbildung 28 ist ein Sprung beim 22. FTW auszumachen.

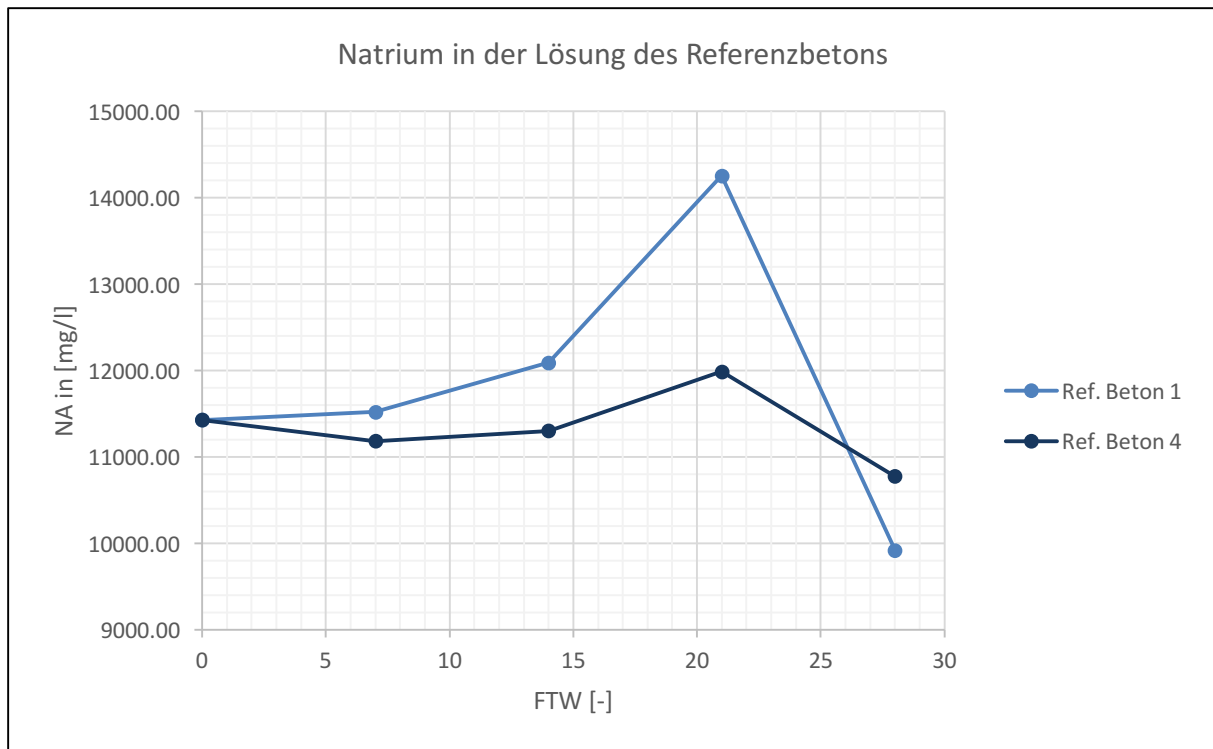


Abbildung 29 Natriumkonzentration der Lösung des Referenzbetons B5 (CDF-Test)

Wenn man Abbildung 29 mit Abbildung 28 vergleicht, verläuft die Kurve analog, mit dem Unterschied, dass auf der vertikalen Achse nun das Natrium in der Lösung aufgetragen ist. Aus der erwähnten Gegenüberstellung ist eine *messbare* Chloridbindekapazität auszuschließen, da in jeder Probenflüssigkeit gebundenes NaCl vorhanden ist und somit das Verhältnis beider Elemente ein fixes ist (Gerade). Die Bestätigung dafür liefert der Vergleich der gemessenen Natrium- und Chlorid-Ionenkonzentrationen der Lösungen in Abbildung 30. Auf der vertikalen Achse ist die Natrium- und auf der horizontalen Achse die Chloridkonzentration aller CDF-Proben (Referenzbeton, Ökobeton 1 und Ökobeton 2) aufgetragen. Die eingefügte Trendlinie mit ausgewerteter Funktion zeigt eine lineare Abhängigkeit von Na-Ionen zu Cl-Ionen mit hoher Übereinstimmung ($R = 0,9839$).

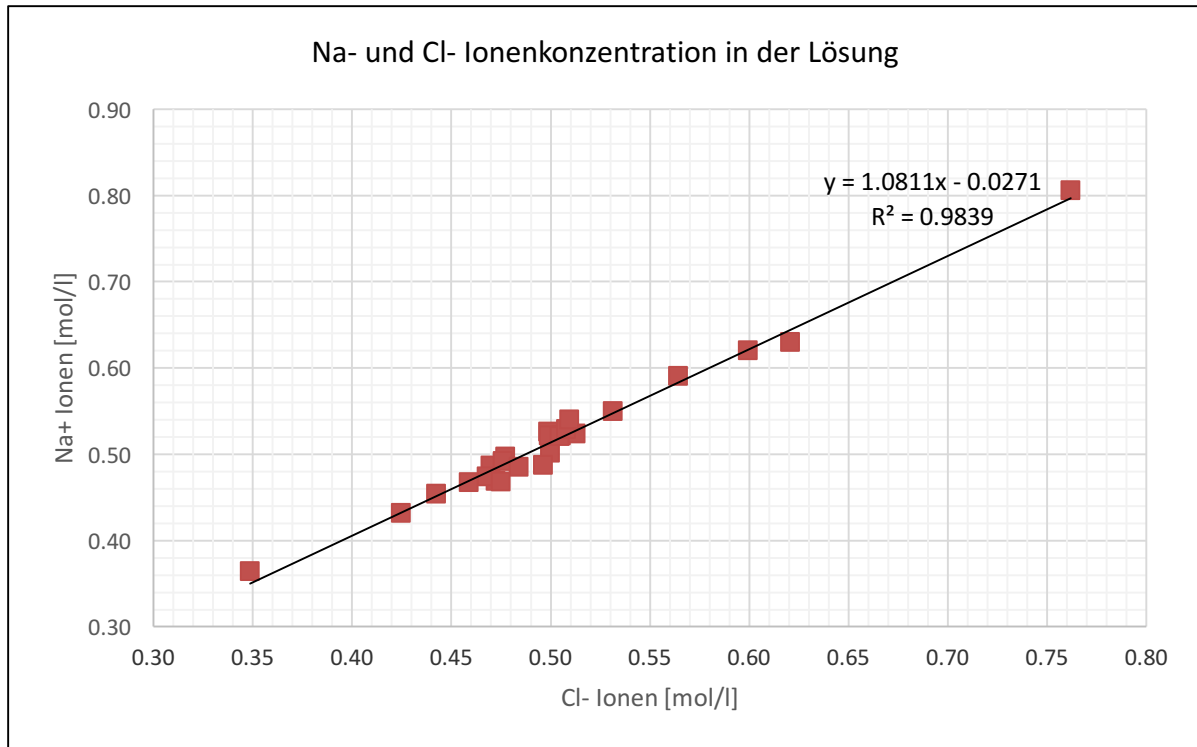


Abbildung 30 Natrium- und Chlorid-Ionenkonzentration in der Lösung

In dem letzten Diagramm (Abbildung 31) sind ebenfalls an den gleichen Stellen die Sprünge in der Chloridkonzentration auszumachen, wie in den dazugehörigen Leitfähigkeitsdiagrammen (Abbildung 24 und Abbildung 25). Jede erste Probe einer Reihe besitzt immer höhere Konzentrationen im Vergleich zu jeder 4. Probe. Die Referenzbetone verhielten sich am neutralsten mit den wenigsten und geringsten Spitzen. Im direkten Vergleich sprangen die Werte bei dem Ökobeton 1 am öftesten und höchsten. Dass bei der vierten Probe des Ökobeton 2 sogar eine Konzentration von ca. 12000 mg/l am letzten Messpunkt zu sehen ist, stellt ein Kuriosum dar.

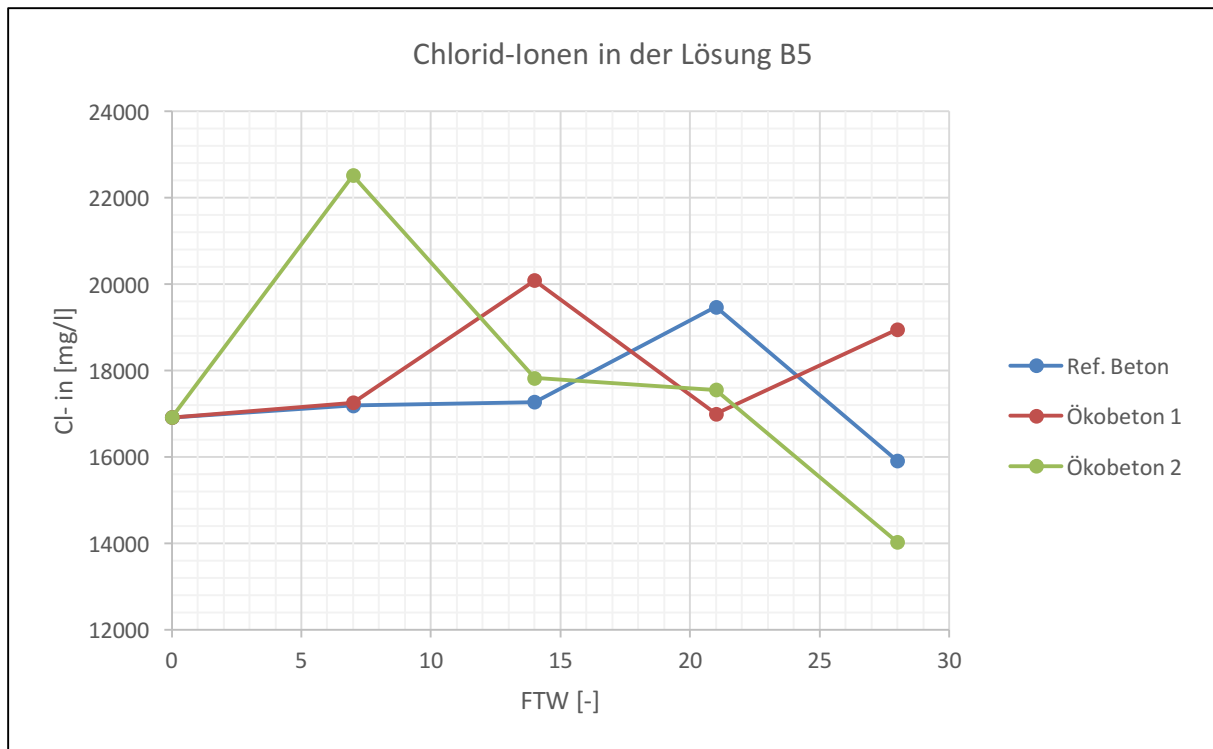


Abbildung 31 Chlorid-Ionenkonzentration der Lösung nach den Frost-Tauwechsel aller B5 Proben

Anhand der Abbildung 31 ist für jede Probenreihe eine annähernd konstante Chloridkonzentration in der Lösung (mit breiter Streuung) anzunehmen.

4.1.6 Bohrmehlanalyse (IC)

Nach dem Abschluss der Entnahme der letzten Flüssigproben und noch bevor die Würfel gespalten wurden, sind Bohrmehlproben aus den Tiefenstufen 5, 10, 20 und 25 mm genommen worden. In Abbildung 32 sind auf der horizontalen Achse die Tiefen der Entnahmeprobe gegenüber der an den erwähnten Stellen gemessenen Chloridkonzentrationen in M% auf der vertikalen Achse aus dem CDF-Test gestellt. Die geplotteten Werte des Chloridprofils bestehen pro Reihe aus dem Mittelwert zweier Würfel, um die Lesbarkeit positiv zu beeinflussen. In allen drei Fällen (Referenzbeton, Ökobeton 1 und Ökobeton 2) sieht der Verlauf sehr ähnlich aus: Beim ersten Messwert in 5 mm Tiefe liegt die Cl⁻ Konzentration zwischen 0,24-0,29 M% die rapide über die Bohrtiefe von 25 mm auf unter 0,01 bis 0,02 M% abnimmt. Bis zur 10 mm Stufe scheinen auch genügend viele Chlorid-Ionen für eine Reaktion mit dem Silbernitrat vorhanden gewesen zu sein, da sich bis zu diesem Punkt eine Farbveränderung erkennen lässt. Insgesamt besitzt der Referenzbeton im 5 und 10 mm Bereich eine um 21 % höhere Chloridkonzentration im Vergleich zu den Ökobetonen. Ab der 20 mm Entnahmemarke ähneln sich alle Betonsorten zeigen einen sehr niedrigen Chlorid-Ionen.

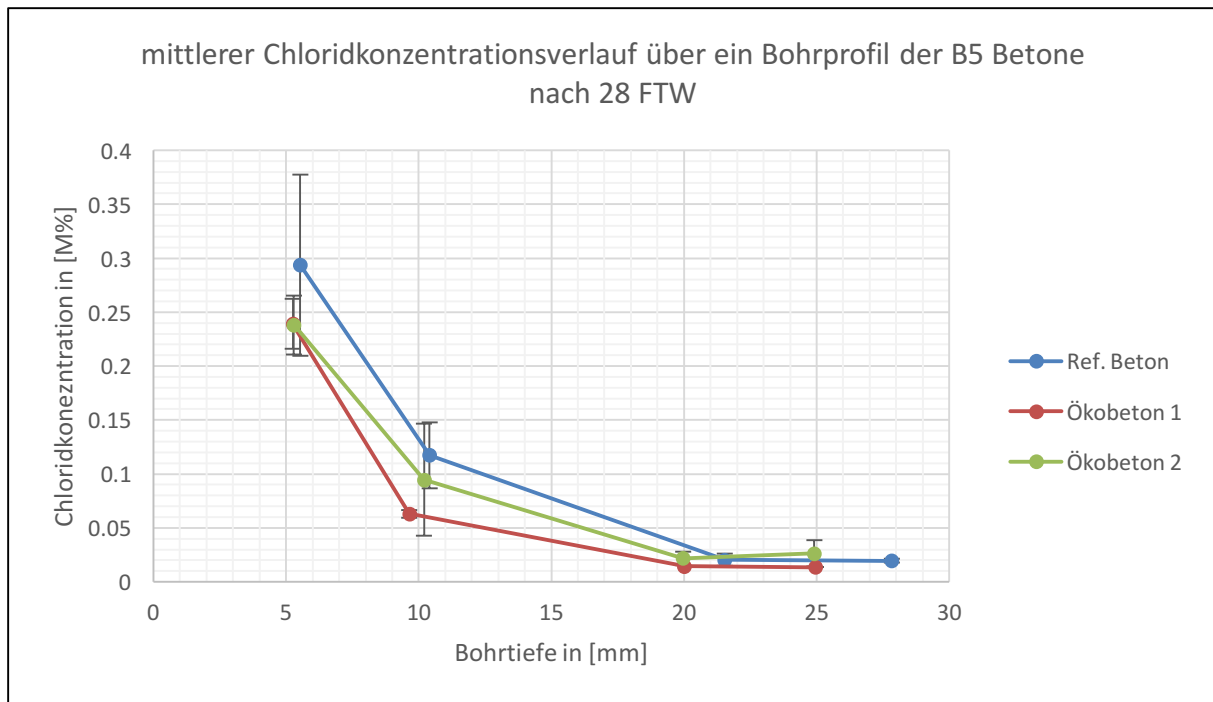


Abbildung 32 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe der CDF B5 Proben

Analog zu Kapitel 3.5.4 wurde der Diffusionskoeffizient für jede Reihe einzeln berechnet. Folgende Eingangsparameter gelten für alle Proben des CDF-Tests:

- $C_i = 0,028$ [m%] – Anfangskonzentration im Beton, aus früheren Versuchen in M%
- $t = 1814400$ [sek] – gesamte Prüfdauer in Sekunden, das 28 FTW mit jeweils 12 Stunden Dauer und einer einwöchigen Vorlagerung entspricht.

Über die Minimierung der Summe der Fehlerquadrate r^2 wurde eine Kurve an die Bohrprofile gefittet. Diese Regressionsanalyse wird in den folgenden Plots dargestellt und enthält zusätzlich die Farbumschlagsgrenzen (Color-change-boundary) der Silbernitratversuche als vertikale graue Linie (CCB T) eingetragen sowie die dazugehörige ermittelte Chloridkonzentration an der der Farbumschlag bei der Reaktion mit dem Silbernitrat eintritt (graue Horizontale – CCB C).

Die Summe der Fehlerquadrate für den Referenzbeton (Abbildung 33) lag bei 0,00977 und der daraus ermittelte Chloriddiffusionskoeffizient beträgt $1,00E-11$ [m^2/s] bei einer Grenzkonzentration C_s von 0,8 [M%]. Je kleiner die Fehlerquadrate sind, desto besser korreliert die eingefügte Funktion mit den gemessenen Werten. Weiters kann eine Chloridkonzentration von 0,12 M% für den Farbumschlag bei den Silbernitratversuchen aus dem Diagramm für den Referenzbeton entnommen werden.

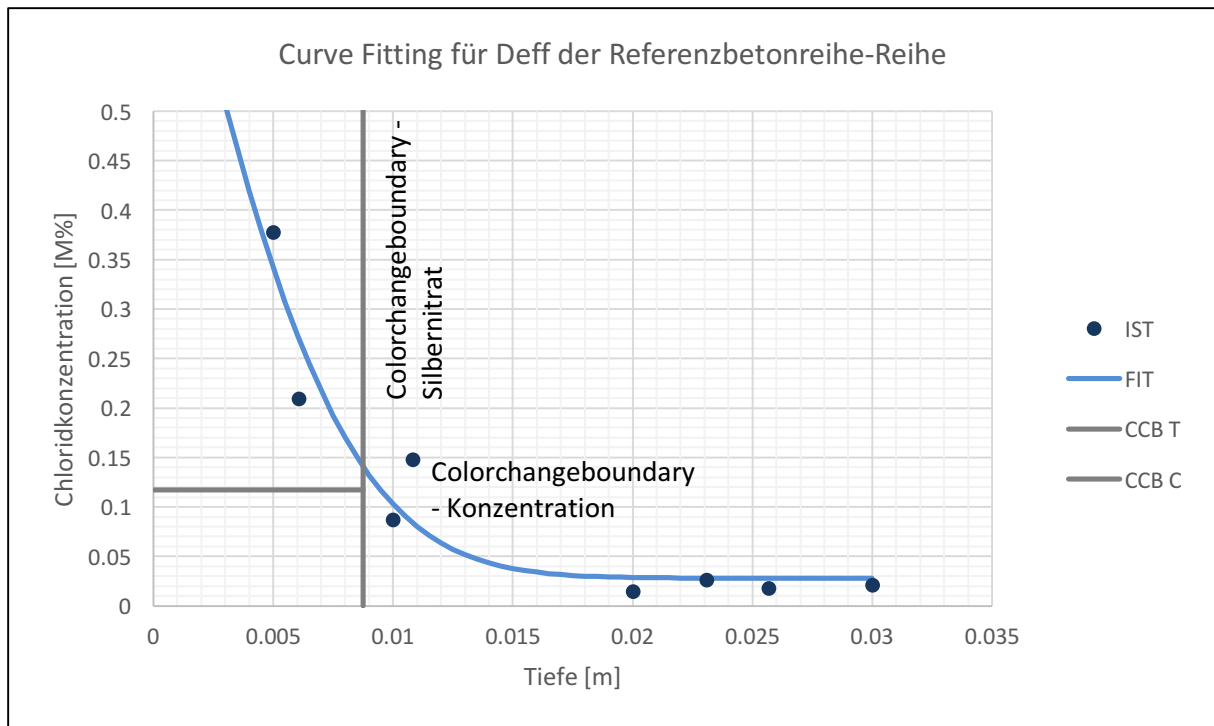


Abbildung 33 Curve Fitting der Referenzbetonreihe mit Color change boundary (CDF-Test)

Im Fall des Ökobeton 1 (Abbildung 34) liegt die Funktion näher an den gemessenen Konzentrationen, wie es anhand des etwas geringeren Fehlerquadrats von 0,00675 ersichtlich ist. Das D_{eff} liegt unter dem Wert des Referenzbetons und ist mit $8,50E-12 [m^2/s]$ bei einer Grenzkonzentration C_S von 0,6 [M%] angegeben. Für den Grenzwert des Farbumschlags kann von der horizontalen Linie (CCB C) eine Konzentration von 0,06 M% abgelesen werden.

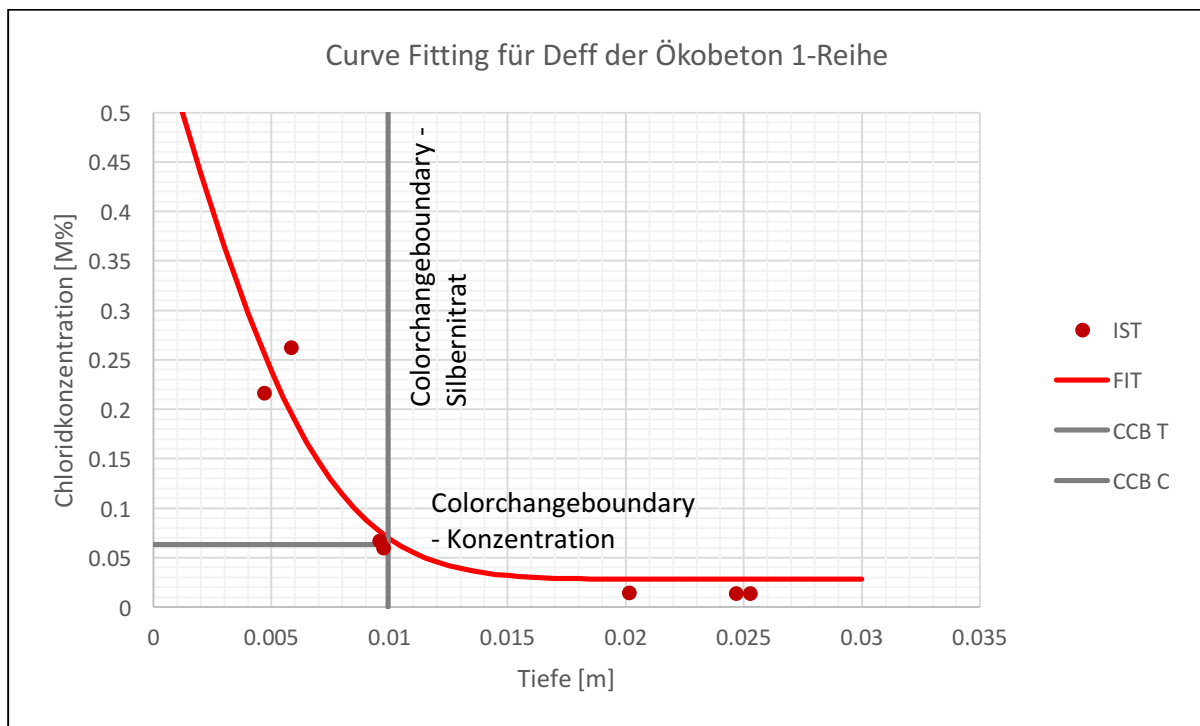


Abbildung 34 Curve Fitting der Ökobeton 1 Reihe mit Color change boundary (CDF-Test)

Die Fitting der Kurve ist für den Ökobeton 2 in Abbildung 35 ist beinahe gleich groß ($r^2 = 0,00674$) wie der des Ökobeton 1, und der Diffusionskoeffizient liegt mit $7,50E-12 [m^2/s]$ bei einer Grenzkonzentration C_s von $0,7 [M\%]$ unter den Ergebnissen der vorherigen Reihen. In diesem Fall liegt der Farbumschlagsgrenzwert für die Konzentration bei $0,095 M\%$ (CCB C). Die ermittelten Color-change-boundary-Konzentrationen sind in Kapitel 4.1.4 in der Tabelle 4 angeführt.

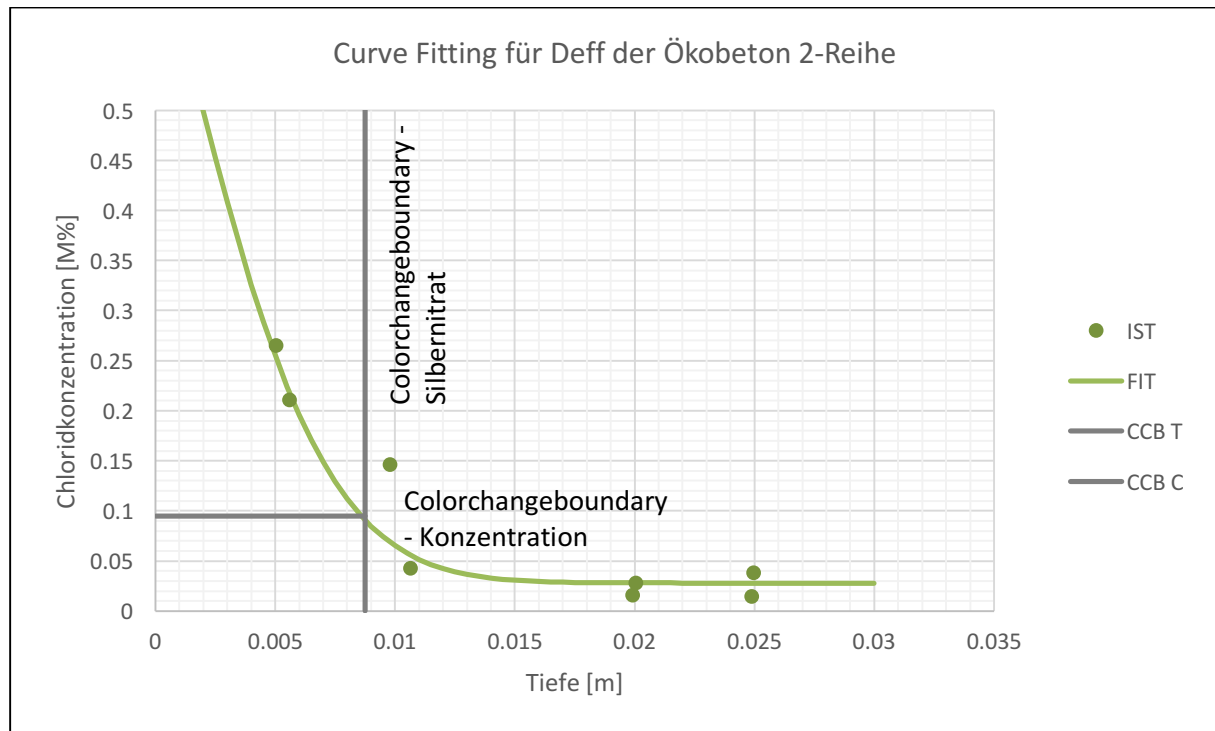


Abbildung 35 Curve Fitting der Ökobeton 2 Reihe mit Color change boundary (CDF-Test)

Da der Diffusionskoeffizient das Maß der Beweglichkeit der Teilchen darstellt, ist der Referenzbeton schneller bei der Aufnahme von Chlorid-Ionen als die beiden Ökobetone. Für eine leichtere Vergleichbarkeit folgt abschließend die Tabelle 5, die die ermittelten Werte zusammenfasst.

Tabelle 5 Diffusionskoeffizienten der CDF-Versuche der Reihen Referenz, Öko 1 und Öko 2

Diffusionskoeffizienten des Referenzbetons, Ökobetons 1 und Ökobetons 2 für $t = 1814400 \text{ s}$			
	Ref. Beton	Ökobeton 1	Ökobeton 2
Diffusionskoeffizient	$1,00E-13 [m^2/s]$	$8,50E-12 [m^2/s]$	$7,50E-12 [m^2/s]$
Σ des Fehlerquadrats	0,00977	0,00675	0,00674

4.1.7 Mikrosondenanalyse

Im letzten Schritt wurden Quader aus den Würfelproben geschnitten, zu einem Dünnschliff auf einer Glasplatte präpariert und in Leoben mit der Mikrosonde JEOL JXA-8200 auf Chloridkonzentrationsgradienten untersucht.

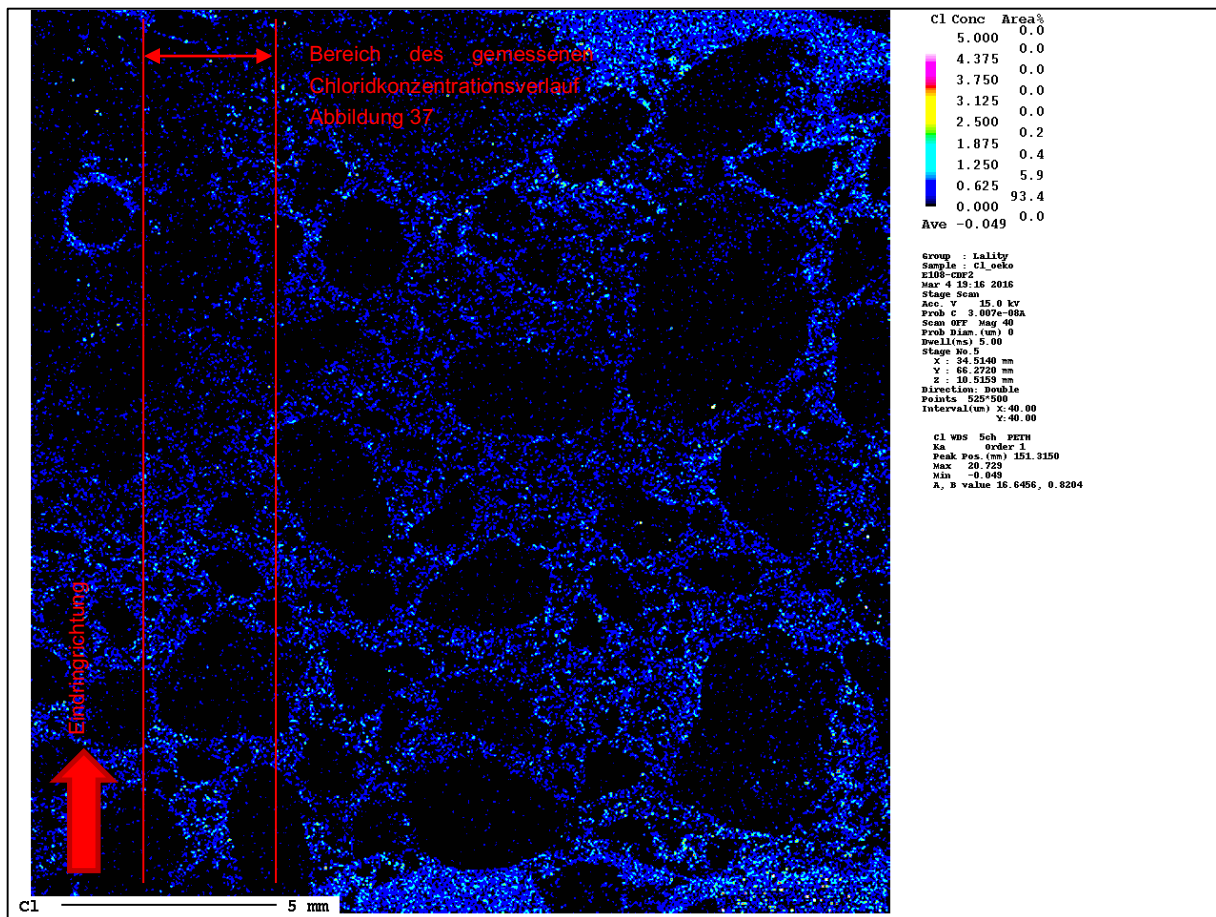


Abbildung 36 Mikrosondenaufnahme des Referenzbetons (von der Probe E108 CDF2)

Für jeden Dünnschliff der drei CDF-Reihen wurden Mappings vom Chlorid-, Aluminium-, Silizium-, Schwefel- und Kalziumgehalt erstellt. Da sich die Arbeit grundsätzlich nur mit dem Eindringen von Chloriden beschäftigt, wurden die restlichen nicht Chlorid-Mappings für diese Untersuchung nicht verwendet. Die Parameter, Einstellungen und Bauteile, die bei den Elementmappings verwendet wurden sind in Kapitel 3.4 angeführt.

Die gemessenen Chloridkonzentrationen am Körper eines Referenzbetons sind Abbildung 36 farbig dargestellt. Erhöhte Konzentrationswerte wechseln die Farbe bis hin zu hellblauen Tönen, niedrige Konzentrationen sind dunkel oder schwarz gehalten. Die untere Grenzfläche stellt die in der Lösung eingetauchte Fläche dar, die mit dem Pfeil markiert ist. Über den Verlauf nach oben in Abbildung 36 verringert sich die Konzentrationsmenge geringer als von den Bohrmehlanalysen erwartet.

Allgemein problematisch bei der Analyse der CDF-Proben war:

- Die Kombination aus der Zerstörung des Gefüges durch die Frost-Tauwechsel-Belastung und der Verwendung von Epoxidharz als Dichtmittel, dessen Bestandteile unter anderem Chloride sind, die mit Unterdruck in die Poren- und Gefügeräume eingedrungen sind und das Ergebnis in manchen Bereichen beeinflussen können. In Abbildung 36 ist diese Erscheinung an den beiden rechten Randbereichen ersichtlich, wo eine höhere Konzentration ersichtlich sind, obwohl ausschließlich die obere Seite der Probe die mit Lösung beaufschlagte Fläche darstellt.

- Weiters ist durch das Legen von Messprofilen kein so klar ersichtlicher Gradient der Konzentration, wie es in den Bohrmehlanalysen oder bei den reinen Chlorideindringungsproben der Fall war, darstellbar (siehe Abbildung 37).
- Das „scharfstellen“ der Randbereiche während der Analyse, da die Proben sehr uneben durch die Gefügezerstörung waren und dadurch kleinere Analysebereiche zur Verfügung stehen.

Die Abbildung 37 stellt einen Chloridkonzentrationsverlauf über die Tiefe der Probe dar. Dabei ist der Verlauf durch die Länge, Breite und Position des Profils beeinflusst und wurde an prädestinierten Stellen (wenig Einfluss vom vermuteten Epoxidharz) gemessen – dargestellt durch die rote Eingrenzung in Abbildung 36.

Tiefpunkte im Bereich 4-6 mm im Diagramm sind große Gesteinskörnungen in der kein Chlorid messbar ist.

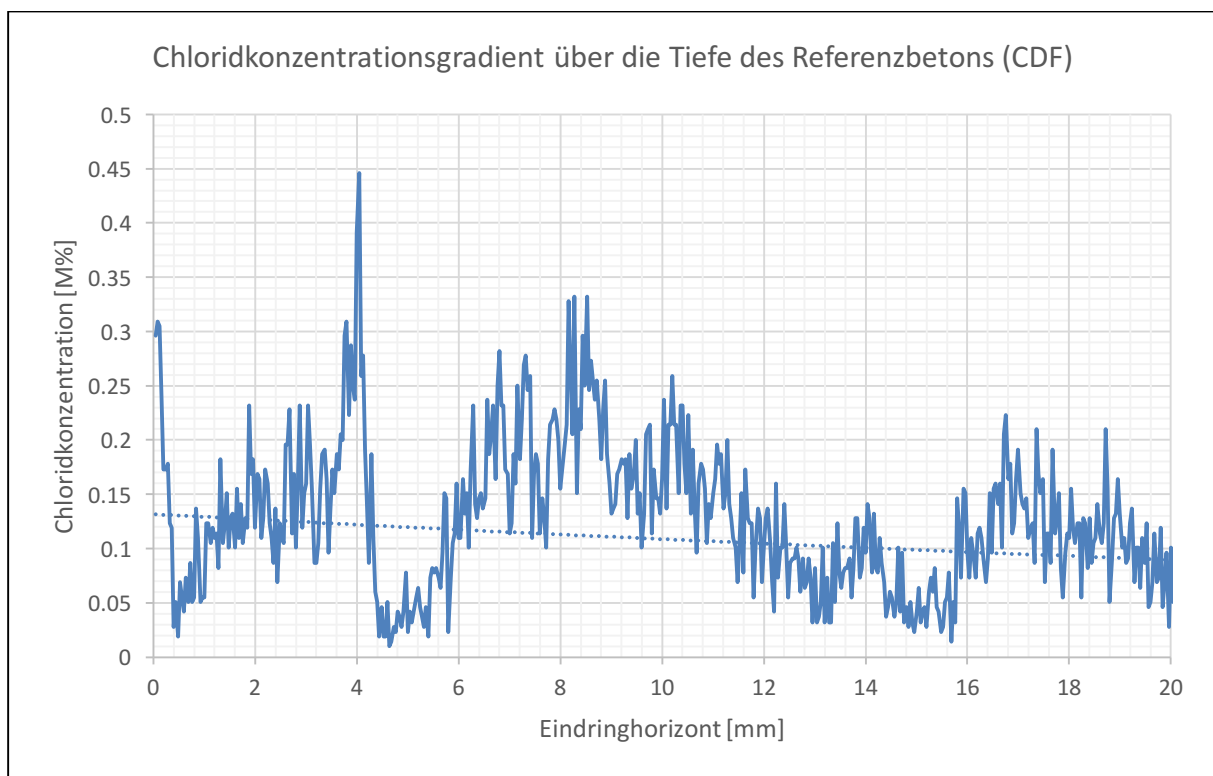


Abbildung 37 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe des Referenzbetons (CDF)

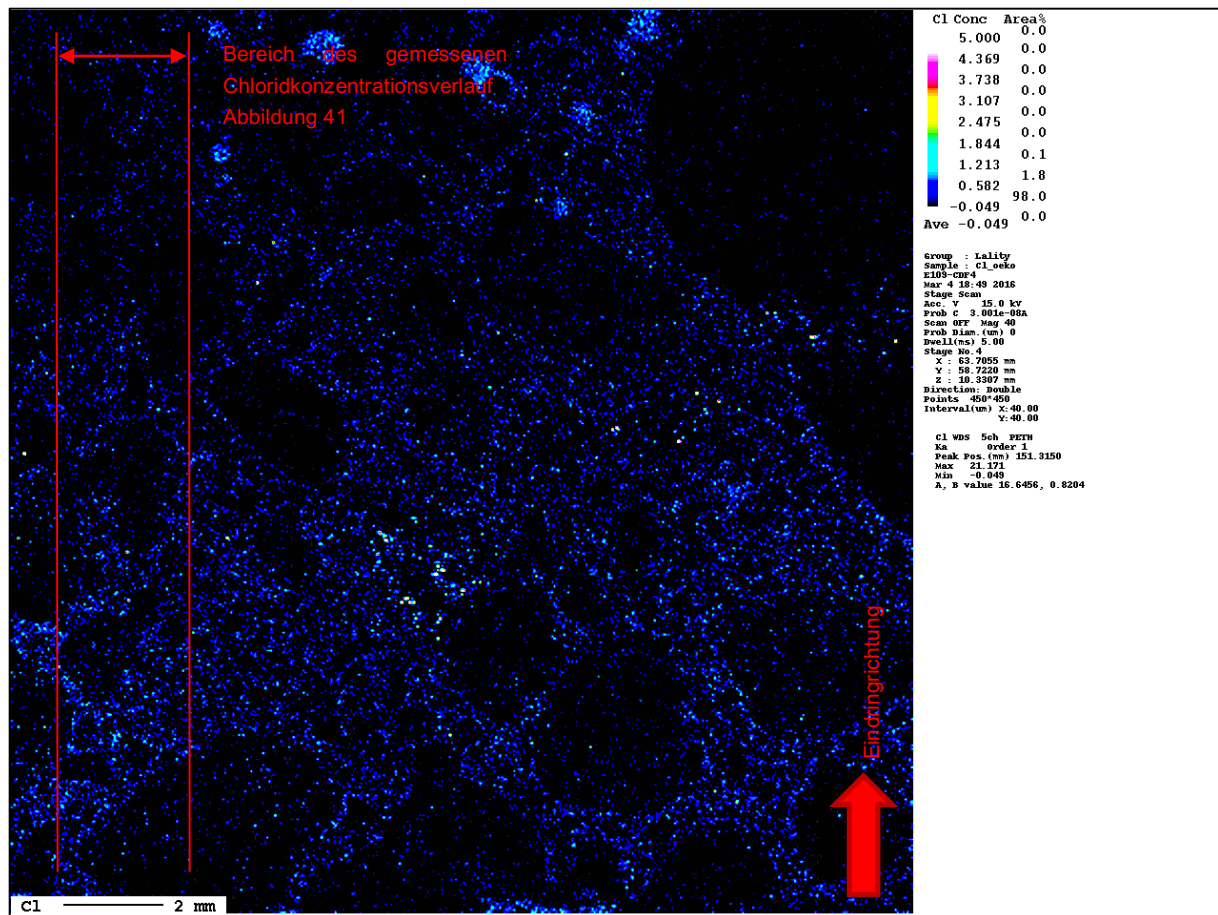


Abbildung 38 Mikrosondenaufnahme des Ökobetons 1 (E109 CDF4)

Die Eindringfläche ist auch in Abbildung 38 die untere Grenze und unter genauer Betrachtung kann eine leichte Konzentrationsabnahme zur oberen Grenze festgestellt werden. Wie bei der Referenzbetonprobe erwähnt, sind bei der nicht beaufschlagten Fläche (oben) kleine Einschlüsse des Epoxidharzes ersichtlich. Die roten Balken markieren das eingelegte Profil, bei dem Einschlüsse und zu große Gesteinskörnungen so gut es ging vermieden wurden. Der Ausgangswert in Abbildung 39 der beaufschlagten Fläche liegt bei 0,26 M% und stimmen mit den Resultaten der Bohrmehlanalyse überein. Gleiches gilt für den Bereich bei 10 mm, der bei 0,06 M% ebenfalls zu den Werten der Bohrmehprobe passt.

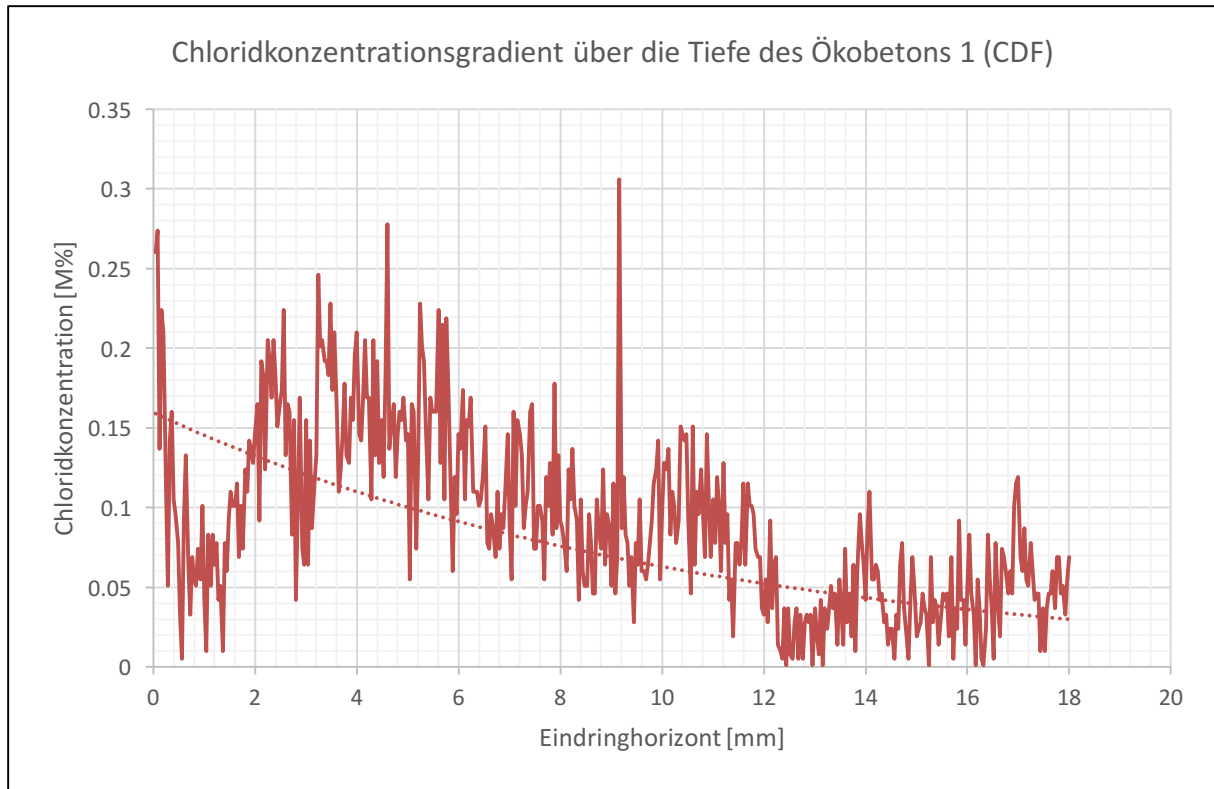


Abbildung 39 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe des Ökobetons 1 (CDF)

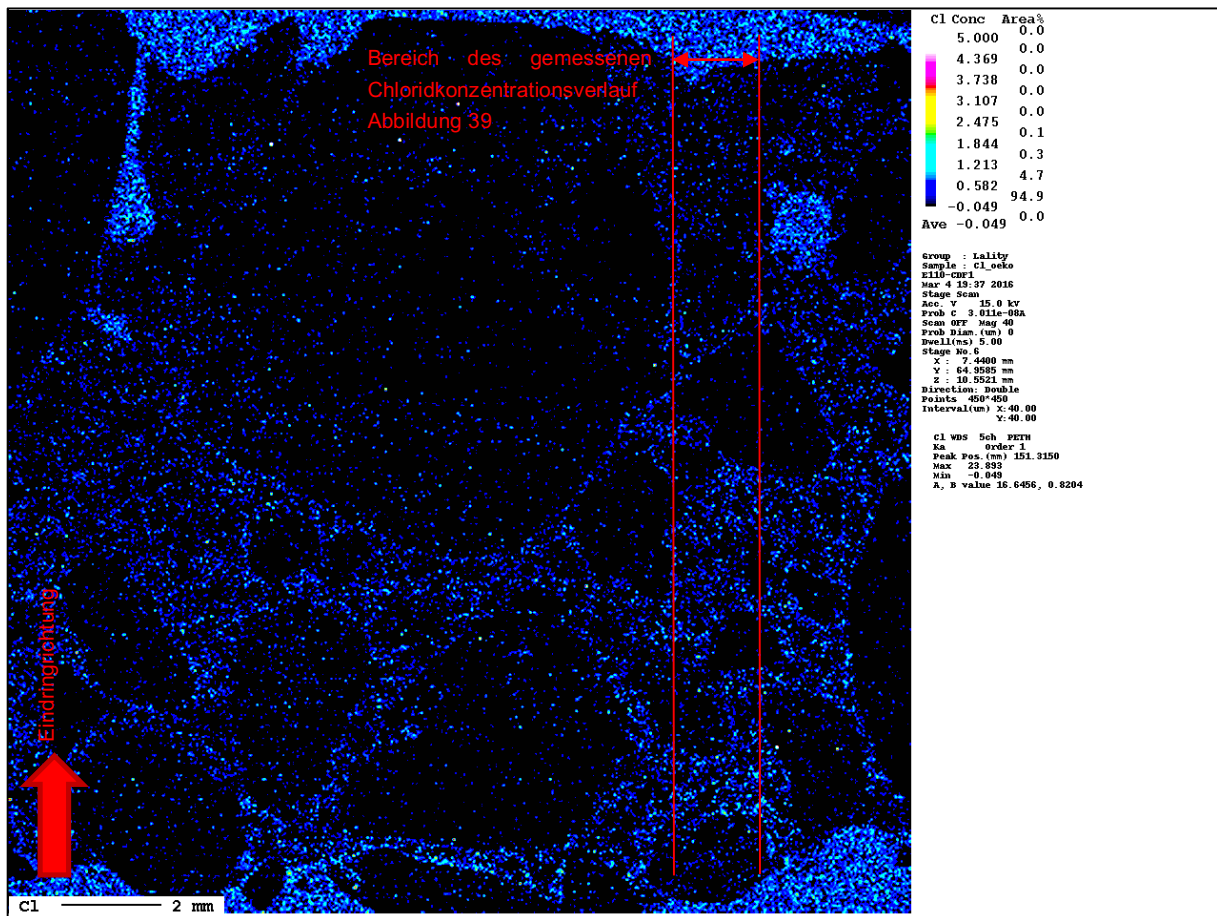


Abbildung 40 Mikrosondenaufnahme des Ökobetons 2 (E110 CDF1)

Weite Bereiche des oberen Randes der Probe in Abbildung 40 sind mit dem Epoxidharz verunreinigt, dass an der hohen Konzentration in der Aufnahme und an einem abrupten Anstieg der Chloridintensität erkennbar ist. Zusätzlich blockieren relativ gesehen große Gesteinskörnungen die obere Seite der Abbildung. Aus diesem Grund ist für den Chloridkonzentrationsverlauf ein sehr schmales Band gewählt worden und die Endbereiche mit der Verunreinigung für das Diagramm pixelgenau entfernt worden.

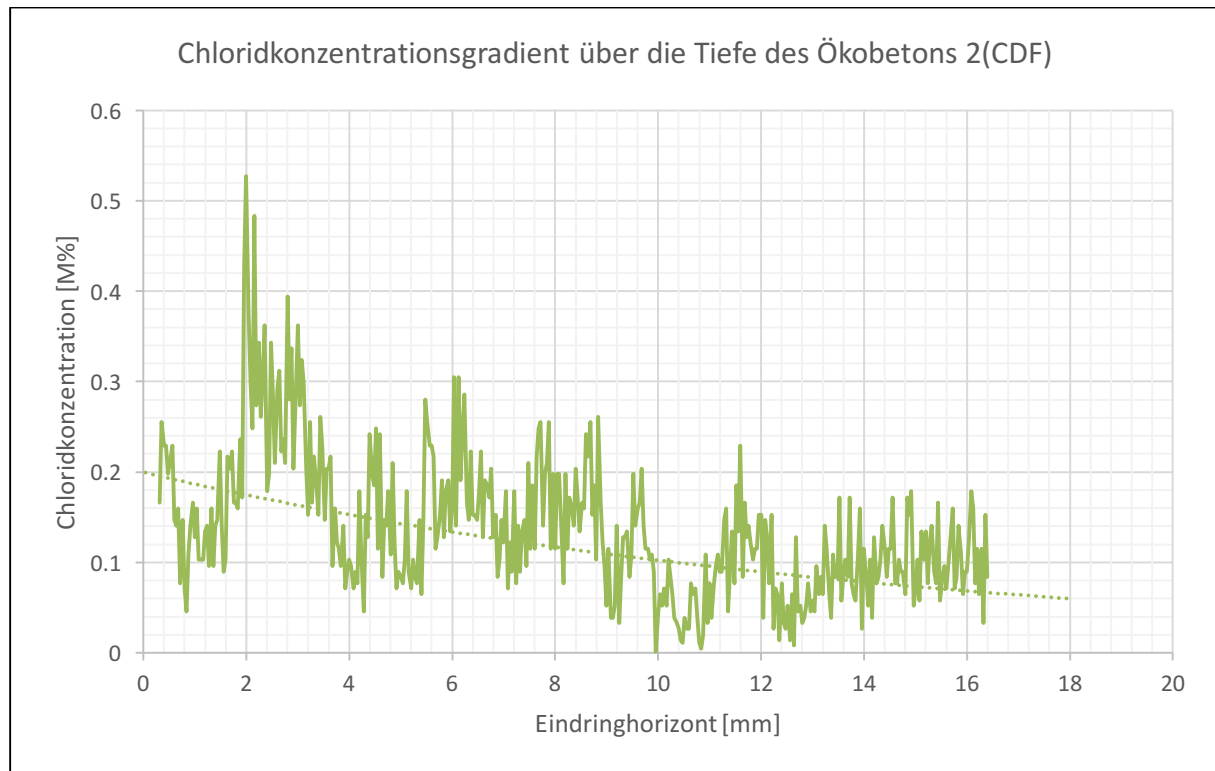


Abbildung 41 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe des Ökobetons 2 (CDF)

Das Resultat daraus sieht man in Abbildung 41. In den ersten zwei Millimetern blockiert noch ein Korn die Chloridmessung, doch auch hier liegt der Wert für die 5 und 10 mm Tiefe in etwa auf den Werten der Bohrmehlanalysen.

Abschließend sei angemerkt, dass mit den Datensätzen der Mikrosondenanalyse durchaus vergleichbare Ergebnisse zu den Chloridkurven der Bohrmehlanalyse für den CDF-Test ermittelt werden konnten, jedoch diese umfangreich bearbeitet werden mussten, wegen den eingangs erwähnten speziellen Schwierigkeiten.

4.2 Angewandter beschleunigter Chlorideindringungstest

Für die drei B5 Prüfreihe (E108, E111, E112 – siehe Kapitel 3) sind die Resultate aus den Versuchen, wie im vorhergehenden Kapitel, chronologisch nach der Auswertung aufgelistet und beschrieben. Der zweite Testdurchlauf mit jeweils zwei B2-Würfeln in den kleineren Boxen dient im wesentlichen der Darstellung des Einflusses des Lösungsvolumens und der Anzahl der Probekörper. Aus diesem Grund wurden lediglich Flüssigproben entnommen und analysiert.

4.2.1 Leitfähigkeitsmessung

In den ersten drei Wochen kam in gewählten Zeitabständen (siehe Kapitel 3.3) bei jeder Probenentnahme der B5-Reihen (Referenzbeton, Ökobeton 1, Ökobeton 2) zusätzlich ein Leitfähigkeitsmessgerät zum Einsatz. In Abbildung 42 sind die veränderten Leitfähigkeiten der Lösung über den Lagerungszeitraum in jener Flüssigkeit dargestellt.

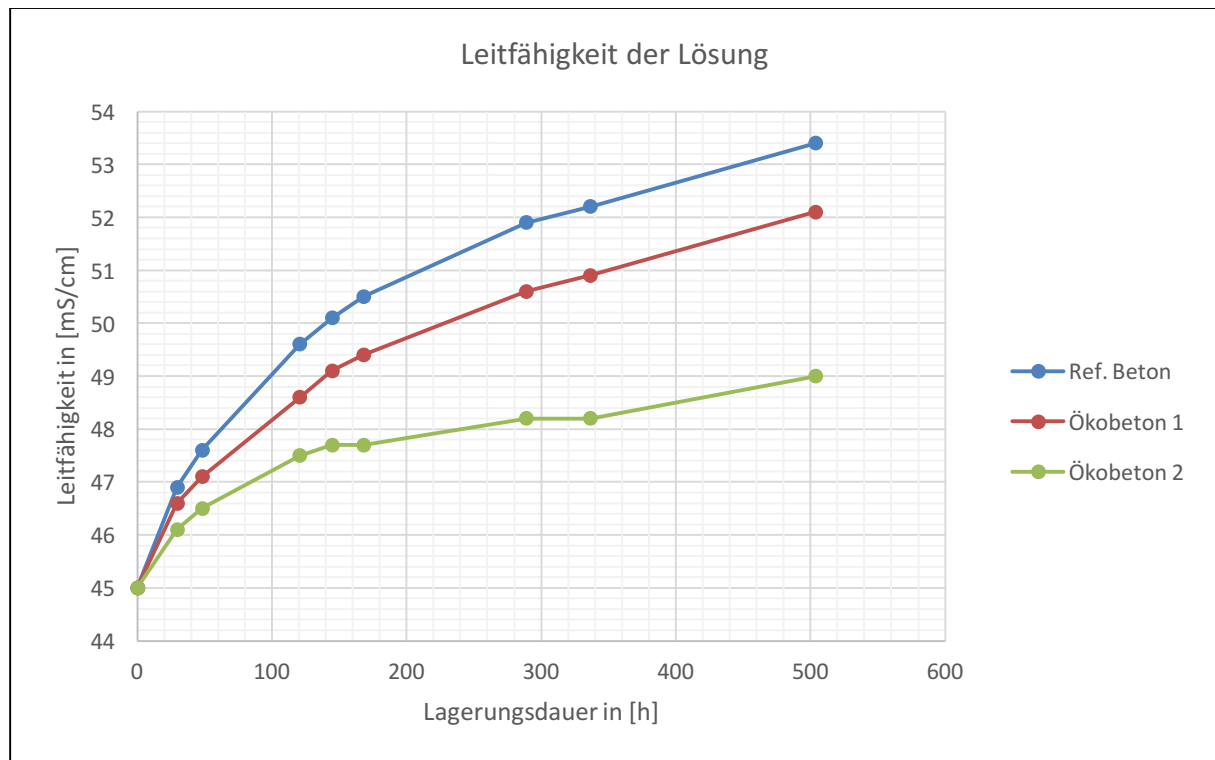


Abbildung 42 Leitfähigkeit der Lösungen in den großen Boxen über den Zeitraum von drei Wochen

Der Ausgangswert der Lösung von 45 mS/cm ist der gleiche wie bei den CDF-Proben. Über die Dauer steigt die Gesamtleitfähigkeit aller Reihen unterschiedlich schnell an und ist bei dem Referenzbeton am höchsten. Gegen Ende der Prüfperiode flacht die Kurve leicht ab, dennoch zeigt der Trend, dass eventuell ein letzter Wert nach 28 Tagen (vor dem Lösungswechsel und Entnahme) nötig gewesen wäre. Dass die Leitfähigkeitsmessung nicht den Chloridverbrauch darstellen kann, liegt an dem Umstand, dass mit einem *allgemeinen* Leitfähigkeitsmessgerät die Lösung untersucht wurde und, das in einem Wasser-Beton-System neben den Chlorid-Ionen auch weitere Ionen (z.B.: Ca, Mg, K) in und aus der Lösung diffundieren. Daraus folgt, dass keine Vergleichbarkeit zu den Flüssigprobenanalysen nach Park et al gegeben ist [1].

4.2.2 Spaltzugfestigkeit

Nach einem Monat bzw. nach drei monatiger Lagerung der B5-Reihen wurden aus den großen Boxen jeweils zwei Würfel entnommen. Die Ausnahme bildet die Ökobeton 2 Reihe, die im Vorfeld mit fünf statt sechs Würfel gestartet wurde. Die Entscheidung, dass nach einem Monat nur ein Probenwürfel der E112-Reihe (Ökobeton 2) entnommen wurde, ist auf das Begehren

zwei Würfel für den 6. Monat mit dem Bohrmehlanalysen untersuchen zu wollen, zurückzuführen.

Tabelle 6 Spaltzugfestigkeit der Probenwürfel nach ein und drei monatiger Lagerung

Spaltzugfestigkeit in [N/mm ²] (Mittelwert von 2 Proben pro Reihe)			
	Referenzbeton B5	Ökobeton 1	Ökobeton 2
f_{ctm} [N/mm ²] (1. Monat)	2,6	2,4	3,4*
f_{ctm} [N/mm ²] (3. Monat)	4,2	4,1	4,7
$f_{ctm}/f_{cm,28d}$ [-] (1. Monat)	0,048	0,038	0,054
$f_{ctm}/f_{cm,28d}$ [-] (3. Monat)	0,078	0,065	0,074

*basierend auf einem Wert statt dem üblichen Mittelwert zweier Proben

Klar ersichtlich in Tabelle 6 sind Steigerungen der Spaltzugfestigkeiten in allen drei Reihen der B5 Proben. Im Fall des Ökobeton 2 (E112) fällt die späte, aber höhere Festigkeitszunahme aufgrund des Hüttensands als Zusatzstoff enorm auf. Der Wert für die einmonatige Lagerung des Ökobetons 2 ist gekennzeichnet, da dieser nur von einem Würfel aufgenommen wurde. Trotzdem liegen beide Festigkeitswerte des Ökobeton 2 über denen des Referenzbetons, der ebenfalls Hüttensand als Bestandteil des verwendeten CEM II besitzt. Ökobeton 1 bietet eine 7,6%-ige Steigerung der maximalen Spaltzugfestigkeit gegenüber dem Referenzbeton (E108) nach einem und eine 3,6%-ige nach drei Monaten Lagerung in einer 3 % NaCl-Lösung.

4.2.3 Eindringtiefe mit Silbernitrat

Im Anschluss zur Spaltzugfestigkeitsbestimmung folgte das Aufsprühen der Silbernitratlösung auf eine Hälfte der Probenkörper. In Abbildung 43 sind die Proben mit deren mittleren Eindringtiefe und Standardabweichung von Chlorid nach dem Silbernitrat-Test eingetragen. Es lässt sich feststellen, dass Betonsorten mit Hüttensandanteilen (Ref. Beton und Ökobeton 2) nicht nur eine höhere Festigkeit besitzen, sondern auch geringere Eindringtiefen des Chlorids aufweisen, wie man anhand des Referenzbetons und des Ökobetons 2 sieht. Die Beobachtung wird von Stark [6] bestätigt. Zusätzlich sei angemerkt, dass es offensichtlich keinen Unterschied im Bezug auf die betontechnologischen Eigenschaften macht, ob der Hüttensand als Zusatzstoff beigemischt wird, oder ob er als Zuschlagstoff vorkommt. Wie im vorhergehenden Kapitel beschrieben, wurde ein Würfel aus der Lagerungskiste für den ersten Zeitraum entnommen. Die Varianz des ersten Würfels der Referenzbetonsreihe hat die höchste Varianz mit 1,96 mm. Im Durchschnitt sind die Schwankungen 1,48 mm für den Referenzbeton am höchsten; 1,25 mm für den Ökobeton 1 und 0,98 mm für den Ökobeton 2 am niedrigsten. Weiters liegen die Daten der Reihen auf einem ähnlichen Niveau wie bei den Proben des CDF-Tests. Abschließend erwähnt, lässt sich anhand der Messdaten der Abbildung 43 nicht eindeutig auf den zeitlichen Fortschritt der Chloriddiffusion schließen.

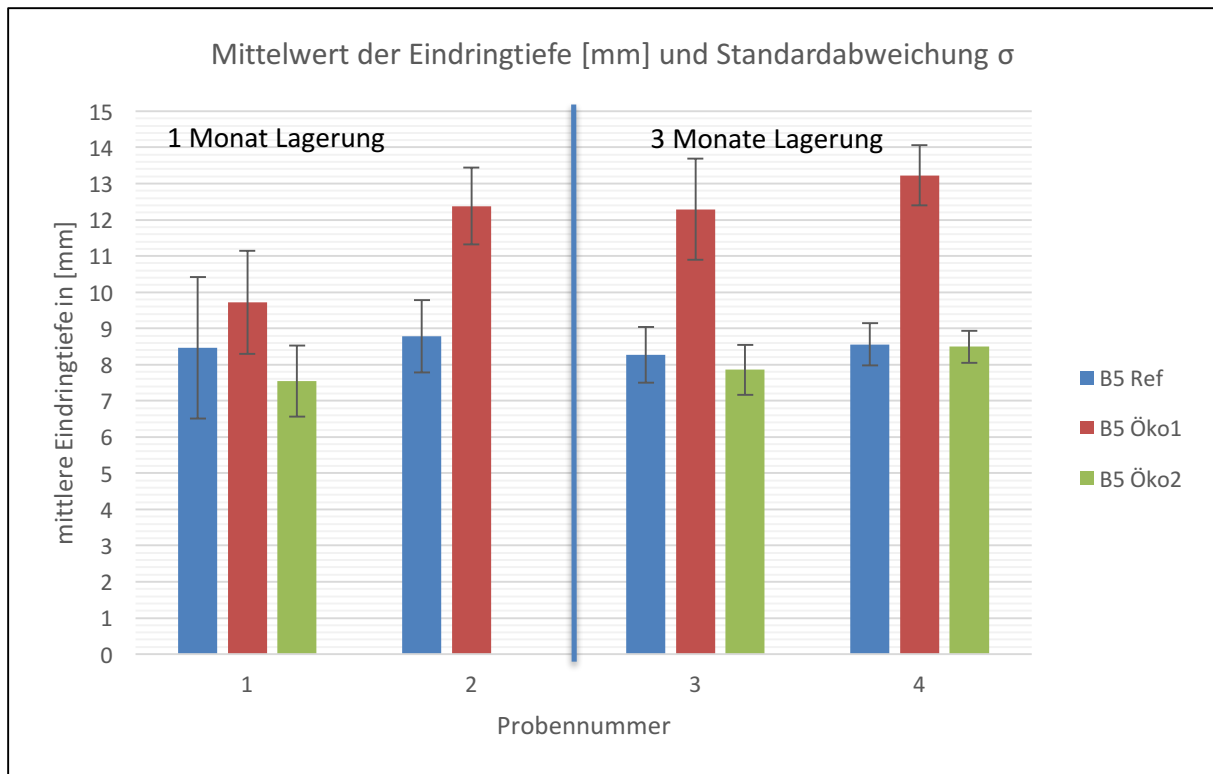


Abbildung 43 Chlorideindringtiefen dargestellt mit Silbernitratlösung

In Kapitel 4.2.5 wurden die gemittelten Eindringtiefen als Farbumschlagsgrenzen (Color-change-boundary) in die Curve-Fitting-Diagramme (Abbildung 47, Abbildung 48, Abbildung 49) eingetragen und die nötige Chloridkonzentration ermittelt, bei der die Oberfläche nach dem Aufsprühen des Silbernitrats seine Farbe ändert. Die daraus ermittelten Konzentrationen sind an dieser Stelle kurz in folgender Tabelle 7 zusammengefasst.

Tabelle 7 Farbumschlagsgrenzwerte der Chloridkonzentration für den beschleunigten Chlorideindringtest

Abgelesene Konzentration der Farbumschlagsgrenzen in [M%] der Chlorideindring Proben			
	Referenzbeton	Ökobeton 1	Ökobeton 2
Eindringtiefe 1 Monat (CCB) [mm]	8,63	11,05	7,54
CCB-Konzentration 1 Monat [M%]	0,07	0,09	0,04
Eindringtiefe 3 Monate (CCB) [mm]	8,41	12,76	8,18
CCB-Konzentration 3 Monate [M%]	0,12	0,11	0,08

4.2.4 Flüssigprobenentnahme (IC)

Im Anschluss der Leitfähigkeitsmessung fanden bei den B5-Serien Lösungsentnahmen statt, während bei den B2 Betonen aufgrund des veränderten Aufbaus ausschließlich Flüssigproben entnommen werden konnten. Der Zeitraum der Entnahme ist im Kapitel 3.3 beschrieben. Abbildung 44 zeigt im gleichen Umfang wie auch in den vorangegangenen CDF-Tests die Chloridkonzentration über einen gewissen Zeitraum. Die unterschiedlich hohen Startwerte der Konzentrationen resultieren aus einem leicht veränderten Mischungsverhältnis der NaCl-Lösung. Während der Trend bei den B5-Reihen (mit Sprüngen nach unten) einer leichten Abnahme folgt, entwickelt sich die Konzentration der B2-Lösung im besten Fall horizontal über die Laufzeit von 3 Wochen. Als Einflussfaktor für die messbare Chlorid-Ionenaufnahme des Betons stellt wahrscheinlich das Verhältnis der Fläche der beaufschlagten Probenwürfel gegenüber der Gesamtfläche der Salzwasserlösung dar. Durch die enge Lagerung der B5-Proben der großen Boxen wird ein Verhältnis von 0,64 erreicht. Die kleineren Kisten mit jeweils zwei B2-Proben kommen auf einen niedrigeren Wert von 0,43, der sehr stark von Parks Aufbau [1] mit einem Verhältnis von 1,0 abweicht.

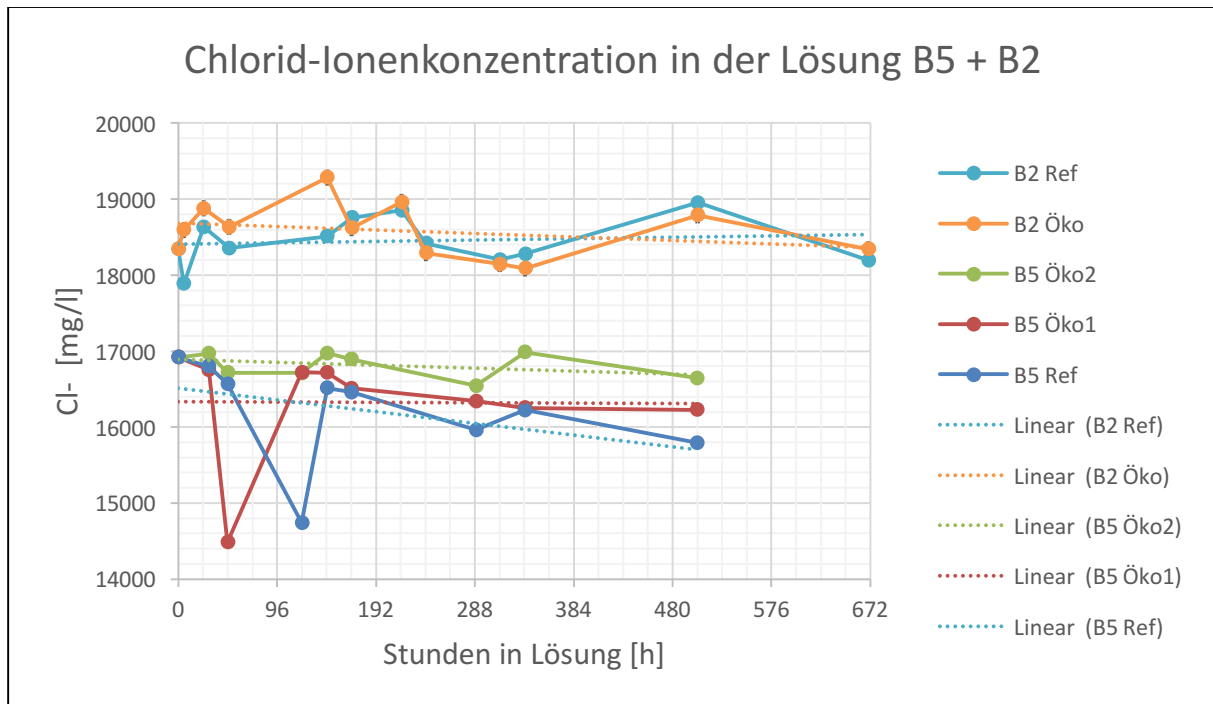


Abbildung 44 Chlorid-Ionenkonzentration der Lösung

Den Beweis für eine tatsächlich stattgefundenene Chloridaufnahme liefert die Abbildung 45. Die Chloridkonzentration, auf der vertikalen Achse, und die Natriumkonzentration, auf der horizontalen Achse eingetragen, zeigen anhand der eingefügten linearen Trendlinie keine Übereinstimmung im Bereich von 0,9, wie es im CDF-Test der Fall war. Da auch kein Lösungswechsel im Testzeitraum stattfand, wird davon ausgegangen, dass Chlorid-Ionen in den Beton eingedrungen sind.

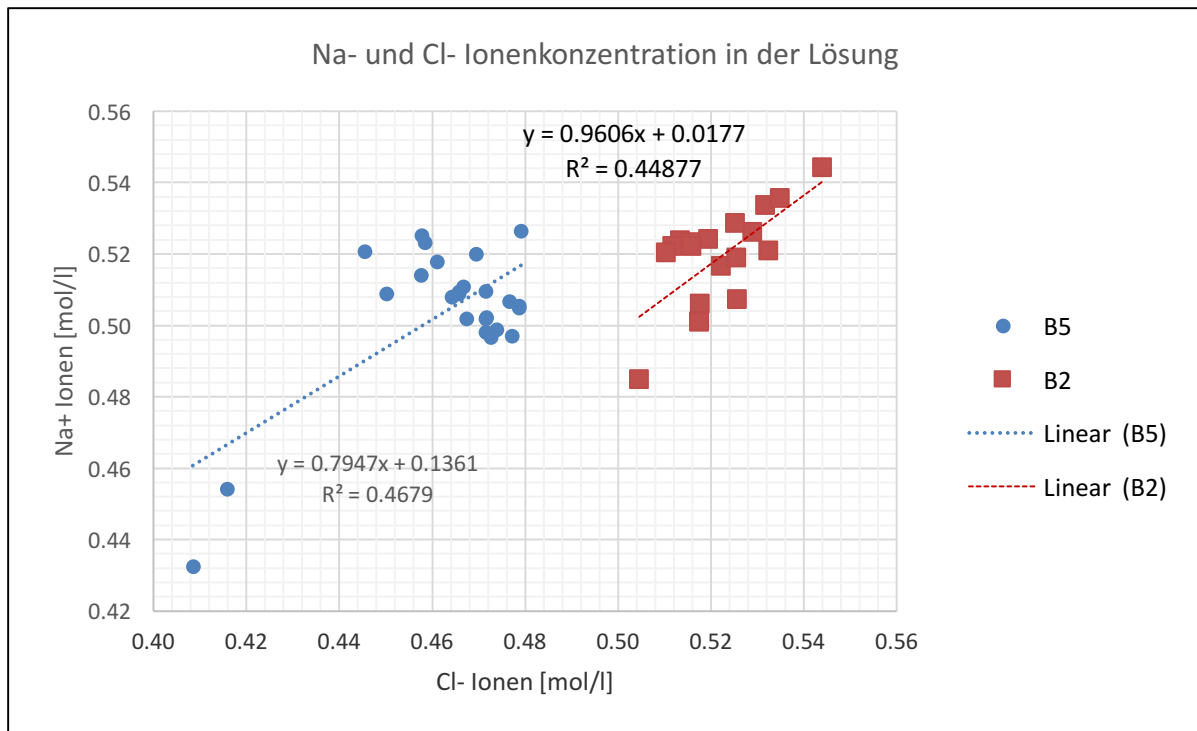


Abbildung 45 Natrium- und Chlorid-Ionenkonzentration in der Lösung

4.2.5 Bohrmehlanalyse - Chloridprofile

Analog zum CDF-Test wurden auch beim beschleunigten Chlorideindringungstest Bohrmehlproben entnommen und analysiert. Im Gegensatz zu dem im Vorfeld erwähnten CDF-Verfahren konnten hier zusätzliche Ergebnisse aufgrund der Versuchsdauer getroffen und unterschieden werden.

In Abbildung 46 ist auf der vertikalen Achse die Chloridkonzentration in M%, auf der horizontalen Achse die Bohrtiefe und zusätzlich pro Wert die Standardabweichung aufgetragen. Dabei ist klar ersichtlich, dass die Konzentration nach drei Monaten deutlich über denen der nach einem Monat entnommenen Proben liegen. Ab dem Messpunkt 20 mm verhalten sich alle Probenreihen und Würfel gleich, egal wie lange sie in der Lösung gelegen sind. Das Eindringverhalten des Ökobeton 2 nach einem Monat ist im Vergleich zu den anderen Reihen des gleichen Alters am stärksten gehemmt und flacht sehr früh (10 mm) ab. Zum nächsten Messpunkt (3 Monate) nähert sich die erwähnte Reihe dem Referenz- und Ökobeton 1 ebenfalls im gleichen Alter an.

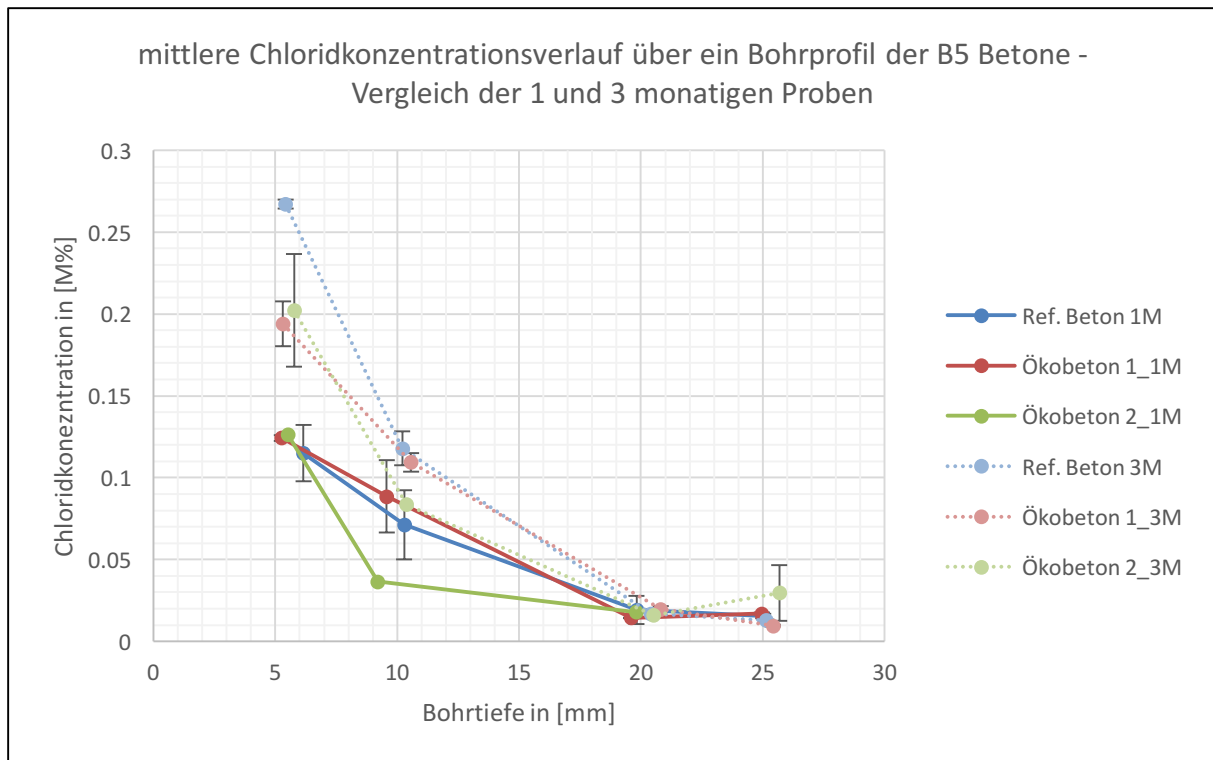


Abbildung 46 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe für die ein (1M) und drei (3M) monatigen Proben

Die ermittelten Eindringtiefen aus den Silbernitratversuchen in Abbildung 43 zeigen eine höhere Eindringungsfront für den Ökobeton 1 nach drei Monaten als für die beiden anderen Reihen, dass zu den Bohrmehlergebnissen weniger gut korreliert, da bei der 10 mm Stufe der Ökobeton 1 eine fast idente Konzentration aufweist wie die Referenz. Weiters schneidet der Referenzbeton mit ähnlich niedriger Maximaleindringung wie der Ökobeton 2 mit ca. 9 mm ab, das wiederum nicht mit den Resultaten dieser Analyse vereinbar ist. Passend dazu ist im 10 mm Bereich das gebundene Chlorid des Ökobeton 2 deutlich niedriger konzentriert als die Referenz. Einzig die von den anderen Reihen isolierte Betrachtung des Ökobeton 2 ist mit den Silbernitratversuchen kompatibel.

Nachfolgend wurden nach dem gleichen Rechenverfahren wie schon in Kapitel 3.5.4 und im Kapitel 4.1.6 für die CDF-Proben der Diffusionskoeffizient mittels Curve-Fitting über das kleinste Fehlerquadrat bestimmt. Auch in diesem Fall enthält das Diagramm zusätzlich die Farbumschlagsgrenzen (Color-change-boundary) der Silbernitratversuche als vertikale graue Linie (CCB T) sowie die dazugehörige ermittelte Chloridkonzentration an der der Farbumschlag bei der Reaktion mit dem Silbernitrat eintritt (graue Horizontale – CCB C). Folgende Eingangsparameter gelten für alle Proben des beschleunigten Chlorideindringungstests:

- $C_i = 0,028$ [m%] – Anfangskonzentration im Beton, von früheren Versuchen in M%
- $t_1 = 2592000$ [sek] – gesamte Prüfdauer in Sekunden für die ein-monatige Lagerung in der Lösung
- $t_2 = 7776000$ [sek] – gesamte Prüfdauer in Sekunden für die drei-monatige Lagerung in der Lösung

In Abbildung 47 ist die gefittete Kurve für den Referenzbeton mit Lagerungszeiträumen von ein und drei Monaten dargestellt. Die Punkte in der Legende mit IST 1M und IST 3M stellen die tatsächlichen Chloridkonzentrationen der analysierten Bohrmehlentnahmeprobe für ein und drei Monate Lagerung dar, während die FIT-Funktion die gefittete Kurve darstellt. Das Fehlerquadrat beider Lagerungen (1 und 3 Monate) besitzen niedrige Werte von 0,00169 für den ersten Monat und 0,00154 für die drei Monate alten Proben. Somit haben beiden Funktionen eine gute Übereinstimmung zu den gemessenen Chloridkonzentrationen. Die nun aus den beiden Kurven des Referenzbetons ermittelten Diffusionskoeffizienten $D_{\text{eff},1\text{M}}$ und $D_{\text{eff},3\text{M}}$ betragen $1,06\text{E}-11 \text{ m}^2/\text{s}$ und $4,29\text{E}-12 \text{ m}^2/\text{s}$ bei den Grenzkonzentrationen C_{S1} und C_{S2} von 0,25 [M%] und 0,48 [M%]. Folgernd reduziert sich der Chloriddiffusionskoeffizient über die Lagerungsdauer von weiteren zwei Monaten um mehr als die Hälfte. Weiters kann eine Chloridkonzentration von 0,07 M% für das erste Monat und 0,12 M% für die drei monatige Lagerung für den Farbumschlag (CCB C1M und CCB C3M) bei den Silbernitratversuchen aus dem Diagramm für den Referenzbeton entnommen werden.

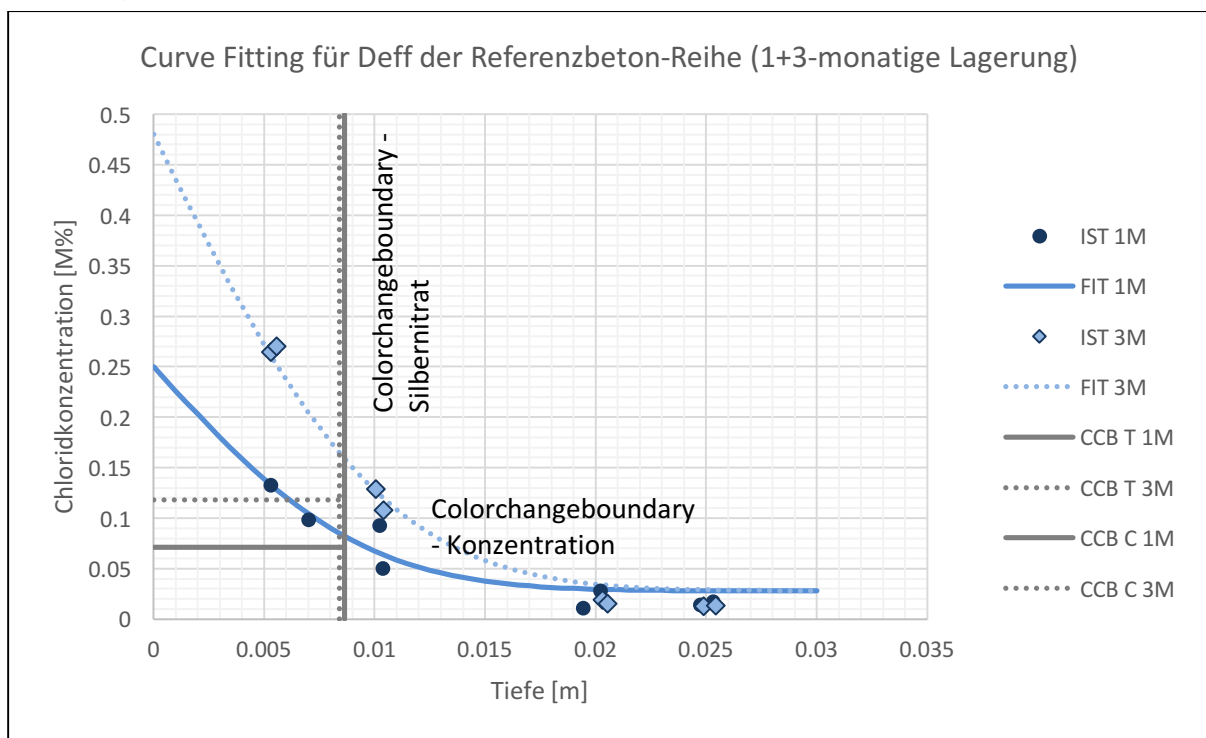


Abbildung 47 Curve Fitting der Referenzbetonreihe nach einem (1M) und drei (3M) Monaten Lagerung in der Lösung mit Color change boundary (beschleunigte Chlorideindringung)

Ausgehend von der Abnahme des D_{eff} über die Lagerungszeit würde sich wahrscheinlich bei einem weiteren Beobachtungsschritt (6 Monate) ein stationäres Diffusionsverhalten einstellen. In Abbildung 48 ist das gleiche Darstellungsmuster wie im Plot des Referenzbetons zu sehen, mit dem Unterschied, dass der Ökobeton 1 in der ein- und drei-monatigen Lagerungsdauer dargestellt wird. In diesen Fall besitzt die gefittete Funktion für die kürzere Lagerungsdauer eine geringere Übereinstimmung zu den gemessenen Bohrmehlkonzentrationen ($r^2 = 0,00279$) als die der längeren Lagerung ($r^2 = 0,00172$). Das $D_{\text{eff},1\text{M}}$ mit dem Wert $1,1\text{E}-11 \text{ m}^2/\text{s}$ ist auf einen ähnlich hohen Wert wie der des Referenzbetons ($1,06\text{E}-11 \text{ m}^2/\text{s}$) bei einer Grenzkonzentration C_S von 0,25 [M%], während der Diffusionskoeffizient der drei-monatigen Lagerung mit einem $D_{\text{eff},3\text{M}} = 4,77\text{E}-12 \text{ m}^2/\text{s}$ um 11 % über dem Wert der Referenz ($4,29\text{E}-12$

m^2/s) liegt. Die abgelesenen Farbumschlagskonzentrationen des Silbernitrat-Tests für die ein- (grau) und drei- (grau, punktiert) monatigen Proben betragen $0,09$ und $0,11 \text{ M\%}$.

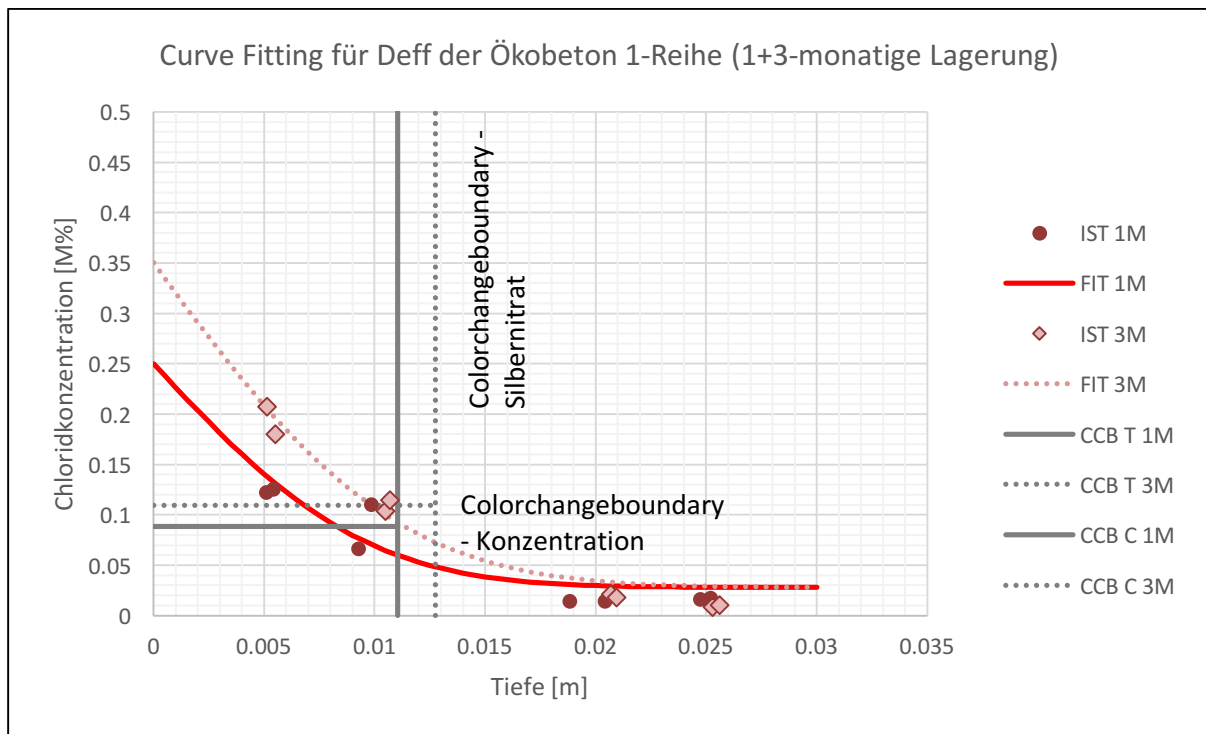


Abbildung 48 Curve Fitting der Ökobeton 1-Reihe nach einem (1M) und drei (3M) Monaten Lagerung in der Lösung mit Color change boundary (beschleunigte Chlorideindringung)

Der Plot des Ökobeton 2 (Abbildung 49) bietet eine ähnlich gute Näherung der Funktion zu den Ergebnissen wie der Ökobeton 1, obwohl die Funktion mit einer reduzierten Anzahl an Punkten zustande kam ($r^2_{1M} = 0,003$ und $r^2_{3M} = 0,0018$). Die daraus resultierenden Diffusionskoeffizienten $D_{\text{eff},1M} = 3,90\text{E-}12 \text{ m}^2/\text{s}$ und $D_{\text{eff},3M} = 2,10\text{E-}12 \text{ m}^2/\text{s}$, bei Grenzkonzentrationen C_{S1} und C_{S2} von $0,45 \text{ [M\%]}$ und $0,6 \text{ [M\%]}$, sind wesentlich niedriger wie die der vorhergehenden Reihen, dass wiederum auf die geringe Anzahl der verwertbaren Entnahmepunkte schließen lässt. Mit Hilfe der horizontalen Linien (grau und grau punktiert) sind auch in diesem Fall die Farbumschlags-Chloridkonzentrationen des Silbernitrat-Tests für die ein und drei Monate in der Lösung gelegenen Proben ermittelt worden: $0,04 \text{ M\%}$ für die kürzere und $0,08 \text{ M\%}$ für die längere Lagerung. Alle in dem Kapitel abgelesenen Colorchange-boundary-Konzentrationen sind in Kapitel 4.2.3 in der Tabelle 7 zusammengefasst.

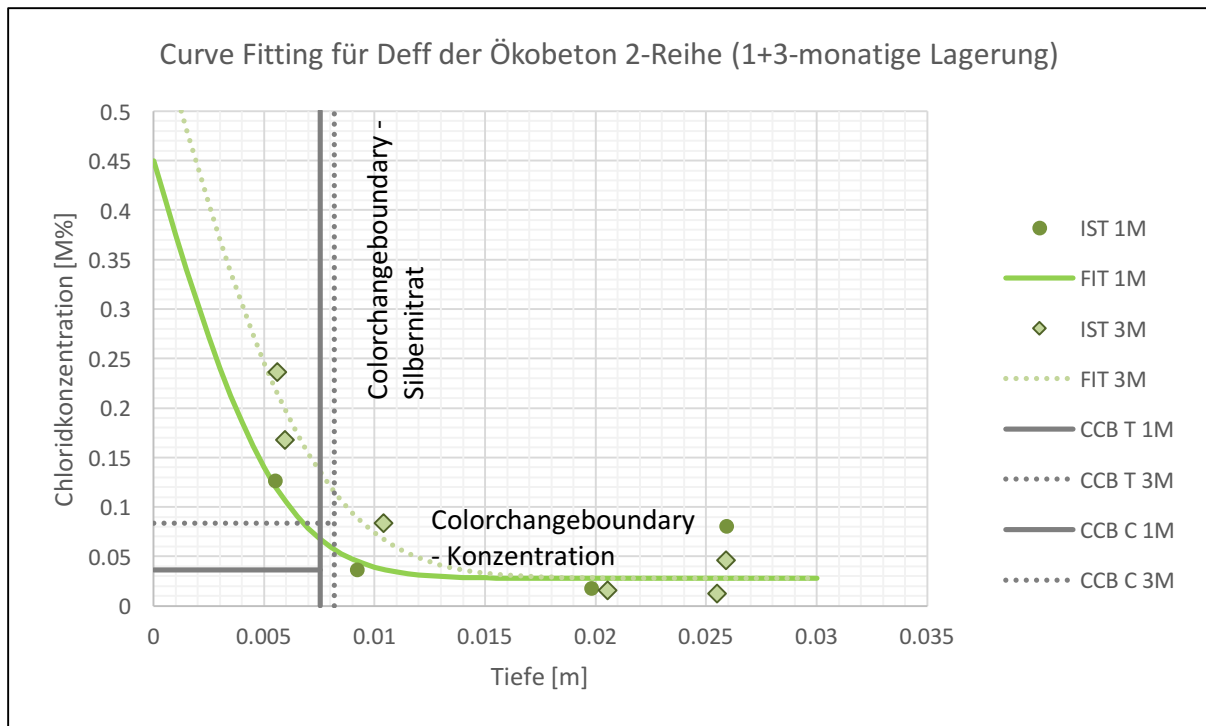


Abbildung 49 Curve Fitting der Ökobeton 2-Reihe nach einem (1M) und drei (3M) Monaten Lagerung in der Lösung mit Color change boundary (beschleunigte Chlorideindringung)

Für eine bessere Übersicht dient Tabelle 8 mit den gesamten Diffusionskoeffizienten. Abschließend sei angemerkt, dass zukünftige Analysen an Bohrmehlen mit wesentlich mehr Probenkörpern durchgeführt werden sollen, um repräsentivere Ergebnisse für den Chloriddiffusionskoeffizienten zu erhalten.

Tabelle 8 Diffusionskoeffizienten der beschleunigten Chlorideindringversuche der Reihen Referenz, Öko 1 und Öko 2

Diffusionskoeffizienten für den Referenzbeton, Ökobeton 1 und Ökobeton 2			
	Ref. Beton	Ökobeton 1	Ökobeton 2
1-monatige Lagerung	1,06E-11 m ² /s	1,10E-11 m ² /s	3,90E-12 m ² /s
Fehlerquadrat 1M	0,00169	0,00279	0,003
3 Monatige Lagerung	4,29E-12 m ² /s	4,77E-12 m ² /s	2,10E-12 m ² /s
Fehlerquadrat 3M	0,00154	0,00172	0,0018

4.2.6 Mikrosonde

Zeitgleich zu der Prüfung der CDF-Proben in der JEOL JXA-8200 Mikrosonde wurden auch die auf Glasscheiben präparierten Dünnschliffe des beschleunigten Chlorideindringungsverfahrens überprüft. Für jeden Dünnschliff der drei Chlorideindringungsreihen wurden Mappings vom Chlorid-, Aluminium-, Silizium-, Schwefel- und Kalziumgehalt erstellt. Die vier letztgenannten Element-Mappings wurden jedoch für diese Untersuchung nicht verwendet. Wegen der besseren Vergleichbarkeit weichen die angepassten Parameter, Einstellungen und

verwendeten Bauteile für die folgenden Elementmappings nicht von denen der CDF-Proben ab.

Ein klar ersichtlicher Chloridkonzentrationsgradient über die Tiefe der Referenzbetonprobe der einmonatigen Lagerung ist aus der Abbildung 50 zu entnehmen. Im Gegensatz zu den bisherigen Betonproben aus den CDF-Versuchen sind wenig auffällige Zonen mit hoher Chloridkonzentration resultierend aus der Dünnschliffpräparation mit dem Epoxidharz ersichtlich. Durch das noch intakte Gefüge kann auch davon ausgegangen werden, dass das chloridhaltige Harz keinen Einfluss auf die tieferen Ebenen hat. Durch diese beiden Umstände, war es möglich den Bereich für die Analyse deutlich größer zu wählen – ersichtlich an den roten Balken in Abbildung 50. [20]

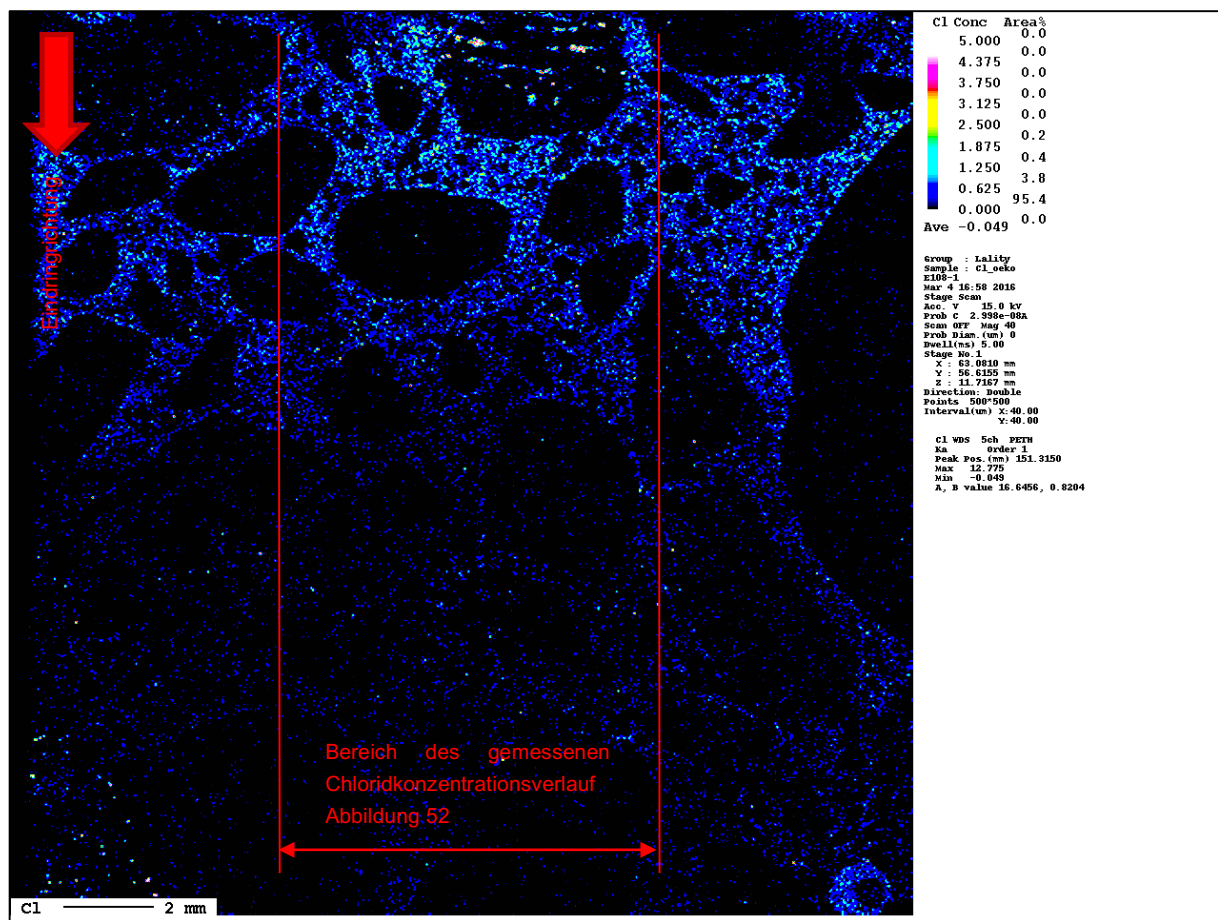


Abbildung 50 Mikrosondaufnahme des Referenzbetons nach einmonatiger Lagerung (Probe E108_1)

Es handelt sich zwar nicht um die gleiche Probe (Nr. 4) wie in Abbildung 50, da die erste Probe nach den ganzen Analyseverfahren nicht mehr für eine fortgesetzte Lagerung in der Lösung geeignet war, jedoch ist im direkten Vergleich ein weiterer Fortschritt der Chlorid-Ionen nach drei Monaten Lagerung in Abbildung 51 zu erkennen. Ähnlich der ersten Probe des Referenzbetons kann ein starker Verlauf von gebundenen Chloriden hin zu Cl-freien Zonen wahrgenommen werden. Jedoch treten in der unteren Grenzfläche hohe Chloridkonzentrationen auf die wiederum auf das Epoxidharz zurückzuführen sind. Nichtsdestotrotz wurde die quantifizierende Analyse über fast den ganzen Scan-Bereich, mit den roten Linien dargestellt, gezogen.

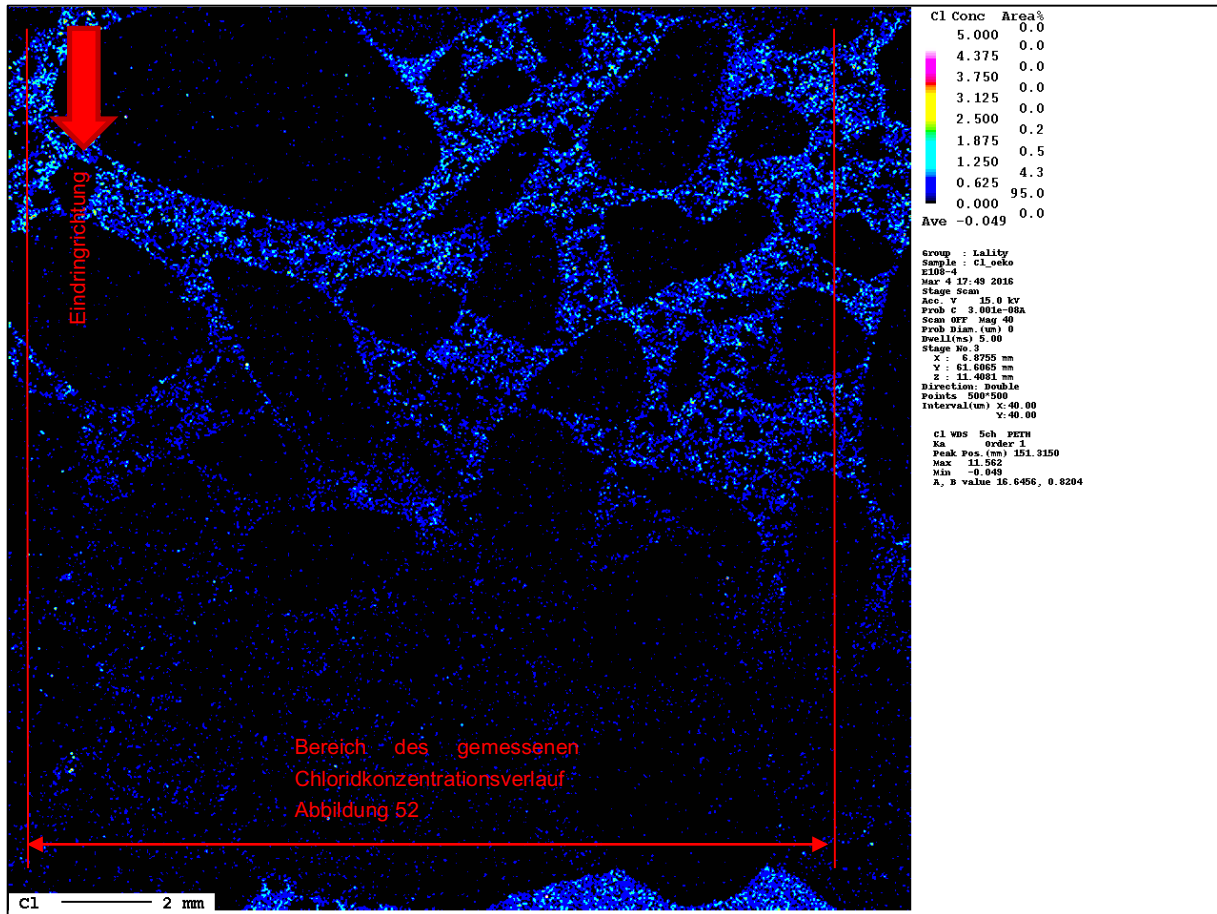


Abbildung 51 Mikrosondenaufnahme des Referenzbetons nach dreimonatiger Lagerung (Probe E108_4)

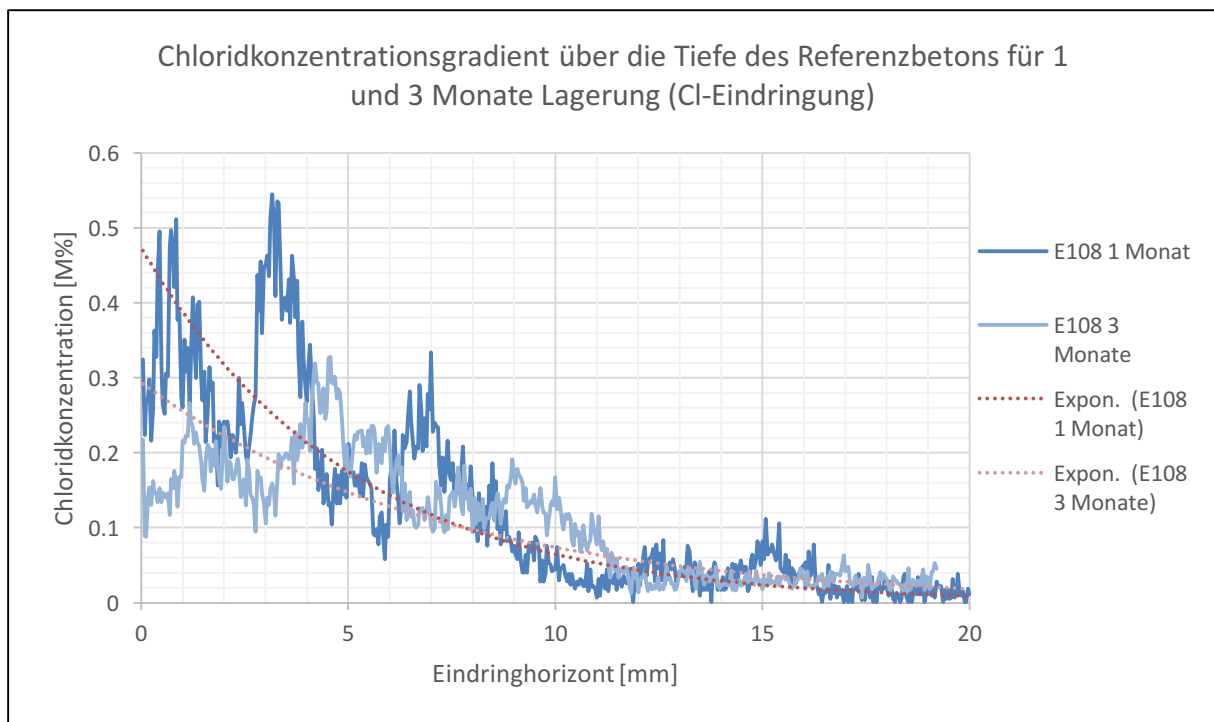


Abbildung 52 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe des Referenzbetons

Wie auch schon bei den CDF-Ergebnissen für die Mikrosondenanalyse, zeigt die Abbildung 52 auf der vertikalen Achse die Chloridkonzentration in Masseprozent und auf der horizontalen Achse die Eindringfront beginnend bei 0 mm mit der beaufschlagten Fläche. In Abbildung 52 täuscht die hohe Anfangskonzentration des einmonatigen Referenzbetons über die rapide Abnahme des eben erwähnten Kennwerts hinweg, während der Bereich zwischen 9 und 11 mm die Hypothese des weiter vorgeschrittenen Chlorids in den Körper aus dem vorhergehenden Absatz unterstützt. Dass die jüngere Probe dennoch in den ersten vier Millimeter höhere Konzentrationen aufweist, spiegelt nicht die Situation aus den Bohrmehlanalysen wieder. Auch sind die Spitzenwerte der Konzentration jenseits von 0,3 M% mehr als doppelt so hoch.

Die Ergebnisse für die drei Monate in der Lösung gelegenen Probe sind dann mehr mit den Erfahrungen aus dem vorhergehenden Test der Bohrmehlanalyse vergleichbar.

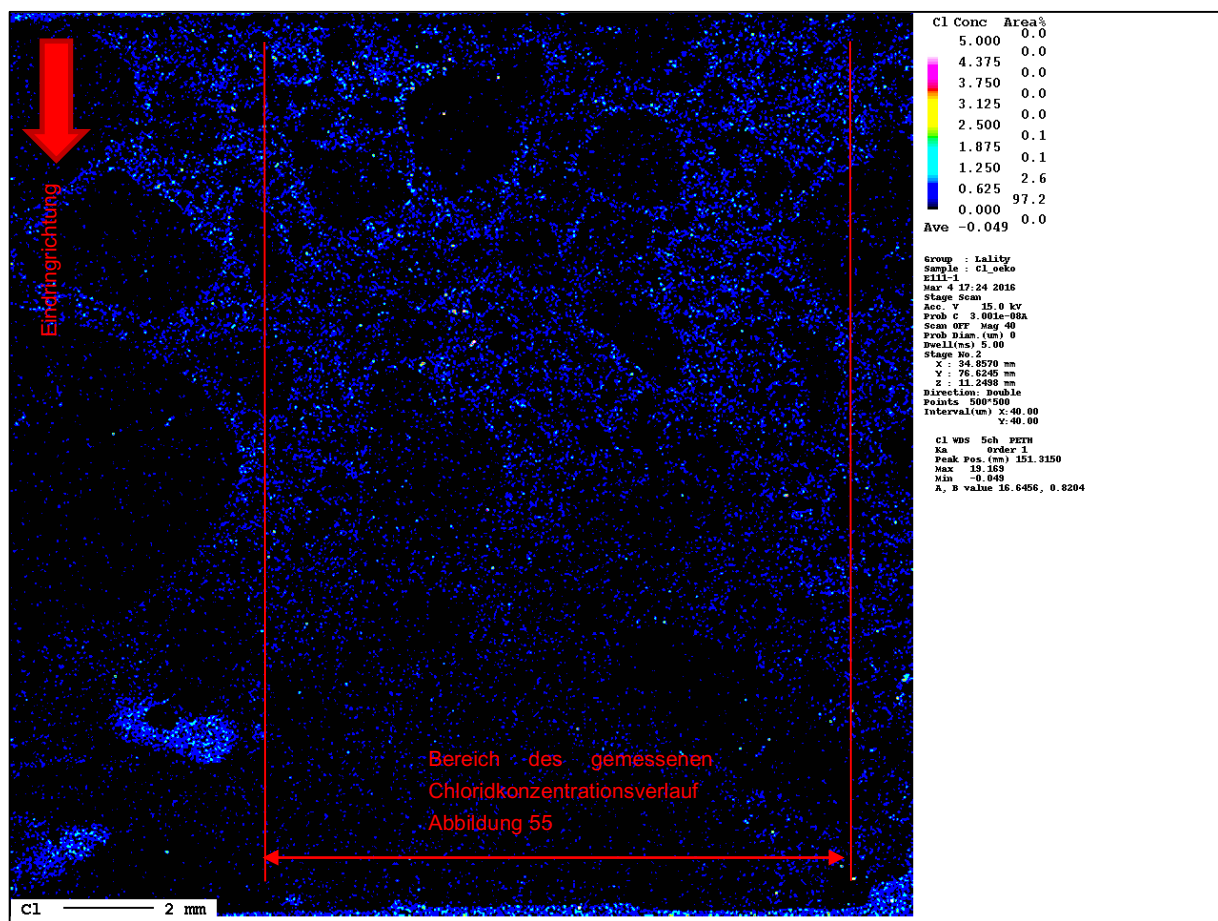


Abbildung 53 Mikrosondenaufnahme des Ökobeton 1 nach einmonatiger Lagerung (Probe E111_1)

Für den Ökobeton 1 nach einem Monat Lagerung (siehe Abbildung 53) kann nicht so ein klarer Verlauf der Konzentration wie beim vorangegangenen Referenzbeton festgestellt werden. An der Unterseite und im linken unteren Eck sind hohe Konzentrationen resultierend aus der Dünnschliffpräparationen mit dem Epoxidharz erkenntlich. Da sonst keine Auffälligkeiten, die eine Störung hervorrufen könnten, erkennbar waren, wurde wieder ein sehr großer Bereich für die quantitative Analyse gewählt.

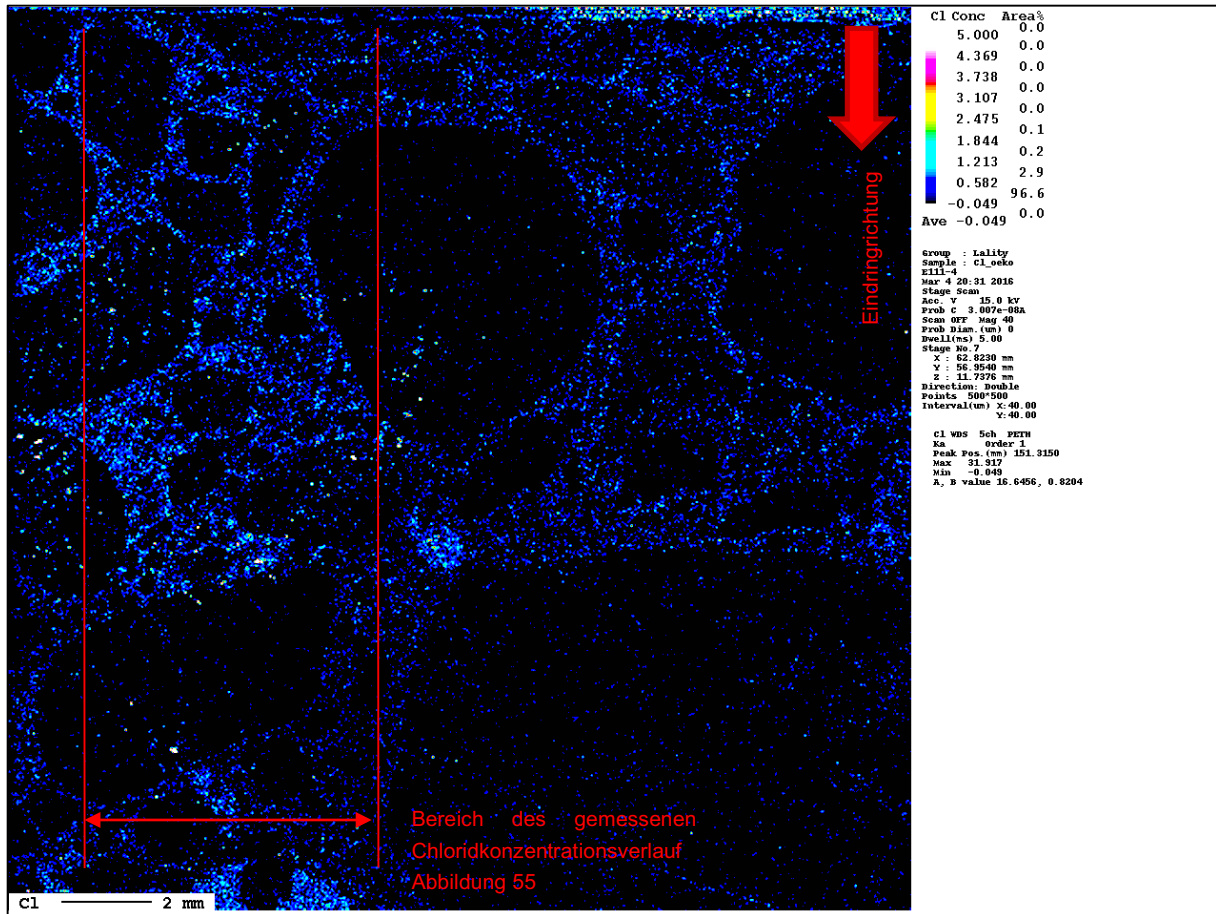


Abbildung 54 Mikrosondenaufnahme des Ökobeton 1 nach dreimonatiger Lagerung (Probe E111_4)

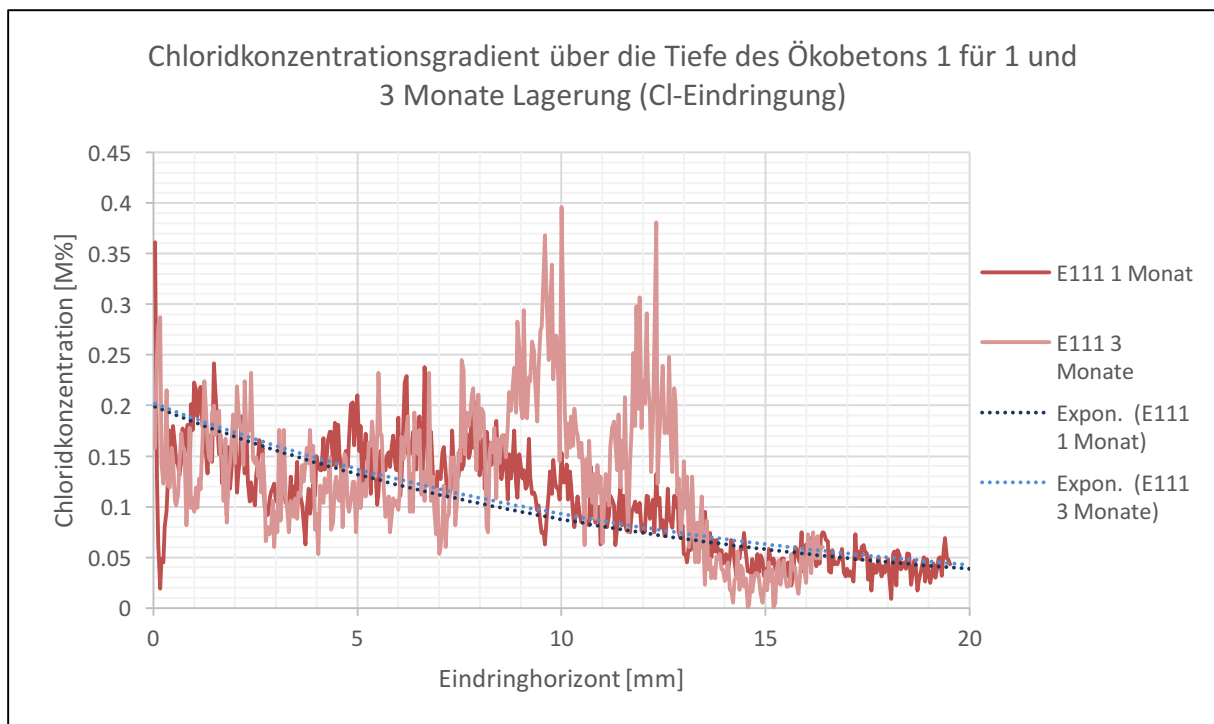


Abbildung 55 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe des Ökobetons 1

Eine qualitative Analyse der Mikrosondenanalyse zeigt einen sehr problematischen Ausschnitt der drei Monate in der Lösung verwahrten Probe (Abbildung 54). Einerseits sind im oberen rechten Bereich an der Eindringseite Epoxidharzreste vorhanden, die die Berechnungsfläche eingrenzen. Andererseits sind durchgängig große Bereiche durch die Gesteinskörnung verdeckt, die im Profil die Werte über die Höhe gerechnet als zu niedrig darstellen. Noch dazu scheint im letztgewählten Analysebereich eine höhere Konzentration zu herrschen, als im restlichen Ausschnitt.

Diese Ausgangssituation führt dann zu den Ergebnissen die im Diagramm (Abbildung 55) recht deutlich ersichtlich sind. Die „Ausreißer“ zwischen 10 und 14 mm der Probe mit der 3 Monate langen Lagerung sind auch in Abbildung 54 erkennbar, jedoch entsprechen die Spitzenwerte nicht den Bohrmehlanalysen und sollten aus den oben erwähnten Gründen vernachlässigt werden. Dennoch liegt die Kurve über den gemessenen Bohrmehlproben. Im Fall der einmonatigen Lagerungsprobe ist das Verhalten genau reversiert und bildet sehr gut die Erfahrungen mit den Bohrmehlproben ab - z. B. bei 10 mm 0,08 zu 0,06 M%.

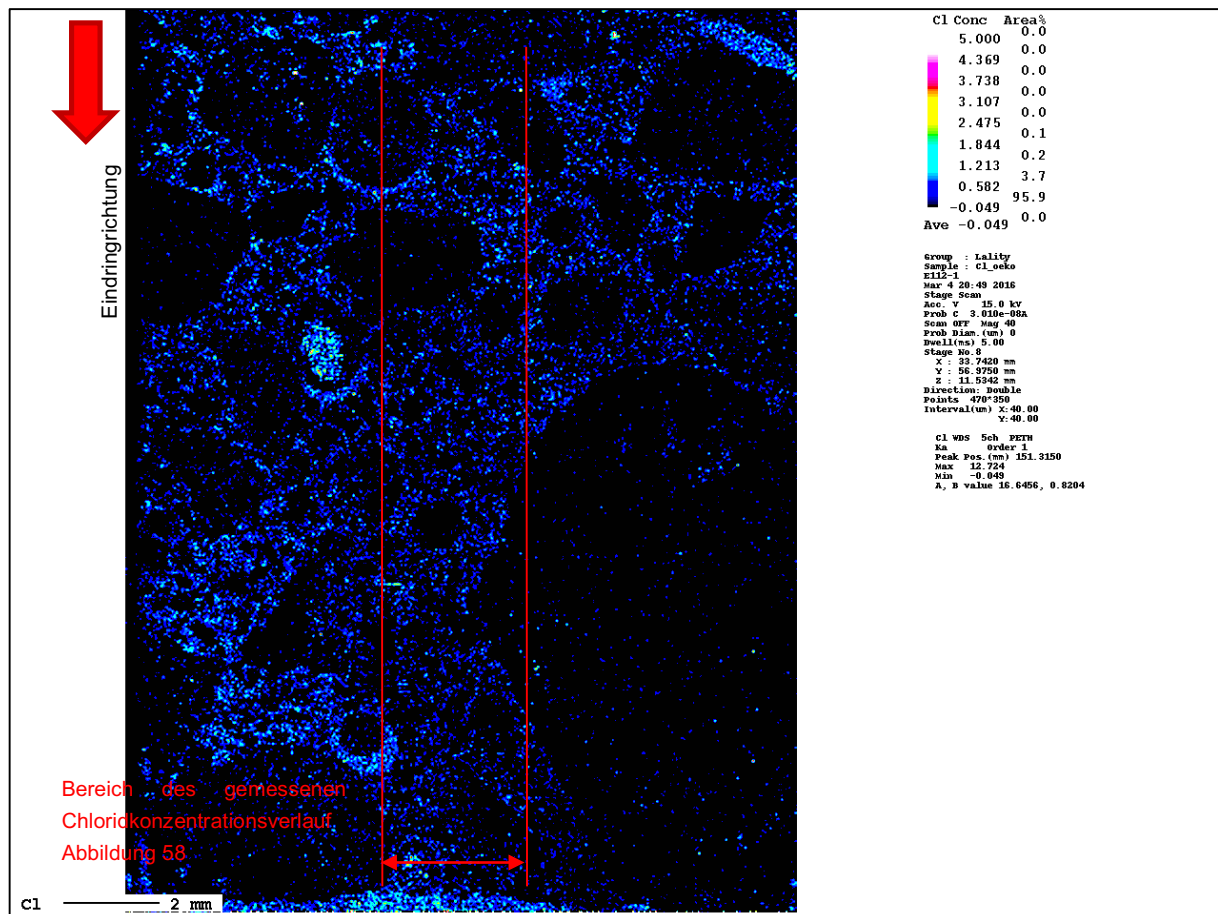


Abbildung 56 Mikrosondenaufnahme des Ökobeton 2 nach einmonatiger Lagerung (Probe E112_1)

Im Allgemeinen galt die Probe des ein Monat in der Lösung gelegenen Würfels der Ökobeton 2-Reihe als sehr schwierig zu interpretieren und analysieren. Zum Einen begrenzen große Gesteinskörner und Chlorideinschlüsse die maximal analysierbare Breite. Zum Anderen war sehr wenig Fläche auf dem Probenträger für Analysezwecke zur Verfügung, die durch

unregelmäßige Präparationsmaßnahmen zustande kamen. Aus diesen Gründen ist der analysierte Ausschnitt kleiner als bei den anderen Versuchen. Weiters ist zu erkennen, dass große Einschlüsse von Epoxidharz auf der linken Seite, in der unteren Flanke und mitten in der Probe vorhanden sind. Letztgenanntes ist durch ein herausgebrochenes Korn entstanden. Dass sich kein sehr steiler Konzentrationsgradient in der Probe einstellen wird, ist aus den Bohrmehlanalysen abzuleiten, jedoch sieht die Probe eher nach denen der CDF-Reihe aus, die oftmals eine gleichmäßige Verteilung der Chlorid-Ionen, zumindest auf den ersten Blick, besaßen. Zusätzlich grenzt ein großes Korn den rechten Bereich weiter ein, das anhand der roten Profillinien erkennbar ist.

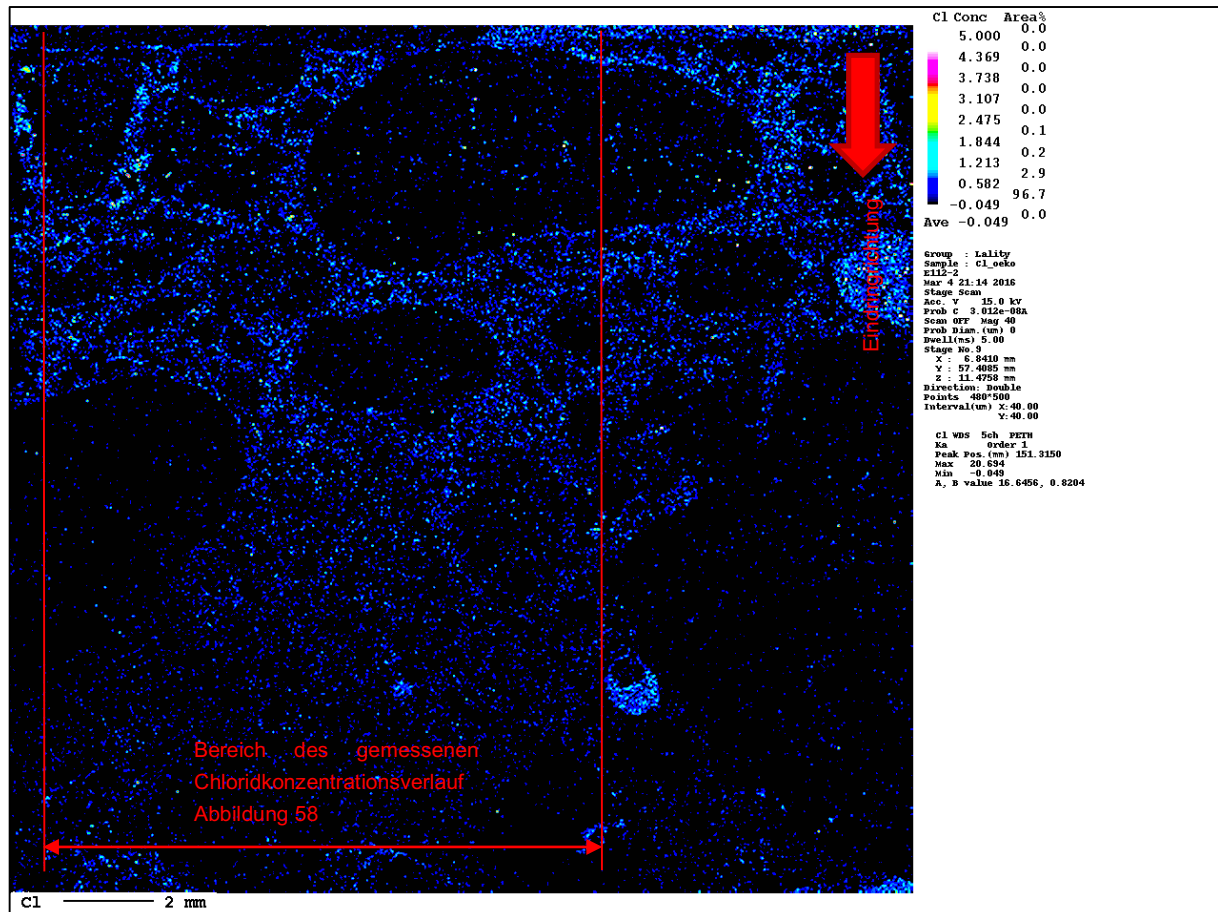


Abbildung 57 Mikrosondenaufnahme des Ökobeton 2 nach dreimonatiger Lagerung (Probe E112_2)

In Abbildung 57 hingegen ist auf der größeren Fläche auch ein deutliche Konzentrationsverminderung über die Eindringtiefe beginnend von oben nachvollziehbar. Auch in dieser Probe finden sich Epoxidharzeinschlüsse, die durch ein Fehlen der Körner zustande kam (helle Stellen auf der rechten Seite). Da sonst keine außergewöhnlichen Beeinträchtigungen vorhanden waren, ist der Bereich der zu quantitativen Konzentrationsberechnung genutzt wurde, sehr breit gewählt worden.

Im Fall der älteren Probe stimmen die Konzentrationen der 5 und 10 mm Tiefen sehr gut mit denen der Bohrmehlanalyse überein und liegen jeweils bei 0,2 M% bzw. bei 0,08 M%. Der Trend ist in der erwähnten Probe klar ersichtlich sinkend somit besteht eine Vergleichbarkeit zu den Bohrmehlversuchen. Das Gleiche kann in diesem Bezug für die kürzer gelagerte Probe

des Ökobeton 2 nicht ausgesprochen werden, da zu hohe Spitzen über einen zu großen Bereich verteilt auftreten und sich mit keinen gewonnen Daten decken.

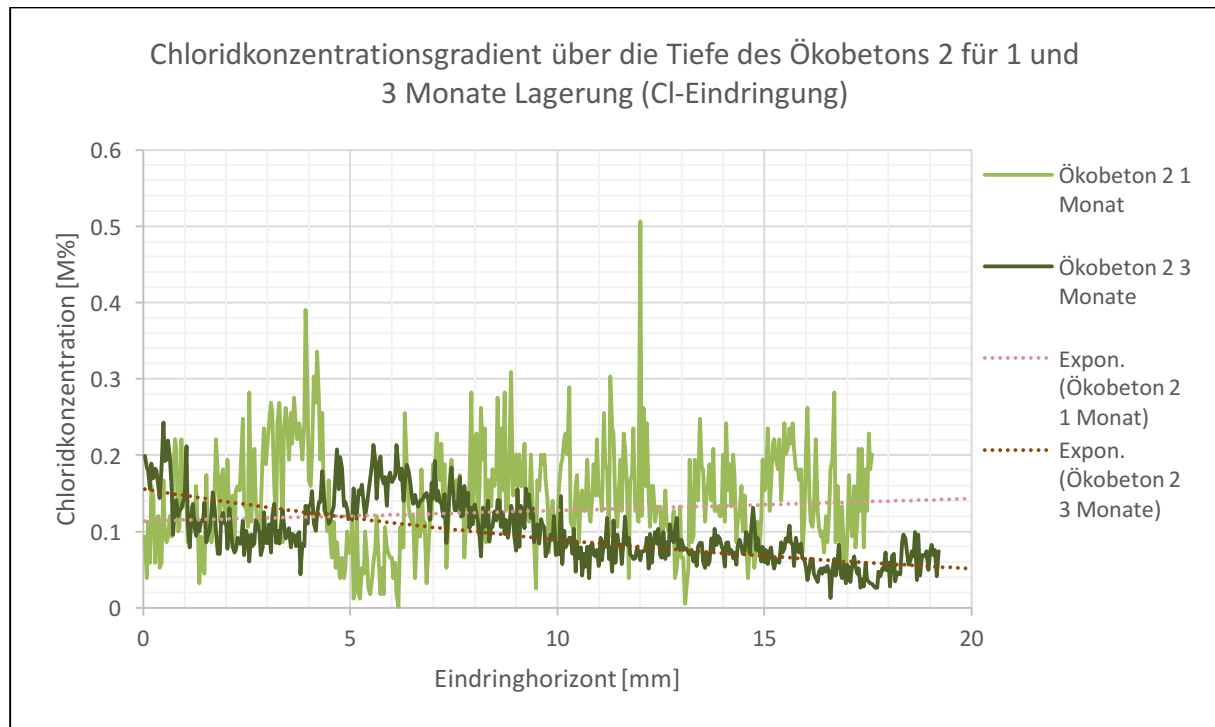


Abbildung 58 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe des Ökobetons 2

Bis auf diese letzte Ausnahme scheinen die Chlorideindringungsproben für die Mikrosonde besser handhabbar und benötigen weniger Nachbearbeitungszeit als die Proben der CDF-Testreihe.

5 Diskussion

Die im Kapitel 4 generierten Ergebnisse sind im folgenden Abschnitt, im Kontext der Interoperabilität des verwendeten CDF-Tests mit dem beschleunigten Chlorideindringungsprüfverfahren untersucht worden. Weitere Kriterien zur Beurteilung der einzelnen Testverfahren, wie die Vergleichbarkeit mit anderen Verfahren und das Verhalten der Betonrezepturen im Bezug zu den gestellten Anforderungen werden ebenfalls angeführt.

5.1 Bewertung der Analysen

In den folgenden Punkten werden die Eignungen der unterschiedlichen Messverfahren für zukünftige Versuche diskutiert.

5.1.1 Leitfähigkeitsmessung

Es gab wie in Kapitel 3.6.1 beschrieben Schwierigkeiten mit dem Lösungswechsel. Die Auswertung (siehe Abbildung 24/Abbildung 25) zeigt eine etwa konstante Leitfähigkeit bei den CDF-Proben, die durch die relativ kurze Lagerungsdauer gefolgt von den Lösungswechsel

beeinflusst ist. Durch zu wenige Messpunkte lässt sich aus den Ergebnissen des CDF-Tests auf kein eindeutiges Chloridaufnahmeverhalten, weder durch Konvektion noch durch Diffusion, schließen. Zusätzlich sei kurz angemerkt, dass zwischen den Sprüngen der Leitfähigkeitsmessung (Abbildung 25), denen der Flüssigprobenentnahme (Abbildung 31) und der Abwitterungsmasse eine Abhängigkeit vermutet wurde, die durch zu viele Unregelmäßigkeiten in den Resultaten nicht bewiesen werden konnte.

Im Fall des beschleunigten Chlorideindringungstests war im Gegensatz zu den CDF-Proben ein stetiger Anstieg der Leitfähigkeit zu verzeichnen (siehe Kapitel 4.2.1), der aber keines Falls rein über die Vermehrung der Chlorid-Ionen in der Lösung zustande kam. Somit zeigt sich, wie zu erwarten war, dass die Leitfähigkeitsmessung keine eindeutige Aussage auf die Cl-Konzentration zulässt.

Die einzige Eignung für die Bestimmung der Gesamtleitfähigkeit mit der Sonde besteht in der Information, wie hoch man die Proben der Lösungsentnahme für die Ionenchromatografie verdünnen muss.

5.1.2 Eindringtiefe darstellung mit Silbernitrat

Die optische Eindringtiefebestimmung durch das Besprühen der gespaltenen Probenwürfelhälften mit Silbernitratlösung ist der schnellste Test, um die Chlorideindringtiefe (Color change boundary) von den CDF-Proben und den der beschleunigten Chlorideindringung und allgemein von einzelnen Betonproben miteinander zu vergleichen. In der Abbildung 59 ist zu erkennen, dass es nicht entscheidend ist, welche Lagerungsdauer bzw. welcher Versuchsaufbau betrachtet wird, der Ökobeton 1 besitzt in allen Vergleichen die tiefste Eindringungsfront. Das Ergebnis verwundert, da die offene Porosität beim Referenzbeton mit 14,9 % über den des Ökobeton 1 und 2 mit jeweils 12,9 % liegen, und die Vermutung zulässt, dass der Hüttensandanteil dieses Verhalten beeinflusst (siehe Kapitel 4.2.3). Smolczyk [21] begründet den auftretenden Effekt mit der erheblichen Chloridbindekapazität der Aluminatphasen (u.a. Bildung von Friedelschen Salzen), und dadurch die für die Diffusion notwendige Bildung eines hohen Konzentrationsgefälles unterbindet. Die Resultate zeigen auch keine signifikante Erhöhung der Chlorideindringfront über die Zeit, mit Ausnahme des Ökobeton 1 (Vergleich 1 und 3 Monate Lagerung).

Die aufgezählten Beobachtungen zeigen eine Inkonsistenz verglichen mit den Chloridkonzentrationen aus den Bohrmehlversuchen, wenn eine Nachweisgrenze für das Chlorid mit 0,3 bis 0,4 M% bezogen auf den Zementanteil angenommen werden kann [22]. Einerseits wird bei der optischen Darstellung der Eindringtiefe mit dem Silbernitrat ausschließlich die nichtgebundenen Chlorid-Ionen durch die Farbumschlagsgrenze (Color change boundary) dargestellt – bei der Bohrmehlanalyse hingegen nur das gebundene Chlorid, das einen Vergleich beider Verfahren erschwert. Andererseits bezieht sich die ermittelte Chloridkonzentration der Bohrmehlanalysen auf den Beton und nicht auf den Zementstein. Die errechneten Cl-Konzentrationen zu den Color change boundaries liegen mit 0,04 – 0,12 M% (Tabelle 4 und Tabelle 7) bezogen auf den Gesamtbeton wesentlich unter denen von Kernbichler et al. [22].

Weiters hat Kernbichler et al [22], die von der Nachweisgrenze von 0,3 – 0,4 M% ausgehen, zusätzlich festgestellt, dass das Besprühen mit Silbernitrat nur im karbonatisierten Bereich und nicht in den darunterliegenden alkalischen Bereichen funktioniere. Diese Aussage widerspricht den Ergebnissen dieser Unternehmung, wo im nicht karbonatisierten Bereich eine eindeutige Farbveränderung zu beobachten war, jedoch die Grenztiefe mit einer sehr hohen Streuung dargestellt wurde. Resultierend aus der geringen Anzahl an verwendeten Probekörpern bzw. den hohen Abweichungen vom Mittelwert besonders bei den CDF-Proben (Abbildung 59) ist keine eindeutige Aussage möglich.

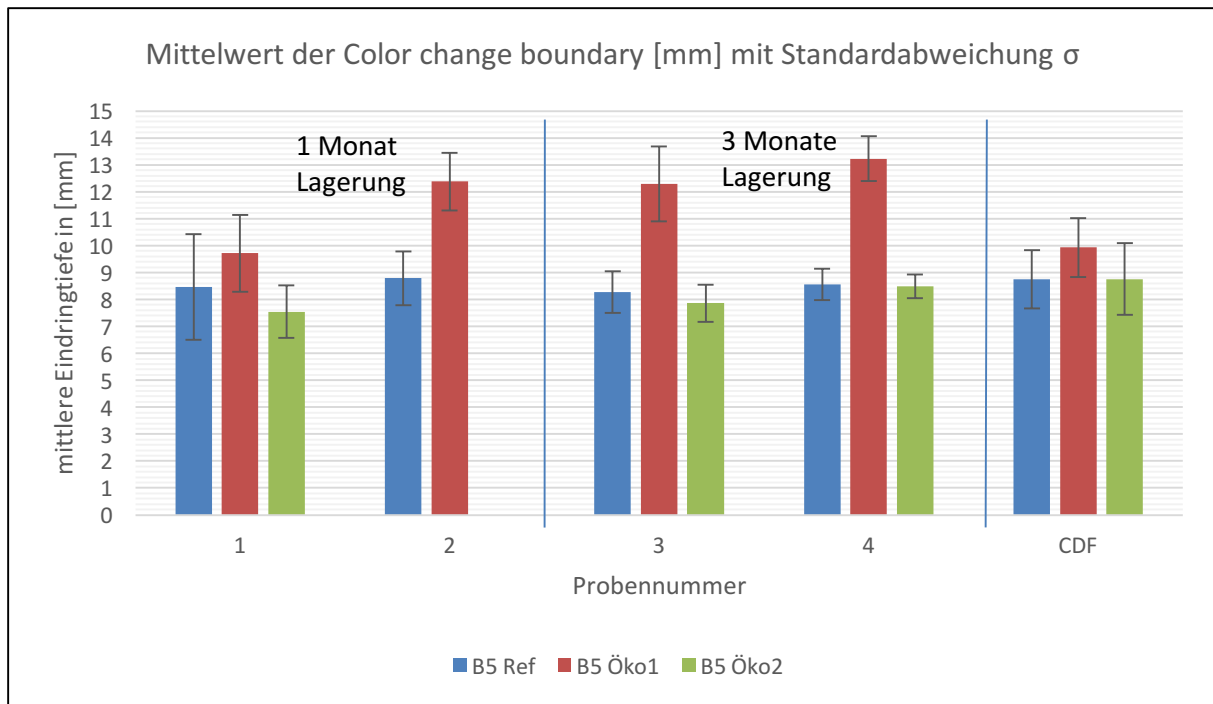


Abbildung 59 Vergleich der Eindringtiefenbestimmung zwischen beschleunigtem Chlorideindringungstest und der CDF-Prüfung

Um die mittleren Messtiefen des CDF-Test mit den Werten der beschleunigten Chlorideindringung vergleichen zu können, wurden 0,5 mm Abwitterungsmasse bei den Eindringtiefen der CDF-Proben dazu addiert.

Vergleicht man eine

5.1.3 Lösungsentnahme

Während der Leitfähigkeitsmessung sind parallel auch Lösungsproben bei den B5 Betonen entnommen worden. Die Entnahmemenge spielte nur bei den beschleunigten Chlorideindringversuchen eine Rolle, da in diesem Fall kein Lösungswechsel innerhalb des Messzeitraums stattfand. Auf das Gesamtvolumen bezogen, machten die akkumulierten Entnahmemengen von 7 ml pro Entnahme und Versuchsreihe ca. 3 % Volumsverlust aus. Bei den später durchgeführten B2 Betonen mit nur 2 ml pro Probe und Zeitpunkt lag das Verhältnis ebenfalls bei 3 % und beide liegen unter den Angaben des Kurzzeitdiffusionstest aus Kapitel 2.2.4 bzw. [1]. Für den CDF-Test gilt, dass eine Analyse der entnommenen Lösung

keine brauchbaren Daten zur Chloridbindekapazität des Betons liefert, da der ständige, vorgeschriebene Lösungswechsel die Chloridkonzentration auf den Ausgangswert der 0-Lösung setzt. Aus diesem Grund besteht keine Vergleichbarkeit zum beschleunigten Chlorideindringungsverfahren.

Obwohl bei den beschleunigten Chlorideindringungsverfahren der B5 Reihen eine Chlorid-Ionenreduktion messbar war, scheint dieses Verfahren von einem in der Publikation [1] nicht erwähnten Parametern stark abhängig zu sein – dem Verhältnis aus der gesamten beaufschlagten Fläche zur eingefüllten Lösungsmenge. Dieses Verhältnis wurde für die B2 Proben und für den Ökobeton 2 der B5-Reihe variiert. Die Änderungen hatten negative Auswirkungen auf das Ergebnis, da in den erwähnten Fällen keine (B2) oder weniger gute (B5) Chlorid-Ionenabnahmen entstanden. Durch die geringe Abnahme der Cl-Konzentration in der Lösung (Abbildung 44) wurde auch kein Chloriddiffusionskoeffizient nach Park et al [1] ermittelt.

Ausgehend von der geringen Aussagekraft der gewonnenen Ergebnisse, ist für große Testdurchläufe mit einer hohen Anzahl von Probekörpern, die in einer Lösung stehen, von dem Lösungsentnahmeverfahren nach STIT [1] abzuraten.

5.1.4 Bohrmehlanalyse

Eine klare Empfehlung für zukünftige Chloridmessungen gibt es für die Variante mit der Bohrmehlentnahme und anschließenden Analyse. Nicht nur bietet dieser Test eine gute Vergleichbarkeit der Chloridkonzentrationen mit den Mikrosondenresultaten, sondern auch mit den Bohrmehlergebnissen unter den CDF- und beschleunigten Chlorideindringungstests. Weitere Vorteile sind Variabilität der Entnahmetiefen bzw. die Anzahl der Tiefenstufen, die für eine gute Darstellung essenziell sind. Um aber eine relevante Aussage zum Chlorideindringmechanismus (Chloridprofile und Diffusionskoeffizient) darstellen zu können, muss die Anzahl der Entnahmeprobe pro Reihe deutlich von den 2 verwendeten Würfeln pro Betonrezeptur und Versuchsaufbau gesteigert werden. Außerdem ist das Bohrmehl auf die wasserlöslichen Chlorid-Ionen zusätzlich zu untersuchen, um eventuell ein ähnliches Verhalten zum Silbernitratstest festzustellen.

5.1.5 Mikrosondenanalyse

Das Analyseverfahren mit der Mikrosonde stellt wahrscheinlich die exakteste Methode zur Darstellung der Chlorideindringung dar, und bietet genau wie die Bohrmehlanalyse eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse zwischen den beiden durchgeführten Versuchsaufbauten (CDF und beschleunigte Chlorideindringung) und zusätzlich zu den Bohrmehlresultaten. Im Grunde haben die Ergebnisse der Bohrmehlentnahmeanalyse eine ausreichend hohe Genauigkeit bei der Darstellung der Chloridkonzentration. Die Ergebnisse der Mikrosondenanalyse würden dementsprechend als Zusatzinformation dienen, wenn die Dünnschliffe ähnlich tief in den Beton reichen würden (25 mm), und eine vergleichbar hohe Anzahl an Dünnschliffproben zu Bohrmehlentnahmepunkten vorhanden wären. Aus diesem

Grund ist zwischen den beiden Chloridkonzentrationsbestimmungsverfahren zu wählen, da bei Ausführung beider es zu einer Redundanz führt.

Mit den nachfolgenden Diagrammen werden jene Beobachtungen grafisch dargestellt.

In Abbildung 60, Abbildung 61 und Abbildung 62 wird der Chloridkonzentrationsverlauf der Bohrmehlanalyse und der Mikrosondenanalyse der CDF-Proben dargestellt. Im Fall des Referenzbetons ist zu beachten, dass kein direkter Vergleich der exakten Probe möglich war und deswegen die Kurven zweier CDF-Proben mit der einen der Mikrosonde verglichen wurden. Die eingefügte Trendkurve bildet in Abbildung 61 und Abbildung 62 ziemlich genau die fortlaufende Bohrmehl-Konzentrationskurve dar, sodass nur die in der 5 mm Bohrtiefe gemessene Konzentration über den Trends der Mikrosondenergebnisse liegt. Schlussfolgernd für den CDF-Test ist ein Vergleich der Proben aus den Bohrmehlversuchen mit den Ergebnissen aus den Dünnschliffanalysen legitim, obwohl die im Kapitel 3.6.4 sowie in Kapitel 4.1.7 erwähnten problematischen Bedingungen für die Interpretation eine Beeinträchtigung darstellten.

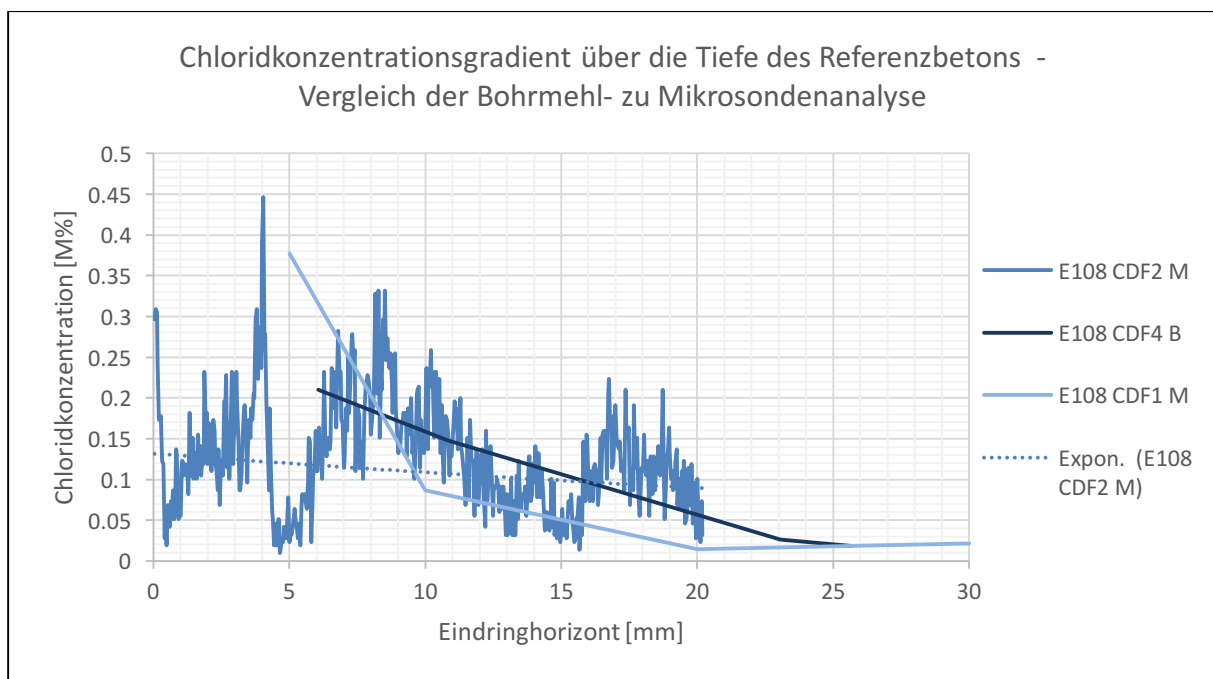


Abbildung 60 Vergleich des Chloridkonzentrationsverlauf zwischen Bohrmehl und Mikrosondenanalyse des Referenzbetons der CDF-Reihe; Abkürzungen: M = Mikrosonde, B = Bohrmehl

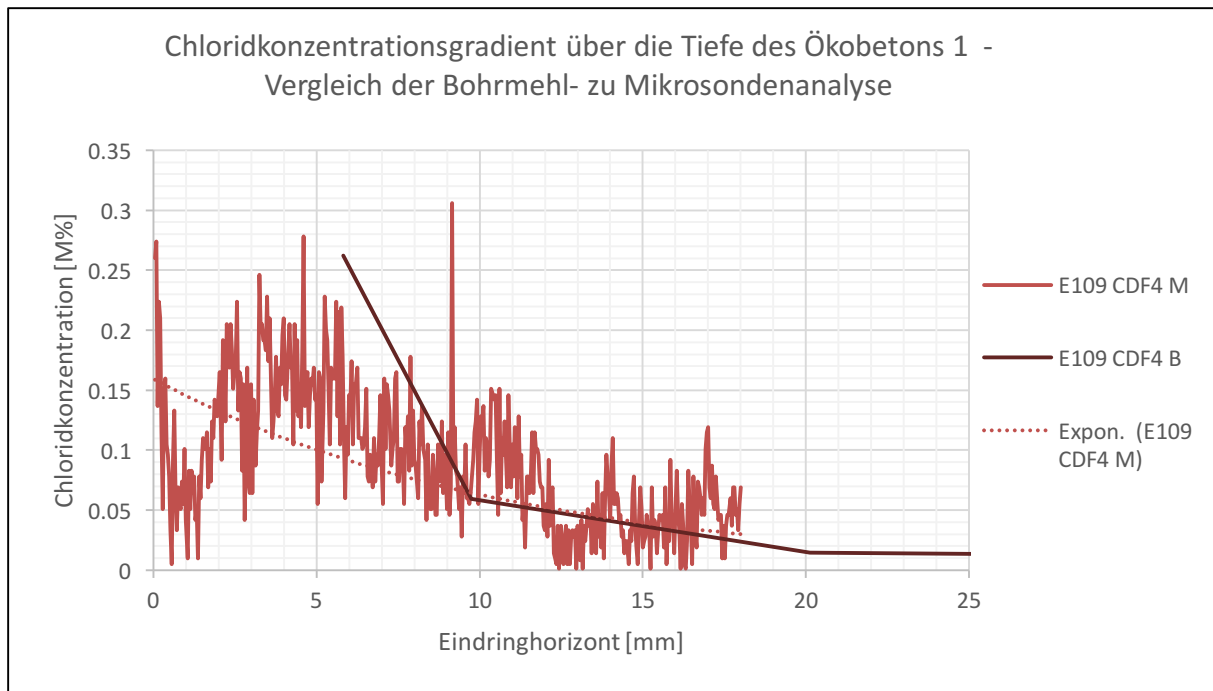


Abbildung 61 Vergleich des Chloridkonzentrationsverlauf zwischen Bohrmehl und Mikrosondenanalyse des Ökobeton 1 der CDF-Reihe; Abkürzungen: M = Mikrosonde, B = Bohrmehl

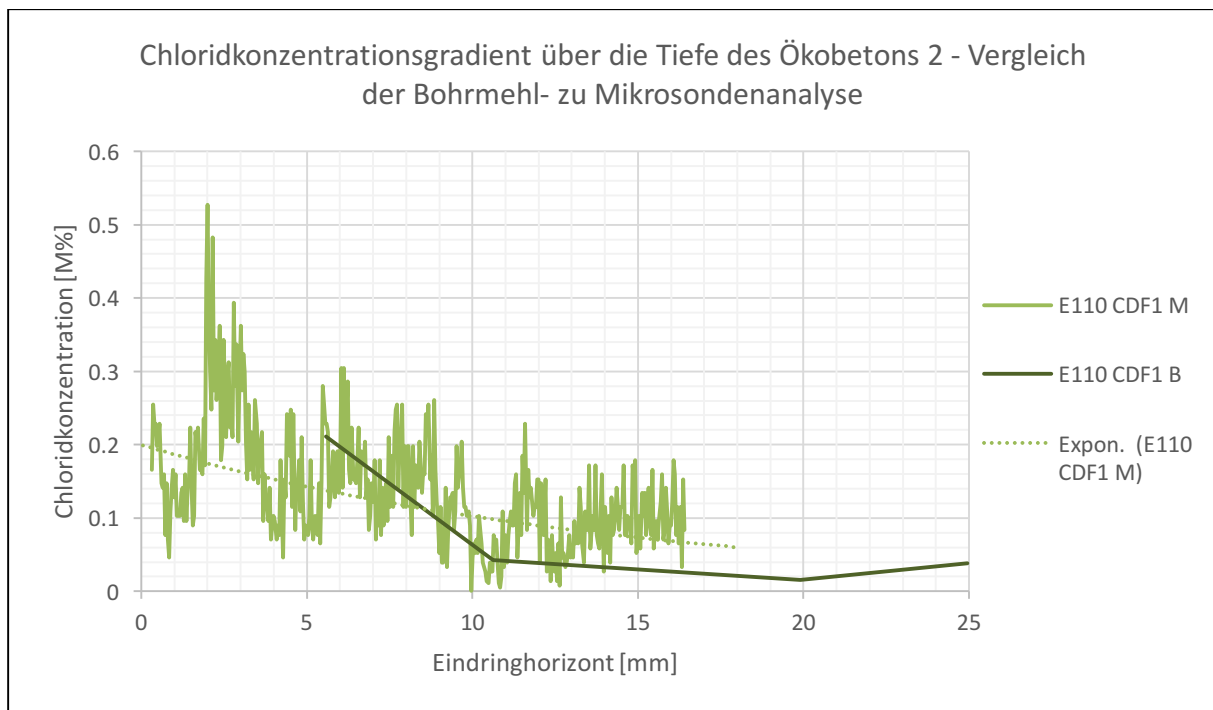


Abbildung 62 Vergleich des Chloridkonzentrationsverlauf zwischen Bohrmehl und Mikrosondenanalyse des Ökobeton 2 der CDF-Reihe; Abkürzungen: M = Mikrosonde, B = Bohrmehl

Die letzten Diagramme (Abbildung 63, Abbildung 64, Abbildung 65) stellen ebenfalls die Vergleichbarkeit der Bohrmehlresultate mit den Ergebnissen der Mikrosondenanalyse dar, nur das es sich in diesem Fall um die Proben der beschleunigte Chlorideindringung handelt.

Weiters ist in jedem der drei Plots der Konzentrationsverlauf für die ein und drei monatige Lagerung der Mikrosonde und der Bohrmehlanalyse enthalten. Erkennbar an den in den Legenden angeführten 1 Monat und 3 Monate Beschriftungen der einzelnen Proben (z.B.: E108_3 Monate M = Referenzbeton, 3 Monate in der Lagerung, Ergebnis aus der Mikrosondenanalyse; oder E111_1 Monat B = Ökobeton 1, 1 Monat in der Lösung, Ergebnis aus der Bohrmehlanalyse).

Im Fall des Referenzbetons (Abbildung 63) ist durchaus eine Vergleichbarkeit der einmonatigen Lagerung möglich, da die Konzentrationen aus der Bohrmehlanalyse jene der Trendlinie aus den Mikrosondenergebnissen sehr gut treffen. In der Darstellung der drei-monatigen Lagerung weicht das Resultat aus den Bohrungen dann erheblich mehr ab. Während die Trendlinie (orange) der Mikrosonde an den 5 und 10 mm Tiefen bei 0,1 und 0,04 M% liegt, ist der Wert der Bohrmehlanalyse (hellblau) an den erwähnten Stellen bei 0,26 und 0,1 M%.

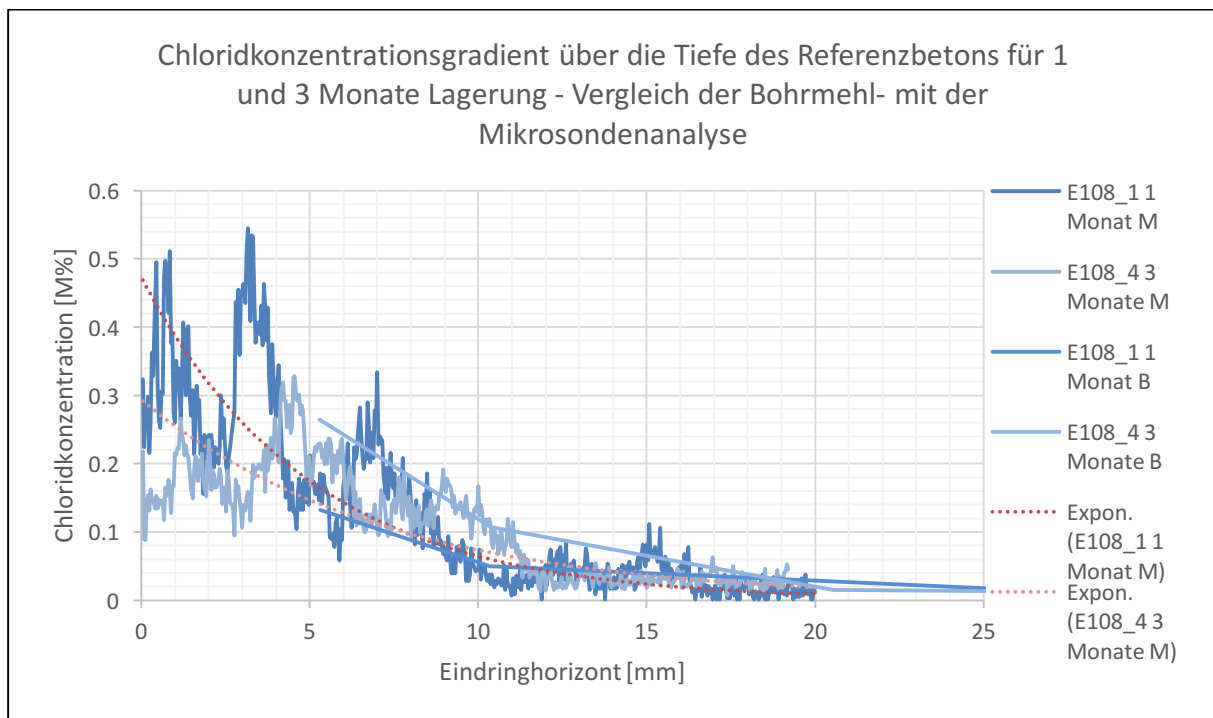


Abbildung 63 Vergleich des Chloridkonzentrationsverlauf zwischen Bohrmehl und Mikrosondenanalyse des Referenzbetons der beschleunigten Chlorideindringungsreihe; Abkürzungen: M = Mikrosonde, B = Bohrmehl

Für den Ökobeton 1 (Abbildung 64) sind die Verläufe beider Versuche sehr ähnlich bis auf, den schnelleren Konzentrationsabfall der Mikrosondenanalyse. Mit beiden Analysemethoden ist der annähernd gleichbleibende von der Lagerungszeit unbeeinflusste Konzentrationsverlauf der Probe dargestellt worden, wenn man die Trendlinien (hellblau und blau) mit den Konzentrationskurven der Bohrmehlentnahmeresultate vergleicht. Eine qualitative und quantitative Vergleichbarkeit anhand des Trends mit den Konzentrationskurven aus den Bohrungen ist durchaus gegeben.

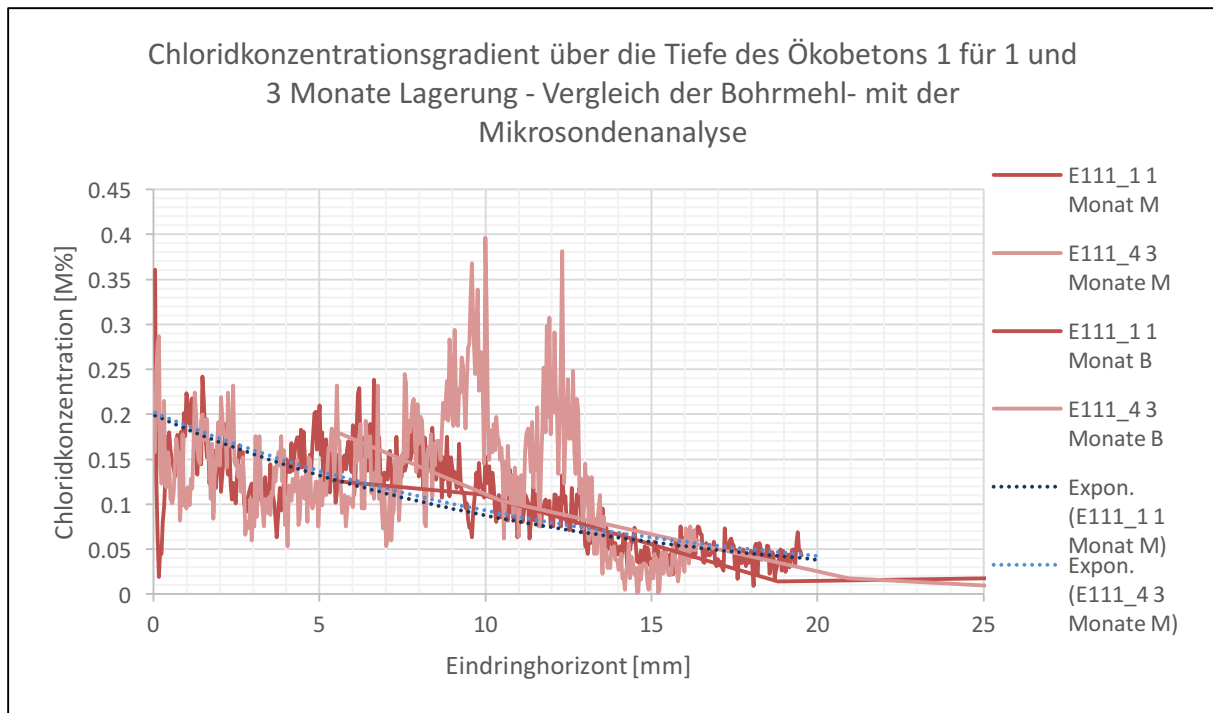


Abbildung 64 Vergleich des Chloridkonzentrationsverlauf zwischen Bohrmehl und Mikrosondenanalyse des Ökobeton 1 der beschleunigten Chlorideindringungsreihe; Abkürzungen: M = Mikrosonde, B = Bohrmehl

Die Vergleiche der Mikrosondenprobe mit denen des Bohrmehlversuchs der Ökobeton 2 Reihe (Abbildung 65) müssen mit Bedacht gezogen werden, da die Probenpräparation für die Mikrosonde der Probe E112_1 (1 Monat) mit mäßigem Erfolg gelungen ist. Das ist auch in Abbildung 65 anhand der geraden Trendlinie (orange) erkennbar. Für die dreimonatige Kurve ist die Konzentration an der 5 mm Marke zwar zu hoch, doch der Trend entspricht der fortführenden Konzentrationskurve der Bohrmehlanalyse. Letztendlich stellt der Vergleich der einmonatigen Ökobeton 2-Probe den „worst case“ dar und darf für weitere Rückschlüsse nicht herangezogen werden. Die ältere Probe hingegen bietet wie auch schon bei den Ökobeton 1 Proben eine Trendlinie die bis auf die 5 mm Marke sehr nahe an den Bohrmehlresultaten liegt.

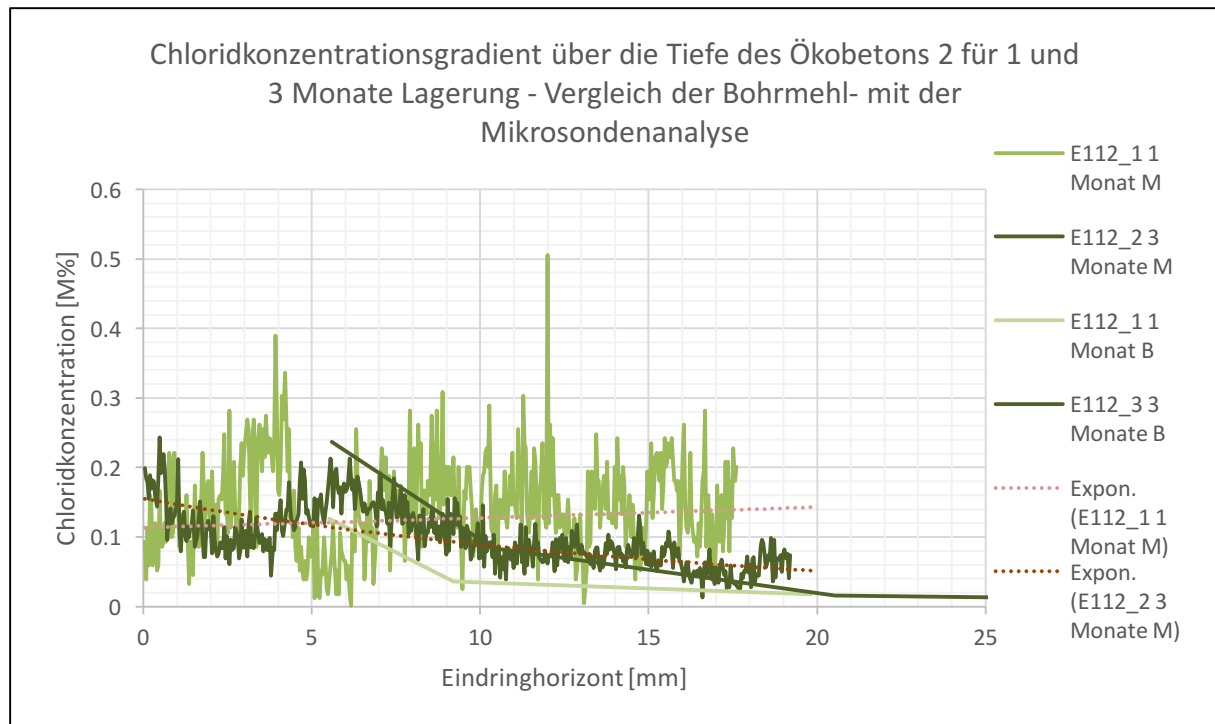


Abbildung 65 Vergleich des Chloridkonzentrationsverlauf zwischen Bohrmehl und Mikrosondenanalyse des Ökobeton 2 der beschleunigten Chlorideindringungsreihe; Abkürzungen: M = Mikrosonde, B = Bohrmehl

Auffällig bei all den verglichenen Proben ist die abrupte Abnahme der Chloridkonzentration bei den Proben des Ökobeton 1 (Abbildung 61, Abbildung 64) im Bereich von 12 mm, das zu den Ergebnis des Silbernitrattests passt (Color change boundary).

Zusammenfassend gibt es eine klare Empfehlung für die Analyse von Bohrmehlen sowie der Mikrosondenanalyse. Erstere ist aus Kostengründen sowie des geringeren Zeitaufwands zu bevorzugen. Die optische Darstellung der Chlorideindringtiefe mittels Silbernitrat ist nur dann zu empfehlen, wenn zusätzlich auch die wasserlösliche Chloridkonzentration bei den Bohrmehlanalysen mituntersucht werden. Wegen dem Fehlen von aussagekräftigen Ergebnissen und zeitkritischem Arbeiten (Entnahmezeitpunkte!) wird vom Schort-Term Diffusion-Test (STIT) nach Park et al [1] abgeraten.

5.2 Vergleich 1: CDF-Test und beschleunigtes Chlorideindringverfahren

Eine der eingangs erwähnten Kriterien der gesamten Studie ist die Klärung der Frage, ob die Ergebnisse aus den CDF-Versuchen mit jenen der beschleunigten Chlorideindringung kombinieren lassen, bzw. ob aus dem CDF-Test Aussagen bezüglich der Korrosionsbeständigkeit eines Betons entsprechend der Expositionsklasse XD getroffen werden können. Folgende mögliche Schnittpunkte bieten sich zum Vergleich an:

- Gegenüberstellung der Chloridkonzentrationsverläufe aus den Bohrmehl- und Mikrosondenanalysen
- Vergleich der Chloriddiffusionskoeffizienten der jeweiligen Betonrezepturen

Für den erstgenannten Punkt gibt es zwei Datensätze zu berücksichtigen. Zum einen die Gegenüberstellung der CDF-Proben mit denen der beschleunigten Chlorideindringung nach einem Monat Lagerung und zum anderen die drei Monate in der Lösung gelegenen Chlorideindringungsproben mit den gleichen CDF-Proben.

Beginnend mit den älteren Proben (3 Monate Lagerung) des beschleunigten Chlorideindringungstests und der CDF-Reihe (siehe Abbildung 66) ist die Konzentration der durch Frost-Tau-Zyklen beschädigten Proben in der 5 mm Zone zwischen 11 (Referenzbeton) und 26 % (Ökobeton 1) höher als jene Exemplare der Chlorideindringung. Für die 10 mm Grenze verringern sich die Konzentrationsunterschiede der beiden Versuchsaufbauten dramatisch, das ein Anzeichen für ein ungeschädigtes Korngefüge sein kann, jedoch mit dem Mikroskop nicht eindeutig festlegbar war. Einzig der Ökobeton 1 des CDF-Versuchs weist in der 10 mm Schicht einen 43 % kleineren Wert gegenüber der beschleunigten Chlorideindringung für die gemessene Konzentration auf. Die ähnlich schnelle Reduktion der der Chloridkonzentration beider Aufbauten kann auch als Indiz gesehen werden, dass der CDF-Test bei dem Silbernitratversuch fast idente Eindringtiefen aufweist, wie die restlichen Proben (Abbildung 59).

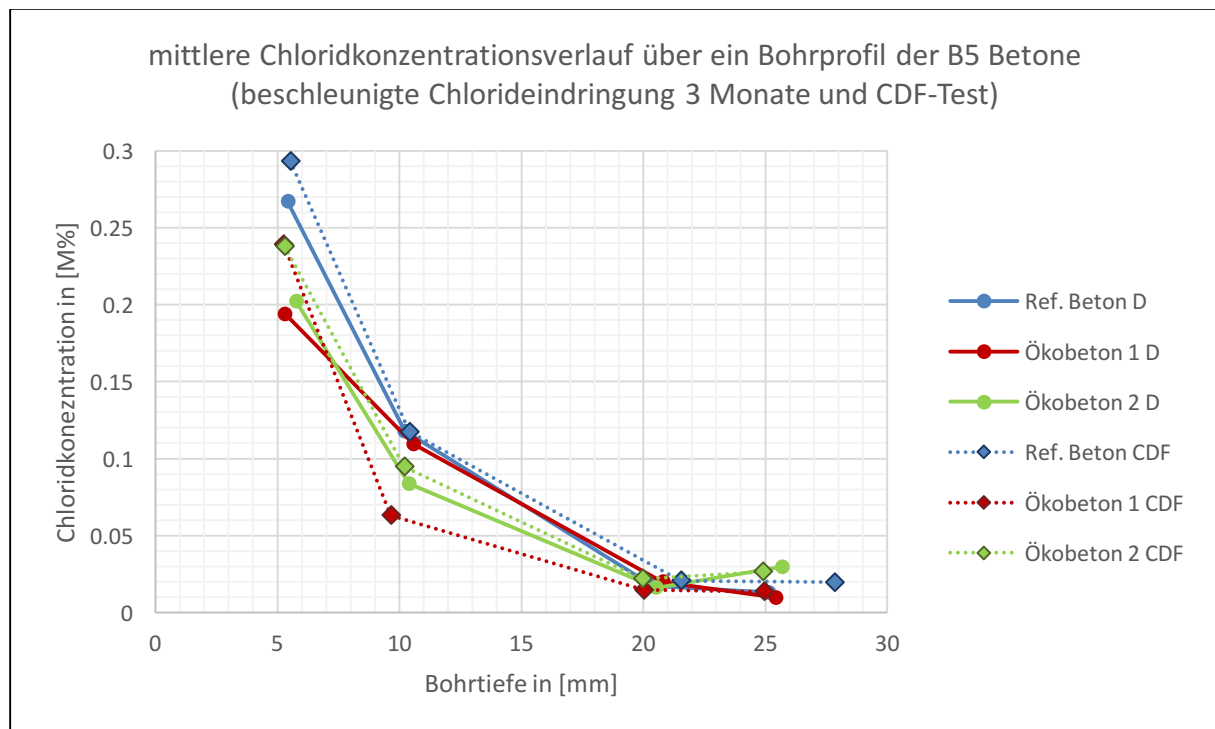


Abbildung 66 Chloridkonzentrationen für CDF- und beschleunigten Chlorideindringungstests nach drei Monaten Lagerung; D = beschleunigte Chlorideindringung, CDF = CDF-Test

In Abbildung 67 sind die CDF-Proben denen des ein-monatigen Chlorideindringungsversuches gegenübergestellt. In starkem Kontrast zu Abbildung 66 sind die Konzentrationen der CDF-Proben wesentlich höher an den ersten zwei Entnahmepunkten (5 und 10 mm).

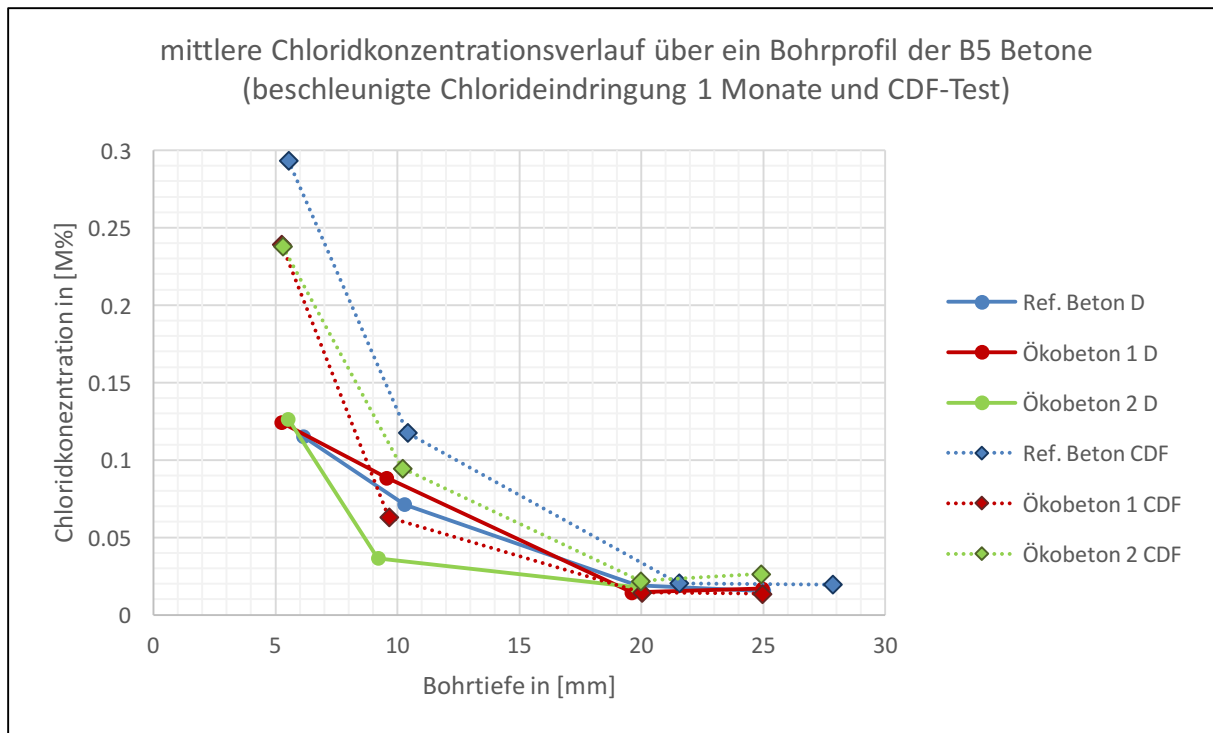


Abbildung 67 Chloridkonzentrationen für CDF- und beschleunigten Chlorideindringungstests nach einem Monat Lagerung; D = beschleunigte Chlorideindringung, CDF = CDF-Test

Aus dieser ersten Gegenüberstellung kann nun gefolgert werden, dass der CDF-Test im Bezug auf das Chlorideindringverhalten eine ähnliche Intensität aufweist wie ein drei Monate andauernder beschleunigter Chlorideindringversuch bei einem B5 klassifizierten Beton.

Abschließend zeigt Tabelle 9 den Vergleich der Chloriddiffusionskoeffizienten der beiden Versuchsaufbauten. Aus der genannten Übersicht ist eindeutig ersichtlich, dass die Diffusionskoeffizienten mit der Zeit geringer werden, somit im Rückschluss der Diffusionswiderstand über eine Zeitperiode zunimmt. Die dem CDF-Test unterzogenen Proben weisen allerdings jeweils einen deutlich höheren Diffusionskoeffizienten auf (Faktor 2-3,5 gegenüber der 3 Monate Lagerung). Im Vergleich von Referenz- und Ökobetonen zeigt sich bei allen Untersuchungen, dass die Werte für den Diffusionskoeffizienten beim Referenzbeton und Ökobeton 1 die Höchsten sind, während der Ökobeton 2 wesentlich unter den beiden anderen Varianten liegt. Die Diffusionskoeffizienten der CDF-Tests ähneln quantitativ am Ehesten denen der einmonatigen Lagerung des Chlorideindringversuches. Somit kann angenommen werden, dass die hohen Chloridkonzentrationen bei den Versuchskörpern der CDF-Reihen primär über den Eislinsepumpeneffekt und der Konvektion zustande kamen. Als weiteren Faktor ist die Gefügeschädigung zu nennen, die ebenfalls zu einer Erhöhung des D_{eff} beiträgt.

Zusammenfassend scheint zuerst ein Vergleich der beiden Versuchsaufbauten anhand der alleinigen Betrachtung der Chloridkonzentrationen in Abbildung 66 möglich zu sein, jedoch resultieren die ähnlich hohen Cl-Konzentrationen aus unterschiedlichen Effekten, die auch in abweichende Diffusionskoeffizienten resultieren. Aus diesem Grund ist keine Abbildung des Chlorideindringwiderstands (XD) mit dem CDF-Test nach den gewonnenen Erfahrungen nach möglich.

Tabelle 9 Vergleich der Chloriddiffusionskoeffizienten des CDF-Versuchs mit denen des beschleunigten Chlorideindringungsverfahrens und deren Fittinggenauigkeit

Vergleich der Diffusionskoeffizienten D_{eff} in $[\text{m}^2/\text{s}]$ des CDF- und Chlorideindringungstests			
	Referenzbeton	Ökobeton 1	Ökobeton 2
1 Monat Lagerung	1,06E-11	1,10E-11	3,90E-12
3 Monate Lagerung	4,29E-12	4,77E-12	2,10E-12
CDF	1,00E-11	8,50E-12	7,5E-12
Fittinggenauigkeit anhand der Summe des Fehlerquadrats r^2 dargestellt (je kleiner desto besser)			
1 Monat Lagerung	0,00169	0,00279	0,00300
3 Monate Lagerung	0,00154	0,00172	0,00180
CDF	0,00978	0,00675	0,00674

5.3 Vergleich 2: Angewandtes Chlorideindringverfahren und neuer Kurzzeitdiffusionstest (STIT)

Der Grundgedanke bei diesem Vergleich war es den beschleunigten Chlorideindringungsversuch soweit in seiner Dauer zu verkürzen, dass der erwähnte Test im Vorfeld zu den CDF-Versuchen durchgeführt werden könnte, ohne den eigentlichen CDF-Testablauf zu beeinflussen oder abzuändern. In der Hinsicht bot das Modell Parks [1], mit dem Rückschlüsse aus dem Chlorid-Ionenverbrauch der Lösung auf einen Diffusionskoeffizienten innerhalb von nur 14 Tagen gezogen werden, eine ideale Lösung für das Problem an. Somit wurden die Methoden auf das bestehende System der Chlorideindringversuche angewandt.

Während in den Originalversuchen auf einzelne zylindrische Proben ein einseitig verschließbares Rohr gleichen Durchmessers aufgesetzt wird, und dort die Lösungsmenge eingefüllt wird, lagen in unserem Fall sechs Würfel mit einer Seitenlänge von 150 mm in einem verschließbaren abgedichteten Behälter in der Lösung. Die Lösungsentnahme erstreckte sich über 21 (B5) bzw. 28 (B2) Tagen und somit eine bzw. zwei Woche(n) länger als in der Literatur empfohlen. Auch die Entnahmemengen waren prozentuell auf das Gesamtvolumen mit 3% unter denen von Park et al [1].

Jedoch konnten im Gegensatz zum Kurzzeitdiffusionstest (STIT) nach Park et al [1] keine (B2) bis geringe (B5) Abnahmen in der Chlorid-Ionenkonzentration der Lösung festgestellt werden. Quantifiziert bedeutet das eine Verringerung der Cl-Ionenkonzentration in der Lösung der B5-Betone ($W/B = 0,55-0,5$) von ca. 17 g/l auf 16,3 g/l (siehe Abbildung 44). Im STIT hingegen sank über die Dauer von 14 Tagen bei einer Probe mit $W/Z = 0,6$ die Cl-Konzentration von 21 g/l auf 16 g/l, somit wesentlich schneller und im größeren Maße (S.173 Abbildung 4b [1]).

Dass das Verhältnis der gesamten eingefüllten Lösungsmenge zur beaufschlagten Fläche (V/A) eine Rolle spielt, konnte anhand folgender Erklärung bewiesen werden:

Bei den B5 Betonen lag das Verhältnis von V/A bei 10,68 (Referenz und Ökobeton 1) und 11,25 (Ökobeton 2) und alle drei Proben zeigten eine leichte Abnahme der Cl-

Ionenkonzentration in der Lösung. Bei den B2 Betonen hingegen mit einem $V/A = 27,58$ konnte kein Chloridverbrauch gemessen werden, sodass davon ausgegangen werden kann, dass eine zu hohe Verhältnis keine messbare Reduktion der Cl-Ionen liefert. Aus den Originalversuchen nach Park et al [1] wurde ein Verhältnis von 13,5 ermittelt. Diese Verhältniszahlen sind als Füllhöhen in [mm] pro Probekörper zu interpretieren.

Als Conclusio sei gesagt, dass es schwer wäre mit weiteren Modifikationen an den Probenbehältern, an der Lösungsmenge und/oder der Konzentration einen höheren Chlorid-Ionenverbrauch über eine Messperiode zu erzeugen um dann einen realistischen Diffusionskoeffizienten zu ermitteln.

5.4 Korrelation der mechanischen Kennwerte

Die Spaltzugfestigkeitsergebnisse des CDF- (Tabelle 3) und des beschleunigten Chlorideindringtests (Tabelle 6) wurden zu einem gemeinsamen Diagramm, der besseren Übersicht dienend, in Abbildung 68 zusammengefasst. Vergleicht man nun die Werte des Referenzbetons der einmonatigen Lagerung (blau) mit denen des CDF-Verfahrens (grün), fällt der relativ große Unterschied in der Spaltzugfestigkeit auf, obwohl beide Proben das gleiche Herstellungsdatum besitzen und zum Zeitpunkt der Spaltung ähnlich lange in der Lösung lagen. Ein Vergleich von Ökobeton 1 mit Ökobeton 2 ist aufgrund unterschiedlichem Alters der Proben nicht ideal. Der Erstgenannte ist 7 Tage früher hergestellt worden. Dennoch kann davon ausgegangen werden, dass die Beschädigung durch die Frost-Tauzyklen keine tiefreichende ist. Der unerklärlich hohe Spaltzugfestigkeitsvorsprung der CDF-Proben kann erst mit den drei Monate in der Lösung gelagerten Exemplaren und auch nur von jenen mit Hüttensandanteilen (Referenzbeton und Ökobeton 2) eingeholt werden. Es ist auch ersichtlich, dass der Ökobeton 1 (roter Balken) ohne Hüttensandanteile keine zusätzlichen Möglichkeiten besitzt, die Festigkeit über einen größeren Zeitraum im selben Maße wie die beiden anderen Varianten zu steigern.

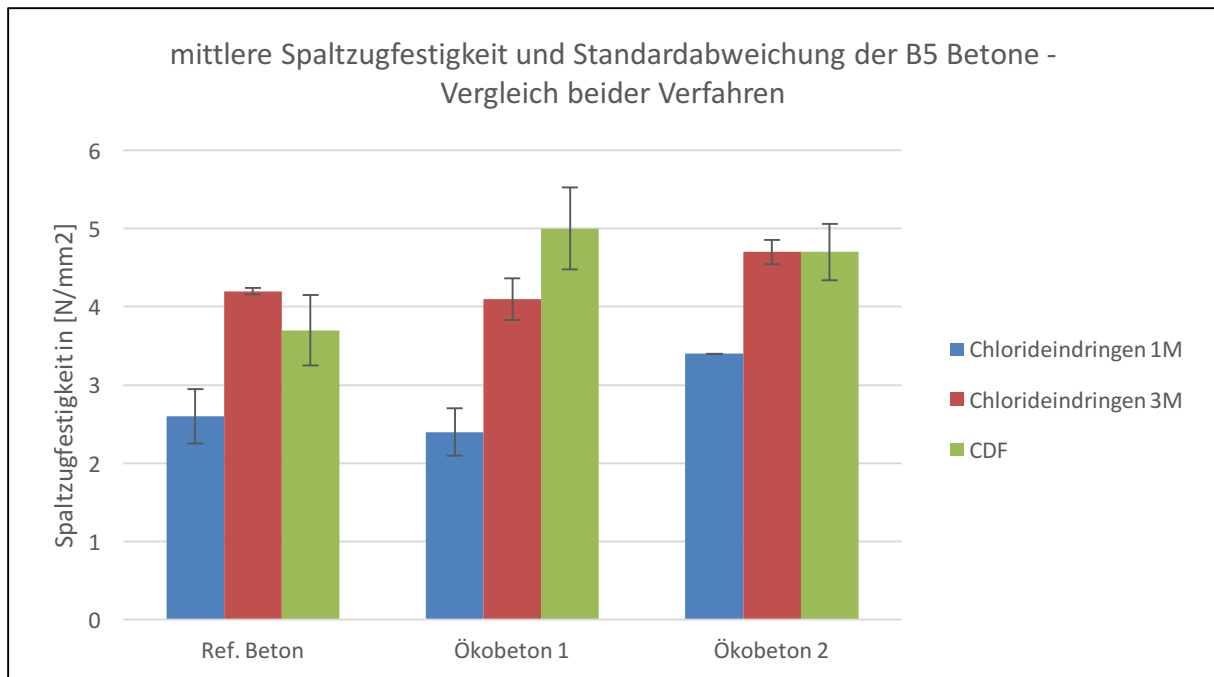


Abbildung 68 Vergleich der Spaltzugfestigkeiten

Wie auch schon in 4.2.3 erwähnt spielt es für die nachträgliche Festigkeitsentwicklung (>56d) keine Rolle, ob der Hüttensand als Zumahlstoff im Zement enthalten ist (Referenzbeton mit 14% Hüttensandanteil im Zement), oder als Zusatzstoff in der Rezeptur vorkommt (Ökobeton 2 mit 15% Hüttensandanteil im „Bindemittel“). In beiden Fällen kommt es zu signifikanten Festigkeitssteigerungen über das Alter von 28 Tagen hinaus.

In der nachfolgenden Tabelle 10 sind alle berechneten Diffusionskoeffizienten gegenüber der offenen Porosität dargestellt. Es ist schnell ersichtlich, dass mit einem geringen Porenvolumen auch ein niedriger Diffusionskoeffizient korreliert. Der Ökobeton 2 besitzt neben dem Hüttensandanteil auch eine geringe Porosität und somit auch in allen Versuchsaufbauten den geringsten Diffusionskoeffizient. Es kann fast eine mathematische Beziehung aus den Werten eines Versuchsaufbaus ermittelt werden.

Zum Beispiel CDF:

Ref. Beton: $14,9/10 = 1,49$

Ökobeton 1: $12,9/8,5 = 1,52$

Ökobeton 2: $12,9/7,5 = 1,72$

Diese Faktoren sind in der unteren Hälfte der Tabelle 10 aufbereitet. Aus näherer Betrachtung fällt bei den Ergebnissen der beschleunigten Chlorideindringung auf, dass die Werte des Referenzbetons und des Ökobetons 1 ähnlich niedrig sind, während sich der Ökobeton 2 dank des sehr niedrigen Diffusionskoeffizienten quantitativ deutlich über den beiden anderen Probenreihen einordnet. Dieses Phänomen ist durchaus auf die reduzierte Anzahl an Exemplaren der einmonatigen Lagerung des Ökobeton 2 zu schließen.

Tabelle 10 Gegenüberstellung von Diffusionskoeffizienten und Gesamtporosität

Korrelation der Diffusionskoeffizienten mit der Porosität			
	Referenzbeton	Ökobeton 1	Ökobeton 2
CDF [m ² /s]	1,00E-11	8,50E-12	7,5E-12
Cl-Eindringung 1M [m ² /s]	1,06E-11	1,10E-11	3,90E-12
Cl-Eindringung 3M [m ² /s]	4,29E-12	4,77E-12	2,10E-12
Offene Porosität [%]	14,9	12,9	12,9
Ermittelte Faktoren aus der offenen Porosität und den Diffusionskoeffizienten			
CDF	1,49	1,52	1,72
Cl-Eindringung 1M	1,41	1,17	3,31
Cl-Eindringung 3M	3,47	2,7	6,14

Auf die Hochofenschlacke zurückkommend hat die zusätzliche Festigkeitsausbildung des Referenzbetons und des Ökobeton 2 über den Zeitraum von 28 auf 90 Tage einen positiven Effekt auf den Diffusionskoeffizienten gehabt.

Hinsichtlich des Vergleichs der Spaltzugfestigkeit mit dem Diffusionskoeffizienten konnten keine nennenswerte Abhängigkeit festgestellt werden.

Letztendlich konnten die Thesen Kapteinas [7] und Stark et als [6], das die Porosität und der Hüttensand einen Einfluss auf den Diffusionskoeffizienten haben, bewiesen werden. Jedoch sollte die zahlenmäßige Beurteilung der Effekte erst bei höheren Probenmengen und längeren Prüfzeiträumen in Betracht gezogen werden.

6 Fazit

Abschließend werden die gewonnenen Erkenntnisse in dieser Arbeit zum Thema der Kombinierbarkeit des CDF-Tests mit dem beschleunigten Chlorideindringungsverfahren und den dazugehörigen Aspekten resümiert.

Anhand des Vergleiches zweier Ökobetonrezepturen (außerhalb aktueller Normvorschriften) mit der eines B5 Betons nach gültiger ÖNORM (Referenzbeton) wurden eine Reihe von Versuchen durchgeführt. In diesem Zusammenhang stand die Leistungsfähigkeit der Ökobetonarten in den Kategorien Frost-Tausalzbeständigkeit und Chlorideindringverhalten im Fokus. Die Frosttauzyklen des CDF-Tests überstand der Ökobeton 1 mit 27% und der Ökobeton 2 mit 37% weniger Abwitterungsmassen als der Referenzbeton, außerdem zeigen sie niedrigere Chloridkonzentrationen in den Bohrmehl- und Mikrosondenanalysen. Auch bezüglich der reinen Chloridbelastung des beschleunigten Chlorideindringversuches wiesen beide Ökobetone 5-25% niedrigere Cl-Konzentrationen in den analysierten Tiefenstufen als der Referenzbeton auf, vor allem der Ökobeton 2 mit dem Hüttensandanteil.

Während der gesamten Versuchsdauer beider Verfahren (CDF-Test und Chlorideindringungsverfahren) wurden unterschiedliche Methoden zur Beurteilung der Betonsorten untersucht, deren Erkenntnisse für zukünftige Projekte hilfreich sind. Das Modell der Kurzzeitdiffusion von

Park et al [1] sah für die Kombinierbarkeit beider Prüfverfahren sehr viel versprechend aus, doch konnten keine relevanten Rückschlüsse auf ein Eindringverhalten gezogen werden, da die Aufnahme von Chlorid-Ionen und damit die Chlorid-Ionenreduktion in der Lösung nicht annähernd so hoch ausfiel, wie es in der Literatur [1] beschrieben war. Durchaus konnten bei der reinen Chlorideindringung durch Chloridprofilerstellung aus den Analysen der Bohrmehlproben Parallelen zum CDF-Test gezogen werden. Während bei den 1 Monate in der 3 %igen NaCl-Lösung gelagerten Proben im Vergleich zu den CDF-Proben niedrigere Konzentrationen in den Chloridprofilen abzulesen waren, fallen die Cl-Konzentrationen der drei Monate in der Lösung gelagerten Proben zu den CDF-Proben annähernd gleich aus. Im Gegensatz zu den gleichen Profilen des letztgenannten Vergleichs sind die Diffusionskoeffizienten aus dem CDF-Test wesentlich höher als die aus dem Nordtest 443 mit der 3 monatigen Lagerung. Aus dieser Beobachtung ist zu schließen, dass mit unterschiedlichen Mechanismen (Eislinsenpumpe und Rissbildung beim CDF-Test, Altersunterschiede der Proben bedingt durch die längere Diffusionsdauer bei der Chlorideindringung) die ähnlich hohen Chloridkonzentrationen der drei-monatigen Lagerung und des CDF-Tests zustandekommen müssen.

Bei langer Zeitdauer (> 6 Monate) geht die Chloriddiffusion auf einen quasi-stationären Zustand (dynamisches Gleichgewicht) zu, bei dem die maximale Eindringtiefe erreicht ist und der Diffusionskoeffizient sich nicht weiter verringert, wie in Kapitel 2.1.2 beschrieben.

Die aussagekräftigsten Ergebnisse aus der großen Anzahl an Analysemethoden konnten aus den Chloridprofilen des Bohrmehlentnahmeverfahrens und der Mikrosondenanalyse gewonnen werden. Das Besprühen mit Silbernitrat gab in Kombination mit den untersuchten Chloridprofilen der Bohrmehlproben Aufschluss über die Chloridkonzentration der Farbumschlagsgrenzen (Color change boundary). Der erwähnte Grenzwert von Chlorid-Ionen lag im Mittel bei 0,085 M% bzw. 0,1 M% für den Referenzbeton, 0,08 M% für den Ökobeton 1 und 0,072 M% für den Ökobeton 2. Jedoch konnten keine höheren Eindringtiefen der besprühten Proben mit längerer Lagerung gegenüber der kurzen Lagerung festgestellt werden. Die Konzentration an der Farbumschlagsgrenze (Color change boundary) ist Rezepturabhängig, wie in den Tabellen 4 und 7 ersichtlich ist.

Für zukünftige Projekte wird die Chloridprofilanalyse nach dem Bohrmehlentnahmeverfahren mit mehreren Tiefenstufen empfohlen, die zwar in der Ausführung eine hohes Maß an Genauigkeit fordert, jedoch weniger Spielraum bei der Interpretation der Ergebnisse lässt, wie es bei der Mikrosondenanalyse an einzelnen Proben der Fall ist.

In dieser Studie konnte aus den Erkenntnissen der Literaturrecherche ein für die Prüfmethoden passendes Modell zur Berechnung der Diffusionskoeffizienten gewählt und in ein anwenderfreundliches Programm umgesetzt werden. Mit dem Excel-Programm war es möglich differenzierte Aussagen zu der Vergleichbarkeit der CDF-Testproben mit den beschleunigten Chlorideindringproben zu geben.

In all den unterschiedlichen praktischen Prüfmethoden zeichnete sich trotz der geringen Anzahl an untersuchten Proben und der Teils hohen Streuung ein sehr deutlicher Trend ab: Der Ökobeton 1 und besonders der Ökobeton 2 mit seinen Hüttensandanteilen boten gegenüber dem Referenzbeton einen erhöhten Chlorideindringwiderstand sowie eine höhere Frost-Tausalzbeständigkeit. Dieser Trend hinsichtlich der Chlorideindringung kann beim CDF-Test und beim Nordtest 443 gesehen werden.

7 Literaturverzeichnis

- [1] B. Park, S. Y. Jang, J.-Y. Cho und J. Y. Kim, „A novel short-term immersion test to determine the chloride ion diffusion coefficient of cementitious materials,“ *Construction and Building Materials*, Bd. 57, pp. 169-179, 2014.
- [2] L. Leiva, „www.nzz.ch,“ 23. Februar 2011. [Online]. Available: <http://www.nzz.ch/auf-dem-weg-zu-klimafreundlichem-beton-1.9649469>. [Zugriff am 5. Februar 2016].
- [3] Vereinigung der österreichischen Zementindustrie, „Zement im Bild Nachhaltigkeitsbericht 2012 der österreichischen Zementindustrie,“ Wien, 2012.
- [4] *ÖNORM EN 206 - Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2014.
- [5] R. Breitenbücher, „Die neue EN 206 - Auswirkungen auf die Anwendung in Deutschland,“ *beton*, Bd. 64, pp. 68-71, März 2014.
- [6] J. Stark und B. Wicht, *Dauerhaftigkeit von Beton*, Berlin Heidelberg: Springer Verlag, 2013.
- [7] G. Kapteina, *Modell zu Beschreibung des Eindringens von Chlorid in Beton von Verkehrsbauwerken*, München: IWT & Universität Gent, 2011.
- [8] „Wikipedia,“ Wikimedia, 23 11 2015. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Kapillarit%C3%A4t>. [Zugriff am 24 11 2015].
- [9] „Wikipedia,“ Wikimedia, 30 10 2015. [Online]. Available: <https://de.wikipedia.org/wiki/Diffusion>. [Zugriff am 25 11 2015].
- [10] P. Spiesz, M. M. Ballari und H. Brouwers, „RCM: A new model accounting for the non-linear chloride binding isotherm and the non-equilibrium conditions between the free- and bound-chloride concentrations,“ *Construction and Building Materials*, Bd. 27, pp. 293-304, 2012.
- [11] P. Spiesz und H. Brouwers, „Influence of the applied voltage on the Rapid Chloride Migration (RCM) test“.
- [12] M. J. Setzer, „Mikroislinsenbildung und Frostscha-den,“ in *Werkstoffe im Bauwesen*, Stuttgart, R. Elighausen, 1999, p. 16.
- [13] M. J. Setzer, „Die Mikroislinsenpumpe - Eine neue Sicht bei Frostangriff und Frostpruefung,“ *ibausil 14. Internationale Baustofftagung 20.-23. September 2000*, Bd. 1, Nr. 14, p. 15, 2000.
- [14] M. J. Setzer, G. Fagerlund und D. J. Janssen, „CDF-Test - Prüfverfahren des Frost-Tau-Widerstands von Beton - Prüfung mit Taumittel-Lösung (CDF),“ *Materials and Structures*, Bd. 29, Nr. 193, pp. 523-528, 1996.
- [15] *NT Build 492 Concrete, Mortar and Cement-based Repair Materials: Chloride migration coefficient from non-steady-state migration experiments*, Espoo: NORDTEST, 1999.

- [16] *NT Build 443 Concrete, Hardened: Accelerated Chloride Penetration*, Espoo: NORDTEST, 1995.
- [17] J. Weiß, *Ionenchromatographie*, 3rd Edition Hrsg., Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH, 2001.
- [18] S. J. B. Reed, *Electron Microprobe Analysis and Scanning Electron Microscopy in Geology*, 2nd Edition Hrsg., Cambridge: Cambridge University Press, 2005.
- [19] BAW, *Merkblatt Frostprüfung von Beton (MFB)*, Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, 2012.
- [20] Y. S. Choi und E. I. Yang, „Effect of calcium leaching on the pore structure, strength, and chloride penetration resistance in concrete specimens,“ *Nuclear Engineering and Design*, Bd. 259, pp. 126-136, 2013.
- [21] H. G. Smolczyk, „Flüssigkeit in den Poren des Betons - Zusammensetzung und Transportvorgänge in der flüssigen Phase des Zementsteins,“ *Beton-Inform*, Bd. 24, Nr. 1, pp. 3-10, 1984.
- [22] K. Kernbichler, H. Geymayer und J. Tritthart, „Kurzberichte über Verfahren mit Schwingungsuntersuchungen und sonstige Verfahren zur Zerstörungsfreien Prüfung von Beton und Bewehrung,“ *Straßenforschung*, Nr. 312, pp. 130-132, 1987.
- [23] F. Weise, B. Maier und K. Ehrig, „Analyse der durch Frost- und Frost-Tausalz-Wechsel induzierten Schädigungsprozesse in Beton,“ *Beton und Stahlbetonbau*, Bd. 107, Nr. 12, pp. 816-823, 2012.
- [24] M. Maes, *Combined Effects of Chlorides and Sulphates on Cracked and Self-Healing Concrete in Marine Environments*, Gent: Universiteit Gent, 2015, p. 291.
- [25] J. Tritthart, „Bestimmung des Chlorids (Cl) in Beton, Einpressmörtel von Spanngliedern und sonstigen mineralischen Stoffen,“ in *QM-PA PA CHA008-12/11*, Graz, 2011.
- [26] V. Bonacetti, H. Donza, V. Rahhal und E. Irassar, „Influence of initial curing on the properties of concrete containing limestone blended cement,“ *Cement and Concrete Research*, Bd. 30, pp. 703-708, 2000.
- [27] K. Stanish, R. Hooton und M. Thomas, „Testing the Chloride Penetration Resistance of Concrete: A Literature Review,“ Department of Civil Engineering University of Toronto, Toronto.
- [28] Z. Djuric, T. Göpfert, U. Guse, M. Haist, H. S. Müller, S. Plöger, M. Raupach, M. J. Setzer, F. Tauscher, A. Westendarp und U. Wiens, *Symposium Dauerhafter Beton – Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung*, Karlsruhe: Universität Karlsruhe, 2009.
- [29] J. Juhart, G. A. David, C. Nickel, G. Fischer, F. Mittermayr und P. Maydl, *Durable Eco-concrete in Austria: Materials and Mix Design Methods*, Graz: VÖB; FFG, 2014.
- [30] M. Colleparidi, A. Marcialis und R. Turriziani, „Penetration of Chloride Ions into Cement Pastes and Concretes,“ *The American Ceramic Society*, Bd. 55, pp. 534-535, 10. Oktober 1972.

- [31] J. Juhart, G. A. David, C. Nickel, G. Fischer und F. Mittermayr, „Ökologisch optimierter Beton: Stoffauswahl und Methoden der Rezepturenentwicklung,“ *Tagungsband des 2. Grazer Betonkolloquiums*, Bd. 2, pp. 9-24, 25. September 2014.
- [32] *ÖNORM EN 13396 - Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren Messung des Eindringens von Chloridionen*, Wien: Österreichische Normungsinstitut, 2004.
- [33] *ÖNORM EN 14629 - Produkte und Systeme für den Schutz und die Instandsetzung von Betontragwerken - Prüfverfahren - Bestimmung des Chloridgehaltes von Festbeton*, Wien: Österreichisches Normungsinstitut, 2006.
- [34] X. Shi, F. Laura, M. M. Peterson und Z. Yang, „Freeze–thaw damage and chemical change of a portland cement concrete in the presence of diluted deicers,“ *Materials and Structures*, Bd. 43, pp. 933-946, 25. Oktober 2009.

8 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1 Schema der Eislinsepumpe [12].....	6
Abbildung 2 Hystereseurve einer Eislinsebildung [12]	6
Abbildung 3 Schematische Darstellung eines normierten Behälters mit Chloridlösung [14]....	8
Abbildung 4 Schematische Darstellung einer Kühltruhe mit Proben [14].....	8
Abbildung 5: Schematische Darstellung eines RCM Prüfaufbaus [15]	11
Abbildung 6 Prüfaufbau STIT [1]	12
Abbildung 7 Schematischer Aufbau eines Ionenchromatografen [17]	14
Abbildung 8 Vergrößerte Darstellung der Injektion als Schleifenaufbau [17].....	14
Abbildung 9 Auswertung von sieben anorganischen Anionen [17]	15
Abbildung 10 Schnitt durch Wehnelt, „Wolframhaarnadel“ und Anode [18].....	16
Abbildung 11 Schematische Darstellung des Glühfadens auf einem Isolator mit darunterliegender Kathode [18].....	16
Abbildung 12 Platzsparende Linse einer Mikrosonde	17
Abbildung 13 Unterscheidung von Secondary Electrons und Backscattered Electrons	19
Abbildung 14 Röntgenspektrenunterscheidung	19
Abbildung 15 Geschaltete Probenoberfläche eines CDF-Test-Würfels mit einer Seitenlänge von 150 mm und seitlich aufgeklebten Alu-Butyband	23
Abbildung 16 Geschnittene Probenoberfläche eines Chlorideindringungstest-Würfels mit einer Seitenlänge von 150 mm und noch ohne Butylklebeband	24
Abbildung 17 Geschnittene Probenoberfläche eines Diffusionswürfels des späteren Chlorideindringungstests mit kleineren Boxen und der im Bild ersichtlichen Silikonabdichtung	24
Abbildung 18 CDF-Proben in der Kältekammer	26
Abbildung 19 Neuer verbesserter Chlorideindringungstest mit kleineren Boxen auf den großen Boxen des ersten Chlorideindringungstest.....	28
Abbildung 20 Bohrmehlentnahmeprofil mit konischem Bohrkopf.....	29
Abbildung 21 Bohrvorrichtung zur Entnahme des Bohrmehls, Indikatorring mit Winkel ermöglichen präzise Bohrstufeneinstellungen.....	31
Abbildung 22 Silbernitrat appliziert auf einer gespaltenen Oberfläche, chlorid-ionenbeeinflusste Stellen sind hell/gräulich dargestellt	31

Abbildung 23 Aufnahme eines Teilbereichs eines Dünnschliffpräparats unter 40x Vergrößerung mit einer Seitenlänge von 40 x 20 mm	32
Abbildung 24 Leitfähigkeit der Lösungen B5	38
Abbildung 25 Mittelwerte der Leitfähigkeit der Probenreihen	39
Abbildung 26 Akkumulierte Mittelwerte der Abwitterungsmassen pro FTW	40
Abbildung 27 Mittlere Eindringtiefe von Chlorid des Referenzbetons und der beiden Ökobetone nach 28 Frost-Tauzyklen	41
Abbildung 28 Chlorid-Ionenkonzentration der Lösung des Referenzbetons B5 (CDF-Test)..	42
Abbildung 29 Natriumkonzentration der Lösung des Referenzbetons B5 (CDF-Test).....	43
Abbildung 30 Natrium- und Chlorid-Ionenkonzentration in der Lösung.....	44
Abbildung 31 Chlorid-Ionenkonzentration der Lösung nach den Frost-Tauwechsel aller B5 Proben	45
Abbildung 32 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe der CDF B5 Proben	46
Abbildung 33 Curve Fitting der Referenzbetonreihe mit Colorchangeboundary (CDF-Test) .	47
Abbildung 34 Curve Fitting der Ökobeton 1 Reihe mit Colorchangeboundary (CDF-Test)....	47
Abbildung 35 Curve Fitting der Ökobeton 2 Reihe mit Colorchangeboundary (CDF-Test)....	48
Abbildung 36 Mikrosondenaufnahme des Referenzbetons (von der Probe E108 CDF2)	49
Abbildung 37 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe des Referenzbetons (CDF)....	50
Abbildung 38 Mikrosondenaufnahme des Ökobetons 1 (E109 CDF4)	51
Abbildung 39 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe des Ökobetons 1 (CDF).....	52
Abbildung 40 Mikrosondenaufnahme des Ökobetons 2 (E110 CDF1)	52
Abbildung 41 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe des Ökobetons 2 (CDF).....	53
Abbildung 42 Leitfähigkeit der Lösungen in den großen Boxen über den Zeitraum von drei Wochen	54
Abbildung 43 Chlorideindringtiefen dargestellt mit Silbernitratlösung	56
Abbildung 44 Chlorid-Ionenkonzentration der Lösung	57
Abbildung 45 Natrium- und Chlorid-Ionenkonzentration in der Lösung.....	58
Abbildung 46 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe für die ein (1M) und drei (3M) monatigen Proben	59
Abbildung 47 Curve Fitting der Referenzbetonreihe nach einem (1M) und drei (3M) Monaten Lagerung in der Lösung mit Colorchangeboundary (beschleunigte Chlorideindringung)	60
Abbildung 48 Curve Fitting der Ökobeton 1-Reihe nach einem (1M) und drei (3M) Monaten Lagerung in der Lösung mit Colorchangeboundary (beschleunigte Chlorideindringung)	61

Abbildung 49 Curve Fitting der Ökobeton 2-Reihe nach einem (1M) und drei (3M) Monaten Lagerung in der Lösung mit Colorchangeboundary (beschleunigte Chlorideindringung)	62
Abbildung 50 Mikrosondenaufnahme des Referenzbetons nach einmonatiger Lagerung (Probe E108_1).....	63
Abbildung 51 Mikrosondenaufnahme des Referenzbetons nach dreimonatiger Lagerung (Probe E108_4).....	64
Abbildung 52 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe des Referenzbetons	64
Abbildung 53 Mikrosondenaufnahme des Ökobeton 1 nach einmonatiger Lagerung (Probe E111_1).....	65
Abbildung 54 Mikrosondenaufnahme des Ökobeton 1 nach dreimonatiger Lagerung (Probe E111_4).....	66
Abbildung 55 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe des Ökobetons 1	66
Abbildung 56 Mikrosondenaufnahme des Ökobeton 2 nach einmonatiger Lagerung (Probe E112_1).....	67
Abbildung 57 Mikrosondenaufnahme des Ökobeton 2 nach dreimonatiger Lagerung (Probe E112_2).....	68
Abbildung 58 Chloridkonzentration in Abhängigkeit der Tiefe des Ökobetons 2	69
Abbildung 59 Vergleich der Eindringtiefenbestimmung zwischen beschleunigtem Chlorideindringungstest und der CDF-Prüfung.....	71
Abbildung 60 Vergleich des Chloridkonzentrationsverlauf zwischen Bohrmehl und Mikrosondenanalyse des Referenzbetons der CDF-Reihe; Abkürzungen: M = Mikrosonde, B = Bohrmehl.....	73
Abbildung 61 Vergleich des Chloridkonzentrationsverlauf zwischen Bohrmehl und Mikrosondenanalyse des Ökobeton 1 der CDF-Reihe; Abkürzungen: M = Mikrosonde, B = Bohrmehl.....	74
Abbildung 62 Vergleich des Chloridkonzentrationsverlauf zwischen Bohrmehl und Mikrosondenanalyse des Ökobeton 2 der CDF-Reihe; Abkürzungen: M = Mikrosonde, B = Bohrmehl.....	74
Abbildung 63 Vergleich des Chloridkonzentrationsverlauf zwischen Bohrmehl und Mikrosondenanalyse des Referenzbetons der beschleunigten Chlorideindringungsreihe; Abkürzungen: M = Mikrosonde, B = Bohrmehl.....	75
Abbildung 64 Vergleich des Chloridkonzentrationsverlauf zwischen Bohrmehl und Mikrosondenanalyse des Ökobeton 1 der beschleunigten Chlorideindringungsreihe; Abkürzungen: M = Mikrosonde, B = Bohrmehl.....	76
Abbildung 65 Vergleich des Chloridkonzentrationsverlauf zwischen Bohrmehl und Mikrosondenanalyse des Ökobeton 2 der beschleunigten Chlorideindringungsreihe; Abkürzungen: M = Mikrosonde, B = Bohrmehl.....	77

Abbildung 66 Chloridkonzentrationen für CDF- und beschleunigten Chlorideindringungstests nach drei Monaten Lagerung; D = beschleunigte Chlorideindringung, CDF = CDF-Test78

Abbildung 67 Chloridkonzentrationen für CDF- und beschleunigten Chlorideindringungstests nach einem Monat Lagerung; D = beschleunigte Chlorideindringung, CDF = CDF-Test 79

Abbildung 68 Vergleich der Spaltzugfestigkeiten82

9 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1 Eigenschaften der B5 Betone	21
Tabelle 2 Eigenschaften der B2 Betonsorten	22
Tabelle 3 Mittlere Spaltzugfestigkeit der Probenreihen (E108, E109, E110) nach 28 Frost-Tauzyklen	40
Tabelle 4 Farbumschlagsgrenzwerte der Chloridkonzentration der CDF-Proben.....	42
Tabelle 5 Diffusionskoeffizienten der CDF-Versuche der Reihen Referenz, Öko 1 und Öko 2	48
Tabelle 6 Spaltzugfestigkeit der Probenwürfel nach ein und drei monatiger Lagerung	55
Tabelle 7 Farbumschlagsgrenzwerte der Chloridkonzentration für den beschleunigten Chlorideindringtest	56
Tabelle 8 Diffusionskoeffizienten der beschleunigten Chlorideindringversuche der Reihen Referenz, Öko 1 und Öko 2.....	62
Tabelle 9 Vergleich der Chloriddiffusionskoeffizienten des CDF-Versuchs mit denen des beschleunigten Chlorideindringungsverfahrens	80
Tabelle 10 Gegenüberstellung von Diffusionskoeffizienten und Gesamtporosität	83

10 Anhang

Alle Berechnungen und Prüfungsprotokolle sind in digitaler Form eingereicht.

