

Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositionsklasse XF2

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 56

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font with a white outline. The letters are slightly irregular, giving it a modern, dynamic feel. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositionsklasse XF2

von

Max J. Setzer
Hans-Joachim Keck
Susanne Palecki

Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft (IBPM)
Universität Duisburg-Essen

Peter Schießl
Christian Brandes

MPA Bau, Centrum für Baustoffe und Materialprüfung (cbm)
Technische Universität München

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 56

bast

Die Bundesanstalt für Straßenwesen veröffentlicht ihre Arbeits- und Forschungsergebnisse in der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen**. Die Reihe besteht aus folgenden Unterreihen:

A - Allgemeines
B - Brücken- und Ingenieurbau
F - Fahrzeugtechnik
M- Mensch und Sicherheit
S - Straßenbau
V - Verkehrstechnik

Es wird darauf hingewiesen, dass die unter dem Namen der Verfasser veröffentlichten Berichte nicht in jedem Fall die Ansicht des Herausgebers wiedergeben.

Nachdruck und photomechanische Wiedergabe, auch auszugsweise, nur mit Genehmigung der Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Die Hefte der Schriftenreihe **Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen** können direkt beim Wirtschaftsverlag NW, Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bgm.-Smidt-Str. 74-76, D-27568 Bremerhaven, Telefon (04 71) 9 45 44 - 0, bezogen werden.

Über die Forschungsergebnisse und ihre Veröffentlichungen wird in Kurzform im Informationsdienst **BAST-Info** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Referat Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.367/2002/DRB
Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositionsklasse XF2

Projektbetreuung
Franka Tauscher

Herausgeber

Bundesanstalt für Straßenwesen
Brüderstraße 53, D-51427 Bergisch Gladbach
Telefon: (0 22 04) 43 - 0
Telefax: (0 22 04) 43 - 674

Redaktion

Referat Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10, D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-86509-706-4

Bergisch Gladbach, Juli 2007

Kurzfassung – Abstract

Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositionsklasse XF2

Ziel des Vorhabens war es, ausgehend von dem für XF4-Betone anerkannten CDF-Prüfverfahren ein Laborprüfverfahren zu entwickeln, das einen abgeschwächten Frost-Tausalzangriff gemäß XF2-Exposition erzeugt und eine Beurteilung des Frost-Tausalz widerstandes bei mäßiger Sättigung zulässt.

Die am IBPM der Universität Duisburg-Essen durchgeführten Laborergebnisse verdeutlichen, dass eine Beurteilung des Widerstandes gegenüber einer XF2-Exposition über die Einstellung eines mäßigeren Feuchtegehaltes bzw. Sättigungsgrades nicht eindeutig möglich ist. Dagegen ergab die Kombination der drei Prüfparameter - Minimaltemperatur -10°C , 3%ige NaCl-Lösung und 14 FTW Prüfdauer - eine geeignete Abschwächung des CDF-Prüfverfahrens auf die Erfordernisse von XF2-Mischungen. Aufgrund der geringen Datenmenge ließ sich jedoch noch kein allgemein gültiger Grenzwert als Abnahmekriterium festlegen.

Im Rahmen der Untersuchungen am cbm der TU München wurden Betone, die aufgrund ihrer Zusammensetzung für die Klassen XF4 und XF2 bzw. für geringere Klassen als XF2 geeignet sind, sowohl durch Untersuchungen im Labor als auch durch Auslagerungsversuche beurteilt. Anhand der durch Auslagerung ermittelten Feuchtedaten wird deutlich, dass die Schädigung über die verschiedenen Winterperioden kumulativ zu sehen ist und nicht aus einer zunehmenden Sättigung des gesamten Probekörpers über mehrere Winter hinweg resultiert. Die Schädigung ist die Folge einer lokalen Übersättigung der äußersten Randzone, die jedoch weder durch Wägung des gesamten Probekörpers noch durch Messungen mit der Multiringelektrode erfassen werden konnte. Die Aufsättigung des Zementsteingefüges erfolgt bei Außenbauteilen aufgrund sich ändernder thermischer Randbedingungen und des damit verbundenen dynamischen Prozesses scheinbar in einer geringeren Schichtdicke als beim CDF-Verfahren. Folglich entstehen in der Praxis trotz vergleichbarer Anzahl an Frost-Tau-Wechseln geringere Schädigungen.

Unabhängig davon erwies sich die Korrelation der Schädigung im Labortest und in der Praxis als sehr gut. Der modifizierte CDF-Test mit einer reduzierten Prüfdauer von 14 Frost-Tau-Wechseln und einer Minimaltemperatur von -10°C spiegelt das Verhalten von XF2 Betonen praxisgerecht wieder.

Development of a test procedure for concrete according to XF2-exposition

The aim of this project was to develop a laboratory test procedure for XF4-concrete based on the accepted CDF-test procedure which produces a reduced frost-thaw attack according to XF-2 exposition and an assessment of the frost-thaw-resistance at a moderate saturation.

The laboratory results achieved at the IBPM, university Duisburg-Essen show that an evaluation of the resistance compared to the XF2-exposition by means of the calibration of a moderate moisture i.e. saturation is not clearly possible. However, the combination of three test parameter – minimal temperature -10°C , 3% NaCl-solution and 14 days frost-thaw-cycles resulted in an appropriate mitigation of the CDF-test procedure with the regard to the demand of XF-2 mixtures. On the basis of a minor amount of data no general boundary value could be determined as acceptance criteria.

In line with the tests at the cbm of the Technical University Munich concrete were tested which were suitable on the basis of their consistency for the specification XF4 and XF2

i.e. and for minor specifications such as XF2 both by laboratory or by field tests. Moisture data which were obtained by field tests show that the damage during various winter periods is cumulative which does not result in an increasing saturation of the whole specimen over several winter periods. The damage is a result of a local oversaturation of the outermost peripheral zone which could not be recorded neither by weighting of the whole specimen nor by measuring with the multi-ring-electrode. The saturation of the hardened cement paste structure occurs at outer constructional elements due to changing thermal boundary conditions and its dynamic process obviously in a smaller layer thickness than at the CDF-process. Consequently smaller damage occurs in practice despite a comparable number of frost-thaw-cycles.

Despite that the correlation of damage under laboratory test conditions and in practice proved to be very good. The modified CDF-test reflects the behaviour of XF2 concrete in practice with a reduced test duration of 14 frost-thaw-changes and a minimum temperature of -10°C .

Vorwort

Mit der europäischen Betonnorm EN 206-1 wurden erstmalig Klassen eingeführt, mit denen die Umgebungsbedingungen von Bauwerksbeton beschrieben werden. Die spezifische Beanspruchung des Betons wird als Expositionsklasse ausgedrückt, aus der differenzierte Anforderungen an die Dauerhaftigkeit abgeleitet werden. Für Frost-Wechsel-Beanspruchung der Bauwerke an Bundesfernstraßen treffen die Expositionsklassen Frost-Tauwechsel mit Tausalzeinwirkung bei mäßiger Wassersättigung (XF2) und Frost-Tauwechsel mit Tausalzeinwirkung bei hoher Wassersättigung (XF4) zu. Welche Wassersättigung die Expositionsklasse XF2 von der Expositionsklasse XF4 trennt, war jedoch nicht bekannt. Auch gab es bisher nur Prüfverfahren, mit denen die Eignung einer Betonzusammensetzung für XF4 überprüft werden kann.

Mit dem vorliegenden Forschungsvorhaben wurde ein Laborprüfverfahren entwickelt, das eine Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton für Bauwerke an Bundesfernstraßen bei mäßiger Wassersättigung (XF2) zulässt. Die Eignung des neuen Laborprüfverfahrens wurde durch Untersuchungen an Betonen unter realen Beanspruchungen (Auslagerungsversuche) überprüft.

Zur Bestätigung der vorgeschlagenen Bewertung von Betonen mit dem „modifizierten CDF-Verfahren XF2“ und zur Trennschärfe des Verfahrens sind allerdings noch weitere, über die Versuche im vorliegenden Forschungsvorhaben hinausgehende Untersuchungen erforderlich. Eine Übertragung der Präzisionsdaten des bekannten CDF-Tests auf das neu entwickelte Prüfverfahren ist möglich, da bis auf die Minimaltemperatur die Randbedingungen gleich gehalten werden.

Ergänzend zum vorliegenden Bericht werden im Rahmen von weiteren, zur Zeit noch nicht abgeschlossenen Forschungsvorhaben, Daten zum Mikroklima im Beton von Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen ermittelt, die unter Verkehr stehen. Durch kontinuierliche Messungen werden Temperatur- und Feuchteverteilung im Bauwerksbeton bis zu ca. 50 mm Tiefe bestimmt. Mit den Ergebnissen aus diesen Forschungsprojekten soll die tatsächliche Beanspruchung von Bauwerksbeton an beispielhaft ausgewählten Bauteilen an Bundesfernstraßen während der Frostperiode beispielhaft erfasst werden.

Dr.-Ing. Franka Tauscher

Bundesanstalt für Straßenwesen

Inhaltsverzeichnis

1	Problemstellung und Zielsetzung	6
2	Einleitung.....	8
2.1	Allgemeines.....	8
3	Frost-Tausalz-Schäden in Labor und Praxis	10
4	Stand der Normung für Frost- und Frost-Tausalz-belastete Bauteile.....	13
4.1	Die Stoffnorm DIN 1045-2: 2001-07	13
4.2	Überprüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes im Labor.....	15
5	Simulation und Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz Angriffs.....	16
5.1	Grundlagen der Laborprüfung	16
5.2	Der CDF-/ CIF-Test	17
5.2.1	Prüfkriterien	17
5.2.2	Prüfablauf des CDF-/CIF-Testes	19
5.2.3	Auswertung im Rahmen des CDF-/CIF-Testes	21
6	Übersicht der Untersuchungen.....	22
7	Teil 1: Untersuchungen zur Modifizierung des Prüfverfahrens.....	23
7.1	Allgemeines.....	23
7.1.1	Zusammensetzung der Mischungen	25
7.1.2	Herstellung der Proben	26
7.1.3	Frischbetonprüfung	27
7.2	Frost-Tausalzprüfung – Variation der Rand- und Prüfbedingungen.....	28
7.2.1	Darstellung der Ergebnisse	28
7.2.2	Einfluss der Nachbehandlung	29
7.2.3	Einfluss der Vorsättigungsdauer	31
7.2.4	Einfluss der Wechsellagerung.....	33
7.2.5	Einfluss der Minimaltemperatur	43
7.2.6	Einfluss der Kombination NaCl-Konzentration und Minimaltemperatur.....	47
7.2.7	Einfluss der Betonrezeptur	50
7.3	Zusammenfassung.....	56
8	Teil 2: Praxisuntersuchungen im Vergleich zur Laborprüfung.....	62
8.1	Allgemeines.....	62
8.2	Untersuchte Betone.....	63
8.2.1	Zusammensetzung der Betone	63
8.2.2	Herstellung der Betone.....	64
8.3	Untersuchungen am Frischbeton	65
8.4	Herstellung der Probekörper und Untersuchungen am Festbeton.....	65
8.5	Untersuchungen am Festbeton	66
8.5.1	Frost-Tausalz-Widerstand nach einem modifizierten CDF-Verfahren.....	67
8.6	Auslagerung	67
8.6.1	Zuordnung der Betone zu den Auslagerungsstellen XF2 und XF4	67
8.6.2	Lagerung der Probekörper während der Auslagerung	68
8.6.3	Lage der Auslagerungsorte	70
8.6.4	Untersuchungen an den Probekörper während der Auslagerung	71
8.6.5	Untersuchungen an den Probekörper nach der Auslagerung	75
9	Ergebnisse der Praxis- und Laborversuche	76

9.1	Frischbetonuntersuchungen.....	76
9.2	Festbetonuntersuchungen.....	77
9.2.1	Druckfestigkeit.....	77
9.2.2	Luftporenkennwerte.....	78
9.2.3	Frost-Tausalz-Widerstand nach dem CDF-Verfahren.....	79
9.2.4	Frost-Tausalz-Widerstand nach dem modifizierten CDF-Verfahren.....	81
9.2.5	Zusammenfassung Laborprüfungen	83
9.3	Auslagerung	84
9.3.1	Charakterisierung der Auslagerungsstätten	84
9.3.2	Untersuchungen an den ausgelagerten Probekörpern.....	94
9.4	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	112
9.4.1	Allgemeines	112
9.4.2	Laboruntersuchungen	113
9.4.3	Zusammenfassung der Auslagerungsergebnisse	115
10	Fazit der Untersuchungen	118
11	Literatur	121

1 Problemstellung und Zielsetzung

Die Dauerhaftigkeit von Beton wird in den Normen zurzeit dadurch gesichert, dass Regeln für die Zusammensetzung, die Herstellung, den Einbau und die Nachbehandlung für bestimmte Umweltbelastungen – Expositionsklassen – festgelegt sind – Deskriptives Konzept. Die Basis dafür sind Praxiserfahrungen, die über Jahrzehnte erworben wurden, nicht zuletzt auch durch Schadensfälle, in denen die Regeln zu mild waren oder einzelne Vorgaben unplanmäßig überschritten wurden. Das deskriptive System deckt damit im Allgemeinen auch den Extremfall ab und sichert die Dauerhaftigkeit durch den Nachweis einer Eignung. Es ist naturgemäß auf diejenigen Methoden und Betonzusammensetzungen beschränkt, die durch Erfahrung gesichert sind.

Durch den zunehmenden Einsatz neuer Betonrezepturen und Baustoffe, für die in Deutschland bisher keine Langzeiterfahrungen vorliegen, ist der deskriptive Ansatz umso weniger anwendbar, je weiter die neue Entwicklung von der bisherigen Erfahrung abweicht. Ziel soll es daher in Zukunft sein, die Eignung einer Betonmischung bzw. deren Ausgangsstoffe nicht mehr anhand der Zusammensetzung zu beurteilen, sondern über die Prüfung der geforderten Eigenschaften, nach dem sogenannten Lab-Performance-Concept. Damit würde auch dem Einsatz neuer Baumaterialien entsprochen und eine breite, innovative Verwendung von Werkstoffen im Bauwesen ermöglicht. Erste Ansatzpunkte für ein derartiges Vorgehen sind im Anhang J der DIN 1045-2 skizziert.

Für ein Performance Konzept muss die Eignung des Werkstoffs in einer Prüfung nachgewiesen werden. Wie im deskriptiven Konzept muss auch hier gesichert sein, dass der Werkstoff bzw. das Bauteil auch im Extremfall besteht, dem das Bauteil ausgesetzt ist. In der derzeitigen Normung werden die unterschiedlichen möglichen Angriffe in ähnliche Kategorien, die so genannten Expositionsklassen, unterteilt.

Ein Prüfverfahren muss zwei Aufgaben lösen: (1) Der Angriff, der einer Expositionsklasse zugrunde gelegt ist, muss sicher simuliert werden und zwar zu einem möglichst frühen Zeitpunkt. (2) Das Verfahren muss verlässliche Ergebnisse erzeugen, die auch von der Prüfstelle und vom Prüfer so weit als möglich unabhängig sind, d. h. die Präzision muss nachgewiesen sein – gemäß heutigem Standard nach ISO 5725.

Das Prüfverfahren ist damit ein Werkzeug, das die Naturgesetze beachtet, die zum Schaden führen. Es definiert nicht die Einflussfaktoren der Praxis. Es bildet - ebenso wenig wie das Design Konzept - nur den zulässigen Extremfall ab. Beide Konzepte können in einer Prüfung auch nicht die gesamte Bandbreite der Belastungen in all ihren Details abdecken. Dazu sind im Design Konzept Langzeiterfahrungen und im Performance Konzept mehrere Versuche für Einzelfälle erforderlich.

Die Prüfung kann dazu dienen, die Einflussfaktoren zu analysieren, die zum Schaden führen. Mit einer geeigneten Datenbasis, sowohl der zu erwartenden Umweltbelastungen als auch dem Verhalten des Werkstoffs im Labor, ist dann eine vorsichtige Optimierung möglich. Das Langzeitverhalten des Werkstoffs muss selbstverständlich ebenfalls beachtet werden.

Die Naturgesetze, die beim Frost- und Frosttausalz-Angriff auf Beton wirken, greifen bis in die Gesetze der Nanostruktur dieses Werkstoffs und in die damit verbundene Oberflächenphysik und -chemie. Der Angriff selbst beruht auf einem hochgradig instationären Transport von Wärme und Wasser bzw. Taumittelösung. In der Prüfung müssen die dynamischen Verhältnisse im Bauteil auf die Probekörper im Labor mit signifikant unterschiedlicher Geometrie abgebildet werden (weitgehend ebenes Problem auf kleine Körper mit dreidimensionalen Grenzflächen).

Für den Angriff XF4 (starke Sättigung bei Taumittelangriff) konnte das CDF-Verfahren in einem umfangreichen Messprogramm mit über 100 verschiedenen Betonzusammensetzungen evaluiert werden, d.h. hier wurde die Konsistenz von Design und Performance Konzept nachgewiesen.

Auch für den Angriff XF3 (starke Sättigung mit Wasser) sind gute Korrelationen gegeben – bei etwas weniger breiter Datenbasis.

Der Angriff XF2 und noch stärker XF1 ist sehr viel „weicher“ in der Norm definiert. Hier bestand ein unmittelbarer Handlungsbedarf.

Sowohl die Theorie wie die Prüfergebnisse zeigen, dass ein wichtiger Faktor beim Frostangriff die Feuchteaufnahme des Betons ist und damit das Feuchteangebot, dem das Bauteil ausgesetzt ist. Die Normung unterscheidet daher bei der Expositionsklasse XF zwischen starker und mäßiger Sättigung. Besser wäre es, die Dauer bzw. die Zeiten zu unterscheiden, in denen ein kombinierter Angriff von Frosttaumittelwechsel und Wasser bzw. Taumittelösung vorliegt. Bei seltenen Ereignissen („mäßige Sättigung“ XF1 bzw. XF2) können die Anforderungen an den Werkstoff geringer bei gleicher geplanter Lebensdauer sein. Vor allem vertikale Flächen im Spritzwasserbereich sind hier betroffen.

Ziel dieses Forschungsvorhabens sollte es sein, ein Verfahren zu erarbeiten, das einen im Vergleich zum CDF-Test bzw. XF4-Exposition abgeschwächten Angriff darstellt und eine Einschätzung des Widerstandes gegen einen Frost-Tausalz-Angriff bei geringer Wassersättigung (bzw. nicht ständigem kombiniertem Angriff von Frost und Wasser bzw. Lösung) möglich macht. Dazu sollte die Übertragbarkeit des CDF-Testes auf eine XF2 Exposition analysiert und Maßnahmen zur Reduzierung des Schadensausmaßes getroffen werden. Zur Validierung des sogenannten modifizierten CDF-Testes sollten damit im Labor Betone geprüft werden, die das deskriptive Konzept erfüllen oder verletzen. Die Methodik von Praxisprüfungen sollte systematisiert

werden und die Ergebnisse mit den Laborergebnissen verglichen werden. Dazu wurden Betonprobekörper unter wohl dokumentierten Bedingungen unter realer Beanspruchung ausgelagert.

2 Einleitung

2.1 Allgemeines

Ein Prüfverfahren muss sowohl praxisrelevanten als auch labortechnischen Anforderungen gerecht werden, wozu die Verhältnisse im Labor möglichst äquivalent zur Praxis abgebildet werden müssen. Ein Laborprüfverfahren stellt natürlich eine Simulation unter Zeitraffer dar und sollte möglichst schnell ein aussagekräftiges Ergebnis liefern, auch wenn es eine Langzeiteigenschaft betrifft. Neben der Erfassung der Randbedingungen, wie sie unter realen Bedingungen vorliegen, muss ein Prüfverfahren selbstverständlich präzise und reproduzierbar sein. Ein Verfahren, das sich auf das Wesentliche mit einfachen Mitteln beschränkt, ist weniger fehleranfällig und auch kostengünstiger. Um die Anforderungen an die Zuverlässigkeit zu erreichen, sollte sich eine Prüfmethode auf klar definierte Fälle beschränken. Damit stellt es immer einen Kompromiss dar, da nicht die gesamte Bandbreite der realen Umweltbedingungen im Labor abgebildet werden kann. Es hat sich gezeigt, dass man ein Prüfverfahren zum Frost- bzw. Frosttausalz widerstand entwerfen kann, dessen Präzision im Wesentlichen durch die Materialstreuung begrenzt wird und das die Praxis wiedergibt, wenn auch in der Regel den ungünstigsten Fall, d.h. starke Durchfeuchtung gemäß XF3, XF4 Exposition, wie es beim CDF/ CIF-Test gehandhabt wird. Dies setzt voraus, dass die Naturgesetze beachtet und umgesetzt werden, die bei einem Frosttauangriff unter realen Bedingungen wirken.

Bei einem Frosttauwechselangriff beobachtet man zwei Phänomene, die im Labor korrekt erfasst werden müssen:

- (1) Mit jedem Wechsel wird von der Betonoberfläche Wasser eingesaugt (Frostpumpe).
- (2) Wenn dadurch ein kritischer Sättigungsgrad überschritten wird, wird der Beton geschädigt.

Neben der Gefrierdehnung des Eises ist vor allem die Wechselwirkung mit Taumitteln von Bedeutung. Dies führt zu äußerer und innerer Schädigung. Betone unterscheiden sich sowohl in der Frostsauggeschwindigkeit als auch in der Schadensanfälligkeit deutlich. Daher muss beides für eine Lebensdauerprognose erfasst werden, sowohl bei mäßiger als auch bei starker Durchfeuchtung.

Ein derartiges Prüfverfahren muss die Fähigkeit der Betonrezeptur und deren Ausgangsstoffe unter der geforderten Exposition nachweisen. Dabei beeinflussen Fakto-

ren wie die Betonrezeptur, die Hydratationsbedingungen (Temperatur, Nachbehandlungsdauer, Hydratationsgrad etc.), mögliche Vorschädigungen (z.B. Mikrorisse verursacht durch Temperaturspannungen), sowie die Qualität der Randzone (z.B. Mörtelanreicherung bei Straßenbetonen) den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton signifikant. In Abbildung 1 ist beispielhaft das Zusammenspiel der Einflussfaktoren auf die Laborprüfung sowie das reale Bauteil dargestellt. Auf Seite der Exposition sind als Variationen das Feuchte- und Salzpotential sowie die Temperatur zu nennen. Diese können auch durch Mikroklimata an einzelnen Bauteilen deutlich unterschiedliche Angriffsstärken hervorrufen (z.B. Süd- und Nordseite, Abstand des Pfeilers von der Fahrbahn, vgl. [23]). Selbstverständlich stellt erst die Kombination aus Einwirkung (Exposition) und dem tatsächlichen Frost-Tausalz-Widerstand an der beanspruchten Stelle die Schadenswahrscheinlichkeit dar und resultiert damit dann in dem tatsächlichen Schadensausmaß.

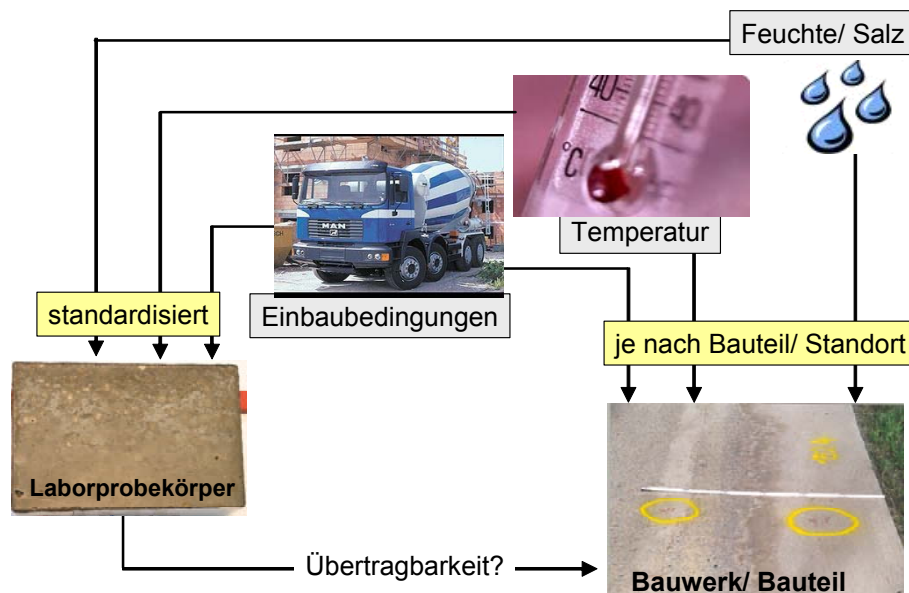


Abbildung 1: Einflüsse auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton

Zur Eignung einer Betonrezeptur für den Einsatz unter einer Frost-Tausalzeinwirkung wird gemäß Normung bisher der deskriptive Ansatz gewählt. Dieser beurteilt allein anhand der Zusammensetzung den Widerstand eines Bauteils gegenüber dem entsprechenden Angriff. Dies heißt, dass abweichend von der Betrachtung für den Bereich der Tragfähigkeits- und Gebrauchstauglichkeitsnachweise für den Bereich der Dauerhaftigkeit Anforderungen an die Zusammensetzung und nicht an die tatsächlichen Eigenschaften des Betons gestellt werden. Diese sind zumeist an Erfahrungen, die in der Praxis gemacht worden sind, angelehnt. Für einen Frost-Tausalz-Angriff werden so u.a. der w/z-Wert zur Minimierung der Kapillarporosität begrenzt und die Verwendung von Luftporenbildnern zur Unterbrechung der Wasseraufnahme und zur Erzeugung von Ausdehnungsbereichen vorgeschrieben. Des Weiteren ist die Auswahl der Ausgangsstoffe eingeschränkt. So müssen Zuschläge den Nachweis

der Tauglichkeit im Rahmen einer Laborprüfung erbringen. Bei den Bindemitteln existiert eine Positivliste aus bekannten Bindemitteln und Bindemittelkombinationen. So wird zum Beispiel die Verwendung von hoch hüttensandhaltigen Zementen oder die Anrechenbarkeit von Flugasche teilweise ausgeschlossen.

Ein derartiges Vorgehen erschwert den Einsatz innovativer und neuer Baustoffe. Auf der einen Seite werden für diese Baustoffe langjährige Erfahrungen erwartet, auf der anderen Seite ist ein Einsatz über Zulassungen im Einzelfall oder allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen und damit die Möglichkeit, Erfahrungen zu sammeln, nur bedingt möglich.

Im Rahmen der aktuellen europäischen Norm wurde im Anhang J der DIN 1045 erstmals auch für die Dauerhaftigkeit von Beton die Möglichkeit geschaffen, über den Nachweis der „Gleichwertigkeit“ neuer Betone im Vergleich zu bekannten Betonen diese einzusetzen. Ein Nachweis der Gleichwertigkeit kann hierbei durch anerkannte Prüfverfahren erfolgen, die die maßgeblichen Mechanismen abbilden.

Für eine XF3/ XF4 Exposition, d.h. für die Eignung von Betonrezepturen und deren Ausgangsstoffen unter dieser Belastung hat sich die Prüfung mittels CDF-/ CIF-Test bewährt. Die Prüfverfahren liegen als international veröffentlichte RILEM Recommendation vor [42]. Der CDF-Test ist im Teil 9 der EN 12390 als Alternativverfahren aufgeführt, der CIF-Test als Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau. Für eine Frost- und Frost-Tausalzbelastung mit mäßiger Sättigung existiert bislang kein gesondertes Prüfverfahren. Einen wichtigen Beitrag zur zukünftigen Beurteilung von Betonmischungen anhand deren Eigenschaften würde somit zusätzlich die Einführung eines Prüfverfahrens für eine XF2 Exposition leisten.

3 Frost-Tausalz-Schäden in Labor und Praxis

Ein Frost-Tausalz-Schaden kann zu unterschiedlichen Schädigungsarten, aber auch Schädigungsgraden führen. Als Schädigungsarten müssen hierbei die innere sowie die äußere Schädigung unterschieden werden.

Eine innere Schädigung ist gekennzeichnet durch eine Zerstörung des Gefüges in der Matrix des Betons. Hierbei findet eine Gefügauflockerung durch Mikrorisse statt. Diese werden aufgrund der höheren Porosität oftmals in der Übergangszone zwischen Zuschlagkorn und Zementstein gebildet. Ein Nachweis der

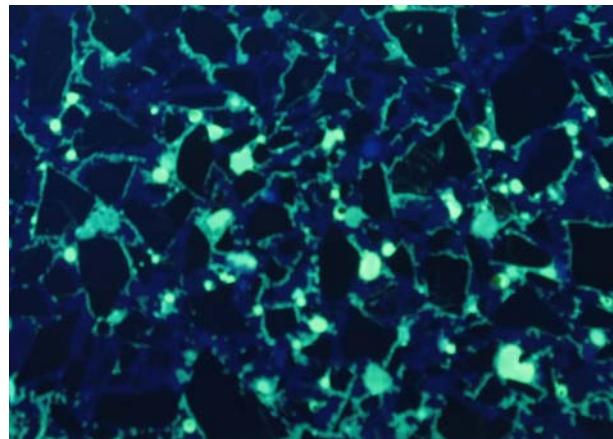


Abbildung 2: Beispiel für eine innere Schädigung - (Mikro) Risse, sichtbar gemacht mit einem dünnflüssigen fluoreszierenden Harz

inneren Schädigung ist durch die Messung mit Ultraschall möglich. Bei längeren Laufzeiten des Ultraschallsignals kann auf die Schäden im Gefüge geschlossen werden, was beispielhaft in Abbildung 2 dargestellt ist.

Eine äußere Schädigung ist durch eine Abwitterung der Oberfläche oder durch Risse an der Oberfläche gekennzeichnet. Diese Schäden können durch ein Versagen des Zementsteins bzw. durch einen Schaden, der durch eine Zerstörung des Zuschlags bedingt ist, ausgelöst werden. Bei ersterem Schadensbild ist zumeist eine Absandung bzw. eine großflächige Ablösung innerhalb der Oberfläche zu erkennen (Abbildung 3). Eine zerstörte Gesteinskörnung führt dagegen zu einer lokal begrenzten Schädigung der Oberfläche, die im Gegensatz zum Absanden tiefer in den Beton hineingeht. In diesem Fall spricht man von Popouts. Ein weiteres dazwischen einzuordnendes Schadensbild ist das Ablösen des Zementsteins direkt über der Gesteinskörnung. Hier geht der Schaden nicht von einem defekten Korn aus, sondern der über dem zumeist größeren Zuschlag befindliche Zementstein löst sich.



Abbildung 3: Beispiele für Frost-Tausalz-Schäden (Schädigung der Oberfläche;
links: Absanden der Oberfläche,
Mitte: Ablösen der Zementleimschicht über einer Gesteinskörnung;
rechts: Popout verursacht durch die Auflösung einer Gesteinskörnung)

Die äußere bzw. innere Schädigung des Betons muss nicht miteinander gekoppelt auftreten. Während eine äußere Schädigung zumeist bei einem Frost-Tausalz-Angriff stattfindet, ist eine innere Schädigung vor allem bei einem reinen Frostangriff zu beobachten. Deshalb ist es wichtig, die unterschiedlichen Schädigungsformen getrennt zu erfassen und hinsichtlich des Frost-Tausalz-Widerstandes der zu betrachtenden Betone auch getrennt zu bewerten.

Wichtig bei einer Frost- und Frost-Tausalzbelastung ist die Berücksichtigung der Transportvorgänge. So handelt es sich beispielsweise bei einer reinen Frostbeanspruchung primär um einen Sättigungsprozess und nur sekundär um ein Schädigungsproblem. Das so genannte Frostsaugen, das während einer zyklischen Frost- und Frost-Tausalzbelastung auftritt, beschreibt das Mikroeislinnenmodell von SETZER [45]. Es beruht auf der gleichzeitigen Existenz von ungefrorenem Wasser, Wasserdampf und Eis, womit ein erheblicher Druckunterschied zwischen Wasser und Eis verbunden ist, der dazu führt dass ein hoher hydraulischer Unterdruck im Wasser

entsteht. Dadurch kommt es zur Kontraktion des Zementgels (**Gefrierschwinden**). Das Porenwasser wird herausgedrückt, das beim weiteren Abkühlen zu den bestehenden Eiskristallen transportiert wird [45]. Beim Auftauen sinkt das Druckgefälle. Das immer noch an das Eis angefrorene Wasser kann nicht in kurzer Zeit zurück transportiert werden. Wird äußeres Wasser angeboten, dann wird es über das vorhandene, ungefrorene Wasser in die expandierenden Gelporen transportiert. Nachdem der Transport im nanoporösen Gelporenbereich stattfindet, muss man zwischen der Wasserbewegung und dem Eindringen von darin gelösten Stoffen (Tausalze) unterscheiden.

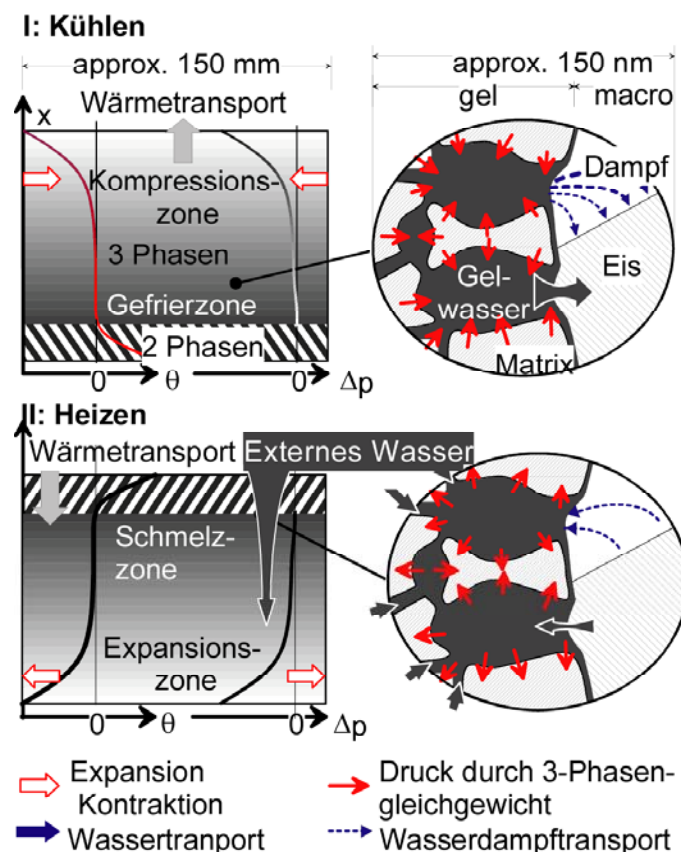


Abbildung 4: Mikroislinnenmodell – links makroskopisch, rechts nanoskopisch

Für das Frostsaugen sind Frosttauwechsel und externes Wasser z. B. in form von an der Betonoberfläche anstehendem oder von außen einwirkendem Wasser erforderlich. Der Wärme- und Wassertransport muss daher praxiskonform in einem Prüfverfahren abgebildet werden.

Ist eine hinreichend hohe Schädigungssättigung („schädigende Sättigung“) erreicht, dann ist zuerst die Gefrierausdehnung des Eises der entscheidende Schädigungsmechanismus. Die bei der behinderten Eisbildung entstehenden hydraulischen Drücke werden in Modellen vor allem von POWERS [32] und FAGERLUND [19] beschrieben. Darüber hinaus gibt es Schädigungsmechanismen durch Umverteilungsdrücke im submikroskopischen Gelbereich, die aber erst bei Temperaturen unter $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$

dominant werden. Eine Übersicht zum derzeitigen Stand findet man in [19]. Es wirken in erster Linie die makroskopischen und semi-makroskopischen Schadensmechanismen. Neben den physikalischen Schadenstheorien ist aber auch der Einfluss chemischer Modelle, wie Phasenumwandlungen innerhalb der Zementsteinmatrix, wie sie von Stark und Ludwig beschrieben worden sind [25], nicht außer Acht zu lassen. Allerdings sind bei der Taumittleinwirkung auch kombinierte oberflächenphysikalische Effekte nicht vernachlässigbar. Es hat sich aber gezeigt, dass sich der Einfluss der Taumittel auf die unmittelbare Oberflächzone konzentriert.

Für die Aussagen dieses Forschungsvorhabens erscheint der physikalische Anteil der Schädigung als maßgebend, allerdings ist aufgrund der häufigen Wechsel über einen langen Zeitraum und die damit verbundene Möglichkeit des Ablaufs langsamer Reaktionen durchaus auch die chemische Umwandlung in Betracht zu ziehen. Bei Betonen mit hüttensandreichen Hochofenzementen ist in jedem Fall zwischen einer Anfangsabwitterung und einer danach einsetzenden Schädigungsrate zu unterscheiden.

4 Stand der Normung für Frost- und Frost-Tausalz-belastete Bauteile

4.1 Die Stoffnorm DIN 1045-2: 2001-07

Nach DIN 1045-2:2001-07 [7] ist die Expositionsklasse Frost mit Taumittel in zwei unterschiedliche Angriffsstärken unterteilt, die Stärke des Angriffes wird hierbei nach dem Feuchtepotential unterschieden. So werden alle Betone, die einer ständigen Durchfeuchtung mit Taumittel bei einem gleichzeitigem Frostangriff ausgesetzt sind, der Expositionsklasse XF4 zugeschrieben. Hierzu zählen z.B. horizontale Bauteile im Straßenbau (Betonstraße, Brückenkappe etc.). Bauteile, die dagegen nur eine mäßige Durchfeuchtung erfahren, werden der Expositionsklasse XF2 zugeordnet. Hierzu zählen z.B. alle senkrechten Flächen im Spritzwasser- und Sprühnebelbereich von taumittelbelasteten Flächen. Eine Unterscheidung der Angriffsstärke hinsichtlich der Temperatur (Minimaltemperatur, Anzahl Frost-Tau-Wechsel etc.) ist in DIN 1045-2:2001-07 nicht vorgesehen.

Wie in Kapitel 1 angeschnitten, wird die Dauerhaftigkeit des Baustoffes selbst in der aktuellen Normung im Gegensatz zu den statischen Anforderungen deskriptiv gehandhabt. Dies bedeutet, dass keine direkten Anforderungen an den jeweiligen maßgebenden Widerstand definiert sind, sondern eine ausreichende Dauerhaftigkeit durch Maßgaben an die Zusammensetzung sichergestellt wird. Im Falle des Frost-Tausalz-Widerstandes von Betonen sind dies vor allem der w/z-Wert und der Mikroluftporengehalt. Des Weiteren ist die Verwendung einiger Zemente bzw. Bindemittelkombinationen ausgeschlossen.

Die Anforderungen sind in der DIN 1045-2:2001-07 [7] enthalten und werden teilweise durch Regelwerke für besondere Bauwerke ergänzt (z.B. ZTV-ING, Teil 3 Massivbau, Abschnitt 1 Beton [52] und ZTV Beton - StB 01 [51]). Tabelle 1 enthält die für die hier untersuchten Betone relevanten Anforderungen aus DIN 1045-2: 2001-07 [7].

Tabelle 1: ausgewählte Anforderungen an die Betonzusammensetzung in Abhängigkeit der Expositionsklasse XF nach DIN 1045-2:2001-07

	XF 1	XF2		XF3		XF4
1	2	3	4	5	6	7
höchstzulässiger w/z-Wert	0,60	0,55	0,50	0,55	0,50	0,50
Mindestdruckfestigkeitsklasse	C 25/30	C 25/30	C 35/45	C 25/30	C 35/45	C 30/37
Mindestzementgehalt [kg/m ³]	280	300	320	300	320	320
Mindest-Luftgehalt [Vol.-%] (Größtkorn: 16 mm)	-	4,5	-	4,5	-	4,5

Nach ZTV-Beton – StB 01 wird für den Bereich der Expositionsklasse XF4 ergänzend zur DIN 1045-2:2001-07 ein maximaler w/z-Wert von 0,45 gefordert. Des Weiteren müssen die Luftporengehalte im Frischbeton bei gleichzeitiger Verwendung eines Fließmittels oder Betonverflüssigers erhöht werden, sofern nicht ein gesonderter Nachweis der Wirksamkeit des LP-Bildners vorliegt (Nachweis erfolgt im Rahmen der Eignungsprüfung über die Ermittlung der Luftporenkennwerte im Festbeton).

Im Bereich des konstruktiven Ingenieurbaus im Zuge des Straßenbaus gelten zusätzlich zur DIN 1045-2:2001-07 auch die ZTV-ING, Teil 3 Massivbau, Abschnitt 1 Beton [52]. In den ZTV-ING 3-1 wird zusätzlich zur DIN 1045-2:2001-07 die Zuordnung der unterschiedlichen Bauteile zu den Expositionsklassen genauer definiert. So zählen zum Bereich XF4 alle vorwiegend horizontalen Bauteile, die mit tausalzhaltigem Wasser oder Schnee direkt beaufschlagt werden, zum Bereich XF2 zählen alle nicht vorwiegend horizontalen Bauteile im Spritz- und Sprühnebelbereich, sofern ein Abfließen des Wassers möglich ist.

Die ZTV-ING 3-1 fordern weiterhin für den Bereich der Expositionsklasse XF2 einen maximalen w/z-Wert von 0,50. Baupraktisch führt diese Forderung dazu, dass Betone für die Expositionsklasse XF2 in der Regel nicht als Betone mit einem Luftporenmittel hergestellt werden, da sich hier ein Mehraufwand in der Einstellung des richtigen Luftporengehaltes und in der Überwachung ergeben würde. Des Weiteren wird die Mindestfestigkeitsklasse für ausgewählte Bauteile (Widerlager, Stützen, Pfeiler etc.) im Bereich XF2 von C 35/45 auf C 30/37 gesenkt, was den Erfahrungen mit Betonen der geforderten Zusammensetzung entspricht. Für den Bereich der Brückenkappen, die der Expositionsklasse XF4 zugeordnet werden, werden in den ZTV-ING 3-1 ein Beton C 25/30 (statt eines C 30/37 nach DIN 1045-2:2001-07) gefordert,

was den Erfahrungen bei den geforderten Luftgehalten entspricht. Des Weiteren wird die Auswahl der Zemente eingeschränkt. So bedarf die Verwendung von CEM II B/M-Zementen der Zustimmung des Auftraggebers, Zemente mit Hüttensanden dürfen nur mit einem Hüttensandgehalt von maximal 50 M.-% eingesetzt werden.

4.2 Überprüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes im Labor

Neben der Einhaltung der stofflichen Zusammensetzung ist es möglich, das Verhalten von unterschiedlichen Materialien unter Frost-Tausalz-Belastung im Labor zu simulieren. Hierzu gibt es für den Bereich der Exposition XF4 unterschiedliche Prüfverfahren, die auf europäischer Ebene in der DIN EN 12390-9:2002-05 [14] geregelt sind. Der CDF-Test ist hierin als Alternativverfahren aufgeführt, das schwedische Plattenprüfverfahren (Slab-Test), sowie das Würfelprüfverfahren sind ebenfalls enthalten. Generell wird bei all diesen Verfahren unter vollständiger Sättigung geprüft. Das CDF/ CIF-Prüfverfahren liegt zudem als Empfehlung zur Prüfung des Frost- und Frost-Tausalzwiderstandes als international veröffentlichte Rilem Recommendation vor [36]. Der Ablauf des Verfahrens wird in Kapitel 5.2 beschrieben und kann in den entsprechenden Prüfvorschriften nachgelesen werden [44 , 27].

Ergänzend zu DIN EN 12390-9:2002-05 gibt es Regelwerke unterschiedlicher Bauherren mit eigenen oder konkretisierten Prüfvorschriften. Für den Bereich der Frost-Tausalz-Prüfung ist hierbei das von der Bundesanstalt für Wasserbau herausgegebene Merkblatt Frostprüfung von Beton [27] zu nennen, das auf dem CDF-/CIF- oder in der Version von 2002 noch CDF/CF-Verfahren genannt, basiert und somit auf der DIN 12390-9:2002-05 bzw. ZTV-W 219, (Ausgabe 1997) [53] aufbaut. Allerdings werden wesentliche Teile konkretisiert (z.B. geforderte Angaben bei der Betonherstellung, verdichtete Prüftermine), als auch durch die Erfassung der inneren Schädigung ergänzt. Hierin sind auch die Abnahmekriterien für eine Beurteilung des Frost- und Frost-Tausalzwiderstandes festgelegt. Für Bauwerke der Expositions-klasse XF4, die in den Bereich der Bundesanstalt für Wasserbau und in den Bereich der Bundesfernstraßen fallen, beträgt die maximal zulässige Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln 1.500 g/m^2 [27]. Für die innere Schädigung gilt für Bauwerke des Wasserbaus zusätzlich, dass der relative dynamische E-Modul, ermittelt aus der Ultraschalllaufzeitänderung nach 28 FTW das Schädigungskriterium von 75% nicht unterschritten haben darf.

In den aktuellen Normen und Regelwerken ist eine Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstandes über Laborprüfverfahren bislang also nur bedingt vorgesehen. Die Berücksichtigung einer schwächeren Belastung, was bei senkrechten Bauteilflächen oder Flächen im Sprühnebelbereich der Fall ist, wird bisher in keinem Verfahren aufgegriffen.

5 Simulation und Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz Angriffs

5.1 Grundlagen der Laborprüfung

Um die in der Praxis vorherrschenden Bedingungen im Labor abbilden zu können, muss ein Prüfverfahren so gewählt sein, dass einerseits alle relevanten Angriffsarten abdeckt und zum anderen keine unrealistischen Anforderungen an das Bauteil gestellt werden. Darüber hinaus muss eine ausreichende Genauigkeit d.h. Wiederhol- und Vergleichpräzision [1] gewährleistet, sowie eine entsprechende Trennschärfe gegeben sein, um Betone eindeutig hinsichtlich ihrer Frostbeständigkeit unterscheiden zu können. Dabei ist eine hundertprozentige Abbildung der Praxisbedingungen im Labor nicht möglich, da die Vielzahl an Einflussparametern, die unter realen Bedingungen vorherrschen, nicht mit einer Prüfmethode im Labor simuliert werden kann. Dennoch ist es natürlich erstrebenswert, diese so nah wie möglich den Praxisbedingungen anzupassen. Bei einem Frostprüfverfahren ist dabei ein einachsiger Wärme- und Feuchtetransport über eine definierte Prüffläche einzustellen, um den Praxisbedingungen gerecht zu werden. Damit würde auch das Frostsaugen auftreten, wie es unter realen Verhältnissen ebenfalls der Fall ist.

In der Vergangenheit wurde eine ganze Reihe an Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost- und Frost-Tausalzwerstandes entwickelt, die sich insbesondere hinsichtlich der Prüfrandbedingungen bzw. Wärme- und Feuchtetransportbedingungen sowie der Grenzwerte unterschieden. Ein Vergleich der Simulationsbedingungen zwischen früher angewendeten Testmethoden und den heute gebräuchlichen Prüfverfahren zur Simulation eines XF3/ XF4 Angriffes ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

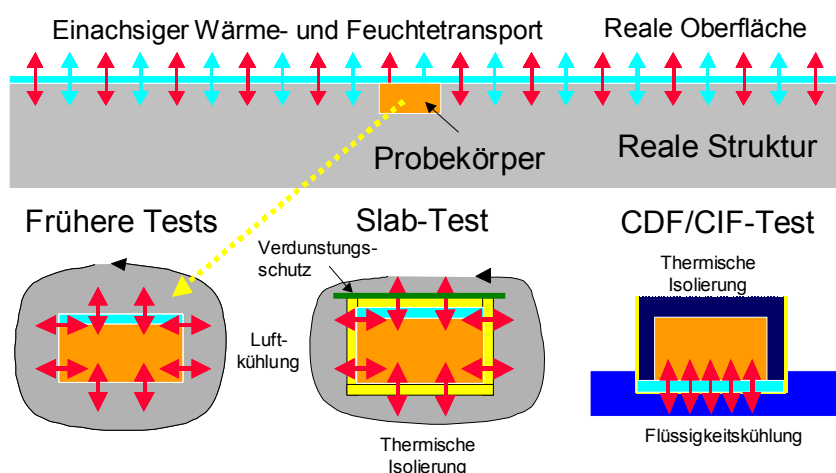


Abbildung 5: Vergleich eines Frostangriffs in der Praxis mit dem in Prüfverfahren. Unterschied zwischen allseitigem (links), mehrachsigem (Mitte) und eindimensionalem (rechts) Wärme- und Feuchtetransport [5].

Da aufgrund des Mikroeilinsenmodells bekannt ist, dass einerseits das Frostsaugen einer Frostschädigung vorausgeht und andererseits dieses von den Randbedingun-

gen abhängt, d.h. von der Richtung des Wärme- und Feuchteangebots, muss man für die Prüfbedingungen diese Voraussetzungen so einhalten, dass sie den Gegebenheiten der Praxis weitgehend entsprechen. Bei realen Bauteilen kann man zunächst davon ausgehen, dass in der überwiegenden Anzahl der Fälle eine relativ ausgedehnte und ebene Angriffsfläche vorliegt, über die sowohl die Temperaturschwankungen, d.h. der Wärmetransport und das Feuchteangebot erfolgen. Dies ist ein ebenes Problem mit einer einachsigen und gleichgerichteten Transportrichtung für Wärme und Feuchte unter instationären Bedingungen. Beim Entwurf eines Prüfverfahrens, das die Praxis simulieren soll, muss man darauf achten, dass der einachsige Transport erhalten bleibt. Denn nur dann wird das entscheidende Phänomen des Frostsaugens realitätsnah simuliert. Während einer Frosttaubelastung dringt in den Beton während der Abkühlphase eine Kältewelle ein und während der Tauphase eine Wärmewelle. Das Temperaturprofil nimmt stetig ab bzw. zu und ermöglicht die Frostpumpe.

Im CDF/CIF-Test dient die ruhende Luft als Dämmschicht und die metallischen Flächen als Strahlungsschutz. Aus physikalischen Gründen ist die Prüffläche unten. Der Wärmetransport erfolgt über ein Bad, das durch die hohe Wärmekapazität für eine genaue Temperaturführung sorgt. Damit ist nachweislich ein einachsiger Wärmetransport gesichert. Das Bad lässt zwei Frosttauwechsel pro Tag zu (12 h Zyklus). Die Höhe der Prüfflüssigkeitsschicht und damit der entsprechende Wärmebedarf sind durch eine Aufständering gesichert.

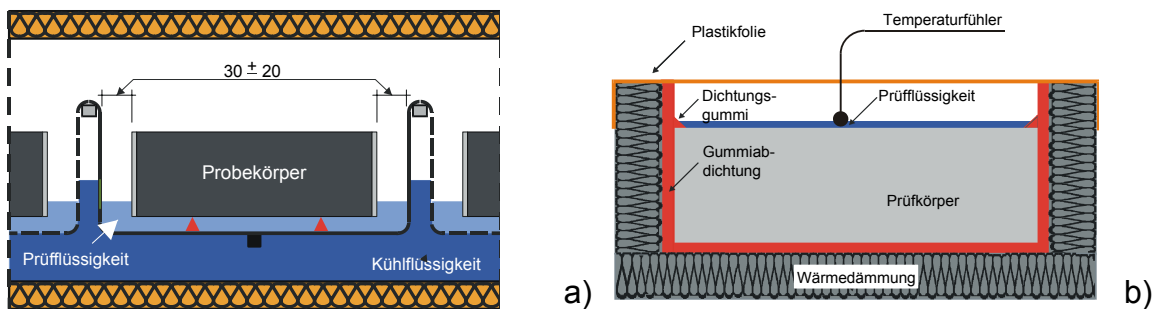


Abbildung 6: Prüfkörperanordnung im Rahmen des CDF/ CIF-Tests im Vergleich zum schwedischen Slab-Test (b)

5.2 Der CDF-/ CIF-Test

5.2.1 Prüfkriterien

Der CDF-/CIF-Test simuliert eine beschleunigte Schädigung von Betonen durch eine vordefinierte Frost-Tau- bzw. Frost-Tausalz-Belastung, um Prognosen über mögliche Schäden in der Praxis und damit Aussagen über die Widerstandsfähigkeit treffen zu können. Das von SETZER entwickelte, von HARTMANN als CDF-Test optimierte und von AUBERG später zum CIF-Test weiterentwickelte Prüfverfahren kommt an den

Universitäten Duisburg-Essen und Essen seit Jahren zum Einsatz [1 , 42 , 44]. Die CDF-/CIF-Prüfmethode erreicht aufgrund der hohen Präzision, Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit die nach ISO 5725 [21] geforderten Präzisionsangaben. Sie wurde im Jahre 2001 auch als RILEM-Recommendation [35] veröffentlicht. Die Prüfmethode des CDF- und CIF-Tests ist ausführlich in der DIN EN 12390-9 [14], dem Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ [27], der Prüfvorschrift SETZER/AUBERG [42] und der RILEM Recommendation [41 , 36] beschrieben.

Die Erfahrung mit verschiedenen Frostprüfverfahren zeigt, dass beim Taumittelangriff die Abwitterung die maßgebliche Größe ist. Ein Maximum wird bei einer geringen Taumittelkonzentration erreicht (üblicherweise 3 M.-% NaCl). Die abgewitterte Masse wird auch von den Prüfbedingungen (Frostpumpe im Oberflächenbereich) bestimmt. Sie ist im CDF-Test etwa dreimal höher als im Slab Test, was auf die unterschiedliche Prüfanordnung und praxiskonformere Simulation im CDF-Test (Frostpumpe) zurückzuführen ist. Das für den CDF-Test maßgebliche Prüfkriterium stellt die Abwitterung dar, ausgedrückt durch die Summe an abgewitterten Partikeln, bestimmt mittels Ultraschallbad nach 28 FTW. Hier liegt der allgemein anerkannte Grenzwert bei 1500 g/m² (Tabelle 2). Detailliert sind die Abnahmekriterien im BAW Merkblatt aufgeführt (Tabelle 3).

Tabelle 2: Übersicht Festlegung von Abnahmekriterien in den einzelnen Normen, Merkblättern und Empfehlungen zum CDF/ CIF-Test [27 , 36 , 14]

Norm/ Empfehlung	CDF		CIF	
	Abwitterung	Innere Schädigung	Abwitterung	Innere Schädigung
DIN 12390-9: 2002-05	„Potentielles Abwitterungskriterium“ = 1,5 kg/m ² nach 28 FTW	-	„Potentielles Abwitterungskriterium“ = 1,5 kg/m ² nach 28 FTW (CF-Test)	-
BAW Merkblatt	≤ 1500 g/m ² nach 28 FTW	E-Modul ≥ 75% nach 28 FTW	≤ 1000 g/m ² nach 28 FTW	E-Modul ≥ 75% nach 28 FTW
RILEM Empfehlung	≤ 1500 g/m ² nach 28 FTW	(E-Modul ≥ 80% nach n FTW ¹)*		E-Modul ≥ 80% nach n FTW ¹

*in der RILEM CIF-Prüfvorschrift für die Anwendung mit NaCl-Lösung enthalten

Zur Bestimmung der inneren Schädigung wird unabhängig von der Wahl der Prüflösung (demineralisiertes Wasser oder NaCl-Lösung) der relative dynamische E-Modul, ermittelt aus der Ultraschalllaufzeit, zur Beurteilung herangezogen. Das BAW Merkblatt [27] sieht einen Abfall des rel. dyn. E-Moduls auf 75% als Schädigungs-

¹ Anzahl FTW je nach Anwendungsfall festzulegen

kriterium vor, welches nach 28 FTW nicht unterschritten werden darf. Als ein weiterer wichtiger Parameter bei der Beurteilung der inneren Schädigung hat sich die Prüflösungsaufnahme herausgestellt. Da diese direkt mit der inneren Schädigung korreliert, können hierüber ebenfalls Aussagen zum Schadensverlauf des zu prüfenden Betons getroffen werden. Diese wird aber in den Prüfvorschriften nicht zwingend vorgeschrieben.

Tabelle 3: Abnahmekriterien gemäß BAW-Merkblatt "Frostprüfung" [27]

Verfahren	Kriterium	Wert	Eignungsprüfung	Güte- und Bauwerksprüfung
CIF	Innere Schädigung ¹⁾	Mittelwert	≥ 28 FTW	≥ 24 FTW
	Abwitterung	Mittelwert	≤ 1000 g/m ² nach 28 FTW	
		95%-Quantile	≤ 1750 g/m ² nach 28 FTW	
CDF	Innere Schädigung ¹⁾	Mittelwert	≥ 28 FTW	≥ 24 FTW
	Abwitterung	Mittelwert	≤ 1500 g/m ² nach 28 FTW	
		95%-Quantile	≤ 1800 g/m ² nach 28 FTW	

¹⁾ Unterschreitung eines rel. dyn. E-Moduls von 75%

5.2.2 Prüfablauf des CDF-/CIF-Testes

Es gelten die in Tabelle 4 dargestellten Randbedingungen. Für eine ausreichende statistische Aussage ist die Prüfung von mindestens 5 Probekörpern vorgeschrieben. Der Standardprobekörper auf den sich die Abnahmekriterien beziehen, besitzt die Abmessungen 150 x 110 x 70 mm³. Nach Erreichen des Prüfalters von 28 Tagen werden die Probekörper seitlich mit Haftgrundmittel bestrichen und anschließend mit Butylband abgedichtet, um einen einaxiale Frostgradienten zu gewährleisten.

Laut Prüfvorschriften sollen die Proben 7 Tage lang durch kapillares Saugen Wasser aufnehmen. Die Feuchtigkeitsaufnahme erfolgt über die zuvor definierte Prüffläche. Dazu werden die Probekörper mit der Prüffläche nach unten gerichtet in die entsprechende Prüflösung 5 mm tief eingetaucht. Die Probekörper werden auf Abstandshaltern gelagert. Durch das kapillare Saugen wird ein definierter Sättigungsgrad zu Beginn der Frost-Tau-Wechselbelastung eingestellt, der von der Materialstruktur des Probekörpers abhängt. Die Gewichtszunahme wird regelmäßig aufgezeichnet, indem die Proben vor dem Abdichten, nach dem Abdichten und während des kapillaren Saugens gewogen werden.

Tabelle 4: Allgemeine Prüfrandbedingungen und Abnahmekriterien des CDF/ CIF-Testes

Parameter	Gemäß Prüfvorschrift
Prüfkörperanzahl und Standardabmessungen:	5 Steine 150 x 150 x 70 mm nach BAW [27] 150 x 110 x 70 mm nach RILEM [36]
Prüffläche:	geschalt mittels Teflonscheiben, Prüffläche nicht behandelt
Nachbehandlung:	1 d Form, 6 d unter Wasser bei 20°C, 21 d Klimaraum bei 20°C 65% RH
Vorlagerung:	7 d in Prüfflüssigkeit, 5 mm tief eingetaucht
Normales Prüfalter:	28 d
T_{\min}/T_{\max}^2	-20°C/+20°C unter Prüfbehälter in Truhenmitte
zul ΔT bei T_{\min}	+/- 0,5 K
Abkühl-/ Auftaugeschwindigkeit:	10 K/h// 10 K/h
Dauer/Anzahl [FTW]:	CDF:12 h/28 FTW CIF: 12 h/28 FTW nach BAW [27] bzw. n FTW bis rel. $E_{\text{dyn}}=80\%$ nach RILEM [36] bzw. n FTW bis rel. $E_{\text{dyn}}=75\%$ nach BAW [27]

Nach dem kapillaren Saugen werden die Probekörper in einem Metallbehältern mit der entsprechenden Prüfflüssigkeit einem Temperaturzyklus zwischen + 20°C und - 20°C ausgesetzt. Ein Zyklus dauert 12 Stunden und beginnt bei + 20°C, von wo aus die Temperatur in vier Stunden mit einer Kühlgeschwindigkeit von 10 K/h auf - 20°C gesenkt wird.

Nach jedem 4. – 6. FTW werden die Messparameter in der Reihenfolge, wie sie in Abbildung 7 schematisch dargestellt ist, ermittelt. Zur Bestimmung der Abwitterung wird der Prüfbehälter für drei Minuten in ein Ultraschallbad getaucht, um die Abwitterung, die noch lose an der Prüffläche haftet, zu entfernen. Anschließend werden die gelösten Partikel, die in der Prüflösung enthalten sind, herausgefiltert. Zur Bestimmung der Feuchtigkeitsaufnahme werden die Probekörper anschließend gewogen. Über die Änderung der Ultraschalllaufzeit, gemessen mittels eines kalibrierten Testbehälters, wird in einem weiteren Schritt der Abfall des relativen dynamischen E-Moduls berechnet. Letzterer charakterisiert die innere Schädigung. Nach Beendigung der Messabfolge wird die Frost-Tau-Wechselbelastung bis zum nächsten Messintervall oder Ende der Prüfung fortgesetzt. Die vorgesehene Prüfdauer beim CDF-Test beträgt 28 FTW.

² T_{\min} und T_{\max} stellen mittlere Werte dar

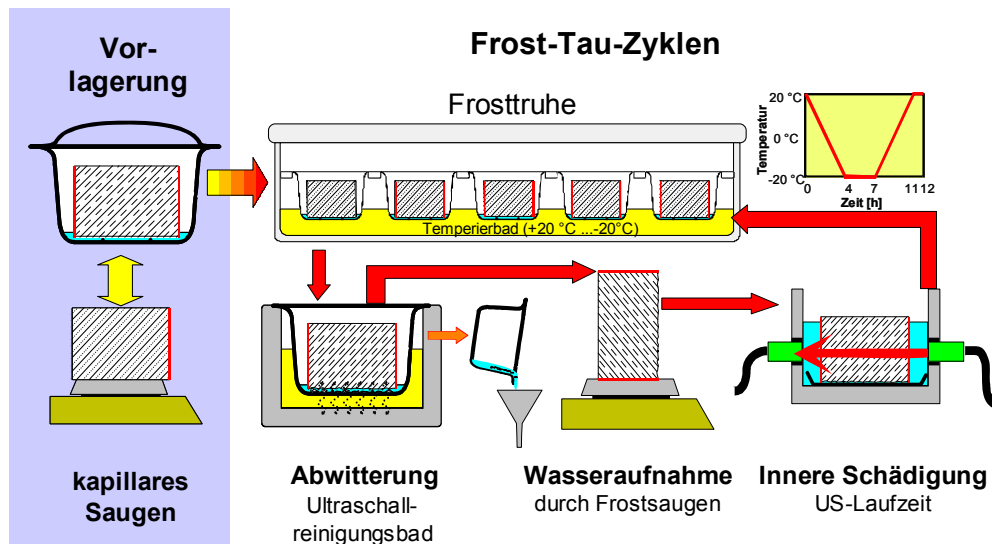


Abbildung 7: Messablauf im Rahmen des CDF-/CIF-Testes

5.2.3 Auswertung im Rahmen des CDF-/CIF-Testes

5.2.3.1 Auswertung der Abwitterung

Für die einzelnen Probekörper werden die Abwitterungen zu jedem Messzeitpunkt berechnet. Die einzelnen Abwitterungsmengen werden aufsummiert. Die Summe der Gesamtabwitterungen m_n nach dem n-ten FTW bezogen auf die Prüffläche ist ein Maß für die Oberflächenschädigung zum entsprechenden Zeitpunkt.

5.2.3.2 Auswertung der inneren Schädigung (Ultraschallmessung)

Mit der Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls über FTW wird die innere Schädigung charakterisiert. Der relative dynamische E-Modul wird über die Ultraschalllaufzeit und folglich über die Ultraschallgeschwindigkeit berechnet. Hierbei wird die Ultraschalllaufzeit je Probekörper in zwei Durchschallungsachsen, die rechtwinklig zueinander stehen, gemessen. Die Achsen liegen hierbei in einem Abstand von 35 mm zur Prüffläche.

Die Abmessungen der Probekörper werden vor Beginn des kapillaren Saugens bestimmt und protokolliert. Vor dem ersten FTW erfolgt die erste Messung der Ultraschalllaufzeit. Auf diesen Anfangszustand werden alle weiteren Messungen bezogen. Die Abnahme des relativen dynamischen E - Moduls nach jedem FTW wird für beide Durchschallungsachsen berechnet und anschließend gemittelt:

5.2.3.3 Auswertung der Feuchteaufnahme

Die Feuchteaufnahme, in der Regel in M.-% angegeben, wird über die Gewichtsänderung des Probekörpers ermittelt. Dabei ist zwischen der kapillaren Feuchteaufnahme während der Vorsättigung und dem Frostsaugen unter Frost-Tau-Wechselbelastung zu unterscheiden.

6 Übersicht der Untersuchungen

Das Prüfprogramm, das von der Universität Duisburg-Essen, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft (IBPM) sowie der TU München, Centrum für Baustoffe und Materialprüfung (cbm) bearbeitet wurde, gliederte sich in zwei Abschnitte

- (1) Anpassung des CDF-Prüfverfahrens an die veränderten Randbedingungen einer XF2 Exposition (IBPM) mit dem Ziel einen „modifizierten CDF-Test“ zu entwickeln
- (2) a) Praxisuntersuchungen an ausgelagerten Proben zur Bestimmung des tatsächlichen Schadensangriffes unter XF2 Exposition im Vergleich zur XF4 Belastung (cbm)
 - b) Vergleich der Auslagerungsergebnisse mit der Laborsimulation (cbm).

Die Untersuchungen erfolgten zum größten Teil parallel. Das Prüfprogramm zur Modifizierung des CDF- Prüfverfahrens wurde in Anlehnung an die Versuchsergebnisse und die Beschlüsse der Betreuungsgruppe jeweils neu angepasst (siehe Tabelle 5)

Tabelle 5: Zeitplan und Vorgehensweise der Untersuchungen zur Modifizierung des CDF-Testes, Arbeiten am IBPM

Variationen	Ergebnis/ Fazit
Start der Untersuchungen - Versuchsreihe 1: a) Vorversuche: Reduzierung der Wasseraufnahme durch Variation der Nachbehandlung und Dauer der Vorsättigung b) Variation der Minimaltemperatur (-10°C), Wechsellagerung während der Befrostung, NaCl-Konzentrationen 0%, 3%, 18%	Abschwächung zu gering, keine Unterscheidung verschiedener Betonqualitäten möglich
2. Versuchsreihe: Erweiterung Prüfmatrix Betonzusammensetzung (Zemente, w/z-Werte, Zementgehalt) Variation Minimaltemperatur (-10°C), Abstufung der NaCl-Konzentration 0% (CIF), 3% (CDF), 8%, (9%), 10%, (11%), 12%, (15%), 18%	Abschwächung erreicht, Unterscheidung verschiedener Betonqualitäten immer noch schwierig
3. Versuchsreihe: Variation Minimaltemperatur (-10°C), Abstufung der NaCl-Konzentration 0% (CIF), 0,1%, 0,5%, 1%, 3% (CDF), 8% Erweiterung Prüfmatrix Betonzusammensetzung (LP-Betone)	Ausreichende Abschwächung erreicht, Unterscheidung verschiedener Betonqualitäten möglich

Die Untersuchungen am cbm der TU München gliederten sich in die Abschnitte Praxisuntersuchungen und Laborprüfung. Im ersten Abschnitt wurden Betone hergestellt, die an zwei unterschiedlichen Stellen in Deutschland für den Zeitraum von drei Wintern ausgelagert wurden. Aufbauend auf den Ergebnissen der Bauwerksuntersuchungen zur Feuchte-, Chlorid- und Temperaturbelastung an senkrechten Bauteilflächen in der Nähe von taumittelbelasteten Verkehrswegen sollten die Prüfbedingungen der derzeitigen Prüfverfahren für die Umweltklasse XF4 bestätigt und daraus neue Methoden zur reproduzierbaren Prüfung der Betonanforderungskategorie XF2 erstellt werden. Ausgangspunkt dabei war der CDF-Test als in der Praxis anerkanntes und bewährtes Prüfverfahren für eine XF4 Exposition. Abschließend sollten die ausgelagerten Betone mit den mittels modifiziertem CDF-Test im Labor geprüften Betonen verglichen werden (s. Abbildung 8).

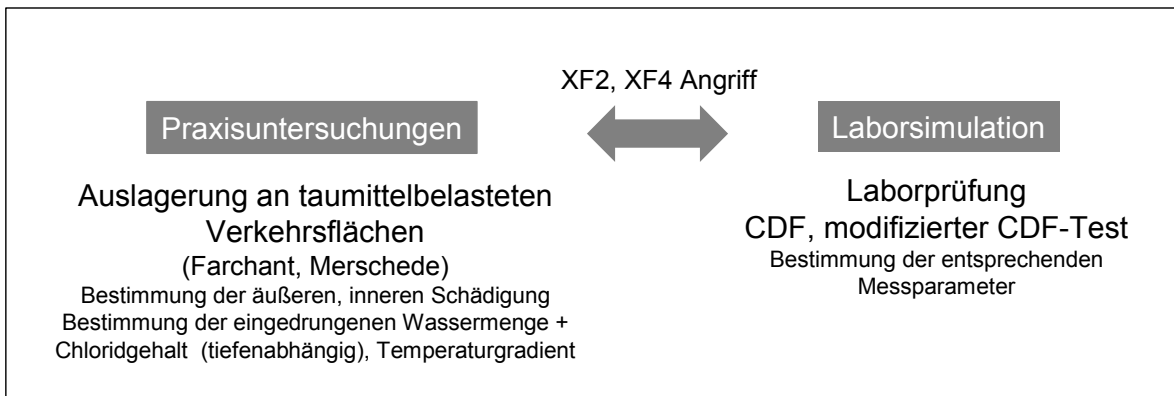


Abbildung 8: Kurze Übersicht der Untersuchungen am cbm der TU München

7 Teil 1: Untersuchungen zur Modifizierung des Prüfverfahrens

7.1 Allgemeines

Ausgangspunkt der Modifizierung des CDF-/ CIF-Tests für einen abgeschwächten Frostangriff war zunächst die Reduzierung des Sättigungsgrads, um den in der Praxis unter diesen Expositionsklassen zu erwartenden niedrigeren Feuchtegehalt einzustellen. Daher wurden im Rahmen der ersten Versuchsreihe, deren Umfang im Antrag festgelegt war, Variationen der Nachbehandlung und Vorsättigung behandelt. Die 2. ergänzende Versuchsreihe umfasste die Untersuchung des Einflusses verschiedener Prüflösungskonzentration sowie der Minimaltemperatur auf das Abwitterungs- und Feuchteaufnahmeverhalten verschiedener XF2 konformer bzw. nicht konformer Mischungen. Die neue Versuchsreihe sollte zunächst an der Universität Duisburg-Essen durchgeführt werden, um das Vorgehen experimentell zu verifizieren und die geeignete Chloridkonzentration festzulegen. Im Anschluss an die Messungen in Essen sollten an der TU München vergleichenden Prüfungen stattfinden.

Schließlich wurde mittels einer 3. Versuchsreihe das Prüfprogramm dahingehend erweitert, dass weitere NaCl-Konzentrationsabstufungen sowie Betonzusammensetzungen die bereits beobachteten Tendenzen verifizieren und weitere Möglichkeiten zur Abminderung des Schädigungsausmaßes getroffen werden sollten. Aufgrund der dargestellten Erweiterung des Versuchsprogramms zur Modifizierung des Prüfverfahrens konnten die ursprünglich vorgesehenen Validierungsprüfungen zur Festlegung des Abnahmekriteriums für XF2 im Rahmen dieses Projektes nicht vorgenommen werden.

Der Bericht enthält die wichtigsten Ergebnisse dieser drei Versuchsreihen und fasst die wesentlichen Erkenntnisse abschließend zusammen.

1. Versuchsreihe

An zunächst 5 Mischungen wurde der Einfluss der Nachbehandlung betrachtet (s. Tabelle 6, Serien S0-S4), wobei die Probekörper nach dem Ausschalen nicht unter Wasser sondern für 7 Tage in Folie verpackt gelagert wurden. Des Weiteren wurde die Dauer der kapillaren Wassersättigung vor der Befrostung von sieben Tage auf einen bzw. null Tage verkürzt. In einem 2. Schritt wurden der Einfluss der Anhebung der Minimaltemperatur des Frost-Tau-Zyklus von - 20 °C auf - 10 °C, eine Wechsellagerung von Zyklus zu Zyklus mit und ohne Prüflösung sowie die Variation der Prüflösung mit NaCl-Konzentration von 0% (CIF), 3% (CDF) und 18% untersucht. Alle Versuche wurden mit einem Zement CEM I und CEM III/A sowie den w/z-Werten 0,50 und 0,60 durchgeführt (s. Tabelle 7).

2. Versuchsreihe

Innerhalb der 2. Versuchsreihe wurde der Einfluss weiter abgestufter NaCl-Konzentrationen (0% (CIF), 3% (CDF), 8%, (9%), 10%, (11%), 12%, (15%) und 18%) in Kombination mit einer Anhebung der Minimaltemperatur auf - 10 °C im Vergleich zum bisherigen Zyklus untersucht. Die Versuche erfolgten an insgesamt 8 Betonmischungen (s. Tabelle 6, Serien I-VIII). Es wurden ein CEM°I-°32,5°R sowie ein CEM°III/B-°42,5 verwendet mit den w/z-Werten 0,50 und 0,60 (s. Tabelle 7).

3. Versuchsreihe

Die Variationen der 3. Versuchsreihe umfasste eine weitere Abstufung der NaCl-Konzentration und zwar wurde das Prüfprogramm um die Konzentrationen 0,1%, 0,5% und 1% NaCl ergänzt. Die Anhebung der Minimaltemperatur wurde beibehalten. Alle Untersuchungen wurden mit einem Zement CEM I 32,5 und CEM III/B 42,5 sowie den w/z-Werten 0,50 und 0,60, sowie den LP-Betonen mit w/z=0,55 durchgeführt (s. Tabelle 7).

In der nachstehenden Tabelle sind alle Prüfparameter zusammengestellt.

Tabelle 6: Übersicht über das Messprogramm mit Variation der verschiedenen Parameter und Zuordnung zu den jeweiligen Serien

Parameter	Variationen	Serienbezeichnung												
		1. Versuchsreihe					2.		3. Versuchsreihe					
		S0	S1	S2	S3	S4	I-IV	V-VIII	IX	X	XI	XII	XIII	XIV
Art der Vorlagerung	1d Schalung	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	6d Folie	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	6d Wasser	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	21d 20°C/65%r.F.	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Dauer des kapillaren Saugens	0d	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	1d	X	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7d	-	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
NaCl Konzentration der Prüflösung	0% (CIF)	X	X	X	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X
	0,1%	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X
	0,5%	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X
	1%	-	-	-	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X
	3% (CDF)	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	8%	-	-	-	-	-	X	X	X	X	X	X	X	X
	9%	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-
	10%	-	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-
	11%	-	-	-	-	-	-	X	-	-	-	-	-	-
	12%	-	-	-	-	-	X	X	-	-	-	-	-	-
Minimaltemperatur	-20°C	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	-10°C	-	-	-	X	-	X	X	X	X	X	X	X	X
Wechsellagerung mit und ohne Prüflösung		-	X	X	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

7.1.1 Zusammensetzung der Mischungen

Um entsprechende Kenntnisse über die Widerstandsfähigkeit des Betons bei schwachem Angriff zu erhalten, wurden gezielt Grenzbetone für eine XF2 Exposition untersucht. Da eine Aussage über die Widerstandsfähigkeit des Betons bei schwachem Angriff nur dann getroffen werden kann, wenn die Probekörper bei dieser Beanspruchung geschädigt werden, wurden zunächst (Versuchsreihe 1 + 2) keine LP-Betone geprüft. Vielmehr wurden im Rahmen der ersten beiden Versuchsreihen Betone mit höherem w/z-Wert untersucht, um eine Schadensanalyse durchführen zu können, da diese erwartungsgemäß zu einem früheren Zeitpunkt geschädigt werden. Insgesamt wurden innerhalb der drei Versuchsreihen 19 Betonserien hergestellt und geprüft, wobei die Serie S2 aufgrund der Frischbetondaten verworfen und im weiteren Verlauf der Untersuchungen nicht weiter berücksichtigt wurde. Die Serie wird durch die Vorserie S0 repräsentiert.

Tabelle 7 enthält die Mischungszusammensetzung aller Versuchsreihen. Die Serienbezeichnung unterscheidet sich von denen der Tabelle 6 nur für die erste Versuchsreihe. Die durchgeführten Untersuchungen je Serie wurden an die Vorgaben der Besprechungen bzw. erzielten Ergebnisse angepasst.

Tabelle 7: Mischungszusammensetzung der Serien der Laborprüfung

Serie	Zementart	w/z-Wert	Zement- gehalt [kg/m³]	Luftgehalt Frischbeton [%]	Bemerkung	
S0	CEM I 32,5	0,60	317	0,60%	Vorserie	1. Versuchs- reihe
S1	CEM III A 32,5	0,60	320	0,70%		
S2	CEM I 32,5	0,60	320		geändert	
S3	CEM III A 32,5	0,50	320	2,00%		
S4	CEM I 32,5	0,50	320	1,00%		
I	CEM I 32,5 R	0,60	320	0,80%		2. Versuchs- reihe
II	CEM III/B 32,5 R	0,60	320	1,10%		
III	CEM I 32,5 R	0,60	360	0,70%		
IV	CEM III/B 32,5 R	0,60	360	0,50%		
V	CEM I 32,5 R	0,50	320	1,30%		
VI	CEM III/B 32,5 R	0,50	320	1,50%		
VII	CEM I 32,5 R	0,50	360	1,00%		
VIII	CEM III/B 32,5 R	0,50	360	1,15%		
IX	CEM I 32,5	0,50	320	1,25%		3. Versuchs- reihe
X	CEM I 32,5	0,60	320	0,70%		
XI	CEM III/B 42,5*	0,50	320	1,30%		
XII	CEM III/B 42,5*	0,60	320	0,80%		
XIII	CEM I 32,5	0,55	320	6,50%		
XIV	CEM III/B 42,5*	0,55	320	4,20%		

*variiert gegenüber einem CEM III32,5 im Rahmen der 2. Versuchsreihe

Die Sieblinie wurde für alle Rezepturen gleich gehalten. Die entsprechenden Kornanteile sind in Tabelle 8 aufgeführt. Nur die Mischungen XIII und XIV enthielten einen Luftporenbildner.

Tabelle 8: Kornzusammensetzung

Sieblinie	Rheinsand 0/2	Rheinkies 2/8	Rheinkies 8/16
AB 16	31,5 %	36,5 %	32,0 %

7.1.2 Herstellung der Proben

Die Herstellung der Betone erfolgte unter gleichen Randbedingungen. Die Serien wurden mit einem Eirich-Intensivmischer R09 T angemischt. Als erstes wurden die gewogenen Gesteinskörnungen mit 1/3 der benötigten Wassermenge kurz vermischt und für drei Minuten ruhen gelassen, um die Gesteinskörnungen zu befeuchten. Anschließend wurden die Zementmenge und das restliche Wasser zugegeben und 90 Sekunden lang gemischt. Bei allen vier Mischungen wurden die folgenden Mischparameter eingehalten:

- Hoher Füllgrad
- Hohe Mischgeschwindigkeit
- Mischen im Gegenstrom

Durch die Wahl dieser Mischparameter sollte die Homogenität des Frischbetons gewährleistet werden. Die mit Frischbeton befüllten Formen, die gemäß CDF-/ CIF Prüfvorschrift mit 2 Teflonscheiben versehen waren, wurden 25 Sekunden verdichtet.

Nach der Herstellung wurden die Proben mit Plastikfolie abgedeckt, um das Austrocknen der Oberfläche zu verhindern. Nach einem Tag wurden die Proben ausgeschalt und bis zum Alter von sieben Tagen unter Wasser, gemäß der CDF-/CIF-Prüfvorschrift gelagert. Nach dem Zusägen der Proben auf die CDF/CIF-Standardabmessungen 150x110x70mm erfolgte die Klimakammerlagerung bei 20°C/ 65% rel. F. über eine Dauer von 21 Tagen. Entsprechend der Variation der Vorlagerungsbedingungen wurde die Serie S0 vergleichend für 6 Tage in Folie gelagert.

7.1.3 Frischbetonprüfung

Bei allen Mischungen wurden die Konsistenz, der Luftporengehalt und die Rohdichte unmittelbar nach dem Mischvorgang nach DIN EN 12350 Teil 5 bis Teil 7 ermittelt.

Die Ergebnisse der einzelnen Mischungen sind in Tabelle 9 aufgelistet. Da sich die hergestellten Mischungen durch Zementart, Zementgehalt und Wassergehalt unterschieden, reichen die Konsistenzen von plastisch bis fließfähig. Auf die Zugabe von verflüssigenden Betonzusatzmitteln wurde verzichtet. Der Luftporen-Gehalt [Vol.-%] und die Frischbetonrohichte der einzelnen Mischungen liegen etwa in vergleichbaren Größenordnungen.

Tabelle 9: Ergebnisse der Frischbetonprüfung

Serie	Zementart	w/z- Wert	Zement- gehalt [kg/m³]	Ausbreit- maß [cm]	Frischbeton- rohichte [kg/dm³]	Luftgehalt Frischbeton [%]	Druck- festigkeit [N/mm²]
S0	CEM I 32,5	0,60	317	39	2,35	0,60	44
S1	CEM III/A 32,5	0,60	320	42	2,36	0,70	36
S2	CEM I 32,5	0,60	320	<i>Mischung verworfen</i>			
S3	CEM III/A 32,5	0,50	320	40	2,32	2,00	46
S4	CEM I 32,5	0,50	320	43	2,35	1,00	51
I	CEM I 32,5 R	0,60	320	49	2,35	0,80	43
II	CEM III/B 32,5 R	0,60	320	46	2,34	1,10	38
III	CEM I 32,5 R	0,60	360	60	2,31	0,70	38
IV	CEM III/B 32,5 R	0,60	360	55	2,43	0,50	32
V	CEM I 32,5 R	0,50	320	36	2,40	1,30	50
VI	CEM III/B 32,5 R	0,50	320	37	2,40	1,50	42
VII	CEM I 32,5 R	0,50	360	41	2,40	1,00	50
VIII	CEM III/B 32,5 R	0,50	360	37	2,40	1,15	43
IX	CEM I 32,5	0,50	320	37	2,39	1,25	58
X	CEM I 32,5	0,60	320	48	2,38	0,70	46
XI	CEM III/B 42,5*	0,50	320	35	2,39	1,30	57
XII	CEM III/B 42,5*	0,60	320	55	2,36	0,80	44
XIII	CEM I 32,5	0,55	320	47	2,24	6,50	37
XIV	CEM III/B 42,5*	0,55	320	43	2,30	4,20	49

*variiert gegenüber einem CEM III32,5 im Rahmen der 2. Versuchsreihe

7.2 Frost-Tausalzprüfung – Variation der Rand- und Prüfbedingungen

7.2.1 Darstellung der Ergebnisse

In den folgenden Abschnitten sind die Variationen der Versuchsparameter und die Einflüsse, die sich aus diesen auf die Abwitterung, die Feuchteaufnahme sowie die innere Schädigung ergeben aufgeführt. Dadurch werden die Ergebnisse der drei Versuchsreihen in Abhängigkeit der jeweiligen Rand- und Prüfbedingungen dargestellt.

Im Alter von 28 Tagen wurden die Probekörper der Frost- und Frost-Tausalzprüfung ausgesetzt, unter Beachtung der bereits in Tabelle 6 vorgestellten Variationen der Prüfrandbedingungen, wie z.B. der Änderung der Dauer der Vorsättigung, der Minimaltemperatur und der NaCl-Konzentration. Die Variation des Temperaturzyklus (Abbildung 9) sah eine Anhebung der Minimaltemperatur von -20 °C auf -10 °C bei ansonsten gleicher Abkühl- und Auftaurate vor.

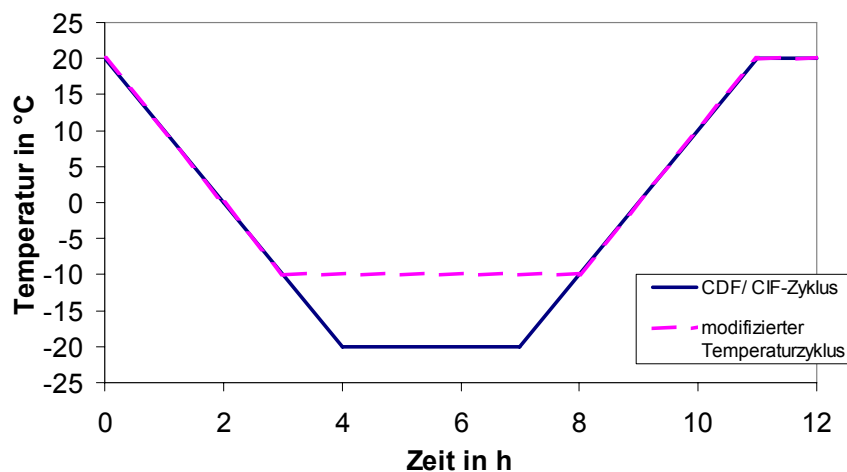


Abbildung 9: Modifizierter Temperaturzyklus bei Reduzierung der Minimaltemperatur auf -10 °C

Alle Serien wurden bis zum 28. Frost-Tau-Wechsel untersucht. In Abständen von 4-6 Frost-Tau-Wechseln erfolgte die Messung der entsprechenden Messparameter - Abwitterung, Feuchteaufnahme, innere Schädigung - gemäß Prüfvorschrift. Die Auswertung der Ergebnisse wurde ebenfalls nach standardisierten Methoden vorgenommen.

Nachfolgend sind die Ergebnisse der verschiedenen Versuchsreihen in der zeitlichen Reihenfolge aufgeführt. Die **relative Feuchteaufnahme** [M.-%] ist wie üblich als Massenzunahme infolge der Aufnahme von Prüfflüssigkeit über die Prüfdauer abgebildet. Es wird zwischen kapillarem Saugen und Frostsaugen unterschieden, so dass die Frostbelastung im Nullpunkt beginnt. Bei gleicher Vorbehandlung, d.h. bei glei-

cher Vorlagerungsart und -dauer des kapillaren Saugens ist der Start des Frostsaugens als Nullpunkt für die Darstellung der Feuchteaufnahme sinnvoll.

Die **Abwitterung**, in g/m^2 auf die Prüffläche bezogen, ist nachfolgend ebenfalls wie gewohnt über die Anzahl an FTW aufgetragen worden, wobei für Vergleiche zwischen den einzelnen Serien auch Balkendiagramme mit Angabe der Gesamtabwitterung gewählt wurden. Für Letztere wurde als Richtwert eine mittlere Abwitterungsmenge von 1500 g/m^2 als Schädigungskriterium zugrunde gelegt, das für den CDF-Test und damit für eine XF4 Exposition nach 28 FTW festgelegt worden ist. Die Beurteilung des Frostwiderstandes kann über die Anzahl an FTW, die bis zum Erreichen dieses Schädigungskriteriums benötigt wurden, vorgenommen werden (z.B. XF4 nach 28 FTW). Bei den Darstellungen wurde grundsätzlich bei einer Abwitterung oberhalb von 5000 g/m^2 aufgrund der starken Streuung auf eine weitere Abbildung der Ergebnisse verzichtet.

Die Bestimmung der inneren Schädigung erfolgte gemäß Prüfvorschrift über die Änderung des **relativen dynamischen E-Moduls**. In den Diagrammen ist nachfolgend der rel. dyn.-E-Modul sowohl über die Zeit als auch in Abhängigkeit der Feuchteaufnahme aufgetragen, wobei der Zeitpunkt des kritischen Sättigungsgrades deutlich zu erkennen ist. Bei den Darstellungen wurde grundsätzlich bei einem Abfall des E-Moduls unter 40% aufgrund der starken Streuung auf eine weitere Abbildung der Ergebnisse verzichtet.

7.2.2 Einfluss der Nachbehandlung

In einem ersten Schritt wurde der Einfluss der Nachbehandlung untersucht, um darüber die spätere Feuchteaufnahme bzw. den Sättigungsgrad zu Beginn der Frostprüfung zu variieren (1. Versuchsreihe). Hierzu wurde ein Teil der Probekörper nach dem Ausschalen nicht 7 Tage gemäß Prüfvorschrift unter Wasser, sondern in Folie verpackt gelagert. Anschließend wurden alle Proben für 21 Tage dem Normklima von 20°C und 65% r. F. ausgesetzt. Die somit unterschiedlich gelagerten Probekörper wurden sowohl mit 0% NaCl (CIF) als auch 3% NaCl (CDF) geprüft.

In Abbildung 10 bis Abbildung 13 sind die Ergebnisse der Serie S0, die mit Portlandzement und einem $w/z=0,60$ hergestellt wurde, wiedergegeben. Die Feuchteaufnahme spiegelt wieder, dass der Einfluss dieses Variationsparameters als relativ gering einzustufen ist. Die Folienlagerung führt erwartungsgemäß zu etwas niedrigeren Werten innerhalb der Feuchteaufnahme und bewirkt somit ein späteres Einsetzen einer inneren Schädigung (Abbildung 11) im Vergleich zur Wasserlagerung.

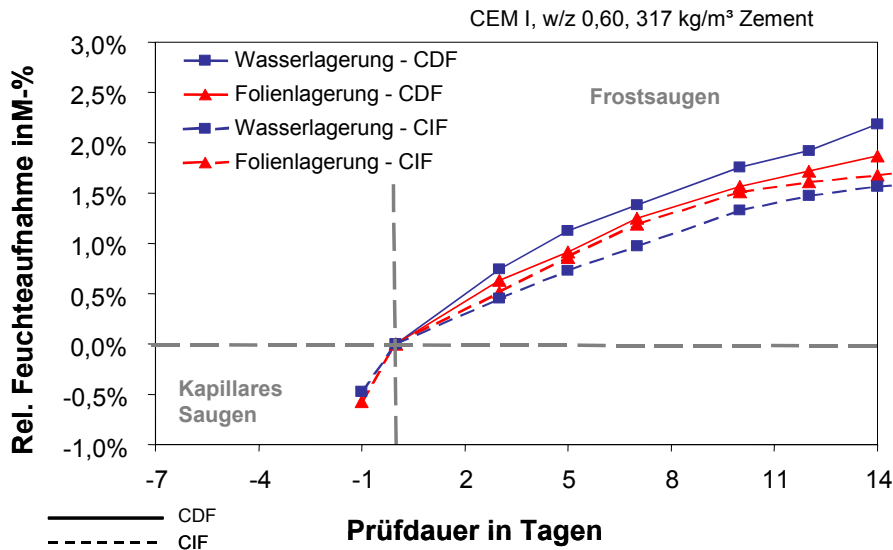


Abbildung 10: Feuchteaufnahme der Serie S0 – Variation der Art der **Nachbehandlung**. Prüfung mit 0% und 3% NaCl-Lösung (1d kapillares Saugen)

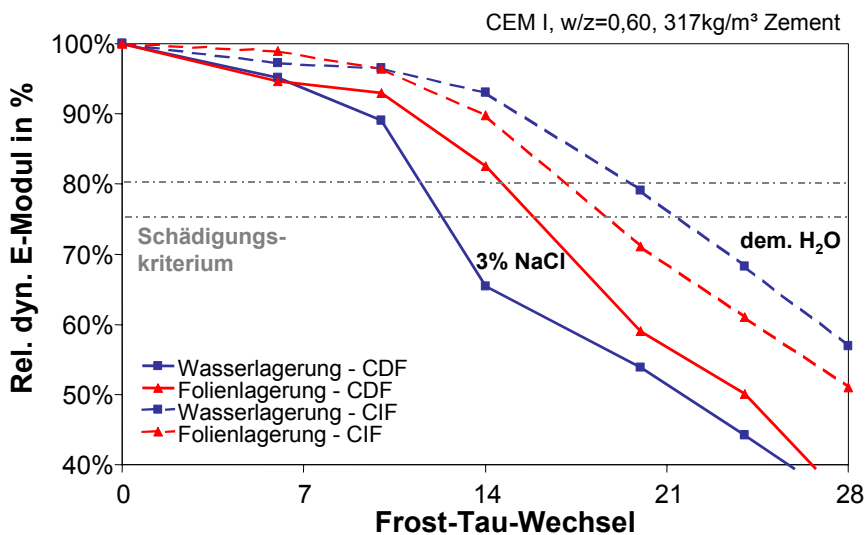


Abbildung 11: Rel. dyn. E-Modulabfall der Serie S0 – Variation der Art der **Nachbehandlung**. Prüfung mit 0% und 3% NaCl-Lösung (1d kapillares Saugen).

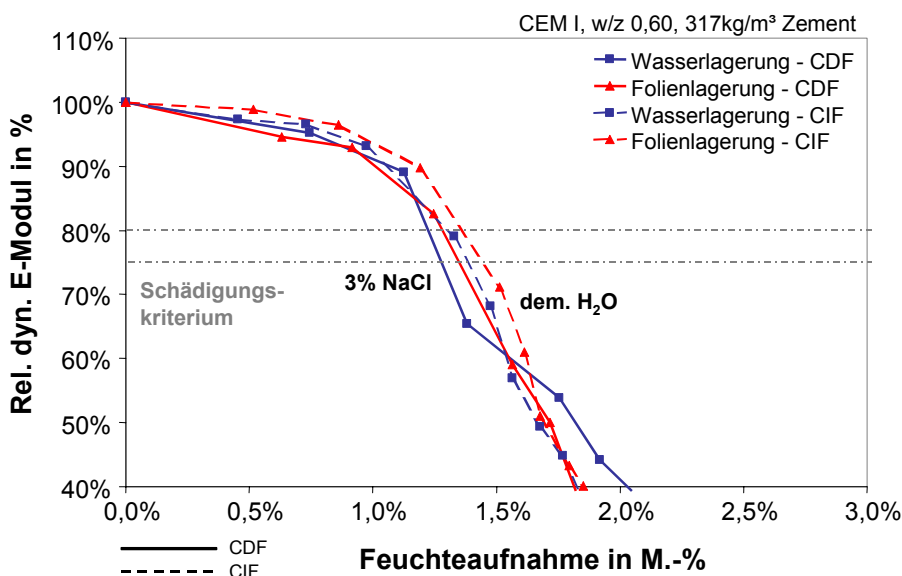


Abbildung 12: Rel. dyn. E-Modulabfall in Abhängigkeit der Feuchteaufnahme der Serie S0 – Variation der Art der **Nachbehandlung**. Prüfung mit 0% und 3% NaCl-Lösung (1d kapillares Saugen)

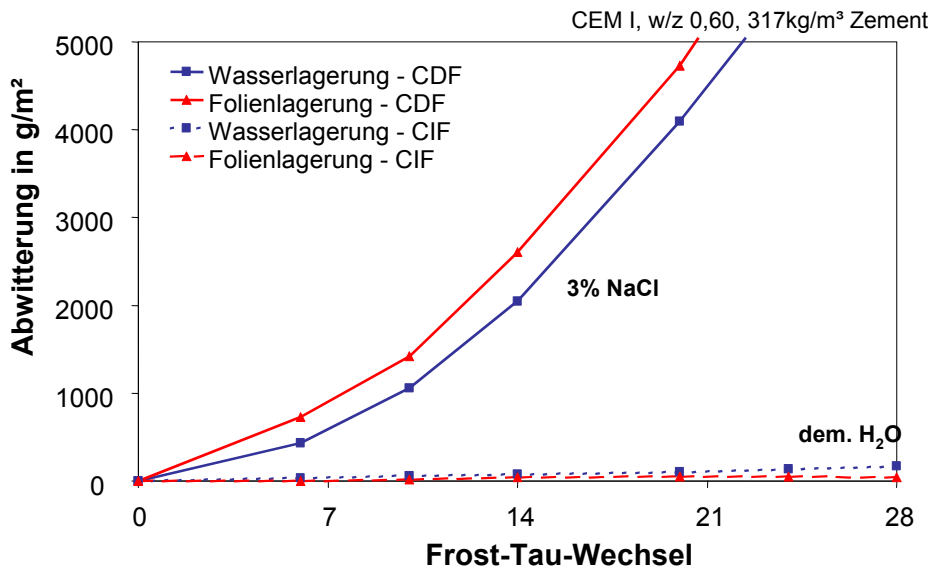


Abbildung 13:
Abwitterung der Serie S0 – Variation der Art der **Nachbehandlung**. Prüfung mit 0% und 3% NaCl-Lösung (1d kapillares Saugen).

Insbesondere bei der Abwitterung ergeben sich aber keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des Grades der äußeren Schädigung (Abbildung 13). Eine gezielte Abschwächung scheint also mit dieser Variation eher schwierig zu sein und wurde als nicht zweckmäßig beurteilt. Weitere Untersuchungen mit anderen Betonzusammensetzungen wurden daraufhin nicht weiter verfolgt.

7.2.3 Einfluss der Vorsättigungsdauer

Als ein weiterer Variationsparameter wurde die Verkürzung der Vorsättigungsdauer in das Prüfprogramm integriert. Dadurch sollte eine Verringerung der kapillaren Wasseraufnahme und damit Reduzierung der Feuchteaufnahme während der Befrostung simuliert werden. Die der 21-tägigen Klimakammerlagerung folgende Vorlagerung zur kapillaren Wassersättigung wurde von 7 Tagen gemäß Prüfvorschrift auf 1 bzw. 0 Tage verkürzt. Die unterschiedlich gelagerten Probekörper wurden sowohl bei 0% NaCl (CIF) als auch bei 3% NaCl (CDF) geprüft.

In Abbildung 14, in der die Feuchteaufnahme der Serie S4 (CEM I; w/z=0,50; Z=320 kg/m³) in Abhängigkeit der Prüfdauer exemplarisch aufgetragen ist, lässt sich erkennen, dass das Frostsaugen schnell den unterschiedlichen kapillaren Sättigungsgrad infolge der verkürzten Saugzeit kompensiert. Unabhängig von der Wahl der Prüflösung erreicht die Feuchteaufnahme während des Frostsaugens infolge der Verkürzung der kapillaren Vorlagerung im Vergleich zur Referenzbehandlung höhere Werte. Es wird deutlich, dass die 7-tägige Vorlagerung zur geringsten Feuchteaufnahme während der Befrostung führt.

Bei der Darstellung der Ergebnisse der Abwitterung hingegen wirkt sich die unterschiedliche Vorsättigungsdauer kaum auf das Schädigungsverhalten aus.

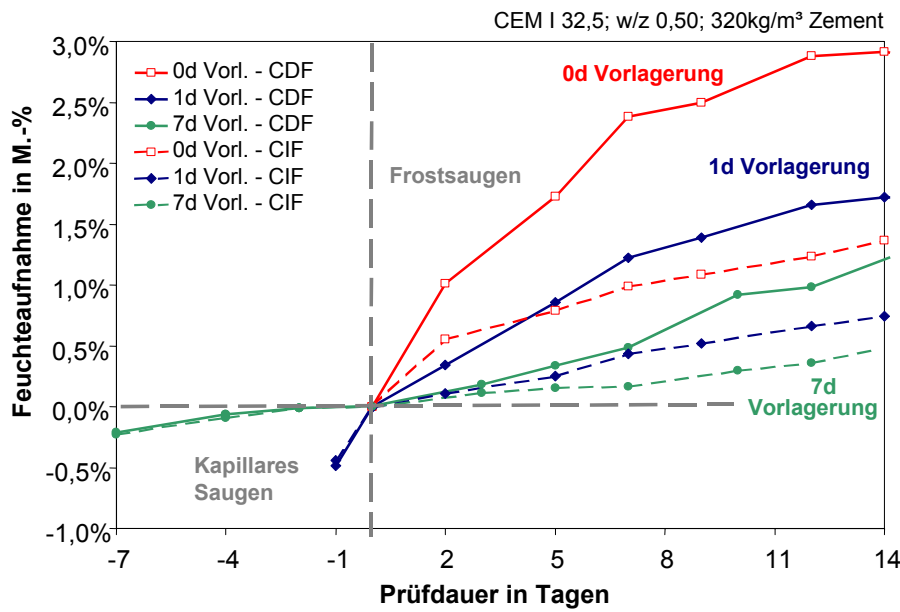


Abbildung 14:
 Feuchteaufnahme
 der Serie S4 –
 Variation der **Dauer
 der Vorsättigung**.
 Prüfung mit 0 und
 3% NaCl-Lösung.

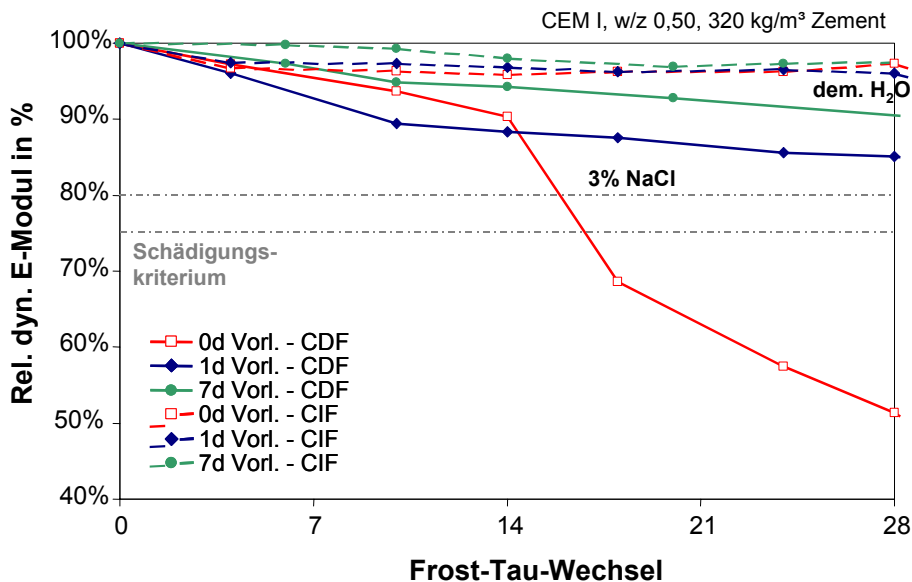


Abbildung 15: E-
 Modulverlauf der
Serie S4 - Variation
 der **Dauer der
 Vorsättigung**.
 Prüfung mit 0 und
 3% NaCl-Lösung.

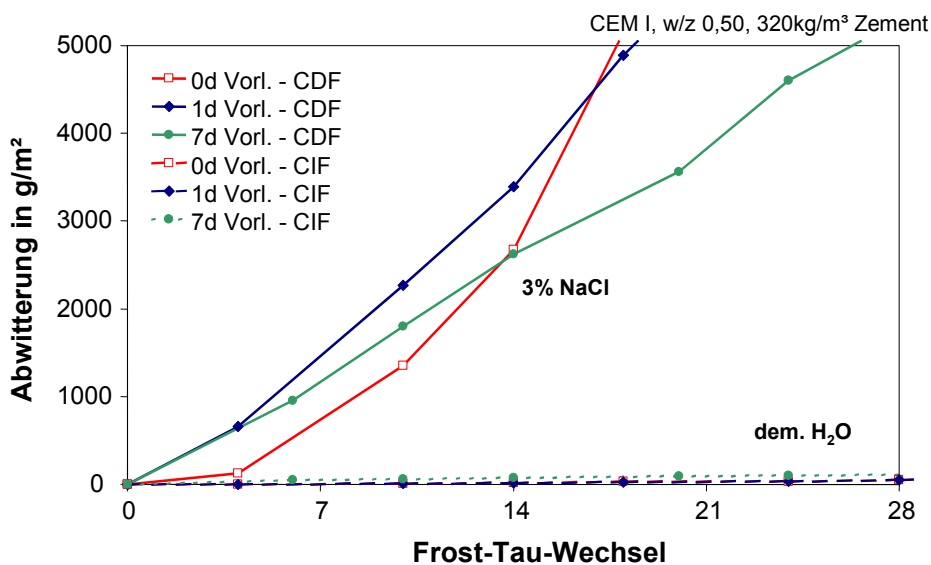


Abbildung 16:
 Abwitterung der
Serie S4 - Variation
 der **Dauer der
 Vorsättigung**.
 Prüfung mit 0 und
 3% NaCl-Lösung.

Bei dem Abfall des rel. dyn. E-Moduls, der direkt mit der Feuchtaufnahme korrelierbar ist, zeigt sich die bereits zu beobachtende schneller eintretende Schädigung bei kürzer vorgelagerten Proben im Vergleich zur Referenzbehandlung (7d). Dieses Verhalten lässt sich auch anhand Abbildung 17 bestätigen, in der die innere Schädigung über die Prüflösungsaufnahme der Serie S0 ($w/z=0,60$) aufgetragen ist. Zwischen 0 und einem Tag kapillarer Vorlagerung kommt es bei dieser Serie infolge des höheren w/z -Wertes zu deutlichen Unterschieden hinsichtlich des kritischen Sättigungsgrades während der Befrostung und zwar unabhängig von der verwendeten Prüflösung.

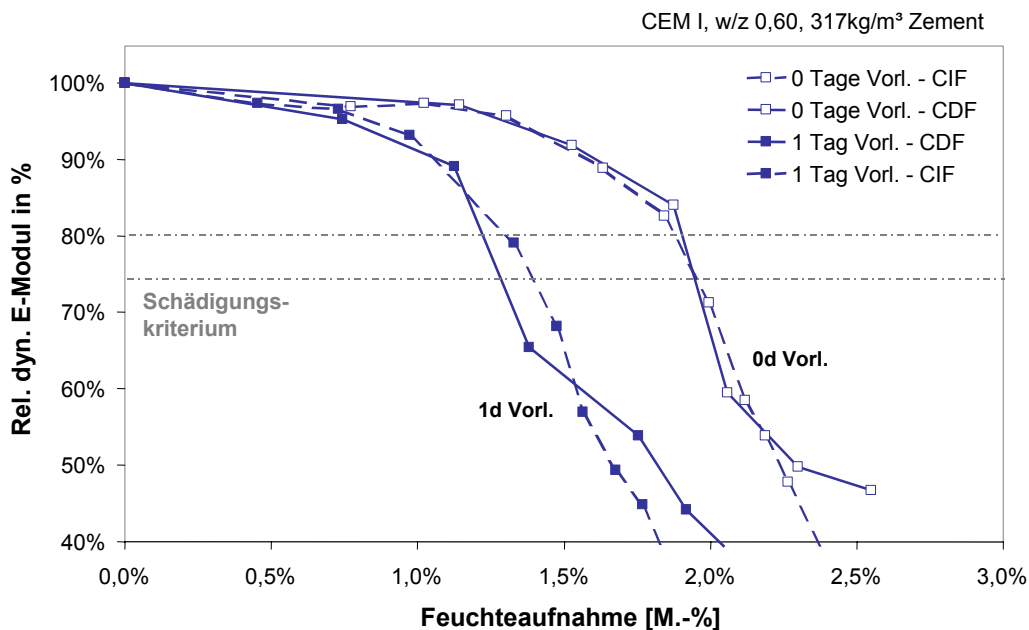


Abbildung 17: E-Modulverlauf in Abhängigkeit der Feuchtaufnahme der Serie S0 (CEM I mit w/z -Wert 0,60) – Unterschiedliche **Dauer der Vorsättigung**, dargestellt bis 56 FTW. Prüfung mit 0 und 3% NaCl-Lösung.

Eine Abschwächung des Frost-Tausalzangriffes durch die Reduzierung der Feuchtaufnahme mittels zeitlicher Verkürzung der kapillaren Vorsättigung lässt sich somit während der Befrostung nicht gezielt erreichen. Das Frostsaugen kompensiert in kürzester Zeit das kapillare Saugen und führt dazu, dass eine beschleunigte Feuchtaufnahme während der zyklischen Belastung verzeichnet werden kann.

7.2.4 Einfluss der Wechsellagerung

In diesem Teil der Untersuchungen sollte der Einfluss einer sogenannten Wechsellagerung auf das Abwitterungsverhalten, die Feuchtaufnahme und die innere Schädigung analysiert werden. Damit sollte eine Schädigungsreduzierung durch die Simulation des Austrocknens realisiert werden. Die Proben wurden dazu in Intervallen ohne Prüflösung der Frost-Tau-Wechselbelastung ausgesetzt, um eine weitere

Feuchtaufnahme während dieser Zeit zu verhindern. Es wurde sowohl mit einer 3%igen NaCl-Lösung als auch mit demineralisiertem Wasser geprüft.

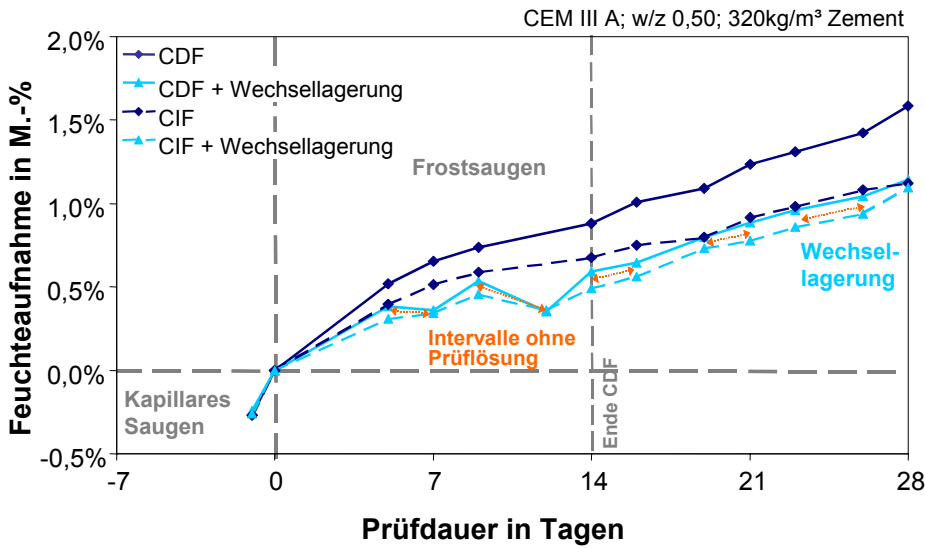


Abbildung 18: Feuchtaufnahme der Serie S1 – Variation **Wechsellagerung** (1d kap. Saugen!), dargestellt bis 56 FTW. Prüfung mit 0 und 3% NaCl-Lösung.

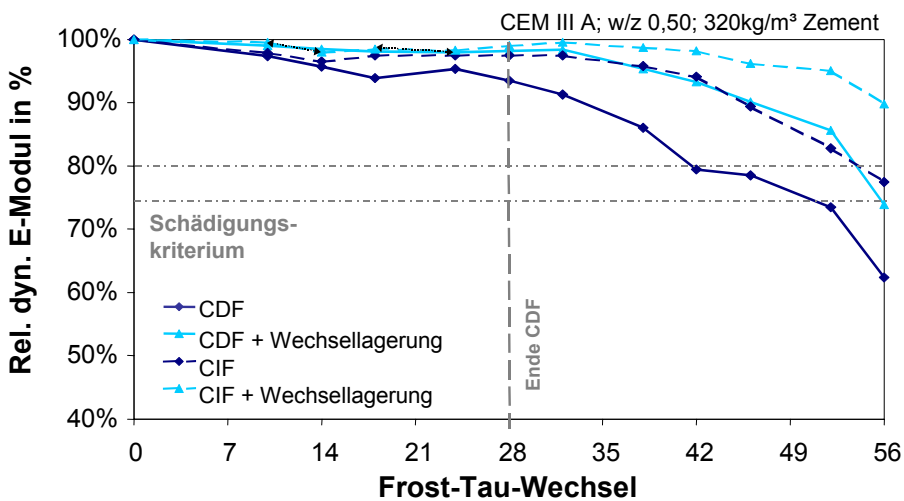


Abbildung 19: E-Modulverlauf der Serie S1 – Variation **Wechsellagerung** (1d kap. Saugen!), dargestellt bis 56 FTW. Prüfung mit 0 und 3% NaCl-Lösung.

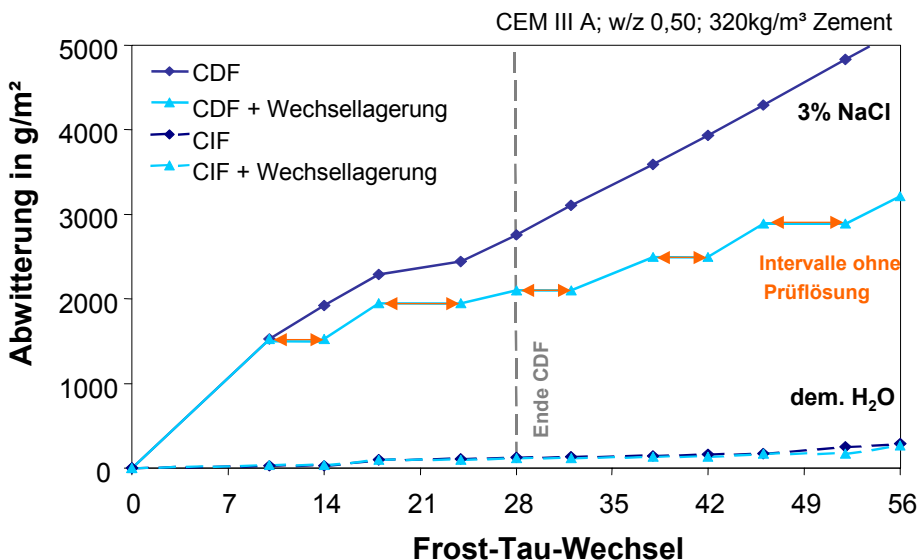


Abbildung 20: Abwitterung der Serie S1 – Variation **Wechsellagerung** (1d kap. Saugen!), dargestellt bis 56 FTW. Prüfung mit 0 und 3% NaCl-Lösung.

Die Feuchtaufnahme verringert sich gegenüber der normalen Prüfung bei Verwendung von demineralisiertem Wasser durch die Wechsellagerung nur unwesentlich,

während bei einer 3%-igen Lösung eine Reduzierung der Prüflösungsaufnahme zu verzeichnen ist. Zu Beginn der Prüfung findet sogar zeitweise eine leichte Rücktrocknung der Proben statt (Abbildung 18).

In Abbildung 20 spiegelt sich die reduzierte Feuchteaufnahme bei Verwendung einer Tausalzlösung auch in dem Abwitterungsverlauf wieder, allerdings erst zu einem deutlich späteren Zeitpunkt (Unterschied nach 56 FTW um ca. 2500 g/m²!). Nach 28 Frost-Tau-Wechseln hingegen sind die Unterschiede innerhalb der abgewitterten Materialmenge zwischen der normalen Prüfung und der Intervallprüfung deutlich geringer. Der Unterschied liegt bei 660 g/m². Nach 14 Frost-Tau-Wechseln hat sich der Unterschied auf ca. 200 g/m² reduziert und lässt eine Differenzierung zwischen diesen beiden Prüfvariationen kaum noch zu. Damit wird deutlich, dass erst ab einer Verlängerung der Prüfdauer eine Abschwächung erzielt und ein Unterschied innerhalb der Prüfergebnisse beobachtet werden kann. Die Prüfdauer wird durch die Maßnahme der Wechsellagerung also nur unnötig verlängert.

Es kann geschlussfolgert werden, dass die Unterbrechung der Prüflösungszufuhr durch Perioden, in denen keine äußere Feuchteaufnahme möglich ist, während der Belastung das Frostsaugen stoppt bzw. reduziert, gleichzeitig wird aber auch bewirkt, dass die Schädigungsmechanismen unterbrochen werden. Für die Praxis kann geschlussfolgert werden, dass ein Schaden also nur fortschreitet, wenn Frost-Tau-Wechsel und Flüssigkeitsangriff gleichzeitig einwirken.

7.2.4.1 Einfluss der NaCl-Konzentration

Hohe Konzentrationen (NaCl ≥ 3%)

Die Erhöhung der NaCl-Konzentration sollte zu einer Reduzierung der gefrierbaren Wassermenge führen und somit den Angriff entsprechend abschwächen. Die Untersuchungen beinhalteten folgende NaCl Abstufungen, denen die verschiedenen Betonserien ausgesetzt wurden (s. auch Tabelle 6):

- Variation der NaCl-Konzentration 8%, 9%, 10%, 11%, 12%, 15%, 18% im Vergleich zur Prüfung mit dem. Wasser (CIF) und der Standardprüfung mit 3% NaCl (CDF)

Die Feuchteaufnahme ist in Abbildung 21 anhand der Mischung V, die mit einem Portlandzement und einem w/z-Wert von 0,50 hergestellt wurde, exemplarisch dargestellt. Während die Feuchteaufnahme wie auch die innere Schädigung (Abbildung 22) keine Unterscheidung zwischen den einzelnen Konzentrationen zulässt, zeigt sich bei der Abwitterung eine eindeutige Staffelung in Abhängigkeit der Tausalzkonzentration (Abbildung 23). Bei 3% NaCl-Lösung liegt ein Schädigungsmaximum vor.

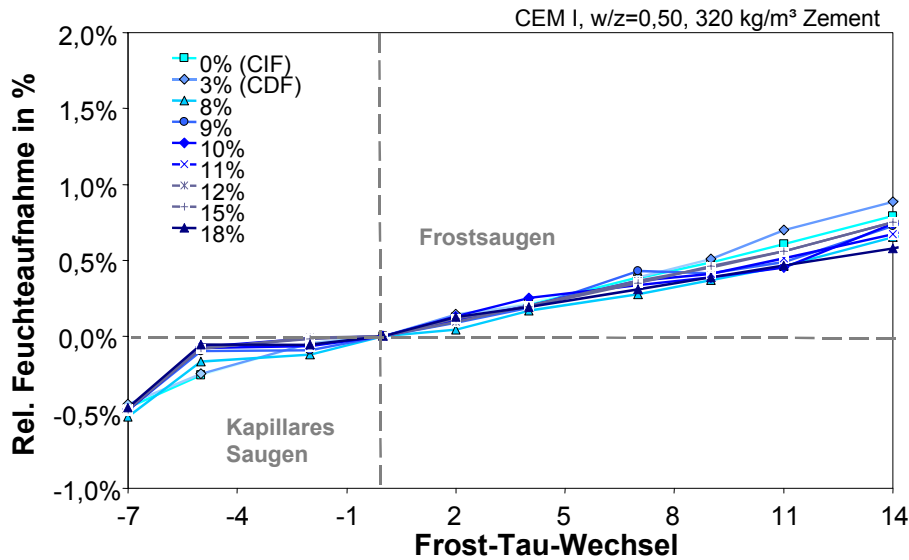


Abbildung 21: Feuchteaufnahme der Serie V - Prüfung mit höheren NaCl-Konzentrationen.

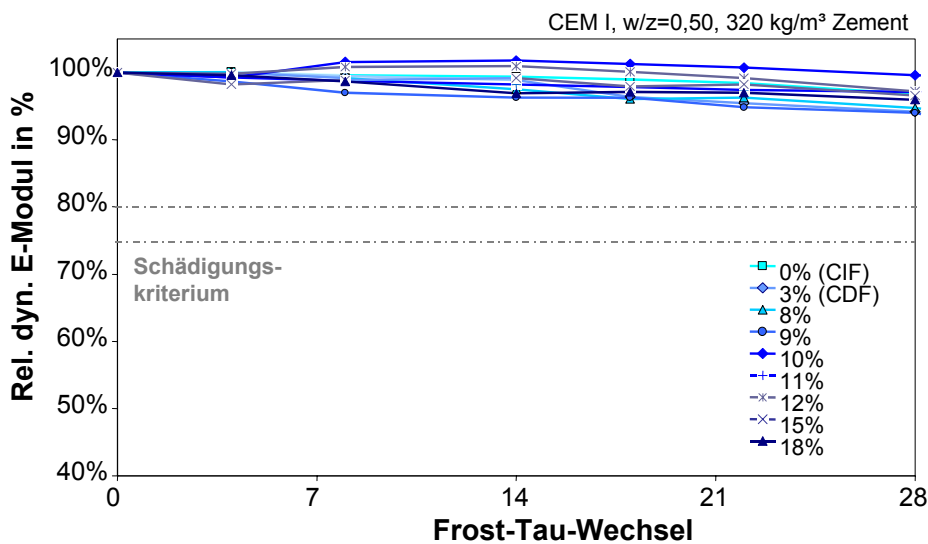


Abbildung 22: E-Modulverlauf der Serie V - Prüfung mit höheren NaCl-Konzentrationen.

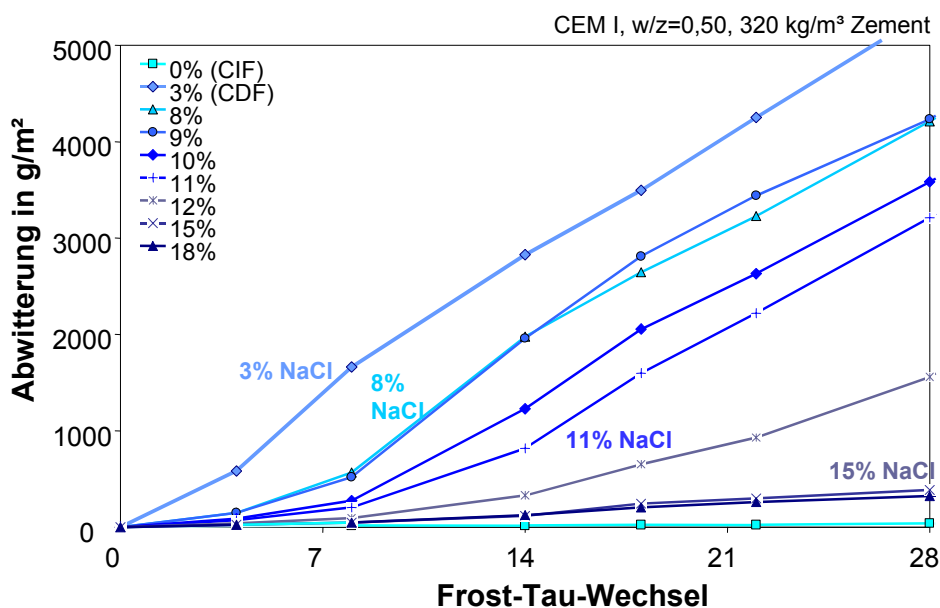


Abbildung 23: Abwitterung der Serie V - Prüfung mit höheren NaCl-Konzentrationen.

Gleiches gilt auch bei Verwendung höherer w/z-Werte (Serie I), wobei hier die innere Schädigung eine bessere Unterscheidung zwischen den einzelnen Konzentrationen aufgrund der höheren Feuchteaufnahme zulässt (Abbildung 24). Allerdings zeigen

sich die Änderungen erst zu einem späteren Zeitpunkt.

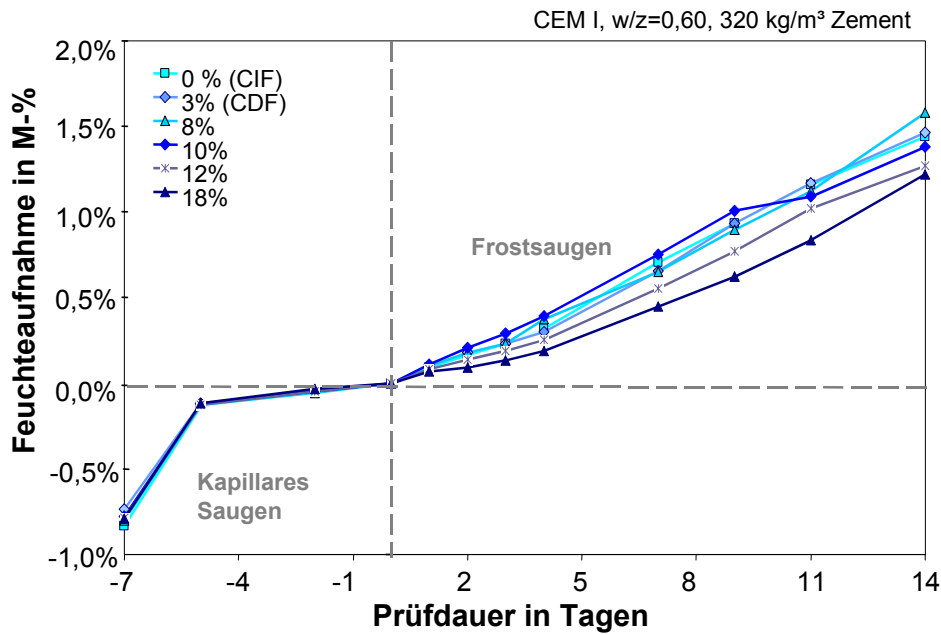


Abbildung 24: Feuchteaufnahme der Serie I (w/z 0,60) - Prüfung mit **höheren NaCl-Konzentrationen**.

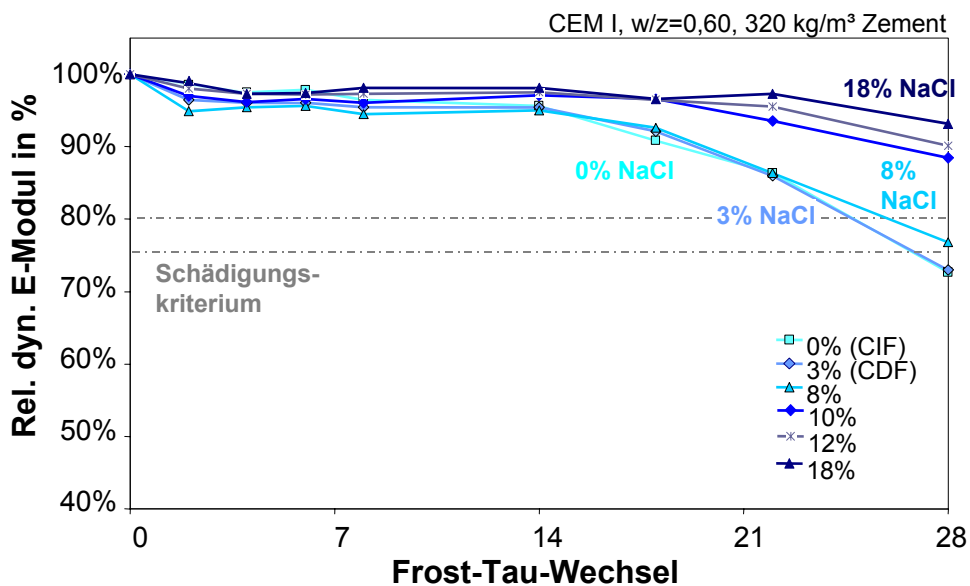


Abbildung 25: E-Modulabfall der Serie I (w/z 0,60) - Prüfung mit **höheren NaCl-Konzentrationen**.

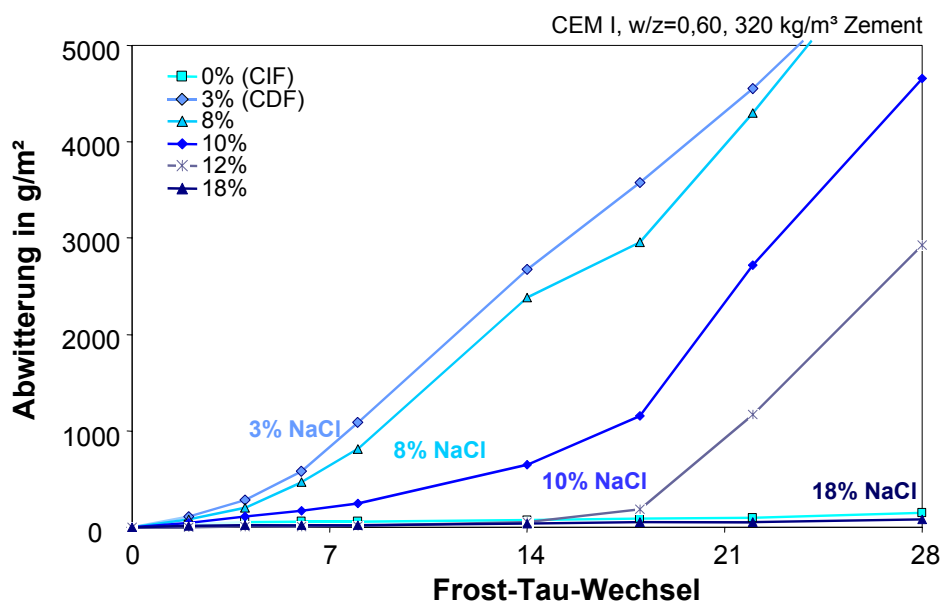


Abbildung 26: Abwitterung der Serie I (w/z 0,60) - Prüfung mit **höheren NaCl-Konzentrationen**.

Anhand dieser Darstellungen wird deutlich, dass unabhängig von der Wahl der Betonzusammensetzung eine 3%-ige NaCl-Lösung eine maximale äußere Schädigung bewirkt. Gegenüber einer Prüflösung aus demineralisiertem Wasser erhöht sich die Abwitterung z. B. nach 14 FTW bereits um den Faktor 10.

Die Abwitterung wird also durch die Erhöhung der NaCl-Konzentration reduziert, wobei NaCl-Konzentrationen oberhalb von 10% die Abwitterung soweit herabsetzen, dass eine klare Trennung zwischen den Betonqualitäten nicht mehr möglich ist. Bei 8% ist der Unterschied hingegen zu einer 3% Lösung nicht ausgeprägt genug, als dass von einer deutlichen Abschwächung des Schadenangriffes gesprochen werden könnte. Die Feuchteaufnahme zeigt sich hingegen nahezu unbeeinflusst von der Konzentration der Tausalzlösung.

Niedrige Konzentrationen (NaCl \leq 3%)

Neben dem Einsatz höherer Konzentrationen wurde auch der Bereich zwischen 0% und 3% NaCl eingehend untersucht, um zwischen dem scheinbaren Schädigungsmaximum bei 3% eine mögliche Abschwächung durch niedrig konzentrierte Lösungen zu erreichen. An repräsentativen Betonserien wurden deshalb die Abstufungen 0,1%; 0,5% und 1%, (2%) im Vergleich zu 0% bzw. 3% untersucht (s. Tabelle 6).

Beim Vergleich der Abwitterungsmengen in Abbildung 27 zwischen den verschiedenen niedrig dosierten NaCl-Konzentrationen fällt auf, dass das Schädigungsmaximum bei einer Lösungskonzentration zwischen 1 und 3% NaCl zu liegen scheint. Sowohl bei der Mischung mit einem Portlandzement als auch unter Verwendung eines Hochofenzementes sind die Unterschiede in diesem Bereich marginal. In beiden Fällen steigt die Abwitterung sprunghaft an.

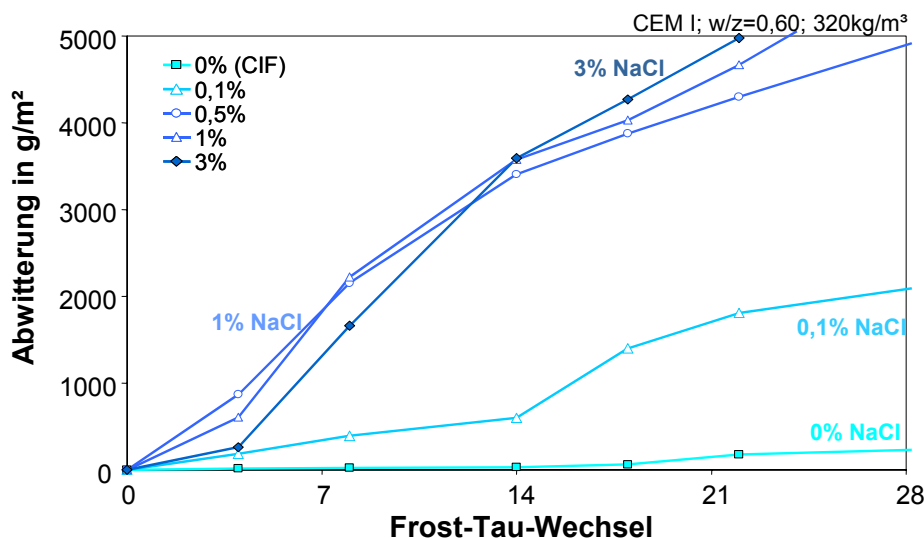


Abbildung 27:
Abwitterung der Serie X (CEM I) - Prüfung mit niedrigen NaCl-Konzentrationen.

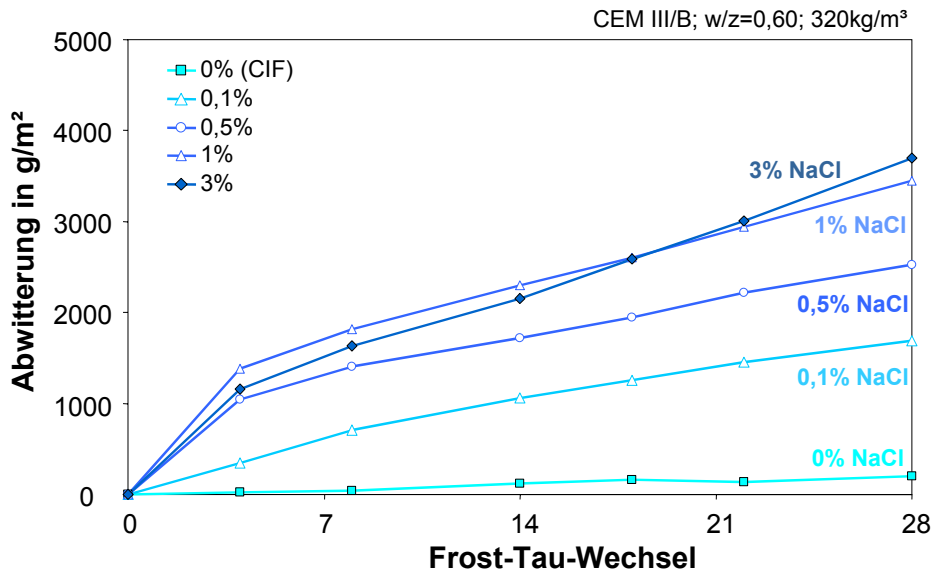


Abbildung 28:
Abwitterung der Serie XII (CEM III/B) -Prüfung mit **niedrigen NaCl-Konzentrationen**.

Bei der HOZ-Mischung kommt es allerdings zu einer deutlicheren Abstufung der Abwitterung unterhalb von 1% NaCl-Konzentration (Abbildung 28). Die Ergebnisse zeigen zudem, dass schon eine Zugabe von 0,1 M.-% NaCl eine signifikante Zunahme der Abwitterung gegenüber reinem Wasser bewirkt. Hier erhöht sich die Menge an abgewitterten Partikeln nach 28 FTW um den Faktor 12.

Während die Abwitterung eine deutliche Unterscheidung und auch Abstufung der NaCl-Konzentrationen zulässt, weisen die Ergebnisse der Feuchteaufnahme und inneren Schädigung geringere Veränderungen auf. Abbildung 29 bis Abbildung 32 enthält die Daten der beiden zuvor vorgestellten Serien.

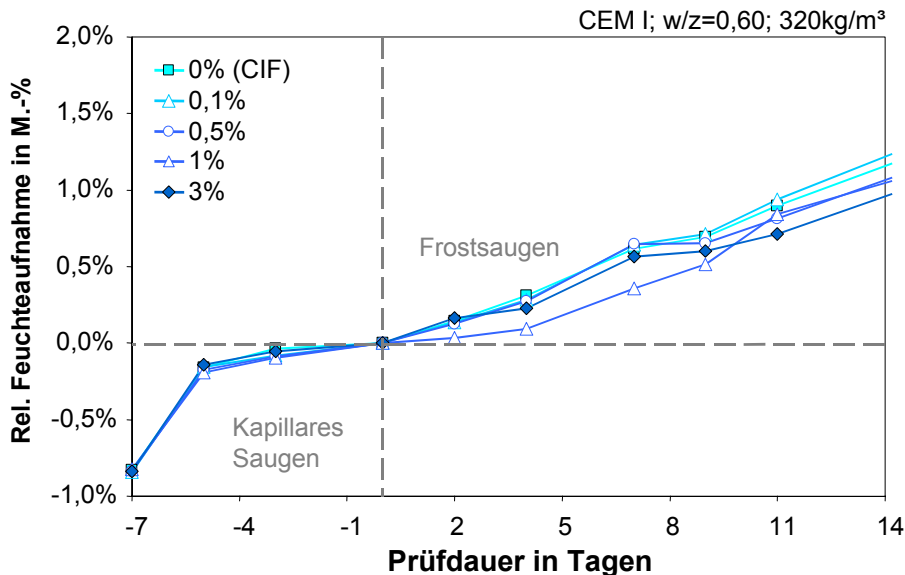


Abbildung 29:
Feuchteaufnahme der Serie X (CEM I w/z 0,60) - Prüfung mit **niedrigen NaCl-Konzentrationen**.

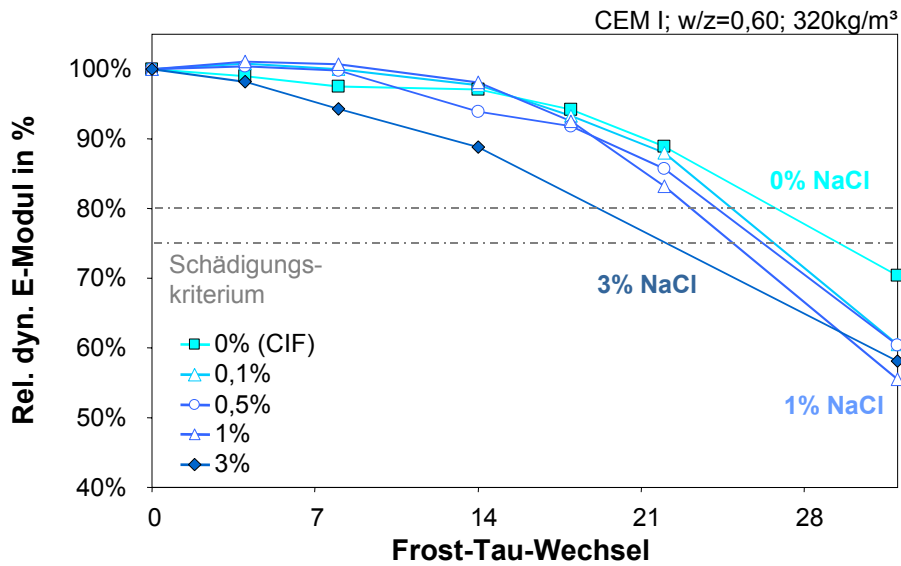


Abbildung 30: E-Modulverlauf der Serie X (CEM I w/z 0,60) - Prüfung mit niedrigen NaCl-Konzentrationen.

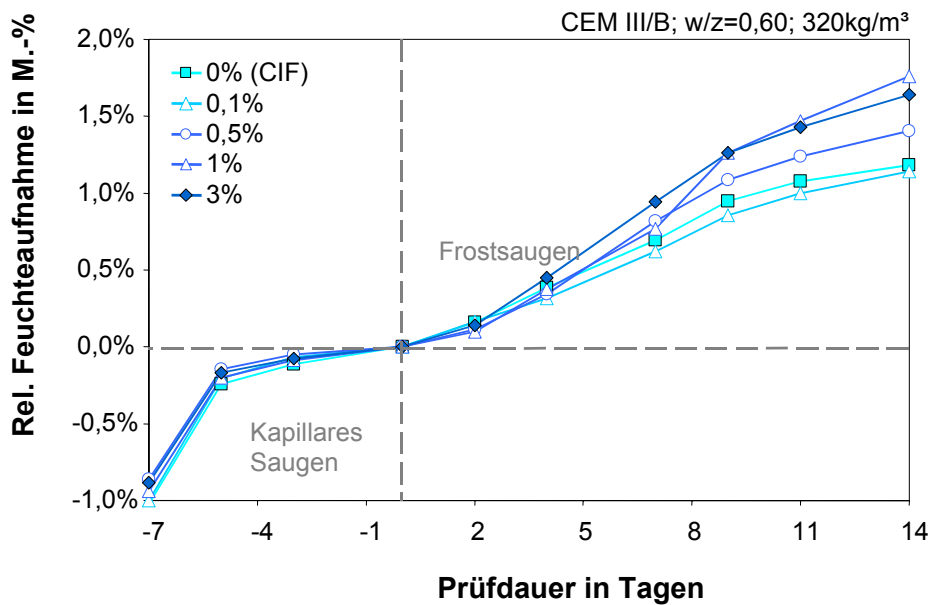


Abbildung 31: Feuchteaufnahme der Serie XII (CEM III/B w/z 0,60) - Prüfung mit niedrigen NaCl-Konzentrationen.

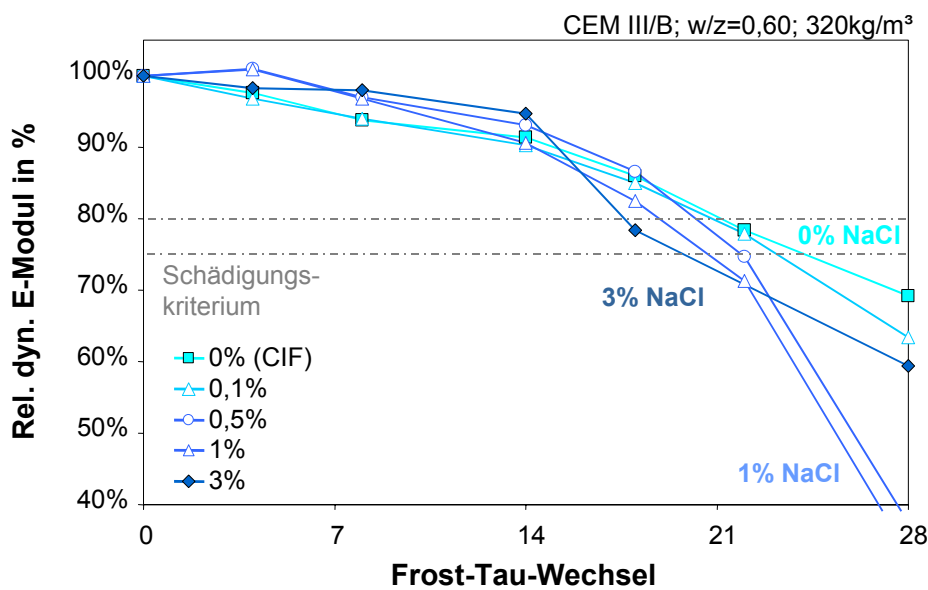


Abbildung 32: E-Modulverlauf der Serie XII (CEM III/B w/z 0,60) - Prüfung mit niedrigen NaCl-Konzentrationen.

Die Feuchteaufnahme und somit auch die innere Schädigung zeigt zwar gerade auch an dem Beispiel der Hochofenzementmischung (Serie XII), dass eine 0,1% NaCl-

Lösung eine Reduzierung der Schädigung bewirkt, allerdings sind die Unterschiede nicht annähernd so deutlich zu erkennen, wie es bei der Betrachtung der Abwitterung der Fall ist (s. Abbildung 32). Die Abwitterung stellt sich hierbei erneut als der geeigneteren Parameter zur Beurteilung des Schädigungsausmaßes in Abhängigkeit der untersuchten Variationen dar.

NaCl-Konzentrationen von 0% bis 18%

An dieser Stelle sei die Bandbreite der verschiedenen untersuchten NaCl-Konzentrationen anhand einer Betonmischung dargestellt. Die Ergebnisse zeigen nachfolgend die Abwitterung einer Serie mit Portlandzement und einem w/z-Wert von 0,50 (Serie V und IX). Die Staffelung der Abwitterungsmengen in Abhängigkeit der NaCl-Konzentration kann am Beispiel dieser Abbildung deutlich verfolgt werden. Zwischen 0% und 0,1% NaCl-Lösung liegen bereits gravierende Unterschiede innerhalb der abgewitterten Materialmenge vor. Zwischen 1 und 2% liegt dann bei dieser Mischung das Maximum der äußeren Schädigung. Oberhalb von 3% nimmt der Grad der Schädigung wieder mit steigender Tausalzkonzentration ab.

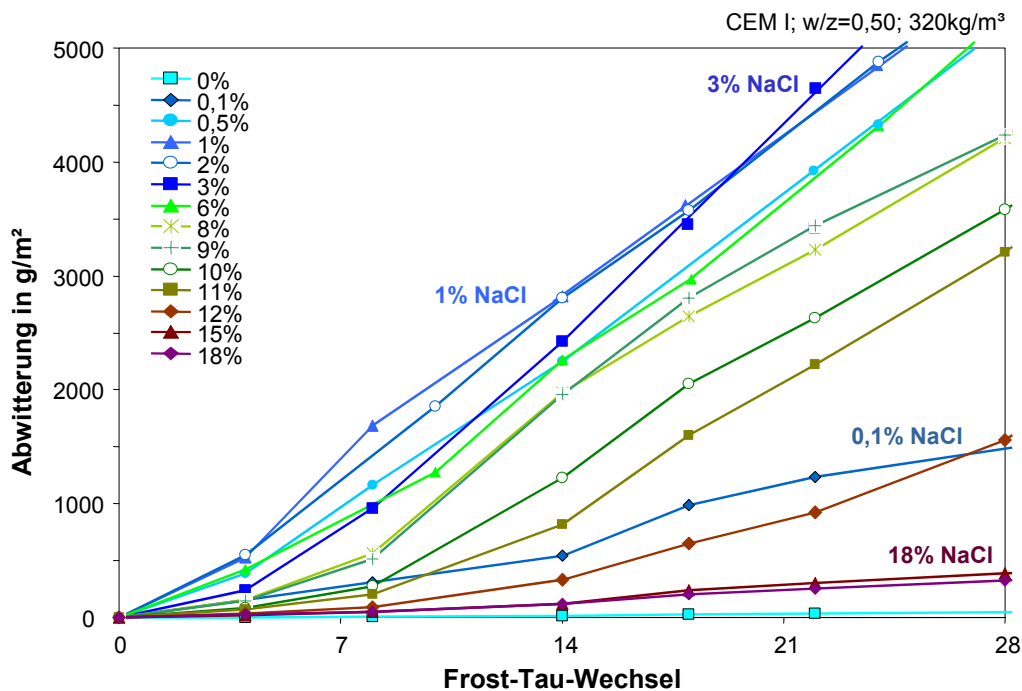


Abbildung 33: Abwitterung der Serien V u. IX (CEM I, w/z 0,50). Prüfung mit NaCl-Konzentrationen von **0 bis 18%**, dargestellt bis 28 FTW und 5000g/m²

Deutlicher lässt sich dieses Verhalten während der ersten Frost-Tau-Wechsel und bei geringerer Skalierung der Abwitterungsergebnisse beobachten. In Abbildung 34 und Abbildung 35 ist die Abwitterung bis zum 14. FTW und einer Abwitterungsmenge von 3000 g/m² aufgetragen. Bei Erhöhung der Tausalzkonzentration von 0,1% auf 0,5% steigt die Zunahme der Abwitterung um knapp 1500 g/m² nach 14 FTW sprunghaft an. Zu diesem Zeitpunkt sind die Unterschiede in der Menge der abgewitterten Partikel je nach NaCl-Konzentration bereits klar voneinander zu unterscheiden. Nach

14 FTW verschimmt der Einfluss der niedrigen Konzentrationen. Nach 28 FTW liegen die Kurven in dem Konzentrationsbereich 1% -3% nahezu übereinander.

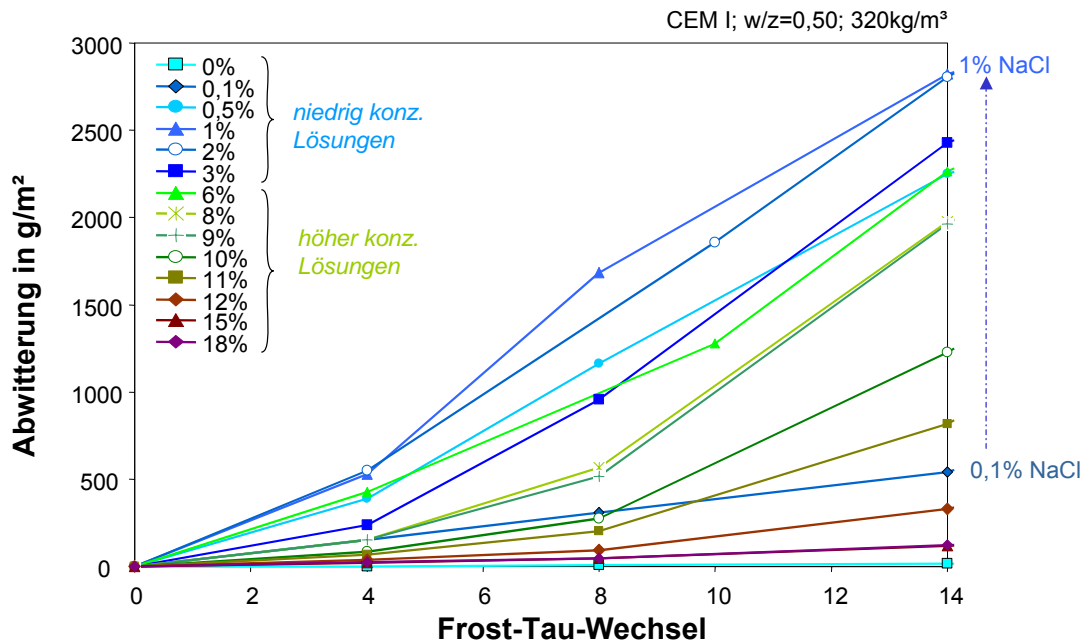


Abbildung 34: Abwitterung der Serien V u. IX (CEM I, w/z 0,50). Prüfung mit NaCl-Konzentrationen von 0 bis 18%, dargestellt 14 FTW und 3000 g/m².

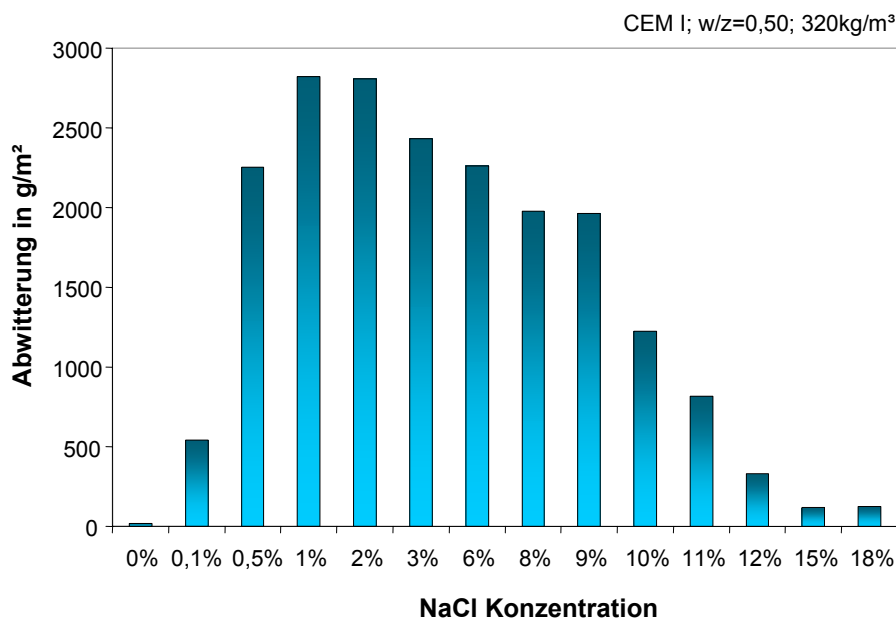


Abbildung 35: Vergleich der Abwitterungsmengen nach 14 FTW Serien V u. IX (CEM I, w/z 0,50) in Abhängigkeit der NaCl-Konzentration.

Vollständigkeitshalber sei an dieser Stelle vergleichend der E-Modulverlauf der selben Serien in Abhängigkeit der NaCl-Konzentration nach 14 FTW aufgetragen (Abbildung 36), welcher aber keinerlei Aussagen hinsichtlich eines Einflusses der Tausalzmenge auf die innere Schädigung zulässt.

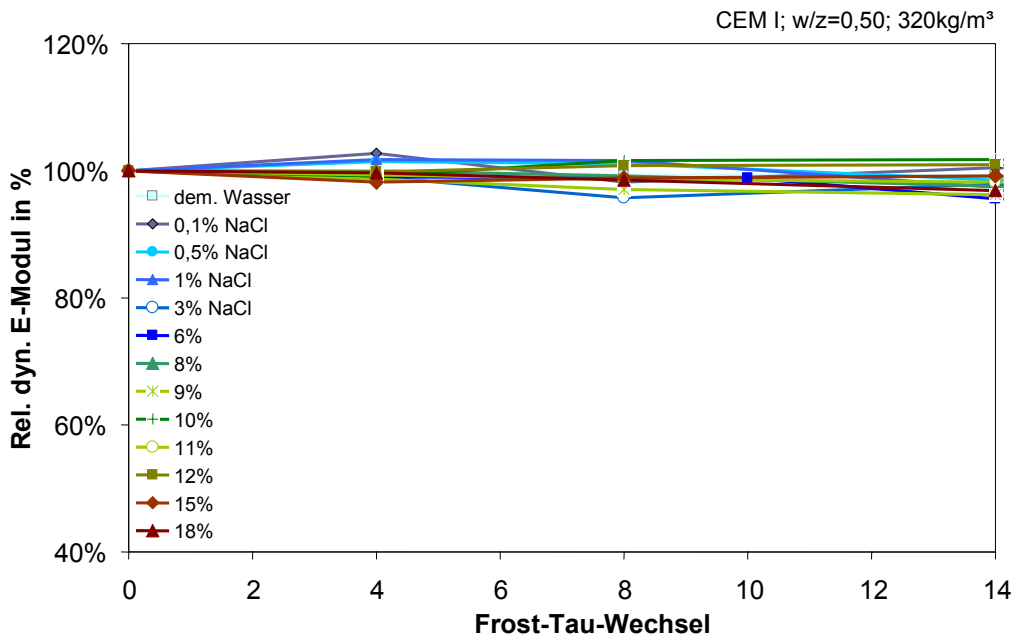


Abbildung 36: Vergleich des E-Modulverlaufs nach 14 FTW Serien V u. IX (CEM I, w/z 0,50) in Abhängigkeit der NaCl-Konzentration.

7.2.5 Einfluss der Minimaltemperatur

Um den Einfluss der Minimaltemperatur zu untersuchen, wurden die Betonserien zusätzlich einem modifizierten Temperaturzyklus ausgesetzt, bei dem die Minimaltemperatur auf -10°C angehoben, die Abkühl- und Auftaugeschwindigkeit allerdings beibehalten wurde. Hierdurch sollte die Effizienz der Mikroeislinsepumpe sowie die gefrierbare Wassermenge reduziert werden, um so eine geringere Feuchtaufnahme zu simulieren. Nachfolgend seien die wichtigsten Erkenntnisse dieses Versuchsabschnittes vorgestellt.

Zunächst wird der Einfluss der Minimaltemperatur am Beispiel der Mischung I (Portlandzement, w/z Wert 0,60) diskutiert. In den Abbildungen 36 bis 39 sind die Ergebnisse der Messparameter dieser Serie dargestellt, an denen bereits deutlich wird, dass die Anhebung der Minimaltemperatur bei der Feuchtaufnahme und inneren Schädigung dieser Serie deutliche Auswirkungen auf den Schadensverlauf ausübt, allerdings erst zum Ende der Prüfung nach 28 FTW.

In Abbildung 37 zeigt sich, dass mit zunehmender Prüfdauer die Differenz zwischen den beiden E-Modulverläufen bei -20°C und -10°C deutlicher hervortritt. Die innere Schädigung wird bei einer Minimaltemperatur von -20°C eher erreicht und schreitet zugleich schneller voran als bei einer Minimaltemperatur von -10°C . Hier wird aufgrund der erhöhten Minimaltemperatur die Eisbildung in den Kapillarporen verringert, was zur Folge hat, dass der Feuchtetransport zwischen den Poren geringerer ausfällt. Demnach tritt der kritische Sättigungsgrad und damit der Schadenszeitpunkt zeitlich verzögert ein. Andererseits führt dies dazu, dass bei der inneren Schädigung

im relevanten Prüfzeitraum von 28 FTW kein Abfall des rel. dyn. E-Moduls beobachtet werden kann, sogar bei Mischungen, die für XF2 nicht geeignet sind, wie die Serie I bzw. X. Damit stellt die innere Schädigung in Kombination mit der Variation der Minimaltemperatur keinen geeigneten Beurteilungsparameter dar.

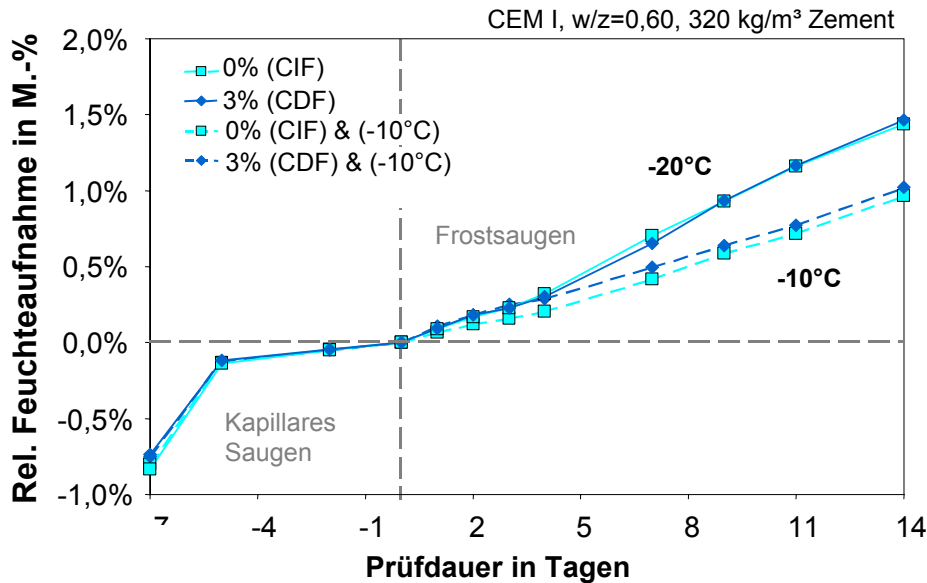


Abbildung 37: Feuchtaufnahme der Serie I- Variation der **Minimaltemperatur**. Prüfung mit 0 und 3% NaCl-Lösung.

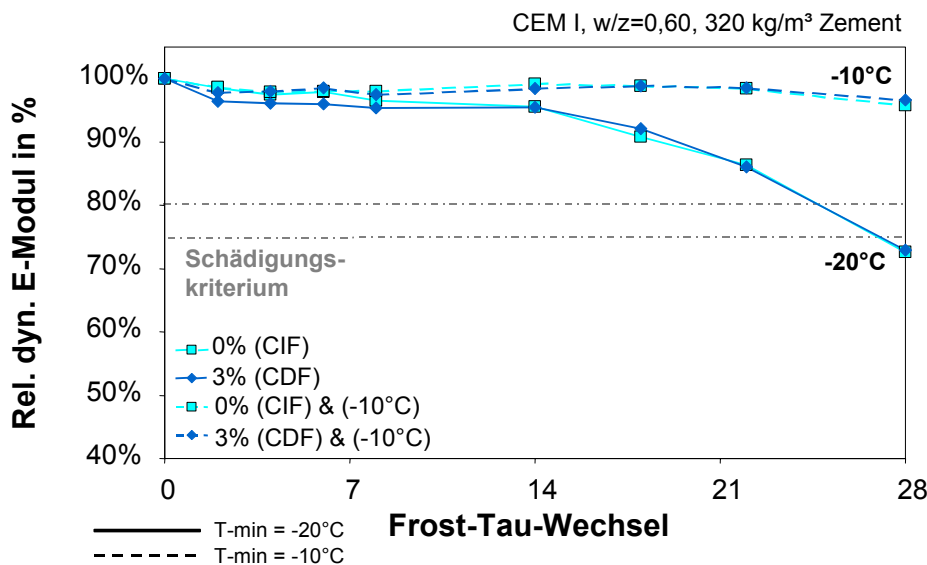


Abbildung 38: E-Modulverlauf der Serie I- Variation der **Minimaltemperatur**. Prüfung mit 0 und 3% NaCl-Lösung.

Bei Betrachtung der Abwitterung lässt sich hingegen eine deutliche äußere Schädigung ausmachen, die durch die Anhebung der Minimaltemperatur reduziert wird. Hier spielt die Betonqualität eine entscheidende Rolle.

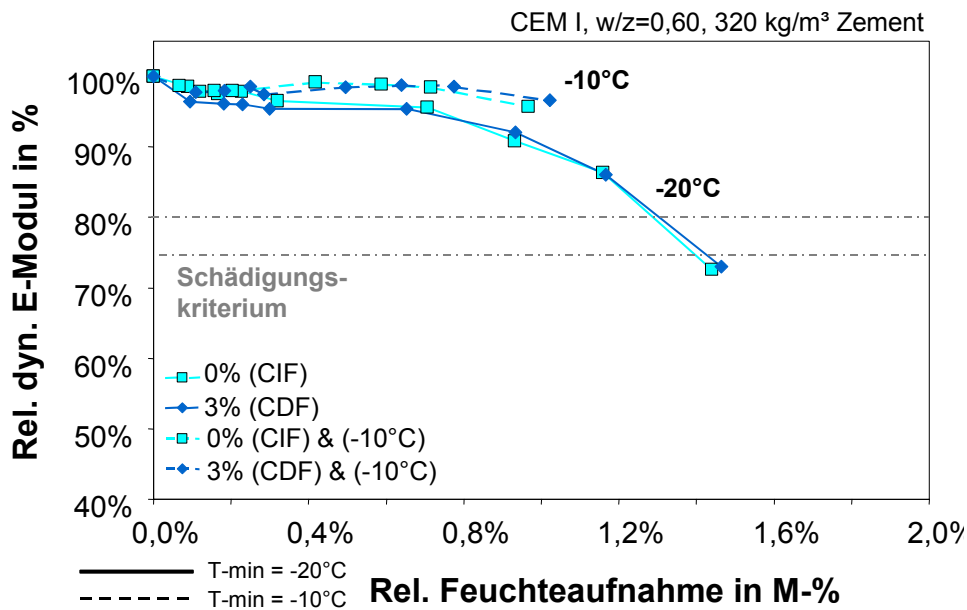


Abbildung 39:
E-Modulverlauf
gegenüber Feuchteaufnahme der Serie I - Variation der **Minimaltemperatur**. Prüfung mit 0 und 3% NaCl-Lösung.

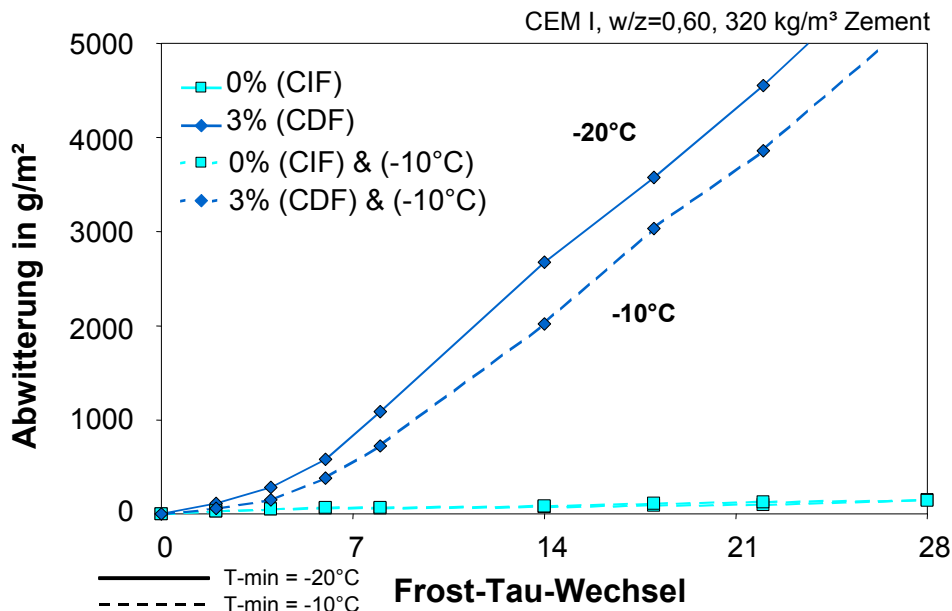


Abbildung 40:
Abwitterung der Serie I - Variation der **Minimaltemperatur**. Prüfung mit 0 und 3% NaCl-Lösung.

In Abbildung 41 ist der Einfluss der geringeren Minimaltemperatur an vier Mischungen exemplarisch dargestellt. Je nach Eignung der Mischung bewirkt die Modifizierung des Temperaturzykluses eine Abschwächung des Schädigungsgrades, wobei dies insbesondere anhand der Mischung V mit einem CEM I und einem w/z-Wert von 0,50 deutlich wird. Oberhalb einer Abwitterungsmenge von 3000 g/m² werden die Unterschiede zwischen den beiden Minimaltemperaturen verschmiert. In diesem Wertebereich liegt die Abwitterungstiefe allerdings auch deutlich über einem für die Praxis akzeptablen Maß (s. auch Abbildung 42, Abbildung 43). Es sei darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um Proben der 3. Versuchsreihe handelt. Bei dem dargestellten Zement CEM III/B handelt es sich um die Festigkeitsklasse 42,5, wodurch die leicht veränderten Abwitterungsverläufe gegenüber den Hüttensandzementserien der 1. und 2. Versuchsreihe zu erklären sind (qualitativ).

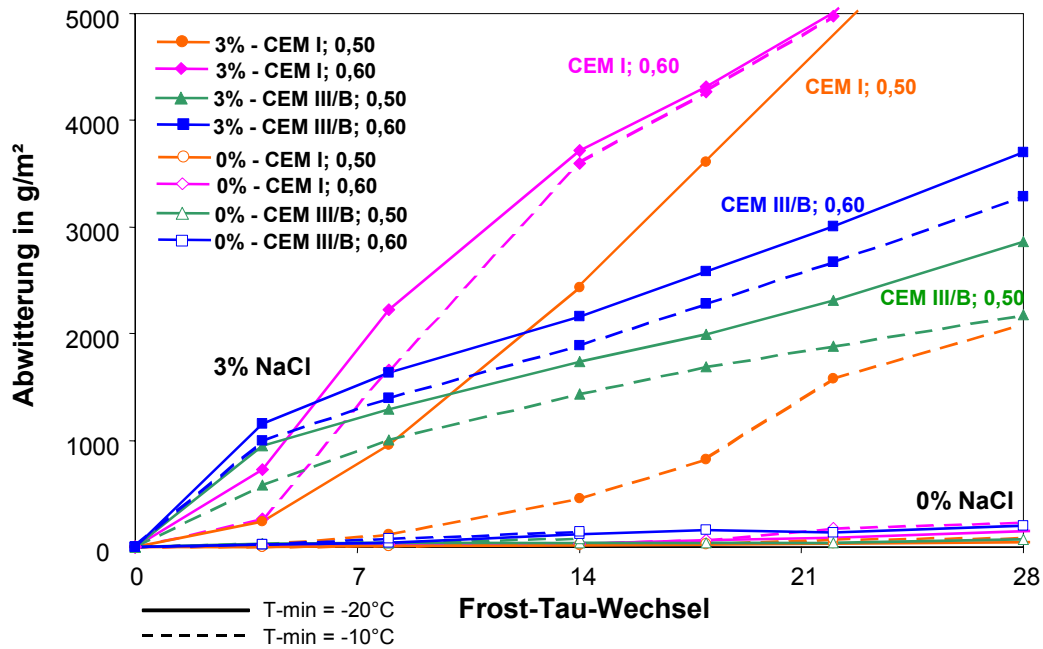


Abbildung 41: Abwitterung verschiedener Serien (IX - XIII) bei Variation der **Minimaltemperatur**, dargestellt bis 28 FTW und 5000 g/m² (3. Versuchsreihe). Im Gegensatz zu den Serien der 1. und 2. Versuchsreihe wurde hier ein Hütten-sandzement der Festigkeitsklasse 42,5 verwendet!

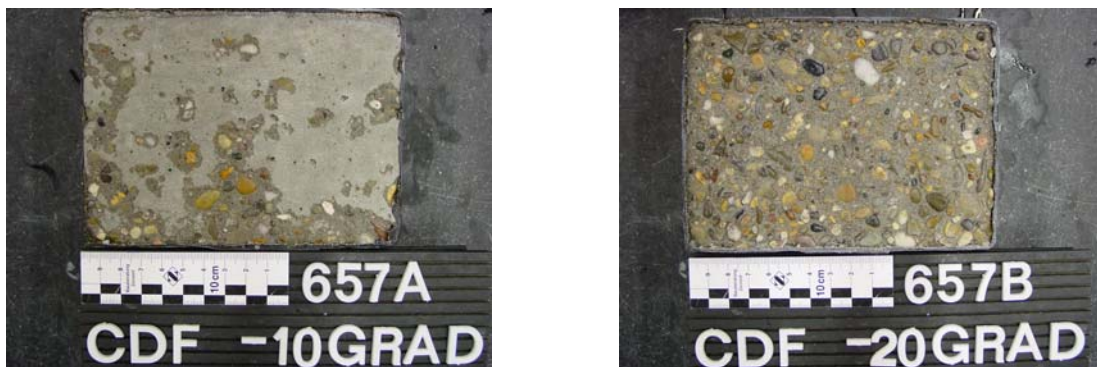


Abbildung 42: Vergleich der Prüffläche der Serie IX – CEM I, 0,50, 320 kg/m³ nach 28 FTW mit 3% NaCl-Lösung bei a) -10°C und b) -20°C Minimaltemperatur



Abbildung 43: Vergleich der Prüffläche der Serie XI – CEM III/B, 0,50, 320 kg/m³ nach 28 FTW mit 3% NaCl-Lösung bei a) -10°C und b) -20°C Minimaltemperatur

Die Balkendiagramme in Abbildung 44 sollen den Einfluss der Minimaltemperatur in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung noch einmal verdeutlichen, wobei die Werte zum Zeitpunkt des 14. und 28. FTW angegeben sind. Erneut spiegelt sich hieran wieder, dass bereits nach 14 FTW eine Differenzierung zwischen den verschiedenen Serien möglich ist und das Ergebnis durch die Fortführung der Prüfung bis zum 28. FTW nicht unbedingt deutlicher hervortritt.

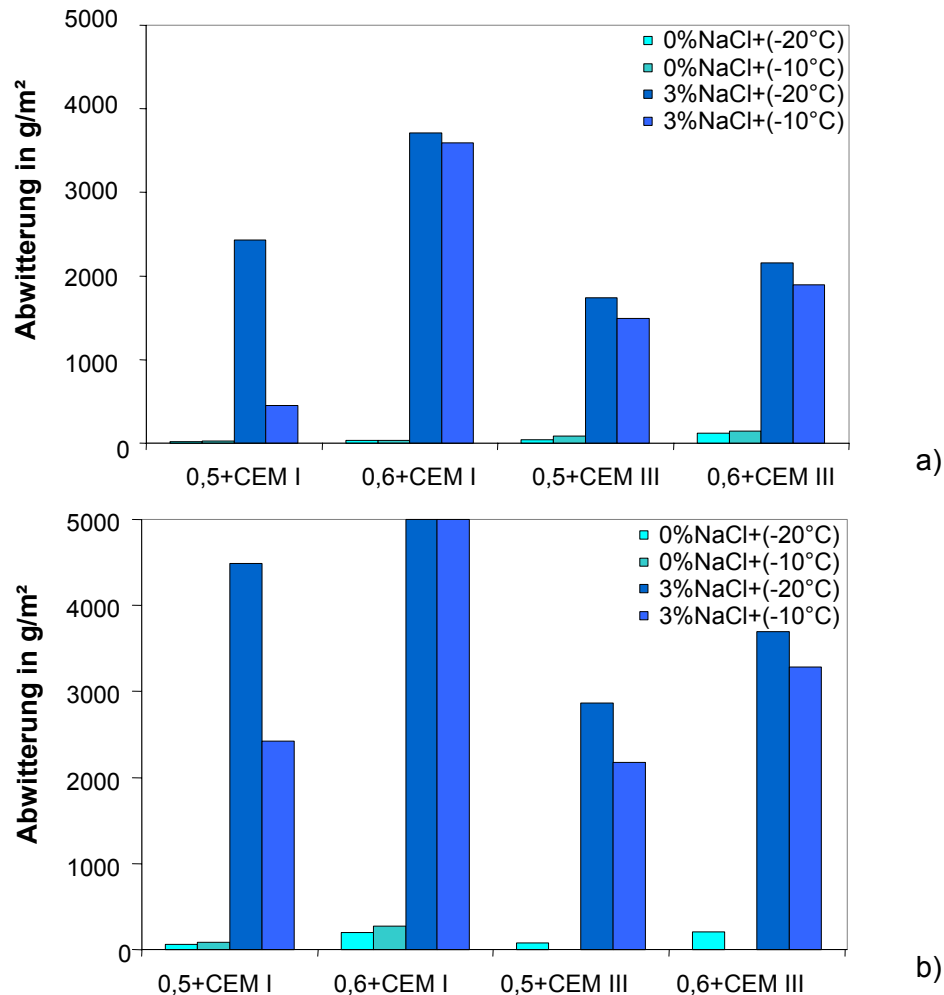


Abbildung 44: Abwitterung verschiedener Serien (IX - XII) bei Variation der Minimaltemperatur, a) nach 14 FTW, b) nach 28 FTW

7.2.6 Einfluss der Kombination NaCl-Konzentration und Minimaltemperatur

Die Kombination verschiedener Tausalzkonzentrationen und Variation der Minimaltemperatur wurde an allen hergestellten Serien der 2. und 3. Versuchsreihe geprüft. Die Einflüsse sollen nachfolgend an einigen Beispielen kurz erläutert werden.

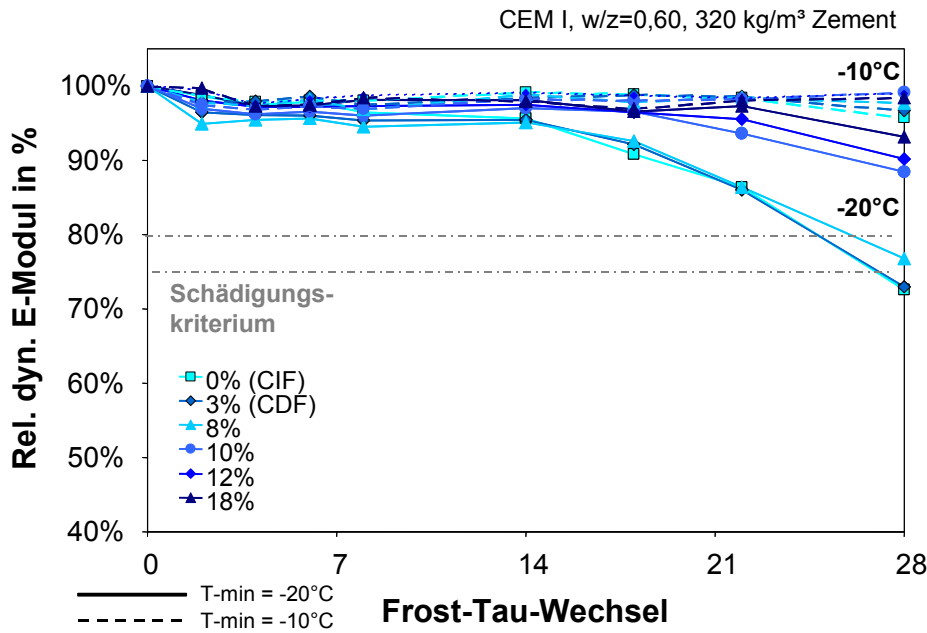


Abbildung 45: E-Modulverlauf der Serie I - Variation der **Minimaltemperatur** und **NaCl-Konzentration**.

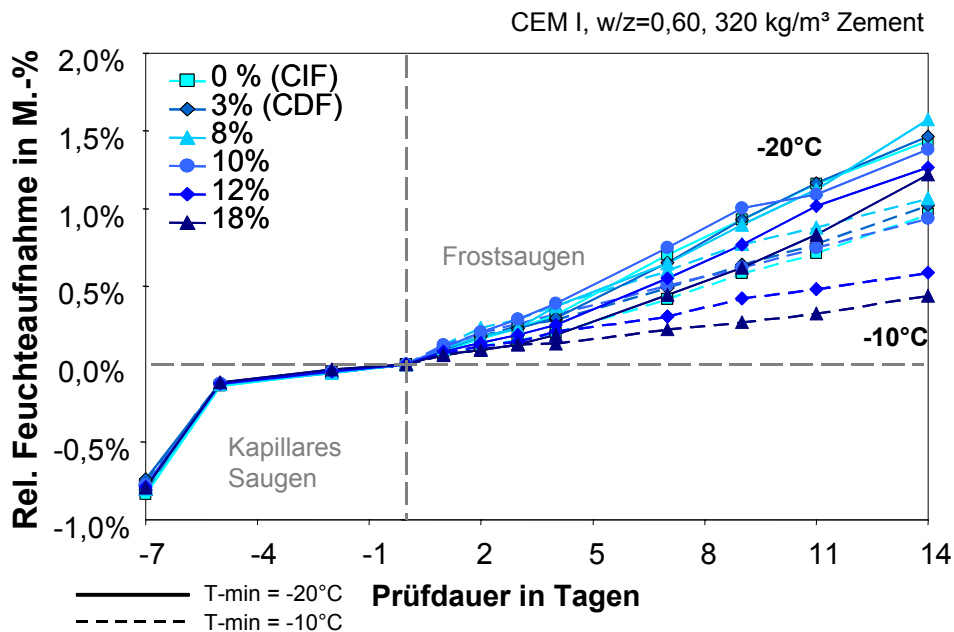


Abbildung 46: Feuchtaufnahme der Serie I - Variation der **Minimaltemperatur** und **NaCl-Konzentration**.

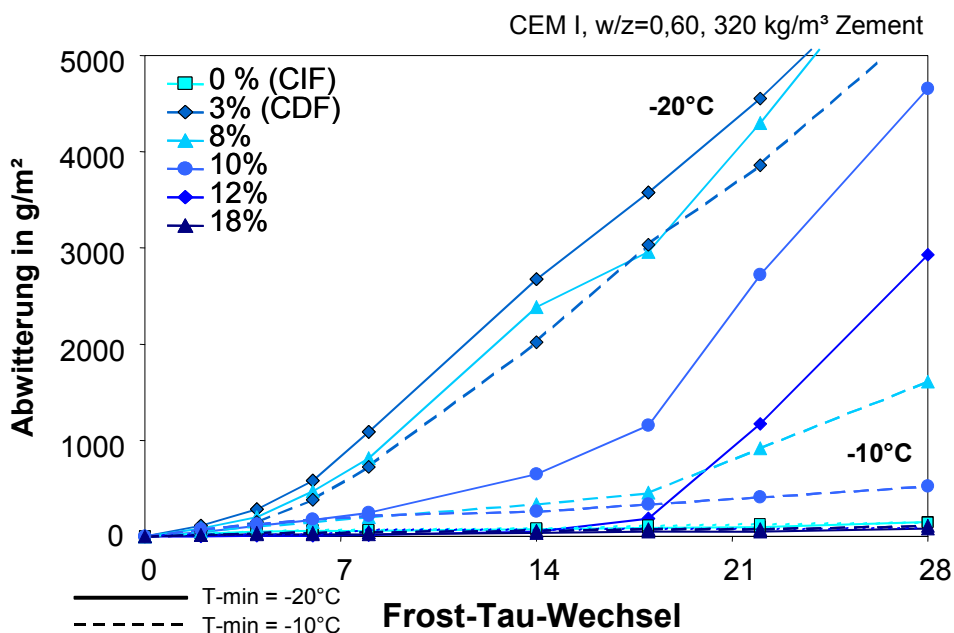


Abbildung 47: Abwitterung der Serie I - Variation der **Minimaltemperatur** und **NaCl-Konzentration**.

Anhand der Serie I der 2. Versuchsreihe wird ersichtlich, dass die Staffelung der NaCl-Konzentration oberhalb von 3% bei einer Minimaltemperatur von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ schwächer hervortritt, als es bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ der Fall ist (Abbildung 45 - Abbildung 47). Dies liegt offensichtlich in der Tatsache begründet, dass die höheren Konzentrationen in Verbindung mit einer geringeren Minimaltemperatur zu einer signifikanten Abnahme der in diesem Temperaturbereich gefrierbaren Wassermenge führen. Eine Minimaltemperatur von $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ ermöglicht bei diesen höheren Konzentrationen noch ein Gefrieren der Prüflösung, während dies bei einer Temperatur von $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ nur noch eingeschränkt der Fall ist. Bei einer 18%-igen Lösung ist auch bei $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ die Eisbildung praktisch unterdrückt.

Was die niedrigeren Konzentrationen angeht, zeigt sich hier ein etwas anderes Verhalten. Im Bereich unter 0,5% NaCl-Lösungskonzentration bzw. 1% erweist sich die Anhebung der Minimaltemperatur weniger abschwächend; im Gegenteil hier bewirkt der veränderte Temperaturzyklus eine geringfügige Zunahme der Abwitterungsmenge nach 28 FTW (s. Abbildung 48, Abbildung 49).

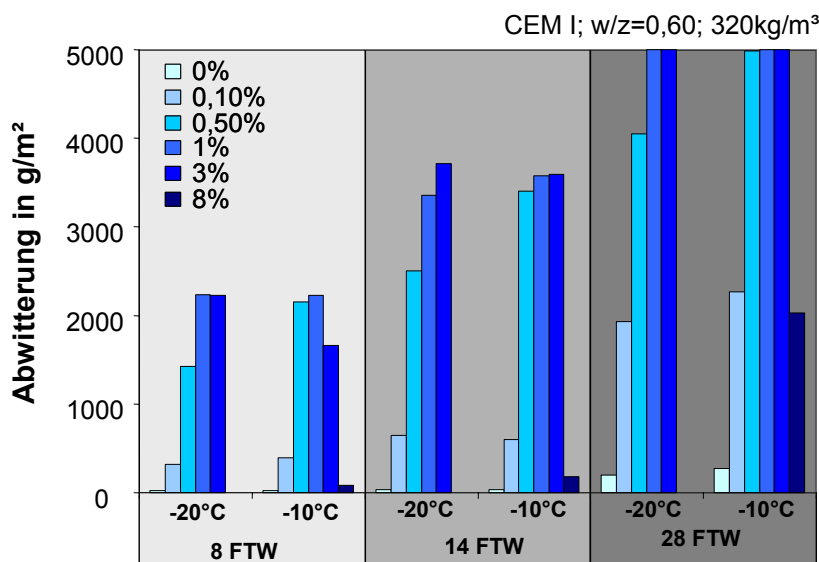


Abbildung 48: Vergleich der Abwitterungsmengen der Serie X (CEM I) bei Variation der **Minimaltemperatur** und **NaCl-Konzentration**.

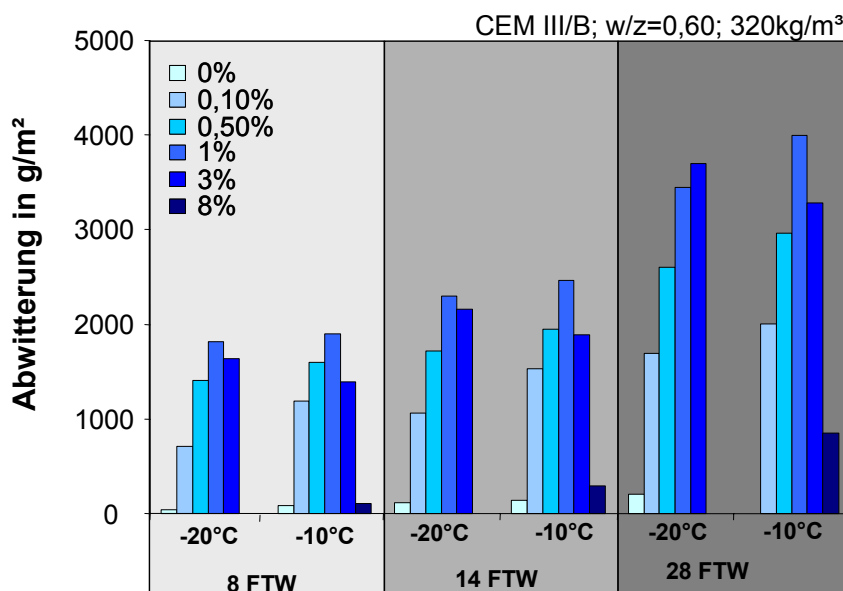


Abbildung 49: Vergleich der Abwitterungsmengen der Serie XII (CEM III) bei Variation der **Minimaltemperatur** und **NaCl-Konzentration**.

Es kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass eine Abschwächung des Angriffes mit einer Minimaltemperatur bei mittleren NaCl-Konzentrationen möglich ist, wobei hier die Betonqualität eine entscheidende Rolle spielt. Bei Abwitterungsmengen oberhalb von 3000 g/m² sind Vergleiche zwischen Variationsparametern wenig sinnvoll, da die Streuung in diesem Bereich einen zu großen Einfluss auf die Ergebnisse ausübt. Entsprechend sind die Beobachtungen nach 28 FTW nur insofern zu interpretieren, solange die Schädigung in einem Wertebereich liegt, indem der Probekörper noch nicht völlig zerstört ist.

Die innere Schädigung erweist sich bei einer Minimaltemperatur von -10 °C als weniger aussagekräftig als die Beurteilung der Abwitterung. Vergleiche können hier zwischen den Konzentrationen nicht angestellt werden, da eine Schädigung in nahezu allen Fällen ausblieb.

7.2.7 Einfluss der Betonrezeptur

Wie bereits erwähnt spielt bei der Variation der Rand- und Prüfrandbedingungen die Betonqualität bzw. Betonzusammensetzung eine große Rolle, ebenso wie der Einfluss der Herstellungsbedingungen. Trotz nahezu identischer Herstellungsparameter, ergaben sich leichte Abweichungen innerhalb der Frischbetondaten (z. B. Luftgehalt im Frischbeton) bei wiederholten Betonagen derselben Serie. Diese üben selbstverständlich einen gewissen Einfluss auf die Ergebnisse der Frost- und Frost-Tausalzprüfung aus. Es ist mittlerweile durch Untersuchungen belegt, dass ein höherer Luftgehalt zu einer Abschwächung der Feuchteaufnahme führt, was aus der Beeinflussung der Mikroislinsenpumpe resultiert [30]. Bei Luftporenbetonen bzw. LP-Gehalten oberhalb von 3% kommt es durch die im Inneren befindliche Luft zu einer Unterbrechung der Mikroislinsenpumpe, so dass das Frostsaugen mehr oder weniger fast vollständig verhindert wird. Im Bereich darunter (LP-Gehalt < 3%) sind die Unterschiede innerhalb der Prüflösungsaufnahme bzw. Abwitterungsmenge zwar geringer als zwischen LP- und Nicht-LP-Betonen, dennoch können Variationen von 0,5% bis 2% im Luftporengehalt zu einer Veränderung der Effizienz der Frostpumpe führen. Dies sollte grundsätzlich bei der Interpretation der Ergebnisse beachtet werden.

Neben der Verwendung von zwei Zementarten (CEM I, CEM III) sowie den w/z-Werten 0,50 und 0,60, wurden im Rahmen der 2. Versuchsreihe auch die Zementgehalte 320 und 360 kg/m³ (CEM I 32,5, CEM III/B 32,5) untersucht, um ein breites Spektrum unterschiedlicher Betonqualitäten abzudecken und zwischen XF2 konformen und nicht konformen Mischungen unterscheiden zu können. Diese Versuche wurden bei der Minimaltemperatur -20°C durchgeführt.

In Abbildung 50 und Abbildung 52 ist der Einfluss des unterschiedlichen Zementgehaltes auf die Abwitterung am Beispiel der Mischungen mit CEM I und CEM III/B in Verbindung mit einem w/z-Wert von 0,50 dargestellt. Zusammenfassend

kann die Aussage getroffen werden, dass mit steigendem Zementgehalt bei gleichem w/z-Wert der Frost-Tausalz-widerstand verringert wird. Durch die Erhöhung des Zementgehaltes bei konstantem w/z-Wert und der damit verbundenen höheren Zementleimmenge im Vergleich zum Anteil der Gesteinskörnung wird das Abwittern der oberflächennahen Zementsteinschichten - bezogen auf die Prüffläche - verstärkt. Auch hinsichtlich der inneren Schädigung kann festgehalten werden, dass bei den Betonen mit höheren Zementgehalten ein niedrigerer Frostwiderstand festgestellt werden konnte, als bei den Proben mit 320 kg/m³ Zement (Versuchsreihe 2, s. Abbildung 51, Abbildung 53). Das Schädigungskriterium – die Anzahl Frost-Tau-Wechsel bis zum Erreichen eines E-Modulabfalls von 80% - wurde bei den zementhaltigeren Betonen deutlich eher erreicht. Bei der Serie VIII (CEM III/B 32,5, w/z 0,50 und 360 kg/m³ Zement) musste die Prüfung aufgrund der starken inneren Schädigung nach 14 FTW abgebrochen werden.

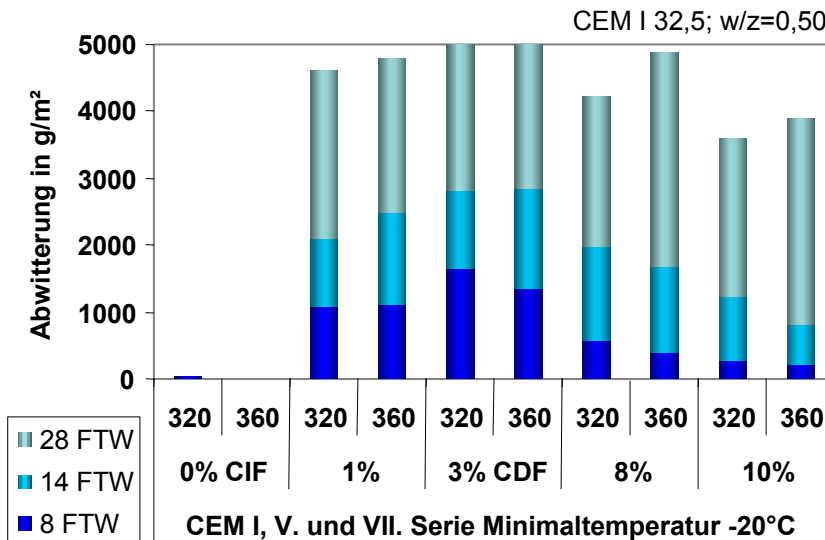


Abbildung 50: Vergleich der Abwitterungsmengen der Serien V und VII bei Variation des **Zementgehaltes** und der **NaCl-Konzentration**.

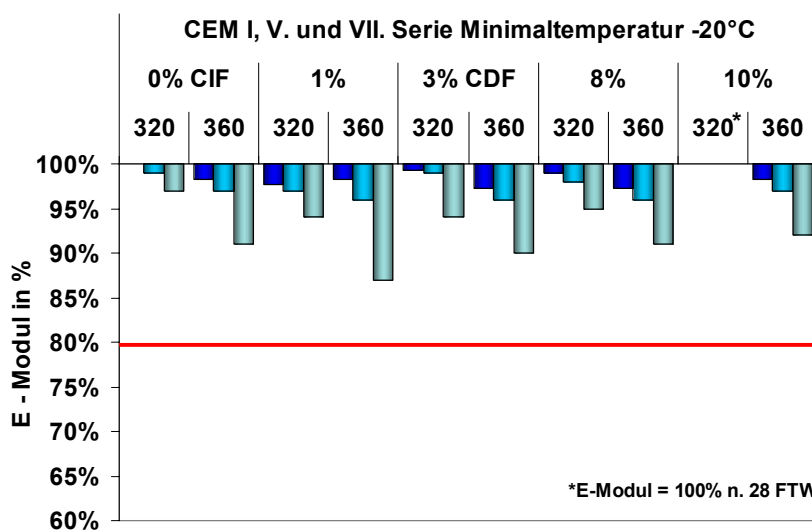


Abbildung 51: Vergleich des E-Modulabfalls der Serien V und VII bei Variation des **Zementgehaltes** und der **NaCl-Konzentration**.

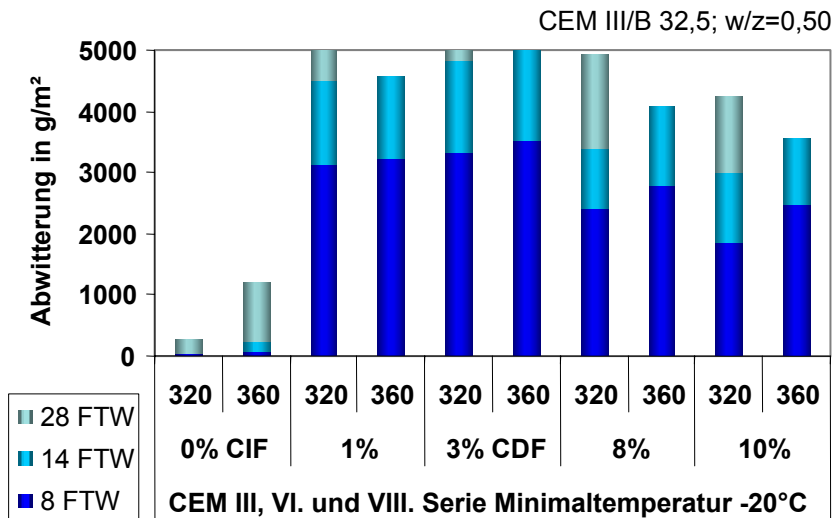


Abbildung 52: Vergleich der Abwitterungsmengen der Serien VI und VIII) bei Variation des **Zementgehaltes** und der **NaCl-Konzentration**.

** bei 360kg/m³ und 1%, 8% bzw. 10% NaCl musste die Prüfung nach 14FTW abgebrochen werden.

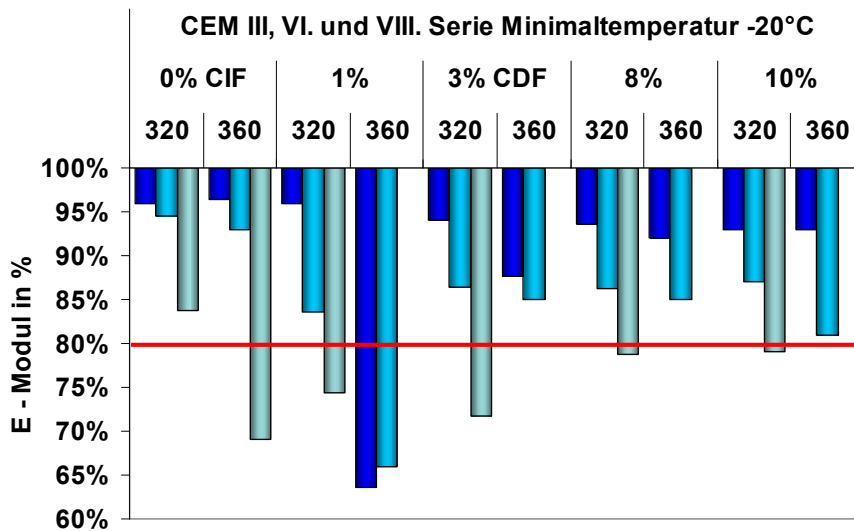


Abbildung 53: Vergleich des E-Modulabfalls der Serien VI und VIII bei Variation des **Zementgehaltes** und der **NaCl-Konzentration**.

** bei 360kg/m³ und 1%, 8% bzw. 10% NaCl musste die Prüfung nach 14FTW abgebrochen werden.

Die Serien mit CEM III Zementen zeigten in allen Fällen die häufig zu beobachtende erhöhte Anfangsabwitterung, die auf das Abwittern der karbonatisierten Randschicht zurückzuführen ist. Wie auch schon in [1], [25] festgestellt werden konnte, bewirkt die Karbonatisierung bei HOZ Betonen die Ausbildung einer poröseren Randzone, die ebenfalls eine dementsprechend raschere Aufnahme an Prüflösung nach sich zieht. Bei NaCl-Konzentrationen zwischen 3% und 12% konnte zwischen einem CEM I 32,5 und einem CEM III/B 32,5 eine nahezu konstante Abwitterungsmengendifferenz von 2000g/ m² nach 14 FTW beobachtet werden. Die durch die Karbonatisierung der Randzone hervorgerufene schnellere Feuchtaufnahme bewirkt, dass bei den geprüften Hochofenzementbetonen auch die innere Schädigung rascher voranschreitet bzw. eher ausgelöst wird, als es bei den CEM I Betonen der Fall ist (s. Abbildung 55, Abbildung 57).

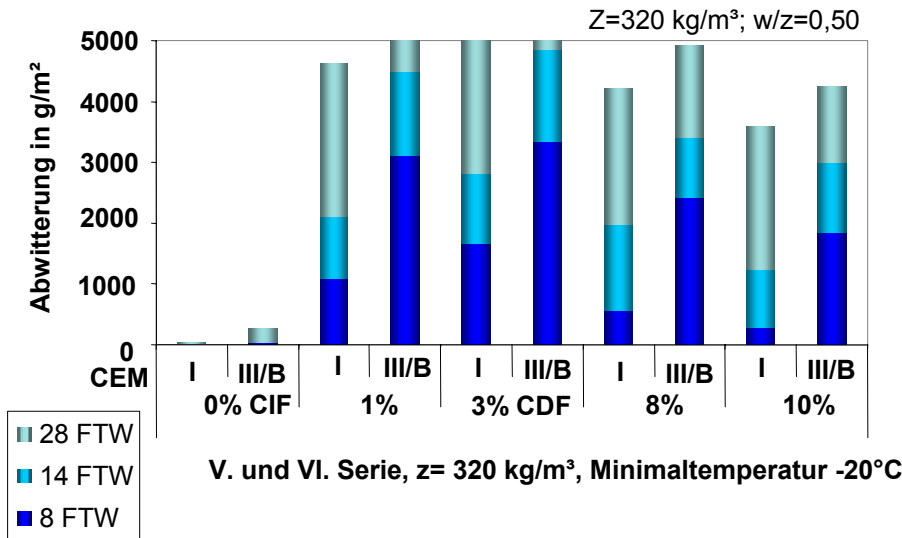


Abbildung 54: Vergleich der Abwitterungsmengen der Serien V und VI bei Variation **Zementtyps** (CEM I 32,5; CEM III/B 32,5) und der **NaCl-Konzentration**.

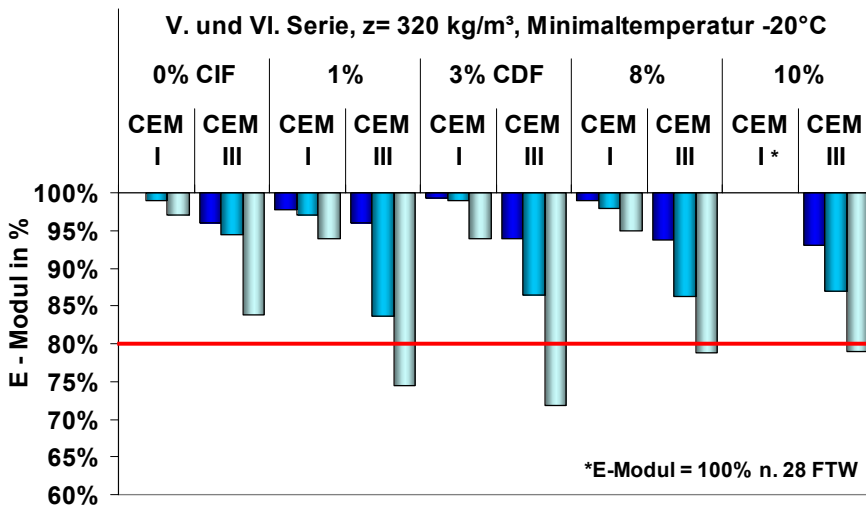


Abbildung 55: Vergleich des E-Modulabfalls der Serien V und VI bei Variation des **Zementtyps** (CEM I 32,5; CEM III/B 32,5) und der **NaCl-Konzentration**.

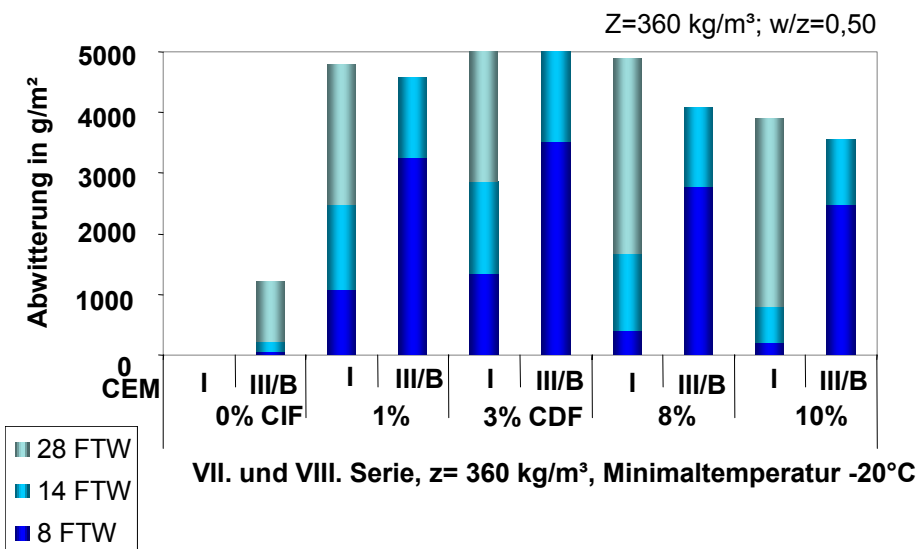


Abbildung 56: Vergleich der Abwitterungsmengen der Serien VII und VIII bei Variation des **Zementtyps** (CEM I 32,5; CEM III/B 32,5) und der **NaCl-Konzentration**.

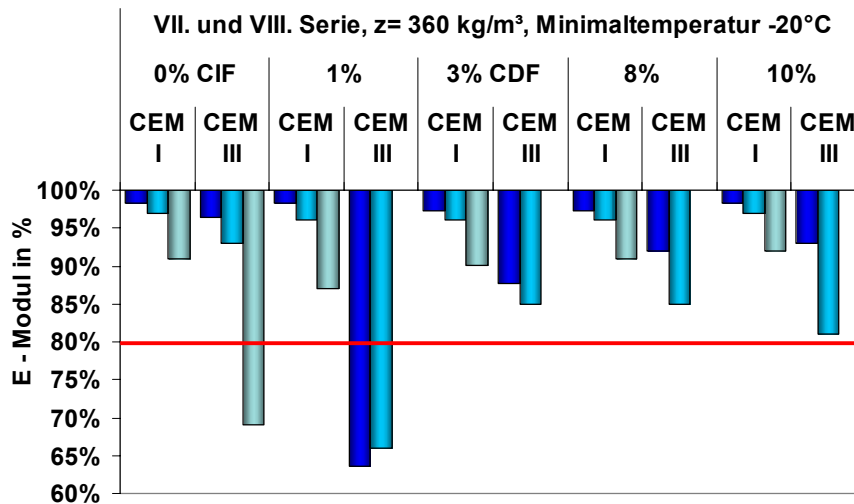


Abbildung 57: Vergleich des E-Modulabfalls der Serien VI und VIII bei Variation des Zement-typs (CEM I 32,5; CEM III/B 32,5) und der NaCl-Konzentration.

** bei CEM I und 1%, 8% bzw. 10% NaCl musste die Prüfung nach 14FTW abgebrochen werden.

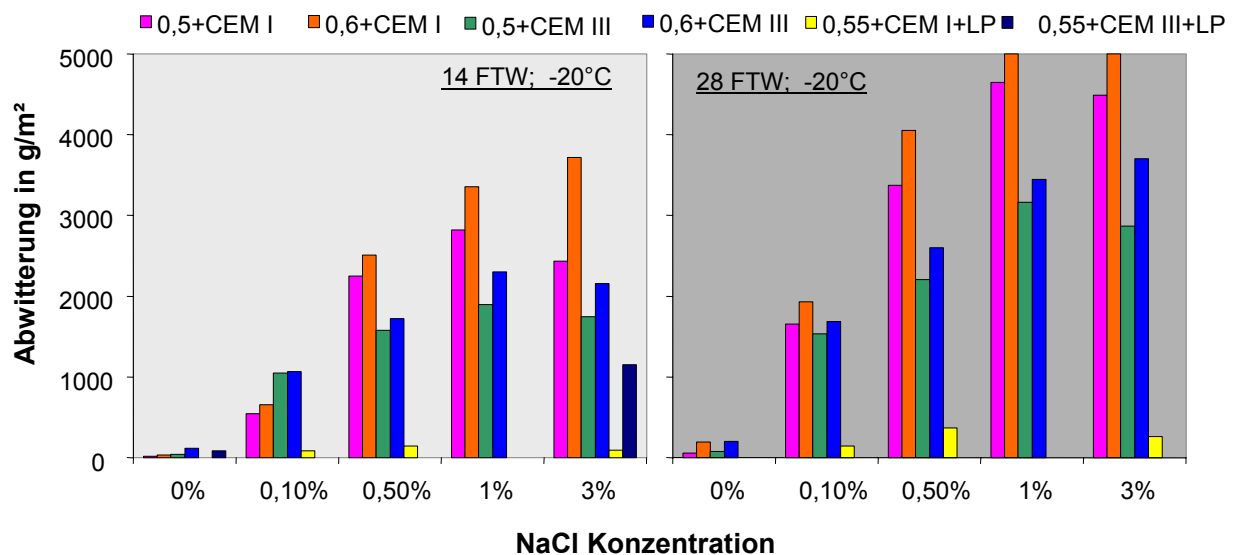


Abbildung 58: Vergleich der Abwitterungsmengen nach 14 FTW und 28 FTW der Serien IX-XIII (CEM I 32,5, CEM III/B 42,5; 3. Versuchsreihe) bei einer Minimaltemperatur von -20°C und Variation der NaCl-Konzentration (0% - 3% NaCl)*.

* die Prüfung der LP-Betone konnte aus organisatorischen Gründen nicht mit der NaCl-Konzentrationen 1% durchgeführt werden.

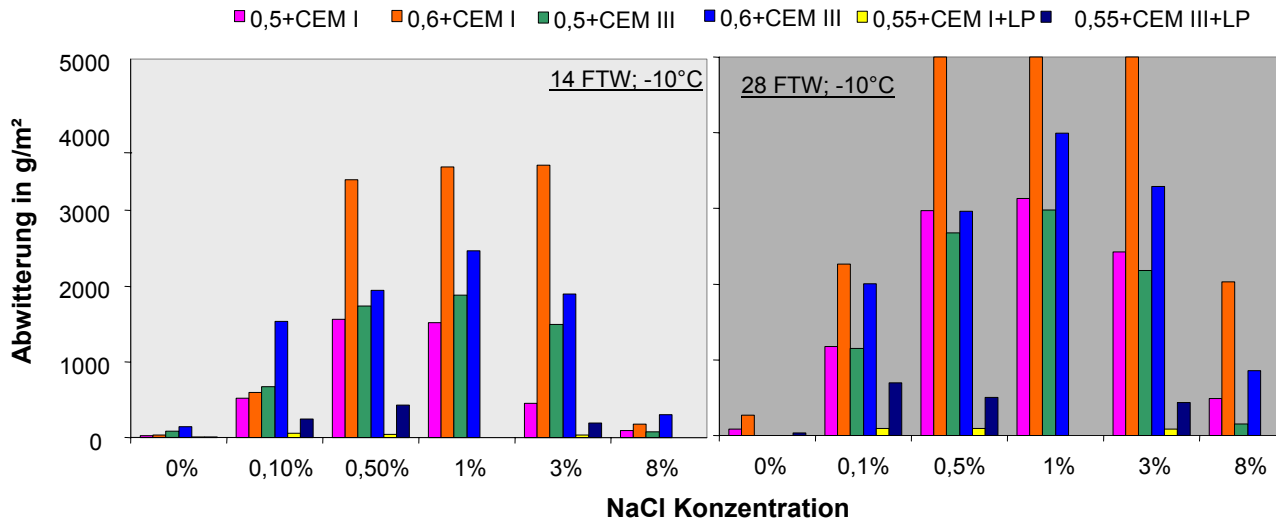


Abbildung 59: Vergleich der Abwitterungsmengen nach 14 FTW und 28 FTW der Serien IX-XIII (CEM I 32,5, CEM III/B 42,5; 3. Versuchsreihe) bei einer Minimaltemperatur von -10°C und Variation der NaCl-Konzentration (0% - 8% NaCl)*.

*die Prüfung der LP-Betone konnte aus organisatorischen Gründen nicht mit den NaCl-Konzentrationen 1% und 8% durchgeführt werden.

Vergleicht man abschließend die verschiedenen Betonqualitäten (Serien der 3. Versuchsreihe, Unterscheidung XF2 konformer – nicht konformer Mischungen, IX-XIII) unter Berücksichtigung der beiden verschiedenen Minimaltemperaturen nach 14 und 28 FTW, ergeben sich die Darstellungen in den Abbildungen 53 und 54. Anhand dieser lässt sich schlussfolgern, dass bei einer Minimaltemperatur von -10°C und einer NaCl-Konzentration von 3% bereits nach 14 FTW zwischen verschiedenen Betonen unterschieden werden kann. Legt man diese Randbedingungen zugrunde, kann zwischen Mischungen differenziert werden, die nach dem deskriptivem Ansatz für eine XF2 Exposition geeignet bzw. nicht geeignet wären (s. Abbildung 60). Der Grenzwert ist als zusätzlicher Faktor an die veränderten Bedingungen entsprechend anzupassen. Im Vergleich dazu liegen die Abwitterungsmengen nach 28 FTW bei XF2 ungeeigneten Betonen teilweise in einem Wertebereich, bei dem der Probekörper nahezu vollständig zerstört ist. Mit zunehmender Abwitterungsmenge steigt darüber hinaus die Prüfstreuung an. Eine kürzerer Prüfzeitraum bei nahezu gleicher Aussagefähigkeit gegenüber einer Testdauer von 28 FTW bietet zudem einen enormen wirtschaftlichen Vorteil, der sich neben der Verringerung der reinen Prüfkosten auch in schnelleren Entscheidungs- und Beurteilungsprozessen wiederfinden lässt. Aufgrund dessen erscheint in diesem Fall eine Beurteilung nach 14 FTW als überaus sinnvoll.

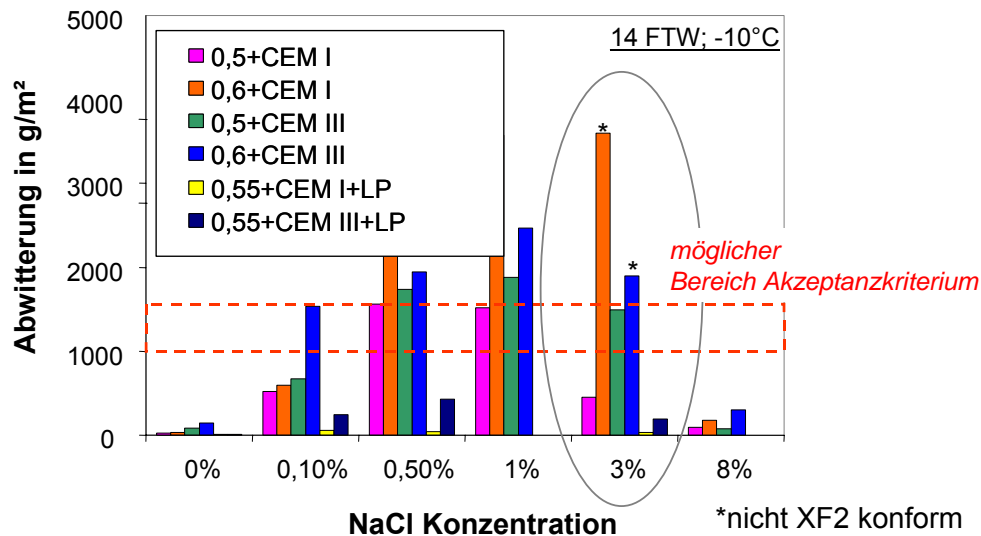


Abbildung 60: Vergleich der Abwitterungsmengen der unterschiedlichen Betonqualitäten bei einer Minimaltemperatur -10°C nach 14 FTW.

Für den Wert der zu diesem Zeitpunkt (14 FTW) maximal zulässigen Abwitterung kann zum aktuellen Stand nur eine Orientierung angegeben werden. Es wird davon ausgegangen, dass ein sinnvoller Grenzwert im Bereich zwischen 1000 und 1800 g/m² liegen sollte. Hier hat sich in der Vergangenheit gezeigt, dass eine Abwitterungsmenge von 1500 g/m², was einer Abwitterungstiefe von ca. 0,6 mm entspricht, in der Praxis als ein realistischer Wert für eine signifikante Schädigung herausgestellt hat. Um einen Grenzwert genau festzulegen reicht die Datenbasis zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht aus. Messungen von Betonen mit verschiedenen Ausgangsstoffen und einer breiteren Variation der Zusammensetzung sind dafür erforderlich.

7.3 Zusammenfassung

Bei der Exposition nach XF2 ist von einer „mäßigen Wassersättigung“ auszugehen. Diese Wortwahl ist etwas missverständlich. Korrekter wäre es, von einem weniger häufigen Angebot von Wasser (XF1) bzw. Taumittellösung (XF2) im Vergleich zu XF3 bzw. XF4 zu sprechen. Das bedeutet aber nicht, dass in der Praxis bei XF1 bzw. XF2 nicht zeitweise eine Schädigungssättigung überschritten wird. Man kann und muss davon ausgehen, dass bei XF1 und XF2 die Austrocknungsphasen ausgeprägter sind als bei XF3 und XF4 und dass daher die Schädigungsphasen, also Phasen während denen eine hohe Wassersättigung bei gleichzeitiger Frost-Tau-Wechsel Belastung auftritt, seltener sind. Daher ist der Zeitfaktor der entscheidende Unterschied. Er bewirkt, dass Betone, die unter XF3 bzw. XF4 in einem sehr frühen Stadium erheblich geschädigt würden, unter XF1 bzw. XF2 deutlich verlängerte Lebensdauern haben.

Dieser Qualitätsunterschied sollte auch in der Laborprüfung deutlich werden. Sonst wäre die Laborprüfung wenig praxiskonform. Die Betone, die erfahrungsgemäß noch gegenüber einem Angriff nach XF2 ausreichend dauerhaft sind (und keinesfalls gegenüber XF4) werden im Standard CDF-Test nur wenige Frosttauwechsel überleben. Nachdem die zeitliche Auflösung der Prüfung auf $\pm \frac{1}{2}$ Wechsel begrenzt ist, ist dieser Angriff zu stark, um zwischen geeigneten und nicht geeigneten Betonzusammensetzungen unterscheiden zu können.

Zur Abschwächung des Frost-Tausalzangriffes gemäß einer XF2 Exposition wurde ein breites Spektrum an Variationsparametern innerhalb verschiedener Versuchreihen an unterschiedlichen Betonmischungen untersucht. Bei einem Vergleich sämtlicher Variationsparameter und deren Einfluss auf die Feuchteaufnahme sowie innere und äußere Schädigung, wird deutlich, dass sich die verschiedenen Modifikationen mit dem CDF /CIF-Test klar und reproduzierbar trennen lassen. Die Maßnahmen schwächen aber den Frostangriff unterschiedlich ab und sind daher unterschiedlich geeignet. Grundsätzlich wirken die Maßnahmen auf verschiedene Weise, wobei eine Schädigung durch folgende Effekte erhöht wird:

- Hohe Sättigungsgeschwindigkeit
- Änderung der Lösungskonzentration zwischen 0 und 3% NaCl (äußere Schädigung).

Das Abnahmekriterium muss den jeweiligen Randbedingungen angepasst werden und zwar durch

- den Zeitpunkt (Anzahl der FTW), zu dem ein Kriterium erfasst sein muss, und
- die Höhe des Schädigungsgrades zu diesem Zeitpunkt.

In diesem Zusammenhang wurden zunächst die Variationsparameter so gewählt, dass in erster Linie die Feuchteaufnahme reduziert wurde und somit eine mäßige Sättigung realisiert werden sollte. Hierzu wurde in einem ersten Schritt die Art der Nachbehandlung und die Dauer der Vorsättigung variiert. Letzteres führte vielmehr dazu, dass die Mikroislinsenpumpe während der zyklischen Belastung die geringere kapillare Prüflösungsaufnahme nach wenigen FTW kompensierte. Widererwartend bewirkte die kürzere Vorsättigungsdauer eine Zunahme der Flüssigkeitsaufnahme während der zyklischen Belastung. Nachteilig wirkt sich bei dieser Variation zudem das Fehlen definierter Randbedingungen hinsichtlich der Wassersättigung zu Beginn der Frostprüfung aus, was eine Erhöhung der Prüfstreuung zur Folge hat.

Als ein weiterer Parameter zur Reduzierung des Sättigungsgrades wurde eine Art Wechsellagerung untersucht, bei der die Prüflösungszufuhr intervallartig gestoppt wurde. Hier stellte sich heraus, dass zwar die Feuchteaufnahme unterbrochen und auch die Schädigungsparameter verzögert werden, die Prüfdauer hierdurch aber nur

unnötig verlängert wird. Die Schädigungsgeschwindigkeit wird dabei während den Phasen mit Prüflösung nicht reduziert. Deutliche Unterschiede konnten erst nach 56 FTW beobachtet werden. Für die Praxis bedeutet dies, dass ein Schaden nur fortschreitet, wenn Frost-Tau-Wechsel und Flüssigkeitsangriff gleichzeitig einwirken.

Die Variation der NaCl-Konzentration sowie der Minimaltemperatur, die die gefrierbare Wassermenge und damit auch Effizienz der Frostpumpe reduzieren sollte, führte je nach Mischungszusammensetzung zu einer unterschiedlich starken Abminderung des Angriffes.

Bei höheren NaCl-Konzentrationen (8-18%) nimmt die Abwitterung im Vergleich zu einer 3%-igen NaCl-Lösung ab. Es konnte in allen Fällen eine eindeutige Staffelung der Schädigungsgrade mit zunehmender NaCl-Konzentration beobachtet werden. Bei Konzentrationen von 8% bzw. 10% zeigt sich im allgemeinen ein langsamerer Schädigungsverlauf, insbesondere bei Kühlung auf -10°C im Vergleich zu einer Minimaltemperatur von -20°C . Die niedrigere Temperatur von -20°C ermöglicht bei diesen Konzentrationen noch ein Gefrieren der Prüflösung, während dies bei der höheren Minimaltemperatur nur noch eingeschränkt der Fall ist. Bei einer 18%-igen Lösung ist auch bei -20°C die Eisbildung praktisch unterdrückt. Die Schädigungsmechanismen werden somit ab einer Konzentration oberhalb von 3% sowohl durch eine geringere Abkühltemperatur als auch durch eine erhöhte Konzentrationen weniger wirksam.

Das Schädigungsmaximum liegt bei einer NaCl-Konzentration zwischen 1 und 3%. Die Abwitterung ist bei diesen Konzentrationen am höchsten. Unterhalb von 1% nimmt der Grad der Schädigung wieder ab, wobei erstaunlich ist, dass schon eine Lösungskonzentration von 0,1% eine Zunahme der Abwitterung um den Faktor 10-12 gegenüber einer reinen Wasserlösung bewirkt. Die Staffelung der Schädigungsgrade ist auch in dem Bereich 0 bis 1% zu verfolgen, so dass sich ein Schadensplateau bei ca. 1% ausbildet.

Wie bereits erwähnt, macht sich der Einfluss der Minimaltemperatur in Abhängigkeit der Betonqualität unterschiedlich stark bemerkbar. Bei Mischungen mit einem höheren w/z-Wert (0,60) wird der Einfluss bei hohen Abwitterungsmengen über 3000 g/m^2 durch die in diesem Bereich auftretende erhöhte Streuung überlagert. Unter Berücksichtigung dieses Sachverhaltes kann dennoch geschlossen werden, dass die Anhebung der Minimaltemperatur eine Abschwächung des Angriffes zur Folge hat. Sowohl die Abwitterung als auch die innere Schädigung verlaufen zeitlich verzögert, wobei die innere Schädigung eine Differenzierung zwischen den Betonqualitäten erst zu deutlich späteren Zeitpunkten zulässt.

Die Betonqualität ist bei den Auswirkungen der Variationsparameter auf das Feuchteaufnahmeverhalten und somit für den Grad der Schädigung entscheidend. Neben

unterschiedlichen Zementen und w/z-Werten wurde auch der Einfluss höherer Zementgehalte untersucht. Bei gleichem w/z-Wert kann mit zunehmendem Zementgehalt eine Erhöhung der Abwitterung verzeichnet werden, was auf den höheren Zementleimgehalt im Vergleich zum Anteil der Gesteinskörnung zurückzuführen ist. Dies bewirkt, dass die obersten Zementsteinschichten unter einer Frost-Tausalzbelastung verstärkt abwittern können. Es konnte zudem ein früheres Einsetzen einer inneren Schädigung festgestellt werden.

Der Unterschied zwischen Portland- und Hüttensandzementen hinsichtlich des Abwitterungsverlaufes konnte erneut betätigt werden. So führt die karbonatisierte Randzone bei CEM III Betonen zu einem früheren Anstieg der Abwitterungsmenge verglichen mit CEM I Betonen, bei welchen sich ein eher progressiver Verlauf darstellt. Zum Ende der Prüfung erreichen diese dann allerdings häufig höhere Werte als die Betone mit Hüttensandzement. Auch die innere Schädigung wird bei CEM III-Betonen eher erreicht, als es bei Portlandzementbetonen der Fall ist. Die karbonatisierte porösere Randzone bewirkt eine beschleunigtere Feuchteaufnahme, was den Sachverhalt der schneller einsetzenden inneren Schädigung begründet.

Allgemein stellt sich die innere Schädigung als weniger geeignetes Kriterium für die Prüfung und Beurteilung XF2 geeigneter Betone dar. Die innere Schädigung unterscheidet zu wenig zwischen einem reinen Frostangriff (XF1 bzw. XF3) und einem Frosttausalzangriff (XF2 bzw. XF4). Mit ihr sollte daher primär der reine Frostangriff bestimmt werden. Dagegen ist die Abwitterung als Beurteilungskriterium für das Prüfkriterium XF2 vorzuziehen, da sich hierbei die Variationen der Randbedingungen deutlicher voneinander unterscheiden lassen. Gleiches gilt auch für die Differenzierung verschiedener Betonqualitäten. Bei der Feuchteaufnahme muss man zwischen der äußersten Oberflächenschicht und dem Betoninneren unterscheiden. Mit steigender Minimaltemperatur sinkt die Stärke der Mikroeislinsepumpe ab. In größerer Tiefe ist für die Beurteilung der Schädigung zusätzlich der dynamische, instationäre Verlauf wichtig, der durch den Temperaturzyklus erzeugt wird. An der Oberfläche hingegen ist die Minimaltemperatur entscheidend. Hinzu kommt, dass gelöste Stoffe wie vor allem Tausalze im wesentlichen an der Oberfläche wirken und dort den Angriff auch schon bei niedrigen Konzentrationen signifikant erhöhen. In größeren Tiefen wirkt der Beton als Filter und mindert diesen Angriff ab. Damit stellt die Abwitterung das geeignetere Beurteilungskriterium für die XF2 Exposition dar.

Festzuhalten ist also, dass sich über die Einstellung eines mäßigeren Feuchtegehaltes bzw. Sättigungsgrades, was innerhalb eines Laborprüfverfahrens grundsätzlich schwer zu realisieren ist, eine Beurteilung des Widerstandes gegenüber einer XF2 Exposition nicht eindeutig vornehmen lässt. Zur Beurteilung des Widerstandes ist vielmehr der Zeitfaktor d.h. die Sättigungsgeschwindigkeit von entscheidender Bedeutung, da diese darüber Aufschluss gibt, wie lange ein Beton in der Praxis einen

XF2 Angriff übersteht, bevor eine kritische Sättigung, auch in tieferen Schichten, erreicht wird. Die entscheidende Frage ist somit weniger, wo die kritische Sättigung eines Betons liegt, sondern vielmehr, wann diese erreicht wird.

Zusammenfassend können also folgende Schlussfolgerungen getroffen werden:

- Grundsätzlich sollte eine Prüfung bei Erreichen einer Abwitterung von 3000 kg/m² bzw. bei einem Abfall des dyn. E-Moduls auf 60 % abgebrochen werden. Aufgrund der starken Schädigung wird hier die Streuung der Ergebnisse zu groß.
- Schon bei einer Erhöhung der NaCl-Konzentration von 0 % auf 1 % wird ein Schädigungsmaximum erreicht und zwar kaum abhängig von der gewählten Minimaltemperatur. Dies trifft insbesondere für die Abwitterung zu. Bei Verwendung von demineralisiertem Wasser unterscheidet hingegen die innere Schädigung stärker, da hier die Abwitterung stark reduziert ist und damit hohen Streuungen unterliegt.
- Bei Konzentrationen oberhalb von 3% beobachtet man einen deutlich verlangsamten Schädigungsverlauf, was sich besonders bei der Abwitterung bemerkbar macht. Eine Staffelung der Schädigungsgarde mit zunehmender NaCl-Konzentration ist zu verzeichnen.
- Oberhalb von 8% NaCl nimmt die Schädigung durch die Absenkung des Gefrierpunkts der NaCl-Lösung so stark ab, dass die verschiedenen Schädigungsgrade bei unterschiedlichen Betonqualitäten kaum noch unterscheidbar sind. Dies gilt sowohl für die Abwitterung als auch für die innere Schädigung. Die Feuchteaufnahme ist bei höheren NaCl-Konzentrationen ebenfalls aufgrund der ausbleibenden Eisbildung bis -20°C bzw. -10°C verlangsamt – die Wirkung der Frostpumpe wird stark reduziert.
- Eine Erhöhung der Minimaltemperatur auf -10°C stellt einen abgeschwächten Angriff dar. Die Abwitterung fällt deutlich niedriger aus. Bei der inneren Schädigung verläuft der Schädigungsprozess zeitverzögert. Bei der inneren Schädigung kann eine Aussage deshalb erst nach längerer Prüfdauer getroffen werden.
- Die Zementart, die Zementmenge sowie der w/z-Wert üben je nach Chloridkonzentration einen entscheidenden Einfluss auf den Schädigungsgrad aus.
- Eine Unterscheidung der verschiedenen Betonqualitäten ist über die Beurteilung der Abwitterung möglich.

Vergleicht man abschließend die variierten Parameter und deren Auswirkungen auf die Messparameter Feuchteaufnahme, innere Schädigung und Abwitterung können die untersuchten Maßnahmen wie folgt bewertet werden:

Variationsparameter	Auswirkung auf die Messparameter	Maßnahme zielführend
Nachbehandlung	<ul style="list-style-type: none"> Einfluss auf innere und äußere Schädigung zu gering 	nein
Vorlagerungsdauer	<ul style="list-style-type: none"> kapillare Feuchtaufnahme wird durch die Frostpumpe kompensiert keine definierten Randbedingungen zu Beginn Befrostung 	nein
Wechselagerung	<ul style="list-style-type: none"> Unterbrechung Feuchtaufnahme, Verzögerung Schadensparameter Prüfdauer wird unnötig verlängert, Schädigungsgeschwindigkeit bei Anwesenheit von Prüflösung + FTW nicht reduziert 	nein
Anhebung der Minimaltemperatur	<ul style="list-style-type: none"> Reduzierung der Abwitterung in Abhängigkeit der Betonqualität Feuchtaufnahme und innere Schädigung erfolgen zeitverzögert 	ja
Höhere NaCl-Konzentration	<ul style="list-style-type: none"> 3-8%: verlangsamter Schadensverlauf >8%: Schädigung zu stark reduziert, keine Unterscheidung der Betonqualitäten mehr möglich 	nein
Niedrige NaCl-Konzentration	<ul style="list-style-type: none"> 1-3%: Schädigungsmaximum 0,1-1%: Reduzierung der äußeren (und auch inneren) Schädigung Einstellung derart niedriger Konzentrationen im Labor schwierig 	nein
Kombination Veränderung NaCl-Konz. und Minimaltemperatur	<ul style="list-style-type: none"> >3%: Abschwächung zu stark, Eisbildung bleibt aus <1%: Abschwächung ebenfalls sehr stark, kein Vorteil gegenüber einer 3%igen Lösung und -10°C 	nein
Reduzierung der Anzahl an FTW und Anpassung des Abnahmekriteriums	<ul style="list-style-type: none"> Aussagefähigkeit bei Kombination 3% NaCl und -10°C nach 14 FTW gegeben Unterscheidung zwischen den Betonqualitäten möglich geeignete Abschwächung erreicht mit Reduzierung des Prüfumfanges Definition des Grenzwertes derzeit noch nicht möglich 	ja

Anhand der gewonnenen Daten kann geschlussfolgert werden, dass eine Abschwächung eines Frost-Tausalzangriffes gemäß XF2 Exposition über die Einstellung folgender Randbedingungen erreicht wird:

- Erhöhung der Minimaltemperatur von -20°C auf -10°C bei gleicher Abkühlgeschwindigkeit bzw. Auftaurate (längere Haltezeiten)
- Verkürzung der Prüfdauer auf 14 FTW anstatt 28 FTW
- Anpassung des Abnahmekriteriums, d.h. der maximal zulässigen Abwitterungsmenge nach 14 FTW
- Beibehaltung einer NaCl-Konzentration von 3%

Damit können verschiedene Betonqualitäten unterschieden werden. Betone, die für eine Belastung nach XF2 zulässig bzw. unzulässig, sind kann sicher erfolgen.

Es muss an dieser Stelle festgehalten werden, dass für die Anpassung des Abnahmekriteriums die Datenmenge bzw. die Variationen der Zusammensetzung derzeit noch nicht ausreicht, um einen endgültigen Grenzwert festzulegen. Daher lässt sich mit den bisherigen Ergebnissen eine Anpassung der Prüfrandbedingungen an eine gezielte und sichere XF2 Simulation vornehmen, nicht aber die Festlegung einer maximal zulässigen Abwitterungsmenge nach den nun vorgeschlagenen 14 FTW. Hierfür sind weitere Untersuchungen nötig.

Die Trennschärfe des Prüfverfahrens CDF/ CIF, dessen Abnahmekriterien und Prüfrandbedingungen für die Klassen XF3 und XF4 geeignet sind, hat sich anhand der Ergebnisse dieser Untersuchungen erneut bestätigt. Die Präzisionsdaten für 1500 g/m^3 in XF3 und XF4 wurden durch zahlreiche Ringversuche zweifelsfrei gesichert [123].

8 Teil 2: Praxisuntersuchungen im Vergleich zur Laborprüfung

8.1 Allgemeines

Die Untersuchungen am cbm der TU München sind, wie bereits erwähnt, in zwei Abschnitte unterteilt.

Im ersten Abschnitt wurden Betone hergestellt, die an zwei unterschiedlichen Stellen in Deutschland für den Zeitraum von drei Wintern ausgelagert werden. Im Rahmen der Herstellung wurden alle relevanten Laborkennwerte am Frisch- und Festbeton untersucht.

Während der Auslagerung wurden an ausgewählten Betonen Widerstands- und Temperaturmessungen in unterschiedlichen Tiefen durchgeführt, um abschätzen zu können, wie tief Wasser während der Nutzungsdauer in Betonbauteile eindringt bzw. wie sich Temperaturänderungen an der Oberfläche im Bauteilinneren auswirken. Darüber hinaus wurden die ausgelagerten Probekörper hinsichtlich ihrer äußeren und inneren Schädigung begutachtet. Nach der Auslagerung wurden an den Probekörper weitere Untersuchungen durchgeführt, um den teilweise entstandenen Frost-Tausalz-Schaden beschreiben zu können.

Im zweiten Untersuchungsabschnitt wurden die im Bereich XF2 ausgelagerten Betone mit dem durch das IBPM der Universität Duisburg-Essen entwickelten Verfahren zur Ermittlung des Widerstandes gegenüber einem XF2 Angriff (modifizierter CDF-Test) bewertet. Hierbei wurden die Probekörper statt mit den vorgeschlagenen 14 Frost-Tau-Wechseln mit 28 Frost-Tau-Wechseln beansprucht.

8.2 Untersuchte Betone

8.2.1 Zusammensetzung der Betone

Es wurden insgesamt 8 unterschiedliche Betone mit unterschiedlichem w/z-Wert, Zementgehalt und Zementart hergestellt. Anders als bei den im vorangegangenen Teil vorgestellten Betonen lag der Fokus hierbei auf der Variation der Betone. Es wurden neben dem identischen Portlandzement auch ein Portlandkalksteinzement verwendet. Tabelle 10 enthält die Bezeichnung sowie die wichtigsten Kennwerte der Zusammensetzung der Betone. In Spalte 5 ist die Expositionsklasse aufgeführt, in der die Betone aufgrund deren Zusammensetzung nach DIN 1045-2:2001-07 eingesetzt werden können. Zugrunde gelegt wurde hierbei die in Kapitel 4 dargestellte Tabelle 1.

Ziel dieser Auswahl der Betone war eine breite Abdeckung der üblicherweise in der Praxis eingesetzten Betone. Des Weiteren sollten mit einer planmäßigen Abweichung von den Vorgaben der Norm auch Zusammensetzungen untersucht werden, die nicht in der Expositionsklasse XF2 und XF4 eingesetzt werden dürfen. Als Abweichungen wurden hierbei eine Erhöhung des w/z-Wertes sowie der Verzicht auf Mikroluftporen gewählt.

Tabelle 10: Bezeichnung und Zusammensetzung der untersuchten Betone

Bezeichnung	Zement	w/z-Wert	LP-Mittel	Expositionsklasse
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
A	CEM I 32,5 R	0,50	nein	XF 2
B	CEM I 32,5 R	0,60	nein	XF 1
C	CEM I 32,5 R	0,70	nein	-
D	CEM I 32,5 R	0,50	ja	XF 4
E	CEM I 32,5 R	0,60	ja	XF 1
F	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	nein	XF 2
G	CEM II A-LL 32,5 R	0,60	nein	XF 1
H	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	ja	XF 4

Wie in Tabelle 10 dargestellt, erfüllen nur die Betone D und H die Anforderungen für die Expositionsklasse XF4, die Betone A und F können gemäß DIN 1045-2:2001-07 in der Expositionsklasse XF2 eingesetzt werden. Alle anderen Betone weichen von den Anforderungen aufgrund des Fehlens von Mikroluftporen und/ oder einem zu hohen w/z-Wert ab.

Alle Betone wurden mit einem calcitischen Sand mit quarzitischen Anteilen und Kies mit einem Größtkorn von 16 mm hergestellt. Die Zuschläge wurden auf deren Frost-Tausalz-Widerstand untersucht und können alle für Betone im Bereich der Expositionsklasse XF4 eingesetzt werden.

Bei den Betonen mit einem w/z-Wert von 0,50 bzw. 0,60 wurde eine Sieblinie in der Nähe der Sieblinie A gewählt, bei dem Beton C mit einem w/z-Wert von 0,70 wurde aufgrund der sonst bestehenden Gefahr des Blutens eine Sieblinie in der Nähe der Sieblinie B gewählt. Die verwendeten Sieblinien sind in Abbildung 61 dargestellt.

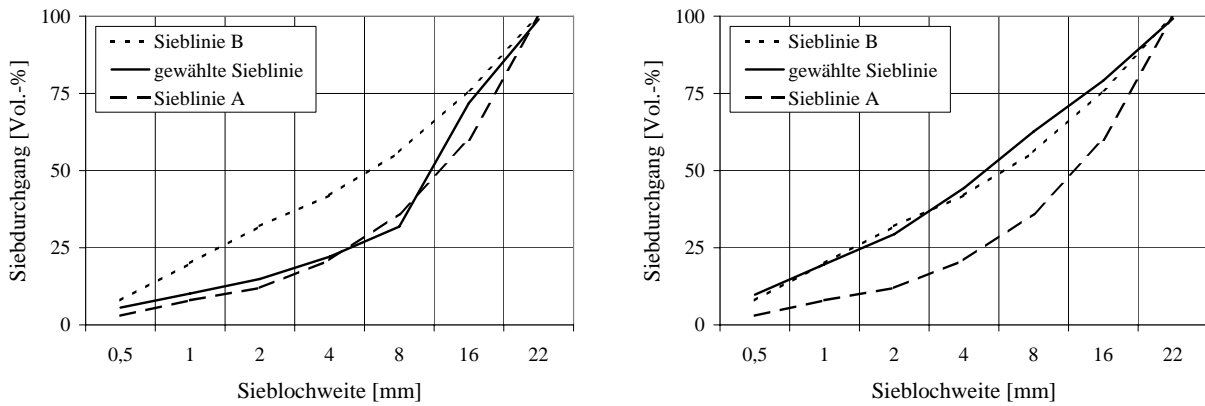


Abbildung 61: Gewählte Sieblinie der Betone mit einem w/z-Wert von 0,50 und 0,60 (links) bzw. einem w/z-Wert von 0,70 (rechts)

Weitere Zusatzmittel etc. wurden nicht verwendet. Durch den Verzicht auf die Zugabe eines Fließmittels sollte sichergestellt werden, dass unterschiedliche Zugabemengen des Fließmittels die Porenstruktur und damit den Frost-Tausalz-Widerstand der Betone nicht beeinflussen kann.

Tabelle 11 enthält die Zusammensetzung der einzelnen Betone.

Tabelle 11: Zusammensetzung der Betone

	Einheit	Beton A, F	Beton D	Beton B, G	Beton E	Beton C
1	2	3	4	5	6	7
w/z-Wert	[-]	0,50	0,50	0,60	0,60	0,70
LP-Mittel	[-]	nein	ja	nein	ja	nein
Zement	[kg/m ³]	320	320	320	320	320
Wasser	[kg/m ³]	160	160	192	192	224
Sand 0/4	[kg/m ³]	588	564	562	538	1162
Kies 4/8	[kg/m ³]	736	706	704	673	181
Kies 8/16	[kg/m ³]	650	623	621	594	448

8.2.2 Herstellung der Betone

Zuerst wurden alle getrockneten Bestandteile in einem Zwangsmischer vorgemischt. Danach wurden das Wasser und gegebenenfalls der Luftporenbildner zugegeben. Der Beton wurde nach einer 30 Sekunden dauernden Wasserzugabe für weitere 60 Sekunden gemischt.

Während der Untersuchungen am Frischbeton wurde dieser mit feuchten Jutetüchern abgedeckt im Mischer bis zur Herstellung der Probekörper gelagert. So sollte ein Feuchtigkeitsverlust während der Herstellung vermieden werden.

8.3 Untersuchungen am Frischbeton

Am Frischbeton wurden die praxisüblichen Kennwerte ermittelt. Hierzu zählen neben der Frischbetontemperatur die Konsistenz, die Frischbetonrohddichte sowie der Luftporengehalt. Die Konsistenz wurde je nach w/z-Wert mit dem Verdichtungsmaß bzw. dem Ausbreitmaß ermittelt. Der Luftporengehalt wurde nur bei den Betonen mit LP-Bildner durchgeführt und erfolgte in einem 8-Liter-Luftporentopf.

Tabelle 12 enthält die am Frischbeton ermittelten Kenngrößen und die entsprechenden Regelwerke.

Nach Beendigung des Mischvorganges wurde aus der Mischtrommel zu den in Tabelle 12 aufgeführten Prüfzeitpunkten Frischbeton entnommen. Vor der Entnahme wurde der Beton jeweils kurz aufgemischt (rund 5 Sekunden). Die Verarbeitbarkeit wurde in die im DIN-Fachbericht 100 [16] aufgeführten C- bzw. F-Klassen eingeteilt.

Tabelle 12: Kennwerte des Frischbetons

Kennwert	Zeit nach Wasserzugabe	Normenverweis
[-]	[min]	[-]
1	2	3
Temperatur	5	-
Konsistenz (Verdichtungsmaß)	5	DIN EN 12350-4:2000-06 [8]
Konsistenz (Ausbreitmaß)	5	DIN EN 12350-5:2000-06 [9]
Rohddichte	10	DIN EN 12350-6:2000-03 [10]
Luftporengehalt	10	DIN EN 12350-7:2000-11 [11]

8.4 Herstellung der Probekörper und Untersuchungen am Festbeton

Nach der Ermittlung der Frischbetoneigenschaften wurden die Probekörper für die weiteren Festbetonuntersuchungen hergestellt. Am Festbeton sollten im Labor die Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen, der Frost-Tausalz-Widerstand sowie die Luftporenkennwerte im Festbeton bei den Betonen mit LP-Bildnern untersucht werden. Eine genaue Beschreibung der durchgeführten Untersuchungen enthält Kapitel 8.5.

Die Probekörper wurden auf einem Rütteltisch verdichtet und anschließend nach Tabelle 13 gelagert.

Tabelle 13: Lagerungsarten der Probekörper

Probekörper	Lagerung
1	2
28-Tage-Druckfestigkeit	1 d in $20 \pm 2 \text{ °C} / 98 \pm 2 \text{ % r.F.}$ 6 d in Wasser ($20 \pm 2 \text{ °C}$) 21 d in $20 \pm 2 \text{ °C} / 65 \pm 2 \text{ % r.F.}$
Frost-Tausalz-Widerstand (CDF-Prüfung)	1 d in $20 \pm 2 \text{ °C} / 98 \pm 2 \text{ % r.F.}$ 6 d in Wasser ($20 \pm 2 \text{ °C}$) 21 d in $20 \pm 2 \text{ °C} / 65 \pm 2 \text{ % r.F.}$
Luftporenkennwerte	1 d in $20 \pm 2 \text{ °C} / 98 \pm 2 \text{ % r.F.}$ 6 d in Wasser ($20 \pm 2 \text{ °C}$) bis zur Prüfung in $20 \pm 2 \text{ °C} / 65 \pm 2 \text{ % r.F.}$
Probekörper für die Auslagerung	1 d in $20 \pm 2 \text{ °C} / 98 \pm 2 \text{ % r.F.}$ 2 d in Folie bei $20 \pm 2 \text{ °C}$ bis zur Auslagerung im Freilager der TU München, Exposition gemäß späterer Lagerung (XF2: senkrechte Prüffläche, XF 4: waagrechte Prüffläche)

Die Probekörper, die für die Auslagerung vorgesehen waren, wurden zusätzlich im Alter von 3 Tagen, also vor der Lagerung im Freilager, abgedichtet. Hierzu wurde ein aluminium-kaschiertes Butyl-Kautschuk-Band verwendet. Beim Abdichten wurde nur die Fläche, die später belastet werden sollte, nicht beklebt.

8.5 Untersuchungen am Festbeton

Die Ermittlung der Rohdichte und Druckfestigkeit erfolgte nach DIN EN 12390-3: -2002-04 [13] an nach Kapitel 8.4 hergestellten und gelagerten Probekörpern.

Die Ermittlung der Luftporenkennwerte am Festbeton erfolgte gemäß DIN EN 480-11: 2005-03 [15] an nach Kapitel 8.4 hergestellten Probekörpern. Hierzu wurde aus jedem Würfel eine Platte mit den Abmessungen $150 \times 100 \times 40 \text{ mm}^3$ entnommen. Je eine Seite wurde geschliffen und poliert. An diesen Seiten wurde die Porensehnenlängenverteilung bestimmt. Die Gesamtmesslänge betrug rd. 2,40 m. Anschließend wurden der Abstandsfaktor \bar{L} , der Mikroluftporengehalt A_{300} und der Gesamtluftgehalt A bestimmt.

Der Frost-Tausalz-Widerstand wurde gemäß DIN EN 12390-9:2002-05 [14] bzw. dem Merkblatt *Frostprüfung von Beton* der Bundesanstalt für Wasserbau [27] ermittelt. Hierzu wurde aus den nach Kapitel 8.4 hergestellten und gelagerten Probekörpern Platten mit den Abmessungen $150 \times 110 \times 70 \text{ mm}^3$ gesägt, die Seitenflächen wurden mit einer aluminiumkaschierten Butylkautschukfolie beklebt (vgl. Kapitel 5.2).

Die Probekörper saugten ab einem Alter von 28 Tagen über die an Teflon geschaltete Stirnseite Prüflösung. Anschließend wurden die Probekörper 56 Frost-Tau-Wechseln

ausgesetzt. Vor und während der Frostbeanspruchung wurden die feuchte Masse der Probekörper, die getrocknete Abwitterung und die Ultraschalllaufzeit gemäß dem BAW-Merkblatt *Frostprüfung von Beton* [27] bestimmt. Aus der Änderung der Ultraschalllaufzeit wurde die innere Schädigung berechnet.

Als Prüflüssigkeit wurde eine 3 M.-%ige NaCl-Lösung verwendet.

8.5.1 Frost-Tausalz-Widerstand nach einem modifizierten CDF-Verfahren

Durch das IBPM der Universität Duisburg-Essen wurde der CDF-Test in der Weise modifiziert, dass dieser einen abgeschwächten Angriff gemäß XF2 Exposition darstellen sollte. Die Herstellung und Lagerung der Probekörper erfolgte entsprechend dem CDF-Verfahren. Im Unterschied hierzu beträgt die Minimaltemperatur bei den Frost-Tau-Wechseln nicht -20 °C, sondern -10 °C.

Alle Probekörper wurden entsprechend der DIN 12390-9 28 Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt.

8.6 Auslagerung

8.6.1 Zuordnung der Betone zu den Auslagerungsstellen XF2 und XF4

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurden Probekörper aus den oben aufgeführten Betonen auf deren Verhalten in den Expositionsklassen XF2 und XF4 unter realen Bedingungen untersucht. Tabelle 14 enthält die Zusammensetzung der untersuchten Betone sowie die Zuordnung zu den jeweiligen Expositionsklasse der Auslagerung.

Zusätzlich zu den in München hergestellten Probekörpern wurden am Auslagerungsort „Farchant“ auch Probekörper, die in Essen hergestellt worden waren, untersucht. Die Betonzusammensetzung ist in Tabelle 7 enthalten. Es handelt sich hierbei um die Serien S1 und S3, die beide mit einem Hochofenzement der Festigkeitsklasse 32,5 ohne die Verwendung eines Luftporenbildners hergestellt worden waren.

Die Betone wurden demnach hauptsächlich in der ihrer Zusammensetzung entsprechenden Exposition gelagert. Zusätzlich wurden einige Betone, sofern sie nicht der Expositionsklasse XF4 zugeordnet sind, einem stärkeren Angriff ausgesetzt. Ziel dieser planmäßigen Überbeanspruchung war es aufzuzeigen, inwieweit auch bei Betonen, die nicht für eine entsprechende Expositionsklasse vorgesehen sind, eine Korrelation zwischen den Laborergebnissen und den Beobachtungen in der Praxis besteht.

Tabelle 14: Zusammensetzung der untersuchten Betone; Expositionen der ausgelagerten Probekörper

Beton	Zement	w/z-Wert	LP-Mittel	Exposition der ausgelagerten Probekörper	
				XF2	XF4
1	2	3	4	5	6
A	CEM I 32,5 R	0,50	nein	X	X
B	CEM I 32,5 R	0,60	nein	X	
C	CEM I 32,5 R	0,70	nein	X	
D	CEM I 32,5 R	0,50	ja		X
E	CEM I 32,5 R	0,60	ja	X	X
F	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	nein	X	X
G	CEM II A-LL 32,5 R	0,60	nein	X	
H	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	ja	X	
S1 ¹	CEM III 32,5	0,60	nein	X	
S3 ¹	CEM III 32,5	0,50	nein	X	

1: hergestellt in Essen

2: Auslagerung nur in Farchant

8.6.2 Lagerung der Probekörper während der Auslagerung

Ziel der Untersuchungen ist eine möglichst realitätsnahe Nachbildung der Verhältnisse von Betonbauteilen, wie sie im Bereich der Expositionsklassen XF2 und XF4 vorkommen (z.B. Stützen, Widerlager). Aus genehmigungstechnischen Gründen, die im Bereich von befahrenen Straßen keine massigen Bauteile erlauben, musste auf Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm zurückgegriffen werden. Abbildung 62 enthält eine Skizze der Herstellung der ausgelagerten Probekörper.

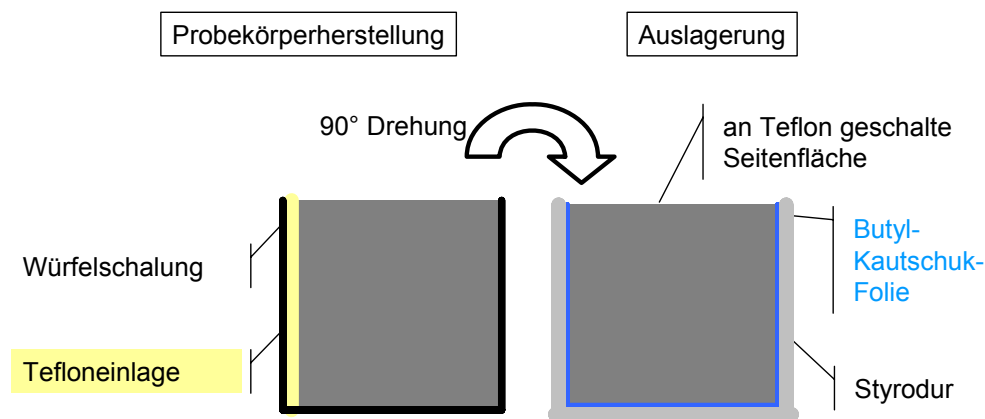
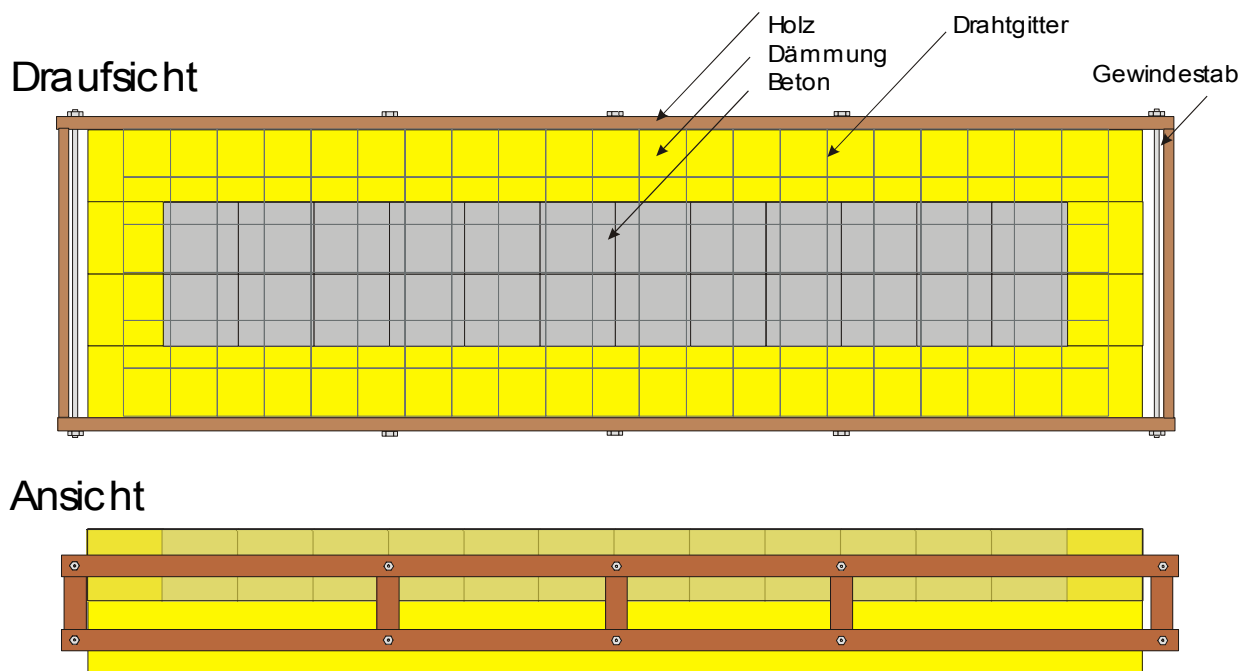


Abbildung 62: Herstellung der ausgelagerten Probekörper

Da die Transportmechanismen und die Temperaturgradienten, die sich in realen Bauteilen während Frost-Tau-Wechseln ausbilden, stark von der Geometrie abhängig sind, wurden die Probekörper seitlich abgedichtet und gedämmt. Hierdurch sollte sichergestellt werden, dass der Feuchte- und Wärmetransport, wie in

praxisnahen größeren Bauteilen, nur eindimensional stattfinden kann. Um außerdem einen Einfluss von Schalöl auszuschließen, wurden die bewitterten Flächen an Teflon geschalt. Die Probekörper wurden einzeln abgedichtet und während der Auslagerung nebeneinander gelagert. Die Rand- und die Unterseite der Auslagerungsstände wurden mit einer 15 cm dicken Dämmung gedämmt. In Abbildung 63 ist ein Auslagerungsstand, wie er im Rahmen dieser Untersuchungen verwendet wurde, abgebildet.



Maße

Länge: beliebig (hier: 2,10 m)

Breite: 0,60 m

Höhe: ca. 0,30 m

Abbildung 63: Skizze der Auslagerungsstände

Die Herstellung der Auslagerungsstände aus Holz war wiederum aus sicherheitstechnischen Aspekten durch die Autobahndirektion vorgegeben. Einer Auslagerung über 3 Wintern hielten diese stand. Eine weitere Vorgabe aufgrund sicherheitstechnischer Vorschriften war seitens der Autobahndirektion die Lagerung der Probekörper hinter der Leitplanke. Eine Beaufschlagung der Oberfläche mit Spritzwasser war damit nicht gegeben. Echtes „Spritzwasser“ konnte allerdings bei beiden Auslagerungsorten auch vor der Leitplanke aufgrund guter Drainage, wie sie im Autobahnbau üblich ist, nicht festgestellt werden. Dennoch war bei Regenereignissen durch den Sprühnebel eine schnelle und ausreichende Befeuchtung der Oberfläche gegeben.

Durch die damit allseitig vorhandene Abdichtung und die Dämmung um das gesamte Probekörperpaket ist davon auszugehen, dass die Transportmechanismen (Wärme- und Feuchtetransport) eindimensional statt finden. Durch den Verzicht auf einen

Überstand bei der seitlichen Abdichtung bei den im Bereich XF4 gelagerten Probekörpern wird eine Pfützenbildung auf der Oberfläche vermieden. Die Oberfläche entspricht aber somit einer planmäßig ausgeführten horizontalen Fläche im Bereich des Straßenbaus mit einer ausreichenden Neigung zur Vermeidung der Pfützenbildung.

8.6.3 Lage der Auslagerungsorte

Als Auslagerungsorte wurden zwei Bereiche an Autobahnen gewählt, die den Expositionsclassen, die in Deutschland herrschen, repräsentativ entsprechen sollen.

Als Orte wurde die Autobahn A46 in der Nähe von Meschede im Sauerland und die autobahnähnlich ausgebaute Schnellstraße B23 (Verlängerung der Autobahn A96) in der Nähe von Farchant gewählt. Die Probekörper lagerten hierbei zwischen den beiden Fahrbahnen in den Expositionsclassen XF2 (senkrechte Prüffläche) und XF4 (waagrechte Prüffläche). Durch die Lagerung im Mittelbereich der Autobahn wurde erreicht, dass die Probekörper einer maximalen Tausalzbelastung ausgesetzt sind und diese nicht, wie dies bei einer Auslagerung neben der Autobahn der Fall wäre, durch den Seitenstreifen behindert wird. Des Weiteren wäre bei einer Auslagerung neben der Autobahn damit zu rechnen gewesen, dass vor allem bei extremen Wintern mit hohem Niederschlag durch den Winterdienst Schnee vor die Probekörper aufgehäuft würden, die ihrerseits durch eine starke Reduktion des Tausalzangebotes und der Verringerung der Temperaturdifferenz zwischen Minimal- und Maximaltemperatur je Tag den Frost-Tausalz-Angriff wesentlich beeinflusst hätten. Eine Auslagerung neben der Autobahn hätte demnach nicht den schärfsten Fall einer Frost-Tausalz-Belastung dargestellt.

Die Auslagerung der Probekörper in Farchant erfolgte im November 2002, die Auslagerung in Meschede erfolgte im Mai 2003. Abbildung 65 zeigt Fotos der Auslagerungsstellen „Meschede“ und „Farchant“ und in Abbildung 64 ist die geographische Lage dargestellt.



Abbildung 64: Ansicht der Auslagerungsorte Farchant (links) und Meschede (rechts)



Abbildung 65: Lage der Auslagerungsorte Meschede und Farchant

8.6.4 Untersuchungen an den Probekörper während der Auslagerung

Die Untersuchungen an den ausgelagerten Probekörpern gliedern sich in zwei Teile. So wurden kontinuierliche Messungen mit Hilfe eines computergesteuerten Messwerverfassungssystems durchgeführt. Außerdem wurden die Probekörper jeweils zwischen den Wintern auf Schäden begutachtet und die innere Schädigung sowie die Masse ermittelt.

Kontinuierliche Messung

Während der Auslagerung wurde mit Hilfe von Multiringelektroden der innere Widerstand ermittelt. Hierzu wurden Multiringelektroden in Würfel ausgewählter Betone einbetoniert. Dadurch ist die Messung des Widerstandes in 8 unterschiedlichen Tiefen bis zu einer Gesamttiefe von rund 40 mm möglich. Die Messungen fanden sowohl an Probekörpern, die im XF2-Bereich ausgelagert waren, als auch in Probekörpern im XF4-Bereich statt.

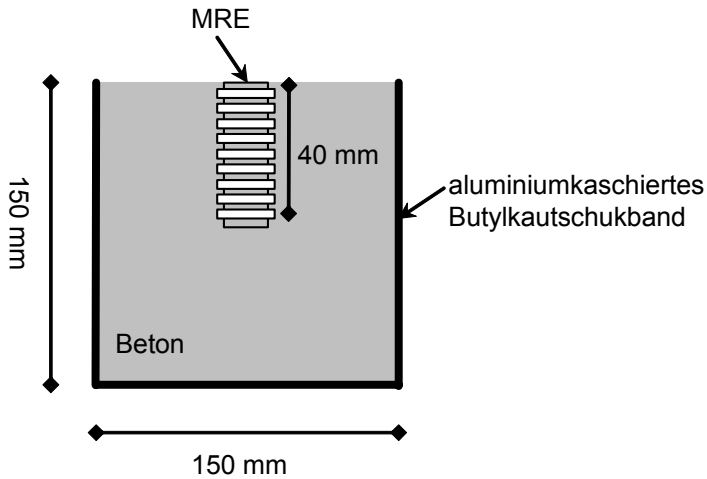


Abbildung 66: Aufbau der Probekörper zur MRE-Messung

Erste Untersuchungen zur Leitfähigkeit von Beton wurden 1911 durchgeführt [3]. Weiterführende Untersuchungen unterschiedlichster Autoren verfeinerten das Verständnis über die Leitfähigkeit [4, 29, 40, 49].

Bei der Leitfähigkeitsmessung von Beton nutzt man die Eigenschaft, dass der Widerstand von trockenem Beton, der in der Regel mehr als $100.000 \Omega\text{m}$ beträgt, deutlich über dem Widerstand von Wasser oder Salzlösungen liegt. Wird Wasser in der Zementsteinmatrix aufgenommen, vermindert sich der gemessene Widerstand deutlich. In Abbildung 67 ist beispielhaft als Ergebnis von Untersuchungen von ELKEY et al. [18] der Widerstand von Beton in Abhängigkeit der Feuchte dargestellt. Die Untersuchungen wurden an einem Mörtel mit einem Zementgehalt von 350 kg/m^3 und einem w/z-Wert von 0,60 durchgeführt. Ähnliche Beziehungen sind auch von Untersuchungen anderer Autoren bekannt.

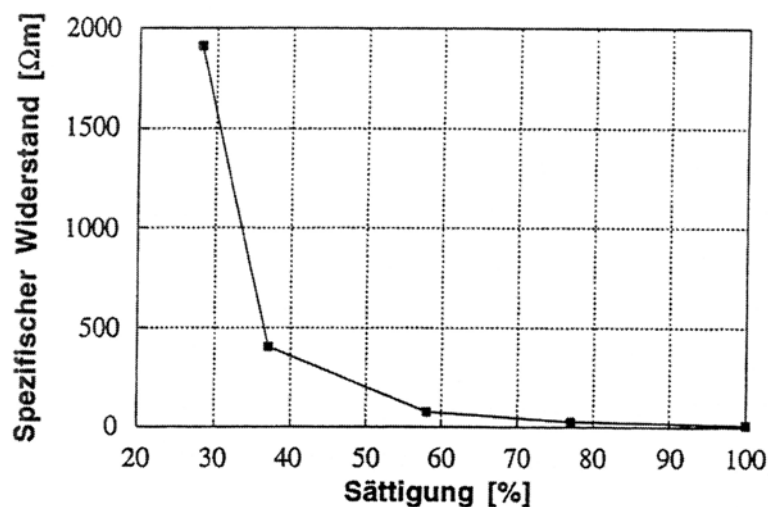


Abbildung 67: Einfluss der Sättigung auf den spezifischen Widerstand von Beton

Gut zu erkennen ist die starke Abhängigkeit des spezifischen Widerstandes von der Feuchte, vor allem in einem Bereich bis ca. 60 % Sättigung ist eine klare Differenzierung der Widerstände möglich.

In weiteren Untersuchungen wurde eine tiefenabhängige Messwerterfassung durch den Bau so genannter Multiringelektroden ermöglicht [34 , 6]. Die in diesem Forschungsprojekt eingesetzten Multi-Ring-Elektroden bestehen aus acht Edelstahlringen, die durch Zwischenringe aus Kunststoff in definiertem Abstand gehalten werden. In Abbildung 68 ist eine Skizze der eingesetzten Multiringelektroden dargestellt.

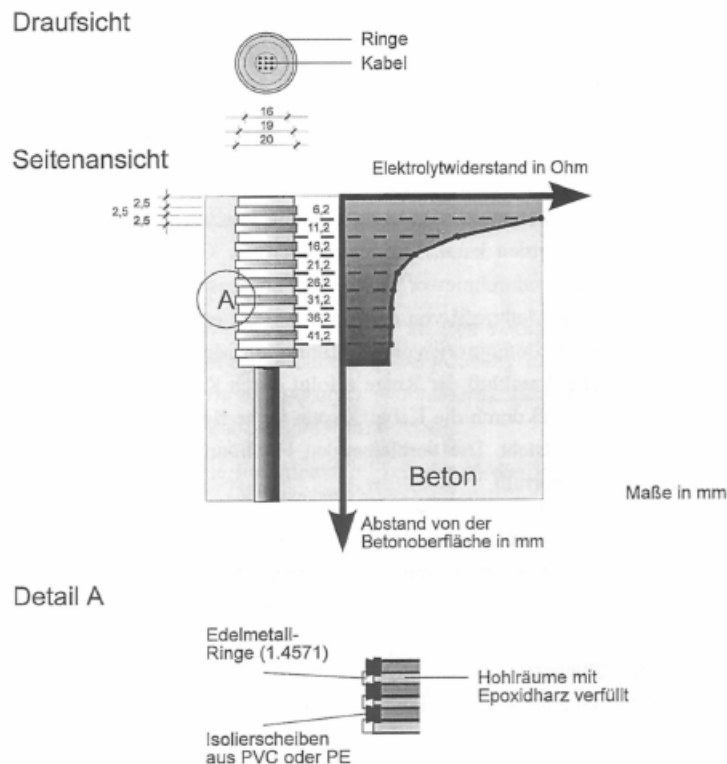


Abbildung 68: Skizze einer Multiringelektrode [39]

Die Dicke der Edelstahl- und Kunststoffringe beträgt 2,5 mm bei einem Durchmesser von 20 mm. Die Messung erfolgt mit Wechselstrom, um den sog. Polarisierungseffekt oder chemische Reaktionen im Baustoff zu vermeiden [24]. Hierbei wird ein definierter Strom auf jeweils zwei benachbarte Ringe aufgebracht und der Abfall der Spannung gemessen. Dieser ist im Vergleich zum Leitungsverlust hauptsächlich durch die Betonschicht und deren Widerstand vorgegeben. Aus diesen Werten kann dann der Widerstand ermittelt werden. In dem vorliegenden Forschungsvorhaben erfolgte dies direkt durch die Messwerterfassung.

Wie anfangs geschildert ist der Feuchtegehalt im Porensystem maßgebend für den ermittelten Widerstand. Daneben beeinflussen aber auch andere Kennwerte den messbaren Spannungsabfall. So verursacht eine Abnahme der Betontemperatur bei gleichem Wassergehalt einen Anstieg des gemessenen Elektrolytwiderstandes. Da

gerade bei Auslagerungsversuchen, wie sie hier geplant sind, Temperaturänderungen von bis zu 60 K (Sommer: +40 °C, Winter: -20 °C) berücksichtigt werden müssen, ist eine Kompensation der Temperatur nötig. Diese kann durch den so genannten Arrhenius Ansatz erfolgen [6]. Als Referenztemperatur wird in den meisten Fällen eine Temperatur von 20 °C gewählt.

$$R_{T_0} = \frac{R_{\text{Mess}}}{e^{b \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0} \right)}} \quad \text{Gleichung 1}$$

mit:	R_{T_0}	[Ω]	Elektrolytwiderstand bezogen auf Referenztemperatur T_0
	R_{Mess}	[Ω]	gemessener Elektrolytwiderstand
	b	[K]	Konstante, hier $b = 2872$
	T	[K]	Temperatur zum Zeitpunkt der Messung
	T_0	[K]	Referenztemperatur, hier 20°C (293 K)

Die Konstante b ist abhängig von der jeweiligen Feuchte, kann aber nach Raupach [33] für eine mittlere Feuchte von 75 % mit guter Näherung auf 2872 gesetzt werden. Die Temperaturkompensation erfolgte durch die Messung der Temperatur in einem der ausgelagerten Würfel. Hier wurde bei der Herstellung ein Temperaturmessstab mit einbetoniert, so dass in unterschiedlichen Tiefen (bis an die Rückseite des Probekörpers) Temperaturen gemessen werden konnten.

Weitere Faktoren, wie zum Beispiel der Chloridgehalt, die ebenfalls einen Einfluss auf den gemessenen Elektrolytwiderstand haben können, erwiesen sich in den bisherigen Untersuchungen als nicht maßgebend und können daher gegenüber der Feuchteänderung und der Temperatur vernachlässigt werden.

Bei beiden Auslagerungsstellen fand die Messwerterfassung in Zusammenarbeit mit dem ibac der RWTH Aachen statt.

Untersuchungen zwischen den Winterperioden

Zusätzlich zu den kontinuierlichen Messungen wurden die Probekörper während der Auslagerung nach jedem Winter begutachtet.

Von allen Probekörpern wurde jeweils zum Zeitpunkt der Begutachtung die Masse ermittelt. Aus dieser wurde dann die prozentuale Veränderung während der Frostperioden berechnet. Als Nullmessung wurde die Masse der Probekörper zum Zeitpunkt der Auslagerung gewählt.

Des Weiteren wurde in Anlehnung an das Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ der Bundesanstalt für Wasserbau [27] die innere Schädigung mit Hilfe der Messung der Ultraschalllaufzeit ermittelt. Hierzu wurden insgesamt vier Achsen je Probekörper

definiert, jeweils kreuzweise angebracht mit einem Abstand von 35 mm zur Ober- bzw. Unterseite der beanspruchten Fläche. Die Schädigung der Achsen auf einer Höhe wurde jeweils gemittelt. So konnte zwischen einer oberflächennahen Schädigung und einer Schädigung im Kernbeton unterschieden werden.

Außerdem wurde die äußere Schädigung der Probekörper aufgenommen. Zur Beurteilung der Schädigung wurden die in Tabelle 15 aufgeführten Schädigungsklassen definiert. Bei der Beurteilung konnte so neben der Schädigungstiefe auch die jeweilige Schädigungsart unterschieden werden (sandige Abwitterung, plattige Abplatzungen).

Tabelle 15: Schädigungsklassen bei der Begutachtung der ausgelagerten Probekörper

Schädigungsklasse	Beschreibung
1	2
0	keine Schädigungen
1	einzelne freiliegende Zuschläge
2	Zuschläge liegen über den Großteil der Fläche frei
3	starke Schädigung (starke Abwitterung des Zementsteins und großflächiges Freiliegen von Zuschlägen)
4	sehr starke Schädigung (Risse, Kantenabbrüche)

8.6.5 Untersuchungen an den Probekörper nach der Auslagerung

Mit unterschiedlichen Methoden sollten nach der Auslagerung weitere Kennwerte zur Beurteilung gewonnen werden. Hierzu zählen sowohl weitere Kennwerte bezüglich der Schädigung, als auch Kennwerte zur Beurteilung der Exposition.

Haftzugprüfung

An ausgewählten ausgelagerten Probekörpern wurde im Labor eine Haftzugprüfung in unterschiedlichen Tiefen durchgeführt. In vorangegangenen Untersuchungen erwies sich dieses Verfahren durch einen Vergleich der Haftzugfestigkeit an der Oberfläche zur Haftzugfestigkeit im Kernbeton als gut geeignet, die jeweils geschädigte Tiefe festzustellen.

Die Haftzugfestigkeit wurde in Anlehnung an DIN 1048-2:1991-06 durchgeführt. Hierbei wurde eine rund 5 mm tiefe Nut in die Oberfläche eingebohrt, anschließend wurde ein Stempel mit einem Durchmesser von 50 mm aufgebracht und die Zugbruchlast ermittelt. Danach wurde eine Scheibe von 10 mm abgesägt, an der Schnittkante wurde wiederum die Haftzugfestigkeit ermittelt.

Bohrmehlentnahme zur Ermittlung des Chloridgehaltes

An ausgewählten Probekörpern wurde der Chloridgehalt in unterschiedlichen Tiefenstufen ermittelt. Hierzu wurden in 10 mm-Schritten Bohrmehl trocken entnommen.

Das Bohrmehl wurde aufbereitet und nach Heft 401 des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton wurde der Chloridgehalt ermittelt [47]. Aus dem entnommenen Bohrmehl wurde die Chloridverteilung in Abhängigkeit der Entnahmetiefe ermittelt.

Ziel dieser Untersuchungen war es, die Exposition hinsichtlich des Tausalzeintrages zu charakterisieren.

9 Ergebnisse der Praxis- und Laborversuche

9.1 Frischbetonuntersuchungen

Die Betone werden im Folgenden gemäß der Betonbezeichnung aus Tabelle 10 bezeichnet. Betone, deren Probekörper sowohl in XF2 als auch XF4 ausgelagert werden sollten, mussten aufgrund der großen Probekörperanzahl in zwei Mischungen hergestellt werden. Diese sind zusätzlich entsprechend mit einer Nummer bezeichnet.

In Tabelle 16 sind die Ergebnisse der Frischbetonuntersuchungen aufgeführt.

Tabelle 16: Ergebnisse der Frischbetonuntersuchung

Beton	Temperatur	Verdichtungsmaß	Ausbreitmaß	Konsistenz	Rohdichte	Luftgehalt
[-]	[°C]	[-]	[cm]	[-]	[kg/dm ³]	[Vol.-%]
1	2	3	4	5	6	7
A1	21,5	1,28	-	C1	2,47	-
A2	19,5	1,31	-	C1	2,48	-
B	20,0	-	46	F3	2,41	-
C	18,0	-	45	F3	2,32	-
D	18,0	1,17	-	C2	2,33	4,7
E1	18,0	-	57	F5	2,31	4,2
E2	18,5	-	57	F5	2,30	4,8
F1	20,5	1,34	-	C1	2,46	-
F2	19,5	1,24	-	C2	2,47	-
G	19,0	-	43	F3	2,42	-
H1	19,0	-	43	F3	2,31	4,9
H2	20,0	-	40	F2	2,30	5,0

Die Betone wiesen in Abhängigkeit der Zusammensetzung deutlich unterschiedliche Eigenschaften im Rahmen der Frischbetonuntersuchung auf. So wurden durch den Verzicht eines Fließmittels zur Einstellung der Konsistenz erwartungsgemäß sehr unterschiedliche Verarbeitungseigenschaften erreicht. Die ermittelte Konsistenz schwankte zwischen C1 (steif) bis F5 (fließfähig). Dennoch waren aber die Betone

mit steifer Konsistenz gut verarbeitbar. Auch wiesen die Betone mit einer fließfähigen Konsistenz keine Entmischungs- oder Sedimentationserscheinungen auf.

Unterschiedliche Mischungen gleicher Rezepturen wiesen dagegen vergleichbare Frischbetoneigenschaften auf.

Nach dem Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton [28] beträgt der Mindestluftporengehalt bei den vorliegenden Betonen 5,5 Vol.-%, Einzelwerte dürfen diesen um 0,5 Vol.-% unterschreiten. Der Zielwert für den Luftporengehalt betrug daher 5,0 Vol.-%. Dieser Luftporengehalt wurde in der Regel erreicht, bei Beton E1 wurde allerdings nur ein Luftporengehalt von 4,2 Vol.-% ermittelt. Dieser ist als auf der sicheren Seite liegend zu beurteilen. Da die Probekörper dieser Serie und der des Betons E2 (Luftporengehalt 4,8 Vol.-%) im Frost-Tausalz-Versuch keine signifikanten Unterschiede aufwiesen, wurde die Serie E1 auch für die weiteren Untersuchungen verwendet.

9.2 Festbetonuntersuchungen

9.2.1 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeit der Betone wurde unter anderem an laborgelagerten Probekörpern ermittelt. Die Ergebnisse der im Alter von 28 Tagen durchgeführten Untersuchungen sind in Tabelle 17 enthalten. Des Weiteren wurde die jeweils erreichte Festigkeitsklasse angegeben.

Tabelle 17: Druckfestigkeit und daraus resultierende Festigkeitsklasse

Beton	$f_{ci,cube}$	$f_{cm,cube}$	Festigkeitsklasse
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[-]
1	2	3	4
A1	39	44	C 30/37
A2	44	46	C 30/37
B	36	38	C 25/30
C	29	31	C 20/25
D	39	40	C 25/30
E1	23	24	C 16/20
E2	24	25	C 16/20
F1	44	45	C 30/37
F2	47	48	C 30/37
G	36	36	C 25/30
H1	27	28	C 16/20
H2	34	35	C 20/25

Nach DIN 1045-2:2001-07 [7] muss ein Beton für den Einsatz in der Expositions-klasse XF4 eine Mindestfestigkeitsklasse C 30/37 aufweisen. Wird der Beton in der Expositions-klasse XF2 eingesetzt, gelten Mindestfestigkeitsklasse von C 25/30 (mit LP-Bildner) bzw. C 35/45 (ohne LP-Bildner).

Maßgebend für einen ausreichenden Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand ist ein optimiertes Luftporengefüge in der Zementsteinmatrix, das sich durch eine geringe Anzahl an Kapillarporen und eine ausreichende Ausbildung von kugeligen Mikroluft-poren auszeichnet. Hintergrund der in DIN 1045-2:2001-07 [7] angegebenen Min-destfestigkeitsklassen ist eine leichte Überprüfbarkeit des maximalen Wasserze-mentwertes der im Bauwerk eingesetzten Betonrezeptur.

Nach ihrer Zusammensetzung sind Beton D (CEM I 32,5 R; w/z = 0,50; LP) und H (CEM II A-LL 32,5 R; w/z = 0,50; LP) geeignet für die Expositions-klasse XF4. Die Betone A (CEM I 32,5 R; w/z = 0,50; kein LP) und F (CEM II A-LL 32,5 R; w/z = 0,50; kein LP) dürfen für Bauwerke, die der Expositions-klasse XF2 ausgesetzt sind, ver-wendet werden (vgl. auch Kapitel 8.2.1).

Alle diese Betone erreichen allerdings nicht die nach DIN 1045-2:2001-07 [7] gefor-derten Festigkeitsklassen. Für die weiteren Untersuchungen wird aufgrund der Kenntnis, dass die w/z-Werte sowie alle weiteren Randbedingungen eingehalten wurden, davon ausgegangen, dass ein Einsatz in der jeweiligen Expositions-klasse möglich ist.

9.2.2 Luftporenkennwerte

In Tabelle 18 sind die Luftporenkennwerte der Betone mit einem Luftporenbildner angegeben.

Tabelle 18: Luftporenkennwerte der Betonmischungen mit LP-Bildner

Beton	Mikroluftporengehalt	Abstandsfaktor
[-]	[Vol.-%]	[mm]
1	2	3
E1	1,43	0,36
E2	2,43	0,22
H1	2,87	0,21
H2	1,88	0,26

Nach den nationalen und europäischen Normen existieren für die Verteilung der Mik-roluftporen keine Grenzwerte, die Einhaltung dieser Werte wird alleine durch den Luftporengehalt im Frischbeton sichergestellt. Aus betontechnologischer Sicht ist die tatsächliche Verteilung und Größe der Luftporen im Zementsteingefüge des Festbe-tons als maßgebend anzusehen. Als Kenngrößen für das Mikroluftporengefüge zäh-

len der Abstandsfaktor als mittlerer maximaler Abstand des Zementsteins zur nächsten Luftpore sowie der Mikroluftporengehalt selbst, zu dem alle Poren bis zu einem Durchmesser von 300 μm gerechnet werden.

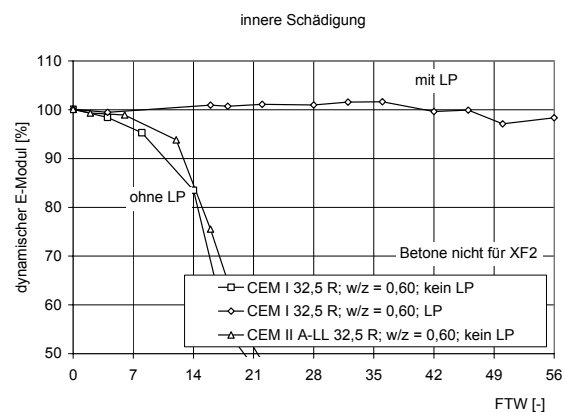
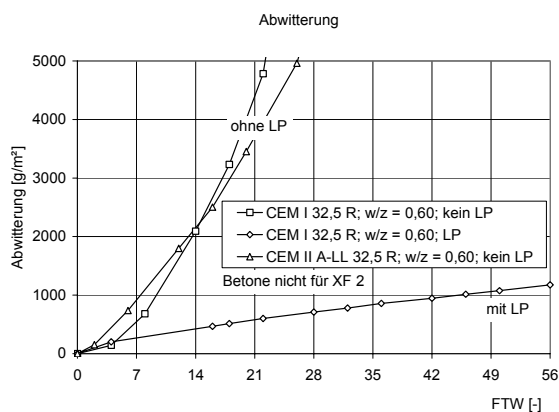
Abnahmekriterien für die Verteilung der Mikroluftporen sind im Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton [28] hinterlegt. Hier werden für die Prüfung im Rahmen der Eignungsprüfung ein Mikroluftporengehalt von 1,8 Vol.-% und ein Abstandsfaktor von 0,20 mm gefordert. Im Rahmen der Bauwerksprüfung betragen diese Akzeptanzkriterien 1,5 Vol.-% bzw. 0,24 mm.

Die in diesem Vorhaben hergestellten Betone wiesen zumeist Luftporenkennwerte auf, die an den Grenzen einer Bauwerksprüfung liegen. Der im Frischbeton niedrigere Luftporengehalt des Betons E1 im Vergleich zur Serie E2 konnte am Festbeton bestätigt werden. Der Abstandsfaktor des Betons E1 lag damit auch deutlich außerhalb der Vorgaben des Merkblatts Luftporenbeton [28].

9.2.3 Frost-Tausalz-Widerstand nach dem CDF-Verfahren

In den nachfolgenden Diagrammen sind die ermittelten Schädigungen bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach dem CDF-Verfahren im Alter von 28 Tagen dargestellt. Alle Betonserien, die mehrmals hergestellt wurden, wiesen ein ähnliches Abwitterungsverhalten auf. Ein Einfluss des niedrigen Luftporengehalts im Frischbeton bzw. des deutlich zu hohen Abstandsfaktors im Festbeton bei den Probekörpern der Serie E1 führte nicht zu einer erhöhten Abwitterung. Der hier dargestellte Verlauf ist bei Betonen, die mehrmals hergestellt wurden, der Mittelwert der geprüften Serien.

Insgesamt wurde sowohl die innere Schädigung über Messung der Ultraschalllaufzeit in einer Tiefe von 35 mm als auch die Abwitterung an der Oberfläche betrachtet. Die Betone sind entsprechend der jeweils möglichen Expositionsklasse zusammengefasst (vgl. auch Kapitel 8.2). Auf eine Darstellung der Schädigung über 5.000 g/m^2 bzw. unterhalb von 50 % des relativen dynamischen E-Moduls wurde verzichtet.



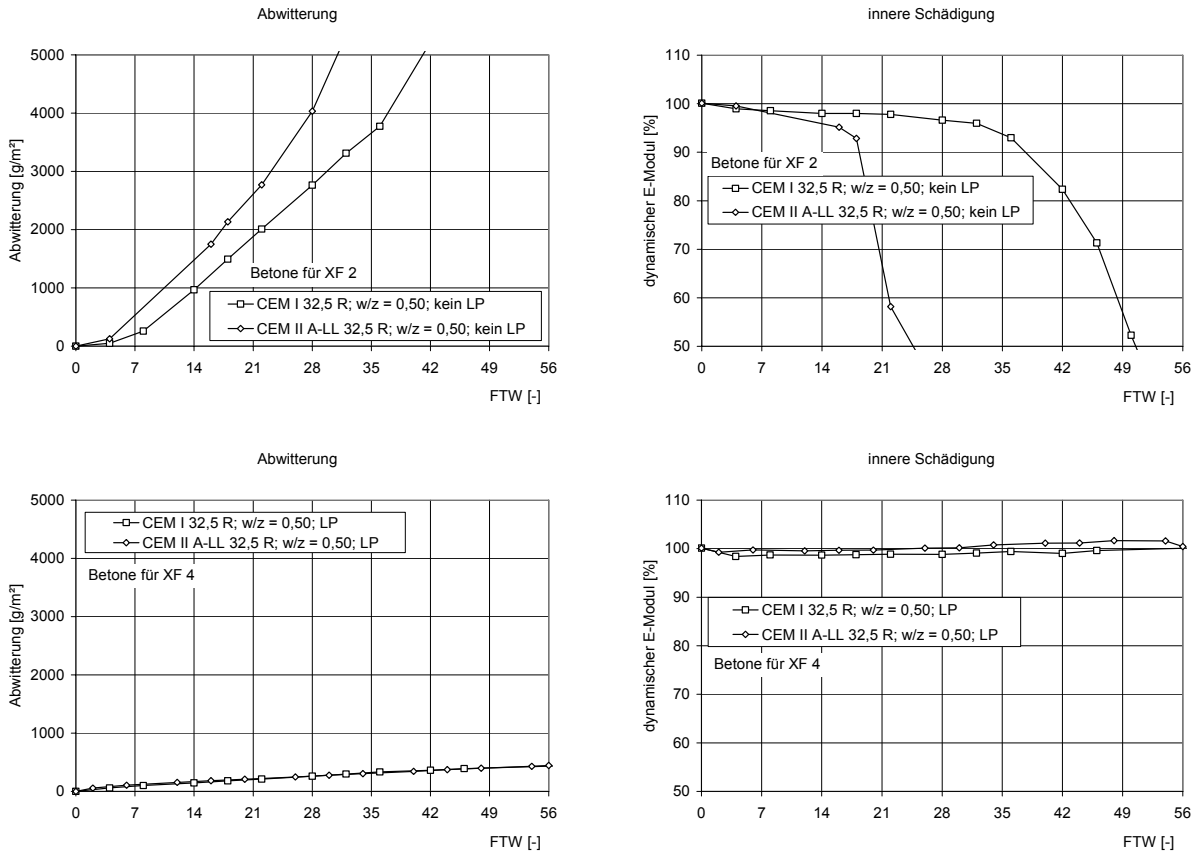


Abbildung 69: Schädigung der untersuchten Betone (links: Abwitterung; rechts: Änderung des dynamischen E-Moduls) im Standard-CDF-Test (XF4)

Abbildung 70 enthält die Ergebnisse der Betone, die in Essen hergestellt und geprüft worden sind.

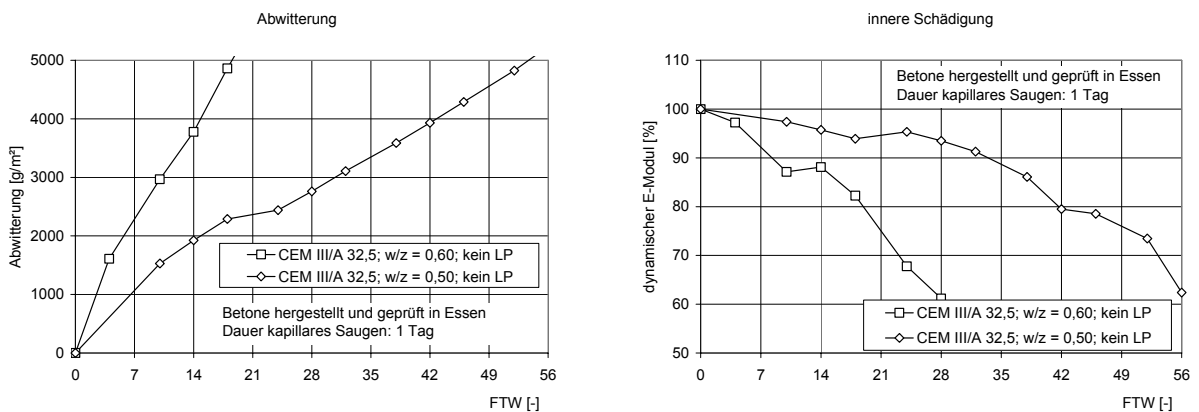


Abbildung 70: Schädigung der untersuchten Betone mit Hochofenzement (links: Abwitterung; rechts: Änderung des dynamischen E-Moduls) im Standard-CDF-Test (XF4) mit verkürzter Dauer des kapillaren Saugens (Dauer: 1 Tag)

Abweichend vom CDF-Verfahren erfolgte hier eine verkürzte Dauer der kapillaren Sättigung von einem Tag. Eigene Untersuchungen zeigen, dass dadurch die Feuchteaufnahme während der ersten Frost-Tau-Wechsel erhöht ist. Dies ist darauf zurück zu führen, dass die kapillare Sättigung noch nicht abgeschlossen ist und sich

während der ersten Frost-Tau-Wechsel mit dem Frostsaugen überlagert. Auf den Verlauf der inneren Schädigung konnte bei eigenen Untersuchungen nur ein sehr gering verzögernder Effekt beobachtet werden, die äußere Schädigung in Form von Abwitterungen war durch eine andere Vorlagerungsdauer gar nicht beeinflusst.

Es ist zu erkennen, dass die Betone, die nach DIN 1045-2:2001-07 der Expositions-klasse XF4 zugeordnet werden können, Abwitterungen von deutlich unter 1.500 g/m^2 nach 28 Frost-Tau-Wechseln aufweisen. Gleichzeitig war bei diesen Betonen auch nach 56 Frost-Tau-Wechseln keine innere Schädigung nachzuweisen. Die beiden hier untersuchten Betone unterschieden sich nur in der Art des Zements (CEM I 32,5 R; CEM II A-LL 32,5 R). Ein Einfluss des Zements war nicht nachzuweisen, die Schädigungsrate bei der Abwitterung verlief bei beiden Serien identisch.

Die übrigen Betone wiesen bis auf eine Ausnahme deutliche Schädigungen in Form von hohen Abwitterungen bzw. einer deutlichen inneren Schädigung auf. Nur Beton E (CEM I 32,5 R; $w/z = 0,60$; LP-Mittel), der aufgrund seines hohen w/z -Wertes nur in der Expositions-klasse XF1 eingesetzt werden könnte, wies eine geringe innere Schädigung und eine Abwitterung von rund 700 g/m^2 nach 28 Frost-Tau-Wechseln auf. Beton E bestand damit die Lab-Performance-Prüfung für die Expositi- onsklasse XF4.

Alle anderen Betone, die ohne ein Luftporenmittel hergestellt worden waren, wiesen deutlich über dem Akzeptanzkriterium liegende Schädigungen auf und bestanden damit die Lab-Performance-Prüfung für die Expositions-klasse XF4 erwartungsgemäß nicht. Die Betone wiesen abhängig von dem verwendeten Zement teilweise unterschiedliche Schadensverläufe auf, die Betone mit einem CEM I 32,5 R zeigten tendenziell einen etwas langsameren Schädigungsfortschritt. Eine erhöhte Anfangsab- witterung, wie sie bei den Hochofenzementen teilweise zu beobachten ist, konnte bei den hier durchgeführten Untersuchungen nicht festgestellt werden.

9.2.4 Frost-Tausalz-Widerstand nach dem modifizierten CDF-Verfahren

Die Betone, die nicht die Kriterien nach dem CDF-Verfahren für einen Beton der Expositions-klasse XF4 (1.500 g/m^2 nach 28 Frost-Tau-Wechsel) erfüllt haben und damit auch nicht den indirekten Nachweis der Tauglichkeit für die Expositions-klasse XF2 aufwiesen, wurden mit einem modifizierten Verfahren auf deren Frost-Tausalz- Widerstand in XF2 untersucht. Diese Betone entsprachen alle nach ihrer Zusam- mensetzung nicht den Anforderungen der DIN 1045-2 für einen Einsatz in der Expo- sitions-klasse XF4. Im Folgenden sind die Betone analog der regulären CDF-Prüfung in die beiden Gruppen „Betone für XF2“ und „Betone nicht für XF2“ zusammen gefasst. Zur Gruppe „Betone für XF2“ zählen die beiden Betone mit einem w/z -Wert von 0,50, die mit einem Portlandzement bzw. einem Portlandkalksteinzement herge- stellt worden sind. Zur Gruppe der „Betone nicht für XF2“ wurden die Betone, die

aufgrund ihres zu hohen w/z-Werts gemäß DIN 1045-2 nicht mehr für den Einsatz in der Expositionsklasse XF2 vorgesehen sind, zusammen gefasst. Alle hier geprüften Betone wurden ohne einen Luftporenbildner hergestellt.

In Abbildung 71 sind die äußere Abwitterung und die innere Schädigung der untersuchten Betone dargestellt. Die Schädigungen, die bei dem modifizierten CDF-Verfahren ermittelt wurden, lagen durchweg unter den Schädigungen, die die gleichen Betone im regulären CDF-Verfahren aufgewiesen hatten.

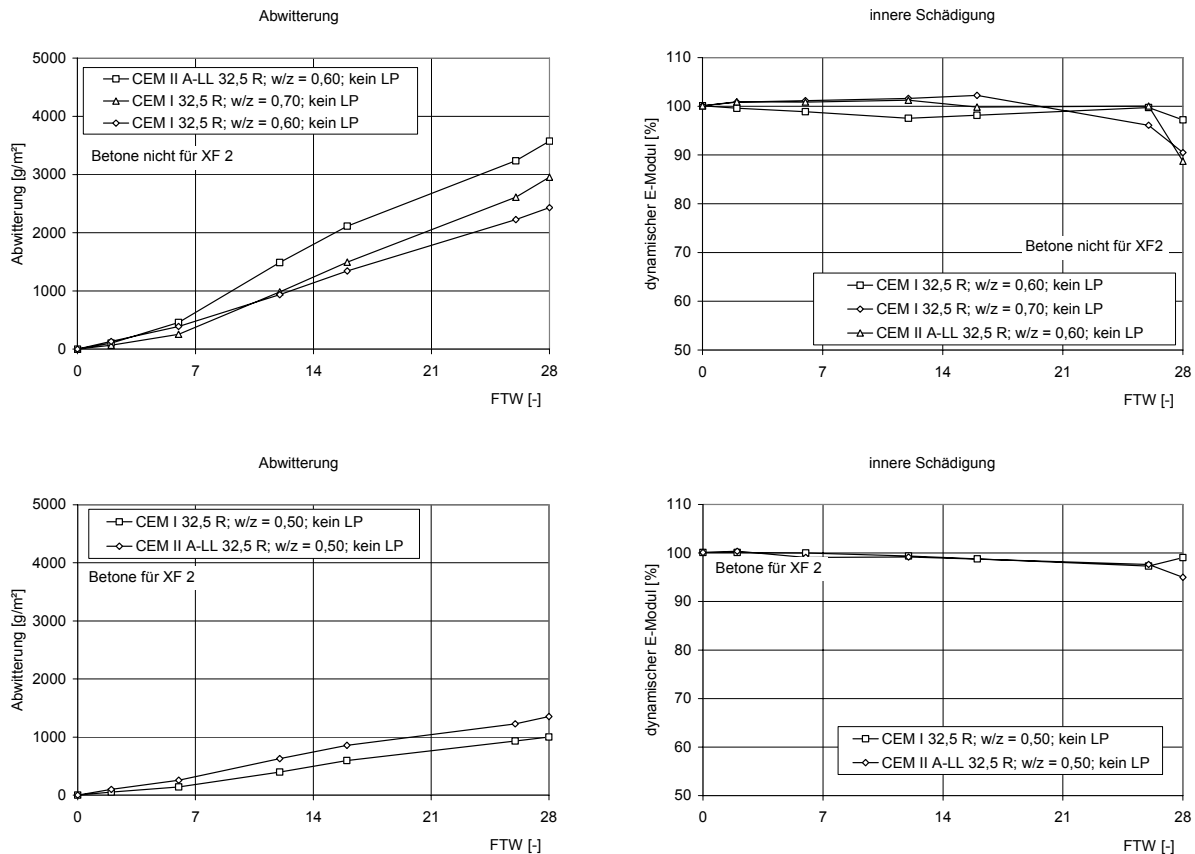


Abbildung 71: Schädigung der untersuchten Betone (links: Abwitterung; rechts: Änderung des dynamischen E-Moduls); modifiziertes CDF-Verfahren -10 °C

So wurde bei den Betonen mit einem w/z-Wert von 0,50 eine Abwitterung von 1.000 g/m² (CEM I 32,5 R) bzw. 1.350 g/m² (CEM II A-LL 32,5 R) nach 28 Frost-Tau-Wechseln festgestellt. Die vergleichbaren Serien wiesen in der Standard-CDF-Prüfung mit 3.000 bzw. 4.000 g/m² die rund dreifache Menge an Abwitterung nach der gleichen Anzahl an Frost-Tau-Wechseln auf.

Auch die Abwitterung der Betone mit einem w/z-Wert von über 0,50 lag um etwa diesen Faktor bei der modifizierten CDF-Prüfung darunter, hier wurden nach 28 Frost-Tau-Wechseln Abwitterungen zwischen 2.500 und 3.500 g/m² ermittelt. Der Beton mit einem w/z-Wert von 0,60 und einem Portlandkalksteinzement wies die größten Schädigungen auf. Diese waren sogar geringfügig höher als die Abwitterungen des Betons mit einem w/z-Wert von 0,60 und einem Portlandzement. Der Verlauf der

Abwitterung war bei allen hier geprüften Betonen in etwa linear, eine plötzlich ansteigende Schädigung, wie sie bei einigen Serien bei dem Standard-CDF-Verfahren auch schon bis zum 28. Frost-Tau-Wechsel beobachtet werden konnte, konnte hier nicht festgestellt werden.

Insgesamt war eine deutliche Abhängigkeit der Schädigung analog der Prüfung nach dem Standardverfahren zu erkennen. So wiesen die Betone mit steigendem w/z-Wert erwartungsgemäß auch höhere Abwitterungen auf. Darüber hinaus zeigte sich auch bei diesem Verfahren, dass die Betone mit Portlandkalksteinzement und ansonsten identischer Rezeptur höhere Abwitterungen als die Betone mit Portlandzement aufwiesen.

Eine innere Schädigung der hier geprüften Serien konnte bei keinem der Betone nachgewiesen werden. Obwohl die Serien mit Kalksteinzement und einem w/z-Wert von 0,60 und Portlandzement mit einem w/z-Wert 0,70 bei den letzten Frost-Tau-Wechseln teilweise leicht längere Laufzeiten des Ultraschallsignals aufwiesen, betrug der Abfall des dynamischen E-Moduls nach 28 Frost-Tau-Wechseln maximal 11 %.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Schädigung zielsicher durch das Heraufsetzen der Minimaltemperatur von -20 °C auf -10 °C eingestellt und deutlich verlangsamt werden kann. Dadurch ist es möglich, auch Betone, die mit einem w/z-Wert von mehr als 0,50 und ohne Luftporenbildner hergestellt werden, differenziert zu prüfen. Damit scheint es möglich, auch Betone, die im Bereich der Exposition XF2 eingesetzt werden können, zielsicher zu differenzieren. Durch diese Differenzierung ist unter Zugrundelegung eines abgesicherten Akzeptanzkriteriums dann eine zielsichere Beurteilung der Frost-Tausalz-Beständigkeit in der Expositionsklasse XF2 möglich.

9.2.5 Zusammenfassung Laborprüfungen

In Tabelle 19 sind die Bewertungen der Ergebnisse der Laborprüfungen zusammengefasst und der nach der Betonzusammensetzung resultierenden XF-Klassen gegenüber gestellt. Als beständig gegenüber einem Frost-Tausalz-Angriff der Expositionsklasse XF4 wurden die im Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ [27] hinterlegten Akzeptanzkriterien zugrunde gelegt (mittlere Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln kleiner als 1.500 g/m^2). Ein derartiges Vorgehen ist derzeit nicht normativ verankert. Es ist aber für den Nachweis des Frost-Tausalz-Widerstandes, der im Rahmen von Bauwerken der BAW gefordert wird, für alle Betone, also auch für Betone, die in ihrer Zusammensetzung nicht den Anforderungen an die DIN 1045 für die Expositionsklasse XF3 bzw. XF4 entsprechen, gängige Praxis. Des Weiteren wird dieses Akzeptanzkriterium als Grundlage für Nachweise der Frost-Tausalz-Beständigkeit, die im Bereich des Deutschen Instituts für Bautechnik oder im Rahmen von Zulassungen im Einzelfall anfallen, eingesetzt. Auch hier werden vornehmlich nicht nach DIN 1045 zusammengesetzte Betone untersucht.

Für die Prüfung mit Hilfe des modifizierten Verfahrens existieren bisher keine Akzeptanzkriterien, diese Prüfung wurde daher nicht in die Auswertung mit aufgenommen.

Tabelle 19: Zusammenfassung der Ergebnisse der Laborprüfungen

Beton	Zement	w/z-Wert	LP-Mittel	XF lt. Zusammensetzung	Festigkeitsklasse für XF erreicht	beständig entspr. CDF für XF4
1	2	3	4	5	6	7
A	CEM I 32,5 R	0,50	nein	XF 2	nein	-
B	CEM I 32,5 R	0,60	nein	XF 1	ja	-
C	CEM I 32,5 R	0,70	nein	-	-	-
D	CEM I 32,5 R	0,50	ja	XF 4	nein	ja
E	CEM I 32,5 R	0,60	ja	XF 1	ja	ja
F	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	nein	XF 2	nein	-
G	CEM II A-LL 32,5 R	0,60	nein	XF 1	ja	-
H	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	ja	XF 4	nein	ja

Aus dieser Zusammenstellung ist noch einmal zu erkennen, dass alle Betone, die gemäß ihrer Zusammensetzung in den Expositionen XF2 und XF4 eingesetzt werden können, die an sie gestellten Anforderungen der Druckfestigkeitsklasse nicht erfüllen. Darüber hinaus ist zu erkennen, dass alle XF4-konform zusammengesetzten Betone die Akzeptanzkriterien gemäß dem Merkblatt „Frostprüfung“ erfüllen. Des Weiteren besteht im CDF-Test ein weiterer Beton, der ebenfalls mit einem Luftporenbildner hergestellt wurde, aber einen deutlich zu hohen w/z-Wert von 0,60 aufweist. Hier scheint sich der w/z-Wert nachrangig zum Vorhandensein von Mikroluftporen auszuwirken.

9.3 Auslagerung

9.3.1 Charakterisierung der Auslagerungsstätten

9.3.1.1 Allgemeines

Nach heutiger Kenntnis zeichnet sich die Schärfe eines Frost-Tausalz-Angriffes vor allem durch folgende Kenngrößen aus:

- Minimaltemperatur
- Anzahl an Frost-Tau-Wechseln
- Feuchtebelastung
- Tausalzbelastung

Die heutige Normengeneration unterscheidet, wie in Kapitel 4 beschrieben, bei einer Tausalzbelastung in Abhängigkeit der möglichen Feuchtebelastung zwei unterschiedliche Expositionsklassen. Eine Unterscheidung hinsichtlich der anderen Kenngrößen erfolgt nicht. In Anbetracht der während der Auslagerung zu erwartenden Schäden werden im Folgenden die beiden gewählten Auslagerungsorte hinsichtlich der für einen Frost-Tausalz-Angriff maßgebenden Kenngrößen charakterisiert. Hierbei wird vor allem auf die jeweils auftretenden Temperaturen und Niederschläge eingegangen. Bei der anfallenden Tausalzmenge wird davon ausgegangen, dass diese von den klimatischen Bedingungen vor Ort abhängig ist und bei tieferen Temperaturen sowie bei Niederschlägen während der Frostperiode steigt. Die im Folgenden verwendeten Daten wurden durch den Deutschen Wetterdienst aufgezeichnet und für dieses Forschungsvorhaben zur Verfügung gestellt.

9.3.1.2 Wetterdaten

Abbildung 72 enthält beispielhaft den Temperaturverlauf der Auslagerungsstelle Farchant im März 2005. Dargestellt sind jeweils die Minimal- (Dreieck) und Maximaltemperatur (Raute) eines Tages sowie die anfallende Niederschlagsmenge (Balken).

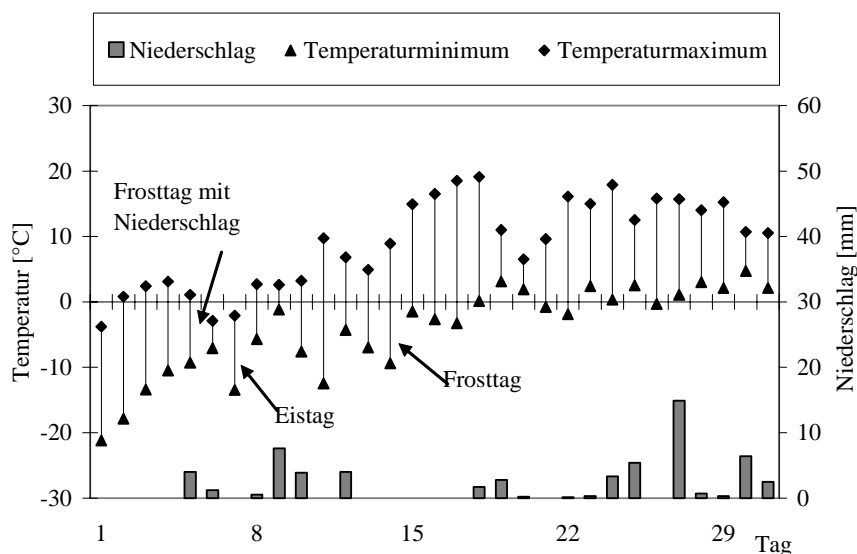


Abbildung 72: Wetterdaten am Beispiel Farchants (März 2005)

Zu unterscheiden sind drei charakteristische Tagesszenarien: Ein Frosttag ist durch eine Maximaltemperatur über dem Gefrierpunkt und eine Minimaltemperatur unter dem Gefrierpunkt gekennzeichnet. Bei einem Eistag liegen sowohl die Maximal- als auch folglich die Minimaltemperatur unter 0 °C . Darüber hinaus werden Frosttage, an denen ein Niederschlag zu verzeichnen gewesen ist, getrennt behandelt (Frosttag mit Niederschlag). Bei letzteren Tagen handelt es sich um die hinsichtlich eines Frost-Tausalz-Angriffes relevanten Tage, da hier zu einem Frost-Tau-Wechsel genü-

gend tausalzhaltige Feuchte (Sprühnebel, Spritzwasser) für die während des Frostes auftretende Sättigung der Betone zur Verfügung stehen sollte.

Zur Charakterisierung der beiden ausgewählten Auslagerungsorte wurden die Wetterdaten dieser mit insgesamt 11 anderen Orten innerhalb von Deutschland verglichen. In Abbildung 73 ist die Lage dieser Wetterstationen dargestellt.



○ Wetterstationen

X Auslagerungsorte

Abbildung 73: Lage der betrachteten Wetterstationen sowie der beiden Auslagerungsorte

Es wurden die in Deutschland für einen Frostangriff relevanten Gebiete abgedeckt (Alpen: Zugspitze; Alpenvorland: Kempten; Bayern: München, Augsburg; ostwindgeprägtes Kontinentalklima: Berlin, Potsdam; Mittelgebirge: Hof). Zusätzlich wurden mit Sylt, Hamburg und Düsseldorf weitere charakteristische Wetterstationen in die Auswertung mit aufgenommen. Als Beobachtungszeitraum wurde Juli 1996 bis Juni 2005 gewählt, eine Saison wurde jeweils von Juli bis Juni des darauf folgenden Jahres gesetzt. Bei den folgenden Angaben handelt es sich jeweils um die durchschnittliche Anzahl je Saison als Mittel des Beobachtungszeitraumes.

In Abbildung 74 ist die durchschnittliche Anzahl an Eistagen, also der Tage mit Dauerfrost, für die einzelnen Wetterstationen dargestellt.

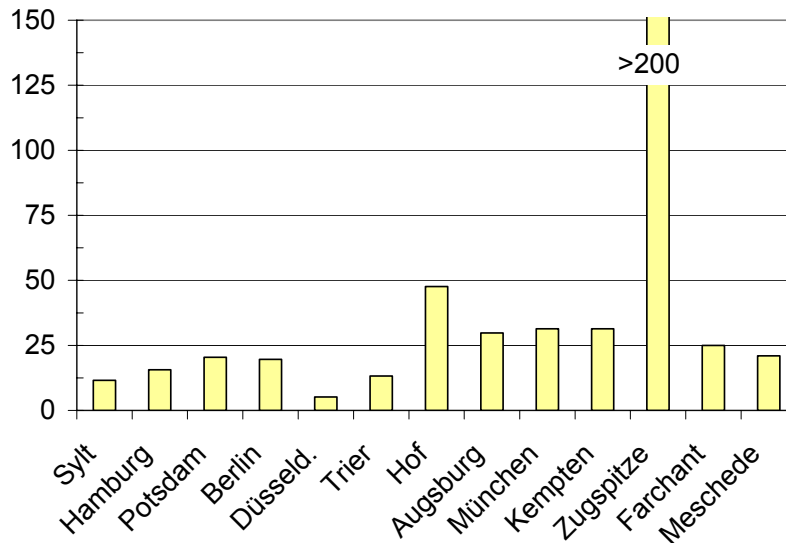


Abbildung 74: durchschnittliche Anzahl an Eistagen

Die durchschnittliche Anzahl an Eistagen in Abhängigkeit der Lage der Wetterstationen zeigt deutliche Unterschiede. Während in Düsseldorf weniger als 10 Eistage je Wintersaison zu verzeichnen waren, wurden auf der Zugspitze mehr als 200 Eistage je Jahr registriert. Die beiden Auslagerungsorte Meschede und Farchant liegen bei der Anzahl an Eistagen im unteren Mittelfeld. In Farchant wurden durchschnittlich 25 Eistage, in Meschede 21 Eistage gezählt.

Wichtiger als die reinen Eistage, bei denen das Wasser durchgehend gefroren vorliegt, sind die Frosttage, also Tage mit einer Temperatur über dem Gefrierpunkt und einer nächtlichen Temperatur unter dem Gefrierpunkt. In Abbildung 75 sind die aufgetretenen Frosttage für den Beobachtungszeitraum aufgeführt.

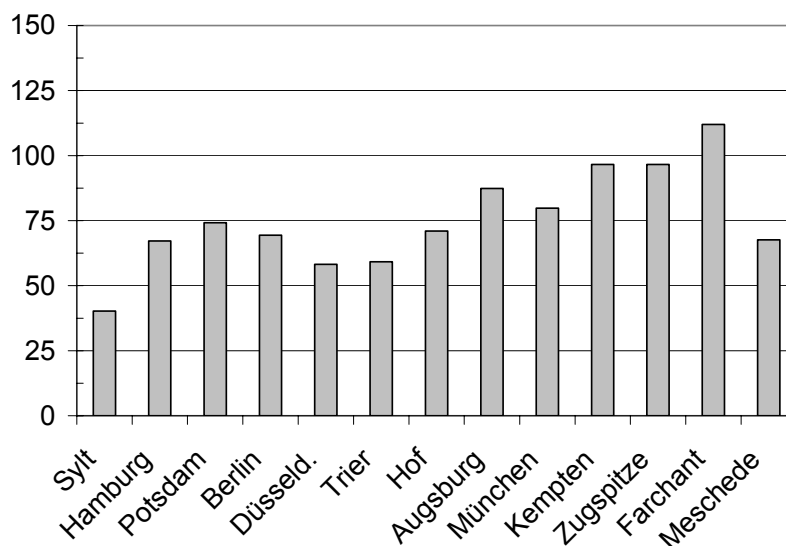


Abbildung 75: durchschnittliche Anzahl an Frosttagen

Es zeigt sich, dass bis auf den Beobachtungspunkt „Zugspitze“ bei den betrachteten Wetterstationen deutlich mehr Frosttage als Eistage zu verzeichnen gewesen sind. Auch lag die Anzahl zwischen den Stationen nicht derart auseinander, wie dies bei den Eistagen der Fall gewesen ist. Der Auslagerungsort Farchant weist mit mehr als 100 Frosttagen die größte Anzahl auf, der Auslagerungsort Meschede liegt im Mittel der betrachteten Wetterstationen.

Die hohe Anzahl der Frosttage in Farchant ist auf das kalte Klima der Alpen zurück zu führen. Im Gegensatz zur Zugspitze (2962 m über N.N.) wirkt sich die Tallage des direkt unterhalb befindlichen Auslagerungsstandes „Farchant“ (700 m über N.N.) verstärkend auf die Anzahl an Frosttagen aus. Durch die Tallage sind bei Sonneneinstrahlung hohe Temperaturen während des Tages möglich, gleichzeitig sind während der Nacht durch die Lage innerhalb der Alpen tiefe Temperaturen zu verzeichnen.

Dagegen führt das gemäßigte Klima in Meschede zu deutlich weniger Frosttagen, die Gesamtanzahl an Tagen mit einer Temperatur unter dem Gefrierpunkt ist im Vergleich zu Farchant deutlich reduziert. Dennoch handelt es sich hinsichtlich der Anzahl an Frosttagen um einen durchschnittlichen Auslagerungsort.

Entscheidend für einen Frostangriff ist aber nicht so sehr die Anzahl an Frosttagen. Für eine funktionierende Mikroeislinsepumpe und einer Aufsättigung des Porengefüges durch Frost-Tau-Wechsel muss ebenso auch genügend Feuchtigkeit zur Verfügung stehen. In Abbildung 76 ist daher die Anzahl an Frosttagen, an denen gleichzeitig ein Niederschlagsereignis stattgefunden hat, dargestellt.

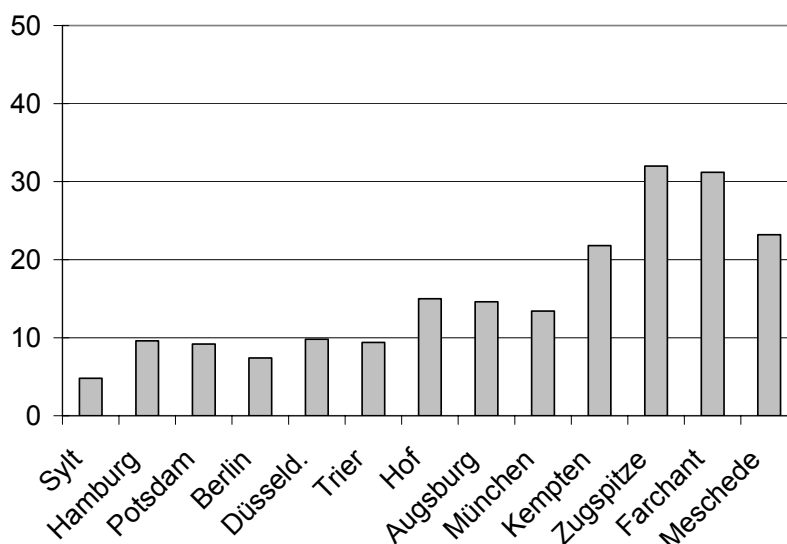


Abbildung 76: durchschnittliche Anzahl an Frosttagen mit Niederschlag (Meschede)

In Abbildung 76 ist zu erkennen, dass die beiden Auslagerungsorte hinsichtlich ihrer Frosttage mit einem Niederschlagsereignis deutlich ungünstiger als alle vergleichbaren Messstationen liegen, nur auf der Zugspitze wurden im Vergleich zum Auslage-

rungsort Farchant geringfügig mehr nasse Frosttage gemessen. In Farchant wurden ca. 31, in Meschede wurden rund 23 Frosttage registriert. Damit wies Meschede verglichen sogar mit dem im Alpenvorland gelegenen Kempten noch ungünstigere Bedingungen auf.

Der Vergleich der Charakteristika der Winterperioden zeigt also, dass Farchant bezüglich einer Frostexposition die extremsten Wetterbedingungen, die innerhalb Deutschlands auftreten können, aufweist. Sowohl in der Anzahl an Frosttagen als auch in der Anzahl der Frosttage mit Niederschlag wird mit Farchant ein sehr extremes Wetter abgedeckt.

Dagegen kann der Auslagerungsort Meschede eher dem oberen Durchschnitt der Expositionsklasse „Frost Deutschland“ zugeordnet werden. So ist zwar die Anzahl an Frosttagen mit Niederschlag deutlich höher als bei den umliegenden Wetterstationen und weist mit einer Anzahl von 23 die zweithöchste Häufung auf, die Anzahl an Frosttagen insgesamt liegt dagegen im unteren Durchschnitt.

Insgesamt können die beiden Auslagerungsorte aber als repräsentativ für Frostergebnisse in Deutschland gesehen werden. Es ist davon auszugehen, dass durch die Auslagerung in diesen beiden Orten allgemeingültige Aussagen bezüglich der Schädigung von Betonen getroffen werden können.

Im Folgenden werden die auftretenden Temperaturen der beiden Auslagerungsorte näher betrachtet. Hierbei werden die registrierten Wettercharakteristika getrennt für die Winterperioden, in den die Probekörper ausgelagert waren, betrachtet. Während bei den vorangegangenen Darstellungen die letzten zehn Jahre ausgewertet wurden, sind im Folgenden die Saisons ab dem Winter 2001/ 2002 dargestellt. Eine Saison ist weiterhin von Juli bis Juni des darauf folgenden Jahres definiert.

In Abbildung 77 sind die Anzahl der Frosttage mit und ohne Niederschlag sowie die Eistage beider Auslagerungsorte getrennt für alle Saisons, in denen die Probekörper vor Ort lagerten, dargestellt.

Es ist ein deutlicher Unterschied zwischen den einzelnen Wintern zu erkennen. So ist vor allem in Farchant ein deutlicher Anstieg der Frosttage bei längerer Auslagerung zu erkennen. In Meschede fällt dieser Anstieg nur sehr geringfügig aus, hier wurde in der Saison 2002/ 2003 sogar die geringste Anzahl an Frosttagen festgestellt.

Bei den Frosttagen mit Niederschlag wurden während der Auslagerungsperiode in Farchant deutlich weniger Tage festgestellt, als diese im Mittel in den letzten zehn Jahren statt gefunden hatten. Insgesamt war kein signifikanter Unterschied zwischen der Anzahl an Frosttagen mit Niederschlag in Farchant und Meschede zu verzeichnen gewesen. Im Mittel wurden unabhängig des Auslagerungsortes rund 21 Frosttage mit Niederschlag reduziert.

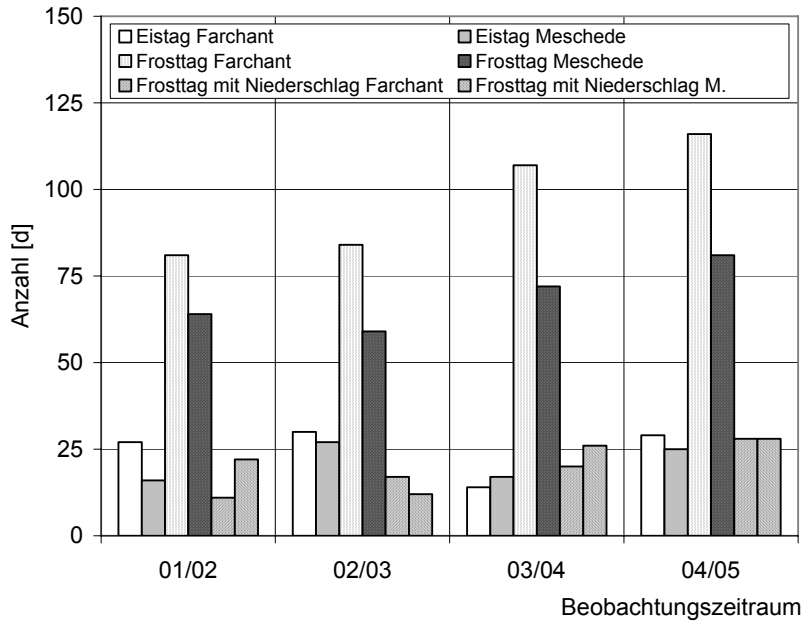


Abbildung 77: Anzahl an Eistagen, Frosttagen und Frosttagen mit Niederschlag der beiden Auslagerungsorte

Neben der reinen Anzahl an Frostwechseln mit und ohne Niederschlag ist aber auch der Temperaturgradient im Beton, der sich durch den Temperaturhub, also dem Unterschied zwischen der Maximal- und der Minimaltemperatur ergibt, maßgebend für die Feuchteaufnahme. Hierzu wurde für beide Auslagerungsorte der Temperaturunterschied für Frosttage mit und ohne Niederschlag ermittelt und in Klassen zu jeweils 5 K aufgetragen (vgl. Abbildung 78).

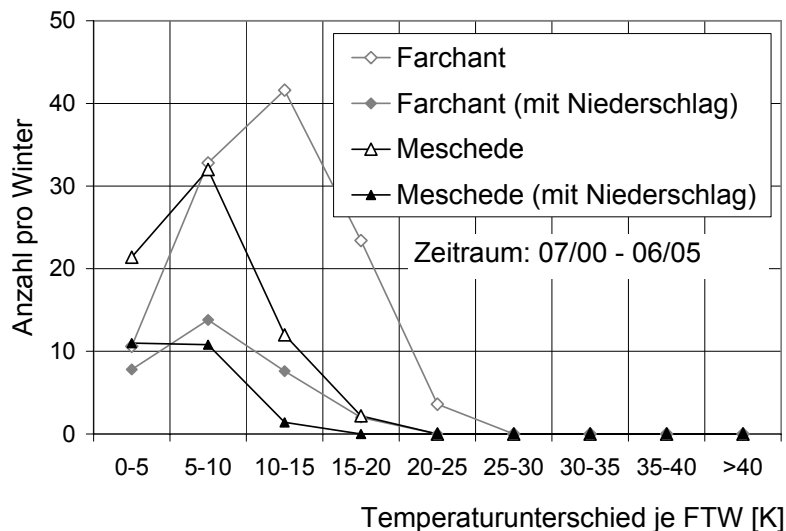


Abbildung 78: Häufigkeit der Temperaturunterschiede je Frosttag in Meschede/Farchant

Erwartungsgemäß wurden in Farchant deutlich höhere Temperaturdifferenzen ermittelt, als dies in Meschede der Fall war. So lag das Maximum des Temperatur-

hubs in Farchant bei der Klasse 10 – 15 K, während in Meschede das Maximum bei der Klasse 5 – 10 K lag. Maximal wurde ein Temperaturhub in Farchant von 23 K, in Meschede von 18 K ermittelt. Im Mittel konnte in Meschede ein Temperaturunterschied von 7,1 K, in Farchant von 11,4 K ermittelt werden.

Die Temperaturunterschiede, die an Tagen mit Niederschlag auftreten, sind deutlich gemäßigter als die aller Frosttage. Dies ist auf die Bewölkung, die zwangsläufig mit Niederschlagsereignissen einhergeht, zurück zu führen. Während an Tagen ohne Niederschlag am Tag eine höhere Erwärmung durch direkte Sonneneinstrahlung möglich ist, ist diese an Tagen mit Niederschlag zumeist nicht gegeben. Das Maximum der Temperaturhübe wird daher an den Tagen mit Niederschlag zu den geringeren Differenzen verschoben. In Farchant lag das Maximum in der Klasse 5 – 10 K, in Meschede wurden in den Klassen 0 – 5 K und 5 – 10 K in etwa gleich viele Tage registriert. Insgesamt konnten in Farchant vor allem in der Klasse von 10 – 15 K deutlich mehr Frosttage mit Niederschlag im Vergleich zum Auslagerungsort Meschede festgestellt werden.

Auch nach Auswertung der Temperaturänderungen an Frosttagen ist der Auslagerungsort Farchant als deutlich ungünstiger als der Auslagerungsort Meschede hinsichtlich eines Frostangriffes anzusehen.

Während der Auslagerung wurde in unterschiedlichen Tiefenstufen auch die Temperatur im Beton selbst gemessen. In Abbildung 79 ist der durchschnittliche Temperaturhub an Luft dem Hub in den unterschiedlichen Tiefen des Betons für den Auslagerungsort Meschede gegenüber gestellt.

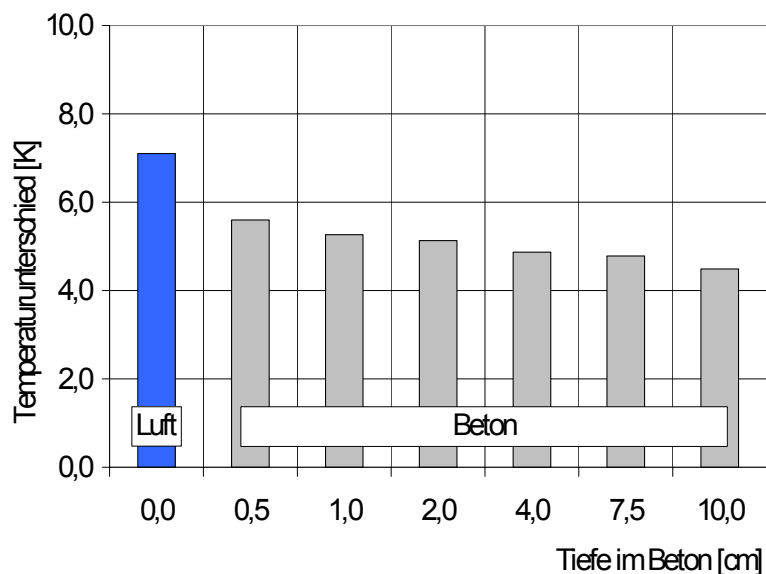


Abbildung 79: durchschnittlicher Temperaturhub an Luft und in unterschiedlichen Tiefenstufen im Beton (Auslagerungsort Meschede)

An dieser Auswertung kann man erkennen, dass die Temperaturunterschiede im Inneren des Betons deutlich abgeschwächt werden. Sind an der Luft noch Temperaturunterschiede von durchschnittlich über 7 K zwischen Tagesmaximum und –minimum zu erkennen gewesen, so konnten in 10 mm Tiefe nur mehr rund 5 K Unterschied ermittelt werden. Dies zeigt deutlich die durch die große Masse bzw. Wärmespeicherkapazität resultierende Trägheit bezüglich Temperaturänderungen und die dadurch abgeschwächten Temperaturschwankungen vor allem in tiefer liegenden Schichten des Betons.

Des Weiteren kann auch erkannt werden, dass die Dämmung der Probekörper ausreichend ist, um anhand der relativ kleinen Probekörper mit Abmessungen von 150 mm massive Bauteile zu simulieren. Dadurch, dass die durchschnittliche Temperaturdifferenz kontinuierlich mit der Tiefe abnimmt, ist zudem zu erkennen, dass kein rückwärtiges Gefrieren statt findet. Damit ist nachgewiesen, dass der Wärmetransport wie in größeren Bauteilen eindimensional von der beanspruchten Fläche her statt findet und keine Wärme rückwärtig ab- und zugeführt wird.

9.3.1.3 Tausalzbeaufschlagung

Neben der Belastung, die aus der klimatischen Bedingungen heraus resultiert, gehört bei einem Frost-Tausalz-Angriff auch die Tausalzbelastung dazu. Diese ist indirekt an die klimatischen Bedingungen gekoppelt, aber auch abhängig von den lokalen Gegebenheiten wie präventiven Streumaßnahmen, Verkehrsdichte, Abstand der Betonfläche von der Fläche, auf der das Tausalz aufgebracht wird (d.h. Spritzwasser- und Sprühnebelmenge, die die Betonoberfläche erreicht), oder von der Wasserfilmdicke auf der Fahrspur.

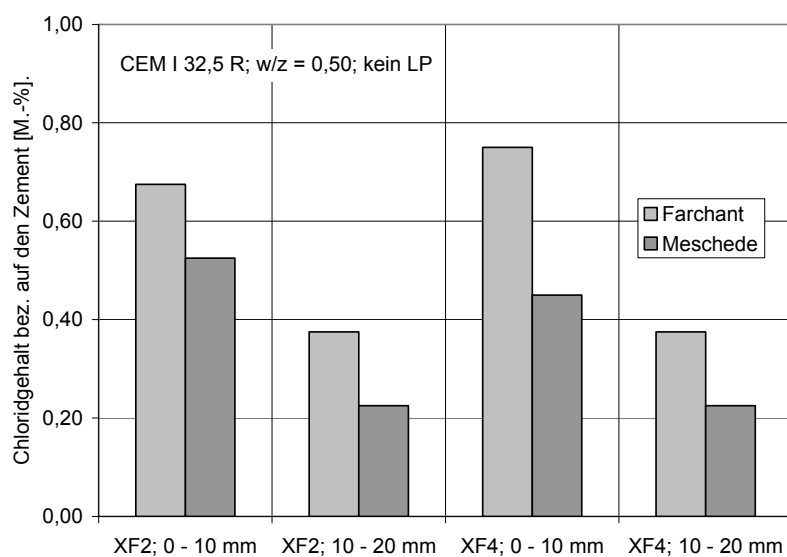


Abbildung 80: Chloridgehalt in ausgewählten Probekörpern und Tiefenstufen, ermittelt nach der Auslagerung über 3 Jahre hinweg

Zur Einschätzung, inwieweit wirklich ein Tausalzeintrag bei den ausgelagerten Probekörpern stattgefunden hat, wurde die Chloridkonzentration an Probekörpern der Betonserie A (CEM I 32,5 R; w/z = 0,50; kein LP) in zwei Tiefenstufen untersucht (vgl. auch Kapitel 8.6.5). Der Beton A wurde gewählt, da er aufgrund seiner Rezeptur für den Bereich XF2 vorgesehen ist und eine Auslagerung sowohl im Bereich XF2 als auch im Bereich XF4 durchgeführt wurde. Die Chloridkonzentrationen wurden sowohl an Probekörpern, die in Farchant ausgelagert gewesen waren, als auch an Probekörpern, die in Meschede lagerten, ermittelt. Der Chloridgehalt wurde auf den Zementgehalt, der bei diesem Beton 320 kg/m^3 beträgt, bezogen (Abbildung 80).

Die Ergebnisse weisen eine deutliche Abhängigkeit der ermittelten Chloridkonzentration von den hier variierten Randbedingungen auf. So wurde erwartungsgemäß in den tieferen Zonen geringere Chloridgehalte ermittelt, in der Schicht 10 – 20 mm zwischen 0,22 und 0,38 M.-%. Diese sind demnach deutlich geringer als die der außen liegenden Schicht 0 - 10 mm (0,45 bis 0,75 M.-%), liegen aber noch deutlich über dem Eigenchloridgehalt, der bezogen auf den Zementgehalt unter 0,10 M.-% liegt. Diese Ergebnisse zeigen, dass alle hier ausgelagerten Probekörper eine deutliche Tausalzbeauschlagung innerhalb der 3 Jahre währenden Auslagerung erfahren haben.

Des Weiteren wiesen die Probekörper, die im Bereich XF4 ausgelagert wurden, geringfügig höhere Chloridkonzentrationen auf als die im Bereich XF2 ausgelagerten Probekörper. Hier konnte demnach ein geringfügiger Einfluss der Exposition festgestellt werden, der sich nicht so ausgeprägt wie erwartet darstellte. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass die XF4-gelagerten Probekörper nicht direkt mit Salz beaufschlagt wurden, sondern hinter der Schutzplanke gelagert vom Sprühnebel beaufschlagt wurden, im Sommer aber gleichzeitig auch der Auswascheffekt bei den direkt beregneten horizontalen Flächen ausgeprägter stattfinden kann.

Darüber hinaus wiesen die Probekörper, die in Farchant ausgelagert gewesen waren, deutlich höhere Chloridgehalte als die Probekörper aus Meschede auf. Dies ist darauf zurückzuführen, dass in Farchant durch die durchwegs kälteren und längeren Winter vermehrt Tausalz eingesetzt wurde. Ein Einfluss bedingt durch andere Randbedingungen wie z.B. die Lage in Bezug auf die tausalzbelastete Straße kann durch die identische Platzierung der Auslagerungsstände direkt unter/ hinter der Leitplanke im Mittelbereich der Autobahnen ausgeschlossen werden.

Im Bereich stark befahrener Straßen wurden im Rahmen von Bauwerksuntersuchungen an Betonflächen Chloridgehalte zwischen 0,2 bis 2,0 M.-% bezogen auf den Zementgehalt festgestellt [38]. Da diese Untersuchungen in der Regel zu den Hauptuntersuchungsterminen, die nach DIN 1076 alle 6 Jahre stattfinden müssen, und über die gesamte Lebensdauer des Bauwerks erfolgen, sind die Proben deutlich älter als die Proben, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens entnommen wur-

den. Dennoch wiesen die hier untersuchten Bohrmehlproben in diesem Bereich liegende Chloridgehalte auf. Dies zeigt, dass auch schon nach einer relativ kurzen Auslagerungszeit übliche Chloridbelastungen zumindest in der Randzone der Betone vorliegen. Es kann daher davon ausgegangen werden, dass die während der Auslagerungszeit beobachteten Frost-Tau-Wechsel in Bezug auf die Chloridbelastung als repräsentativ anzusehen sind.

9.3.2 Untersuchungen an den ausgelagerten Probekörpern

9.3.2.1 Masseänderung

Zu den jährlichen Inspektionsterminen wurde die Masse der Probekörper bestimmt. Aus dieser wurde die Masseänderung der Betone berechnet, als Bezugspunkt wurde der Zeitpunkt der Auslagerung gewählt.

In Abbildung 81 und Abbildung 82 sind die Masseänderungen der Probekörper, die im Bereich der Exposition XF2 ausgelagert gewesen waren, dargestellt. Für die in Meschede ausgelagerten Probekörper ist die erste Messung aufgrund des Auslagerungstermines im Sommer 2004 durchgeführt worden, die Probekörper, die in Farchant ausgelagert gewesen waren, wurden das erste Mal im Sommer 2003 vor Ort begutachtet. Zu beachten ist, dass die aufgenommene Masse jeweils nur eine Momentaufnahme darstellt, kurzzeitige Wetterereignisse haben einen deutlichen Einfluss auf den momentanen Wassergehalt der Probekörper. Dennoch würde eine deutliche Tendenz der Masseänderung auch trotz dieser Wetterereignisse sichtbar werden. Vergleiche eines Messtermins (z.B. Vergleich zwischen den Expositionen) sind jederzeit möglich.

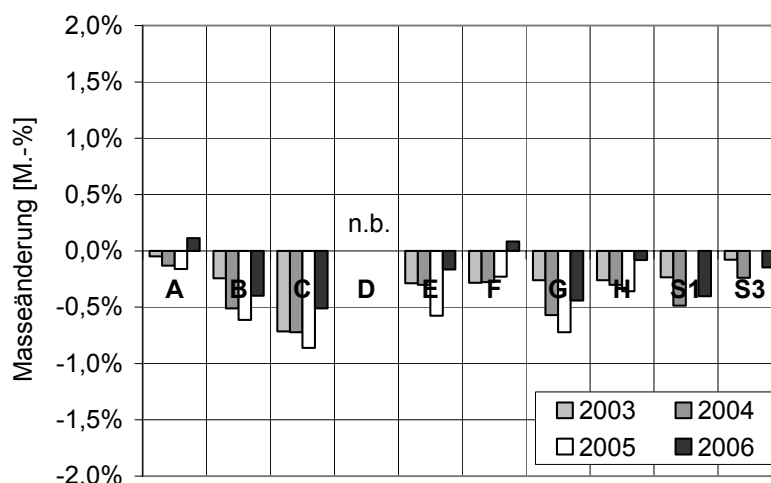


Abbildung 81: Masseänderung der Probekörper während der Auslagerung in Farchant; Expositionsklasse XF2

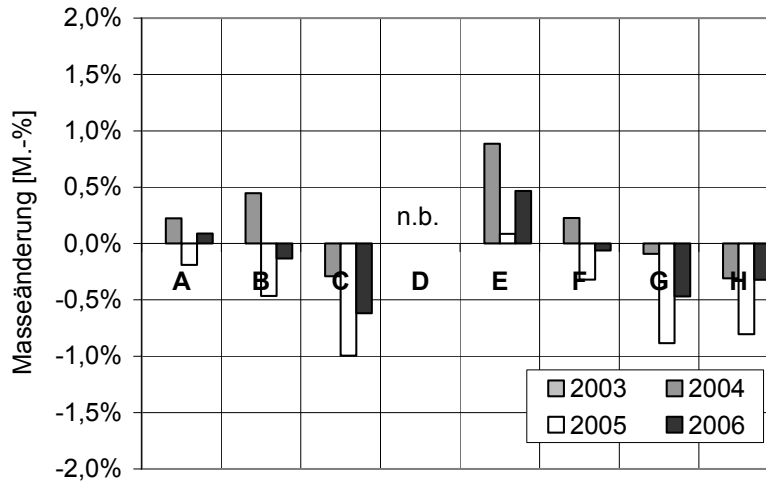


Abbildung 82: Masseänderung der Probekörper während der Auslagerung in Meschede; Expositionsklasse XF2

Bei den meisten hier beobachteten Serien wurden über den Zeitraum der Auslagerung in etwa konstante Feuchtegehalte ermittelt. Die in Meschede ausgelagerten Probekörper wiesen einen etwas unstetigeren Masseverlauf über den Zeitraum der Auslagerung auf, nur bei Serie E wurde auch nach Beginn der Auslagerung noch eine leichte Feuchtaufnahme von rund 0,5 M.-% ermittelt, die übrigen Serien wiesen in etwa konstante Feuchtegehalte oder leicht geringere Massen auf.

Insgesamt war bei den untersuchten Probekörpern unter den gegebenen Bedingungen (vertikale Lagerung, Abdichtung aller Seitenflächen außer der Prüffläche, Umgebungsbedingungen, etc.) keine Aufsättigung bzw. Massezunahme durch Feuchtaufnahme zwischen aufeinander folgenden Winterperioden festzustellen.

In Abbildung 83 und Abbildung 84 sind die Masseänderungen der Probekörper, die im Bereich der Expositionsklasse XF4 ausgelagert gewesen waren, dargestellt.

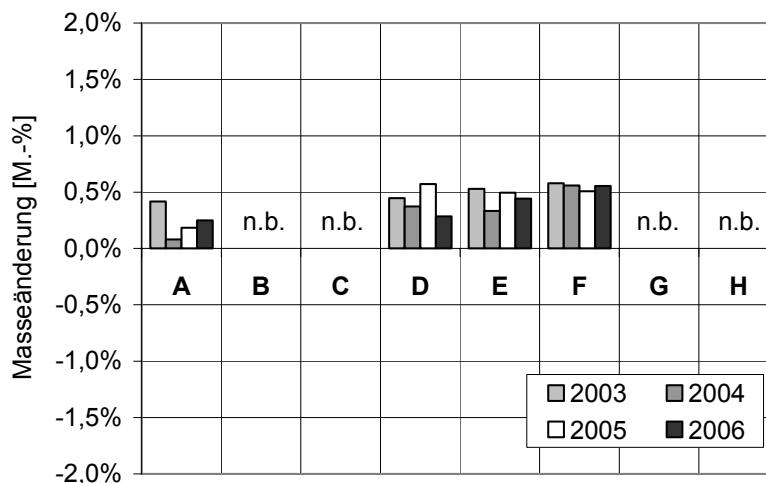


Abbildung 83: Masseänderung der Probekörper während der Auslagerung in Farchant; Expositionsklasse XF4

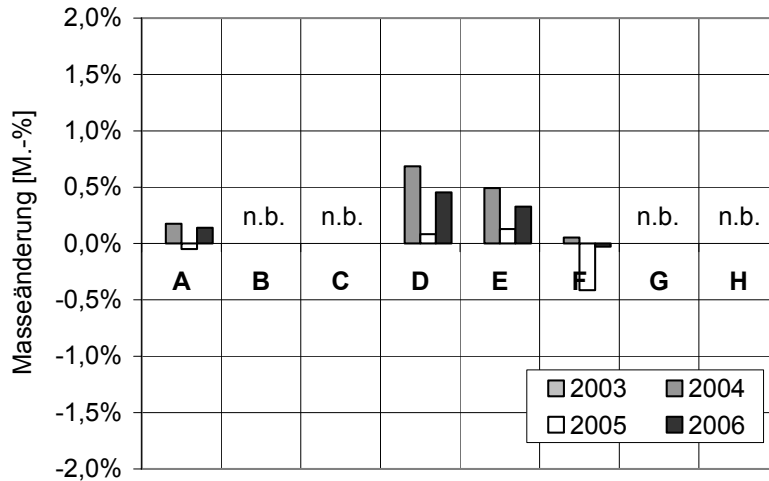


Abbildung 84: Masseänderung der Probekörper während der Auslagerung in Meschede; Expositions-klasse XF4

Die Untersuchung der Masseänderung bei den im Expositionsbereich XF4 ausgelagerten Probekörpern zeigte sowohl für den Auslagerungsort Farchant als auch für den Auslagerungsort Meschede in den meisten Fällen eine deutliche Massezunahme. So nahmen die Probekörper in Farchant durchschnittlich 0,5 M.-% Feuchtigkeit auf, die Probekörper in Meschede in Schnitt aller Untersuchungstermine 0,3 M.-%.

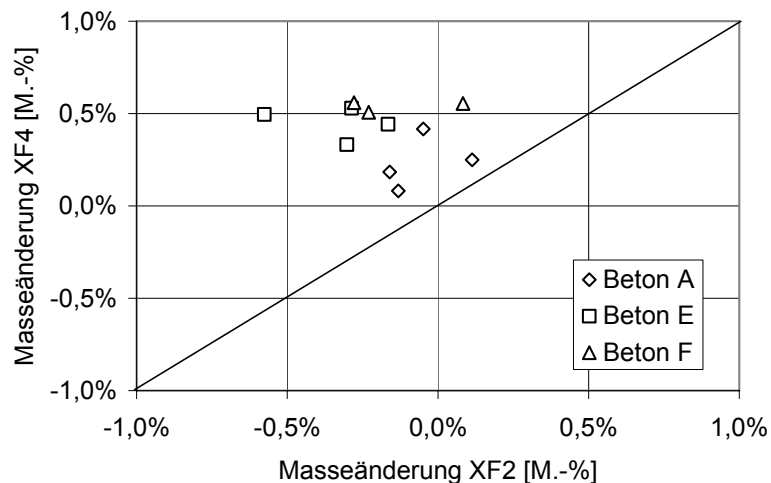


Abbildung 85: Masseänderung der in Farchant ausgelagerten Probekörper; Vergleich zwischen der Exposition XF2 und XF4

Auch bei den Probekörpern, die gemäß eines XF4 Angriffs horizontal gelagert waren, konnte eine Aufsättigung, also eine kontinuierliche Massezunahme über mehrere Winterperioden hinweg unter den gegebenen Bedingungen nicht beobachtet werden. Allerdings bleibt zu berücksichtigen, dass bei den hier verwendeten Probekörpern eine Pfützenbildung, wie sie bei unzureichender Planung (z.B. ungenügende Nei-

gung) auch durchaus im Bereich des Straßen- und Brückenbaus möglich ist, nicht simuliert wurde.

In Abbildung 85 ist die Masseänderung der Probekörper, die in Farchant im Bereich der Exposition XF2 ausgelagert gewesen sind, der Masseänderung der in der Exposition XF4 ausgelagerten Probekörper gegenüber gestellt. Die ebenfalls eingezeichnete Winkelhalbierende markiert den Bereich, bei der eine identische Masseänderung dieser beiden Lagerungsarten stattfindet.

Gut zu erkennen ist die klare Abhängigkeit zwischen der Expositionsklasse und der Masseänderung. So wiesen die Probekörper, die in der Expositionsklasse XF2 gelagert waren, einen deutlich höheren Masseverlust bzw. eine geringere Massezunahme als die in der Exposition XF4 gelagerten Probekörper auf.

Vergleicht man die während der Auslagerung maximal festgestellte Wasseraufnahme der Betone, die bei rund 0,50 M.-% liegt, mit der Wasseraufnahme, die die Laborprobekörper während des kapillaren Saugens aufwiesen (minimal 0,60 M.-%), so sind diese in etwa identisch. Allerdings wird der kapillar aufnehmbare Feuchtegehalt von keinem der Betone direkt erreicht oder überschritten. Des Weiteren findet eine Schädigung des Betons erst statt, wenn weiteres Wasser durch die Mikroislinsenpumpe aufgenommen wird und zumindest lokal zu einer kritischen Sättigung des Betons führt.

Die Ergebnisse zeigen daher, dass unter den gegebenen Auslagerungsbedingungen eine über mehrere Jahre hinweg andauernde Aufsättigung der Betone, gemessen durch die Ermittlung der Masse von Probekörpern mit einer Tiefe von 150 mm, scheinbar nicht stattfindet. Die Sättigung, die durch die normale Witterung in Anlehnung an eine XF4 Exposition erreicht wird, liegt nach den Messungen der Gewichtsänderung geringfügig unterhalb der kapillar aufgenommenen Wasser- bzw. Taumittelösungsmenge, wie sie im CDF-Laborprüfverfahren ermittelt wurde. Deutlich unterscheiden sich hingegen die Werte der Feuchteaufnahme, die unter Laborbedingungen während der Befrostung erzielt worden sind von denen, die infolge Auslagerung für den gesamten Probekörper gemessen wurden.

9.3.2.2 Ergebnisse Multiringelektrode

An ausgewählten Betonen wurde mit so genannten Multiringelektroden die Widerstandsverteilung bis in eine Tiefe von rund 40 mm ermittelt (vgl. Kapitel 8.6.4). Im Folgenden werden die Widerstandsverteilungen des Betons F (CEM II A-LL 32,5 R; w/z = 0,50; kein LP) über den Zeitraum der Auslagerung näher betrachtet. Dieser Beton wurde gewählt, da hier sowohl Daten der Lagerung XF2 als auch der Lagerung XF4 vorlagen. Des weiteren wies dieser Beton im Laufe der Auslagerung teilweise deutliche Schädigungen auf. Bei der Darstellung der Ergebnisse werden der

Übersicht halber nur drei Ringe, der äußerste, der mittlere und der innerste Ring, betrachtet.

Bei den hier dargestellten Widerständen handelt es sich um temperaturkompensierte Widerstände. Trotz dieser Kompensation sind vor allem in den Wintermonaten teilweise deutliche tageszeitliche Schwankungen zu beobachten. Dies ist teilweise darauf zurückzuführen, dass bei Frostereignissen eine schlagartige und nicht durch die gängige Temperaturkompensation ausgleichbare Veränderung des Widerstandes stattfindet. Die Auswirkungen eines Gefrierereignisses sind hierbei abhängig von der Temperatur und vor allem vom Feuchtigkeitsgehalt, d.h. bei hohen Feuchtigkeitsgehalten und dementsprechend niedrigen Widerständen wird durch das Überschreiten des Gefrier- bzw. des Schmelzpunktes in kurzer Zeit eine hohe Widerstandsänderung gemessen, die allerdings nicht aus einer Veränderung des Wasserhaushaltes, sondern nur durch den Phasenübergang begründet ist. Für die weiteren Aussagen ist dies allerdings nicht entscheidend, sofern man jeweils die niedrigen Widerstände und damit die Zeitpunkte, an denen das Wasser im flüssigen Zustand vorliegt, betrachtet. Durchführung

Nachfolgend sind die Widerstände über den gesamten Auslagerungszeitraum für den Beton, der im Bereich XF2 in Farchant ausgelagert gewesen war, dargestellt.

Zu erkennen ist ein deutlicher Einfluss von Wetterereignissen auf den hier ermittelten elektrolytischen Widerstand im Randbereich der Betone. Regenereignisse sind durch fallende Widerstände, längere Trockenperioden sind durch steigende Widerstände gekennzeichnet. Die Abnahme des Widerstandes durch ein Regenereignis erfolgt hierbei relativ schnell, der Anstieg des Widerstandes während der Trockenperiode erfolgt dagegen langsam. Dies ist darauf zurück zu führen, dass das Wasser während des Regenereignisses kapillar in den Baustoff aufgenommen wird, während es in der Trocknungsperiode zum größten Teil über die dampfförmige Phase wieder an die Umgebung abgegeben wird. Während durch den kapillaren Wassertransport eine schnelle Umverteilung und Einlagerung des Wassers in die Randzone des Betons erfolgen kann, ist der dampfförmige Transport während des Trocknens durch den diffusionsgesteuerten Prozess deutlich langsamer. Gut zu erkennen ist dies zum Beispiel in der Widerstandskurve des äußersten Rings im Diagramm rechts oben (graue Kurve).

Bei den Betonen, die im Bereich XF2 ausgelagert gewesen waren, weist die Randzone im Vergleich zu den weiter innen liegenden Ringen zumeist deutlich höhere Widerstände, d.h. einen geringeren Wassergehalt auf. Dies ist darauf zurück zu führen, dass auch bei Regenereignissen nur eine geringe Wassermenge an die senkrecht gelagerte Oberfläche der ausgelagerten Probekörper gelangt und dort auch sofort wieder ablaufen kann. Im Rahmen der jährlichen Begutachtung der Probekörper konnte festgestellt werden, dass die so gelagerten Probekörper schon kurz nach

einem Regenereignis wieder eine trockene Oberfläche aufwies. Damit kann in der Randschicht der Probekörper nur eine geringe Wassermenge aufgenommen werden, der Wasserhaushalt der im Bereich XF2 gelagerten Probekörper ist demnach von langen Trockenperioden und zumeist nur kurzen Regenereignissen, die sich zudem durch ein geringes Wasserangebot auszeichnen, gekennzeichnet. Dies führt letztlich dazu, dass der Widerstand in den äußeren Schichten in der Regel höher ist als im Kernbeton.

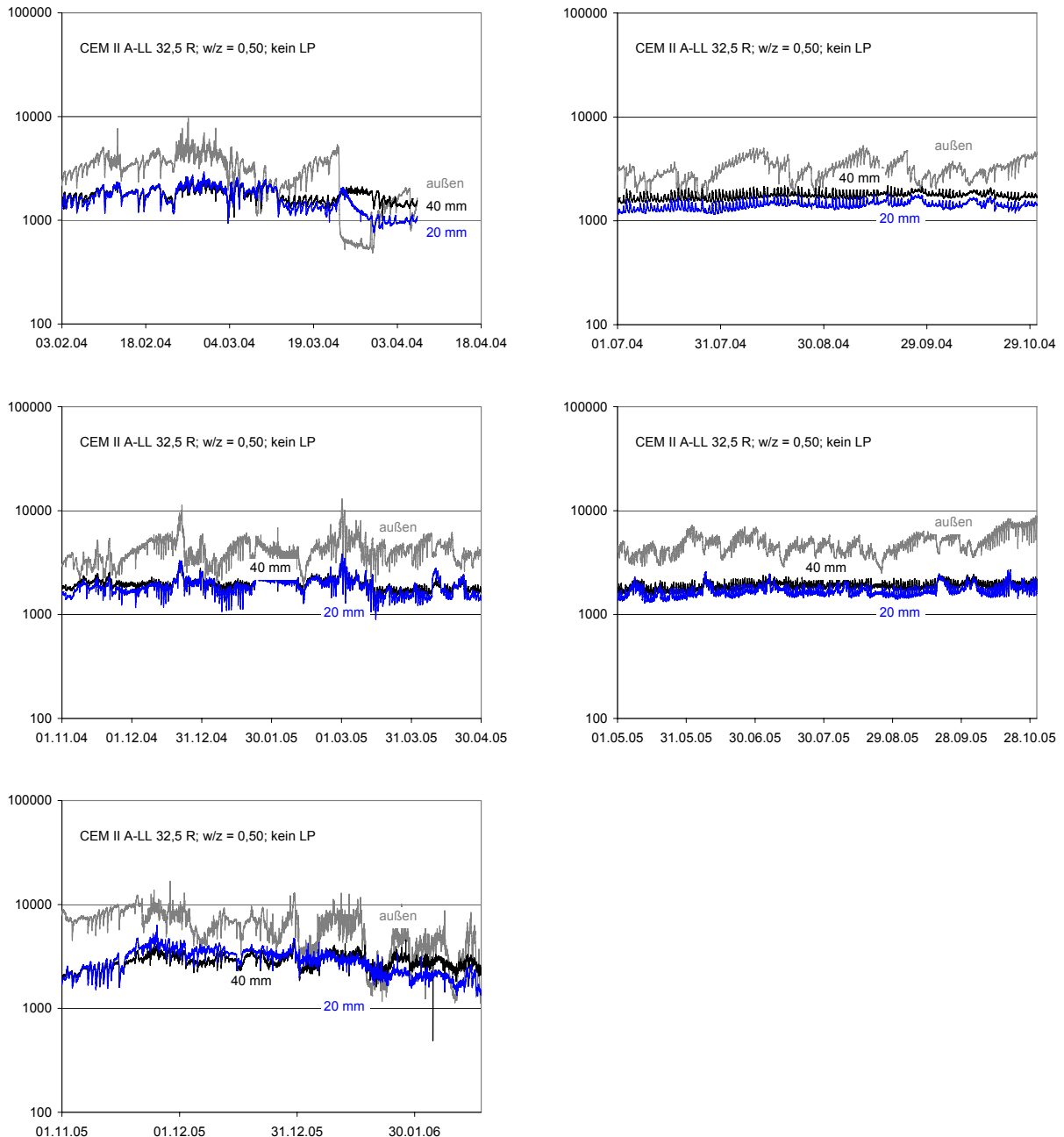


Abbildung 86: Verlauf der gemessenen Widerstände an Ring 1 (Tiefe = 40 mm), Ring 4 (Tiefe = 20 mm) und Ring 8 (außen); Beton F (CEM II A-LL 32,5 R; w/z = 0,50; kein LP); Auslagerung Farchant Exposition XF2

Der Wasserhaushalt des Kernbetons erwies sich als ziemlich unbeeinflusst von äußeren Ereignissen. Die Probekörper wiesen über den Zeitraum der Auslagerung relativ konstante Widerstände ab einer Tiefe von rund 20 mm auf, ein leicht ansteigender Widerstand im Kernbeton weist auf eine leichte Austrocknung hin.

Am Ende des ersten Auslagerungswinters konnte an dem hier betrachteten Probekörper eine deutliche Feuchteaufnahme, die auch im Innenbereich des Probekörpers messbar war, beobachtet werden. Die dazugehörigen Widerstände sind in Abbildung 86 zu erkennen und in Abbildung 87 vergrößert dargestellt.

Anders als bei den oben beschriebenen Widerstandsverteilungen ist hier ein deutlicher Abfall des Widerstandes in der Randzone der Probekörper zu beobachten. Des Weiteren setzt sich dieser Abfall auch in dem weiter innen liegenden Ring in einer Tiefe von 20 mm fort. Der Ring in einer Tiefe von 40 mm zeigt dagegen keinen veränderten Widerstand in dem hier betrachteten Zeitraum.

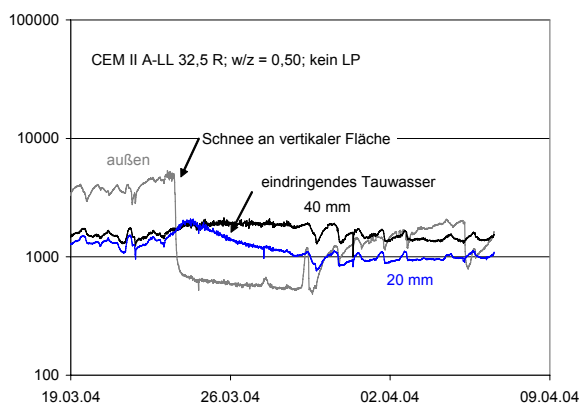


Abbildung 87: Verlauf der gemessenen Widerstände an Ring 1 (Tiefe = 40 mm), Ring 4 (Tiefe = 20 mm) und Ring 8 (außen); Beton F (CEM II A-LL 32,5 R; w/z = 0,50; kein LP); Auslagerung Farchant Exposition XF2 (Detail: Schnee an vertikaler Fläche)

Der stark abfallende Widerstand im ersten Ring ist durch einen lang anhaltenden Schneefall und eine Windverfrachtung dieses Schnees in den Zwischenraum zwischen Schutzplanke und Auslagerungsstand an die vertikale Fläche der Probekörper bedingt. Über einen Zeitraum von 7 Tagen (23.03.04 bis 29.03.04) lag damit an der Oberfläche der Probekörper eine Schneesicht, die teilweise durch Tauvorgänge als Nassschnee vorlag, an. Somit konnte über einen Zeitraum von 7 Tagen trotz der eigentlich vertikalen Lagerung der Probekörper kapillares Wasser in den Beton eindringen. Dieses Wasser führte an der Oberfläche des Betons zu einer schnellen Reduzierung des Widerstandes. Nach rund 2 Tagen ist auch an dem mittleren Ring in einer Tiefe von 20 mm ein Abfall des Widerstandes zu erkennen. Dieser findet aufgrund der in dieser Tiefe langsamer ablaufenden kapillaren Wasseraufnahme

deutlich gedämpfter statt, bis zum Ende des anliegenden Schnees, der am 29.03.04 ist auch in dieser Schicht der Widerstand deutlich unter $1\text{ k}\Omega$ gefallen. Der Trocknungsvorgang, der ab dem 29.03. einsetzt, verläuft danach entsprechend rückläufig, d.h. hier weist die Oberfläche nach kurzer Zeit wieder einen höheren Widerstand als die tiefer liegenden Betonzonen auf.

Ein ähnliches Phänomen trat nochmals im letzten beobachteten Winter in den Zeiträumen 17.01.06 bis 22.01.06 sowie 07.02.06 bis 09.02.06 auf. Auch hier war durch den lang andauernden Kontakt zum Schnee eine deutliche Reduzierung des Widerstandes in der Randzone zu beobachten, die Beeinflussung der tiefer liegenden Schichten fand allerdings durch die kürzer andauernde Belastungszeit nicht so ausgeprägt wie im Winter 2003/2004 statt.

Insgesamt zeichnen sich die im Bereich der Expositionsklasse XF2 ausgelagerten Probekörper dadurch aus, dass der Widerstand in der Außenzone hauptsächlich über dem Widerstand im Inneren des Betons liegt. Nur kurzzeitig konnten Widerstände in der Außenzone beobachtet werden, die deutlich unter den im Kernbeton ermittelten Widerständen lagen. Des Weiteren war über den Zeitraum der Auslagerung keine kontinuierliche Veränderung der Widerstände zu erkennen gewesen.

In der Abbildung 88 sind die Widerstände eines Probekörpers des gleichen Betons (CEM II A-LL 32,5 R; $w/z = 0,60$; kein LP), der im Bereich der Exposition XF4 ausgelagert gewesen war, dargestellt. Die Fläche, in der die Multiringelektrode eingebaut war, lag während der Auslagerung horizontal.

Ebenso wie bei dem Probekörper, der im Bereich XF2 ausgelagert gewesen war, wies auch der im Bereich XF4 ausgelagerte Probekörper im inneren Bereich ab ca. 20 mm keine starke Beeinflussung durch Wetterereignisse auf. So wurden durchgehend im Kernbereich Widerstände im Bereich von 2 bis $3\text{ k}\Omega$ ermittelt.

Dagegen wurden im Randbereich der Probekörper abweichend von der vorangegangenen vorgestellten Lagerung XF2 im Bereich der Lagerung XF4 deutlich geringere Widerstände ermittelt. Dies kann darauf zurückgeführt werden, dass sich auch bei kurzen Regenereignissen auf der horizontalen Fläche schnell ein durchgehender Feuchtigkeitsfilm bildet. Hierdurch ist eine kapillare Wasseraufnahme in der Randschicht schnell gegeben, was eine Reduzierung des Widerstandes in dieser Zone zur Folge hat. Da wie eingangs beschrieben die kapillare Wasseraufnahme deutlich schneller erfolgt als die dampfförmige Trocknung, ist auch bei einem geringen zeitlichen Anteil an Regenereignissen verglichen mit den Zeiträumen der Trockenperioden insgesamt eine Wasseraufnahme möglich. Im Fall der Auslagerung Farchant stellt sich ein Gleichgewicht der Randzone ein, das durch einen etwas geringeren Widerstand im Randbereich und damit einem etwas höheren Feuchtegehalt gekennzeichnet ist.

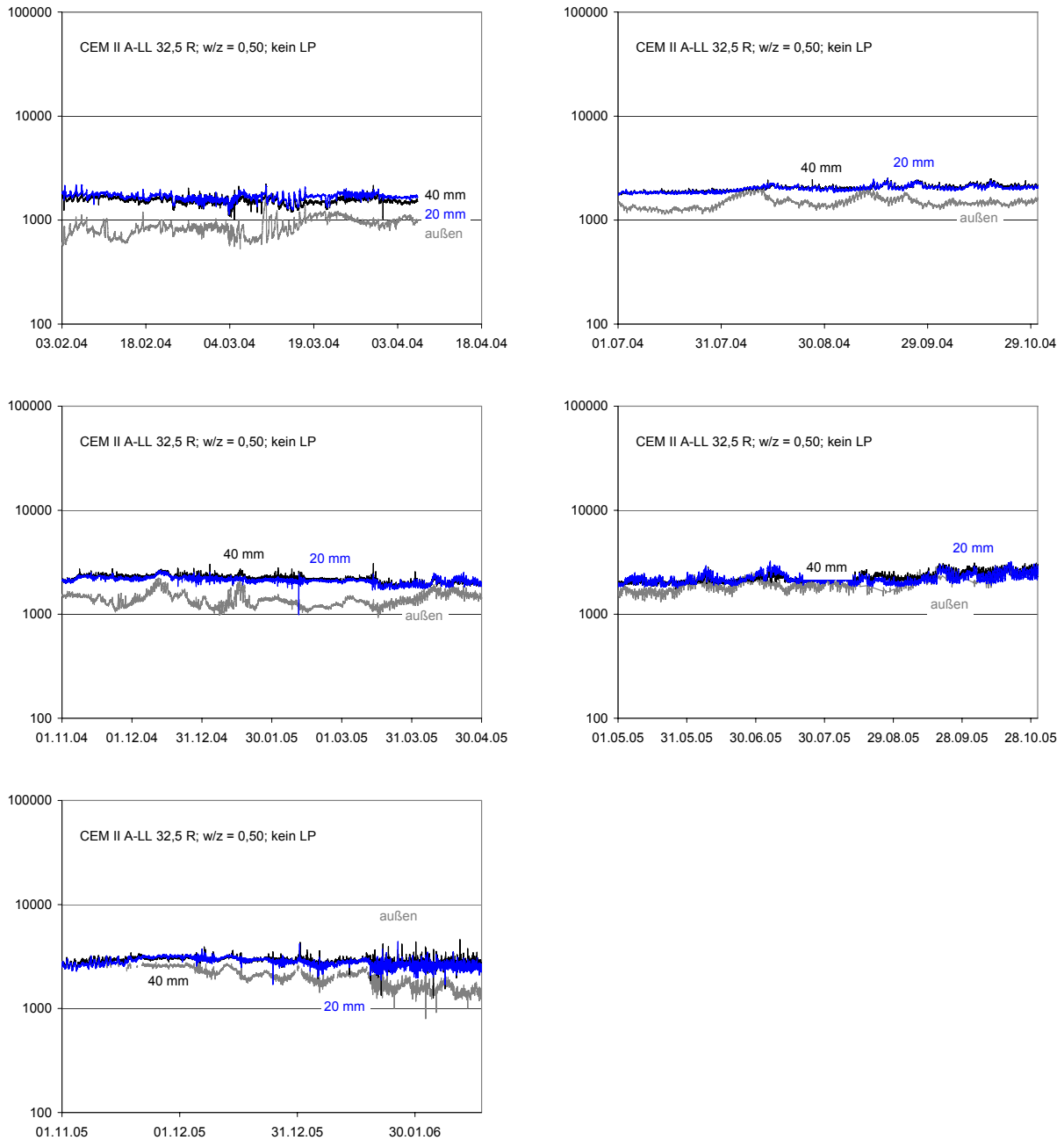


Abbildung 88: Verlauf der gemessenen Widerstände an Ring 1 (Tiefe = 40 mm), Ring 4 (Tiefe = 20 mm) und Ring 8 (außen); Beton F (CEM II A-LL 32,5 R; w/z = 0,50; kein LP); Auslagerung Farchant Exposition XF4

Insgesamt wiesen die Betone, die im Bereich XF4 ausgelagert gewesen waren, durchgehend geringere Widerstände in der Außenzone auf. Eine Tendenz, zum Beispiel eine kontinuierliche Reduzierung des Widerstandes, was auf eine kontinuierliche Aufsättigung schließen lassen könnte, konnte nicht festgestellt werden. Vielmehr wurden die ermittelten Widerstände geprägt durch die lokalen Wetterereignisse, eine Aufsättigung, zum Beispiel als Folge einer wirksamen Mikroislinsepumpe konnte durch die Multiringelektrode nicht nachgewiesen werden.

In Abbildung 89 sind die temperaturkompensierten Widerstände, die im Rahmen der Auslagerung des Betons F (CEM II A-LL 32,5 R; w/z = 0,60; kein LP) in Meschede im Bereich XF4 ermittelt wurden, dargestellt. Abweichend der Auslagerung in Farchant fielen hier aufgrund der späteren Auslagerung statt 4 Wintern nur 3 Winter in den Beobachtungszeitraum. Bei der Darstellung wurden die jeweiligen Saisons (Sommer bis Sommer) zusammengefasst.

Die Tendenzen der in Meschede ausgelagerten Probekörper sind ähnlich zu denen in Farchant. So wurden auch hier im Bereich XF4 in der Randzone deutlich niedrigere Widerstände ermittelt, als diese im Bereich XF2 gemessen wurden. Bei Beton F lagen wiederum die Widerstände in der Randzone des XF4-Probekörpers deutlich unter den Widerständen des Kernbetons, auch hier stellte sich demnach eine geringfügig feuchtere Rand- als Kernzone ein.

Ein signifikanter Unterschied zwischen den beiden gewählten Auslagerungsorten konnte nicht festgestellt werden. Dies ist damit zu begründen, dass die Niederschlagsereignisse beider Auslagerungsorte sich in etwa ähneln, was zur Folge hat, dass sich über das Jahr hinweg ein vergleichbarer Feuchtehaushalt in den hier untersuchten Probekörpern einstellt.

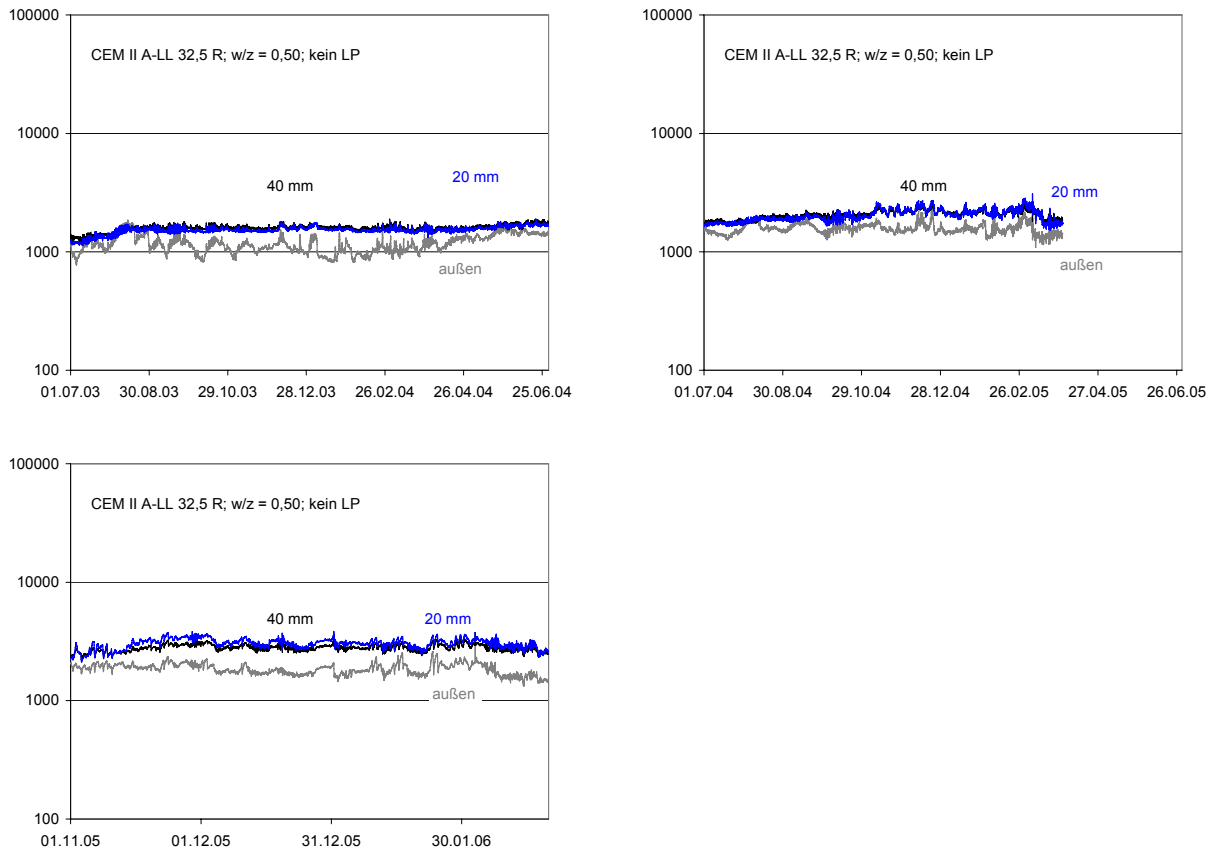


Abbildung 89: Verlauf der gemessenen Widerstände an Ring 1 (Tiefe = 40 mm), Ring 4 (Tiefe = 20 mm) und Ring 8 (außen); Beton F (CEM II A-LL 32,5 R; w/z = 0,50; kein LP); Auslagerung Meschede Exposition XF4

Neben der Ermittlung der Widerstände an den ausgelagerten Probekörpern wurden auch Widerstände mit Hilfe der Multiringelektrode an Laborprobekörpern, die aus den gleichen Betonen hergestellt worden waren, ermittelt. Die Probekörper wurden hierzu identisch zu den ausgelagerten Probekörpern nachbehandelt und bis zu einem Alter von rund 90 Tagen auf dem Freigelände der TU München gelagert. Im Alter von 90 Tagen wurden die Probekörper für eine Dauer von 28 Tagen unter Wasser gelagert, anschließend wurde der Widerstand, der sich in der Multiringelektrode eingestellt hatte, ermittelt (vgl. Tabelle im Anhang). Hierbei wurden Widerstände zwischen 500 und 700 Ω gemessen.

Im Vergleich zu den während der Auslagerung ermittelten Widerständen zeigen die Ergebnisse, dass durch die kapillare Sättigung deutlich niedrigere Widerstände und damit deutlich höhere Wassergehalte in den Betonen erreicht werden können, als dies im Feldversuch festgestellt werden konnte. Einzig das Phänomen eines windverfrachteten Schnees an Probekörpern der Auslagerung Farchant führte durch die daraus resultierende lang anhaltende Nasslagerung zu ähnlich niedrigen Widerständen. Insgesamt erwiesen sich die hier untersuchten Auslagerungsszenarien zumindest in den hier betrachteten Tiefenstufen als deutlich trockener, als es im Rahmen der Frost-Tausalz-Prüfung im Labor simuliert wird.

Zu beachten bleibt bei der Messung der Widerstände mittels der Multiringelektrode, dass bei Wassergehalten um die kritische Sättigung des Betons kleine Änderungen des Widerstandes signifikante Änderungen des Feuchtegehaltes und damit des Schädigungspotentials bedeuten (vgl. Kapitel 8.6.4). So ist fraglich, ob ein kritischer Sättigungsgehalt überhaupt zielsicher festgestellt werden kann. Des Weiteren liegt der erste Wert als Integral für eine Schichtdicke von 8 mm vor, eine feinere Auflösung ist messtechnisch nicht möglich. Für Betrachtungen vollständig nass gelagerter Betone (z.B. Sparbecken) ist dies aufgrund der tieferen Eindringzone ausreichend, bei wechselnd feucht und trocken gelagerten Probekörpern mit einer überwiegend trockenen Lagerung ist dagegen ein stärkerer Feuchtegradient zu erwarten.

Dennoch bestätigen die Ergebnisse der Multiringelektrode die einzelnen Ergebnisse der Masseermittlung, mit beiden Verfahren konnte unter den gegebenen Randbedingungen der Auslagerung keine Aufsättigung festgestellt werden. Es konnte nachgewiesen werden, dass der Feuchtegehalt bezogen auf den gesamten Probekörper in diesen Fällen jeweils unter der kapillaren Feuchteaufnahme unter Laborbedingungen lag. Des Weiteren war analog der Masseermittlung eine klare Abhängigkeit der Expositionsklasse zum ermittelten Widerstand nachweisbar. Über den Wassergehalt bzw. den Sättigungsgrad der Betonoberfläche selbst konnte anhand der Messung in einer Tiefe von 8 mm keine Aussage auf die Verhältnisse an der direkten Oberfläche getroffen werden.

9.3.2.3 Schädigung der ausgelagerten Probekörper

An den ausgelagerten Probekörpern wurde sowohl die innere Schädigung als auch die äußere Schädigung ermittelt. Die Bestimmung der inneren Schädigung erfolgte per Ultraschalllaufzeit in zwei Tiefenstufen (Oberseite: $t_1 = 35$ mm; Unterseite: $t_2 = 115$ mm). Als Bezugspunkt (100 %) wurde der Zeitpunkt des Beginns der Auslagerung gewählt.

Für einen besseren Überblick der ausgelagerten Serien sind in Tabelle 20 die Zusammensetzung der Betone und die Expositionen während der Auslagerung aller untersuchten Serien aufgeführt.

Tabelle 20: Zusammensetzung der untersuchten Betone; Expositionen der ausgelagerten Probekörper

Beton	Zement	w/z-Wert	LP-Mittel	Exposition der ausgelagerten Probekörper	
				XF2	XF4
1	2	3	4	5	6
A	CEM I 32,5 R	0,50	nein	X	X
B	CEM I 32,5 R	0,60	nein	X	
C	CEM I 32,5 R	0,70	nein	X	
D	CEM I 32,5 R	0,50	ja		X
E	CEM I 32,5 R	0,60	ja	X	X
F	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	nein	X	X
G	CEM II A-LL 32,5 R	0,60	nein	X	
H	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	ja	X	
S1 ¹	CEM III/A 32,5	0,60	nein	X ²	
S3 ¹	CEM III/A 32,5	0,50	nein	X ²	

1: hergestellt in Essen

2: Auslagerung nur in Farchant

Innere Schädigung

In Abbildung 90 ist die innere Schädigung in Form der Änderung des dynamischen E-Moduls für die Probekörper, die in Farchant im Bereich XF2 ausgelagert waren, dargestellt, Abbildung 91 enthält die Änderung des dynamischen E-Moduls der in Meschede ausgelagerten Probekörper. Unterschiedlich hervor gehoben sind jeweils die Messlinien an der Ober- bzw. Unterseite der Probekörper.

Sowohl bei den Probekörpern, die in Farchant, als auch bei den Probekörpern, die in Meschede ausgelagert gewesen waren, konnte über die Dauer der Auslagerung keine Abnahme des dynamischen E-Moduls verzeichnet werden.

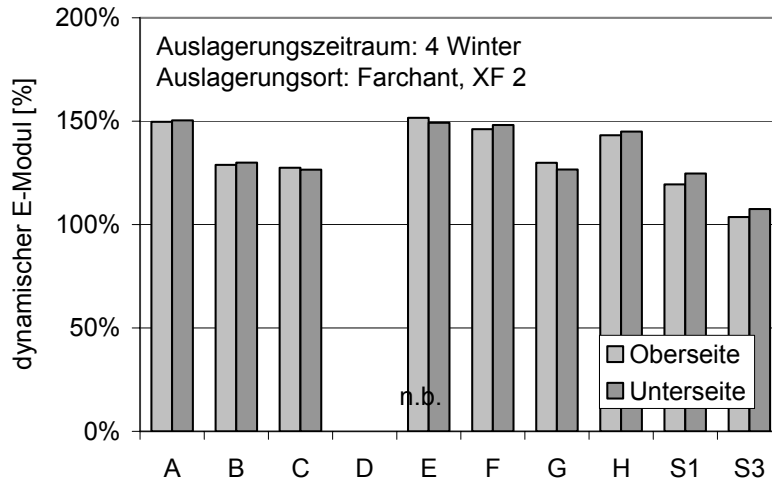


Abbildung 90: Änderung des dynamischen E-Moduls durch die Auslagerung (Auslagerungsort: Farchant; Exposition: XF2)

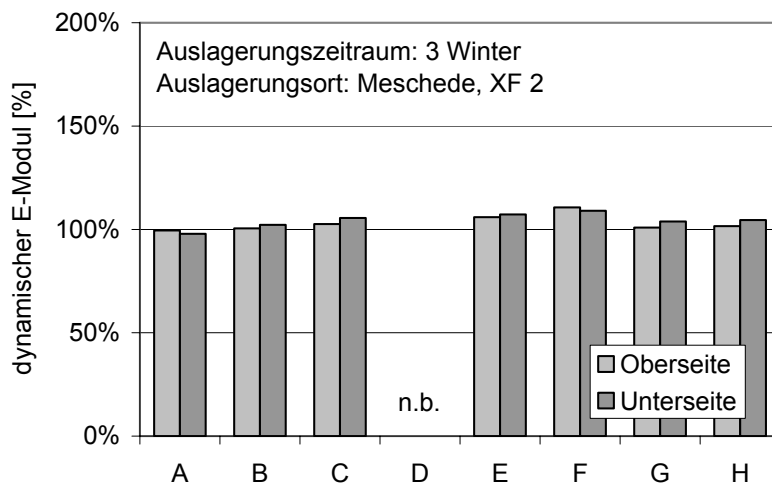


Abbildung 91: Änderung des dynamischen E-Moduls durch die Auslagerung (Auslagerungsort: Meschede; Exposition: XF2)

Des Weiteren waren die Änderungen der Laufzeit in der oberen und in der unteren Ebene der Probekörper identisch. Eine Front der inneren Schädigung konnte demnach nicht nachgewiesen werden. Der Vergleich zweier Tiefenstufen ist insofern auch wichtig, da selbst bei einem konstanten dynamischen E-Modul nicht zwangsläufig auf eine Schadensfreiheit des Gefüges geschlossen werden kann. So ist denkbar, dass durch eine weitere Hydratation der Betone auf der einen Seite eine Gefügeverfestigung und damit eine Verbesserung des dynamischen E-Moduls statt findet, diese auf der anderen Seite durch eine Frostschädigung und auftretende Mikrorisse wieder abgebaut wird. Dadurch, dass sich sowohl die beanspruchte Seite als auch die Rückseite gleichläufig entwickeln, ist eine derartige Konstellation auszuschließen.

Während bei den Probekörpern, die in Meschede ausgelagert gewesen waren, die Ultraschalllaufzeit über die Dauer der Auslagerung in etwa konstant blieb, wiesen die in Farchant ausgelagerten Probekörper einen deutlichen Anstieg des dynamischen E-Moduls während der Auslagerung auf. Dieser war vor allem auf eine deutliche Abnahme der Ultraschalllaufzeit zwischen der ersten und der zweiten Messung zurück zu führen. Wird als Bezugsgröße die Ultraschalllaufzeit nach dem ersten Winter angesetzt, ergibt sich über die verbleibende Auslagerungszeit die in Abbildung 92 dargestellte Änderung des dynamischen E-Moduls.

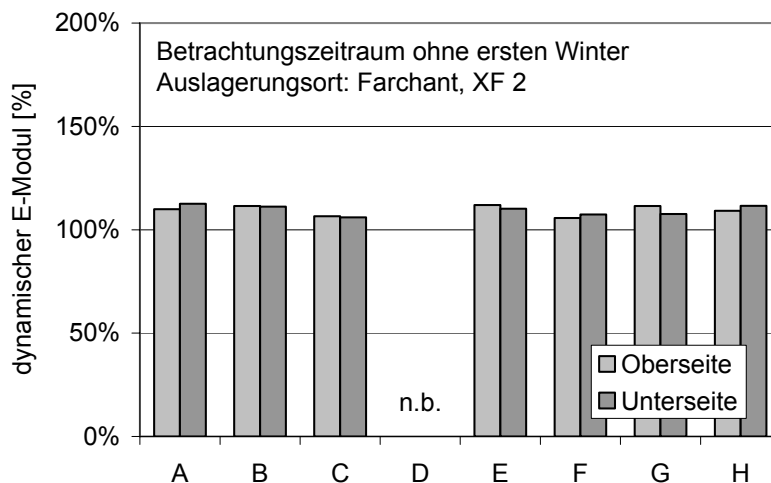


Abbildung 92: Änderung des dynamischen E-Moduls durch die Auslagerung (Auslagerungsort: Farchant; Exposition: XF2); Bezug: Sommer 2003

Setzt man als Bezugspunkt für den Vergleich des dynamischen E-Moduls die Messung nach dem ersten Winter an, so sind die deutlichen Verbesserungen des dynamischen E-Moduls nicht mehr zu erkennen. Der Zuwachs des dynamischen E-Moduls erfolgt daher in der Zeit zwischen der Auslagerung und der ersten Zwischenmessung, die bei den Probekörpern in Farchant im Sommer 2003 stattgefunden hatte.

Der Grund der starken Zunahme des dynamischen E-Moduls der Probekörper, die in Farchant ausgelagert gewesen waren, liegt vermutlich in dem relativ frühen Zeitpunkt der ersten Messung. Diese wurde zum Zeitpunkt der Auslagerung durchgeführt. Die Probekörper, die in Farchant ausgelagert wurden, waren hierbei zwischen 21 und 45 Tage alt. Durch eine weitere Hydratation der Betone während der ersten Winterperiode erfolgte eine Verdichtung des Gefüges und damit eine Verbesserung in der Ultraschalllaufzeit. Die Probekörper, die in Essen hergestellt worden waren und ebenfalls in Farchant ausgelagert wurden, wiesen eine derartige Verbesserung nicht auf (Serien S1 und S3). Diese waren zum Zeitpunkt der ersten Messung aber auch mindestens vier Wochen alt.

Eine derartige Zunahme des dynamischen E-Moduls war bei den in Meschede ausgelagerten Betonen nicht festzustellen. Durch Komplikationen der Auslagerung und eine Verschiebung des Auslagerungszeitpunktes um rund 6 Monate waren die Probekörper bei der Erstmessung deutlich älter. Hier konnte die Nacherhärtung schon vor der Auslagerung stattfinden und war damit zum Zeitpunkt der Erstmessung weitestgehend abgeschlossen, eine weitere Verbesserung während der Auslagerung konnte nicht beobachtet werden.

In Abbildung 93 und Abbildung 94 ist die Veränderung des dynamischen E-Moduls der Probekörper, die im Bereich der Exposition XF4 ausgelagert gewesen waren, dargestellt.

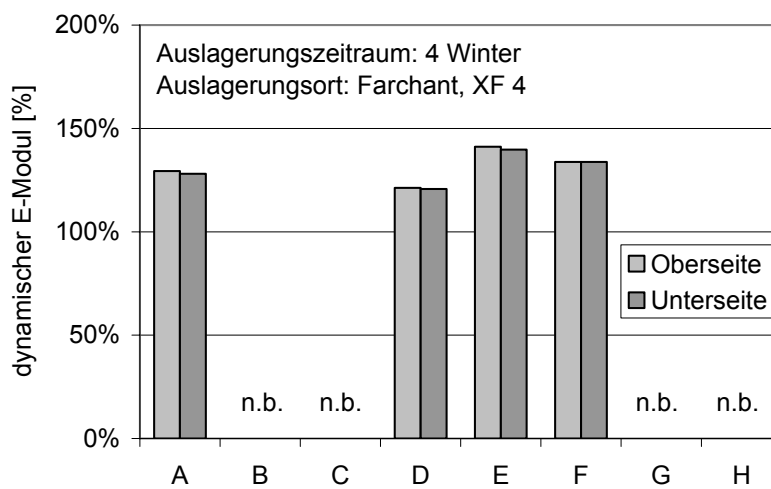


Abbildung 93: Änderung des dynamischen E-Moduls durch die Auslagerung (Auslagerungsort: Farchant; Exposition: XF4)

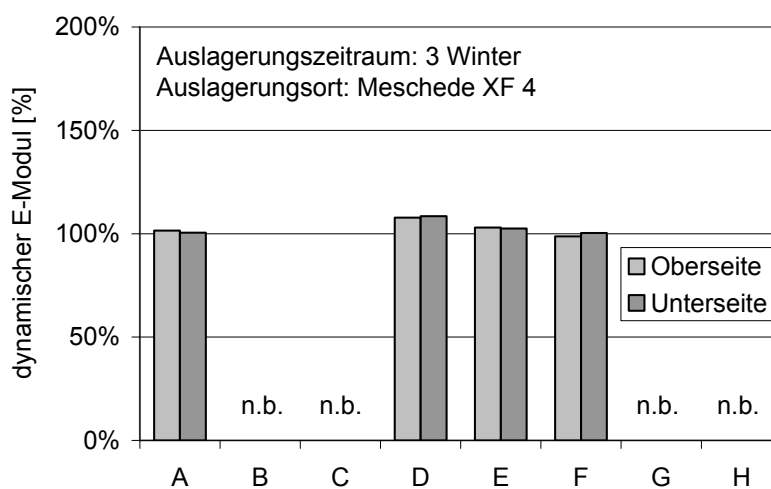


Abbildung 94: Änderung des dynamischen E-Moduls durch die Auslagerung (Auslagerungsort: Meschede; Exposition: XF4)

Ebenso wie bei den im Bereich der Exposition XF2 ausgelagerten Probekörpern war auch bei den Probekörpern, die im Bereich der Exposition XF4 ausgelagert gewesen waren, über den Zeitraum der Auslagerung keine innere Schädigung nachweisbar. Auch bei diesen Serien wiesen die Probekörper, die in Farchant ausgelagert gewesen waren, im ersten Jahr eine deutliche Zunahme des dynamischen E-Moduls auf, was wiederum auf die relativ früh stattgefundenene Erstmessung zurückgeführt werden kann. Ein Unterschied der beiden Tiefenstufen war nicht festzustellen, ein Gradient zwischen beanspruchter Fläche und Rückseite der Probekörper konnte damit nicht nachgewiesen werden.

Insgesamt wurde demnach bei keiner der ausgelagerten Serien in den jeweils untersuchten Expositionsklassen eine innere Schädigung nachgewiesen.

Äußere Schädigung, Oberflächenabwitterung

Bei allen Terminen wurden keine sandigen Abwitterungen des Zementsteins an der Oberfläche der beanspruchten Probekörperseiten festgestellt. Schädigungen an der Oberfläche traten eher konzentriert an Zuschlägen auf. Bei einigen Betonen traten diese vermehrt an großen Zuschlägen, bei anderen Betonen aber auch ausgehend von kleineren Zuschlägen auf. In Abbildung 95 ist beispielhaft die Oberfläche zweier Betone, die für 2 Winter im Bereich der Expositionsklasse XF2 ausgelagert waren, dargestellt. Die Einteilung der Schädigung erfolgte gemäß Kapitel 8.6.4.

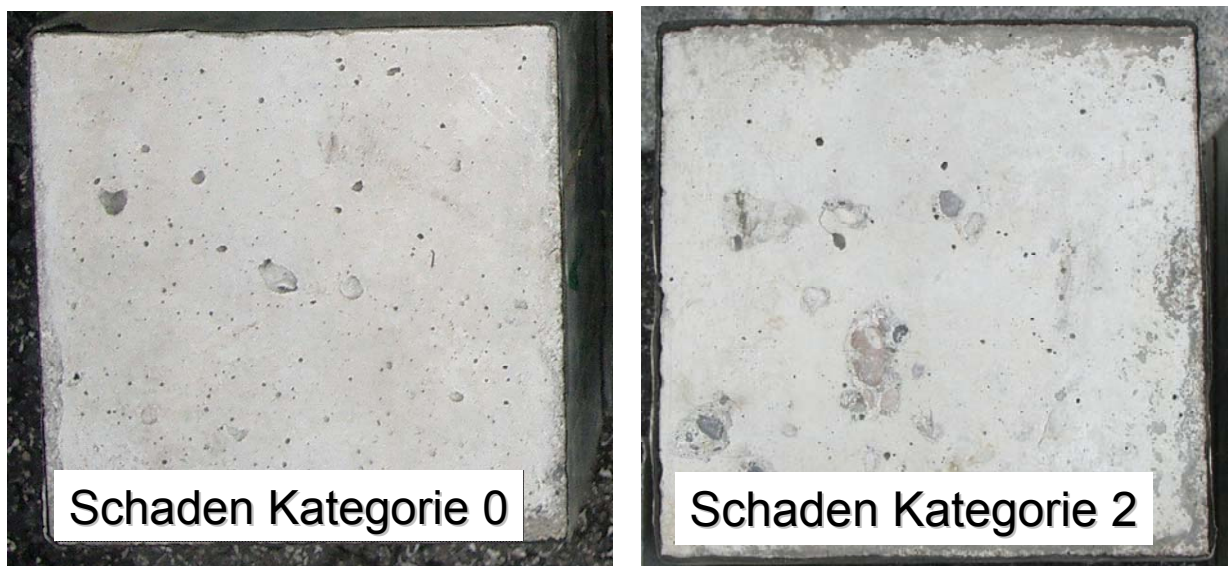


Abbildung 95: Oberfläche zweier Probekörper nach einer Auslagerungsdauer von 2 Wintern (links: CEM II A-LL 32,5 R; w/z = 0,50; kein LP; rechts: CEM II A-LL 32,5 R w/z = 0,60; kein LP)

In Tabelle 21 und Tabelle 22 ist die Schädigung der Probekörper, die in der Exposition XF2 ausgelagert gewesen waren, aufgeführt. Fotos aller beanspruchten Oberflächen sind im Anhang enthalten. Bei den in Meschede ausgelagerten Probekörpern

fand aufgrund der Auslagerung im Frühjahr 2003 die erste Begutachtung im Sommer 2004 statt.

Tabelle 21: Schädigung der in Farchant ausgelagerten Probekörper, Expositions-klasse XF2

Nr.	Betonzusammensetzung						
	Zement	w/z-Wert	LP-Mittel	2003	2004	2005	2006
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7	8
A	CEM I 32,5 R	0,50	nein	0	0	0	0
B	CEM I 32,5 R	0,60	nein	0	0	0	0
C	CEM I 32,5 R	0,70	nein	0	0	1	1
D	CEM I 32,5 R	0,50	ja	-	-	-	-
E	CEM I 32,5 R	0,60	ja	0	0	0	0
F	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	nein	0	0	0	0
G	CEM II A-LL 32,5 R	0,60	nein	1	2	3	3
H	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	ja	0	0	0	0
S1	CEM III/A 32,5	0,60	nein	1	2	3	3
S2	CEM III/A 32,5	0,50	nein	0	0	0	0

Tabelle 22: Schädigung der in Meschede ausgelagerten Probekörper, Exposit.klasse XF2

Nr.	Betonzusammensetzung						
	Zement	w/z-Wert	LP-Mittel	2003	2004	2005	2006
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7	8
A	CEM I 32,5 R	0,50	nein	-	0	0	0
B	CEM I 32,5 R	0,60	nein	-	0	0	0
C	CEM I 32,5 R	0,70	nein	-	0	0	1
D	CEM I 32,5 R	0,50	ja	-	-	-	-
E	CEM I 32,5 R	0,60	ja	-	0	0	0
F	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	nein	-	0	0	0
G	CEM II A-LL 32,5 R	0,60	nein	-	0	1	1
H	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	ja	-	0	0	0

Die in der Expositions-klasse XF2 ausgelagerten Probekörper wiesen teilweise Schädigungen auf. Die Schädigungen einer Probekörper-Serie traten bei Würfeln gleicher Serie jeweils sehr gleichmäßig auf, vgl. auch Bilder im Anhang.

Bei den ausgelagerten Serien wiesen nach der Auslagerung drei Serien deutliche Schädigungen der Oberfläche auf. Bei den Serien handelte es sich um den Beton mit Portlandzement und einem w/z-Wert von 0,70 sowie um die beiden Betone mit einem w/z-Wert von 0,60 und der Verwendung eines Portlandkalksteinzements bzw. eines

Hochofenzements. Alle geschädigten Betone wurden ohne einen Luftporenbildner hergestellt und sind nach ihrer Zusammensetzung nicht für die Expositionsklasse XF2 vorgesehen. Interessant ist, dass die Reihung der Schädigung, wie sie im Labor festgestellt wurde, sich auch in der Schädigung während der Praxislagerung widerspiegelt.

Zu den Serien, die während der Auslagerung keinerlei Schädigungen aufwiesen, gehörten erwartungsgemäß die vier Betone (A, D, F, H), die aufgrund ihrer Zusammensetzung durch einen niedrigen w/z-Wert und/oder die Zugabe eines Luftporenbildners nach DIN 1045-2:2001-07 für einen Einsatz in der Expositionsklasse XF2 vorgesehen sind. Darüber hinaus wiesen auch die Betone B (w/z = 0,60; kein LP) und E (w/z = 0,60; LP) keinerlei sichtbare Schädigungen nach 3 bis 4 Wintern auf.

Tabelle 23: Schädigung der in Farchant ausgelagerten Probekörper, Expositionsklasse XF4

Nr.	Betonzusammensetzung			Schädigung			
	Zement	w/z-Wert	LP-Mittel	2003	2004	2005	2006
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7	8
A	CEM I 32,5 R	0,50	nein	1	2	2	2
B	CEM I 32,5 R	0,60	nein	-	-	-	-
C	CEM I 32,5 R	0,70	nein	-	-	-	-
D	CEM I 32,5 R	0,50	ja	0	1	1	1
E	CEM I 32,5 R	0,60	ja	1	1	1	1
F	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	nein	1	2	2	2
G	CEM II A-LL 32,5 R	0,60	nein	-	-	-	-
H	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	ja	-	-	-	-

Tabelle 24: Schädigung der in Meschede ausgelagerten Probekörper, Exposit.klasse XF4

Nr.	Betonzusammensetzung			Schädigung			
	Zement	w/z-Wert	LP-Mittel	2003	2004	2005	2006
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7	8
A	CEM I 32,5 R	0,50	nein	-	1	1	1
B	CEM I 32,5 R	0,60	nein	-	-	-	-
C	CEM I 32,5 R	0,70	nein	-	-	-	-
D	CEM I 32,5 R	0,50	ja	-	0	1	1
E	CEM I 32,5 R	0,60	ja	-	0	1	1
F	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	nein	-	1	1	2
G	CEM II A-LL 32,5 R	0,60	nein	-	-	-	-
H	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	ja	-	-	-	-

Die meisten Betone der Expositionsklasse XF2 wiesen nach einer Auslagerungszeit von zwei Wintern keine äußere Schädigungen auf, lediglich die Probekörper des Betons mit Portlandkalksteinzement und einem w/z-Wert von 0,60, der entsprechend der Zusammensetzung nicht für die Expositionsklasse XF2 vorgesehen ist, wiesen schon zu diesem Zeitpunkt deutliche Abplatzungen auf der Oberfläche auf.

Im Bereich XF 4 waren die an den Betonen mit Luftporenbildner festgestellten Schädigungen sehr gering, hier waren oberhalb kleiner Zuschläge Abplatzungen zu erkennen. Dagegen wiesen die beiden Betone, die ohne einen Luftporenbildner hergestellt worden waren, deutliche Schädigungen in Form größerer Abplatzungen an der Oberfläche auf.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass nur Betone, die entsprechend ihrer Zusammensetzung nicht für die jeweilige Expositionsklasse konzipiert waren, Schädigungen während der Auslagerung aufweisen. Dagegen zeigten auch einige Betone, die außerhalb der nach DIN 1045-2:2001-07 geforderten Zusammensetzung hergestellt worden waren, eine ausreichende Dauerhaftigkeit über den Zeitraum der Auslagerung. Darüber hinaus kann festgestellt werden, dass alle Betone, die entsprechend ihrer Exposition zusammengesetzt waren, während der Auslagerung keine die Standsicherheit beeinträchtigenden Schädigungen aufwiesen.

9.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

9.4.1 Allgemeines

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden Betone hinsichtlich ihres Verhaltens im Bereich der Expositionsklassen XF2 und XF4 untersucht. Hierzu wurden drei Gruppen unterschiedlicher Betone, die aufgrund ihrer Zusammensetzung für die Klassen XF4 und XF2 bzw. für geringere Klassen als XF2 geeignet sind, hergestellt. An den Betonen wurden sowohl Untersuchungen im Labor, als auch Auslagerungsversuche durchgeführt. Durch den Vergleich der Schädigungen in Labor und Praxis sollte die Korrelation zwischen der Belastung im Rahmen des Frostlaborverfahrens und der Praxisbeanspruchung untersucht werden.

Im Labor wurden neben den Frischbetonkennwerten die Druckfestigkeit und der Frost-Tausalz-Widerstand ermittelt. Letzterer wurde mit Hilfe des CDF-Verfahrens, das einer Prüfung bei vollständiger Sättigung entspricht, ermittelt. Zusätzlich wurden die Betone, die in diesem Verfahren mehr als 1.500 g/m² Abwitterung nach 28 Frost-Tau-Wechseln und keine Zusammensetzung entsprechend den Anforderungen an die Expositionsklasse XF4 aufwiesen, mit einem vom IBPM der Universität Duisburg-Essen entwickelten, modifizierten CDF-Verfahren beansprucht. Dieses unterscheidet sich vom herkömmlichen CDF-Verfahren hinsichtlich des verwendeten Frost-Zyklus,

bei dem anstatt einer Minimaltemperatur von -20 °C eine Minimaltemperatur von -10 °C eingestellt wird sowie hinsichtlich der Prüfdauer und des Abnahmekriteriums, wodurch ein mäßiger Angriff gemäß der Umweltklasse XF2 praxisgerechter simuliert werden sollte.

Im Rahmen der Auslagerungsversuche wurden jeweils 5 Probekörper der Betone in ausgewählten Expositionen für die Dauer mehrerer Winter beansprucht. Als Auslagerungsorte wurden Meschede im Sauerland und Farchant bei Garmisch-Partenkirchen gewählt. Es wurde nachgewiesen, dass es sich bei diesen beiden Auslagerungsorten um Orte mit einer charakteristischen Frost-Tau-Beanspruchung handelt. Farchant zeichnet sich hierbei durch eine höhere Anzahl an Frosttagen (Minimaltemperatur unter 0 °C ; Maximaltemperatur über 0 °C) von durchschnittlich 110 aus, in Meschede wurden durchschnittlich 70 Frosttage registriert. Die Anzahl an Frosttagen mit Niederschlag war dagegen bei beiden Auslagerungsorten ähnlich, hier wurden je Winter ca. 20 Frost-Tau-Wechsel registriert. Die Temperaturunterschiede an Frosttagen mit Niederschlag betrug in Meschede durchschnittlich $7,1\text{ K}$, in Farchant wurde ein Temperaturunterschied von $11,4\text{ K}$ nachgewiesen. Im Vergleich mit anderen Orten in Deutschland ist die Wetterbeanspruchung bezüglich einer Frost-Tau-Beanspruchung in Farchant als deutlich extrem und in Meschede als durchschnittlich anzusehen. Als Auslagerungsvarianten wurden die Expositionen XF2 und XF4 gewählt. Die Auslagerung fand jeweils im Mittelbereich mehrspuriger Fahrbahnen statt, die beanspruchte Oberfläche der Probekörper war in der Exposition XF2 senkrecht, in der Exposition XF4 waagrecht gelagert. Die Betone wurden den Expositionen entsprechend ihrer Zusammensetzung zugeordnet. Zusätzlich wurden ausgewählte Betone in der jeweils höheren Expositionsstufe gelagert. Hierdurch sollte eine Korrelation von nicht bestandenen Frost-Tausalz-Prüfungen und Schadensentwicklung während der Auslagerung untersucht werden. Die Probekörper waren in Auslagerungsständen zu Paketen zusammengefasst, die Seiten dieser Pakete waren mit einer 15 cm dicken Schicht thermisch gedämmt. Zusätzlich waren die Probekörper bis auf die beanspruchte Fläche abgedichtet. Hierdurch wurde erreicht, dass analog großer Bauteile in den Probekörpern ein eindimensionaler Feuchte- und Wärmetransport stattfindet und somit trotz der geringen Abmessungen der Probekörper repräsentative Ergebnisse erzielt werden.

9.4.2 Laboruntersuchungen

Die Betone wiesen im Rahmen der Druckfestigkeitsuntersuchung im Labor zumeist eine entsprechend den Anforderungen an die Expositionsstufe zu niedrige Druckfestigkeitsstufe auf, obwohl die Anforderungen an die Zusammensetzung entsprechend der jeweiligen Expositionsstufe gegeben war. So wurde in den meisten Fällen die Betonfestigkeitsstufe trotz der im Rahmen der Norm liegenden Zusammen-

setzung nicht erreicht. Dies bestätigt Erfahrungen, die an anderer Stelle im Rahmen von Eignungsprüfungen oder Forschungsarbeiten gemacht worden sind und zu den entsprechenden Anträgen zu A1-Änderungen oder zu einem Herabsetzen der Anforderungen in den ZTV-ING 3-1 geführt haben. Diese Ergebnisse zeigen aber auch, dass ein zu hoher w/z-Wert durch den indirekten Nachweis über die Druckfestigkeitsklasse zielsicher erfasst werden würde. Für die Untersuchungen dieses Forschungsvorhabens wurde das Nichterreichen der geforderten Festigkeitsklasse aufgrund des im Labor sicher eingestellten w/z-Wertes als nicht relevant eingestuft.

In den Frost-Tausalz-Prüfungen wiesen alle Betone, die gemäß DIN 1045 für den Einsatz in der Expositionsklasse XF4 hergestellt worden waren, eine unter dem Akzeptanzkriterium von 1.500 g/m^2 nach 28 Frost-Tau-Wechseln liegende Schädigungen auf. Des Weiteren erwies sich ein weiterer Beton (CEM I 32,5 R; w/z = 0,60; mit LP-Bildner), der in seiner Zusammensetzung nicht den Anforderungen der DIN 1045 für die Expositionsklasse XF4 entsprach, ebenfalls als beständig in der Laborprüfung. Alle übrigen Betone wiesen erwartungsgemäß aufgrund des Fehlens eines Luftporenbildners und aufgrund der relativ hohen w/z-Werte über 0,50 deutliche Schädigungen in der XF4-CDF-Prüfung auf.

Im Rahmen der Prüfung der Betone mit dem modifizierten CDF-Verfahren wurden deutlich geringere Schädigungsraten ermittelt. Hierbei zeigte sich eine klare Trennung zwischen den Betonen mit einem w/z-Wert von 0,50 und den Betonen mit einem darüber liegenden w/z-Wert. Während die Betone, die für die Expositionsklasse XF2 konzipiert waren, Abwitterungen nach 28 Frost-Tau-Wechseln von unter 1.500 g/m^2 aufwiesen, wurde bei den Betonen mit darüber liegenden w/z-Werten deutlich höhere Abwitterungen ermittelt. Dies steht im Widerspruch zu den im Rahmen der Auslagerungsversuche ermittelten Schädigungen. Zur Festlegung eines Abnahmekriteriums liegen zurzeit zu wenige Ergebnisse an unterschiedlich zusammengesetzten Betonen vor.

Nur in wenigen Fällen der Frost-Tausalz-Prüfung konnte eine innere Schädigung der Betone nachgewiesen werden. Dies war allerdings auch erst bei einer hohen Anzahl an Frost-Tau-Wechseln der Fall, die Abwitterungen betragen zum Zeitpunkt des Erreichens einer inneren Schädigung (Verlust des dynamischen E-Moduls > 25 %) über 3.000 g/m^2 . Die Messungen belegen, dass bei einem Frost-Tausalzangriff die äußere Schädigung in der Regel überwiegt während die innere Schädigung eher zweitrangig ist.

Insgesamt konnten bei beiden Verfahren - dem herkömmlichen CDF-Test sowie dem modifizierten CDF-Test - die bekannten betontechnologischen Einflussfaktoren auf den Frost-Tausalz-Widerstand bestätigt werden. So wiesen die Betone mit steigendem w/z-Wert oder fehlendem Luftporenbildner höhere Schädigungen auf. Hierbei zeigte sich, dass der w/z-Wert gegenüber der Verwendung eines Luftporenbildners

als deutlich nachrangig zu betrachten ist. So wies der Beton mit einem w/z-Wert von 0,60 und der Verwendung eines Luftporenbildners mit 700 g/m² nach 28 Frost-Tau-Wechseln³ immer noch deutlich niedrigere Abwitterungen als der Beton mit einem w/z-Wert von 0,50 und ohne die Verwendung eines Luftporenbildners auf.

Darüber hinaus konnte ein geringer Einfluss der verwendeten Zementart bei den Betonen ohne Luftporenbildner festgestellt werden. So wiesen die Betone ohne Luftporenbildner mit einem Portlandkalksteinzement im Vergleich zu den Portlandzementbetonen geringfügig höhere Abwitterungen auf. Auch hier zeigte sich aber wieder im Vergleich der Luftporenbetone der große Einfluss des LP-Bildners, der diese Unterschiede bei den Mischungen mit einem Luftporenbildner überdeckte.

9.4.3 Zusammenfassung der Auslagerungsergebnisse

Die Masseänderung während der drei- bzw. vierjährigen Auslagerung zeigte eine klare Abhängigkeit zur Exposition. So wiesen die Probekörper, die in der Expositions-kategorie XF2 ausgelagert gewesen waren (vertikale Prüffläche), tendenziell eine Abnahme der Masse auf, die Probekörper, die in der Expositions-kategorie XF4 lagerten (horizontale Prüffläche, kein Überstand), wiesen eine geringe Zunahme bzw. gleich bleibende Masse auf. Insgesamt konnte anhand der Messung der Gewichtsänderung unter den gegebenen Bedingungen keine einheitliche Tendenz hinsichtlich einer Aufsättigung der Proben über die Dauer der Auslagerung beobachtet werden. Eine Aussage auf die relevante Randzone ist aufgrund der integralen Messung nicht möglich.

Die Ergebnisse der Langzeitmessung der elektrolytischen Widerstände mit den in die Probekörper eingebauten Multiringelektroden zeigten ebenfalls, dass durch mehrere Winter keine Aufsättigung der Probekörper statt findet. Darüber hinaus war auch hier eine klare Abhängigkeit der Widerstandsverteilung im Probekörper in Abhängigkeit der Exposition zu beobachten. Eine Abhängigkeit vom Auslagerungsort konnte dagegen nicht festgestellt werden. Dies kann auf den relativ ähnlichen Anfall an Niederschlag an beiden Orten zurückgeführt werden.

Die gewonnenen Ergebnisse aus der Messung der Gewichtsänderung sowie der Widerstände mittels Multiringelektrode konnten unter den gewählten Randbedingungen der Auslagerung des Betons während der dreijährigen Dauer der Exposition in Farchant und Meschede eine Aufsättigung der Probekörper ebenfalls nicht nachweisen. Anhand der Daten könnte somit geschlussfolgert werden, dass sich eine Schädigung über die verschiedenen Winterperioden kumulativ darstellt und nicht aus einer zunehmenden Sättigung der Proben resultiert.

³ bisheriger Vorschlag zum modifizierten CDF-Test sieht eine Bewertung nach 14 FTW vor

Bei der Begutachtung der ausgelagerten Probekörper zeigte sich eine gute Beständigkeit der jeweils für die Expositionsklassen vorgesehenen Betone. Darüber hinaus erwiesen sich aber auch teilweise Betone, die nicht entsprechend der Zusammensetzung in der jeweiligen Expositionsklasse eingesetzt werden dürften, als dauerhaft. Nur Betone, die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens auch in Expositionsklassen, für die sie gemäß DIN 1045-2:2001-07 nicht vorgesehen sind, ausgelagert wurden, wiesen teilweise erhebliche Schädigungen in Form von Abplatzungen an der Oberfläche auf. Innere Schädigungen konnten an den ausgelagerten Probekörper nicht nachgewiesen werden.

Neben der damit sicheren Einteilung der Betone entsprechend der Zusammensetzung konnte für die Expositionsklasse XF4 auch eine sehr Korrelation zwischen der Frost-Tausalz-Prüfung im Labor und den Ergebnissen der Auslagerung festgestellt werden. So wies neben den beiden Betonen, die entsprechend der Zusammensetzung für die Exposition XF4 vorgesehen sind, auch ein Beton mit einem w/z-Wert von 0,60 und einem Luftporenbildner Abwitterungen unter dem allgemein anerkannten Akzeptanzkriterium von 1.500 g/m² auf. Auch dieser Beton erwies sich im Rahmen der Auslagerung als dauerhaft über den Beobachtungszeitraum.

Bei der Auslagerung im Bereich XF2 zeigten nur drei Betone, die eine ebenfalls abweichende Zusammensetzung entsprechend DIN 1045-2:2001-07 aufwiesen, Schädigungen. Auch hier erwiesen sich die Betone, die entsprechend der Norm hergestellt worden waren, als dauerhaft. Eine Beurteilung entsprechend des modifizierten CDF-Verfahrens kann im Rahmen dieses Forschungsvorhabens aufgrund der bisher fehlenden Akzeptanzkriterien nicht erfolgen. Es zeigte sich aber, dass eben diese beiden Betone bei der Prüfung eine im Vergleich zu den Betonen mit einer XF2-Zusammensetzung deutlich höhere Abwitterungen während der modifizierten Laborprüfung aufwiesen.

Im Rahmen der Auslagerungen konnte weiterhin eine klare Abhängigkeit der Schädigung zum Auslagerungsort festgestellt werden. So wiesen die Betone, die in Meschede teilweise nur geringe Schädigungen aufwiesen, deutliche Schädigungen bei der Auslagerung in Farchant auf. Dies bestätigt, dass trotz einer in etwa gleichen Anzahl an Frosttagen mit Niederschlag der Temperaturhub während dieser Tage als maßgebend anzusehen ist.

Interessant ist weiterhin, dass bei den Probekörpern Schädigungen festgestellt wurden, obwohl im Rahmen der Multiringelektrodenmessung deutlich höhere Widerstände ermittelt wurden, als dies selbst bei der kapillaren Sättigung der Fall war. Zu erwarten wäre gewesen, dass aufgrund des dadurch geringeren Feuchtegehaltes keine Schädigung statt findet. Dies lässt den Schluss zu, dass hier die kritische Sättigung nur in der äußersten Randzone der Betone erreicht wird, die durch die Multiringelektrode, die den integralen Wert in einer Schicht bis zu 8 mm ermittelt, nicht

direkt messbar ist. Durch den starken Feuchtegradienten, der sich damit einstellt, erfolgt eine Schädigung nur in der obersten Randzone. Im Laborversuch ist aufgrund der lang andauernden Sättigung und der nicht gegebenen Möglichkeit des Trocknens sowie den deutlich größeren Temperaturunterschieden zwischen Minimal- und Maximaltemperatur eine deutlich tiefere Randschicht gesättigt. Dies zeigt sich einerseits in der Messbarkeit des abfallenden Widerstandes mit Hilfe der Multiringelektrode sowie auch in der dadurch bedingten größeren Schädigungsrate während der Frost-Tausalz-Prüfung.

Dies bedeutet, dass im Laborversuch alleine schon durch die hohe und klar definierte Sättigung eine höhere Schädigung erreicht wird. Bezogen auf den Beton in der Praxis ist so eine auf der sicheren Seite liegende Aussage anhand von Akzeptanzkriterien möglich. Die tatsächliche Schädigung am Bauwerk stellt sich dann aber neben anderen Einflüssen, wie zum Beispiel der Minimaltemperatur, aufgrund des geringeren Risikos des Erreichens der kritischen Sättigung niedriger ein. Die Tendenz des Schädigungsgrades ist aber aufgrund der gleichen Schädigungsmechanismen im Labortest sowie in der Praxis identisch.

Insgesamt haben die Untersuchungen gezeigt, dass der Frost-Tausalz-Widerstand aller Betone zuverlässig durch das CDF-Verfahren beschrieben werden kann. Für den Bereich der Betone ohne Luftporenbildner für die oder gerade nicht mehr für die Expositionsklasse XF2, die im CDF-Verfahren (Prüfung für Expositionsklasse XF4) eine schnelle Schädigung auch schon in den ersten Wechsellagen aufwies, ist eine differenzierte Einteilung durch eine im modifizierten CDF-Verfahren (Prüfverfahren für XF2) langsamer ablaufende Schädigung gegeben. Anhand dieser beiden Verfahren konnte eine gute Korrelation zwischen der Schädigung im Labor und der Schädigung während der Praxislagerung ermittelt werden. Über ein Abnahmekriterium sowie über die Anzahl der Frosttauwechsel bis zu Erreichen des Abnahmekriteriums konnte aufgrund der geringen Datenbasis der vorliegenden Untersuchungen noch keine abschließende Aussage getroffen werden.

10 Fazit der Untersuchungen

Ziel des Forschungsvorhabens war es ein Laborprüfverfahren zu entwickeln, das einem abgeschwächten Frost-Tausalzangriff gemäß XF2 Exposition gerecht wird und eine Beurteilung des Frost-Tausalzwiderstandes bei mäßiger Sättigung zulässt. Damit sollen zukünftig Betonmischungen sowie deren Ausgangsstoffe vor einem Einsatz in der Praxis zusätzlich zum derzeit normativ geregelten design concepts auf ihre Eignung hinsichtlich der Umweltklasse XF2 beurteilt werden. Ausgangsbasis für dieses Verfahren war der CDF-Test, der sich für die Überprüfung des Frost-Tausalzwiderstandes von Beton unter XF4 Angriff bewährt hat.

Zur Anpassung des CDF-Verfahrens an die veränderten Randbedingungen einer XF2-Exposition wurden umfangreiche Untersuchungen am IBPM der Universität Duisburg-Essen zur Prüfmethodik durchgeführt. Parallel dazu erfolgten Praxisversuche an ausgelagerten Proben des cbm der TU München, deren Ergebnisse abschließend mittels Laboruntersuchungen verglichen werden sollten. Die Modifikationen des CDF-Prüfverfahrens teilten sich in drei Versuchsreihen auf, innerhalb derer verschiedene Parameter wie die Minimaltemperatur, die NaCl-Konzentration, die Vorlagerungsart und –dauer variiert wurden. Die Ergebnisse verdeutlichen, dass sich über die Einstellung eines mäßigeren Feuchtegehaltes bzw. Sättigungsgrades in der Laborprüfung, was auch prüftechnisch grundsätzlich schwer zu realisieren ist, eine Beurteilung des Widerstandes gegenüber einer XF2-Exposition nicht eindeutig vornehmen lässt. Hierbei ist der Zeitfaktor d.h. die Sättigungsgeschwindigkeit von entscheidender Bedeutung. Sie gibt darüber Aufschluss, wie lange ein Beton in der Praxis einen XF2-Angriff übersteht, bevor dieser eine kritische Sättigung erreicht. Es stellt sich weniger die Frage, wo die kritische Sättigung eines Betons liegt, sondern vielmehr, wann diese erreicht wird. Ausgehend von der Sättigungsgeschwindigkeit, die bei XF2 geeigneten Betonen infolge dieses abgeschwächten Angriffs entsprechend reduziert ist, sollte dann zwischen den verschiedenen Betonqualitäten für XF2 unterschieden werden können.

Die im Rahmen der Modifizierung des CDF-Prüfverfahrens gewonnenen Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass in erster Linie ein Anheben der Minimaltemperatur zu einer deutlich verlangsamten Saugrate führt und damit ein geeignetes Mittel zur Simulation eines abgeschwächten Frost-Tausalzangriffes darstellt. Die Variationen der NaCl-Konzentration führten zwar zu unterschiedlichen Schädigungsgraden, allerdings waren die verschiedenen Betonqualitäten bei einer 3%igen NaCl-Lösung in Kombination mit einer Minimaltemperatur von -10°C ausreichend gut zu unterscheiden, so dass hier keine Anpassung erforderlich ist. Zudem zeigte sich eine ausreichend hohe Differenzierungsmöglichkeit nach bereits 14 Frost-Tau-Wechseln, was die Prüfdauer signifikant verkürzen und damit einen enormen Vorteil hinsichtlich des

Prüfaufwandes darstellen würde. Variationen der Nachbehandlung, Dauer der Vorsättigung oder Wechsellagerung waren dagegen für die Anpassung des Prüfverfahrens an eine XF2-Exposition nicht zielführend.

Die Ergebnisse belegen, dass die Kombination dieser drei Parameter – Anheben der Minimaltemperatur, 3%ige NaCl-Lösung, Verkürzen der Prüfdauer – das Prüfverfahren CDF für XF4 Betone auf die Erfordernisse der XF2-Exposition abschwächt. Es lässt bei ansonsten konstanten Randbedingungen, wie die Prüfanordnung, Prüftechnik sowie Messmethodik der Prüfparameter, eine ausreichende Differenzierung von Betonen, die sich bei dem herkömmlichen CDF-Test bewährt haben und durch zahlreiche Ringversuche bestätigt wurden, zu.

Den vierten Parameter stellt die Anpassung des Abnahmekriteriums dar, d.h. die maximal zulässige Abwitterungsmenge z.B. nach 14 FTW. Die Abwitterungsmenge konnte im Rahmen dieser Untersuchungen aufgrund der noch zu geringen Datenmenge nicht festgelegt werden. Die Prüfparameter wurden aber so gewählt, dass das Kriterium im statistisch abgesicherten, günstigen Bereich zwischen 1000 g/m² und 1800 g/m² liegen wird. Dies wird durch die bisher getesteten Betone bestätigt. Das Programm umfasste Betone, die nach dem Entwurfskonzept sowohl XF2 erfüllten als auch verletzten. Ein allgemein gültiger Grenzwert ist aber auf dieser Basis nur mit erhöhtem Risiko definierbar. Daher lässt sich mit den bisherigen Ergebnissen eine Anpassung der Prüfrandbedingungen an eine XF2-Simulation vornehmen, nicht aber die Festlegung einer maximal zulässigen Abwitterungsmenge nach den nun vorgeschlagenen 14 FTW. Hierfür sind weitere Untersuchungen nötig.

Im Rahmen der Untersuchungen am cbm der TU München wurden Betone hinsichtlich ihres Verhaltens im Bereich der Expositionsklassen XF2 und XF4 geprüft. Dabei wurden Betone hergestellt, die aufgrund ihrer Zusammensetzung für die Klassen XF4 und XF2 bzw. für geringere Klassen als XF2 geeignet sind. Diese wurden durch Untersuchungen im Labor als auch durch Auslagerungsversuche beurteilt. Bei der Bestimmung des Feuchtegehaltes der ausgelagerten Probekörper war es aufgrund der messtechnischen Möglichkeiten sowie der klimatischen Randbedingungen nicht möglich, eine Aufsättigung der Betone über mehrere Winter hinweg nachzuweisen. Dabei ist zu beachten, dass die Sättigung aus versuchstechnischen Gründen nur für den gesamten Probekörper bestimmt werden konnte und nicht für die wenigen Millimeter der äußeren, gefährdeten Schicht. Die anhand der Auslagerung gewonnenen Ergebnisse lassen unter den gewählten Randbedingungen bislang den Schluss zu, dass eine Aufsättigung der Randschicht innerhalb eines Winters stattfindet und nicht über mehreren Winterperioden hinweg.

Aufgrund der ermittelten Feuchtedaten lässt sich vermuten, dass eine Schädigung über die verschiedenen Winterperioden, natürlich in Abhängigkeit der tatsächlichen Temperatur- und Feuchtebedingungen, kumulativ zu sehen ist. Die beobachteten

Schäden sind auf eine lokale Übersättigung der äußersten Randzone zurückzuführen, die jedoch in den hier durchgeführten Untersuchungen nicht durch Wägung des gesamten Probekörpers bzw. Messung mit der Multiringelektrode erfasst werden konnte. Die Aufsättigung des Zementsteingefüges erfolgt insbesondere bei realen Bauteilen aufgrund der geänderten thermischen Randbedingungen und des damit verbundenen dynamischeren Prozesses scheinbar in einer geringeren Schichtdicke, als dies beim CDF-Verfahren an Laborproben der Fall ist. Hieraus resultieren bei ähnlicher Anzahl an Frost-Tau-Wechseln geringere Schädigungen an der Bauteiloberfläche.

Dennoch erwies sich die Korrelation der Schädigung im Labortest und in der Praxis als sehr gut. So stimmten sowohl der im Labor beobachtete Trend für das modifizierte Verfahren zur Einordnung von Betonen für die Expositionsklasse XF2 als auch das etablierte CDF-Verfahren für Betone der Expositionsklasse XF4 mit den an den ausgelagerten Probekörpern festgestellten Schädigungen gut überein. Anhand des allgemein anerkannten Akzeptanzkriteriums von 1.500 g/m^2 nach 28 Frost-Tau-Wechseln war für den CDF-Test eine zielsichere Unterscheidung von XF4-beständigen und unbeständigen Betonen möglich.

Ebenso kann der hier beobachtete Trend für die Schlussfolgerung herangezogen werden, dass der modifizierte CDF-Test mit einer reduzierten Prüfdauer von 14 Frost-Tau-Wechseln und einer Minimaltemperatur von -10°C das Verhalten von XF2 Betonen praxisgerechter widerspiegelt als es beim herkömmlichen CDF-Test der Fall ist und als es eine rein deskriptive Beschreibung zulässt.

11 Literatur







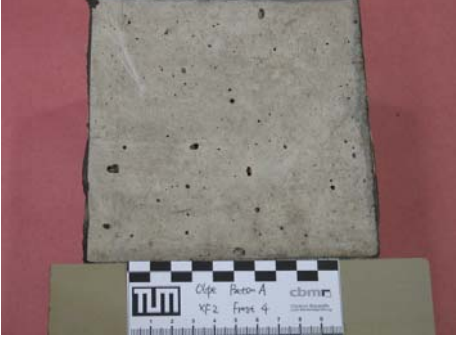



- 1 Auberg, Rainer: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton mit dem CDF- und CIF-Test. Dissertation im Fachbereich Bauwesen der Universität Essen. Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft Heft 6, ISBN 3-8265-4716-0, Shaker Verlag Aachen 1998.
- 2 Badelt, H.; Götzfried, F.: Wirksamkeit verschiedener Tausalze; Beitrag in Straßenverkehrstechnik; Oktober 2003
- 3 Berndt, O.; Wirtz, H.; Müller, W.: Versuche über den elektrischen Widerstand von unbewehrtem Beton; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 6; 1911
- 4 Catharin, P.; Federspiel, H.: Elektrische Leitfähigkeit des Betons; Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut der österreichischen Zementfabrikanten; Heft 10; 1972
- 5 DAfStb Unterausschuss Frost: Sachstandsbericht „Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse“, DAfStb Heft 560, 2005
- 6 Dauberschmidt, C.; Harnisch, J.: Messung des Wassergehaltes von Beton mit Hilfe nachträglich eingebauter Multiringelektroden; Kurzbericht Nr. 16 (2003); ibac der RWTH Aachen; Aachen 2003
- 7 DIN 1045-2: 2001-07: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton - Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2001
- 8 DIN EN 12350-4: 2000-06: Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß; Deutsche Fassung EN 12350-5: 1999; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2000
- 9 DIN EN 12350-5: 2000-06: Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß; Deutsche Fassung EN 12350-5:1999; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2000
- 10 DIN EN 12350-6: 2000-06: Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonroh-dichte; Deutsche Fassung EN 12350-6:1999; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2000
- 11 DIN EN 12350-7: 2000-11: Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Luftporengehalte, Druckverfahren; Deutsche Fassung EN 12350-7:2000; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2000
- 12 DIN EN 12390-2: 2001-06: Prüfung von Festbeton - Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen; Deutsche Fassung EN 12390-2: 2000; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2001











- 13 DIN EN 12390-3:2002-4: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2001; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2002
- 14 DIN EN 12390-9: 2002-05: Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz widerstand; Abwitterung; Deutsche Fassung prEN 12390-9: 2002; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2002
- 15 DIN EN 480-11: 2005-03: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel - Prüfverfahren - Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton; Deutsche Fassung prEN 480-11: 2005; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2005
- 16 DIN-Fachbericht 100: Beton – Zusammenstellung von DIN EN 206-1 und DIN 1045-2; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2001
- 17 Efes, Y.: Porengrößenverteilung von Mörteln nach Lagerung im Wasser und in einer Chloridlösung; Cement and Concrete Research Vol. 10; S. 231 – 242; 1980
- 18 Ellkey, W.; Sellevold, E.J.: Electrical resistivity of concrete; Norwegian Road Research Laboratory, 1995
- 19 Fagerlund, R.F.: Freeze-ThawResistance of High-Performance Concrete; 6th International Symposium on High Strength/High Performance Concrete, Leipzig 2002
- 20 Fagerlund, R.F.: Frost attack as a moisture mechanics problem, RILEM Workshop Universität Essen, S. 23-37, 1997
- 21 ISO 5725 Teil 1 bis 6: Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results.
- 22 Johnston, J.; Grove, C.: The solubility of NaCl, 1931
- 23 Lay, S.: Abschätzung der Wahrscheinlichkeit tausalzinduzierter Bewehrungskorrosion – Baustein eines Systems zum Lebenszyklusmanagement von Stahlbetonbauwerken, Dissertation, Lehrstuhl für Baustoffkunde und Werkstoffprüfung, TU-München, März 2006
- 24 Lück, W.: Feuchtigkeit, Grundlagen Messen Regeln, Oldenburg, 1963
- 25 Ludwig, H.-M.: Zur Rolle der Phasenumwandlungen bei der Frost- und Frost-Tausalz-Belastung von Beton; Dissertation an der Fakultät Bauingenieurwesen der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar; Eigenverlag; Weimar 1996
- 26 Lunk, P.: Kapillares Eindringen von Wasser und Salzlösungen in Beton; Building Materials Report 8; Fraunhofer Verlag; 1997











- 27 Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ (BAW Merkblatt „Frostprüfung“) Dezember 2004; Bundesanstalt für Wasserbau; Eigenverlag; Karlsruhe, Hamburg, Ilmenau 2004
- 28 Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton, Ausgabe 2004; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonstraßen; Eigenverlag; Köln 2004
- 29 Nikkanen, P.: On the electrical properties of concrete; The State Institute for Technical Research; Helsinki 1962
- 30 Palecki, S.: Hochleistungsbeton unter Frost-Tau-Wechselbelastung – Schädigungs- und Transportmechanismen, Dissertation an der Universität Duisburg-Essen, Cuvillier Verlag Göttingen, 2005
- 31 Podvalnyi, A.M.: Phenomenological aspect of concrete durability theory; Materials and Structure; Heft 9; S. 151 – 162; 1976
- 32 Powers T.C.: Resistance of concrete to frost at early ages; Proceedings RILEM Synopsium Winter Concreting; pp. 1-46; Copenhagen 1956
- 33 Raupach, M.: Zur chlorinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl im Beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (Hrsg.), Heft 433: Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1992
- 34 Raupach, M.; Dauberschmidt, C.; Warkus, J.: Bestimmung der Feuchteverteilung in zementösen Baustoffen mit Einbausensoren; Soil Moisture Group der Universität Karlsruhe; In: Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis, Bauwesen-Geotechnik-Umwelttechnik; Kolloquium mit Workshop; Karlsruhe 2003
- 35 RILEM TC 117 IDC, Setzer, M.J.: CIF-Test Test method of frost resistance of concrete, (Capillary Suction, Internal damage and Freeze thaw Test), Reference method and alternative methods A and B. Materials and Structures Vol. 34 (2001) pp 515-525
- 36 RILEM TC 176-IDC, M.J. Setzer, P. Heine, S. Kasperek, S. Palecki, R. Auberg, V. Feldrappe, E. Siebel: Final Recommendation of RILEM TC 176-IDC ‚Internal Damage of Concrete due to frost action‘ Test methods of frost resistance of concrete: CIF-Test: Capillary suction, internal damage and freeze thaw test) – Reference method and alternative methods A and B. Materials and Structures, Vol. 37 – No 274 (12.2004) p. 742-753
- 37 Rösli, A.; Harnik, A.B.: Zur Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton; Schweizer Ingenieur und Architekt; S. 929 – 934; 1979











- 38 Rucker, P.; Beddoe, R., Schießl, P.: Wasser- und Salzhushalt im Gefüge zementgebundener Baustoffe – Modellierung der auftretenden Mechanismen; Beton- und Stahlbetonbau 101; Heft 6/2006; Ernst und Sohn Verlag GmbH & Co. KG; Berlin 2006
- 39 Schießl, P.; Souchon, T.; Breit, W.: Berechnungsmodell zur Bestimmung von Feuchtigkeitsgehalten aus Widerstandswerten der Multi-Ring-Elektrode ermittelt in der Betonrandzone mittels Einbausensoren. Abschlussbericht F 538; Aachen 1997
- 40 Schulte, Ch.; Mader, H.; Wittmann, F.H.: Elektrische Leitfähigkeit des Zementsteins bei unterschiedlichem Feuchtigkeitsgehalt; Cement and Concrete Research; Vol. 8; S. 359 □ 368; 1978
- 41 Setzer, M.J., Janssen, D.J., Fagerlund, G.: RILEM TC 117 FDC: CDF Test - Test method for the freeze-thaw resistance of concrete - tests with sodium chloride solution (CDF). RILEM Recommendation TC117-FDC: Freeze-thaw and de-icing resistance of concrete. Materials and Structures Vol. 29 (1996) 523-528
- 42 Setzer, M.J.; Auberg, R.: CIF-Test - Prüfverfahren des Frostwiderstands von Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 64 (4/1998), 94-105.
- 43 Setzer, M.J.; Auberg, R. Hartmann, V.: Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Transportbeton, Forschungsbericht aus dem Fachbereich Bauwesen, Universität Duisburg-Essen, Heft 62, 1994
- 44 Setzer, M.J.; Hartmann, V.: CDF-Test – Prüfvorschrift. Betonwerk + Fertigteil-Technik, 57 (9/1991), 83-86.
- 45 Setzer, M. J.: Die Mikroislinsenpumpe – Eine neue Sicht bei Frostangriff und Frostprüfung ibausil – 15. Intern. Baustofftagung, Weimar 2003. p. 2-1321 - 2-1338. Bauhaus Univ. Weimar (2003)
- 46 Springenschmid, R.: Grundlagen und Praxis der Herstellung und Überwachung von Luftporenbeton; Zement und Beton; Heft 1 S 19 – 25; 1969
- 47 Springenschmid, R: Anleitung zur Bestimmung des Chloridgehaltes von Beton, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 401, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 1989, ISBN 3-410-65601-4
- 48 Stark, J.; Wicht, B.: Dauerhaftigkeit von Beton; Schriften der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar; Heft 100; Weimar 1995
- 49 Straub, F.: Physikalische Messungen an Zementstein bei tiefen Temperaturen; Bericht der Abteilung Werkstoffphysik Nr. 7; TU München; 1975











- 50 Wenger, B.; Harnik, A.B.: Temperaturmessungen in Straßenbelägen. Straße und Verkehr 63 (1977) H.1; S 427 – 429
- 51 ZTV Beton – StB 01: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton; Ausgabe 2001; FGSV Verlag GmbH; Köln 2001
- 52 ZTV-ING: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten; Verkehrsblatt-Sammlung Nr. S 1056; Verkehrsblatt-Verlag Borgmann GmbH & Co KG; Dortmund 2003
- 53 ZTV-W LB 219: Zusätzlich technische Vertragsbedingungen - Wasserbau für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken, 1997. mit Verweis auf RILEM Draft Recommendation CF-Test von 1995.











XF 2: Beton A (CEM I 32,5 R; w/z = 0,50, kein LP)	
Auslagerungsort Meschede	Auslagerungsort Farchant
	
	
	
	
	











XF2: Beton B (CEM I 32,5 R; w/z = 0,60; kein LP)	
Auslagerungsort Meschede	Auslagerungsort Farchant
	
	
	
	
	











XF2: Beton C (CEM I 32,5 R; w/z = 0,70; kein LP)	
Auslagerungsort Meschede	Auslagerungsort Farchant
	
	
	
	
	











XF2: Beton E (CEM I 32,5 R; w/z = 0,60; LP)	
Auslagerungsort Meschede	Auslagerungsort Farchant
	
	
	
	
	











XF2: Beton F (CEM II A-LL 32,5 R; w/z = 0,50; kein LP)	
Auslagerungsort Meschede	Auslagerungsort Farchant
	
	
	
	
	

XF2: Beton G (CEM II A-LL 32,5 R; w/z = 0,60; kein LP)	
Auslagerungsort Meschede	Auslagerungsort Farchant
 <p>Olpa Beton G cbmm XF2 PK1</p>	 <p>Farchant Beton G cbmm XF2 PK6</p>
 <p>Olpa Beton G cbmm XF2 PK2</p>	 <p>Farchant Beton G cbmm XF2 PK7</p>
 <p>Olpa Beton G cbmm XF2 PK3</p>	 <p>Farchant Beton G cbmm XF2 PK8</p>
 <p>Olpa Beton G cbmm XF2 PK4</p>	 <p>Farchant Beton G cbmm XF2 PK9</p>
 <p>Olpa Beton G cbmm XF2 PK5</p>	 <p>Farchant Beton G cbmm XF2 PK10</p>

XF2: Beton H (CEM II A-LL 32,5 R; w/z = 0,50; LP)	
Auslagerungsort Meschede	Auslagerungsort Farchant
	
	
	
	
	

XF4: Beton A (CEM I 32,5 R; w/z = 0,50; kein LP)	
Auslagerungsort Meschede	Auslagerungsort Farchant
 <p>cfpe Beton A cbmm XF4 Frost 6</p>	 <p>Farchant Beton A2 cbmm XF4 PK6</p>
 <p>cfpe Beton A cbmm XF4 Frost 7</p>	 <p>Farchant Beton A2 cbmm XF4 PK7</p>
 <p>cfpe Beton A cbmm XF4 Frost 8</p>	 <p>Farchant Beton A2 cbmm XF4 PK8</p>
 <p>cfpe Beton A cbmm XF4 Frost 9</p>	 <p>Farchant Beton A2 cbmm XF4 PK9</p>
 <p>cfpe Beton A cbmm XF4 Frost 10</p>	 <p>Farchant Beton A2 cbmm XF4 PK10</p>

XF4: Beton D (CEM I 32,5 R; w/z = 0,50; LP)	
Auslagerungsort Meschede	Auslagerungsort Farchant
 <p>cfp Beton D XF4 ccf-1 cbmr</p>	 <p>Farchant Beton D XF4 PE6 cbmr</p>
 <p>cfp Beton D XF4 ccf-2 cbmr</p>	 <p>Farchant Beton D XF4 PE5 cbmr</p>
 <p>cfp Beton D XF4 ccf-3 cbmr</p>	 <p>Farchant Beton D XF4 PE4 cbmr</p>
 <p>cfp Beton D XF4 ccf-4 cbmr</p>	 <p>Farchant Beton D XF4 PE3 cbmr</p>
 <p>cfp Beton D XF4 ccf-5 cbmr</p>	 <p>Farchant Beton D XF4 PE2 cbmr</p>

XF4: Beton E (CEM I 32,5 R; w/z = 0,60; LP)	
Auslagerungsort Meschede	Auslagerungsort Farchant
	
	
	
	
	

XF4: Beton F (CEM II A-LL 32,5 R; w/z = 0,50; kein LP)	
Auslagerungsort Meschede	Auslagerungsort Farchant

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

1993

- B 1: Realkalisierung karbonatisierter Betonrandzonen
Budnik, Laakkonen, Maaß, Großmann vergriffen
- B 2: Untersuchungen an Fertigteilbrücken BT 70/BT 700
Haser kostenlos
- B 3: Temperaturunterschiede an Betonbrücken
Knabenschuh vergriffen
- B 4: Merkblatt zur Entnahme repräsentativer Strahlschuttproben
MES-93 € 9,00

1994

- B 5: Spezielle Probleme bei Brückenbauwerken in den neuen
Bundesländern
von H. Hase, R. Kaschner
Teil 1: Nachrechnung von Gewölbebrücken
Teil 2: Schubsicherung bei Fertigteilträgern BT 70 und BT 50
Haser, Kaschner € 11,50

1995

- B 6: Zur Berechnung von Platten mit schwacher Querbewehrung
Kaschner € 11,50
- B 7: Erprobung von dichten lärmindernden Fahrbelägen für
Brücken
Sczyslo € 12,50
- B 8: Untersuchungen am Brückenbelag einer orthotropen Fahrbelag-
platte
Krieger, Rat € 17,50
- B 9: Anwendung von zerstörungsfreien Prüfmethode bei Beton-
brücken
Krieger € 13,00
- B 10: Langzeituntersuchungen von Hydrophobierungsmitteln
Maaß, Krieger € 12,50

1996

- B 11: Fahrbeläge auf Sohlen von Trogbauwerken
Wruck € 12,00
- B 12: Temperaturmessungen bei der Verbreiterung der Rodenkir-
chener Brücke
Goebel € 15,50
- B 13: Strukturanalyse von Beton
Gatz, Gusia € 11,00

1997

- B 14: Verhalten von Fahrbelägen aus Asphalt infolge Ho-
rizontallasten
Krieger, Rath € 16,00
- B 15: Temperaturbeanspruchung im Beton und Betonersatz beim
Einbau von Abdichtungen
Großmann, Budnik, Maaß € 14,50
- B 16: Seilverfüllmittel – Mechanische Randbedingungen für Brük-
kenseile
Eilers, Hemmert-Halswick € 27,50
- B 17: Bohrverfahren zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe
und des Chloridgehaltes von Beton
Gatz, Gusia, Kuhl € 14,00

1998

- B 18: Erprobung und Bewertung zerstörungsfreier Prüfmethode
für Betonbrücken
Krieger € 16,50
- B 19: Untersuchung von unbelasteten und künstlich belasteten Be-
schichtungen
Schröder € 11,00
- B 20: Reaktionsharzgebundene Dünnbeläge auf Stahl
Eilers, Ritter € 12,50
- B 21: Windlasten für Brücken nach ENV 1991-3
Krieger € 10,50

1999

- B 22: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Inge-
nieurbauwerken
Haardt € 11,50
- B 23: Bewertung und Oberflächenvorbereitung schwieriger Un-
tergründe
Schröder, Sczyslo € 11,00
- B 24: Erarbeitung einer ZTV für reaktionsharzgebundene Dünn-
beläge auf Stahl
Eilers, Stoll € 11,00
- B 25: Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von
Brücken- und Ingenieurbauwerken
Haardt € 12,50
- B 26: Einsatzmöglichkeiten von Kletterrobotern bei der Bauwerks-
prüfung
Krieger, Rath, Berthold € 10,50
- B 27: Dynamische Untersuchungen an reaktionsharzgebundenen
Dünnbelägen
Eilers, Ritter, Stoll € 11,00

2000

- B 28: Erfassung und Bewertung von reaktionsharzgebundenen
Dünnbelägen auf Stahl
Eilers € 11,00
- B 29: Ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung der Karbo-
natisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton
Gatz, Quaas € 12,00
- B 30: Materialkonzepte, Herstellungs- und Prüfverfahren für elutions-
arme Spritzbetone
Heimbecher € 11,00
- B 31: Verträglichkeit von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen
mit Abdichtungssystemen nach den ZTV-BEL-ST
Eilers, Stoll € 10,50
- B 32: Das Programm ISOCORRAG: Ermittlung von Korrosivitäts-
kategorien aus Massenverlusten
Schröder € 11,50
- B 33: Bewehrung von Belägen auf Stahlbrücken mit orthotropen
Fahrbelagplatten
Eilers, Sczyslo € 17,00
- B 34: Neue reaktionsharzgebundene Dünnbeläge als Fahrbelag-
beläge auf einem D-Brücken-Gerät
Eilers, Ritter € 13,00

2002

- B 35: Bewehrung von Brückenbelägen auf Betonbauwerken
Wruck € 11,50
- B 36: Fahrbeläge aus Asphalt
Wruck € 11,00
- B 37: Messung der Hydrophobierungsqualität
Hörner, von Witzhausen, Gatz € 11,00
- B 38: Materialtechnische Untersuchungen beim Abbruch der Tal-
brücke Haiger
Krause, Wiggenhauser, Krieger € 17,00

B 39: Bewegungen von Randfugen auf Brücken
Eilers, Wruck, Quaas € 13,00

2003

B 40: Schutzmaßnahmen gegen Graffiti
von Weschpfennig € 11,50

B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahr-
tafeln beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht
Eilers, Küchler, Quaas € 12,50

B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Von A. Städing, T. Krockner € 12,00

B 43: Entwicklung eines Bauwerks Management-Systems für das
deutsche Fernstraßennetz – Stufen 1 und 2
Haardt € 13,50

B 44: Untersuchungen an Fahrbahnübergängen zur Lärminderung
Hemmer-Halswick, Ullrich € 12,50

B 45: Stahlbrücken – Schäden – wetterfeste Stähle Seile
Teil 1: Dokumentation über Schäden an Stahlbrücken
Teil 2: Dokumentation und Erfahrungssammlung mit Brücken aus
wetterfesten Stählen
Teil 3: Erfahrungssammlung über die Dauerhaftigkeit von Brücken-
seilen und -kabeln
Hemmer-Halswick € 13,00

2004

B 46: Einsatzbereiche endgültiger Spritzbetonkonstruktionen im
Tunnelbau
Heimbecher, Decker, Faust € 12,50

2005

B 47: Gussasphaltbeläge auf Stahlbrücken
Steinauer, Scharnigg € 13,50

2006

B 48: Scannende Verfahren der zerstörungsfreien Prüfung von
Brückenbauwerken
Holst, Streicher, Gardei, Kohl, Wöstmann,
Wiggenhauser € 15,00

B 49: Einfluss der Betonoberflächenvorbereitung auf die Haf-
tung von Epoxidharz
Raupach, Rößler € 13,50

B 50: Entwicklung eines Bauwerks-Management-Systems für
das deutsche Fernstraßennetz, Stufe 3
Holst € 13,50

B 51: Hydrophobierungsqualität von flüssigen und pastösen
Hydrophobierungsmitteln
Panzer, Hörner, Kropf € 12,50

B 52: Brückenseile mit Galfan-Überszug – Untersuchung der
Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen
Friedrich, Staack in Vorbereitung

B 53: Verwendung von selbstverdichtendem Beton (SVB) im
Brücken- und Ingenieurbau an Bundesfernstraßen
Tauscher € 14,50

B 54: Nachweis des Erfolges von Injektionsmaßnahmen zur
Mängelbeseitigung bei Minderdicken von Tunnelinnenschalen
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Rath, Berthold, Lähner € 12,50

2007

B 55: Überprüfung des Georadarverfahrens in Kombination
mit magnetischen Verfahren zur Zustandsbewertung von
Brückenfahrbahnplatten aus Beton mit Belagsaufbau
Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Krause, Rath, Sawade, Dumat € 14,50

B 55: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der
Expositionsklasse XF2

Dieser Bericht liegt **nur** in digitaler Form vor und kann kosten-
pflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes € 19,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

Wirtschaftsverlag NW
Verlag für neue Wissenschaft GmbH
Postfach 10 11 10
D-27511 Bremerhaven
Telefon: (04 71) 9 45 44 - 0
Telefax: (04 71) 9 45 44 77
Email: vertrieb@nw-verlag.de
Internet: www.nw-verlag.de

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.