

UNIVERSITÄT

D U I S B U R G
E S S E N

Mitteilungen
aus dem Institut für
Bauphysik und
Materialwissenschaft

Modifizierter CIF-Test

**Auswirkung gelöster Ionen auf
die Frostschädigung bei reinem Frostangriff**

von
Ivanka Bevanda

Heft 16

Herausgeber: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. Max J. Setzer
Universität Duisburg-Essen



Cuvillier Verlag Göttingen
Internationaler wissenschaftlicher Fachverlag

Universität Duisburg-Essen
Fakultät für Ingenieurwissenschaften / Abteilung Bauwissenschaften
Institut für Materialwissenschaft

Modifizierter CIF-Test

– Auswirkung gelöster Ionen auf die Frostschädigung bei reinem Frostangriff –

Der Fakultät Ingenieurwissenschaften / Abteilung Bauwissenschaften
an der Universität Duisburg-Essen vorgelegte

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor-Ingenieur

von
Dipl.-Ing. Ivanka Bevanda

München 2011

Tag der mündlichen Prüfung	27. April 2010
Referent	Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. Max J. Setzer
Koreferent	Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig
Vorsitzende	Prof. Dr.-Ing. Martina Schnellenbach-Held

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

1. Aufl. - Göttingen : Cuvillier, 2011

Zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2011

978-3-86955-718-2

© CUVILLIER VERLAG, Göttingen 2011

Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen

Telefon: 0551-54724-0

Telefax: 0551-54724-21

www.cuvillier.de

Alle Rechte vorbehalten. Ohne ausdrückliche Genehmigung des Verlages ist es nicht gestattet, das Buch oder Teile daraus auf fotomechanischem Weg (Fotokopie, Mikrokopie) zu vervielfältigen.

1. Auflage, 2011

Gedruckt auf säurefreiem Papier

978-3-86955-718-2

VORWORT DES HERAUSGEBERS

Seit meiner Habilitation 1977 und den Arbeiten am Baustoffinstitut der TU München und dann seit 1987 am Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft der Universität Duisburg-Essen war es eines meiner wesentlichen Forschungsziele, die Mechanismen beim Frost- und Frost-Taumittelangriff besser zu verstehen. Sowohl die Grundlagen auf dem Gebiet der Nanophysik des Betons wie die Umsetzung in die Bau- und Prüfpraxis waren gleichwertig vertreten.

Eine ganze Reihe herausragender Mitarbeiter und Doktoranden haben in diesen Forschungsteams zum großen Erfolg beigetragen. Bei den Grundlagen zum Frostangriff sind u.a. Dr. Stockhausen und Dr. Zech in München und Dr. Xu, Dr. Wowra, Dr. Dahme, Dr. Liebrecht und Dr. Kruschwitz in Essen zu nennen.

Bei der Umsetzung in die Prüfpraxis sind die Arbeiten von Dr. Hartmann (CDF-Test) und Dr. Auberg (CIF-Test und Prüfpräzision beider Verfahren) herausragend. Beide haben auch in den RILEM TCs als Sekretäre maßgeblich mitgewirkt. Frau Dr. Palecki hat die Methodik im Rahmen des EU Projekts CONLIFE auf High-Performance Betone übertragen. Dr. Heine hat den Einfluss des Zuschlags erforscht. Ergänzt wurden diese Arbeiten durch die Forschungsergebnisse im Umfeld von Dr. Badmann, Dr. Lang und Dr. Beddoe in München und Dr. Adolphs, Dr. Keck, Dr. Duckheim, und meinen externen Doktoranden Dr. Klink, Dr. Gräf, Dr. Tauscher und Dr. Molkenthin.

Mit der vorliegenden Dissertation liefert meine letzte Doktorandin Frau Dr. Bevanda einen wichtigen Schlusspunkt der Forschungstätigkeit des Instituts für Bauphysik und Materialwissenschaft der Universität Duisburg-Essen auf dem Gebiet der Frostforschung.

Trotz der intensiven Forschung war ein wichtiger Aspekt noch nicht ausreichend genau untersucht, um damit auch tragfähige Aussagen für eine systematische Frostprüfung zu liefern; nämlich: Wie verändern sehr geringe Ionenkonzentrationen die Abwitterung? Es sind Konzentrationen, wie sie für Regen- Oberflächen- und Trinkwasser charakteristisch sind.

Bereits die Ringversuche des RILEM TCs 176 und vor allem die Messungen in der Arbeit von Dr. Auberg hatten gezeigt, dass schon solch geringe Mengen die Abwitterung dramatisch um ein Vielfaches erhöhen und Prüfergebnisse damit, beim damaligen Wissenstand, unkontrollierbar verfälschen können. Aus diesem Grund hat das RILEM TC für den CIF-Test demineralisiertes Wasser als Prüfmedium vorgeschlagen, wohl wissend, dass damit die Abwitterung deutlich unter den Werten bleibt, die mit "normalem" Wasser gefunden werden. Ziel war es aber, die innere Schädigung korrekt abzubilden, die als gutes Maß für die Schädigung unter XF3 Bedingungen gesehen wurde.

Da wegen des Chromatographieeffekts bereits in mäßigen Tiefen die Zusammensetzung des Porenwassers unabhängig vom Prüfmedium wird, ist für die innere Schädigung diese Wahl nicht wesentlich. Denn der inneren Schädigung geht das Frostsaugen voraus, mit dem die kritische Sättigung für den Frostschaden generiert wird. Es wird durch den instationären Frost-Tau-Wechselangriff aktiviert. Das Frostsaugen wiederum beruht auf der Mikroislinsenpumpe, die im Nano- und Mikrogefüge wirkt. Beides Mikroislinsenpumpe und Chromatographieeffekt beruhen auf den gleichen oberflächenphysikalischen Phänomenen.

Auslagerungsversuche unter reinen XF3 Bedingungen in SFB 398/Teilprojekt A11 (M. J. Setzer, persönl. Mitteilung) haben gezeigt, dass die Abwitterung, die sehr wohl von der Prüflösung abhängt, auch unter realen Bedingungen des reinen Frostangriffs keinesfalls vernachlässigt werden darf und, dass, wie schon aus der übrigen Forschung des Instituts bekannt, innere Schädigung und Abwitterung nicht strikt korreliert sind. Die Auslagerungsergebnisse an zwei Orten - Meißen und Holzkirchen - und in Wintern mit unterschiedlicher Härte brachten einerseits eine qualitativ reproduzierbare Reihung der verschiedenen Betone mit unterschiedlichen Zementen und wz-Werten. Sie lieferten aber keine quantitativen Ergebnisse, die für ein allgemein gültiges Prüfverfahren erforderlich sind.

Damit ergab sich ein Dilemma: Einerseits wittern Betone unter XF3 Bedingungen signifikant unterschiedlich ab, bei stets gleicher Reihung aber mit unterschiedlichem Niveau je nach Ort und Klima. Andererseits wissen wir, dass schon kleine Änderungen in der Ionenzusammensetzung und vor allem der Konzentration völlig verschiedene Ergebnisse liefern. Schon das unterschiedliche Leitungswasser der RILEM Mitglieder in Zürich, Weimar, Essen, Helsinki und Lund ergab signifikant andere Werte.

Mit den Methoden der makroskopischen Chemie oder Physik lassen sich diese Phänomene nicht erklären, ebenso wenig wie die Mikroislinsenpumpe oder der Chromatographieeffekt. Es wären hierfür umfangreiche Messungen der oberflächenphysikalischen Wechselwirkungen (disjoining pressure) bei der Eisbildung im Nanogefüge des Zementsteins und Betons erforderlich.

Da keine Zeit hierfür war haben sich Frau Bevanda und ich darauf geeinigt, eine systematische und phänomenologische Forschungsarbeit durchzuführen, die allerdings die eigenen Grundlagentenkenntnisse der Nanophysik durchaus berücksichtigt.

Die Ergebnisse dieser Forschung erlauben es, eine Prüfmethode vorzuschlagen, die hinreichend sicher, reproduzierbar und genau ist und die gleichzeitig die Phänomene der Praxis und der Auslagerungsergebnisse ausreichend abbildet.

Die vorliegende Arbeit ist ein wichtiger Meilenstein sowohl für die Prüfpraxis wie für weitere grundlegende Untersuchungen. Auch eine gute Basis für eine Optimierung der Betonrezepturen und eine Einschätzung unterschiedlicher klimatischer Randbedingungen ist damit geschaffen.

Krailling, im März 2011

Univ.-Prof. Dr. Max J. Setzer

VORWORT DER AUTORIN

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft der Universität Duisburg-Essen. Während dieser Tätigkeit bekam ich die Chance, Forschungsprojekte rund um das Thema meiner Dissertation bearbeiten zu können. Die Projekte wurden von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) gefördert. Die Veröffentlichung dieser Arbeit wird vom Förderverein des Instituts für Bauphysik und Materialwissenschaft finanziell unterstützt. Für die finanzielle Beihilfe danke ich der DFG sowie dem Förderverein.

Diese Arbeit wäre sicherlich nicht ohne die Unterstützung einer Vielzahl von Menschen entstanden. Ihnen allen spreche ich an diese Stelle meine Dankbarkeit aus.

Anfangen möchte ich mit meinem Doktorvater Herrn Prof. M. J. Setzer. Ich bedanke mich herzlich für die Möglichkeit bei ihm promovieren zu dürfen, für das entgegengebrachte Vertrauen, die wissenschaftliche Förderung sowie die menschliche Unterstützung. Das alles sehe ich nicht als selbstverständlich an. Es war mir stets eine große Freude und Ehre von ihm lernen zu dürfen.

Herrn Prof. H.-M. Ludwig danke ich herzlich für die Übernahme des zweitens Gutachtens und die damit verbundenen Mühen. Mein weiterer Dank gilt Frau Prof. M. Schnellenbach-Held als Vorsitzenden der Prüfungskommission.

Allen wissenschaftlichen und nichtwissenschaftlichen Mitarbeitern des Instituts möchte ich noch einmal ganz herzlich für die gute Zusammenarbeit und die Unterstützung danken. Das Institutsklima hat stark dazu beigetragen, dass ich mich am Institut immer sehr wohl gefühlt habe. Ohne das Team wäre die Umsetzung dieser Arbeit sowie der ganzen Projekte die ich als wissenschaftliche Mitarbeiterin betreut habe nicht möglich. Ein besonderer Dank an: Herrn P. Dubray und Herrn S. Nawrath für die tatkräftige Hilfe und stetiges Engagement in allen „meinen“ Experimenten; Herrn Dr. H.-J. Keck für die ganze Unterstützung in „verwaltungstechnischen“

Angelegenheiten; insbesondere dafür, dass er immer gesorgt hat, dass meine Vertragsverlängerungen rechtzeitig vorlagen, denn ohne das wäre meine Aufenthalt in Deutschland nicht möglich gewesen; Frau M. Wilkesmann für die ganzen Ratschläge in der Verfassung zahlreicher Texte in der deutschen Sprache. Bedanken möchte ich mich auch bei meinen langjährigen studentischen Hilfskräften Herrn W.Y. Gao und Herrn M. Borgolte für die Unterstützung bei der Durchführung umfangreicher Experimente und Messungen.

Frau Dr. B. Enk, Frau B.-Y. Youn und Frau N. Gharbi danke ich für das Korrekturlesen. Ein besonderes Danke dafür, dass sie alle bereit waren es sehr kurzfristig durchzuführen. Herrn A. Tomičić danke ich für den „Tag und Nacht“-Einsatz bei der technischen Anfertigung dieser Arbeit, ohne ihn als „meinen“ Systemadministrator wäre der Weg sicherlich viel mühsamer gewesen.

Den entscheidenden Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit hat meine Familie geleistet. Meinen Schwestern danke ich, dass sie mich durch Höhen und Tiefen begleitet haben und immer für mich da waren. An dieser Stelle möchte ich besonders meinen Eltern für die Liebe, die Fürsorge und die Unterstützung, mit denen sie mich und meine Schwestern begleiten, danken:

*Draga mama, dragi tata,
bez vas, ja danas ne bi bila ono što jesam. Hvala za sve!*

München, März 2011

Ivanka Bevanda

KURZFASSUNG

Mit jedem Frost-Tau-Wechsel werden ins Betongefüge – infolge der Mikroeispumpe – außen anstehendes Wasser und die darin gelösten Ionen hineingepumpt. Bisher wurde nicht genau genug ermittelt, wie sich eine sehr geringe Ionenkonzentration – wie sie z.B. für Niederschlagswasser u.ä. Oberflächenwasser charakteristisch ist – auf die Frostschädigung auswirkt.

Ziel dieser Arbeit war es, die Auswirkung sehr geringer Ionenkonzentrationen auf die Betonschädigung infolge der reinen Frostbeanspruchung zu untersuchen. Es wurde der Frage nachgegangen, inwieweit sehr geringe Ionenkonzentrationen, die der Prüflösung im CIF-Test beigefügt wurden, die Abwitterung und innere Schädigung beeinflussen und wieweit diese Ergebnisse mit der Praxis von Auslagerungsversuchen korreliert werden können. Damit sollen zusätzliche Daten geliefert werden, um das Prüfverfahren für den reinen Frostangriff bei hoher Sättigung – XF3 noch aussagekräftiger, mit der Praxis korrelierbarer und damit belastbarer zu machen. Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass Ionenkonzentrationen, die noch im Bereich des üblichen Niederschlags- u.ä. Oberflächenwasser liegen, die Abwitterung erheblich erhöhen.

ABSTRACT

With every freeze-thaw cycle, outside standing water and its dissolved ions are pumped into the concrete microstructure as a result of the micro ice pump. It has not yet been fully determined what effect a very small ion concentration – characteristic for rainwater and other surface waters – has on frost damage.

The aim of this work was to examine the effects of a small ion concentration on concrete damage as a result of pure frost attack. The question was pursued to what extent very small ion concentrations, which were added to the test solution in the CIF test, influence the surface scaling and inner damage and the degree these results can be correlated with the practice of field tests. This should provide additional data to make the testing procedure more correlatable and resilient with the practice for pure freeze-thaw attack with high saturation – XF3 being more meaningful. The results introduced here show that ion concentration, still in the area of ordinary rainwater and other surface waters, increases surface scaling significantly.

*Čovječe pazi
da ne ides malen
ispod zvijezda!*

...

*Da ni za čim ne žališ
kad se budeš zadnjim pogledima
rastajo od zvijezda!*

(„Opomena“, Antun Branko Šimić)

*Mensch gib acht
dass du nicht winzig
unter den Sternen wandelst!*

...

*Dass du nichts bereuen musst
wenn du dich mit einem letzten Blick
von den Sternen trennen wirst!*

(„Mahnung“, Antun Branko Šimić)

ZA BAKU IVU I UJAKA MIRKA
(znam da se radujete zajedno sa mnom)

ZA RAJU

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	X
1 Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise	1
1.1 Hintergrund / Motivation	1
1.2 Zielsetzung dieser Arbeit	5
1.3 Vorgehensweise und Versuchsprogramm	6
2 Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton	9
2.1 Schadensbilder	9
2.2 Grundsätzliches zum Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton	13
2.2.1 Gefrierpunktniedrigung, Unterkühlung und Eisbildung	13
2.2.2 Zyklische Frost-Tau-Wechsel-Belastung – Transport- und Schädigungs- mechanismen	15
2.2.2.1 Mikroeislinsen-Modell	17
2.2.3 Aufwendung und Erfahrungen mit dem CIF-Test	22
3 Untersuchung des Frostwiderstandes mittels CIF-Test mit Fokus auf die Prüflö- sung	29
3.1 Sachstand zum Einfluss der Prüflösung im CIF-Test auf den Frostwiderstand . . .	29
3.2 Eigene Laboruntersuchungen und -ergebnisse	33
3.2.1 Untersuchte Betone	33
3.2.1.1 Vorüberlegungen	33
3.2.1.2 Zusammensetzung, Herstellung und Probenpräparation	34
3.2.2 Frostuntersuchung mittels CIF-Test	35
3.2.3 Konzept der „niedrigkonzentrierten“ Prüflösungen	37
3.2.3.1 Ausgangssituation und Anforderungen	37

3.2.3.2	Herstellung der Prüflösungen und Versuchsprogramm	38
3.2.4	Einfluss der Prüflösung auf die Prüfung des Frostwiderstandes	39
3.2.4.1	Einfluss von Prüflösungen in Trinkwasserqualität auf die Frostschädigung	40
3.2.4.2	Einfluss der Äquivalentkonzentration der Prüflösung auf die Frostschädigung	45
3.2.4.3	Auswirkungen auf die innere Schädigung und Feuchteaufnahme	57
3.2.4.4	Einfluss der Ionenart der Prüflösung auf die Frostschädigung . .	60
3.2.5	Folgerungen und Interpretation der Ergebnisse	67
3.2.6	Frostwiderstand nach dem modifizierten CIF-Test	68
3.2.6.1	Einfluss der Zementart	68
3.2.6.2	Einfluss des Prüfalterungseffektes	73
4	Untersuchung des Frostwiderstandes in Praxisversuchen	79
4.1	Sachstand zu Praxisversuchen versus CIF-Test	79
4.2	Eigene Praxisuntersuchungen und -ergebnisse	84
4.2.1	Ausgelagerte Betone und Versuchsanordnung	84
4.2.2	Frostbeanspruchung in situ	87
4.2.3	Frostschädigung in situ	95
4.2.3.1	Äußere Schädigung	95
4.2.3.2	Innere Schädigung und Feuchteaufnahme	100
4.2.3.3	Zusammenfassung der Ergebnisse der Praxisuntersuchungen .	104
4.3	Praxisuntersuchungen im Vergleich zum (modifizierten) CIF-Test	105
5	Bewertung der Prüfergebnisse und Beurteilung des Frostwiderstandes mit dem modifizierten CIF-Test	109
6	Zusammenfassung	115
	Literaturverzeichnis	117
	Abbildungsverzeichnis	125
	Tabellenverzeichnis	131
A	ANHANG	i

Abkürzungsverzeichnis

BAW	Bundesanstalt für Wasserbau
CDF	Capillary suction, De-icing agent and Freeze-thaw test
CF	Capillary suction and Freeze-thaw test
CIF	Capillary suction, Internal damage and Freeze-thaw test
CEM	Zement (Bezeichnung nach DIN EN 197-1)
CEM I	Portlandzement (Bezeichnung nach DIN EN 197-1)
CEM II	Kompositzement (Bezeichnung nach DIN EN 197-1)
CEM III	Hochofenzement (Bezeichnung nach DIN EN 197-1)
CEN	Europäisches Komitee für Normung
CN	Calciumnitrat
CSH	Calciumsilicathydrate
DAfStb	Deutscher Ausschuss für Stahlbeton
DIN	Deutsche Industrienorm
EDL	Elektrische Doppelschicht
EN	Europäische Norm
FA	Flugasche
FTW	Frost-Tau-Wechsel
HS	Hoher Sulfatwiderstand
HSAB	Prinzip der Harten Lewis-Säuren und Lewis-Basen
HOZ	Hochofenzement
HÜS	Hüttensand
LP	Luftporen
M.-%	Massenprozent
NW	Niedrige Hydratationswärme
NA	Niedriger Alkaligehalt
R	Rapid

Fortsetzung auf der nächsten Seite

RDM	Relativer dynamischer Elastizitätsmodul
rel. dyn. E-Modul	Relativer dynamischer Elastizitätsmodul
RGB	Radius-Gefrierpunkt-Beziehung
RILEM	International Union of Laboratories and Experts in Construction Materials, Systems and Structures
SFB	Sonderforschungsbereich
SLGS	Solid-Liquid-Gel-System
TC	Technisches Komitee
US	Ultraschall
VDZ	Verein Deutscher Zementwerke
Vol.-%	Volumenprozent
w/b	Wasserbindemittelwert
w/z-Wert	Wasserzementwert
XF1	Frost ohne Tausalzbelastung, mäßige Wassersättigung (Bezeichnung nach DIN EN 206-1)
XF2	Frost mit Tausalzbelastung, mäßige Wassersättigung (Bezeichnung nach DIN EN 206-1)
XF3	Frost ohne Tausalzbelastung, hohe Wassersättigung (Bezeichnung nach DIN EN 206-1)
XF4	Frost mit Tausalzbelastung, hohe Wassersättigung (Bezeichnung nach DIN EN 206-1)
ZTW	Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen

Kapitel 1

Motivation, Zielsetzung und Vorgehensweise

1.1 Hintergrund / Motivation

Betonaußenbauteile erfahren alljährlich Frostbeanspruchungen die mit Frostscha den resultieren können, welche wiederum die Funktion des Bauteiles sowie deren Standsicherheit beeinträchtigen. Die Frostbeanspruchung, mit/ohne Tausalzbelastung, ist ein dynamischer Prozess, der zugleich ein Transportmechanismus, sowie ein Schadensmechanismus ist. Bedingt durch die Mikroeislin senpumpe (siehe Kapitel 2) wird während eines Frost-Tau-Wechsels externes Wasser eingesaugt; das Betonporengefüge wird gesättigt. Erst nachdem dadurch ein kritischer Sättigungsgrad überschritten worden ist, kann ein Schaden durch die Eisexpansion entstehen. Der kritische Sättigungsgrad ist dadurch gekennzeichnet, dass kein ausreichender Ausweichraum im Betongefüge vorhanden ist, um die Eisdehnung aufzufangen [Fag73]; es bauen sich während des Gefrierens innere Spannungen auf, welche wiederum zu Mikrorissbildung führen. Als Folge treten an Betonbauwerken innere und/oder äußere Schäden auf. Die innere Schädigung ist durch Gefügezerstörung infolge von Mikrorissen gekennzeichnet, welche die mechanischen und physikalischen Eigenschaften des Betonbauwerkes und damit dessen Tragsicherheit beeinflussen. Die äußere Schädigung zeichnet sich durch das Abwittern der Oberfläche – Absanden oder Abschalen des Feinmörtels oder kraterförmige Absparungen über größere Zuschlagskörner aus. Anfangs stellt sie lediglich einen ästhetischen Mangel dar. Anschließend kann aber die oberflächliche Zerstörung zu Einschränkung und Verlust der Funktion des Bauteiles führen, wenngleich die Standsicherheit weiterhin gewährleistet ist (z.B. im Falle von Flughafen-Rollbahnen). Beide Schadensarten hängen, wie bereits berichtet, mit dem kritischen Sättigungsgrad und der Eisexpansion zusammen, dennoch sind sie getrennt zu betrachten, da sie nicht streng korreliert erscheinen. Hinzu kommt, dass gelöste Stoffe die äußere

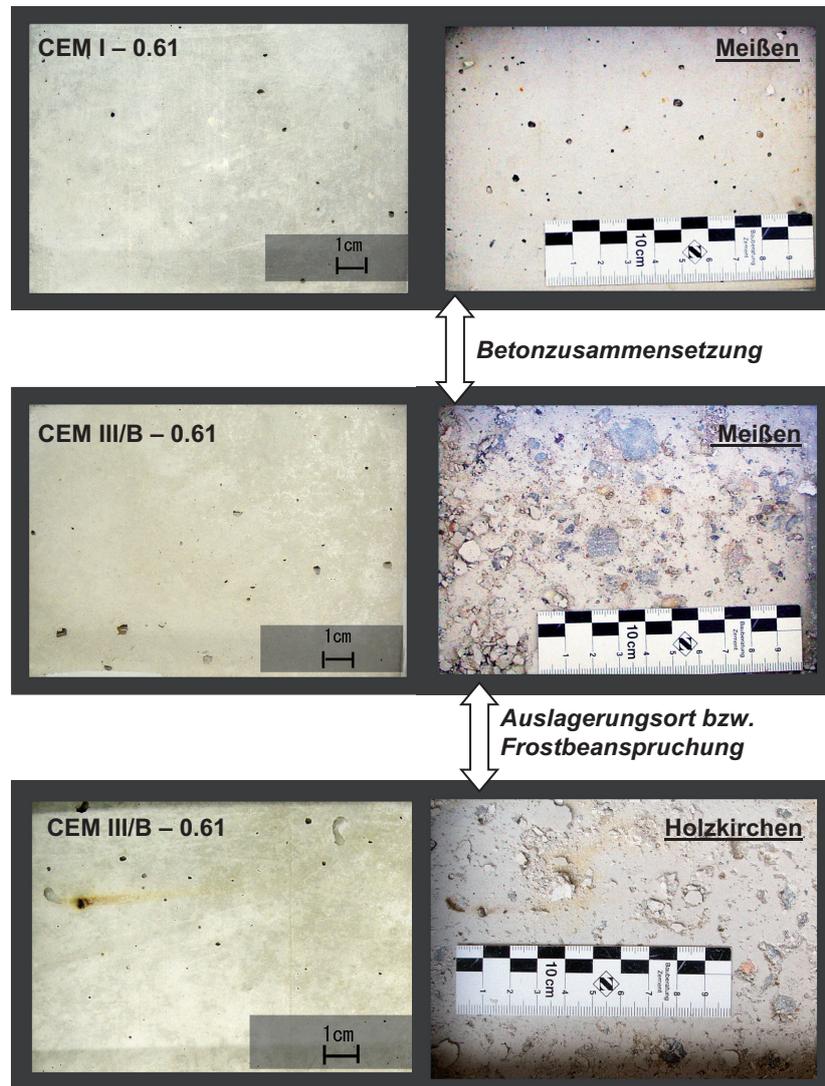


Abbildung 1.1: Äußere Schädigung von Praxisproben nach einem Winter (Winter 05/06) Auslagerung in Meißen und Holzkirchen; links – vor der Auslagerung, Daten aus [Set08].

Schädigung verstärken. Derzeit wird dieser Effekt als maßgeblich beim Frost-Taumittel-Angriff erachtet. In zahlreichen Veröffentlichungen wie z.B. in [LS97] [SKP⁺07] wird die Auswirkung von verschiedenen Taumitteln sowie Taumittelkonzentrationen auf die äußere Schädigung diskutiert. Hauptsächlich wird der Effekt von Konzentrationen über 1 M.-% untersucht. Dagegen ist die Auswirkung von geringen Mengen gelöster Stoffe – wie sie in natürlichen Wässern wie z.B. Niederschlag u.Ä. vorkommen – auf die äußere Schädigung bisher kaum untersucht worden. Untersuchungen im Rahmen des Ringversuches der CEN-Arbeitsgruppe TC 51/WG12 Anfang der 1990-er Jahre gaben erste Hinweise über die Auswirkung sehr geringer Konzentrationen

gelöster Stoffe auf die Abwitterung beim reinen Frostangriff. Die untypische Streuung der Abwitterungsergebnisse im Ringversuch wurde als Anlass genommen, um Untersuchungen mit verschiedenen Leitungswasserqualitäten als Prüflösungen im CF-Test¹ [SJF96] durchzuführen. Diese ergaben im Vergleich zu demineralisiertem Wasser erhöhte Abwitterungsmengen mit steigendem Härtegrad des Wassers [SAL94], siehe dazu Kapitel 3. Da selbst die unterschiedlichen Trinkwasserqualitäten zu signifikanten Unterschieden geführt haben, und da diese Unterschiede nicht eindeutig zuordenbar waren, wird vom RILEM TC 176 IDC für die Recommendation der Frostprüfung CIF-Test² vereinbart, dass demineralisiertes Wasser als Prüflösung verwendet wird; denn es ist an jedem Standort in gleicher Qualität verfügbar [Set09a]. Die reproduzierbare Beurteilung der inneren Schädigung und auch der Oberflächenschädigung (Abwitterung) mittels CIF-Test wird dadurch gewährleistet. Dass demineralisiertes Wasser zugleich die Gesamtabwitterung reduziert, wurde hingenommen; die innere Schädigung wurde bei reinem Frostangriff als der wesentliche Schaden betrachtet.

In Rahmen eigener Feldversuche im Sonderforschungsbereich (SFB) 398/Teilprojekt A11: „Lebensdauerbetrachtung von Beton unter speziellen Umwelteinflüssen wie Frost- und Frost-Tausalz-Beanspruchung“ [BS07] [Set08] konnte an ausgelagerten Betonproben festgestellt werden, dass unter den gegebenen Praxisbedingungen – eingestuft als reiner Frostangriff – eine Unterscheidung der Betonqualitäten anhand der Abwitterung nach nur einem Winter Auslagerung möglich ist, siehe Abbildung 1.1. Die Reihenfolge der Betone mit unterschiedlicher Qualität war an zwei Auslagerungsorten – Meißen in Ostdeutschland und Holzkirchen in Süddeutschland – äquivalent. Weitere Details sind [BS07] [Set08] [BS09] sowie Kapitel 4 zu entnehmen. Gleichzeitig stimmte der Schädigungstrend, in Abhängigkeit der Betonqualität, auch mit Laborergebnissen im CIF-Test überein, siehe Abbildung 1.2. Hinzugefügt sei, dass alle Betone das Abnahmekriterium für die Abwitterung, welches im Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ [BAW04] der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) vorgegeben wird, im CIF-Test erfüllen: Abwitterung $< 1000 \text{ g/m}^2$ nach 28 Frost-Tau-Wechseln (FTW).

Ausgangspunkt für die folgende Arbeit waren folgende Erkenntnisse:

- Bereits geringe Mengen an gelösten Salzen, wie sie im Leitungswasser, Niederschlag u.ä. Oberflächenwasser vorkommen, verstärken die Abwitterung signifikant, obwohl sie sonst meist vernachlässigt werden.
- Die ausgelagerten Proben unterscheiden sich in der Oberflächenschädigung – Abwitterung und lassen klare Qualitätsunterschiede erkennen.

¹Capillary suction and Freeze-thaw test

²Capillary suction, Internal damage and Freeze-thaw test

- Die Praxisergebnisse zeigen, dass die Oberflächenabwitterung auch beim reinen Frostangriff ein wichtiger Schadensmechanismus ist.
- Weder der Einfluss unterschiedlicher Salzkonzentrationen noch der verschiedener Ionen ist hinreichend analysiert worden.

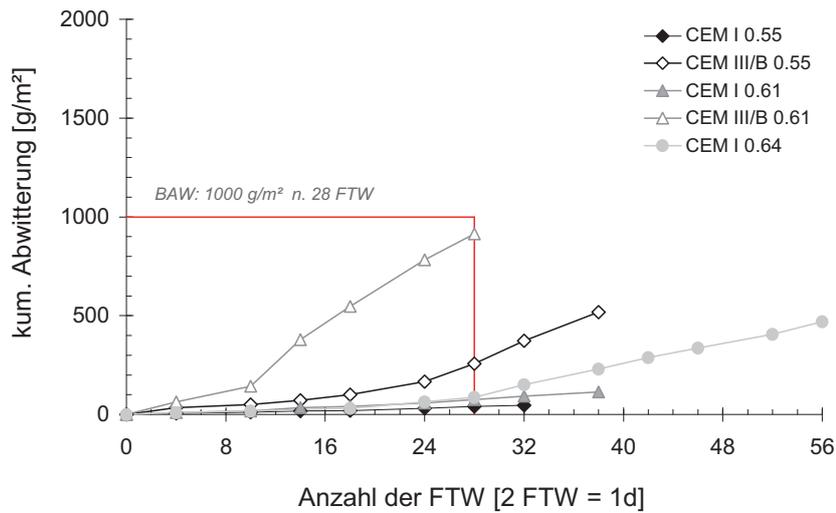


Abbildung 1.2: Abwitterung von Laborproben ermittelt im CIF-Test; unveröffentlichte Daten aus SFB 398/Teilprojekt A11, siehe [Set08].

1.2 Zielsetzung dieser Arbeit

Der Kern dieser Arbeit besteht darin die Auswirkung von sonst vernachlässigbaren Mengen gelöster Stoffe auf die Betonschädigung infolge der reinen Frostbeanspruchung zu untersuchen. Dazu soll der CIF-Test modifiziert und dem demineralisierten Wasser auf definierte Weise Salze in geringer Konzentration zugesetzt werden. Wichtig ist an dieser Stelle anzumerken, dass gerade mit der Entwicklung des CIF-Tests ein Werkzeug geschaffen wurde, welches es überhaupt erst ermöglicht, die einzelnen Rand- sowie Materialeinflüsse auf den Betonfrostwiderstand „zu filtrieren“ und präzise zu analysieren. Die sehr hohe Präzision und Trennschärfe des Prüfverfahrens ist sowohl für die Abwitterung wie für die innere Schädigung in [Set05] [Aub99] nachgewiesen. Es wird der Frage nachgegangen, inwieweit die Äquivalentkonzentration sowie die Zusammensetzung der Prüflösung im CIF-Test die Abwitterung beeinflussen. Ferner ist es erstrebenswert, die Bedeutung dieses Einflusses für den realen Schaden abzuschätzen. Die grundlegende wissenschaftliche Analyse soll mit dem praktischen Ansatz verbunden werden. Durch phänomenologische Versuche am Beton soll eine vergleichende Aussage zur Auswirkung verschiedener Prüflösungen bei unterschiedlichen Betonqualitäten auf die Frostschädigung getroffen werden. An dieser Stelle wird ausdrücklich darauf hingewiesen, dass die grundlegenden Mechanismen der Oberflächenphysik im Nanobereich der Gelpartikel (disjoining pressure), die dafür verantwortlich sind, nicht Fokus dieser Arbeit sind. Sie erfordern eine genaue Analyse der oberflächenphysikalischen und -chemischen Vorgänge [Set09a].

Aus den vorangegangenen Überlegungen ergibt sich folgende Zielsetzung dieser Arbeit:

Wissenschaftliche Zielsetzung:

- Welche Auswirkungen haben sehr niedrig konzentrierte (Salz-)Lösungen auf das Abwitterungsverhalten sowie die innere Gefügezerstörung von Normalbetonen?
- Wie lässt sich die geringe Konzentration definieren?
- Wie verändert die Lösungszusammensetzung die Abwitterung?
- Wie nimmt damit die Abwitterung mit der Konzentration zu?

Praktische Zielsetzung:

- Können aufgrund der Ergebnisse Vorgaben erarbeitet werden, mit denen eine Prüflösung im CIF-Test definiert werden kann, die eine eindeutige Beurteilung des reinen Frostwiderstandes anhand der Abwitterung ermöglichen? Im Vordergrund steht die Anforderung, dass Praxisergebnisse adäquat unter Zeitraffereffekt im Labor mittels CIF-Test wiedergegeben werden.

1.3 Vorgehensweise und Versuchsprogramm

Die in dieser Arbeit gewählte Vorgehensweise wird im Folgenden kurz dargestellt. Gegenstand von Kapitel 2 sind die Grundlagen zum Frostwiderstand – mit und ohne Tausalzbelastung – bei Beton. In Kapitel 3 folgt zuerst ein kurzer Überblick über die Ergebnisse anderer Autoren zum Thema Einfluss der Prüflösung im CIF-Test auf den Frostschaden im Labor. Anschließend werden die eigenen Laborergebnisse dargestellt. Die gleiche Vorgehensweise ist auch im Kapitel 4: Frostbeanspruchung und -schädigung in situ gewählt. Die Gegenüberstellung der eigenen Praxis- und Laborergebnisse erfolgt im Kapitel 5. Abschließend erfolgt in Kapitel 6 eine Zusammenfassung der wesentlichen Erkenntnisse dieser Arbeit.

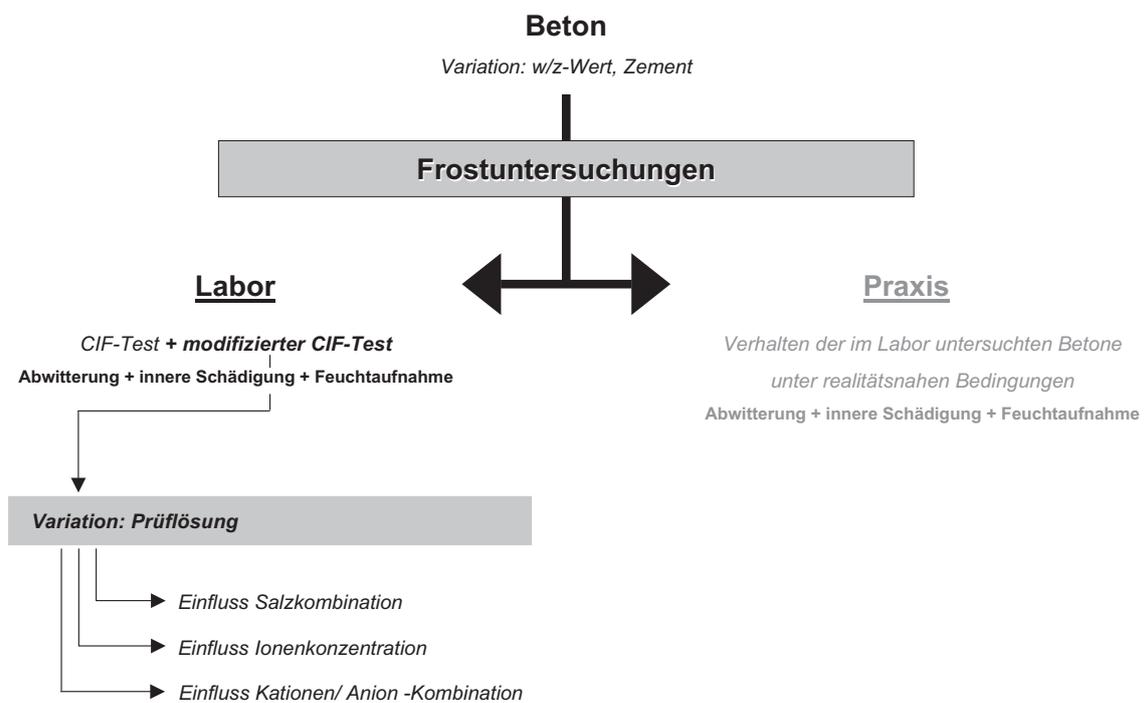


Abbildung 1.3: Versuchsprogramm.

In Abbildung 1.3 ist der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Untersuchungen dargestellt. Das Versuchsprogramm gliedert sich in zwei Teile: Frostuntersuchung im Labor unter definierten Randbedingungen (modifizierter CIF-Test) und Frostuntersuchung unter praxisnahen Bedingungen (Auslagerungsort: Meißen, Ostdeutschland). Im ersten Schritt werden Vorversuche im Labor mittels modifiziertem CIF-Test durchgeführt d.h. mit "niedrigkonzentrierten" Prüflösungen in Trinkwasserqualität in Anlehnung an die Untersuchungen von AUBERG [Aub99]. Für den späteren Vergleich Labor–Praxis erfolgte zeitnah das Auslagern der Feldproben, die aus der gleichen Herstellcharge stammten wie ein Teil der Proben aus dieser Laborversuchsphase. Damit ist gewährleistet, dass das Betonverhalten unter Praxisverhältnissen systematisch mit den Prüfergebnissen im Labor korreliert werden kann. Im zweiten Schritt wird die Auswirkung der Konzentration sowie der Kationen/Anionen-Kombination auf die oberflächliche Schädigung der Betone erforscht. Damit soll die Bedeutung der verschiedenen Einflussgrößen herausgearbeitet werden. Das Konzept der verwendeten niedrig konzentrierten Prüflösungen wird näher im Kapitel 3 erläutert. Die variierenden Parameter hinsichtlich der Betonzusammensetzung sind: Wasserzementwert (w/z-Wert), Zementart bzw. -menge, sowie Herstellwerk.

Kapitel 2

Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton

2.1 Schadensbilder

Unter Frostbeanspruchung – mit/ohne Taumittelbelastung – werden zwei Schädigungsarten betrachtet: (1) die äußere Schädigung und (2) die innere Schädigung.

Die äußere – oberflächennahe – Schädigung zeigt sich in Form von Abwitterungen. Dabei werden kleine Partikel oder dünne Schichten aus der Oberfläche des Betons herausgelöst oder abgesprengt. Anfangs stellt die äußere Schädigung einen ästhetischen Mangel dar. Anschließend kann aber die oberflächliche Zerstörung zur Einschränkung und zum Verlust der Funktion des Bauteiles führen, obwohl die Standsicherheit gewährleistet ist. Die äußere Schädigung manifestiert sich als: (1) flächiges Absanden und (2) lokales Abplatzen des Zementsteins (vgl. Abbildung 2.1) und im Falle einer zuschlaginduzierten Schädigung als (3) pop-outs und (4) D-cracking. Oberflächenabwitterungen treten häufig in sehr unterschiedlicher Intensität auf, siehe dazu Abbildung 2.2. Als eine Ursache für die ortsabhängigen, stark differierenden Schädigungsgrade wurde in [Aub06] ein enger Zusammenhang zu der eingebauten Betongüte bzw. eingebauten Zementgüte herausgestellt. Zwei verwendete Betonrezepturen unterschieden sich zwar nicht grundlegend in der Zusammensetzung, jedoch wurden die Betone von zwei Transportbetonlieferanten geliefert, die Zemente aus unterschiedlichen Zementwerken verwendet hatten.

Die innere Schädigung äußert sich durch innere Gefügezerstörung infolge von Mikrorissen, meist in der Kontaktzone Zementmatrix-Zuschlag, vgl. Abbildung 2.3 und Abbildung 2.4. Das heißt es liegt eine fortschreitende Zerstörung des tiefer liegenden Betongefüges vor, welche die Gebrauchseigenschaften des Betons (Druckfestigkeit, E-Modul, Dauerhaftigkeit) vermindern und letztlich die Tragsicherheit des Betonbauwerkes beeinflussen. Zunächst ist die innere

Schädigung von außen nicht erkennbar. Im fortgeschrittenen Schadensverlauf können, diese Gefügeschädigungen durch Risse im Beton aber auch von außen sichtbar werden.



A: Flächige-blättrige Abwitterungen



B: Lokale, punktförmige Abwitterungen



C: Abwitterungen einen dünnen Zementmörtelschicht über Gesteinskörnung



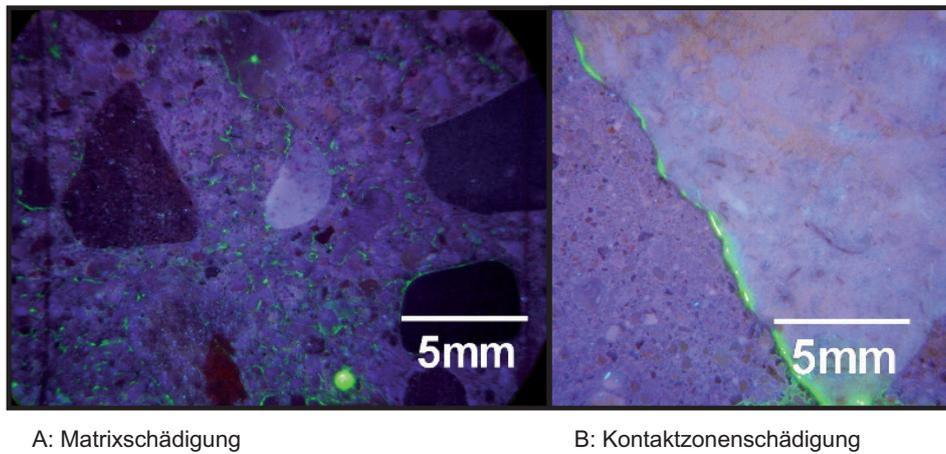
D: Popout verursacht durch die Auflösung einer Gesteinskörnung

Abbildung 2.1: Äußere Schädigung: Schädigungsarten; entnommen aus [TP07].



Abbildung 2.2: Äußere Schädigung in der Wasser-Wechsel-Zone eines Kläranlagebeckens nach acht Jahren Nutzungsdauer; entnommen aus [Aub06].

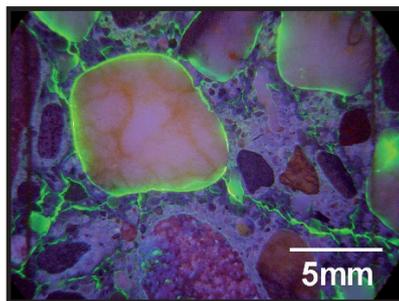
POWERS [Pow45] stellte bereits 1945 heraus, dass beide Schädigungen unabhängig voneinander auftreten können. Daher ist es wichtig, die beiden Schädigungsarten im Laborprüfverfahren getrennt zu erfassen. AUBERG [Aub99] schlug vor, den Frostwiderstand von Beton im CIF-Test sowohl anhand der Abwitterungen (äußere Schädigung) als auch mit Hilfe des rel. dyn. E-Moduls (innere Schädigung) zu beurteilen. Derzeit wird nach dem BAW-Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ [BAW04] zur Beurteilung des reinen Frostwiderstandes – ohne Tausalzbelastung – die innere Schädigung als Hauptkriterium herangezogen und die Oberflächenabwitterung als zusätzliches Kriterium berücksichtigt. Die Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstandes erfolgt auf der Basis der äußeren Schädigung, dabei wird die innere Schädigung als zusätzliches Kriterium berücksichtigt.



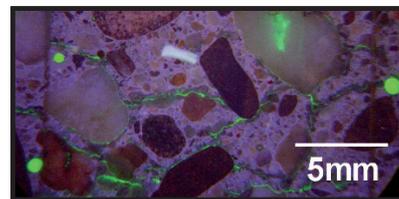
A: Matrixschädigung

B: Kontaktzonenschädigung

Abbildung 2.3: Innere Schädigung: A) Matrixschädigung und B) Kontaktzonenschädigung; entnommen aus [Hei04].

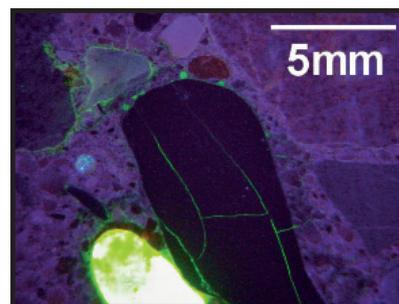


A



B

- A: Rissstruktur vom Korn in die Matrix
 B: Rissentwicklung zwischen
 Gesteinskörnungsflächen
 C: Schädigung des Kornes



C

Abbildung 2.4: Innere Schädigung: weitere Schädigungsarten; entnommen aus [Hei04].

2.2 Grundsätzliches zum Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton

In den nachfolgenden Unterkapiteln werden kurz die grundlegenden Mechanismen der Frostschädigung erläutert. Zuerst wird das anomale Gefrierverhalten der Porenlösung im Zementstein dargelegt, ohne dessen Vorkenntnis die Schädigungsmechanismen bzw. Transportmechanismen beim Frost-(Tausalz)-Angriff nur schwer verstanden werden können. Bezüglich der Schädigungsmechanismen, wird der Fokus auf das Mikroislinsen-Modell gelegt, da der CIF-Test die prüftechnische Umsetzung dieses Modells ist.

2.2.1 Gefrierpunktniedrigung, Unterkühlung und Eisbildung

Im Betongefüge wird das Gefrierverhalten der Porenlösung wesentlich durch physikalische und chemische Effekte verändert. Es tritt gegenüber dem freien Wasser, welches bei atmosphärischem Druck auf Meereshöhe bei $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ gefriert, eine Gefrierpunktniedrigung auf. Die Gefrierpunkttemperatur wird auch Gleichgewichtstemperatur genannt. Der Phasenübergang von Wasser zu Eis wird durch: (1) gelöste Stoffe im Porenwasser, (2) hohe Drücke und (3) die Wirkung von Oberflächenkräften verschoben, was eine Verringerung der Gleichgewichtstemperatur und somit eine Gefrierpunktniedrigung bewirkt.

Gelöste Stoffe (wie z.B. Alkalien, Erdalkalien, Sulfate usw.) verursachen eine konzentrationsabhängige Gefrierpunktniedrigung. Die alkalische Porenlösung im Beton bewirkt eine Erniedrigung um ca. 1,3 bis 3 K [GS80]. Einen besonders starken Einfluss ruft der Einsatz von Taumitteln hervor. Hier tritt in Abhängigkeit vom Taumittel und der Konzentration eine erhebliche Gefrierpunktniedrigung auf. So sind bei einer NaCl-Lösung Gefrierpunktniedrigungen bis $-21,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ und bei einer CaCl_2 -Lösung bis $-39,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ möglich.

Einen vergleichbar starken Einfluss üben auch Oberflächenkräfte in Gelporen und Mikrokapillarporen ($R_H < 100\text{ nm}$) aus. Die innere Oberfläche führt zu einer Verringerung des chemischen Potentials des Porenwassers, so dass in Abhängigkeit vom Porenradius der Gefrierpunkt durch Oberflächeneffekte erniedrigt wird. Dieser Zusammenhang, zwischen Porenradius und Gefrierpunkt, wird mit Radius-Gefrierpunkt-Beziehung (RGB) ausgedrückt. Unter Annahme verschiedener Vereinfachungen wurden unterschiedliche RGB-Modelle aufgestellt. Die in Abbildung 2.5 dargestellten RGB-Modelle von BRUN ET AL. [BLQE77] und STOCKHAUSEN [Sto81] berücksichtigen die Dicke der nichtgefrorenen, adsorbierten Wasserschicht auf der Festkörperoberfläche. Diese Modelle sind allerdings semi-makroskopisch, erfassen Effekte wie den Spaltdruck (disjoining pressure) nicht und sind daher aus heutiger Sicht mit Vorsicht anzuwenden [Set09a].

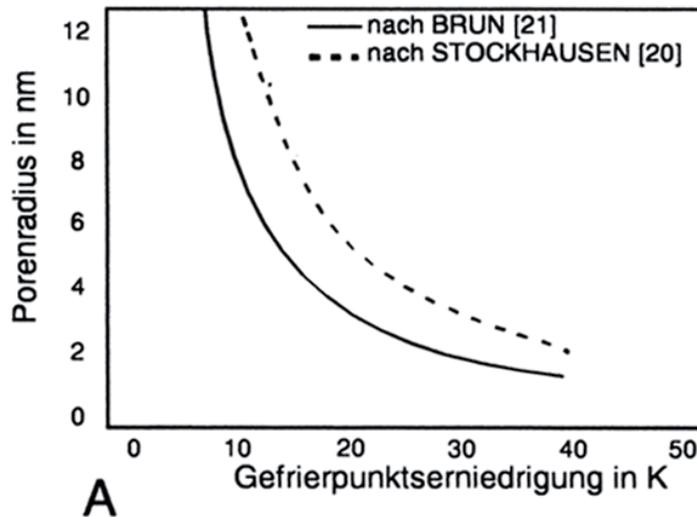


Abbildung 2.5: Radius-Gefrierpunkt-Beziehung (RGB) nach STOCKHAUSEN [Sto81] und BRUN [BLQE77].

Unter Vernachlässigung der strukturierenden Wirkung der inneren Oberflächen in sehr kleinen Poren, d.h. unter semi-makroskopischen Verhältnissen, kann die Gefrierpunktserniedrigung durch folgende Gleichung nach SETZER vereinfacht abgeschätzt werden. Dabei ist $R_{H,c}$ der hydraulische Radius ($R_{H,c} = \text{Volumen/Oberfläche} = r/2$) des gebildeten Eiskristalls, von SETZER [Set77] eingeführt zur Beschreibung der Porengröße, unabhängig von der Porengeometrie.

$$\Delta T \approx \frac{-32 [K \cdot nm]}{R_{H,c} [nm]}$$

Aufbauend auf einem hydraulischen Radius entwickelte SETZER [Set97] eine neue Poreneinteilung, welche die Besonderheiten des Porenwassers bei tiefen Temperaturen berücksichtigt und sich an der Art des Porenwassers orientiert. Dabei differenzierte er zwischen Grob-, Kapillar- sowie Meso- und Mikrogelporen. Tabelle 2.1 zeigt eine Auflistung der Porenarten sowie der dort wirkenden Gesetzmäßigkeiten nach SETZER [Set97]. Daraus kann für das Frostverhalten des Betons gefolgert werden, dass bis -20°C nur ca. 1/3 des Porenwassers gefriert. Das bedeutet, unter mitteleuropäischen Klimabedingungen gefriert beim Auftreten von Frost nur ein kleiner Teil des Porenwassers, ein bedeutender Teil bleibt während der Gefrierphase mehr oder weniger beweglich. -20°C ist auch die minimale Temperatur der meisten Frostprüfverfahren. Das Gefrieren oder Auftauen des Porenwassers ist kein unendlich schneller Prozess. Die Phasenübergänge finden vielmehr verzögert statt (Hysterese). Dieser metastabile Zustand wird als Unterkühlung bezeichnet. Wenn unterkühltes Wasser nach einer Nukleation gefriert, dann wird schlagartig eine große Eismenge gebildet, Eisdruck erzeugt und eine Wasserumverteilung

Table 2.1: Einteilung der Poren nach ihrer kapillaren Saughöhe nach SETZER [Set97]; entnommen aus [Aub06].

Typ	R_H	Besonderheiten	Art des Porenwassers
Grobporen	$\geq 1 \text{ mm}$	leer	
Makrokapillarporen	$< 1 \text{ mm}$	saugend sofort befüllbar	freies
Mesokapillarporen	$< 30 \text{ }\mu\text{m}$	saugend in Minuten bis Wochen befüllbar	makroskopisches
Mikrokapillarporen	$< 1 \text{ }\mu\text{m}$	kein makroskopisches Gleichgewicht	Wasser
Mesogelporen	$< 30 \text{ nm}$	Übergang vom freien makroskopischen Verhalten zur Oberflächenphysik befüllt durch Kondensation bei rel.F. 50% bis 98%	vorstrukturiertes kondensiertes Wasser
Mikrogelporen	$< 1 \text{ nm}$	Oberflächenphysik, befüllt durch Sorption bei rel.F. $< 50\%$	strukturiertes Oberflächenwasser

behindert [Erb87]. HARNIK ET AL. [HMR80] konnten bei gesättigtem Zementstein bei Verhinderung einer Eisbildung an der äußeren Oberfläche Unterkühlungen bis -15°C erreichen, die jedoch bei initiiertem äußerer Eiskeimbildung auf -5°C abfielen. Bei Beton sind aufgrund einer ausreichenden Verteilung von Grobporen Unterkühlungen bis -4°C zu erwarten. ERBAYDAR [Erb87] zeigte in seinen intensiven Untersuchungen, dass ab einer Unterkühlung von -4°C eine weitere Temperaturabnahme zu einer erheblichen Zunahme der spontanen Ausdehnung führen kann, die durch eine spontane Eisbildung hervorgerufen wird. In seinen Untersuchungen an Mörtelproben konnte jedoch nur bei höheren w/z-Werten, größer als 0,6, ein merklicher Unterkühlungseffekt beobachtet werden. Die Unterkühlung ist bei Gefrieren in Wasser größer als in einer Taumittellösung. Die stetige Eisbildung in einer Taumittellösung, entsprechend dem Phasendiagramm, wirkt in diesem Zusammenhang weniger schädigend.

2.2.2 Zyklische Frost-Tau-Wechsel-Belastung – Transport- und Schädigungsmechanismen

Die Auswirkungen zyklischer Frost-Tau-Wechsel – mit/ohne Tausalzbelastung – auf Beton resultieren aus zwei aufeinander folgenden Effekten: (1) Frostsaugen und einen Sättigungsgrad, der über der kapillaren Sättigung liegt und sich daran anschließende (2) Schädigungsprozesse.

Das Frostsaugen wird von SETZER [Set99] anhand des Mikroeislinnen-Modells beschrieben. Details dazu werden später erläutert. Wesentlich ist, dass erst, wenn der kritische Sättigungsgrad (Closed Container Model nach FAGERLUND [Fag73]) überschritten ist, der Schädigungs-

prozess beginnt. Entsprechend der Komplexität des Gefriervorganges bestehen eine ganze Reihe von Schädigungsmodellen, die die Phänomene und die Schadensbildung bei Frost-(Tausalz)-Belastung beschreiben. Die Schadensphänomene, die infolge der Frostbeanspruchung auftreten, sind grundsätzlich vielschichtig und überlagern sich in ihrer Wirkung. Einen Überblick über die wesentlichen Schädigungsmodelle gibt die Tabelle 2.2. Es werden physikalische und chemische, sowie makroskopische und mikroskopische Schädigungsmodelle unterschieden. Die makroskopischen Mechanismen beziehen sich auf den Beton als Ganzes und ziehen makroskopische Spannungen nach sich. Den mikroskopischen Mechanismen ist gemeinsam, dass sie sich auf den mikroskopischen Zementstein und Gesetzmäßigkeiten auf dieser Mikrostrukturebene beziehen. Ausführliche Darstellungen der einzelnen Modelle sind z. B. aus STRAK & WICHT [SW01] zu entnehmen.

Die bei der behinderten Eisbildung entstehenden hydraulischen Drücke werden in Modellen vor allem von POWERS [Pow45] und FAGERLUND [Fag73] beschrieben. POWERS & HELMUTH postulieren die Modelle des kapillaren Effekts und des osmotischen Drucks [PH53]. Die Grenzflächenspannung zwischen Wasser und Eis ist nach EVERETT & HAYNES [EH75] für die Wasserumverteilung während eines Frost-Tau-Wechsels verantwortlich. LITVAN [Lit73] nimmt in seinem Modell an, dass aufgrund der erniedrigten relativen Feuchte oberhalb des unterkühlten Gelporenwassers der Wassertransport innerhalb des Porensystems vorwiegend über Diffusion erfolgt. Die Modelle von POWERS, POWERS & HELMUTH, EVERETT & HAYNES und LITVAN basieren alle auf der gleichen Grundlage, dass eine Wasserumverteilung von Gelporen und Mikrokapillaren hin zu Kapillar- und Grobporen stattfindet. Das thermodynamische Modell von SETZER [Set76] berücksichtigt bei der Beschreibung des Schadensmechanismus zusätzlich die Wirkungen von Oberflächenkräften auf das Gefrierverhalten von Porenwasser. Durch die neue Grenzfläche zwischen der Wasserschicht und Eiskristallen in den Gelporen entstehen zusätzliche Oberflächenspannungen, die zu inneren Drücken führen.

GRÜBL [Grü81] betrachtet thermisch bedingte Spannungen infolge unterschiedlicher Temperaturendeckungskoeffizienten der Betonausgangsstoffe Zement, Gesteinskörnung und des Wassers bzw. Eises. Im Modell zum schichtenweisen Gefrieren berücksichtigen SPRINGENSCHMIDT & BLÜMEL [BS70] den Einfluss des (Tau-)Salzgradienten und das hervorgerufene Temperaturgefälle. Nach RÖSLI & HARNIK [RH79] verursacht ein plötzlicher Wärmeentzug, der durch das Auftauen einer Eisschicht auf der Oberfläche beim Aufstreuen von Tausalz entsteht, einen Temperatursturz in der Betonrandzone, der zur Bildung innerer Druck- und Zugspannungen führt. PÜHRINGER [Püh94] beschreibt einen möglichen Zerstörungsmechanismus durch Separation von Salzlösungen beim Gefrieren.

Tabelle 2.2: Schädigungsmechanismen infolge der Frostbeanspruchung; entnommen aus [Pal05].

Schädigungsmechanismen	Schadensursache/ Modell
Makroskopische Modelle	<ul style="list-style-type: none"> • Unterschiedliche Temperaturdehnungskoeffizienten von Zement, Gesteinskörnung und Eis (PODVALNYI) • Temperatursturz • Konzentrationsunterschiede bei Tausalzeinsatz - „layerwise freezing“ (SNYDNER, BLÜMEL und SPRINGSCHMIDT) • Temperaturgradient infolge Tausalze (RÖSLI und HARNIK)
Semi-makroskopische Modelle	<ul style="list-style-type: none"> • Volumenausdehnung infolge Eisbildung • Unterkühlung und damit verbundene spontane Ausdehnung (ERBAYDAR)
Mikroskopische Modelle und Transportphänomene	<ul style="list-style-type: none"> • „Closed container“ –Modell (FAGERLUND) • Hydraulischer Druck (POWERS) • Osmotischer Druck (POWERS und HELMUTH) • Kapillarer Effekt (POWERS und HELMUTH) • Oberflächeneffekte an gekrümmten Phasengrenzflächen (EVERETT und HAYNES) • Wassertransport durch Potentialunterschiede und daraus resultierende Schwindspannungen (LITVAN) • Thermodynamisches Modell (SETZER)
Makro- und mikroskopische Transportmechanismen	<ul style="list-style-type: none"> • Mikroeislinnenmodell und künstliche Sättigung (SETZER)
Chemische Modelle	<ul style="list-style-type: none"> • Ettringitbildung (STARK und LUDWIG)

Neben den physikalischen Schadenstheorien ist aber auch der Einfluss chemischer Modelle, wie Phasenumwandlungen innerhalb der Zementsteinmatrix, wie sie von STARK & LUDWIG in [SL94] beschrieben wird, nicht außer Acht zu lassen. LUDWIG hat eine bevorzugte Bildung von Ettringit bei niedrigen Temperaturen aufgezeigt [Lud96].

2.2.2.1 Mikroeislinnen-Modell

Wie bereits erläutert, beschreibt das Mikroeislinnen-Modell nach SETZER den Pumpeffekt, der zum Frostsaugen führt, und den anschließenden Schädigungsprozess. Es ermöglicht eine systematische und konsequente Darstellung der Vorgänge beim Frost-Tau-Wechsel, vgl. Abbildung 2.6.

Zur Erklärung werden Gesetze der Oberflächenphysik herangezogen, die im Submikrobereich unter 100 nm dominieren. SETZER beschreibt die thermodynamischen und oberflächenphysikalischen Bedingungen in den Gelporen, die dazu führen, dass selbst bei tiefen Temperaturen (bis ca. -40 °C) das Gelporenwasser nicht gefriert. Im Folgenden wird das Modell nur in seinen Grundzügen beschrieben. Detaillierte Beschreibungen finden sich in [Set99] [Set01] [Set02]. Das Mikroeislinnen-Modell basiert darauf, dass im nanoporösen Beton die drei Pha-

Da zu diesem Zeitpunkt die Eislinsen im Kapillarporenbereich immer noch gefroren sind, wird die Expansion im Gelporenbereich durch Nachsaugen – Frostsaugen – von externem Wasser gedeckt. Wesentlich ist, dass die Frostpumpe Wasser effizienter und tiefer befördert als andere Mechanismen. Mit jedem Frost-Tau-Wechsel wird durch die Frostpumpe der Sättigungsgrad des Porengefüges erhöht. Beim Erreichen des kritischen Sättigungsgrads wird schließlich die Matrix durch die 9 Vol.-% Ausdehnung des Eises beim Phasenübergang irreversibel geschädigt.

Durch die Frostpumpe können nicht nur Wasser, sondern auch Ionen mit in die Matrix hineingesaugt werden. Dabei ist wesentlich, dass Eis praktisch keine gelösten Stoffe aufnimmt. Die gelösten Stoffe werden im ungefrorenen Gelporenwasser angereichert. Das bewirkt eine Änderung des elektrostatischen Terms des Spaltdruckes [Set09b]. Nach SETZER sind diese oberflächenphysikalischen Effekte nicht vernachlässigbar. Der Spaltdruck setzt sich aus drei Komponenten zusammen: dem dispersiven – van-der-Waals-Term, dem elektrostatischen und dem strukturellen Term. Der van-der-Waals-Term wirkt stets anziehend. Der elektrostatische und der strukturelle Term sind stets abstoßend und kompensieren zusammen den van-der-Waals-Term. Dieses Zusammenspiel der drei Komponenten stabilisiert das Zementgel, siehe dazu das Solid-Liquid-Gel-System Modell (SLGS Modell) des Zementsteins [Set06b]. Eine Abnahme des elektrostatischen Terms durch gelöste Stoffe bewirkt ein zusätzliches Frostschrumpfen [Set09b].

Eine Reihe von Untersuchungen und Beobachtungen stützen das Mikroeislinnen-Modell. Das Frostschrumpfen bzw. Tauquellen von Proben, die nicht völlig wassergesättigt sind, sowie die Expansion bei der Eisbildung, wenn für das aus den Gelporen transportierte Wasser nicht genügend Ausweichraum vorhanden ist, konnte bspw. von LIEBRECHT [Lie06] an Zementsteinen und von AUBERG [Aub99] an Betonen experimentell nachgewiesen werden, siehe dazu Abbildung 2.7 und Abbildung 2.8. Abbildung 2.8 zeigt, dass während des Gefrierens, beim gutem Beton, aufgrund der Volumenreduktion bei der Hydratation, zunächst freier Porenraum vorhanden ist, so dass der Eisdruck nicht wirksam ist. Es ist ein Frostschrumpfen zu beobachten. Der leere Porenraum ist der entscheidende Grund, dass Beton einen hohen Widerstand gegen Frostbelastung hat. Erst wenn durch die Mikropumpe in mehreren Frost-Tau-Wechseln dieser Porenraum gefüllt ist bzw. der kritische Sättigungsgrad überschritten wird, erfolgt eine Frostschädigung infolge der Eisexpansion [Set09b].

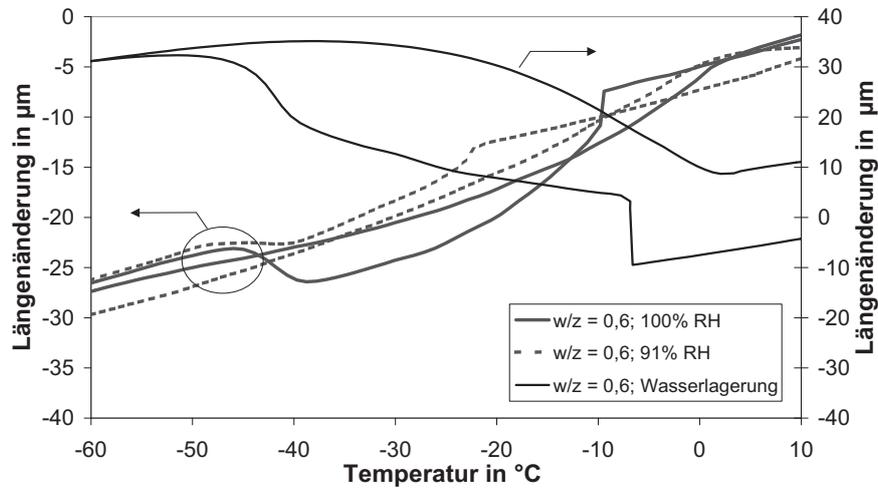


Abbildung 2.7: Thermische Ausdehnung von Zementsteinproben nach unterschiedlicher Vorlagerung: 100 % – versiegelte Vorlagerung – Frostschwinden ist deutlich; 91 % in Klimalagerung; Wasserlagerung in gesättigter Calciumhydroxid-Lösung – völlig gesättigter Porenraum; entnommen aus [Lie06].

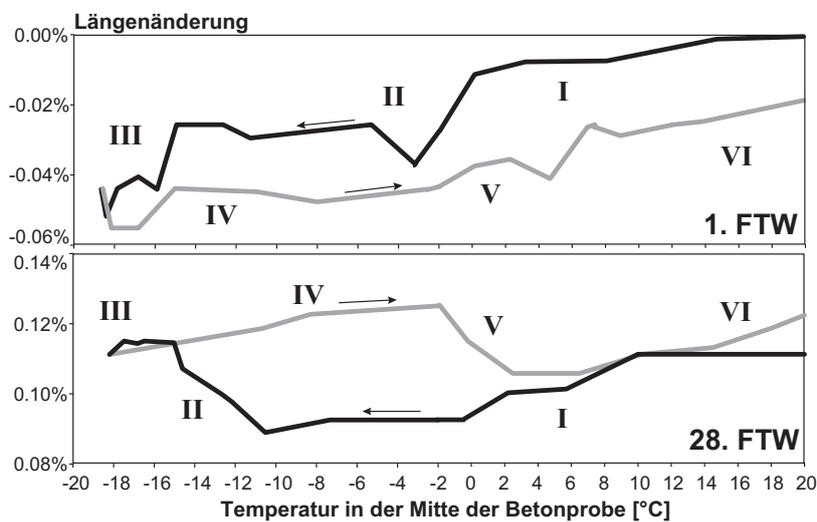


Abbildung 2.8: Thermische Dehnung von Betonproben (CIF-Test): Ungeschädigter Beton (nach 1 FTW) – Frostschwinden; geschädigter Beton (nach Frostsaugen in 28 FTW) – Eisdehnung; entnommen aus [Aub99].

Der Feuchtigkeitsgehalt, der durch eine wiederholte Frost-Tau-Wechsel-Belastung hervorgerufen wird, übersteigt deutlich den Wert, der durch kapillares Saugen maximal erreichbar ist [Set02]. In AUBERG [Aub99], HEINE, [Hei04] und PALECKI [Pal05] konnte gezeigt werden, dass die innere Schädigung und die Feuchteaufnahme direkt miteinander korrelieren. PALECKI stellte in [Pal05] den Zusammenhang zwischen Saugrate, Porenradienverhältnis und Frostwiderstand her und klassifizierte Betone in Abhängigkeit vom Feuchteaufnahmeverhalten in Schädigungstypen. Beispielhaft ist in der Abbildung 2.9 die Korrelation zwischen innerer Schädigung und Feuchteaufnahme mit den verschiedenen Feuchtebereichen abgebildet. Der Feuchtegehalt, geprägt von der Frostpumpe, nimmt kontinuierlich mit steigender FTW-Anzahl zu. Erst nach einer kritischen Sättigung dieses Porenraumes beginnt durch die Eisexpansion die Schädigung des Betongefüges. Der kritische Sättigungsgrad ($S_{crit.}$) markiert einen Knickpunkt im Feuchteverlauf bzw. im Verlauf des rel. dyn. E-Moduls (RDM). Deutlich zu erkennen ist die „Inkubationszeit“, bis zu der der Beton keine Schädigung erfährt. Durch diese ist die Nutzungsdauer entsprechend verlängert [Pal05]. Die letzte Phase ist durch einen rasanten Abfall des RDM und eine erhöhte Feuchteaufnahme innerhalb weniger Frost-Tau-Wechsel gekennzeichnet. Nicht nur der Porenraum, sondern auch die durch den Frostangriff entstandenen Risse werden mit Feuchte gefüllt. Für die Lebensdauer eines Bauteils unter Frostbelastung ist die Sättigungsgeschwindigkeit entscheidend und nicht die aufgenommene Feuchtemenge [Aub99] [Pal05].

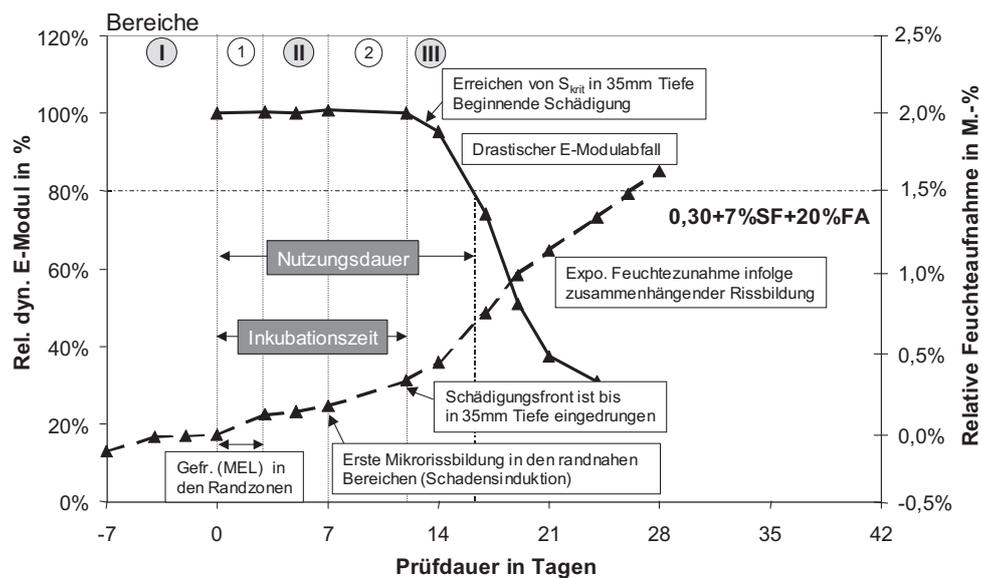


Abbildung 2.9: CIF-Test: Korrelation rel. dyn. E-Modul und Feuchteverlauf – Betone des Typs 2; entnommen aus [Pal05].

KRUSCHWITZ [Kru08] modellierte den Gefrier- und Tauprozess von zementhaltigen teilgesättigten porösen Materialien. Sein mehrskaliges Modell greift die genannten Effekte der Mikroislinsenbildung, des Frostschrindens, der Gefrier-Tau-Hysterese und der Mikroislinsenpumpe auf und verdeutlicht ihre Wirkungsweise.

2.2.3 Aufwand und Erfahrungen mit dem CIF-Test

Schäden an Bauwerken durch Frost- oder Frost-Tausalz-Angriffe führten zu intensiver Forschungstätigkeit im Bereich der Entwicklung geeigneter Prüfverfahren. Im Folgenden werden nur die wesentlichen Charakteristika eines Frostprüfverfahrens aufgezeigt. Ein kompletter Überblick der existierenden Frost- und Frost-Tausalz-Prüfverfahren kann z.B. [Aub99] [Lud96] entnommen werden. Anschließend werden exemplarisch Erfahrungen mit dem CIF-Test dargestellt.

Wesentlich ist, dass sich die existierenden Prüfverfahren bezüglich der Prüfbedingungen – Probenpräparation³, Schadensangriff⁴ und Schadensaufnahme⁵ – zum Teil sehr bedeutend unterscheiden. Dies führt zu unterschiedlichen Schädigungsintensitäten derselben Betonqualität in Abhängigkeit des verwendeten Verfahrens. Andererseits schwanken die frostrelevanten Umweltbedingungen, denen Bauwerke in der Praxis ausgesetzt werden. Prinzipiell kann diese Bandbreite an tatsächlichen Praxisbedingungen nicht durch ein Prüfverfahren im Labor vollständig abgebildet werden, da eine Prüfung eindeutige, ortsunabhängige und reproduzierbare Ergebnisse erfordert und damit klare und i.d.R. einfache Prüfbedingungen. Ein Prüfverfahren ist daher eine Konvention.

Ausschlaggebend für eine Frost-Laborprüfung ist, dass:

- die relevanten Angriffsarten abdeckt sind. Bei einem Frostprüfverfahren ist dabei ein einachsiger Wärme- und Feuchtetransport über eine definierte Prüffläche einzustellen, siehe Abbildung 2.10;
- eine ausreichende Genauigkeit d.h. Wiederhol- und Vergleichpräzision gewährleistet ist, sowie eine entsprechende Trennschärfe gegeben ist, um Betone eindeutig hinsichtlich ihres Frostwiderstands unterscheiden zu können.

³z.B. Nachbehandlung, Vorlagerung, Probengeometrie, Prüfalter

⁴Feuchte- und Temperaturbelastung

⁵äußere Schädigung: z.B. Abwitterungsmenge, Massenverlust, Volumenänderung, optische Beurteilung; innere Schädigung: z.B. Resonanzfrequenz, Ultraschalllaufzeit, Längenänderung, Druck- oder Biegezugfestigkeit

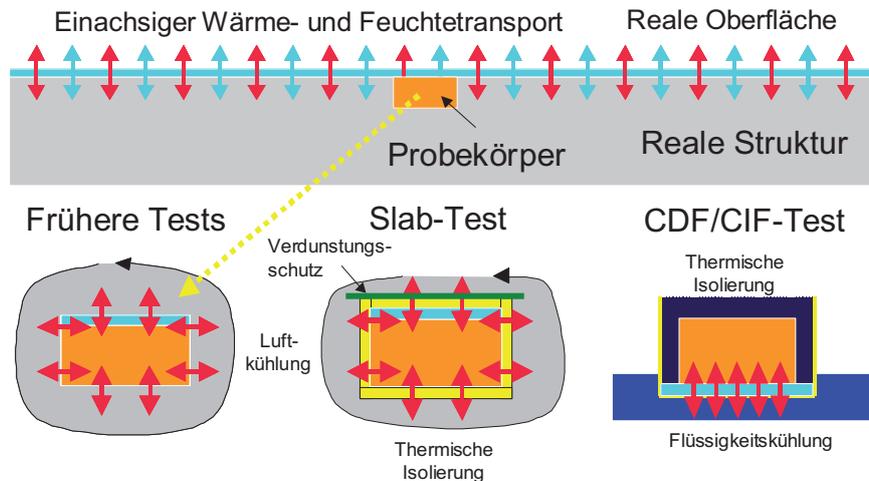


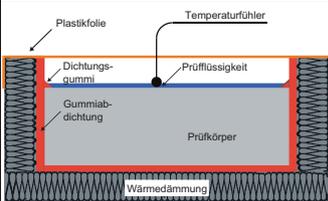
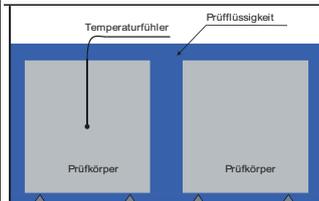
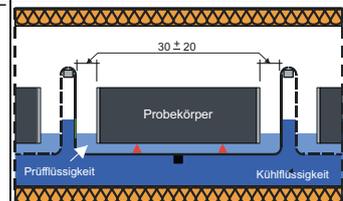
Abbildung 2.10: Vergleich eines Frostangriffs in der Praxis mit dem in Prüfverfahren. Unterschied zwischen allseitigem (links), mehrachsigem (Mitte) und eindimensionalem (rechts) Wärme- und Feuchtetransport, entnommen aus [Set98].

Beispielhaft ist in Abbildung 2.10 ein Vergleich der Simulationsbedingungen zwischen früher angewendeten Testmethoden und den heute gebräuchlichen Prüfverfahren Slab-Test und CDF-⁶/CIF-Test dargestellt.

Für die Bestimmung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes werden in Deutschland i.d.R. die Prüfverfahren verwendet, die in der Vornorm DIN 12390-9 [din06] und in dem DIN Fachbericht CEN/TR 15177 [din08] aufgeführt sind. In der Vornorm DIN 12390-9 sind drei Prüfverfahren zur Bestimmung der äußeren Schädigung – Abwitterung aufgeführt: Slab-Test, Würfelprüfverfahren und CF-/CDF-Test. Einen Überblick über die wesentlichen Merkmale und Differenzen der drei Prüfverfahren gibt Tabelle 2.3. Der DIN Fachbericht CEN/TR 15177 beinhaltet ebenso drei Prüfverfahren zur Bestimmung der inneren Schädigung: Balkenprüfverfahren, Plattenprüfverfahren und CIF-Test. Von RILEM TC 117 FDC [SJF96] wird der CDF-Test für die Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes und von RILEM TC 176 IDC [Set04] der CIF-Test für die Bestimmung des Frostwiderstandes empfohlen. Im Rahmen von allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen wird in Deutschland der CIF- sowie der CDF-Test verwendet; der CIF-Test ist Gegenstand der ZTV-W LB 219 [ztv96] bzw. des BAW-Merkblattes „Frostprüfung von Beton“ [BAW04] und der CDF-Test der ZTV-ING 3-1 [ztv07].

⁶Capillary suction, De-icing agent and Freeze-thaw test

Tabelle 2.3: Überblick über die verschiedenen Frost-Laborprüfverfahren; entnommen aus [SBB⁺ 05].

Parameter	Prüfverfahren		
	slab-Test	Würfelfahren	CIF/CDF-Test
			
Prüfkörper	4 Platten (150 x 150 x 50) mm ³	4 Würfel (100 x 100 x 100) mm ³	5 Steine (150 x 150 x 70) mm ³ nach [21] 150 x 110 x 70) mm ³ nach [147, 149]
Prüffläche	gesägt (Würfelmittle)	geschalt	geschalt (Teflonschalung)
Nachbehandlung	1 d Form 6 d unter Wasser bei 20 °C 21 d Klimaraum (20/65)	1 d Form 6 d unter Wasser bei 20 °C 20 d Klimaraum (20/65)	1 d Form 6 d unter Wasser bei 20 °C 21 d Klimaraum (20/65)
Vorlagerung	3 d mit aufstehender Prüfliquid	1 d in Prüfliquid untergetaucht	7 d in Prüfliquid 5 mm tief eingetaucht
Prüfalter bei Vorlagerungsbeginn	28 d	28 d	28 d
Prüfrichtung	einseitig	allseitig	einseitig
T_{\min}/T_{\max} ¹	-18°C / +20°C (s. Bild 3.1) im Prüfmedium	-15°C / +20°C (s. Bild 3.3) in Würfelmittle	-20°C / +20°C (s. Bild 3.5) unter Prüfbehälter in Truhenmittle
zul ΔT bei T_{\min}	bis +/- 2 K	+/- 2 K	+/- 0,5 K
Abkühl-/ Auftauge- geschwindigkeit	2,5 K/h / 6,5 K/h	1,5 K/h / 6,0 K/h	10 K/h / 10 K/h
Dauer/Anzahl FTW	24 h / 56 FTW	24 h / 56 FTW	CDF: 12 h / 28 CIF: 28 FTW nach [21] bzw. n FTW nach [147, 149]
Prüfkriterium: 1.	Oberflächenschädigung festgestellt durch Abwitterung der Prüffläche bei Prüfung mit Tausalz		
Vorgeschlagener Grenzwert	< 1,0 kg/m ² nach 56 FTW	< 5,0 M.-% nach 56 FTW	< 1,5 kg/m ² nach 28 FTW (CDF)
Präzision [34] - Vergleichbarkeit - Wiederholbarkeit	bei 1,0 kg/m ² 31 % 17 %	bei 5,0 M.-% 37 % 18 %	bei 1,5 kg/m ² 29 % 14 %
Prüfkriterium: 2.	Innere Schädigung festgestellt durch Änderung dynamischer E-Modul		
Vorgeschlagener Grenzwert	$E_{\text{dyn}} < 80\%$ nach [150]:) ²	-	rel. $E_{\text{dyn}} = 75\%$ / 28 FTW nach [21] rel. $E_{\text{dyn}} = 80\%$ / n FTW ³ nach [147, 149]
Präzision - Vergleichbarkeit - Wiederholbarkeit	bei 80 % rel. E_{dyn} [150] 7,3% 7,7%	-	bei 80 % rel. E_{dyn} [149] 4,8% 6,2%
Besonderheiten (vgl. auch Bild 3.9)	Schutz vor Verdunsten notwendig Thermische Isolierung Mehrachsigter Wärmetransport Rückseitiges Gefrieren der Probekörper möglich	Mehrachsigter Wärmetransport Rückseitiges Gefrieren der Probekörper möglich	Thermische Isolierung Einachsigter Wärme- und Feuchtetransport

¹ T_{\min} und T_{\max} stellen mittlere Werte dar (s. Temperaturverlauf)² E-Modul aus Resonanzfrequenz oder UPTT ist als Alternativverfahren A und B angegeben [150], Längenänderung ist Referenzverfahren³ Anzahl FTW je nach Anwendungsfall festzulegen

In der vorliegenden Arbeit wird der Fokus auf den CIF-Test gelegt. Die Prüfmethodik ist für beide Prüfverfahren – CDF- und CIF-Test – gleich⁷. Der Prüfverlauf wird in Kapitel 3 beschrieben. Beide Methoden sind die prüftechnische Umsetzung des Mikroeislinnen-Modells. Das wesentliche Merkmal der Verfahren besteht darin, dass durch die Prüfanordnung während der Frost-Tau-Wechsel ein einachsiger Wärme- und Feuchtetransport über eine Beanspruchungsfläche gewährleistet wird, entsprechend den ebenen einachsigen Praxisbedingungen, siehe dazu z.B. KASPAREK [Kas05], d.h., die Mikropumpe wird praxisadäquat aktiviert. Des Weiteren werden die innere und die äußere Schädigung eindeutig und präzise (Präzisionsermittlung nach ISO 5725) bestimmt [Aub99] [Set05]. Ebenso ist die Trennschärfe gegeben.

Wie bereits erläutert, kann eine zyklische Frost-Tau-Belastung von Beton sowohl zu oberflächlichen Schädigungen, als auch zu Schäden im Kernbereich führen. Im CIF-Test wird die innere und äußere Schädigung, sowie die Feuchteaufnahme gleichzeitig ermittelt.

Nachfolgend werden beispielhaft bisherige Erfahrungen mit dem CIF-Test in Abhängigkeit der betontechnologischen Einflussgrößen auf den Frostwiderstand von Beton dargestellt. Bei der Schädigung von Beton infolge eines Frost-(Tausalz)-Angriffs spielen verschiedene Aspekte eine Rolle. Eine ausführliche Darstellung der einzelnen Einflüsse auf den Frost-(Tausalz)-Widerstand ist z.B. in STARK & WICHT [SW01] vorzufinden. Da derzeit die Beurteilung des Frostwiderstandes nach der RILEM Recommendation [Set04] bzw. dem BAW-Merkblatt [BAW04] aufgrund der inneren Schädigung (Hauptschädigungskriterium) erfolgt, beziehen sich die meisten Ergebnisse auf diese. Der derzeitige Wissenstand bezüglich des reinen Frostangriffs und der äußeren Schädigung bzw. des Einflusses der Prüflösung auf die Abwitterung wird im Kapitel 3 dargestellt.

Die Dauerhaftigkeit für Betone mit unterschiedlichem w/z-Wert im CIF-Test wurde vor allem von AUBERG [Aub99] untersucht. Abbildung 2.11 zeigt die Abnahme des RDM nach 28 FTW in Abhängigkeit des w/z-Wertes der geprüften Betonrezeptur. Nach einer Frostbelastung von 28 FTW zeigen nur Betone mit einem w/z-Wert $> 0,6$ einen bedeutenden Abfall im rel. dyn. E-Modul. Die anderen Rezepturen weisen abhängig vom w/z-Wert eine Reduzierung von 7 % bis 25 % auf. Des Weiteren unterscheiden sich die Betone mit Luftporenmittel deutlich von den „ohne LP-Mittel“ Betonen. Der CIF-Test differenziert nicht nur Betone mit und ohne künstlich eingebrachte Luftporensysteme, sondern ermöglicht auch eine Klassifizierung LP-freier Betone [Aub99]. Ferner ist eine Unterscheidung der Betonqualitäten anhand der Abwitterung mit dem CIF-Test möglich, vgl. Abbildung 2.12. Allerdings ist es nicht die Regel, dass die Einteilung des Frostwiderstands anhand der inneren Schädigung und Abwitterung korreliert.

⁷Unterschiede bestehen in der angewandten Prüflösung – CIF-Test: demineralisiertes Wasser; CDF-Test: 3 M.-% Tausalz-Lösung, i.d.R. 3 M.-% NaCl – und im Hauptschädigungskriterium – CIF-Test: innere Schädigung; CDF-Test: Abwitterung.

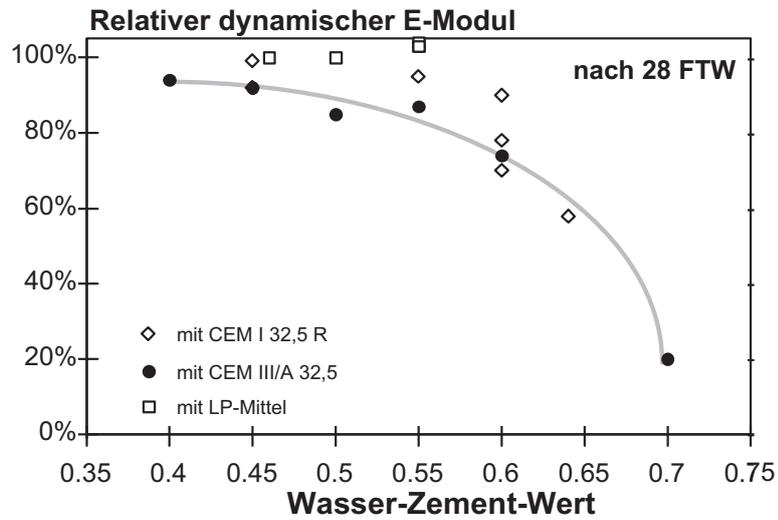


Abbildung 2.11: CIF-Test: Abfall des rel. dyn. E-Moduls nach 28 FTW in Abhängigkeit des w/z-Wertes; entnommen aus [Aub99].

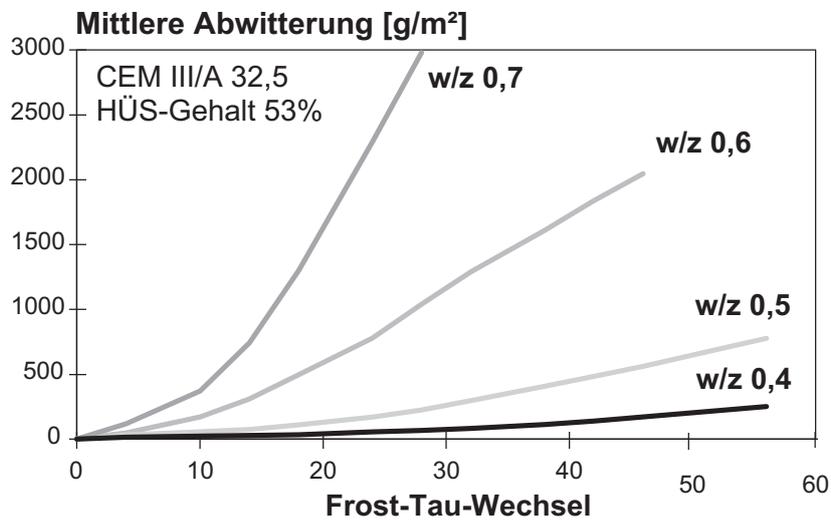


Abbildung 2.12: CIF-Test: Typische Abwitterungsverläufe von CEM III/A-Betonen mit unterschiedlichen w/z-Werten; entnommen aus [Aub99].

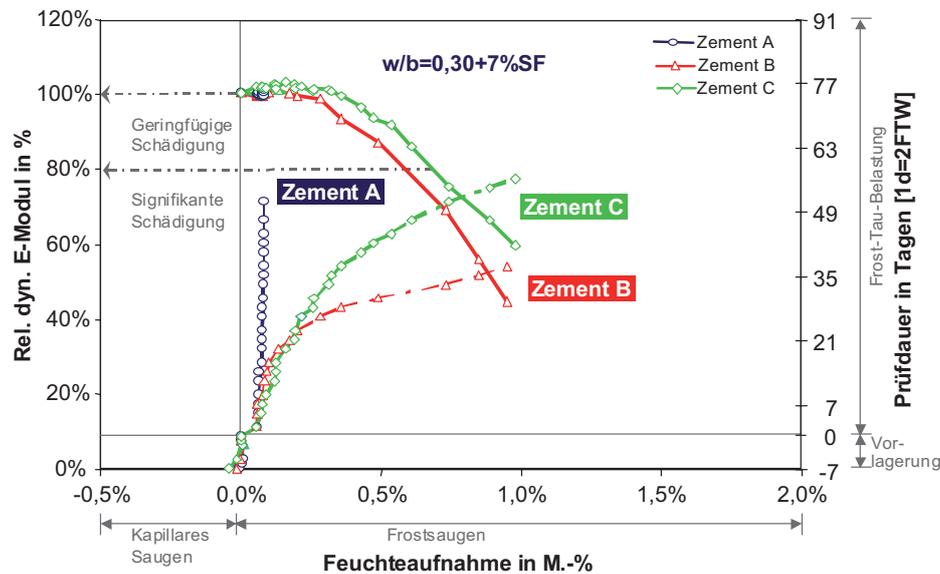


Abbildung 2.13: CIF-Test: Kombinationsdiagramm – rel. dyn. E-Modul, Feuchtaufnahme und Testdauer der Betone mit $w/b=0,3$ und Zugabe von 7% Silikastaub bei Verwendung der Zemente A-C verschiedener Hersteller; entnommen aus [Pal05].

Untersuchungen von HEINE [Hei04] und PALECKI [Pal05] zeigen den unmittelbaren material-spezifischen Zusammenhang zwischen Porenstruktur, Feuchtaufnahme und innerer Schädigung. Der Einfluss der Zementart auf den Frostwiderstand macht sich hauptsächlich in der unterschiedlichen Porenstruktur des Betons bemerkbar.

Besonders Spezialbetone wie z.B. Hochleistungsbetone können sensibel auf die chemische Zusammensetzung des Zementes reagieren. So konnte PALECKI [Pal05] mittels CIF-Test zeigen, dass die Verwendung vergleichbarer Portlandzemente unterschiedlicher Hersteller bei ein und derselben Mischungszusammensetzung zu einem signifikant unterschiedlichen Frostwiderstand führt, vgl. Abbildung 2.13. HEINE [Hei04] nutzte den CIF-Test zur Beurteilung des Frostwiderstandes von Gesteinskörnungen. Er erfasste die frostrelevanten Aspekte der Matrix-Gesteinskörnung-Interaktion. Nach kurzer Prüfdauer konnte im CIF-Test die Qualität der Matrix-Gesteinskörnung-Kombination identifiziert werden, vgl. Abbildung 2.14.

LOHAUS & PETERSON [LP02] untersuchten den Frostwiderstand an fünf unterschiedlichen Herstellchargen gleicher Betonzusammensetzung. Bei drei Herstellchargen wurde keine wesentliche Veränderung des rel. dyn. E-Moduls während der Prüfdauer (84 FTW) gemessen. Bei zwei Herstellchargen fiel das rel. dyn. E-Modul vor dem 56 FTW unter 80% ab, siehe Abbildung 2.15.

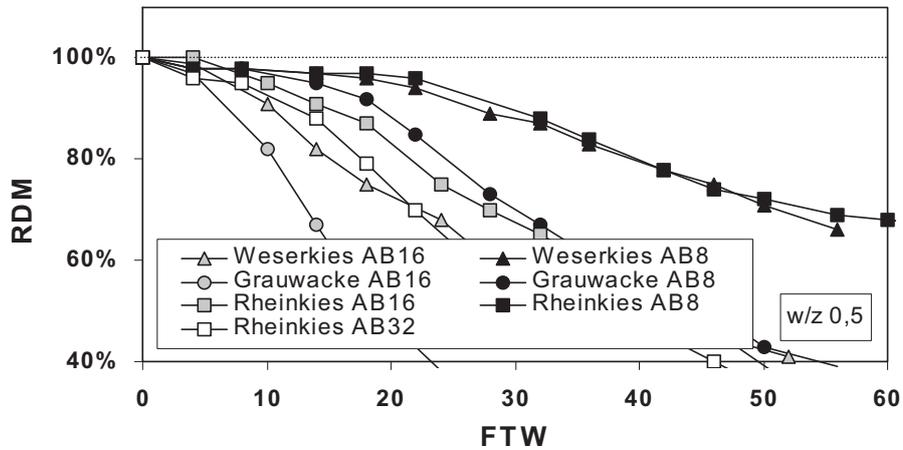


Abbildung 2.14: CIF-Test: Einfluss der Sieblinie und der Gesteinskörnungen auf die innere Schädigung; entnommen aus [Hei04].

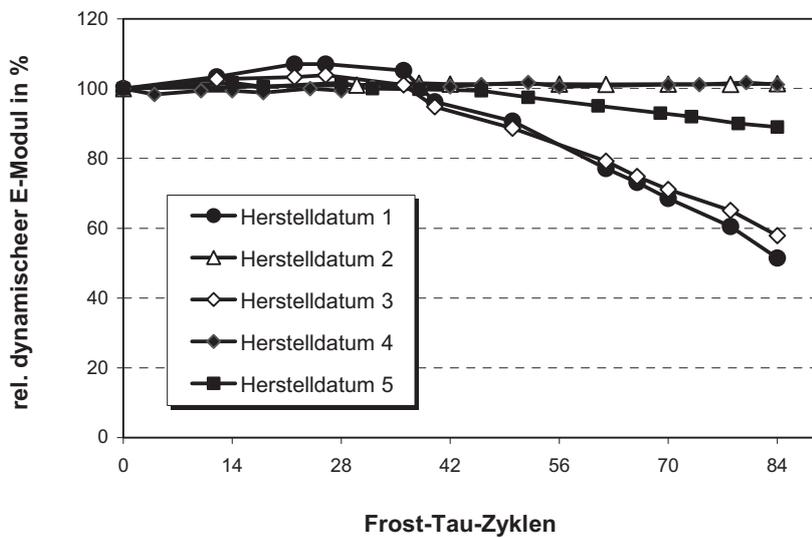


Abbildung 2.15: CIF-Test: Verlauf des rel. dyn. E-Moduls in Abhängigkeit der Herstellcharge bei gleicher Betonzusammensetzung; entnommen aus [SBB⁺ 05].

Kapitel 3

Untersuchung des Frostwiderstandes mittels CIF-Test mit Fokus auf die Prüflösung

Wie bereits geschildert, lieferten die Abwitterungsergebnisse in Rahmen des Ringversuches der CEN-Arbeitsgruppe TC 51/WG12 im Jahre 1993 erste Indizien zur Auswirkung verschiedener – im CF-Test als Prüflösung verwendeter – Leitungswasserqualitäten auf die Abwitterung. Bis zu diesem Zeitpunkt wurde der Einfluss der Prüflösung bzw. des Leitungswassers auf die Bestimmung des Frostwiderstandes nicht beachtet. Der folgende Abschnitt gibt einen kurzen Überblick der zur dieser Thematik bekannten Untersuchungen und Ergebnisse. Anschließend werden die eigenen CIF-Untersuchungen und -Ergebnisse zur Bestimmung der Frostwiderstandes in Abhängigkeit der Prüflösung dargestellt. Wiederum ist der Fokus auf die äußere Schädigung – Abwitterung gerichtet.

3.1 Sachstand zum Einfluss der Prüflösung im CIF-Test auf den Frostwiderstand

Die ersten Untersuchungen zur Auswirkung der Leitungswasserqualität auf die äußere Schädigung im CF-Test wurden im Auftrag des RILEM TC 117 ICD durchgeführt [SAL94]. In Tabelle 3.1 sind die Ergebnisse der Abwitterung nach 28 FTW in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung sowie Wasserhärte dargestellt. Geschlussfolgert wird, dass die Leitungswasserqualität die Abwitterung signifikant beeinflusst: Mit steigender Wasserhärte der Prüflösung steigt die Abwitterung um den Faktor 2,5 bis 4 an. Dieser Effekt ist ausgeprägter bei Beton mit Hochofenzement (HOZ). Unabhängig von der Zementart und Prüflösung wird insgesamt ein pro-

gressiver Abwitterungsverlauf beobachtet. Als Konsequenz wurde vom RILEM TC 176 IDC für die Recommendation der Frostprüfung CIF-Test vereinbart, dass demineralisiertes Wasser als Prüflösung zu definieren sei [Set04].

Weiterführende Untersuchungen von AUBERG [Aub99] bestätigten, dass der Härtegrad bzw. die Zusammensetzung der Prüflösung einen entscheidenden Einfluss auf das Abwitterungsverhalten im CF-Test hat. Da sich Leitungswässer nicht nur in der Gesamthärte, sondern auch im Gehalt an Salzen, wie Chloride, Sulfate, Calcium und Magnesium, unterscheiden, wurden die CF-Prüfungen mit synthetisch hergestellten Wässern durchgeführt. Um die verschiedene Härtegrade einzustellen, wurde demineralisiertem Wasser Calciumnitrat – $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ – in verschiedenen Konzentrationen beigefügt. Dabei lag die höchste Konzentration des NO_3^- im Bereich des Grenzwertes des Betonzugabewassers [din02]. Teilweise wurden den Calciumnitrat-Prüflösungen geringe Mengen an Chlorid und Sulfat beigemischt; deren Menge lagen aber unter den Grenzwerten der deutschen Trinkwasserverordnung (TWV) [twv01]. Zusätzlich wurde auch Essener Leitungswasser als Prüflösung verwendet.

Abbildung 3.1 zeigt beispielhaft typische Abwitterungsverläufe unterschiedlicher Betonqualitäten aus den genannten Untersuchungen. Die geprüften Betone entsprachen hinsichtlich der Zusammensetzung Betonen mit hohem Frostwiderstand nach DIN 1045-2 [din98]. Die Abwitterungsmengen zwischen den einzelnen Prüflösungen wiesen erhebliche Unterschiede unabhängig von der Zementart und der Betonqualität auf. Grundsätzlich ist mit steigendem Härtegrad der Prüflösung eine Zunahme der Abwitterungsmenge zu beobachten. Die Zugabe geringer Mengen von Chloriden oder Sulfaten zur Prüflösung bewirkten noch eine zusätzlichen Abwitterungsanstieg.

Tabelle 3.1: Abwitterungsmengen nach 28 FTW im CF-Test; Daten aus [SAL94].

Prüflösung	CF-Test: Abwitterung nach 28 FTW [g/m ²]	
	PZ 35 L- 350 kg/m ³ - w/z=0.65	HOZ 35 L- 350 kg/m ³ - w/z=0.65
demineralisiertes Wasser; 0°dH ¹⁾	202	407
Leitungswasser Nohra; 1.9°dH ¹⁾	291	638
Leitungswasser Weimar; 16.4°dH ¹⁾	332	817
Leitungswasser Umpferstadt; 27.0°dH ¹⁾	489	1502

¹⁾Gesamtwasserhärte

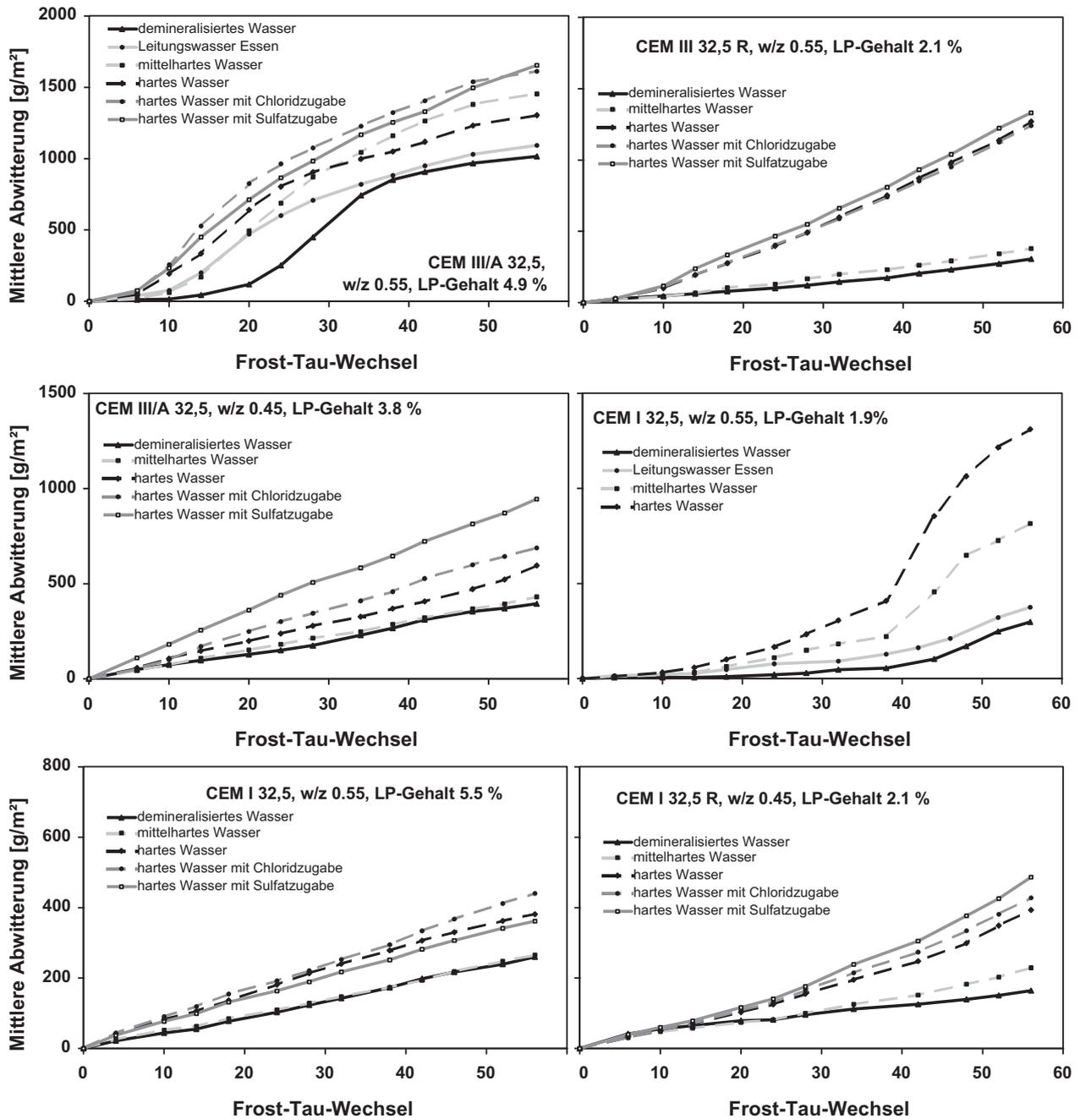


Abbildung 3.1: Einfluss der Wasserqualität auf das Abwitterungsverhalten von CEM III/A- und CEM I-Beton mit unterschiedlichem Frostwiderstand; entnommen aus [Aub99].

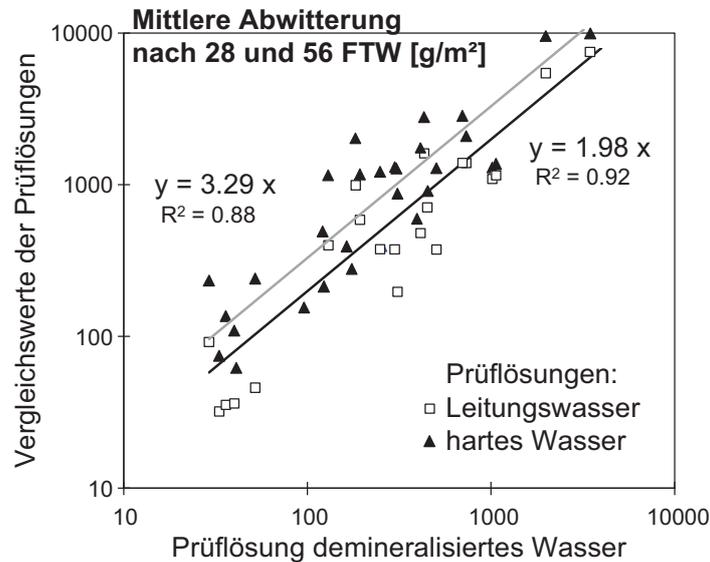


Abbildung 3.2: Gegenüberstellung der mittleren Abwitterung bei einer Prüfung mit demineralisiertem Wasser und den Vergleichswässern – Leitungswasser und hartem Wasser – nach 28 und 56 FTW, entnommen aus [Aub99].

Der Vergleich der Abwitterungen nach 28 und 56 FTW im CF-Test mit hartem Wasser und Essener Leitungswasser mit den entsprechenden Ergebnissen der Prüflösung – demineralisiertes Wasser – ergab, dass:

- der Anstieg der Schädigung unabhängig von der Abwitterungsmenge auftritt;
- beim harten Prüfwasser die Werte deutlich oberhalb der Werte mit Leitungswasser bzw. demineralisiertem Wasser liegen, vgl. Abbildung 3.2.

Ein Einfluss der Wasserqualität auf die kapillare Feuchteaufnahme und die innere Schädigung wurde nicht gefunden.

Zeitnahe Untersuchungen zur Bestimmung des Frostwiderstandes im CF-Test, im Rahmen des Ringversuches des Vereins der deutschen Zementindustrie (VDZ) [SB93], zeigten den gleichen Sachverhalt. Es wurden Untersuchungen mit verschiedenen künstlichen Leitungswässern unterschiedlicher Härte durchgeführt, deren Zusammensetzung innerhalb der Grenzwerte der deutschen Trinkwasserverordnung (TWV) lagen. Als Kriterium wurde die kumulative Abwitterungsmenge nach 56 FTW herangezogen. Schon bei der Verwendung einer Prüflösung geringer Härte wurden Abweichungen der Abwitterung von durchschnittlich 20 % in Bezug auf die Abwitterung mit demineralisiertem Wasser festgestellt. Bei Verwendung einer Prüflösung ho-

her Härte wurden Abweichungen bis zu 400 % vorgefunden. Eine Tendenz in Abhängigkeit der Betonqualität (w/z-Wert, LP-Gehalt u.Ä.) war nicht erkennbar [SB93].

Als Fazit werden folgende Schlussfolgerungen von AUBERG aus [Aub99] zitiert:

Zur Zeit kann noch keine Begründung für die höhere Schädigung durch hartes Wasser während der Frostprüfung gegeben werden. Weitere Untersuchungen mit Wässern, deren Härtegrad durch andere Erdalkalisalze eingestellt wurde, müssen aufzeigen, in welchen Konzentrationen bestimmte Salze einen Frostangriff verstärken können und ob entsprechende Maßnahmen an praktische Anforderungen gestellt werden müssen. Für eine europäische bzw. internationale Standardisierung von Prüfverfahren zur Bestimmung des Frostwiderstands anhand einer Oberflächenabwitterung ist eine genaue Festlegung der Prüflösung erforderlich. (Seite 65f)

Bei der „reinen Frostbeanspruchung“ treten sowohl Abwitterungen bzw. Absplitterungen an der Oberfläche als auch innere Gefügeschädigungen auf. Beide Mechanismen müssen nicht unbedingt gleich stark auftreten. Aus diesem Grund ist es erforderlich die Frostprüfung hinsichtlich der Messung beider Schadensbilder zu optimieren. (Seite 67)

3.2 Eigene Laboruntersuchungen und -ergebnisse

3.2.1 Untersuchte Betone

3.2.1.1 Vorüberlegungen

Die Betonrezepturen (Variationsparameter: w/z-Wert und Zementart) werden so gewählt, dass eine Schädigung infolge der Frostbeanspruchung (Versuchsparameter) unter Labor- aber auch unter realen Umweltbedingungen zu erwarten ist. Untersucht wurden Betonmischungen (Grenzbetone) für die Expositionsklasse XF3 bzw. XF1⁸ in Anlehnung an DIN EN 206-1 [din00] in Ergänzung der nationalen Anwendungsregeln in DIN 1045-2 [din98]. Damit ein Vergleich aufgrund der Zusammensetzung (w/z-Wert und Zementart) möglich ist, wurde darauf geachtet, dass die Betone eine vergleichbare Verarbeitbarkeit sowie einen vergleichbaren Gehalt an Verdichtungs- und Festigkeiten aufweisen.

⁸XF3 – Frost ohne Tausalzbelastung, hohe Wassersättigung; XF1 – Frost ohne Tausalzbelastung, mäßige Wasserstättigung

Tabelle 3.2: *Betonzusammensetzungen für Laboruntersuchungen.*

Rezeptur	Zusammensetzung				Kennwerte Frischbeton	
	Zement [kg/m ³]	Zuschlag [kg/m ³]	Wasser [kg/m ³]	w/z [-]	Ausbreitmaß [cm]	LP-Gehalt [Vol.-%]
I (Referenz)	330	1848		0.55		
II (Referenz)	295	1883		0.61		
III	360	1827	180	0.50	42±3	1.5
IV	260	1912		0.70		

3.2.1.2 Zusammensetzung, Herstellung und Probenpräparation

Eine Übersicht der eingesetzten Betonrezepturen ist in Tabelle 3.2 wiedergegeben. Angestrebt wurden Betone mit einem Ausbreitmaß der Konsistenzklasse F2/F3 sowie einem Luftporengehalt von rund 1,5 Vol.-%. Um den frostinduzierten Schädigungsprozess zu beschleunigen, wurde auf Luftporenbildner verzichtet. Alle Betone wurden mit einem konstanten Wassergehalt von 180 kg/m³ hergestellt. Als Zuschlag kamen Rheinkies 2/16 und Rheinsand 0/2 aus einem lokalen Vorkommen zum Einsatz. Für alle Mischungen wurde die gleiche Zuschlagzusammensetzung – sandreiche AB/16 Sieblinie nach DIN EN 4226 [din01] – verwendet. Als Referenzzemente wurden ein Portlandzement des Typs CEM I 32,5 R und ein Hochofenzement des Typs CEM III/B 42,5-LN/HS/NA gewählt, da Betone mit diesen Zementarten bekanntermaßen unterschiedliches Verhalten in der Abwitterung bei Frost-Tau- bzw. Frost-Tausalzbeanspruchung aufweisen [Lud96] [Aub99]. Die Referenzzemente stammen aus dem gleichen Werk (Werk I). Darüber hinaus wurde zu Vergleichszwecken ein weiterer CEM I 32,5 R und CEM III/B 42,5-LN/HS/NA eines anderen Zementwerkes einbezogen. Zusätzlich wurde jeweils eine Mischung mit einem Kompositzement des Typs CEM II/B-S 32,5 R sowie Hochofenzemente des Typs CEM III/A, der Festigkeitsklasse 32,5 und 42,5 untersucht.

Um eine eventuelle herstellbedingte Streuung der Festbetoneigenschaften auszuschließen, erfolgte die Herstellung unter gleichen Randbedingungen: Bei allen Mischungen stimmen Füllgrad, Mischgeschwindigkeit, Mischregime und Mischdauer überein. Am Frischbeton wurden 10 Minuten nach Mischende das Ausbreitmaß, die Rohdichte sowie der Luftgehalt bestimmt. Am Festbeton wurde die Druckfestigkeit nach 28 Tagen ermittelt. Hauptsächlich wurden Betone mit einem w/z-Wert von 0,55 und 0,61 untersucht.

Die Probenherstellung (geschaltete Prüffläche) und Lagerung der Betone, d.h. ein Tag in der Form, sechs Tage unter Wasser bei 20 °C und 21 Tage im Klimaraum bei 20 °C und 65 % rel. Feuchte, erfolgte in Anlehnung an die CIF-Prüfvorschrift [Set04] bzw. [BAW04]. Die Laborproben wurden, gemäß Prüfvorschrift, nach 28 (± 1) Tagen dem Frosttest (7-tägige Vorsättigung und anschließende Frost-Tau-Belastung) unterworfen.

3.2.2 Frostuntersuchung mittels CIF-Test

Zur Analyse der Betonschädigung infolge der Frost-Tau-Belastung wurde der CIF-Test verwendet. Der CIF-Test ist die prüftechnische Umsetzung des Mikroeislinnen-Modells nach SETZER, welches das Gefrierverhalten in porösen Medien beschreibt, siehe Kapitel 2. Der Test zeichnet sich gegenüber anderen Methoden insbesondere dadurch aus, dass er die in der Baupraxis relevanten Randbedingungen – der einachsige Wärme- und Feuchtetransport in Bauteilen – präzise abbildet. Im genannten Test wurden beide Schadensarten, die infolge von reiner Frostbelastung entstehen können, betrachtet: (1) Abwitterung und (2) innere Schädigung.

Der Prüfablauf ist in drei Schritte unterteilt, vgl. Abbildung 3.3 :

- I. Trockenlagerung bei 20 °C / 65 % relativer Feuchte;
Die Trockenlagerung dient zur Entleerung aller kapillaraktiven Poren zumindest an der Oberfläche, sowie dazu, eine definierte, praxiserichtete Materialfeuchte einzustellen.
- II. siebentägige kapillare Vorsättigung unter isothermen Bedingungen (20 °C);
Um einen materialspezifisch definierten Sättigungsgrad einzustellen, werden die Probekörper (110 x 150 x 70 mm³) – in Prüfbehältern auf 5 mm hohen Abstandshaltern mit der Prüffläche nach unten gerichtet – in die entsprechende Prüflösung eingetaucht. Eine seitliche Abdichtung garantiert das kapillare Saugen über eine definierte Prüffläche.
- III. Befrostung durch definierte Frost-Tau-Wechsel (FTW);
In gleicher Anordnung, wie bei der Vorsättigung, werden die Probekörper in der Prüftube der Befrostung ausgesetzt. Der Temperaturzyklus wird zur Gewährleistung einer hohen Genauigkeit über ein Temperierbad gefahren: Der einachsige Wärmestrom lässt die Proben von unten über das Prüfmedium einfrieren und wieder Tauen. Ein FTW beträgt zwölf Stunden und umfasst ein vierstündiges Abkühlen von +20 °C auf -20 °C, drei Stunden Halten bei -20 °C, ein vierstündiges Erwärmen von -20 °C auf +20 °C und ein einstündiges Halten auf +20 °C. In Abständen von vier bis sechs FTW werden die Proben hinsichtlich ihrer Oberflächenabwitterung, inneren Schädigung sowie Feuchteaufnahme untersucht.

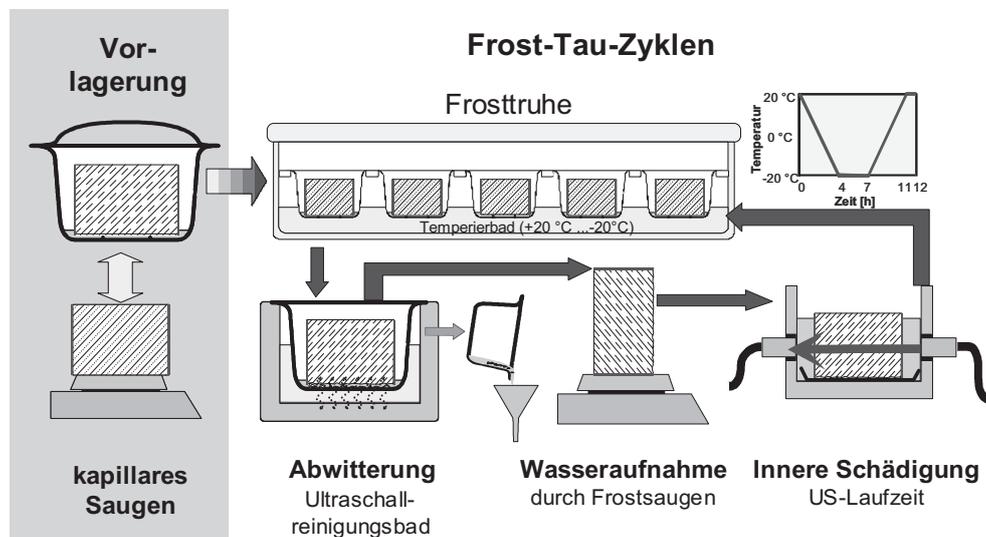


Abbildung 3.3: Ablauf der Untersuchungen im CIF-Test, dargestellt mit der Referenzmethode (die Bestimmung der inneren Schädigung erfolgt aus der Änderung der Ultraschalllaufzeit [Set06a]).

Bei der Beurteilung des Frostwiderstandes wird im standardisierten CIF-Test – nach der RILEM-Recommendation [Set04] bzw. dem BAW-Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ [BAW04] – derzeit die innere Schädigung als Hauptschädigungskriterium herangezogen. Sie ist für die Dauerhaftigkeit von Konstruktionen von großer Bedeutung. Die innere Schädigung wird anhand der Änderung des rel. dyn. E-Moduls, ermittelt aus der Ultraschalllaufzeit in 35 mm Höhe, berechnet. Die Abwitterung ist nach BAW-Merkblatt als zusätzliche Schädigungskriterium bei reinem Frostangriff definiert; sie stellt die Gesamtmenge des abgelösten/ abgeplatzen Oberflächenmaterials in g/m^2 dar. Im BAW-Merkblatt werden in Ergänzung zur der DIN EN 206-1 bzw. dem wasserbauspezifischen Regelwerk ZTV-W LB 215 [ztv00] die Abnahmekriterien⁹ beschrieben. Der dort festgelegte Abnahmezeitpunkt ist nach 28 FTW. Die Schädigungsgrenze für die innere Schädigung ist der Abfall des $\text{RDM} = 75\%$ und für die Abwitterung $1000 \text{ g}/\text{m}^2$. Die Bewertungskriterien wurden auf Basis von Untersuchungsergebnissen in AUBERG [Aub99], HEINE [Hei04], KASPAREK [Kas05], PALECKI [Pal05] und in Anlehnung an DIN EN 206-1 hergeleitet.

⁹Als Abnahmekriterium gilt die je nach Anwendungsfall festzulegende FTW-Anzahl „n“ bis zum Erreichen des Schädigungskriteriums

3.2.3 Konzept der „niedrigkonzentrierten“ Prüflösungen

3.2.3.1 Ausgangssituation und Anforderungen

Die Aufgabe besteht darin, im CIF-Test Prüflösungen einzusetzen, die Niederschlagswasser u.ä. natürliche Oberflächenwasser mit geringen – jedoch genau definierten – Salzkonzentrationen simulieren. Demgegenüber ist die reale Zusammensetzung von Niederschlag ortsabhängig und zeitabhängig. Des Weiteren existieren in der Literatur keine (normativen) Angaben zur Zusammensetzung von synthetisch hergestelltem Niederschlagswasser. Als Ausgangspunkt wurden daher die Richtwerte der deutschen Trinkwasserverordnung (TWV) [twv01] sowie jene nach DIN EN 1008: Anmachwasser für Beton [din02] ausgewählt. Die Richtwerte sind in Tabelle 3.2 zusammengefasst. Zum Vergleich sind in der gleichen Tabelle Werte der Regenwasserzusammensetzung aus [Rah00] aufgeführt.

Tabelle 3.3: Grenzwerte für einzelne Inhaltsstoffe für Trinkwasser, Zugabewasser für Beton, sowie Messergebnisse von Regenwasser aus [Rah00].

Ionen	Grenzwert n. TWV [mg/l]	Grenzwert n. DIN EN 1008 [mg/l]	Maximum [mg/l]	Regenwasser Literaturangaben	
				Mittelwert [mg/l]	Minimum [mg/l]
Kationen					
Ca ²⁺	-	-	14.8	1.04	0.18
Mg ²⁺	-	-	3.43	0.33	0.09
Na ⁺	200	¹⁾	8.86	2.14	0.61
K ⁺	-	¹⁾	k.A	k.A	k.A
Anionen					
Cl ⁻	250	500 ²⁾ (1000 ³⁾)	10.75	3.37	1.12
NO ₃ ⁻	50	500	16.69	4.21	2.76
SO ₄ ²⁻	240	2000	12.34	5.46	3.21

¹⁾ bei Anwendung von alkali-empfindlichen Zuschlägen im Beton : Alkaligehalt des Wassers (NaO-Äquivalent) < 1500 mg/l

²⁾ vorgespannter Beton/ Einpressmörtel; ³⁾ Beton mit Bewehrung

Bei der Modifikation der Prüflösung wurden folgende Punkte beachtet:

- die Zusammensetzung sowie Konzentration stellt eine eindeutige Trennung des „reinen“ Frostangriffs gegenüber anderen Angriffsarten z.B. Frost-Tausalz-, Säureangriff sicher;
- die erzielte Oberflächenschädigung soll klar d.h prüftechnisch sicher verschiedene Betonqualitäten unterscheiden;
- die Korrelation zu Praxiserfahrungen muss gegeben sein;
- die hohe Präzision des CIF-Tests bleibt gewährleistet;
- leicht wasserlösliche Salze werden bevorzugt;
- neben dem reinen Frostangriff soll durch die Prüflösung möglichst kein zusätzlicher Schadensmechanismus wie z.B ein chemischer Betonangriff angeregt oder zumindest vernachlässigbar gering gehalten werden.

3.2.3.2 Herstellung der Prüflösungen und Versuchsprogramm

Die jeweilige Prüflösung wurde durch Zugabe der entsprechenden Salze zum demineralisiertem Wasser eingestellt. Angewandt wurden Salze mit einer Reinheit pro analysi (p.a.). Die Einwaage erfolgte mit einer Genauigkeit von 0,001 g.

Im Sinne der erörterten Anforderungen an die modifizierten Prüflösungen werden drei Ansatzpunkte verfolgt:

- I. Auswirkung von Prüflösungen in Trinkwasserqualität
- II. Auswirkung der Kationen- und Anionenart in der Prüflösung
- III. Auswirkung der Äquivalentkonzentration der Prüflösung

Die Versuchsparameter sind in Abbildung 3.4 veranschaulicht. Es wurden einkomponentige sowie mehrkomponentige Prüflösungen eingesetzt. Der Begriff einkomponentige Lösung bezieht sich auf Prüflösungen, die nur mit einer Salzart hergestellt wurden, entsprechend bestehen mehrkomponentige Lösungen aus mehreren Salzarten.

Innerhalb des ersten Ansatzpunktes wird der gegenwärtige Wissenstand zum Einfluss von Leitungswasser als Prüfmedium auf die Abwitterung im CIF-Test angewandt. Untersuchungen in [SAL94] [Aub99] zeigen, dass im Vergleich zu demineralisiertem Wasser Leitungswasser in Abhängigkeit des Härtegrades zwar eine Zunahme der Abwitterungsmenge bewirkt, dennoch



Abbildung 3.4: Versuchsparemeter.

liegen keine systematischen Untersuchungen vor. Des Weiteren wird untersucht, ob Prüflösungen in Trinkwasserqualität eine ausreichende Trennschärfe verschiedener Betonqualitäten anhand der Abwitterung gewährleisten. Anhand der Erkenntnisse zur Auswirkung der Ionenart auf die Abwitterung kombiniert mit dem dritten Ansatzpunkt – Auswirkung der Äquivalentionenkonzentration – sollen Richtwerte der Prüflösungszusammensetzung im modifizierten CIF-Test abgeleitet werden.

3.2.4 Einfluss der Prüflösung auf die Prüfung des Frostwiderstandes

Stand des Wissens ist, dass gelöste Ionen die Abwitterung beeinflussen. Das folgende Kapitel behandelt die Frage der Auswirkung geringer Mengen gelöster Stoffe (Ionen) auf den Frostwiderstand von Normalbetonen. Die Untersuchungen konzentrieren sich auf den Einfluss üblicherweise vernachlässigbar geringer Ionenkonzentrationen auf die Abwitterung, im Vergleich zum standardisierten demineralisierten Wasser als Prüflösung.

Versuchsbedingungen, -parameter und Anforderungen sind im vorangegangenen Kapitel beschrieben. Die Zusammenhänge zwischen Lösungskonzentration¹⁰ sowie Lösungszusammensetzung und Abwitterung werden nun systematisch herausgearbeitet und anhand der jeweiligen Gesamtabwitterungsmengen (nach 28 FTW) sowie der Abwitterungsverläufe beschrieben. Auch der Einfluss auf die innere Schädigung wird ermittelt. Der Übersichtlichkeit wegen werden in den einzelnen Abschnitten zunächst die Ergebnisse in Abhängigkeit der Prüflösungsmodifikation im Einzelnen betrachtet.

¹⁰Der Begriff Lösungskonzentration wird dem Begriff Äquivalentionenkonzentration gleichgestellt.

3.2.4.1 Einfluss von Prüflösungen in Trinkwasserqualität auf die Frostschädigung

Im Folgenden wird der Einfluss von ein- sowie mehrkomponentigen Prüflösungen untersucht, deren Zusammensetzung den Richtwerten der deutschen Trinkwasserverordnung (TWV) entspricht.

Mengenmäßig sind die bedeutsamsten Ionen in natürlichen Wässern: Calcium, Magnesium, Natrium, Kalium, Chlorid, Sulfat und Nitrat. Aufgrund der Untersuchungsergebnisse von AUBERG [Aub99] sowie eigenen Vorüberlegungen wird als Basis das Calciumnitrat (abgekürzt mit: CN) gewählt. CN wirkt als Erstarrungsbeschleuniger im Frischbeton. Eine primäre schädigende Wirkung auf Festbeton wurde bisher nicht abgeleitet [Aub99]. AUBERG schließt unter den vorhandenen (prüftechnischen) CIF-Randbedingungen eine chemische Schädigung durch CN bei niedriger Konzentration aus.

In mehrkomponentigen Prüflösungen wurden Ionen wie Natrium, Magnesium, Chlorid und/oder Sulfat beigefügt. Deren Gehalte liegen durchgehend unter den Grenzwerten der TWV. Stand des Wissens ist, dass alle diese Ionen bei ausreichender Konzentration eine chemisch schädigende Wirkung auf Festbeton haben können. Die beigefügten Mengen sind jedoch um ein Vielfaches niedriger als die Grenzwerte für Anmachwasser bei der Betonherstellung nach DIN EN 1008 [din02].

In Abbildung 3.5 ist eine Übersicht der verwendeten Prüflösungen illustriert. Details der Zusammensetzungen sind den Anhang, Tabelle A.1 zu entnehmen.

Ferner werden Untersuchungen mit nicht TWV-konformen Prüflösungen durchgeführt bzw. mit Lösungen, deren Nitrat-Gehalt die Grenzwerte der TWV überschreiten, aber dennoch unter den Grenzwerten der DIN EN 1008 sind. Dabei wird das Ziel verfolgt, die Äquivalentionenkonzentration durch Zugabe von CN-Salz zu erhöhen. In der TWV wird für NO_3^- ein Grenzwert von 50 mg/l festgelegt, da das per se unschädliche Nitrat im menschlichen Verdauungstrakt zu schädlichem Nitrit umgewandelt werden kann. Nach DIN EN 1008 sind für die Betonherstellung Wässer mit einem Nitrat-Gehalt bis 500 mg/l brauchbar.

Entsprechend dem gültigen Abnahmekriterium für reinen Frostangriff des BAW-Merkblattes „Frostprüfung“ in Höhe von 1000 g/m² nach 28 FTW wird hier angestrebt, dass die durch niedrig konzentrierte Lösungen hervorgerufene Abwitterung eine Beurteilung anhand dieses Kriteriums erlaubt. Einerseits ist der Mittelwert der Abwitterungstiefe mit 1500 g/m² < 1 mm und damit unter dem relevanten Werten einer inneren Schädigung. Andererseits basiert die 1000 g/m²-Grenze auf den Präzisionsdaten der Ringversuche, die zeigen, dass mit zunehmender mittlerer Abwitterung der Variationskoeffizient abnimmt [Aub99] [Set05]. Die Beurteilung der äußeren Schädigung aufgrund des abgewitterten Materials ist am präzisesten bei Abwitterungsmengen zwischen 1000–2000 g/m². Bei Abwitterungen > 3000 g/m² muss beachtet wer-

		Prüflösung gemäß TWV		Prüflösung gemäß DIN EN 1008	
einkompo.	Calciumnitrat		Calciumnitrat		
	PL I-CN- verschiedene Äquivalentkonzentrationen		PL II-CN- verschiedene Äquivalentkonzentrationen		
mehrkomponentige	Calciumnitrat + Natriumchlorid				
	PL I-a-I	(0.0018)	PL II-a-I	(0.0086)	
	Calciumnitrat + Natriumchlorid + Magnesiumsulfat				
	+ Calciumchlorid		+ Calciumchlorid		
	PL I-b-I	(0.0058)	PL II-b-Ia	(0.0058)	
	PL I-b-II	(0.0076)			
	PL I-b-III	(0.0087)	+ Magnesiumchlorid		
			PL II-b-Ib	(0.0058)	

Abbildung 3.5: Variationen der Prüflösungen gemäß TWV und DIN EN 1008. Details der Zusammensetzung sind in der Tabelle A.1 aufgeführt.

den, dass aufgrund der starken Schädigung der Betonprüfkörper zusätzlich die Ränder der Probekörper überproportional abwittern; es ist keine eindeutige Bezugsfläche mehr gegeben und damit eine wesentliche Annahme der Auswertung der CDF-/CIF-Prüfung verletzt. AUBERG hat außerdem in seinen Untersuchungen festgestellt, dass die Abwitterungsmengen beträchtlich vom Härtegrad (entspricht dem Erdalkaligehalt) der Prüflösung abhängen: Bei Verwendung von Leitungswasser als Prüfmedium anstatt von demineralisiertem Wasser stieg die Vergleichsstreuung zwischen den Prüfinstituten an, da sie verschiedene Leitungswässer benutzten. Die Wiederholstreuung ist im CIF-Test relativ gering und wird im Wesentlichen durch die Materialstreuung des Betons bestimmt. Auch die Vergleichsstreuung ist bei demineralisiertem Wasser – oder wie im CDF-Test bei einer dreiprozentigen NaCl-Lösung – klein. Die Schwankungen bedingt, durch den Härtegrad der Prüflösung, zeigen, wie genau die Prüflösung definiert sein muss. Dies bedeutet: Um eine geeignete Prüflösung überhaupt definieren zu können, muss demnach zuerst der primäre Einflussparameter der gelösten Stoffe in der Prüflösung herausgefiltert werden. Damit anschließend eine gesicherte Beurteilung unterschiedlicher Betonqualitäten bezüglich der äußeren Schädigung erfolgen kann, sollte die Abwitterung nach 28 FTW zwischen 1000–2000 g/m² liegen.

In Abbildung 3.6 ist die Abwitterung bei CEM I-Beton (2 Prüfserien, gleicher Betonzusammensetzung) in Abhängigkeit der Prüflösung dargestellt. Unabhängig von der Prüflösung ist ein progressiver Abwitterungsverlauf festzustellen. Zugleich ist eine Tendenz im Anstieg der Menge an abgewittertem Material in Abhängigkeit von der Äquivalentionenkonzentration der Prüflösung abzuleiten. Dies gilt auch für CEM III-Betone, siehe Abbildung 3.7. Die Äquivalentionenkonzentration bewirkt gegenüber demineralisiertem Wasser eine deutliche Erhöhung der Abwitterungsrate. Auch eine Unterscheidung der Betonqualität in Abhängigkeit des w/z-Wertes ist gegeben.

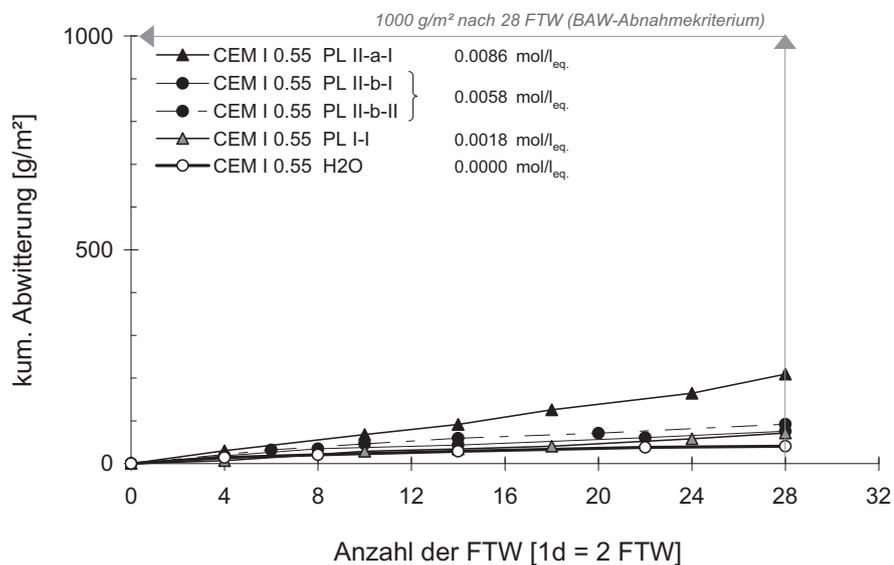


Abbildung 3.6: Abwitterungsverläufe beim CEM I-Beton in Abhängigkeit der verwendeten Prüflösung; DW – demineralisiertes Wasser, PL I – Prüflösung gemäß TWV, PL II – Prüflösung gemäß DIN EN 1008.

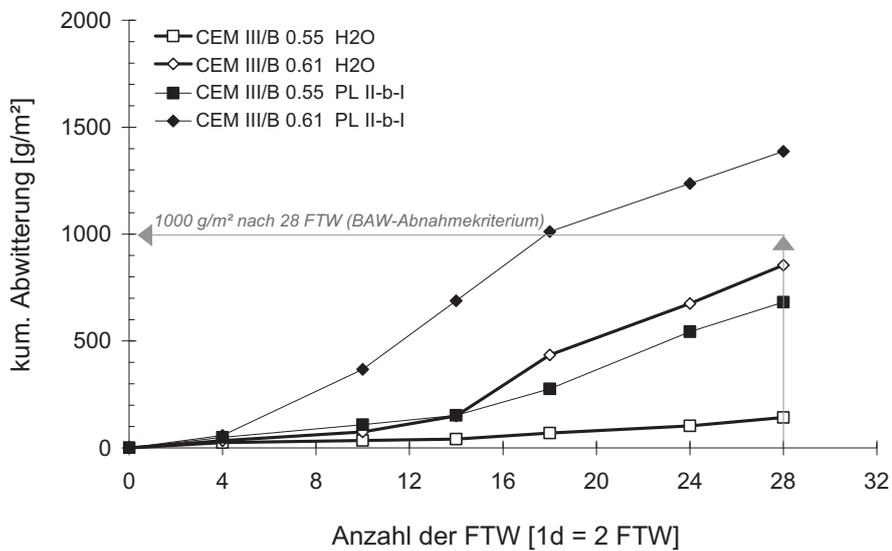


Abbildung 3.7: Abwitterungsverläufe beim CEM III/B-Beton in Abhängigkeit der verwendeten Prüflösung; DW – demineralisiertes Wasser, PL II – Prüflösung gemäß DIN EN 1008.

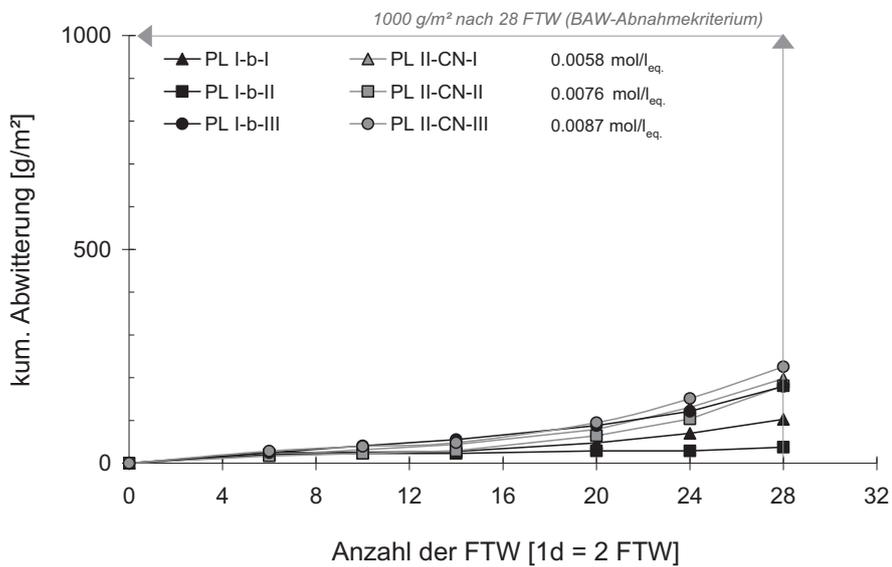


Abbildung 3.8: Abwitterungsverläufe beim CEM I-Beton (w/z-Wert 0,61) in Abhängigkeit der Äquivalenzkonzentration der Prüflösung; PL I-b – mehrkomponentige Prüflösung gemäß TWV, PL II-CN – einkomponentige CN-Lösungen gemäß DIN EN 1008.

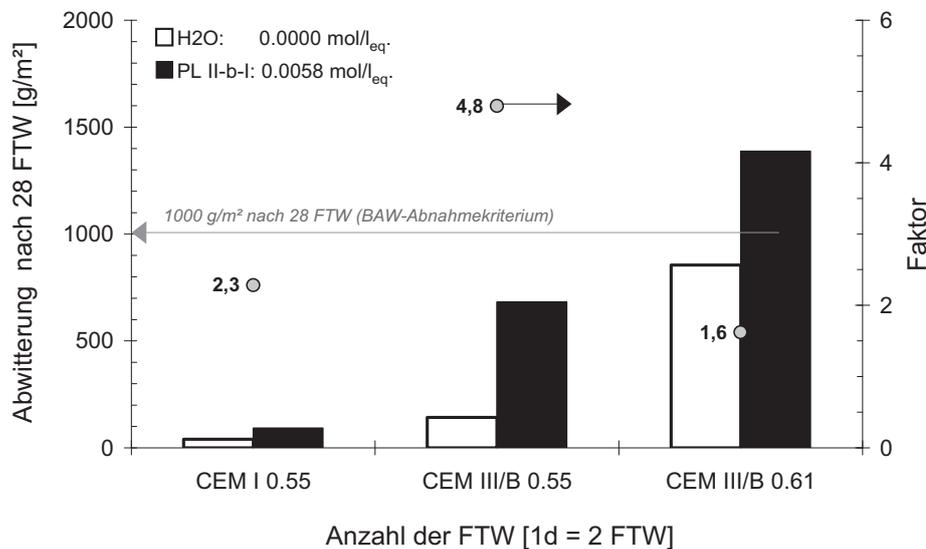


Abbildung 3.9: Gegenüberstellung der Abwitterung nach 28 FTW bewirkt mit demineralisiertem Wasser ($0,000 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$) und PL II-b-I ($0,0058 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$) in Abhängigkeit der Betonqualität.

In einer weiteren Versuchsreihe sind im modifizierten CIF-Test ein- und mehrkomponentige Prüflösungen eingesetzt worden. Der Versuchsparameter ist die gleiche Äquivalentenkonzentration jeweils einer ein- und einer mehrkomponentigen Prüflösung, im Bereich von $0,006$ bis $0,009 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$. Der Nitrat-Gehalt der CN-Lösungen liegt unter dem maximal zugelassenen Wert nach DIN EN 1008. Die Zusammensetzung der mehrkomponentigen Prüflösungen entspricht der Trinkwasserqualität. Des Weiteren ist das Verhältnis der (Salz-)Ionen in der Prüflösung immer gleich; geändert wird praktisch nur die Menge bzw. die Äquivalentenkonzentration der Prüflösung, siehe Anhang, Tabelle A.1.

In Abbildung 3.8 ist das Versuchsergebnis für einen CEM I-Beton mit w/z-Wert 0,61 dargestellt. Es ist kein Einfluss der Prüflösungszusammensetzung erkennbar. In der sehr geringen Abstufung der Konzentration ist die Äquivalentenkonzentration der maßgebliche Faktor. Unabhängig von der Wahl der Beton- sowie Prüflösungszusammensetzung bewirkt vorerst die Erhöhung der Äquivalentenkonzentration einen Anstieg der Abwitterung. Zum Beispiel erhöht die Prüflösung mit einer Äquivalentenkonzentration von $0,0058 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$ die Abwitterung nach 28 FTW um das rund zwei bis fünffache im Vergleich zu demineralisiertem Wasser, siehe Abbildung 3.9.

Zentrale Erkenntnisse, die aus den vorgestellten Ergebnissen abgeleitet werden können, sind:

- Relativ geringe Mengen an Ionen in der Prüflösung ($< 0,01 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$!) im Vergleich zum demineralisierten Wasser ($0,000^{11} \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$) erhöhen die Abwitterungsrate.
- Die stärkste Einflussgröße auf den Abwitterungsanstieg ist vorerst die Lösungs- bzw. Äquivalentionenkonzentration.
- Die unterschiedliche Ionenzusammensetzung beeinflusst das Ergebnis weit geringer und nicht eindeutig. Für weitere Untersuchungen werden daher einkomponentige bzw. CN-Prüflösungen gewählt. Die Herstellung/Handhabung ist einfacher und damit mit geringerem Risiko behaftet.
- Obwohl Betonqualitätsunterschiede feststellbar sind, liegt die ermittelte Abwitterung deutlich unter dem zur Beurteilung optimalen Bereich zwischen 1000 und 2000 g/m^2 nach 28 FTW. Um gesicherte Aussagen bezüglich der Abwitterung machen zu können, muss die Angriffsstärke moderat erhöht werden.

3.2.4.2 Einfluss der Äquivalentkonzentration der Prüflösung auf die Frostschädigung

Auswirkungen auf die äußere Schädigung

Die Untersuchungen werden mit einer „reinen“ CN-Prüflösung, dessen Äquivalentionenkonzentration variiert wird, durchgeführt. Auf die Konzentrationsvariation mehrkomponentiger Prüflösungen wird verzichtet, da eventuelle Wechselwirkungen zugefügter Ionen nicht auszuschließen sind. Die im Folgenden benutzte Calciumnitratlösung (CN) wird außerdem, wenn überhaupt, nur einen geringen und untergeordneten rein chemischen Angriff verursachen.

Um den Einfluss der Äquivalentionenkonzentration der Prüflösung auf die Abwitterung grundlegend zu definieren, ist es sinnvoll Untersuchungen an Betonzusammensetzungen durchzuführen, bei denen ein Schaden zu erwarten ist. Daher wird ein CEM III/B-Beton mit $w/z = 0,55$ gewählt. Zum einen ist dies eine Betonqualität, die unter praxisnahen Bedingungen (siehe Kapitel 4) nach kurzer Expositionszeit (i.d.R. nach nur einem Winter) eine beträchtliche oberflächliche Schädigung zeigte; zum anderen erfüllt die Zusammensetzung nicht die derzeitige Anforderung nach DIN EN 206 für die Exposition XF3; es ist ein Grenzbeton. Das heißt die gewählte Betonzusammensetzung sollte den modifizierten CIF-Test nicht bestehen; die Abwitterung nach 28 FTW soll $\geq 1000 \text{ g/m}^2$ sein.

¹¹theoretischer Wert

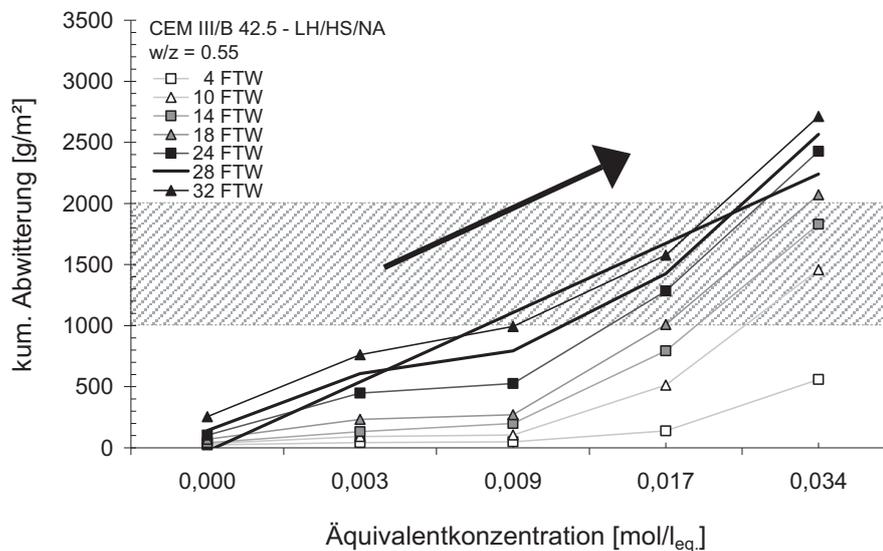


Abbildung 3.10: Entwicklung der Abwitterung über die Prüfdauer in Abhängigkeit der Äquivalentionenkonzentration der CN-Prüflösung; CEM III/B-Beton, $w/z = 0,55$. Exemplarisch ist im Diagramm die Trendlinie für die Abwitterung nach 28 FTW dargestellt.

In Abbildung 3.10 ist die Gesamtabwitterung nach den jeweiligen FTW über die Äquivalentionenkonzentration der CN-Prüflösung abgebildet. Im untersuchten Konzentrationsbereich steigt die Abwitterung in Abhängigkeit der Äquivalentionenkonzentration näherungsweise linear. In Bezug auf die Anforderung, dass die Abwitterung nach 28 FTW größer als 1000 g/m^2 sein soll, sind CN-Äquivalentionenkonzentrationen von $>0,01 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$ notwendig. Folglich wird in anschließenden Untersuchungen die Äquivalentionenkonzentration erhöht, um eine entsprechende Abwitterungsrate hervorzurufen. Parallel dazu wird ein CEM I-Beton gleicher Rezeptur untersucht. Dieser zeigte unter Praxisbedingungen im Rahmen des Feldversuches im Vergleich zu den CEM III/B-Beton praktisch keine Schädigung. An dieser Stelle sei noch angemerkt, dass in EN 206-1 und DIN 1045-2 keine Anforderungen bzw. Beschränkungen für die Exposition XF3 sowie XF1 bezüglich der Anwendung für Portlandzemente (CEM I), Portlandhüttenzemente (CEM II) und Hochofenzemente (CEM III) angeben sind. Nach ZTV-W LB 219 [ztv96] erfordert die Anwendung von CEM III/A keine und von CEM III/B eine besondere Zustimmung des Auftraggebers.

Bei gleicher Betonzusammensetzung unterscheiden sich die Abwitterungsverläufe in Abhängigkeit von der verwendeten Zementart, vgl. Abbildung 3.11. Der CEM III-Beton hat eine ausgeprägte Anfangsabwitterung und nimmt dann einen degressiven Verlauf. Beim CEM I-Beton tritt ein progressiver Verlauf auf. Auch bei dieser Abstufung der Äquivalentionenkonzentration

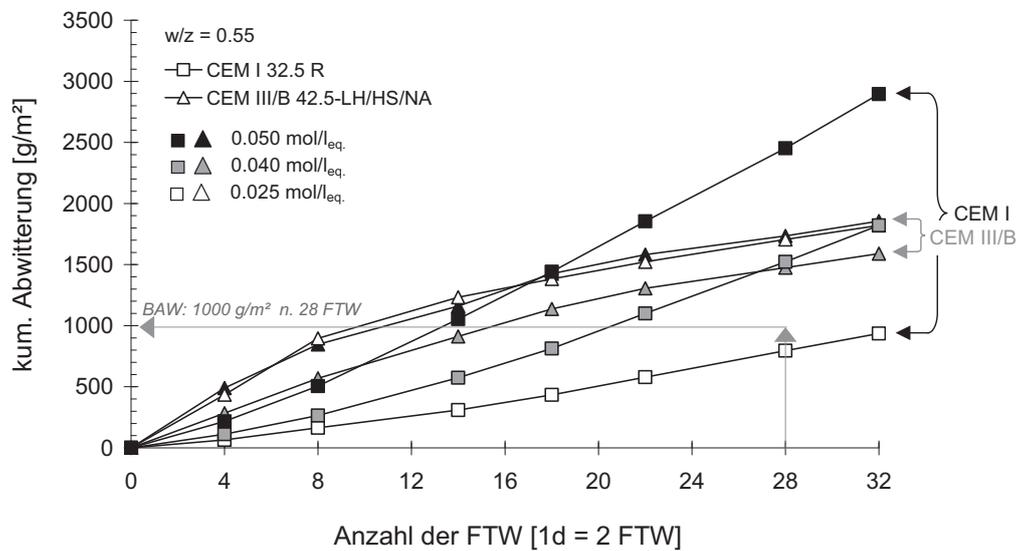


Abbildung 3.11: Vergleich der Abwitterungsverläufe von CEM I- und CEM III/B-Betonen in Abhängigkeit der verwendeten Prüflösung.

sind die Abwitterungsverläufe qualitativ unabhängig von der Prüflösung. Dies ist wesentlich in Hinblick auf die oft diskutierten Prüfrandbedingungen und Zeitraffereffekte in einem Prüfverfahren, die zur Verfälschung des Angriffs und somit zur falschen Beurteilung führen können. Konkret im vorliegenden Fall heißt das: Unabhängig von der Änderung der Äquivalentenkonzentration der Prüflösung wird im modifizierten CIF-Test immer der derselbe Schadensablauf hervorgerufen, es ist also nur eine Frage der Intensität bzw. des Zeitraffereffektes. Weiter ist festzustellen, dass die Aufspreizung der Abwitterungsverläufe in Abhängigkeit der Konzentration bei CEM I-Beton im Vergleich zum CEM III-Beton größer ist. Das bedeutet, dass der CEM I-Beton empfindlicher auf eine Konzentrationsänderung im untersuchten Bereich reagiert. Dagegen ist der Effekt der Konzentration beim CEM III/B-Beton geringer.

Da die Abwitterungsverläufe der Betone mit Portlandzement (CEM I) und mit Hochofenzement (CEM III/B) praktisch zwei „Extreme“ abbilden, wird die Auswirkung der Äquivalentenkonzentration der CN-Prüflösung auf die Abwitterung dieser beiden Zementarten detaillierter untersucht. Die Ergebnisse sind in den folgenden Diagrammen veranschaulicht.

Auf Abbildung 3.12 ist die Abwitterung von CEM I-Beton mit w/z-Wert 0,55 über die Anzahl der FTW für jede Äquivalentenkonzentration einzeln dargestellt. Die Abstufung der Äquivalentenkonzentration erfolgte im Bereich von 0,000 (demineralisiertes Wasser) bis 0,100 mol/leq.,

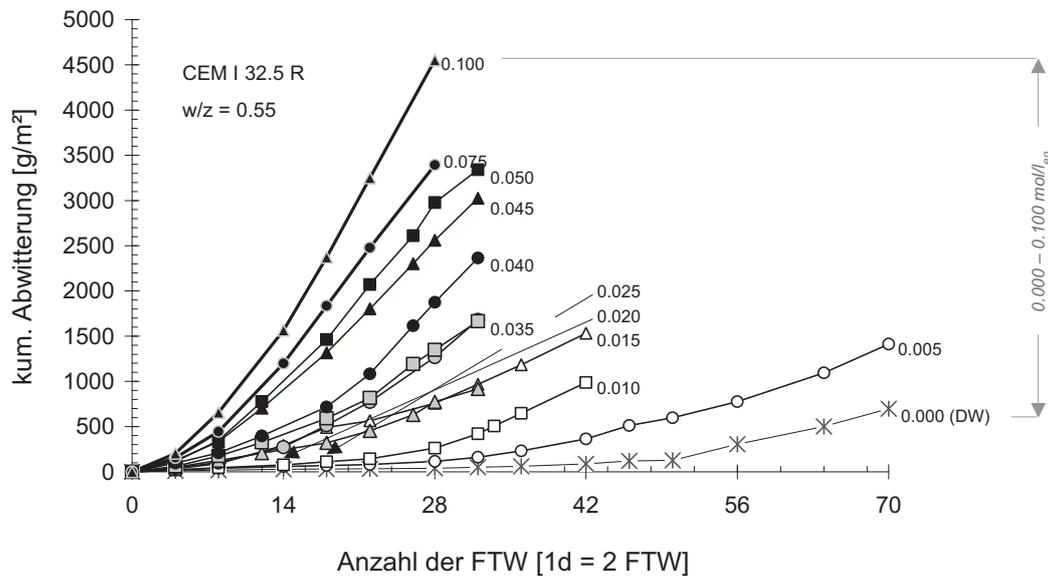


Abbildung 3.12: Abwitterungsverläufe beim CEM-I-Beton in Abhängigkeit der verwendeten CN-Prüflösung; $c_{\text{eq.}} = 0,000\text{--}0,100 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$.

wobei demineralisiertes Wasser als Referenzlösung betrachtet wird. Die Staffelung der Abwitterungsmengen in Abhängigkeit der Konzentration kann am Beispiel der Abbildung 3.12 deutlich verfolgt werden: Der Schädigungsgrad nimmt mit zunehmender CN-Konzentration bedeutend zu. Darüber hinaus steigt die Abwitterung mit der Anzahl der FTW erheblich an. Der aus CDF-Untersuchungen bekannte typische progressive Abwitterungsverlauf für Betone mit Portlandzement kann auch hier abgeleitet werden. Dieser ist umso ausgeprägter, je höher die Äquivalentkonzentration der CN-Prüflösung ist. Ab einer Konzentration von $\geq 0,050 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$ tritt ein nahezu linearer Verlauf auf. Allerdings fängt bei demineralisiertem Wasser und der Konzentration $c_{\text{eq.}} = 0,005 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$ die Schädigung (ansteigender Abwitterungsverlauf) praktisch erst ab 28 FTW an. Vergleicht man die Abwitterungsmengen, so sind diese klar voneinander zu differenzieren. Bei Verwendung der CN-Prüflösung $c_{\text{eq.}} = 0,005 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$ nimmt die Abwitterung im Vergleich zu demineralisiertem Wasser um knapp das Doppelte zu.

Wie eingangs bereits beschrieben, werden in der vorliegenden Arbeit die Untersuchungsergebnisse nach den Vorgaben des BAW-Merkblattes „Frostprüfung“ beurteilt. In Abbildung 3.13 ist die Abwitterungssteigerung nach 28 FTW im Vergleich zu demineralisiertem Wasser (Referenzprüflösung, theoretisch $c_{\text{eq.}} = 0,000 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$) dargestellt. Das Balkendiagramm verdeutlicht noch einmal, wie mit geringfügig zunehmender CN-Konzentration die Abwitterungsmenge vergleichsweise signifikant zunimmt. Die Spannbreite der Steigerungsrate beträgt rd. 10 bei $0,010 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$ bis rd. 105 bei $0,10 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$, das heißt eine zehnfache Erhöhung der Äquivalent-

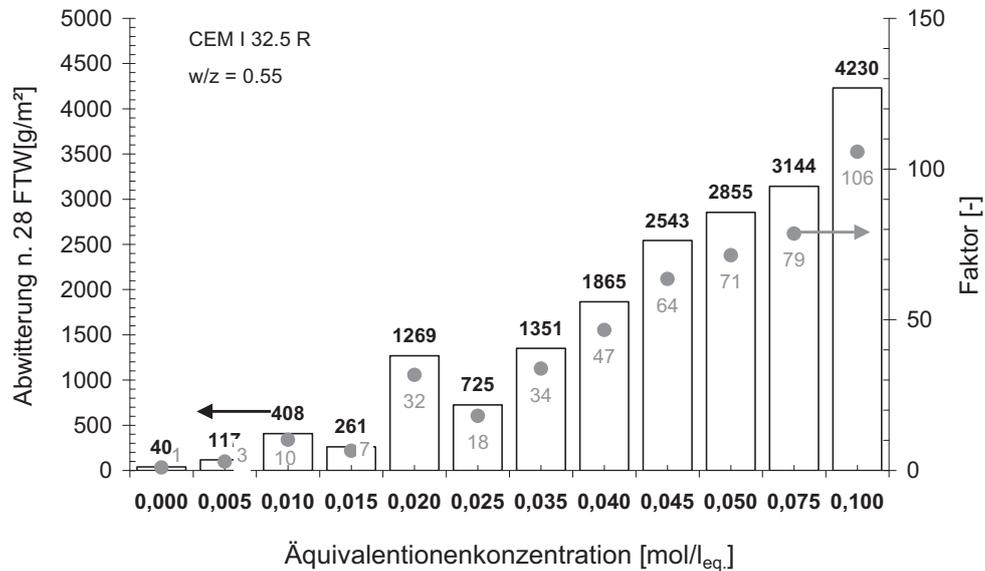


Abbildung 3.13: Abwitterungsmenge nach 28 FTW und Zunahmefaktor im Vergleich zur Abwitterung ermittelt mit demineralisiertem Wasser (0,000 mol/leq.) in Abhängigkeit der Äquivalentenkonzentration der CN-Prüflösung; CEM I-Beton, w/z = 0,55.

konzentration bewirkt eine zehnfache Erhöhung der Abwitterung. An dieser Stelle darf jedoch nicht außer Acht gelassen werden, dass eine Äquivalentenkonzentration von 0,010 mol/leq. nur in etwa 0,08 M.-% Calciumnitrat entspricht. Die dazu äquivalente Menge von Natriumchlorid wäre rd. 0,06 M.-% NaCl, und dementsprechend sind 0,100 mol/leq. rd. 0,6 M.-% NaCl. Der Vergleich mit diesem in der Baupraxis üblichen Salz soll noch klarer die Auswirkung der äußerst geringen Mengen an beigefügten Ionen in der Prüflösung hervorheben, die trotzdem zu einem erheblichen Abwitterungsanstieg führen.

Die Abwitterung nach 28 FTW nimmt nahezu linear mit der Äquivalentenkonzentration der CN-Prüflösung zu, siehe Abbildung 3.14. Interessant ist, dass unabhängig von der Prüflösungskonzentration der progressive Abschnitt im Abwitterungsverlauf nach einer Abwitterungsrate von 500 g/m² eintritt, vgl. Abbildung 3.12. Da diese Abwitterungsrate in etwa 0,2 mm Abwitterungstiefe entspricht, wird im Folgenden der verzögerte Abwitterungsverlauf – Abschnitt I – der Randschicht und der progressive Abwitterungsverlauf – Abschnitt II – der Kernschicht der Probekörper zugeordnet.

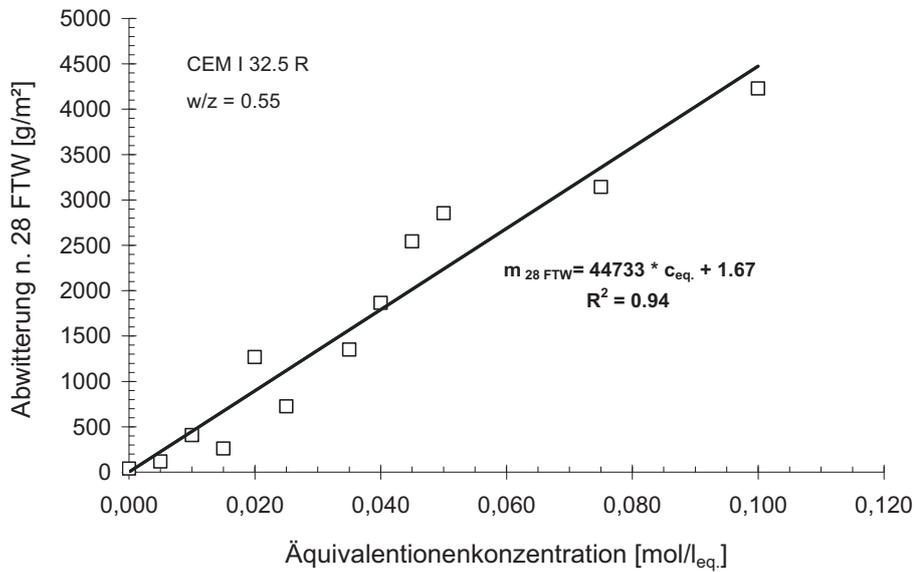


Abbildung 3.14: Zusammenhang zwischen Abwitterungsmenge nach 28 FTW und Äquivalentkonzentration der CN-Prüflösung; CEM I-Beton, w/z = 0,55.

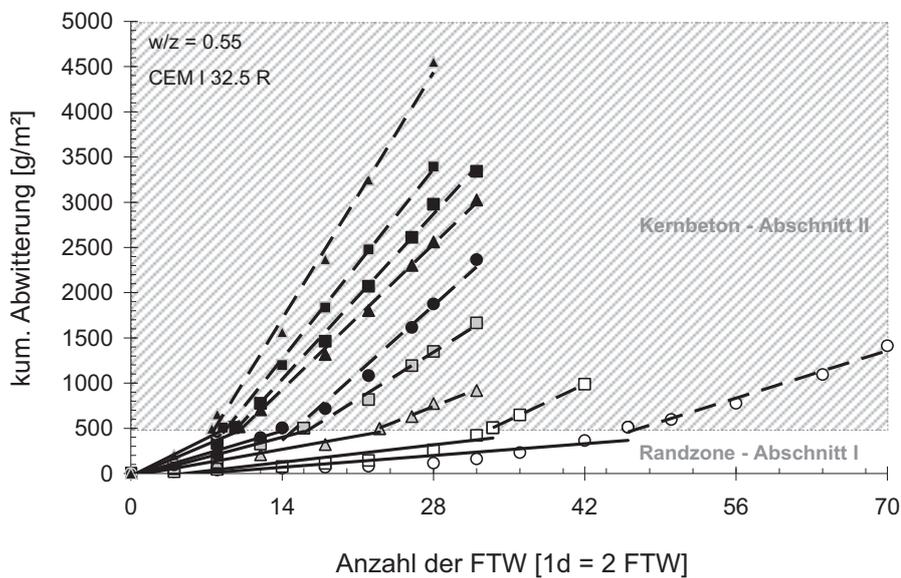


Abbildung 3.15: Aufteilung der Abwitterungskurve in Abhängigkeit der CN-Prüflösung; CEM I-Beton, w/z = 0,55.

Abbildung 3.15 zeigt den Abwitterungsverlauf in Abhängigkeit der Prüflösung nach den jeweiligen Bereichen im Beton und damit dem jeweiligen Abschnitt getrennt. Die Abwitterung wird bei der CIF-Prüfung zu einer bestimmten Anzahl an FTW ermittelt, daher wird die entsprechende FTW-Anzahl bis zum Erreichen des Schwellwertes mittels linearer Interpolation zwischen zwei benachbarten Messwerten berechnet. Zunächst kann beobachtet werden, dass sich die Anzahl der FTW bis zum Erreichen des Schwellwertes zeitlich umso mehr nach hinten verschiebt, je geringer die Äquivalentkonzentration ist. Außerdem sind eindeutig die unterschiedlichen Tendenzen der Abwitterungsverläufe für den Rand- und Kernbeton zu erkennen. Abbildung 3.16 zeigt die Korrelation zwischen der Steigung Δ Abwitterung zu Δ FTW und der jeweiligen Äquivalentkonzentration getrennt nach Rand- und Kernbeton. Vergleicht man die beiden Trendlinien, so nimmt mit steigender CN-Konzentration die Abwitterungsrate für den Kernbeton deutlich ausgeprägter zu. Die Ergebnisse legen nahe, dass die Ausbildung der zwei Abwitterungsabschnitte der Carbonatisierung zuzuordnen sind. Die carbonatisierungsbedingte Änderung der Betonrandzone verzögert die äußere Schädigung, siehe Abschnitt 3.2.6.2. Wenn aber dieser dünne, carbonatisierte Betonrand abwittert, dann nimmt das Fortschreiten der Ab-

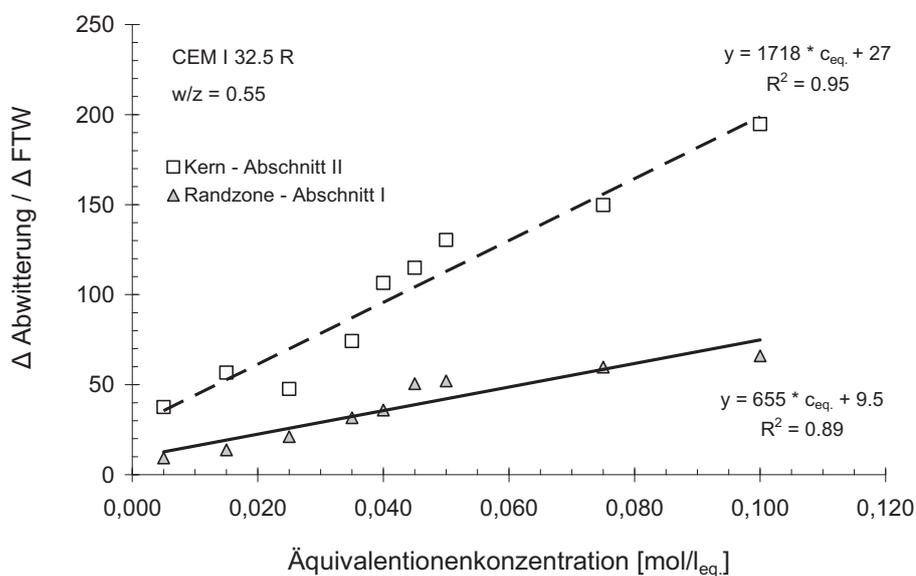


Abbildung 3.16: Zusammenhang zwischen Abwitterungsmenge nach 28 FTW und Äquivalentkonzentration der CN-Prüflösung getrennt nach Rand- (Abschnitt I) und Kernschicht (Abschnitt II); CEM I-Beton, $w/z = 0,55$.

witterung im Betonkern deutlich zu. Unter der Voraussetzung einer konstanten Abwitterungsrate der carbonatisierten Randschicht könnte die 500 g/m^2 -Marke (rd. $0,2 \text{ mm}$) als Grenze zwischen carbonatisiertem Betonrand und nicht carbonatisierten Betonkern angenommen werden.

Die Ergebnisse lassen erkennen, dass:

- die Intensität der Abwitterung nach 28 FTW im untersuchten Bereich nahezu linear in Abhängigkeit der CN-Konzentration der Prüflösung zunimmt (Abbildung 3.14);
- die Äquivalentenkonzentrationsstärke den Abwitterungsgrad der Rand- und der Kernschicht unterschiedlich beeinflusst (Abbildung 3.16).

Entsprechend ist auch ein CEM III/B-Beton mit repräsentativen Prüflösungsvariationen mittels modifiziertem CIF-Test untersucht worden. Die Ergebnisse sind in den Abbildungen 3.17–3.20 dargestellt.

Abbildung 3.17 zeigt die Entwicklung der Abwitterung in Abhängigkeit der Äquivalentkonzentration. Erwartungsgemäß, nimmt mit ansteigender Lösungskonzentration die Intensität der Abwitterung zu. Es ist wieder eine klare Abhängigkeit von der Äquivalentkonzentration festzustellen, vgl. Abbildung 3.18. Diese lässt sich im Gegensatz zum CEM I-Beton mit einer Quadratfunktion beschreiben. Die Abwitterungsmenge nimmt im Vergleich zu demineralisiertem Wasser (DW) bis um das 25-fache zu, siehe Abbildung 3.19. Wieder können zwei Abschnitte im Abwitterungsverlauf beobachtet werden; im Vergleich zum CEM I-Beton die gegenläufige Tendenz: Abschnitt I – progressive Anfangsabwitterung in der Randzone und Abschnitt II – verzögerte Abwitterungsverlauf in der Kernschicht. In Übereinstimmung mit der Literatur ist der Knickpunkt im Abwitterungsverlauf der CEM III-Betone sehr ausgeprägt. In CDF-Untersuchungen von AUBERG [Aub99] und LUDWIG [Lud96] korreliert der Knickpunkt der Abwitterungskurve bzw. die erhöhte Anfangsabwitterung und die entsprechenden Abwitterungstiefe mit der Carbonisierungstiefe. Die hier gemessene Carbonisierungstiefe, ermittelt vor Prüfbeginn (Probenalter 28 d) streute ortsabhängig zwischen $0,7$ bis $2,1 \text{ mm}$. Daher wird die Dicke der Randschicht mit der minimal gemessenen Carbonisierungstiefe gleichgesetzt. Diese entspricht in etwa einer Abwitterung von 1700 g/m^2 .

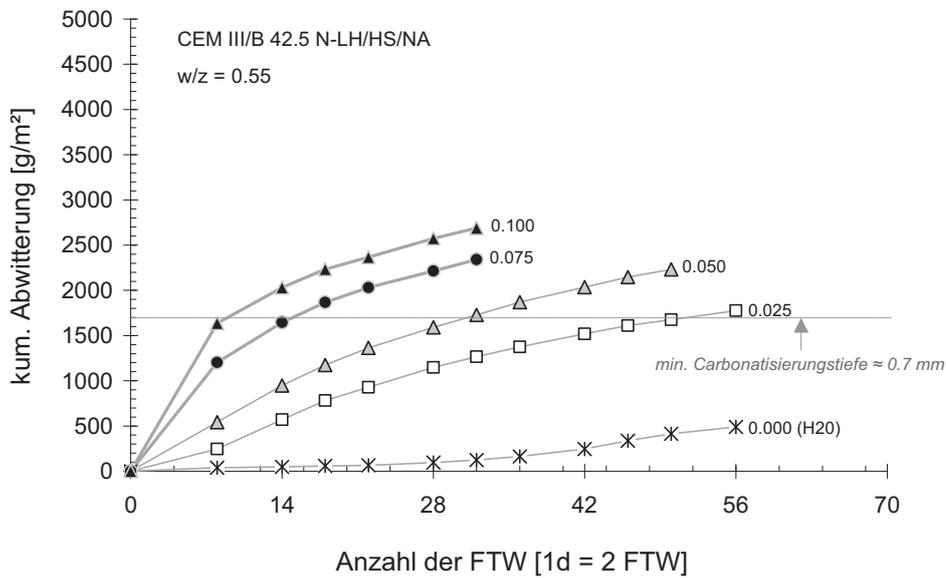


Abbildung 3.17: Abwitterungsverläufe beim CEM III/B-Beton in Abhängigkeit der verwendeten CN-Prüflösung; $c_{eq.} = 0,000-0,100 \text{ mol/l}_{eq.}$.

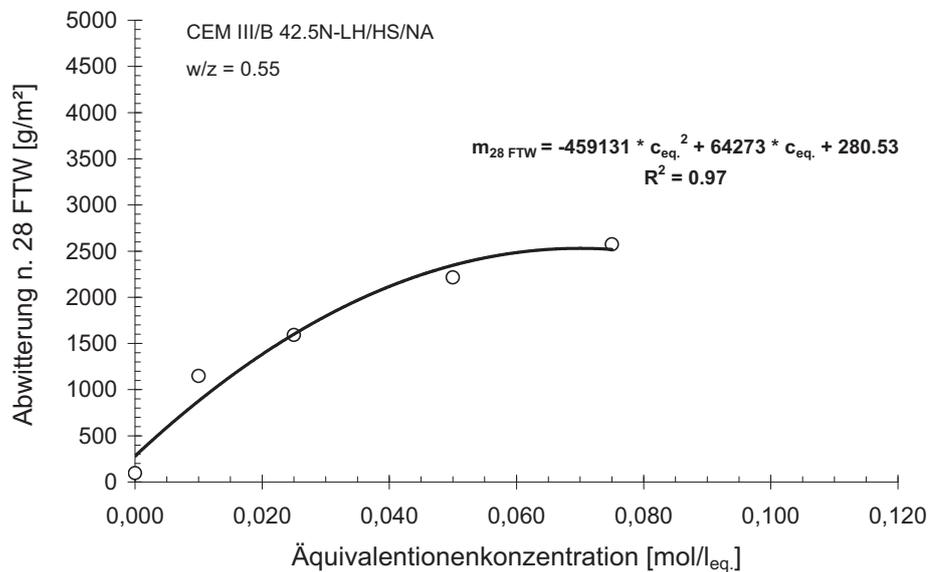


Abbildung 3.18: Zusammenhang zwischen Abwitterungsmenge nach 28 FTW und Äquivalentenkonzentration der CN-Prüflösung; CEM III/B-Beton, w/z = 0,55.

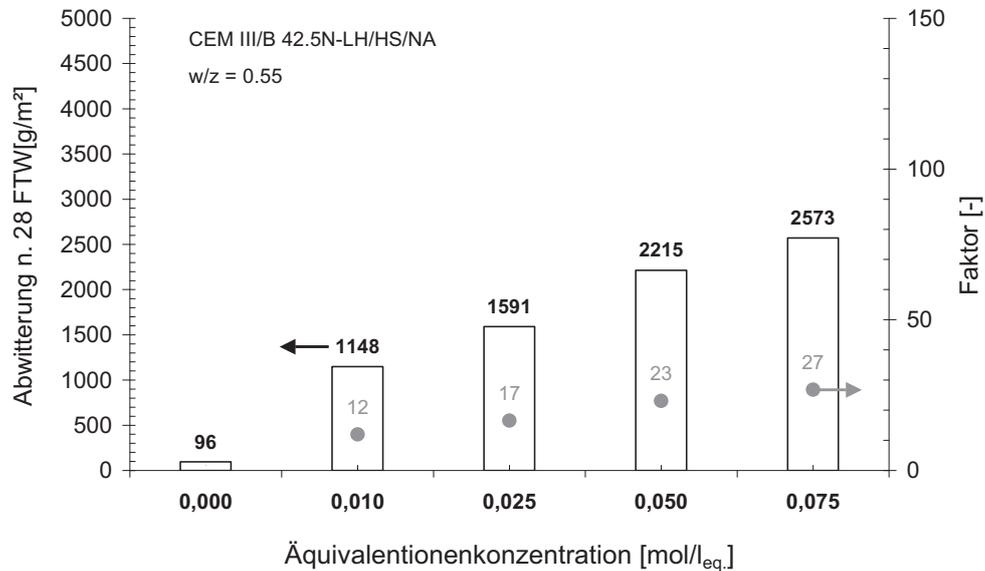


Abbildung 3.19: Abwitterungsmenge nach 28 FTW und Zunahmefaktor im Vergleich zur Abwitterung ermittelt mit demineralisiertem Wasser (0,000 mol/l_{eq.}) in Abhängigkeit der Äquivalentenkonzentration der CN-Prüflösung; CEM III/B-Beton, w/z = 0,55.

In Abbildung 3.20 ist die Korrelation zwischen der Steigung im Abwitterungsverlauf (Δ Abwitterung / Δ FTW) und der jeweiligen Äquivalentenkonzentration getrennt nach Schichten abgebildet. Die nahezu geringe Steigung der Trendlinie für den Kernbeton zeigt, dass der Einfluss der Konzentration auf die Abwitterung in diesem Bereich beim CEM III-Beton relativ gering ist. Die Randzone beeinflusst das Abwitterungsverhalten der untersuchten Betone bis rund 14 FTW. Des Weiteren ist interessant, dass der Abwitterungsverlauf nach diesem Zeitpunkt bis zum Ende der Untersuchungen nahezu unabhängig von der Äquivalentenkonzentration verläuft, vgl. Abbildung 3.17.

Festzuhalten ist, dass aus den vorliegenden Ergebnissen, unabhängig von der Ursache für diese Phänomene (siehe Abschnitt 3.2.6.2), eine unterschiedliche Schädigungsgeschwindigkeit in der Rand- und Kernschicht abgeleitet werden kann; und zwar ist diese sowohl für die Rand- wie auch für die Kernschicht abhängig von der Äquivalentenkonzentration. Grundsätzlich nimmt die Schädigungsintensität mit zunehmender Konzentration der Prüflösung zu.

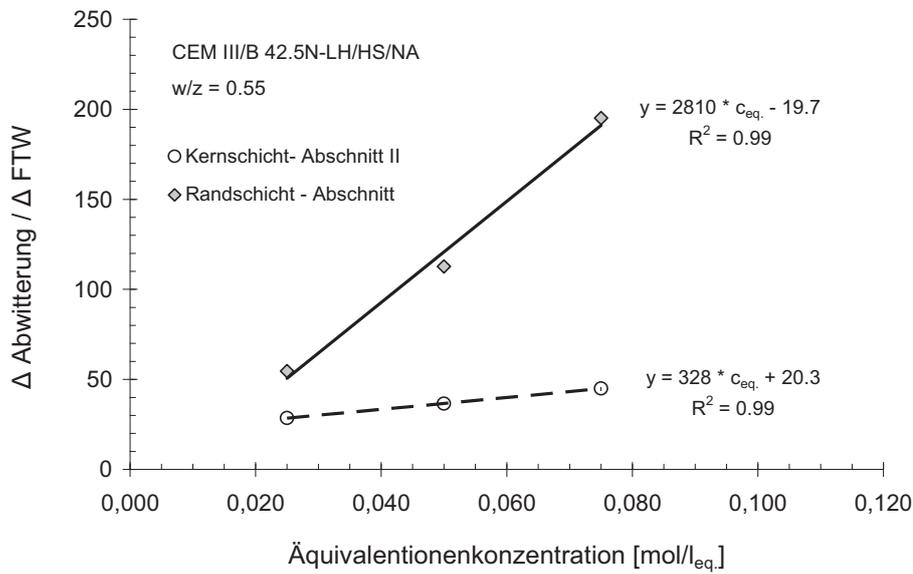


Abbildung 3.20: Zusammenhang zwischen Abwitterungsmenge und Äquivalentenkonzentration der CN-Prüflösung für Rand- (Abschnitt I) und Kernschicht (Abschnitt II); CEM III/B-Beton, w/z = 0,55.

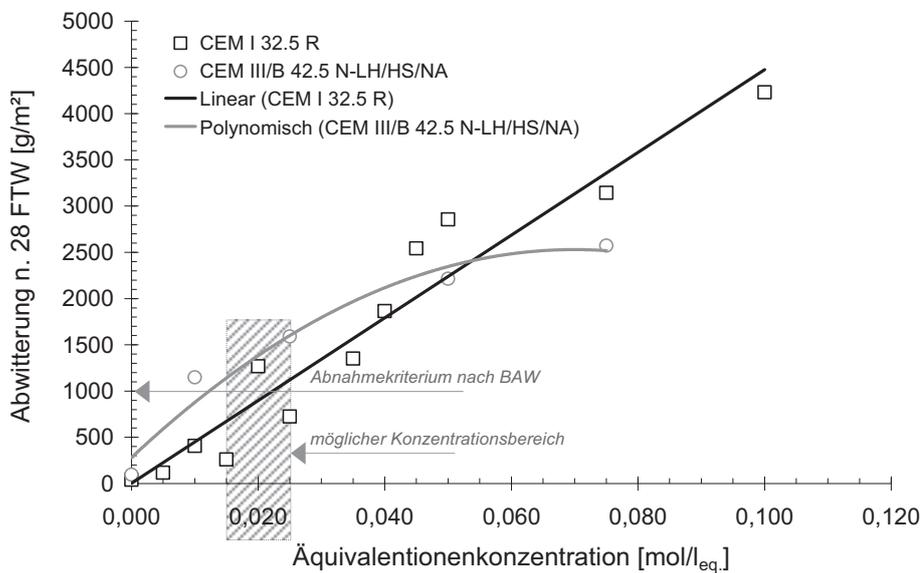


Abbildung 3.21: Vergleich der Abwitterungsmengen nach 28 FTW der CEM I- und CEM III/B-Betone in Abhängigkeit der Äquivalentenkonzentration der CN-Prüflösungen.

Zusammenfassend können anhand der bisherigen Erkenntnisse folgende Aussagen getroffen werden:

- Mit niedrig konzentrierten CN-Prüflösungen entsteht eine Abwitterung, die es zulässt, unterschiedliche Betonqualitäten quantitativ und zuverlässig zu unterscheiden. Die Betone lassen sich mit dem modifizierten CIF-Test in Bezug auf die w/z-Werte eindeutig unterscheiden.
- Die geschilderten Tendenzen sind eindeutig auf die unterschiedlich dosierten CN-Prüflösungen zurückzuführen. Dabei ist von zentraler Bedeutung, dass der Schädigungsgrad in Abhängigkeit der Konzentrationsstärken um ein Vielfaches steigt.
- Der abschließende Vergleich der Abwitterungsrate nach 28 FTW der zwei Betone (in Abhängigkeit der Zementart) hinsichtlich des Abnahmekriteriums, ergibt, dass die potentielle Äquivalentenionenkonzentration der CN-Prüflösung im Bereich von 0,015 bis 0,030 mol/l_{eq} liegt, vgl. Abbildung 3.21. Dabei ist zu beachten, dass die Beurteilung in der Praxis auf der Grundlage der Gesamtabwitterung erfolgt, d.h., Unterschiede im Abwitterungsverhalten (Betonrandschicht und Kernbeton) werden nicht berücksichtigt.

3.2.4.3 Auswirkungen auf die innere Schädigung und Feuchteaufnahme

Abbildung 3.22 zeigt den Abfall des RDM – als Maß der inneren Schädigung – über die FTW-Anzahl; der variierte Parameter ist die Prüflösung. Bei der Betrachtung der inneren Schädigung sind keine Unterschiede im Schädigungsverlauf erkennbar. Die Differenzen im Schädigungsverlauf bzw. die Standardabweichung des Gesamtmittelwertes des RDM liegen in der Größenordnung der Wiederholpräzision bzw. Präzision unter Zwischenbedingungen.

In Abbildung 3.22 ist die Feuchteaufnahme der Betonserie in M.-% über die Prüfdauer in Tagen ($1\text{ d} = 2\text{ FTW}$) jeweils nach Prüflösung getrennt dargestellt. Der negative Bereich der Zeitachse (-7 bis 0 Tage) bezeichnet das isotherme kapillare Saugen – die Vorlagerungsphase; der positive Bereich der Zeitachse gibt die Frost-Tau-Wechsel-Belastung mit Frostsaugen durch die Mikroislinsenbildung wieder. Der Übersichtlichkeit wegen sind nur Werte bis zum relevanten 28 FTW (Abnahmezeitpunkt) dargestellt. Die Feuchteaufnahme liegt zu diesem Zeitpunkt zwischen 1,1 und 1,3 M.-% und somit in einem sehr engen Toleranzbereich. Auch die Betrachtung der Feuchteaufnahme lässt keine Unterschiede hinsichtlich der Aufnahme der Prüflösungen erkennen.

Die Ergebnisse der inneren Schädigung sowie der Feuchteaufnahme über die Prüfdauer, aufgeschlüsselt nach Prüflösungen des vergleichenden CEM III/B-Betons, sind im Anhang, siehe Abbildungen A.1 und A.2 aufgeführt.

Es kann geschlussfolgert werden:

- Ein Einfluss der niedrigkonzentrierten Prüflösung auf die die innere Schädigung und Feuchteaufnahme ist im modifizierten CIF-Test nicht abzuleiten. Die Prüflösungsvariationen ändern nur die Intensität der Abwitterung und haben derzeit keine messbare Auswirkung auf die Intensität der inneren Gefügezerstörung.

Als Ursache für diesen Sachverhalt kann die Nanostruktur des Zementsteines genannt werden. Die Nanostruktur wirkt wie ein Filter und führt zum verzögerten Eindringen der Ionenfront im Vergleich zur Wasserfront, siehe z.B LUNK [Lun97] und Seite 66. Dieser Effekt hat zu Folge, dass ins Probeninnere infolge der Mikroislinsenpumpe während der Frost-Tau-Belastung praktisch „nur“ Wasser eingepumpt wird [Set09b]; die Änderung der Prüflösungskonzentration im genannten Bereich ist daher für die innere Schädigung nicht relevant.

Prinzipiell ist letzteres im Zusammenhang mit jedem Frostprüfverfahren ein sehr wichtiger Aspekt, da die beiden Schädigungsmechanismen unterschiedlich sind d.h. sie sind nicht strikt korreliert. Dieser Sachverhalt muss deshalb adäquat in einem Prüfverfahren abgebildet werden. Im modifizierten CIF-Test ist dies sichergestellt.

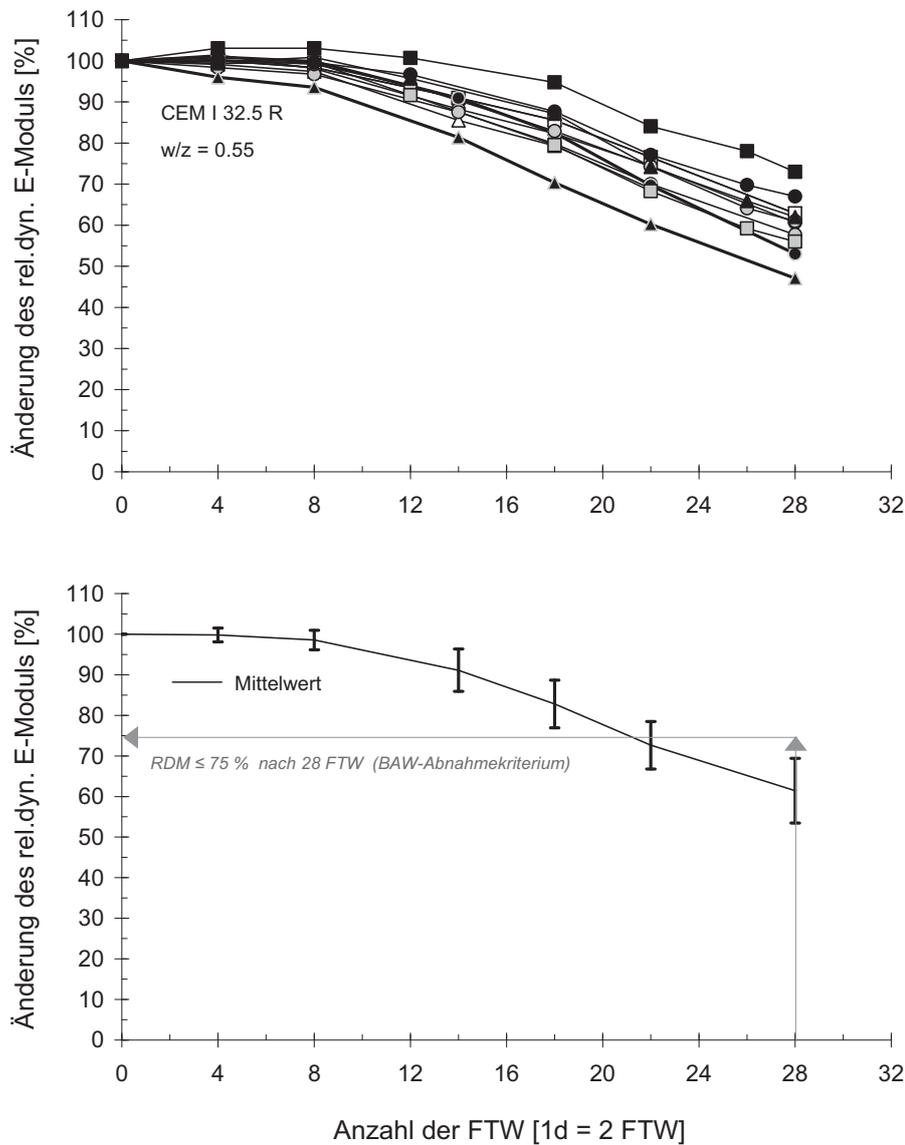


Abbildung 3.22: Oben: Vergleich der mittleren RDM-Verläufe einer CEM I-Betonserie im (modifizierten) CIF-Test mit unterschiedlichen CN-Prüflösungen; in der Legende wird durchgehend die gleiche Symbolik für den RDM-Verlauf getrennt nach Prüflösung verwendet wie in Abbildung 3.12. Unten: Gesamtmittelwert des RDM-Abfalls mit Standardabweichung der gleichen Betonserie.

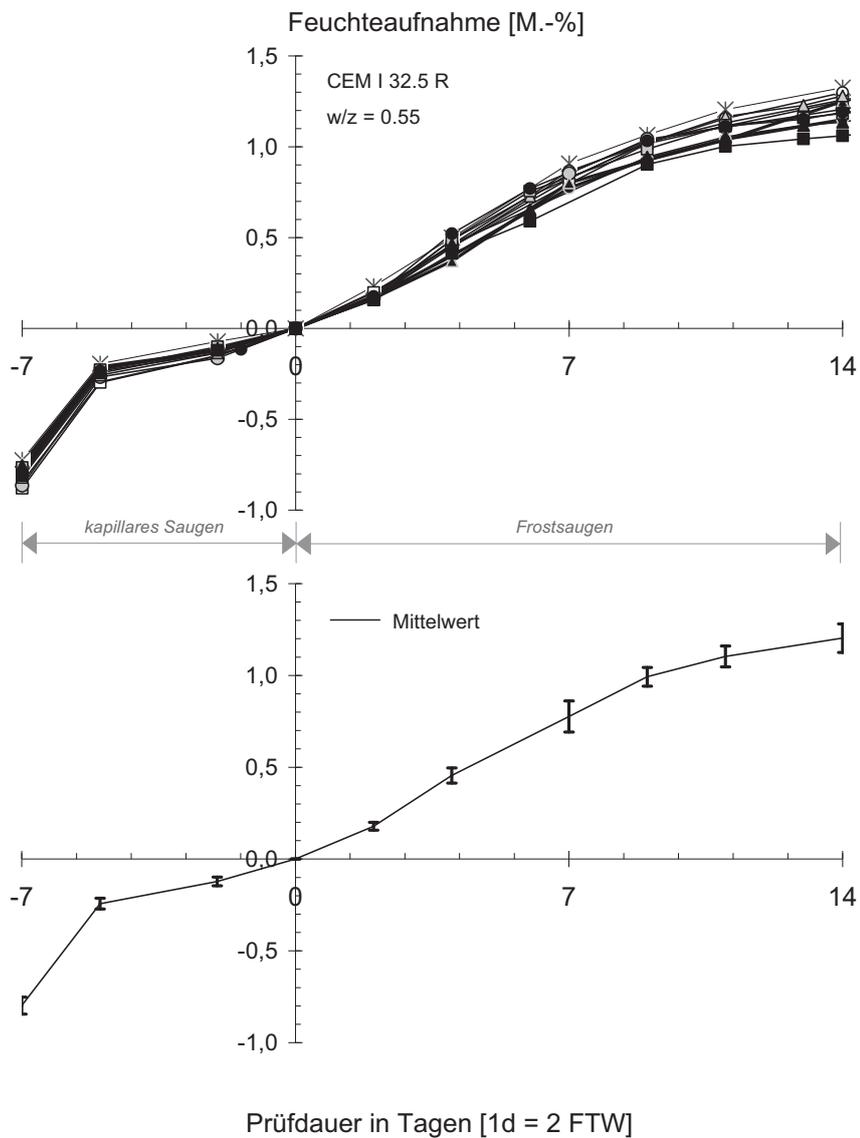


Abbildung 3.23: Oben: Vergleich der mittleren Feuchtaufnahme einer CEM I-Betonserie im (modifizierten) CIF-Test mit unterschiedlichen CN-Prüflösungen; in der Legende wird durchgehend die gleiche Symbolik für die Feuchtaufnahme getrennt nach Prüflösung verwendet wie in Abbildung 3.12. Unten: Gesamtmittelwert der Feuchtaufnahme mit Standardabweichung der gleichen Betonserie.

3.2.4.4 Einfluss der Ionenart der Prüflösung auf die Frostschädigung

Unter der Voraussetzung, dass die beigefügten Ionen keine primäre chemische Schädigung am Festbeton hervorrufen, gestaltete sich das Variieren entsprechender Kationen/Anionen-Kombinationen in der Lösung als schwierig. Bezogen auf ihr Vorkommen sind, wie eingangs erwähnt, die wichtigsten Ionen in natürlichen Wässern:

- Kationen: Natrium, Kalium, Calcium, Magnesium;
- Anionen: Chlorid, Sulfat, Nitrat.

Gleichzeitig sind die meisten dieser Ionenarten betonkorrosiv, wenn höhere Konzentrationen vorliegen oder entsprechende Expositionszeiten. Weiterführende Literatur zur Thematik chemischer Angriff auf Beton ist z.B. in STARK & WICHT [SW01] vorzufinden. Da das Nitrat-Anion NO_3^- als einziges Anion keine primäre chemische Schädigung beim Festbeton hervorruft, wird es als Referenz-Anion deklariert. Um den Einfluss des Kations auf die Abwitterung zu untersuchen, werden unterschiedliche Nitrat-Prüflösungen im modifizierten CIF-Test verwendet. Neben dem Referenzsalz Calciumnitrat wird Natrium-, Kalium- und Magnesiumnitrat eingesetzt. Alle Prüflösungen haben die gleiche NO_3^- - bzw. Kationen-Äquivalentkonzentration von $0,025 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$. Vergleichend wird auch demineralisiertes Wasser als Prüflösung verwendet. Die Untersuchungen erfolgen an einem CEM I-Beton mit w/z-Wert 0,55. Die ermittelten Abwitterungen aufgetragen über die FTW-Anzahl sind in der Abbildung 3.24 dargestellt.

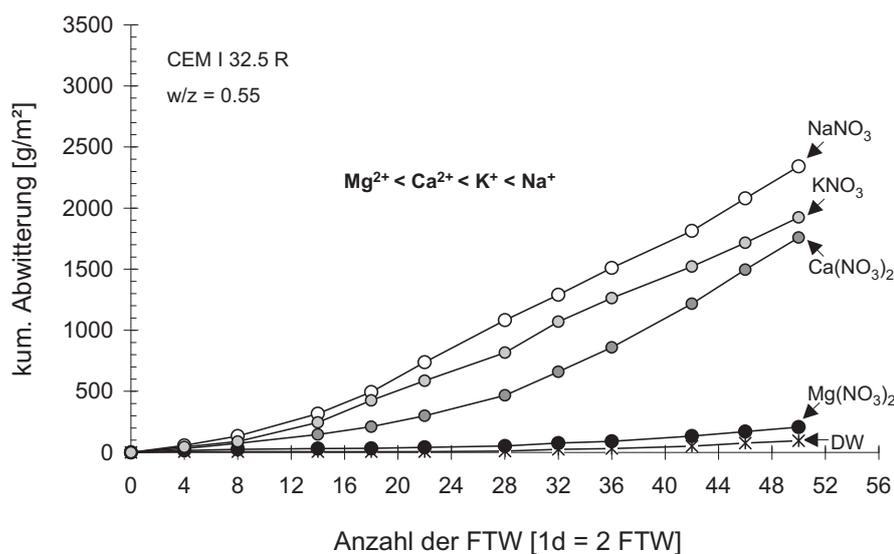
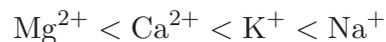


Abbildung 3.24: Einfluss des Kations der Nitrat-Prüflösung auf die Abwitterung; konstante Äquivalentkonzentration bezogen auf das Nitration bzw. Kation, $c_{\text{eq.}} = \text{konst.} = 0,025 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$.

Erstens zeigt sich, unabhängig von der Prüflösung der für CEM I-Betone charakteristische progressive Abwitterungsverlauf. Zweitens ist eine Zunahme der Abwitterungsmenge in folgender Reihenfolge zu beobachten:

demineralisiertes Wasser < Magnesiumnitrat < Calciumnitrat < Kaliumnitrat < Natriumnitrat

Da die NO_3^- - bzw. Kationen-Äquivalentenkonzentration der eingesetzten Prüflösungen gleich ist, bedeutet dies, dass die Abwitterung in Abhängigkeit vom Kation in dieser Reihung zunimmt:



Somit kann festgestellt werden, dass die Art des Kations der Nitrat-Prüflösung die Abwitterungsmenge beeinflusst. Dieser Sachverhalt wird auch in weiteren Versuchsreihen – variiertes Kation: Na^+ und Ca^{2+} – bestätigt, siehe Abbildung 3.25. Hier bewirkt das Natrium – unabhängig von der Zementart – eine größere Abwitterung als das Calcium.

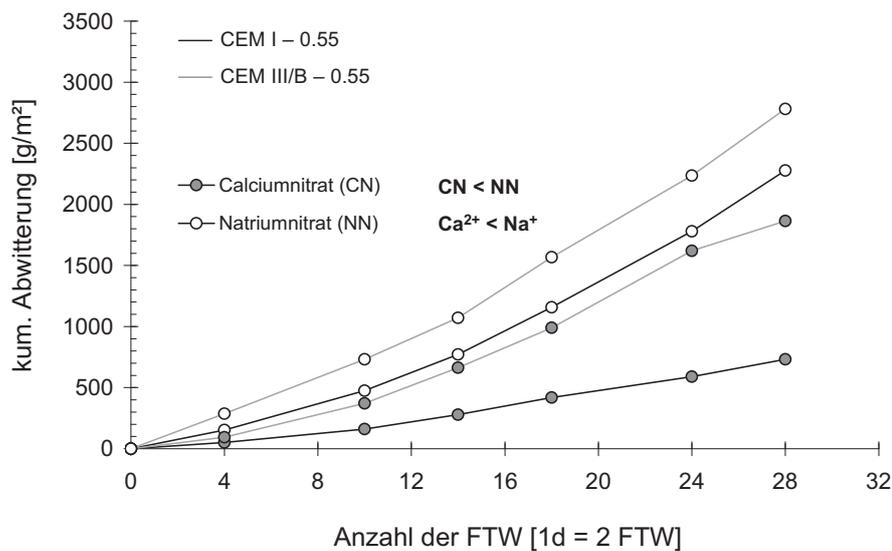


Abbildung 3.25: Einfluss der Kationen/Anionen-Kombination auf die Abwitterung verschiedener Betonqualitäten (Variation: w/z-Wert und Zementart); konstante Äquivalentenkonzentration bezogen auf Anion bzw. Kation, $c_{\text{eq.}} = \text{konst.} = 0,040 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$.

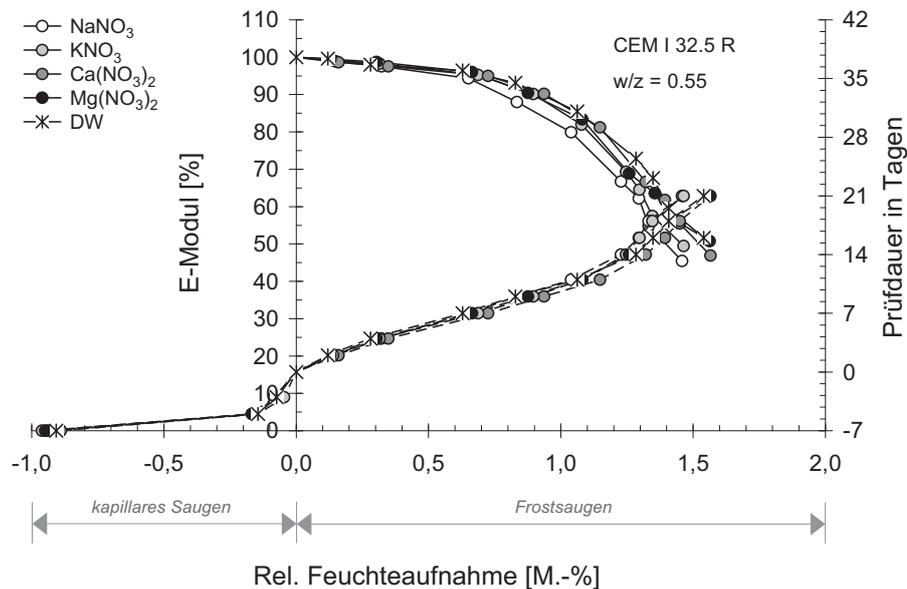


Abbildung 3.26: Interaktionsdiagramm: rel. dyn. E-Modul als Funktion der Feuchtaufnahme und Testdauer; rel. dyn. E-Modul ermittelt aus der Ultraschalllaufzeit in einer Probenhöhe von 3,5 cm.

Betrachtet man die Feuchtaufnahme der gleichen Versuchreihe (Abbildung 3.26), so bewirken die verschiedenen Nitrat-Prüflösungen kein unterschiedliches Feuchtaufnahmeverhalten der Betonproben im Vergleich zu demineralisiertem Wasser. Ebenso ist der Fortschritt der inneren Schädigung, welcher grundsätzlich mit der Feuchtaufnahme gekoppelt ist, einheitlich¹². Hier kommt erneut der Retardierungseffekt¹³ zum Tragen: Beim Eindringen wässriger Lösungen in den Beton ist ein unterschiedliches Eindringverhalten zwischen der Wasserfront, sowie den Anionen und Kationen zu beobachten [Lun97].

Des Weiteren kann analog zur Versuchreihe in Abbildung 3.15 der Abwitterungsverlauf in zwei Abschnitte geteilt werden: Randbereich bis 500 g/m^2 (Abschnitt I) und Kernbereich größer als 500 g/m^2 (Abschnitt II). Wird die Abwitterung am Anfang des Abschnitts II gleich Null gesetzt, so zeigt sich, dass der Abwitterungsprogress in der Kernschicht nicht durch die Kationenart bei gleicher Äquivalentkonzentration der Nitrat-Prüflösung beeinflusst wird, siehe Abbildung 3.27. Das bedeutet das Kation beeinflusst nur die Steigung der Abwitterung in der Randschicht, der Verlauf in der Kernschicht ist dagegen davon unabhängig. Da im vorliegenden Fall die Äquivalentkonzentration der Nitrat-Ionen sowie der Kationen für alle Prüflösungen gleich ist, ist für die Betrachtung der Abwitterung die Kationenart relevant. Interessant ist, dass

¹²Die Standardabweichung des Gesamtmittelwertes des RDM (gebildet aus der RDM aller Proben) liegt in der Größenordnung der Wiederholpräzision

¹³Zusammenwirken von Chromatographieeffekt, chemischer Bindung und Sorption an der Zementsteinoberfläche

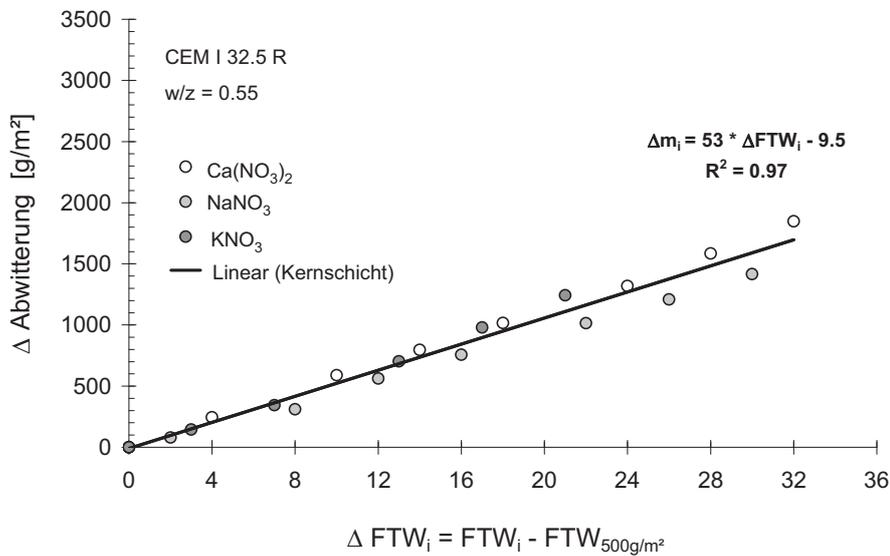


Abbildung 3.27: Einfluss des Kations der Nitrat-Prüflösung auf die Abwitterung im Kernbereich; konstante Äquivalentkonzentration bezogen auf das Nitration bzw. Kation, $c_{\text{eq.}} = \text{konst.} = 0,025 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$.

die Reihung der Abwitterung in Abhängigkeit der gelösten Kationen mit der Reihung in Abhängigkeit von deren Solvathüllen-Radii korreliert, siehe Tabelle 3.4.

Als Fazit kann genannt werden:

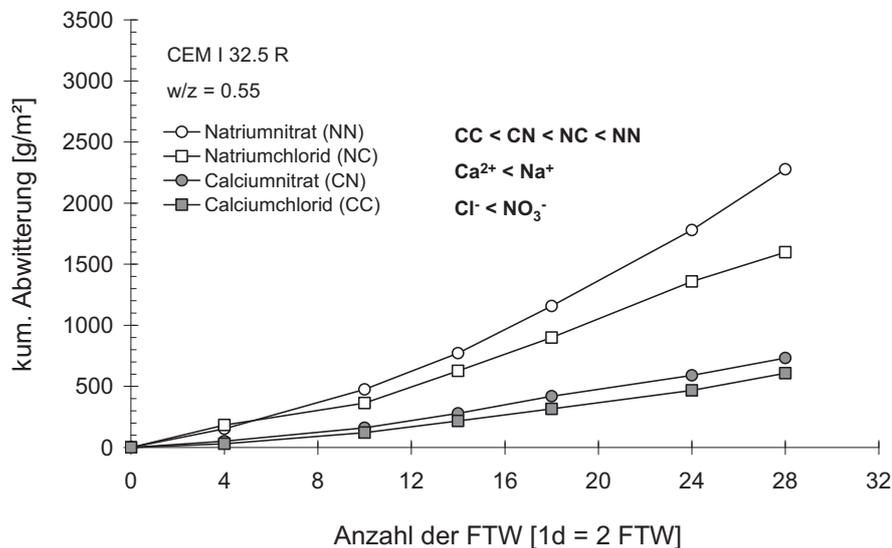
- Die Prüflösungsvariation Nitrat-Prüflösungen mit unterschiedlichen Kationen bei gleicher Nitrat-Äquivalentkonzentration bewirkt in Abhängigkeit des Kations ein unterschiedliches Abwitterungsverhalten; die Feuchteaufnahme und innere Schädigung sind dagegen davon unabhängig.
- Die Abwitterung steigt indirekt proportional zum Radius der solvatisierten¹⁴ Kationen.

Bei Variation des Anions (Chlorid- und Nitrat-Ion) der Prüflösung wird für beide Anionen in Gegenwart von Calcium-Ionen eine geringere Abwitterung beobachtet, wobei das Nitrat-Ion generell die größere Abwitterung bewirkt als das Chlorid-Anion, siehe Abbildung 3.28.

¹⁴Gelöste Ionen bilden in Lösung eine Solvathülle – n-Schichten strukturiertes Wasser in Abhängigkeit der Ionenladung – aus, die für eine gegenseitige Abschirmung sorgt.

Tabelle 3.4: Ionenradius und Radius mit Solvathülle.

Ion [-]	Radius [nm]	Radius mit Solvathülle [nm]
Na ⁺	0.095	0.20
Ca ²⁺	0.099	0.30
Cl ⁻	0.181	0.15
NO ₃ ⁻	0.189	0.15

**Abbildung 3.28:** Einfluss der Kationen/Anionen-Kombination auf die Abwitterung; konstante Äquivalenzkonzentration bezogen auf Anion bzw. Kation, $c_{eq.} = konst. = 0,040 \text{ mol/l}_{eq.}$.

Für die Interpretation der vorgestellten Ergebnisse ist die Kenntnis um die Wechselwirkungen zwischen der inneren Oberfläche des Zementsteins und dem Porenwasser sowie der Ion-Ion-Interaktionen nötig. Diese werden daher folgend in knapper Form beschrieben.

Die Zementsteinmatrix stellt mit der Porenlösung eine ionische Festkörperoberfläche dar. Es wird davon ausgegangen, dass die Oberfläche der CSH-Phasen hauptsächlich eine negative Ladung aufweist. Die im Gelporenwasser¹⁵ befindlichen Kationen (Na⁺, K⁺ und Ca²⁺) ordnen sich, bedingt durch die Coulomb-Wechselwirkungen, in einer elektrostatischen Schicht angren-

¹⁵Das Gelporenwasser steht im Gleichgewicht mit der Porenlösung in den Kapillarporen

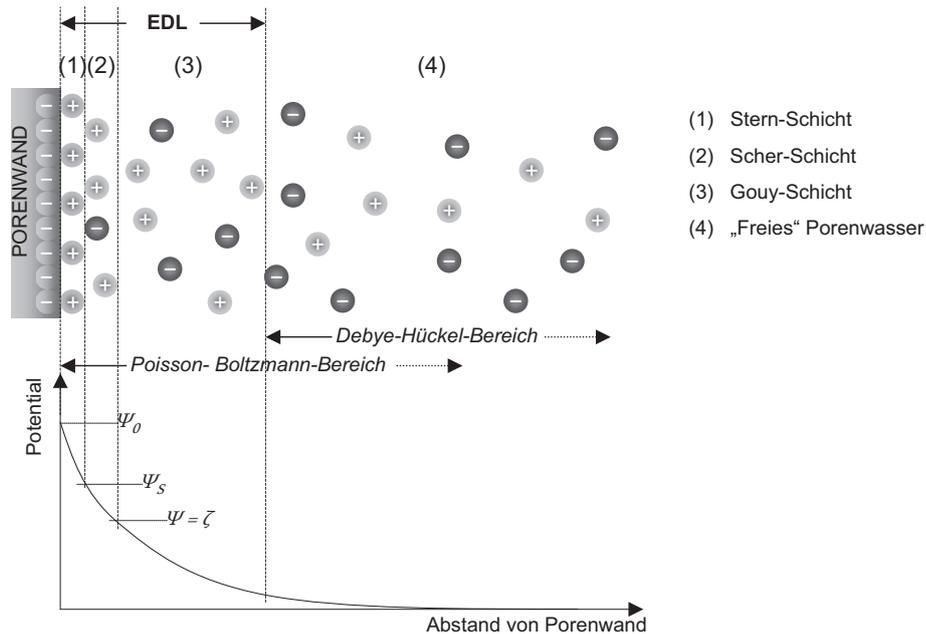


Abbildung 3.29: Schematische Darstellung der Phasengrenze Geloberfläche–Porenlösung; in Anlehnung an [Atk90].

zend an die Oberfläche der CSH-Phasen an. An der Phasengrenze Geloberfläche–Porenwasser bildet sich eine dünne, relativ gut gebundene Schicht (Stern-Schicht) und dahinter liegend eine mobile, diffuse Schicht. Die Anordnung der Ladungen an der Phasengrenze wird als Elektrische Doppelschicht (EDL) bezeichnet, siehe Abbildung 3.29.

Im Gegensatz zur Porenlösung, welche elektroneutral ist und ein Potential gleich Null aufweist, hat das durch die Ionensorption bedingte Potential nahe der Festkörperoberfläche einen endlichen Wert. Die Konzentration von Kationen (Gegenionen) näher der Festkörperoberfläche ist höher als in der restlichen Lösung. Bevorzugt wird Ca^{2+} angelagert, da es durch die zweifach positive Ladung eine wesentlich größere Ladungsdichte aufweist als Na^+ oder K^+ . Gleichzeitig ist die Konzentration der Anionen (Ko-Ionen) geringer als in der restlichen Lösung. Den elektrostatischen Kräften in der EDL wirkt die Diffusion entgegen, die dazu führt, dass mit zunehmendem Abstand von der Phasengrenze eine Verdünnung eintritt.

Wenn sich die Doppelschichten zweier CSH-Schichten durchdringen, überlappen sich ihre elektrostatischen Potentialfelder. Als Folge der sich überlappenden Ionenwolken entsteht ein repulsiver Druck, so dass sich die beiden gegenüber liegenden CSH-Schichten abstoßen. Dieser abstoßende Effekt wird als elektrostatische Komponente des Spaltdruckes bezeichnet [Der75] [Chu00]. Die Interaktion der elektrostatischen Komponente des Spaltdruckes und der Diffusion beschreibt die Poisson-Boltzmann-Gleichung. Für die Verteilung der solvatisierten Ionen in der „freien“ Porenlösung gilt die Debye-Hückel Theorie [Wed97] [Atk90].

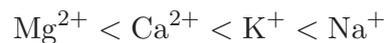
Wichtig ist, dass das Zusammenspiel der drei Spaltdruckkomponenten – elektrostatische und sterische Abstoßung und die anziehenden van-der-Waals Kräfte – das Gelgefüge der Zementmatrix stabilisiert (siehe SLGS-Modell nach SETZER [Set06b]). Für die eigenen Untersuchungen ist relevant, dass die elektrostatische Komponente und damit die Eigenschaften der Doppelschicht von der Ionenstärke des Systems abhängig sind. Dagegen sind die entgegenwirkenden van-der-Waals Kräfte unabhängig von der Ionenkonzentration. Je höher die Konzentration in der Porenlösung ist, desto mehr nimmt der elektrostatische Spaltdruck ab [Set09b]. Mit zunehmender Ionenkonzentration werden die Ladungen an der Oberfläche durch die Ionen abgeschirmt, die Debye-Länge¹⁶ nimmt ab und somit auch der abstoßende Effekt [Set09b]. Ferner, verursacht eine Erhöhung der Ladung des Ions eine signifikante Veränderung der elektrostatischen Wechselwirkungen: Kleine hochgeladene Ionen zeigen eine starke Wechselwirkung mit dem Wasser, wodurch eine Störung der Struktur der angrenzenden Porenlösung verursacht wird.

Konkret beim Frostangriff sind zwei Effekte zu berücksichtigen, die im Zusammenhang mit der Ionenkonzentration eine Rolle spielen: (1) Die Eisbildung führt zur einer Aufkonzentration der Porenlösung. Dadurch steigt die Ionenkonzentration in der Wasserhülle, die die Eiskeime umgibt, stark an. Die Folge ist eine Abnahme des elektrostatischen Terms des Spaltdrucks. (2) Die Abnahme des elektrostatischen Spaltdrucks bewirkt ein zusätzliches Frostschwinden [Set09b]. Hier sei angemerkt, dass der zusätzliche Effekt, bedingt durch Chromatographieeffekte im oberflächennahen Bereich stattfindet [Set09b].

Infolge der Frostpumpe wird während der Frost-Tau-Belastung Prüflösung in den Beton eingepumpt. Die genannten Wechselwirkungen werden anschließend durch verschiedenartige Eindring- und Anlagerungsverhalten unterschiedlicher Ionenarten beeinflusst. Weiterhin ist das retardierende Verhalten der Ionenfront im Vergleich zur Wasserfront zu beachten, siehe dazu z.B. LUNK [Lun97]. WOWRA [Wow97] und DAHME [Dah06] nehmen als Grund für die Retardierung die Sorption einer Ionenart an, wobei eine Ladungstrennung entsteht. Die dissoziierten geladenen Ionen bewegen sich in Richtung des Konzentrationsgefälles fort: Anionen diffundieren schneller in den Zementstein als die zugehörigen Kationen. Die Stärke des Feldes hängt dabei von der Art und der Konzentration der gelösten Ionen ab. In der Doppelschicht erfolgt bedingt durch die zugefügten externen Ionen ein Ionenaustausch. Die Austauschvorgänge sind sehr komplex und werden an dieser Stelle nicht näher erläutert. Als weiterführende Literatur zur dieser Thematik wird ISRAELACHWILLI [Isr91] empfohlen. Prinzipiell werden Kationen umso stärker gebunden, je höher geladen und je kleiner sind. Korreliert mit den Abwitterungsergebnissen in vorliegendem Fall zeigt sich, dass die Abwitterung umso geringer ist, je stärker das Kation an die innere Oberfläche adsorbiert werden kann, siehe Abbildung 3.24.

¹⁶Die Ausdehnung der diffusen Ionenschicht wird durch den reziproken Wert der Debye-Länge $1/k$ bestimmt.

Als weiterer Einfluss ist das von DAHME [Dah06] eingeführte Ionenverdrängungsprinzip vorstellbar. In Analogie zum Ionenverdrängungsprinzip werden im Folgenden die Wechselwirkungen unter dem Aspekt des HSAB-Prinzips¹⁷ betrachtet. Mit Hilfe des HSAB-Prinzips kann die Rangfolge der Ionenaffinität zur inneren Oberfläche der Zementmatrix konkretisiert werden. Die Härte der Lewis-Säure nimmt mit zunehmender Kationenladung und Abnahme des Kationenradius zu. Im vorliegenden Fall nimmt diese in folgender Rangfolge zu:



(weiche Lewis-Säure < harte Lewis-Säure)

Mit zunehmender Härte nimmt die Affinität zur Adsorption an die innere Oberfläche zu. Je größer die Affinität des Kations zur Oberfläche, desto geringer ist die Abwitterungsmenge. Die Zementart hat dabei keinen Einfluss auf die Reihung, vgl. Abbildung 3.25. Das höher geladene Calcium-Ion bewirkt eine Verringerung der Debye-Länge. Dementsprechend dehnen sich im Vergleich die Natrium-Lösungen bei gleicher Äquivalentenionenkonzentration stärker aus als die calciumhaltigen Prüflösungen.

Bei Variation des Anions (Chlorid und Nitrat-Ion) der Prüflösung wird für beide Anionen in Gegenwart von Chlorid-Ionen eine geringere Abwitterung beobachtet, wobei das Nitrat-Ion die größere Abwitterung bewirkt, siehe Abbildung 3.28. Das Nitrat-Ion ist im Vergleich zum Chlorid-Ion die härtere Lewis-Base, da es höher oxidiert ist. Als hartes Anion ist es stark elektronegativ und reagiert entsprechend eher als Base mit der Geloberfläche.

3.2.5 Folgerungen und Interpretation der Ergebnisse

Aus den Untersuchungen mit niedrig konzentrierten Prüflösungen im (modifizierten) CIF-Test kann zusammenfassend Folgendes festgestellt werden:

- Niedrig konzentrierte Prüflösungen bewirken durchgängig im Vergleich zum demineralisierten Wasser eine Zunahme der Abwitterung. Dagegen kann kein Einfluss auf die Feuchteaufnahme und auf die innere Schädigung festgestellt werden.
- Das Ausmaß der Abwitterung ist primär von der Äquivalentkonzentration abhängig; mit steigender Ionenkonzentration steigt auch die Abwitterung an. Die beigefügte Ionenart bei gleichbleibender Äquivalentkonzentration beeinflusst ebenfalls die Abwitterung.

¹⁷Prinzip der Harten Lewis-Säuren und Lewis-Basen

- Unterschiedliche Betonqualitäten können anhand der äußeren Schädigung im modifizierten CIF-Test quantitativ unterschieden werden. Ferner beeinflusst die Modifikation der Prüflösung nur die Schädigungsintensität, aber nicht den eigentlichen Schädigungsverlauf. Ausgehend von der grundlegenden prüftechnischen Anforderung, dass ein Prüfverfahren die wesentlichen realen Bedingungen abbilden muss, ist dies ein wichtiger Aspekt.

Als geeignete Prüflösung im modifizierten CIF-Test wird eine Lösung auf Basis von Calciumnitrat (CN) aufgestellt. So ist eine klare Abgrenzung gegenüber anderen Angriffsarten wie Frost-Tausalz-Angriff, Sulfatangriff oder Alkali-Kieselsäure-Reaktion gegeben. Des Weiteren ist Calcium ein zementeigenes Ion und Nitrat ist im Vergleich zu anderen zur Auswahl stehenden Anionen, wie Chlorid und Sulfat, nicht primär betonkorrosiv.

3.2.6 Frostwiderstand nach dem modifizierten CIF-Test

In den vorherigen Kapiteln konnte gezeigt werden, dass die Äquivalentionenkonzentration sowie die Ionenart der Prüflösung die Abwitterungsmenge beeinflusst. Für die Baupraxis ist über die vorgeschlagene Prüflösung – eine CN-Prüflösung – und über die Prüfung des Frostwiderstandes hinaus, der Einfluss betontechnologischer Parameter bedeutend. Daher wird im vorliegenden Kapitel sowohl der Einfluss des w/z-Wertes als auch der Einfluss der Zementart sowie das Prüfalter untersucht. Dabei soll festgestellt werden, inwieweit eine Beurteilung des Frostwiderstandes auf Basis der Abwitterung im modifizierten CIF-Test möglich ist. Es sei noch angemerkt, dass die untersuchten Einflussgrößen nur eine Auswahl der möglichen Parameter darstellen, wenngleich die Werte gewählt worden sind, die nach bisherigen Überlegungen am entscheidendsten sind.

3.2.6.1 Einfluss der Zementart

Der Einfluss der Zementart auf die Abwitterung wird folgend detailliert untersucht. Der Fokus liegt dabei auf Betonen mit verschiedenen Zementarten, die sich hauptsächlich im Hütten sandgehalt (von 0 bis 70 %) unterscheiden. Es werden Zemente aus verschiedenen Zementwerken verwendet. Da der Fokus auf den Abwitterungsverlauf gelegt wird, wird nicht die absolute Menge des abgewitterten Materials analysiert. Nach dem heutigen Stand des Wissens beeinflusst die Klinkerzusammensetzung (C_3A -Gehalt) die Abwitterung [Lud96]. Der Übersichtlichkeit wegen, sind die Ergebnisse für jede Prüflösungskonzentration ($c_{\text{eq.}} = 0,025, 0,040$ und $0,050 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$) getrennt in Abhängigkeit von der Zementart und dem w/z-Wert (0,55 oder 0,61) dargestellt, siehe Abbildung 3.30. Es zeigt sich, dass bei den untersuchten Betonen die Zementart bei gleicher Zusammensetzung, ähnlicher Festbetoneigenschaften und identischer Nachbehandlung einen signifikanten Einfluss auf den Abwitterungsverlauf hat.

Alle untersuchten Betone mit reinem Portlandzement (CEM I) weisen eine progressive Abwitterungskurve mit geringer Anfangsabwitterung auf. Je höher die Äquivalentenionenkonzentration der Prüflösung ist, desto größer ist der Abwitterungsanstieg. Lediglich bei der zweiten Betonserie (gleiche Zusammensetzung, anderes Zementwerk) tritt bei der Prüflösung $c_{\text{eq.}} = 0,050 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$ ein linearer Abwitterungsverlauf auf. Des Weiteren ist der Verlauf unabhängig vom w/z-Wert (0,55 oder 0,61). Ein vergleichbares Abwitterungsverhalten tritt auch beim Beton mit Portlandhüttenzement (CEM II/B-S) auf mit dem Unterschied, dass hier schon die Konzentration von $0,040 \text{ mol/l}_{\text{eq}}$ einen linearen Abwitterungsverlauf bewirkt. Dagegen führen höhere Hüttenandgehalte im Zement (HÜS > 35 %) prinzipiell zu einem degressiven Abwitterungsverlauf, wobei die Anfangsabwitterung mit steigendem Hüttenandgehalt und Äquivalentenionenkonzentration der Prüflösung zunimmt. Einzig bei den CEM III/A-Betonen ist eine deutliche Differenzierung des Abwitterungsverlaufes im Abhängigkeit von der Äquivalentenionenkonzentration festzustellen: Die Äquivalentenionenkonzentration von $0,025 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$ bewirkt einen linearen Abwitterungsverlauf. Wird die Äquivalentenionenkonzentration erhöht, so geht dieser in einen degressiven Verlauf über. In Übereinstimmung mit den CDF-Untersuchungen von LUDWIG [Lud96] und AUBERG [Aub99] lässt sich der degressive Abwitterungsverlauf bei CEM III-Betonen (HÜS > 35 %) immer klar in zwei Abschnitte unterteilen: progressive Anfangsabwitterung (Abschnitt I) und anschließender degressiver Verlauf (Abschnitt II). Nach LUDWIG [Lud96] korreliert die Abwitterungstiefe am Knickpunkt der Abwitterungskurve bei den Betonen mit einer erhöhten Anfangsabwitterung mit der Carbonatisierungstiefe. Das bedeutet: Die Anfangsabwitterung resultiert aus der Carbonatisierung. Dies wird auch von AUBERG [Aub99] bestätigt. Er berichtet dass bei CEM I-Betonen (ohne LP-Mittel) ein ähnlicher Zusammenhang besteht. Bei CEM I-Betonen ist die Differenzierung zwischen den zwei Abschnitten – retardierte Anfangsabwitterung (Abschnitt I) und anschließende progressive Abwitterung (Abschnitt II), jedoch wesentlich schwieriger. Die carbonatisierte Oberflächenschicht verzögert den Beginn des überproportional ansteigenden Abwitterungsverlaufs [Aub99].

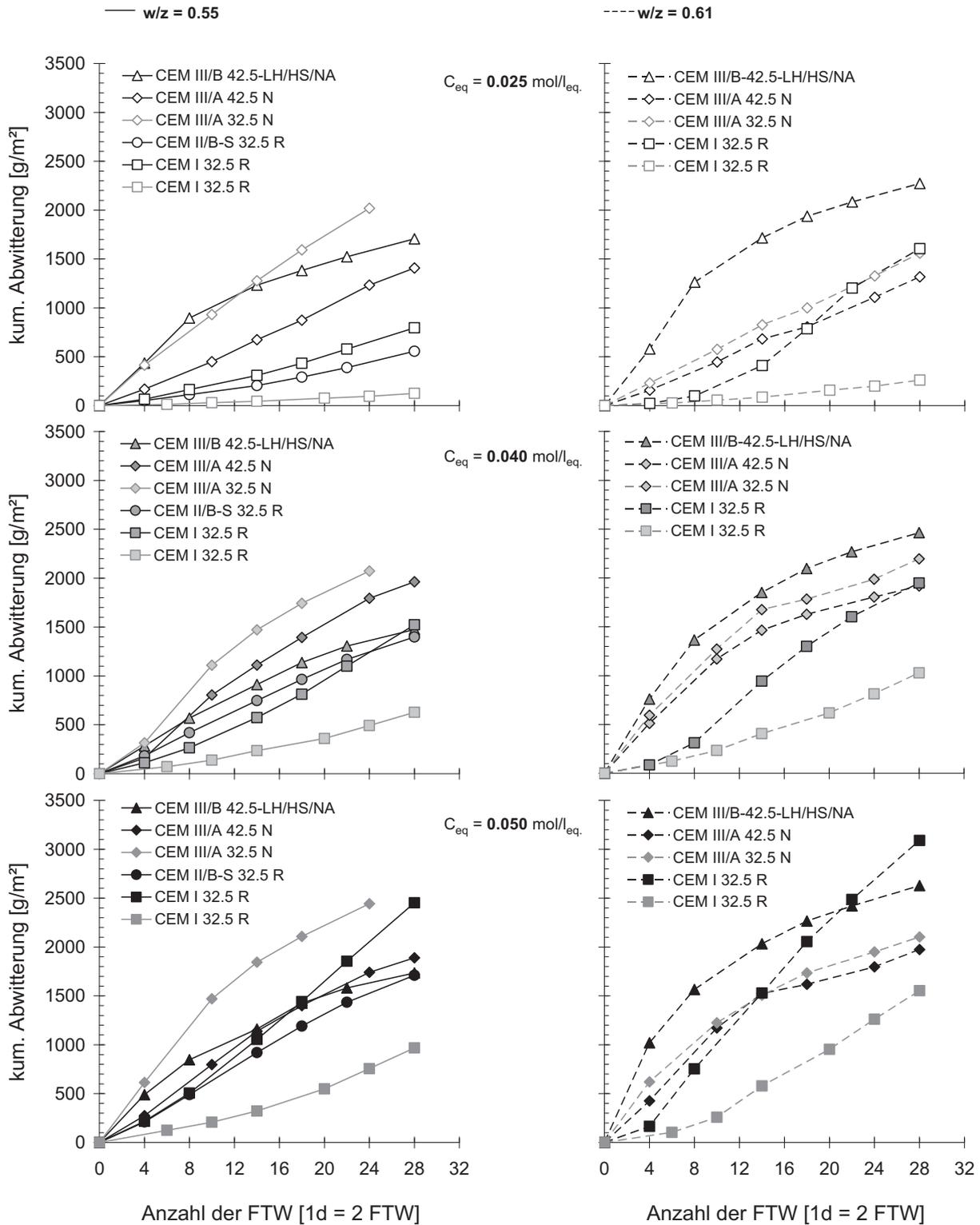


Abbildung 3.30: Abwitterungsverläufe verschiedener Betone im modifizierten CIF-Test; Variation: w/z-Wert(0,55 – links und 0,66 – rechts) und Zementart (HÜS-Gehalt).

Um die Abwitterungsverläufe auch quantitativ darzustellen, wird der Steigungsquotient bestimmt. LUDWIG [Lud96] definiert den Steigungsquotienten wie folgt:

$$Q_s = \text{Anstieg Abwitterungskurve } 0 - 8 \text{ FTW} / \text{Anstieg Abwitterungskurve } 8 - 28 \text{ FTW}$$

Ein lineares Abwitterungsverhalten ist mit $Q_s \approx 1$ definiert, ein insgesamt progressives Abwitterungsverhalten mit niedriger Anfangsabwitterung mit $Q_s < 1$ und ein insgesamt degressives Abwitterungsverhalten hoher Anfangsabwitterung mit $Q_s > 1$.

Die Festlegung des Quotienten basiert auf der Beobachtung, dass bei zweigeteiltem Abwitterungsverlauf der Knickpunkt der Kurve nach dem 8 FTW auftritt. In der vorliegenden Analyse ist als Knickpunkt der 10 FTW gewählt.

Exemplarisch sind in Abbildung 3.31 die Ergebnisse für die CN-Prüflösung $0,050 \text{ mol/l}_{\text{eq}}$ abgebildet. Die Steigung der einzelnen Abwitterungsabschnitte – Abschnitt I: 0–10 FTW und Abschnitt II: 10–28 FTW – in Abhängigkeit des Hüttensandgehaltes – ist getrennt nach Betonzusammensetzung dargestellt. Mit steigendem Hüttensandgehalt ist zum einem der Anstieg der Anfangsabwitterung, hinsichtlich der Größenordnung, im Verhältnis zum Anstieg der Abwitterungskurve im Abschnitt II größer. Praktisch ist nur beim CEM I-Beton eine Anfangsabwitterung zu beobachten, deren Steigung kleiner ist als die der fortschreitenden Abwitterung. Zum anderen nimmt, vom w/z-Wert ausgehend, die Differenz zwischen den Steigungen der beiden Abschnitte mit höherem w/z-Wert zu. In Abbildung 3.32 sind die Ergebnisse der Steigungsquotienten der einzelnen Prüfkombinationen (Prüflösungskonzentration und w/z-Wert) nach Hüttensandgehalt der Zemente bzw. Betone kategorisiert. Demnach treten bei allen CEM I-Beton Variationen insgesamt progressive Abwitterungsverläufe, und bei allen Betonen mit HÜS-Gehalt $\geq 45 \text{ M.-%}$ insgesamt degressive Verläufe auf. Die Abwitterungskurve der geprüften Variationen mit Betonen mit niedrigem HÜS-Gehalt von 25 M.-% ist linear.

Als Fazit kann gezogen werden:

- Die Betrachtung der Abwitterung von gleichartigen Betonen getrennt nach Zementart zeigt, dass die von LUDWIG [Lud96] und AUBERG [Aub99] im CDF-Test abgeleiteten zementspezifischen Abwitterungsverläufe unabhängig von der Äquivalentionenkonzentration qualitativ „übertragen“ werden können; sie sind jedoch in den Absolutwerten bei geringer Äquivalentionenkonzentration zeitlich verzögert und daher auch reduziert.

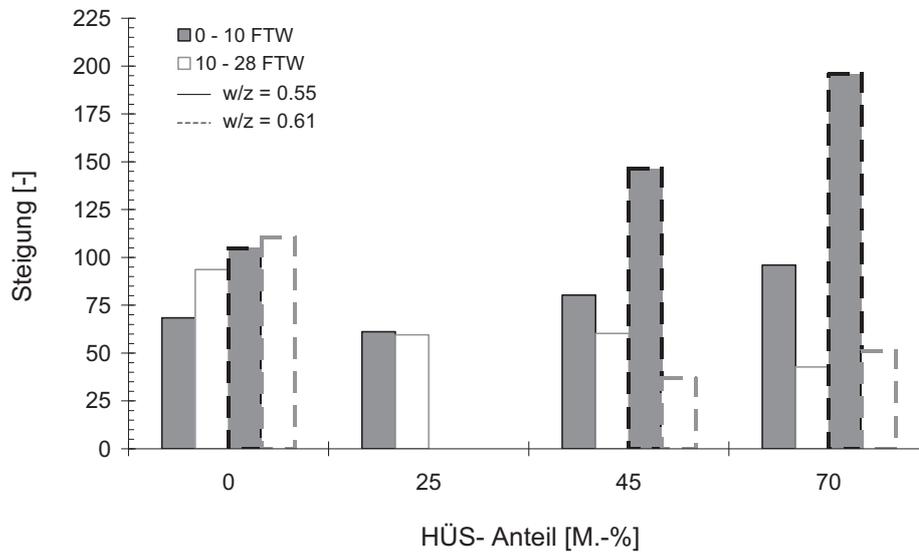


Abbildung 3.31: Abwitterungsanstieg in Abhängigkeit des HÜS-Gehaltes der Betone getrennt nach Abschnitten; Abschnitt: 0–10 FTW und Abschnitt: 10–28 FTW.

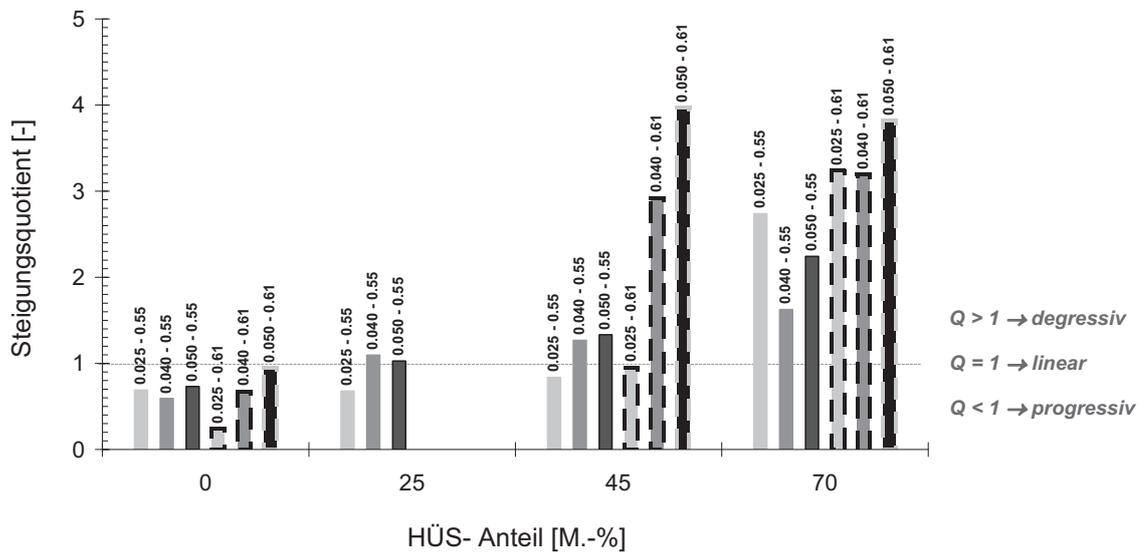


Abbildung 3.32: Steigungsquotient der geprüften Variationen in Abhängigkeit des HÜS-Gehaltes der Betone.

3.2.6.2 Einfluss des Prüfalterungseffektes

Im Folgenden wird der Einfluss der Prüflösung auf die äußere Schädigung – Abwitterung in Abhängigkeit des Probenprüfaltes im CIF-Test betrachtet. Die Kenntnis über altersbedingte Änderungen des Abwitterungsverhaltens ist u.a. notwendig für die in der Praxis oft vorkommende Beurteilung „älterer“ Betone [Aub99]. In den „Prüfaltereffekt“ fließen als Einflussfaktoren die Ausgangsfeuchte sowie die Änderung der Porenstruktur z.B. durch Hydratation oder Carbonatisierung ein.

In Abbildung 3.33 sind Abwitterungsergebnisse einer Betonherstellcharge im Alter von 35 d und rund 1 Jahr gegenübergestellt. Bis zum Prüfbeginn wurden alle Proben entsprechend der Prüfvorschrift [BAW04] im Normklima gelagert. Als Prüflösungen werden Lösungen auf Basis von Calcium-, Natrium- und Magnesiumnitrat gleicher Äquivalentenkonzentration eingesetzt. Hierbei zeigt sich, dass hinsichtlich der Abwitterung bei den „älteren“ Proben die Kationenspezifischen Unterschiede verloren gehen. Nitrat-Prüflösungen gleicher Äquivalentenkonzentration bewirken bei den 1-Jahr-Proben identische Abwitterungsverläufe bzw. -mengen unabhängig vom Kation. Außerdem ist ein enormer Anstieg der Abwitterungsmenge zu beobachten. Prinzipiell zeigt sich bei allen untersuchten Variationen, dass unabhängig von der verwendeten Nitrat-Prüflösung, im höheren Prüfalte eine höhere Abwitterung auftritt.

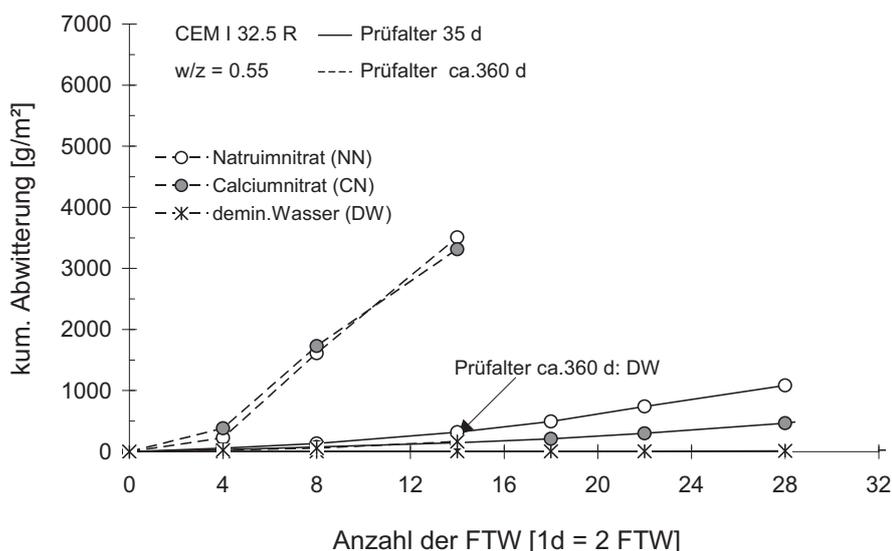


Abbildung 3.33: Einfluss des Kations der Nitrat-Prüflösung auf die Abwitterung einer Betonherstellcharge in unterschiedlichem Probenprüfalte (Normaler 35 d und ca. 360 d); konstante Äquivalentenkonzentration $c_{eq.} = 0,025 \text{ mol/l}_{eq.}$.

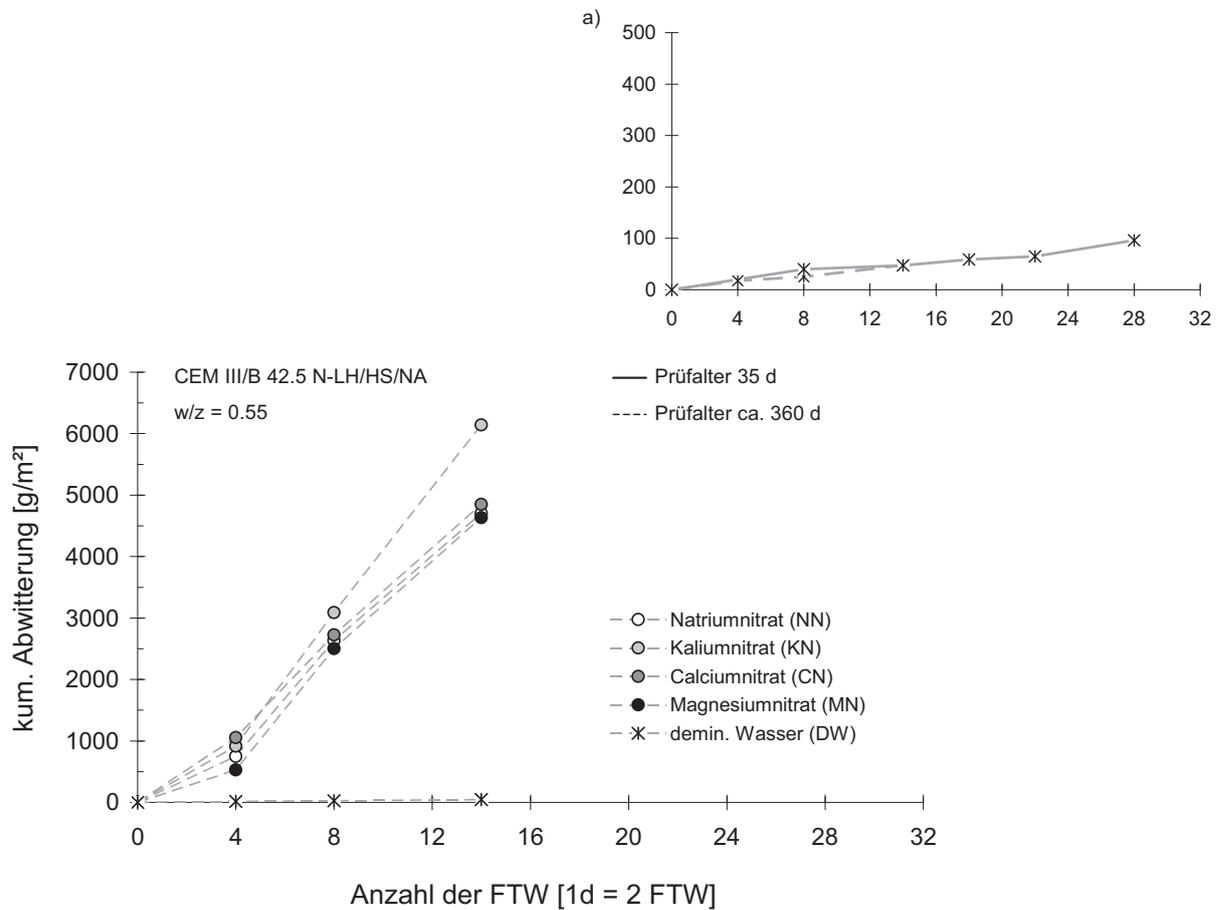


Abbildung 3.34: Einfluss der Kationen der Nitrat-Prüflösung auf die Abwitterung im Probenprüfalter ca. 360 d; konstante Äquivalentenkonzentration, $c_{\text{eq.}} = \text{konst.} = 0,025 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$; a) Vergleich der Abwitterung mit demineralisiertem Wasser als Prüflösung einer Betonherstellcharge im Normalter 35 d und ca. 360 d.

Beispielsweise zeigt Abbildung 3.33, dass bereits nach 8 FTW die Abwitterungsmenge, die im Prüfalter 35 d nach 28 FTW erreicht wurde, deutlich überschritten wird. Hingegen wird mit demineralisiertem Wasser als Prüflösung auch in diesem Prüfalter keine nennenswerte Abwitterungsmenge (rund 150 g/m^2 nach 14 FTW) hervorgerufen, siehe dazu auch Abbildung 3.34. Der charakteristische degressive CEM III-Abwitterungsverlauf ist im Prüfalter 360 d nicht existent, siehe Abbildung 3.34. Auch hier sind die Abwitterungsmengen nach 14 FTW unabhängig vom Kation der Nitrat-Prüflösung praktisch deckungsgleich. Hinzugefügt sei, dass die erreichten Gesamtabwitterungen bezüglich der Größenordnung, extrem hoch sind. Wird die Äquivalentenkonzentration der CN-Prüflösung variiert, so besteht auch im Probenprüfalter 360 d eine Reihung der Abwitterungsmenge in Abhängigkeit der Äquivalentenkonzentration, siehe Abbildung 3.35. Verglichen mit der Abwitterungsrangfolge im Normalter ist sie gleich: Mit

zunehmender Konzentration steigt die Abwitterung an. Des Weiteren nimmt die Schädigungsintensität im untersuchten Konzentrationsbereich mit zunehmender Konzentration der Prüflösung linear zu, siehe Abbildung 3.36. Ob sich diese Abhängigkeit in einem weiteren Konzentrationsbereich mit einer quadratischen Gleichung analog zum Normprüfalter (vgl. Abbildung 3.11) beschreiben lässt, wurde nicht untersucht. In Abbildung 3.37 sind die Ergebnisse der drei vorgestellten Betonserien, geprüft mit der CN-Prüflösung $c_{\text{eq.}} = 0,025 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$, gegenübergestellt. Analog zum Normprüfalter weist der CEM I-Beton erneut die geringste Schädigung auf.

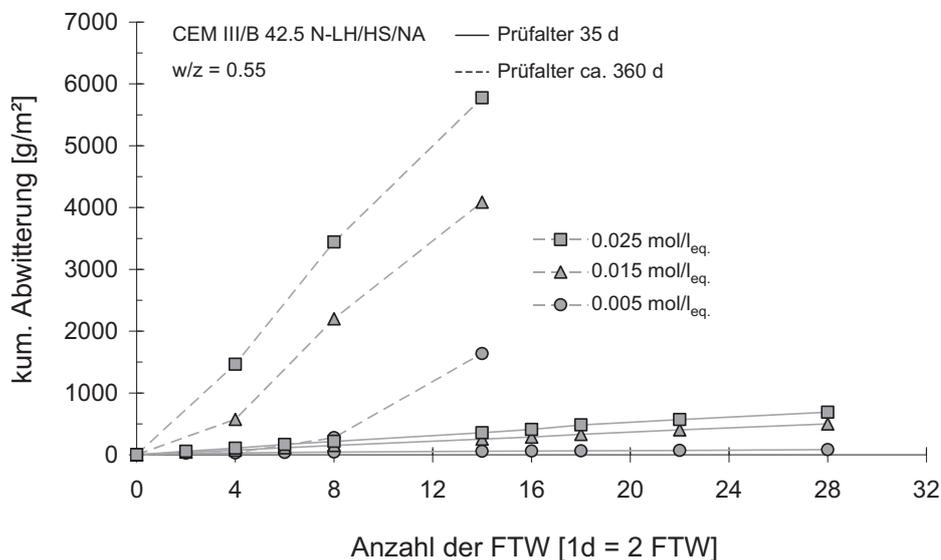


Abbildung 3.35: Einfluss der Äquivalentkonzentration der CN-Prüflösung auf die Abwitterung im unterschiedlichen Probenprüfalter einer Betonherstellcharge (Normalter 35 d und ca. 360 d); CEM III/B-Beton, $w/z = 0,55$.

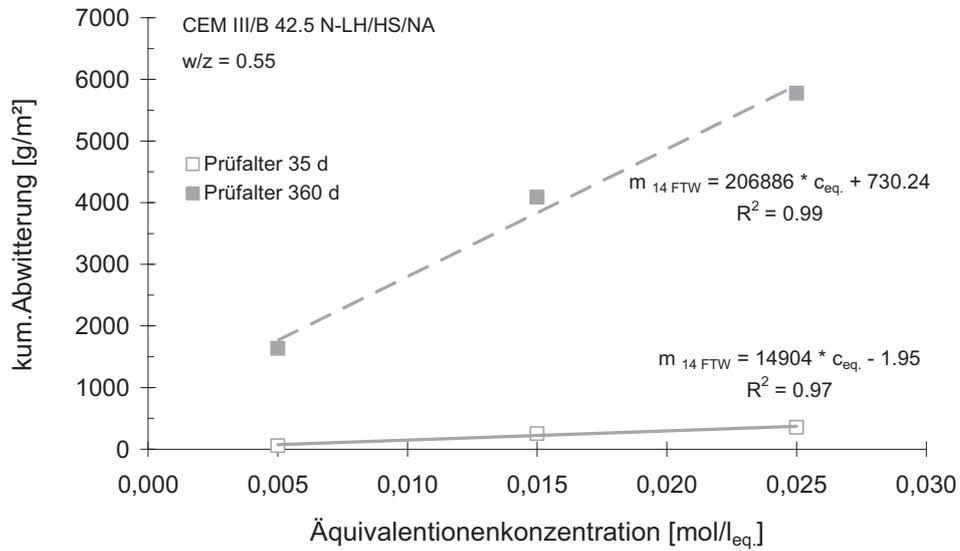


Abbildung 3.36: Zusammenhang zwischen Abwitterungsmenge nach 14 FTW und Äquivalentionenkonzentration der CN-Prüflösung in Abhängigkeit des Prüfalters (Normaler 35 d und ca. 360 d) getrennt nach Rand- und Kernschicht; CEM III/B-Beton, w/z = 0,55.

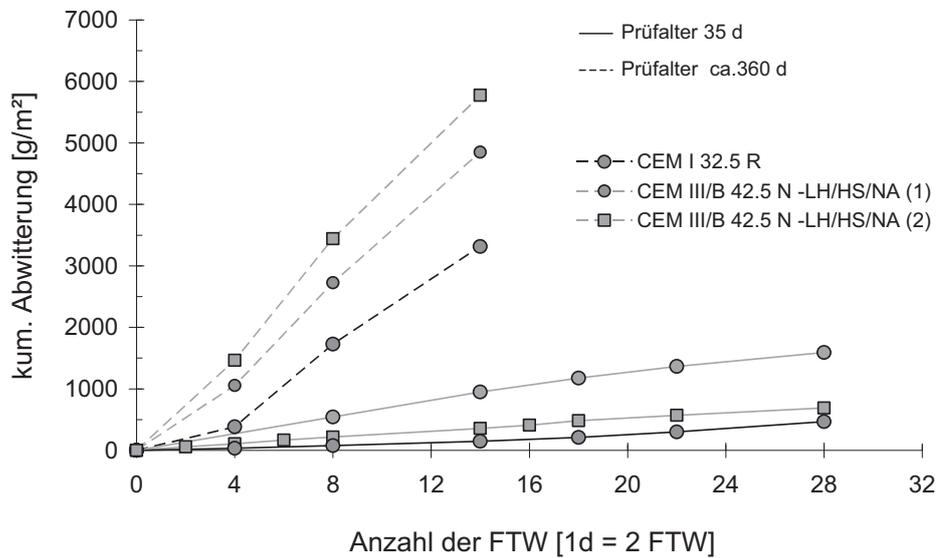


Abbildung 3.37: Vergleich der Abwitterung von drei Betonserien geprüft mit CN-Prüflösung: $c_{\text{eq.}} = 0,025$ mol/l_{eq.}.

Im Sinne eines Fazits ist in Tabelle 3.5 der Einfluss des „Altereffekts“ auf die Abwitterung im modifizierten CIF-Test zusammengefasst.

Tabelle 3.5: (Qualitativer) Einfluss des Probenprüfalterers auf die Abwitterung für ausgewählte Prüflösungsvariationen.

Normprüfalter (35 d)	Prüfalter ca. 360 d
+ Ionenkonzentration	+ Ionenkonzentration
+ Ionenart	- Ionenart
+ zementspezifischer Abwitterungsverlauf	- zementspezifischer Abwitterungsverlauf

Nachfolgend wird der Einfluss der Carbonatisierung als maßgeblicher Prüfaltereffekt betrachtet. Zusammenhänge zwischen Carbonatisierungstiefe, Anfangsabwitterung und Abwitterungsverlauf im CIF-Test wurden erstmals von LUDWIG und AUBERG festgestellt. Darüber hinaus stellte LUDWIG fest, dass die Carbonatisierungstiefe und die damit verbundene Porenstrukturänderung keinen feststellbaren Einfluss auf die Abwitterung im CIF-Test (Prüflösung: demineralisiertes Wasser) hat. In eigenen Untersuchungen kann dies bestätigt werden: Im CIF-Test, durchgeführt mit demineralisiertem Wasser als Prüflösung, ist der Abwitterungsverlauf unabhängig vom Prüfalter, siehe Abbildung 3.33 und Abbildung 3.34. In Tabelle 3.6 sind die ermittelten Carbonatisierungstiefen aufgelistet. Die ermittelte Abwitterungsmenge im Prüfalter 360 d ist hinsichtlich der Größenordnung praktisch die gleiche wie die abgewitterte Menge im Normprüfalter. Im Gegensatz dazu bewirken niedrigkonzentrierte Prüflösungen im höheren Alter eine deutliche Zunahme der Abwitterung. Im Zusammenhang mit der Ionenkonzentration ist es naheliegend, die carbonatisierungsbedingte Änderung des pH-Wertes des Betons bzw. der Porenlösung zu betrachten. Durch die Carbonatisierung ändert sich die chemische Struktur der Zementsteinmatrix. Als Folge wird der pH-Wert der Porenlösung bei vollständig carbonatisiertem Zementstein von $> 12,7$ auf $8,7$ reduziert [Kro83]. Bedingt durch die pH-Wert-Reduzierung wird die Wechselwirkung zwischen Gelmatrix und Gelporenwasser verändert. So werden zum einen weniger Kationen gebunden, da die negative Ladung der Geloberfläche reduziert wird; zum anderen wird der elektrostatische Teil des Spaltdrucks stark von der Konzentration der OH-Ionen beeinflusst [CSWR00].

Tabelle 3.6: Carbonatisierungstiefen ermittelt nach DIN EN 14630.

Betonserie	Carbonatisierungstiefe [mm] nach DIN EN 14630	
	Prüfalter 28 d	Prüfalter ca. 360 d
CEM I 32.5 R w/z = 0.55 ¹⁾	0.2	5
CEM III/B 42.5 N-LH/HS/NA w/z = 0.55 ²⁾	2.1	8
CEM III/B 42.5 N-LH/HS/NA w/z = 0.55 ³⁾	0.9	8

Kapitel 4

Untersuchung des Frostwiderstandes in Praxisversuchen

Allgemein ist die Beziehung zwischen der reinen – ohne Taumittel – Frostbeanspruchung und resultierender Frostschädigung unter Praxisbedingungen bisher kaum systematisch untersucht worden. Der folgende Abschnitt soll einen kurzen Überblick zum heutigen Wissenstand bezüglich in situ-Untersuchungen mit besonderem Fokus auf die Korrelation von Labor- und Praxisergebnissen geben. In Sinne der eigenen Ziele ist die Schädigung an ausgelagerten Proben und deren Korrelation mit CIF-Ergebnissen relevant. Der Autorin sind zum Zeitpunkt der Anfertigung dieser Arbeit Ergebnisse aus zwei solchen Forschungsvorhaben bekannt. Deren wesentliche Erkenntnisse werden geschildert. Anschließend werden die eigenen Praxisversuche (Auslagerungsversuche) und deren Ergebnisse dargestellt.

4.1 Sachstand zu Praxisversuchen versus CIF-Test

Für die Frostschädigung ist vom Aspekt äußerer, umweltbedingter Einflüsse die Klimabeanspruchung des Bauteiles entscheidend. Die Frostbeanspruchung resultiert aus dem Feuchtegehalt bzw. -angebot und aus dem Temperaturwechsel oberhalb und unterhalb des Gefrierpunktes. Die Intensität hängt von der Minimaltemperatur, dem Feuchtegehalt und der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel ab. Die Reaktion des Bauteiles auf die klimatische Beanspruchung kann durch die Temperatur- und Feuchteverteilung als Funktion der Zeit beschrieben werden. In der Regel dringt die Feuchte- und Wärmefront in Außenbauteile eindimensional d.h. senkrecht zu einer äußeren Beanspruchungsfläche ein.

Wichtige Erkenntnisse zur Frostbeanspruchung und resultierender Schädigung von Betonen in Bauwerken sowie direkt gemessen an ausgelagerten Proben wurden in den letzten Jahren in Deutschland im Rahmen des Verbundforschungsvorhabens des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) „Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse“ gewonnen; einen zusammenfassenden Überblick geben der Sachstandbericht DAfStb-Heft 560 [SBB⁺05] sowie DAfStb-Heft 577 [MG10]. Nachfolgend werden einige wesentliche Ergebnisse aus dem genannten Verbundprojekt dargestellt. Details können DAfStb-Heft 577 [MG10] bzw. den Abschlussberichten der einzelnen Projektpartner entnommen werden.

Temperaturmessungen im Beton zeigten, dass die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel in der Randzone der Bauwerke in der Regel geringer ist als die Anzahl der Frosttage, die anhand der Lufttemperatur bestimmt wurden. Dies bedeutet, dass eine direkte Übertragung der Klimadaten von Wetterstationen auf die Verhältnisse in der Betonrandzone aufgrund der lokal sehr unterschiedlichen Verhältnisse am Bauwerk schwierig ist. In den Wintern während des Beobachtungszeitraumes traten an den verschiedenen Standorten der Bauwerke durchschnittlich 3 bis 16 Tage mit Temperaturen unter -5°C auf. In der Betonrandzone liegt bei mindestens 2/3 der Frost-Tau-Wechsel die Temperaturspanne im Bereich zwischen -5°C und $+5^{\circ}\text{C}$. Bei keinem untersuchten Bauwerk bzw. -teil konnte eine kontinuierliche Zunahme des Feuchtegehalts – Aufsättigung – der Betonrandzone über mehrere Jahre hinweg festgestellt werden; dabei ist anzumerken, dass aufgrund der Messtechnik erst ab einer Tiefe von ca. 7 mm die Randzone erfasst wird. Es können Unterschiede zwischen dem Betonrandbereich und dem Inneren herausgearbeitet werden. Der Feuchtegehalt der Betonrandzone (bis rd. 20 mm von der Prüfoberfläche) verändert sich bei Bauteilen bzw. -werken, die nicht ständig im Wasserkontakt stehen, entsprechend den jahreszeitlichen Klimaschwankungen. Bei der Beurteilung der Frostbeanspruchung von Bauwerken sollte davon ausgegangen werden, dass sich weitgehend unabhängig von der Expositionsklasse in der Randzone ein hoher Sättigungsgrad einstellen kann. Die Häufigkeit ist dabei vom vorherrschenden Klima sowie der Nutzung abhängig. Die Häufigkeit ist solcher Verhältnisse in den Expositionen XF1 und XF2 im Vergleich zu den Expositionen XF3 und XF4¹⁸ – wenn überhaupt –, extrem selten zu erwarten. Im Hinblick auf die Frostschädigung bei ausgelagerten Proben und der Korrelation dieser mit Laborergebnissen (CIF- bzw. CDF-Test) wurden in Abhängigkeit der Exposition folgende Beobachtungen festgestellt [MG10]:

- Bei der Gesamtgegenüberstellung der Ergebnisse aus Auslagerungen und CIF-Test wird in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung zwischen drei Fällen unterschieden: (1) die

¹⁸XF1 – Frost ohne Tausalzbelastung, mäßige Wassersättigung; XF2 – Frost mit Tausalzbelastung, mäßige Wassersättigung; XF3 – Frost ohne Tausalzbelastung, hohe Wassersättigung; XF4 – Frost mit Tausalzbelastung, hohe Wassersättigung

Zusammensetzung ist normgerecht nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 für die Expositions-kategorie XF3; (2) die Zusammensetzung ist normgerecht nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 für die Expositions-kategorie XF1; oder (3) die Zusammensetzung liegt außerhalb der Vorgaben für die Expositions-kategorien XF3 und XF1.

Ein eindeutiger Tendenz bezüglich der äußeren Schädigung konnte nicht festgestellt werden. Hinsichtlich der inneren Schädigung wird bei den ausgelagerten Proben ein Anstieg des RDM beobachtet, unabhängig davon, ob die jeweilige Betonmischung das Abnahmekriterien des CIF-Tests (RDM > 80% nach n^{19} FTW [Set04] oder > 75% nach 28 FTW [BAW04]) im Labor erfüllt hat oder nicht. Als ein Grund für die zum Teil widersprüchlichen Ergebnisse im Labor- und Praxisversuch wird der unterschiedliche Hydratationsgrad zum Zeitpunkt der Frostbeanspruchung vermutet. So trat die erste Frostbeanspruchung an den ausgelagerten Proben im Alter von mehreren Monaten auf und damit nach einem längeren Zeitraum mit günstigen Bedingungen für die Nachhydratation im Vergleich zu den Laborproben, die im Alter von 35 d befroren wurden.

- Bei der Gesamtgegenüberstellung der Ergebnisse aus Auslagerungen und CIF-Test wird wiederum in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung zwischen drei Fällen unterschieden: Die Zusammensetzung ist normgerecht nach DIN EN 206-1 bzw. DIN 1045-2 für die Expositions-kategorie (1) XF2 bzw. (2) XF4, oder (3) sie liegt außerhalb der Vorgaben für die Expositions-kategorien XF2 und XF4.

Es ergab sich folgender Trend: (1) Betone deren Zusammensetzungen nicht für die jeweilige Expositions-kategorie konzipiert waren, wiesen äußere Schädigungen während der Auslagerung auf; (2) einige Betone, deren Zusammensetzungen außerhalb der Normvorgaben lagen, zeigten dennoch eine ausreichende Dauerhaftigkeit über den Zeitraum der Auslagerung von bis zu vier Jahren; (3) alle Betone, die entsprechend ihrer Expositions-kategorie nach Norm zusammengesetzt waren, wiesen während der Auslagerung keine Schädigungen auf, die die Standsicherheit beeinträchtigen.

- Unabhängig von der Expositions-kategorie wird festgestellt, dass die äußere Schädigung über die Auslagerungszeit kumulativ zunimmt.

Obgleich insgesamt keine eindeutige Tendenz bezüglich der äußeren Schädigung unter den Bedingungen des reinen Frostangriffs im Labor und in der Praxis festgestellt werden konnte, zeigt die gesonderte Betrachtung nach den einzelnen Forschungsvorhaben, dass diese partiell gegeben ist. Hinzugefügt sei, dass für die vorgenommene Gesamtauswertung im Sinne der Zielsetzung des Verbundforschungsvorhabens die normgerechte Betonzusammensetzung als

¹⁹_n – die zu definierende Anzahl an FTW, die der Beton überstehen muss, bevor das Schädigungskriterium erreicht wird

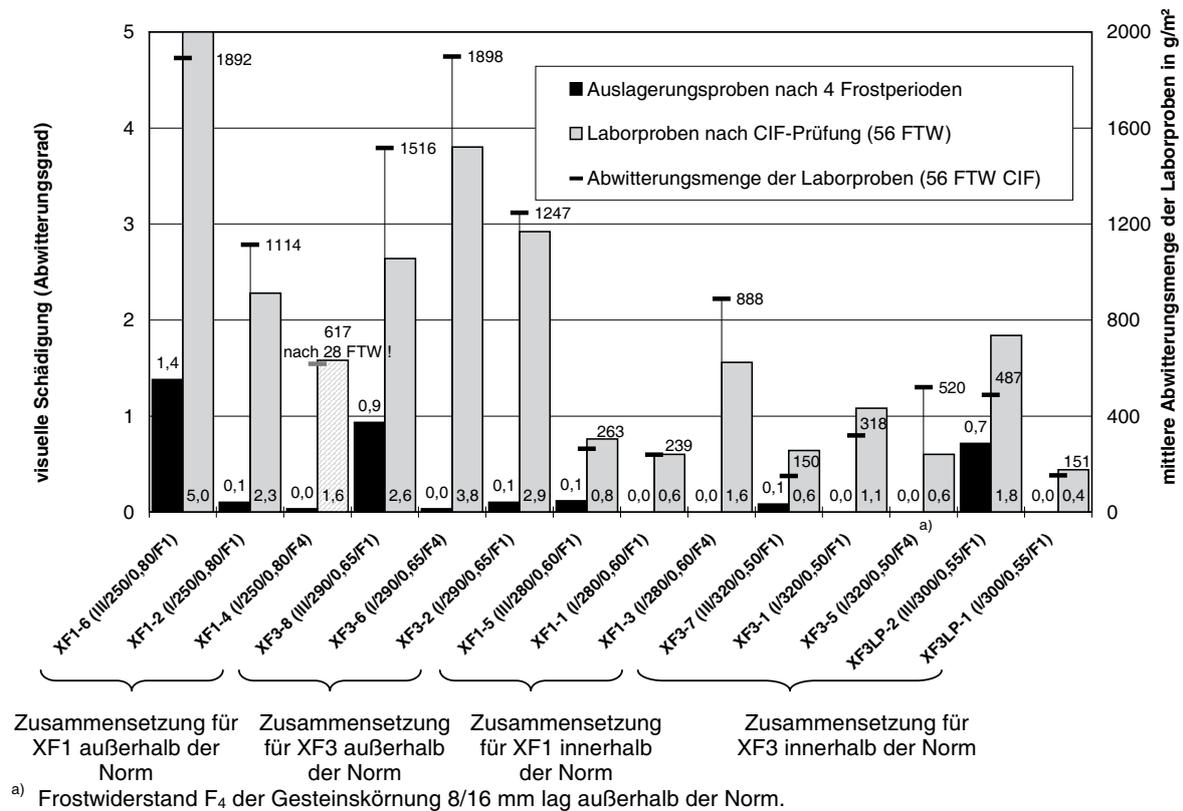


Abbildung 4.1: Gegenüberstellung der äußeren Schädigung von Auslagerungsproben (ausgedrückt über den Abwitterungsgrad) nach 4 Frostperioden und Laborproben (Abwitterungsmenge nach 56 FTW gemäß der CIF-Prüfvorschrift); entnommen aus [RH06].

Hauptkriterium diene. Die Abbildung 4.1 zeigt beispielhaft den Vergleich der Ergebnisse der äußeren Schädigung von Labor- und Praxisproben aus dem Forschungsvorhaben „Vergleichsprüfungen des Frostwiderstandes und Vergleich mit der Praxis“ [RH06], Teilprojekt 1 des DAfStb-Verbundforschungsvorhabens. Die Autoren schreiben als Schlussfolgerung der Studie: „Dabei wurde eine gute Korrelation zwischen der bei der CIF-Prüfung gemessenen Abwitterungsmenge und dem visuell bzw. fotoanalytisch erfassten Abwitterungsgrad festgestellt.“ (Seite 22)

Im Rahmen des europäischen Forschungsprojektes CONLIFE [Hol04a] [Hol04b] wurden ebenfalls Labor- als auch Feldversuche sowie Analysen bestehender Bauwerke zum Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand²⁰ von Hochleistungsbeton durchgeführt. Insgesamt zeigten die untersuchten Hochleistungsbetone nach drei Jahren Auslagerung erwartungsgemäß keine signifikanten Frostschäden. Lediglich in Nordfinland konnte eine gute Korrelation einiger Serien mit geringem Frostwiderstand zwischen Labor- und Praxistests festgestellt werden. Die scharfe Frostbeanspruchung – 56 Frost-Tau-Wechsel und Tiefsttemperaturen bis $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ – führte bei

²⁰Gegenstand des Projekts waren zudem Säure-, Meerwasser- und Chloridangriffe.



Abbildung 4.2: Rissbildung auf der exponierten Betonoberfläche nach einem Winter Auslagerung (56 Frost-Tau-Wechsel und Minimaltemperaturen bis -40°C); $w/b = 0,42 + 7\%$ Microsilica; entnommen aus [Hol04b].

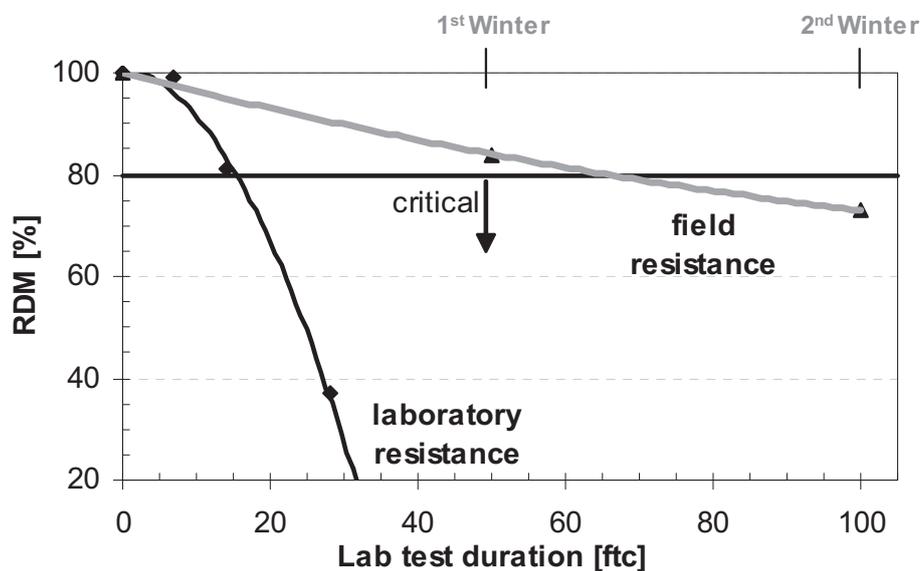


Abbildung 4.3: Vergleich der inneren Schädigung von Laborproben im CIF-Test und Praxisproben; die innere Schädigung ist definiert als Abfall des rel. dyn. E-Moduls aus US-Laufzeitmessung; $w/b = 0,42 + 7\%$ Microsilica; entnommen aus [Hol04a].

zwei Betonqualitäten bereits nach einem Winter Exposition zur Schädigung. Auf den exponierten Prüfflächen der jeweiligen Betonserien wurden zum einen Risse festgestellt, siehe Abbildung 4.2; zum anderen war eine signifikante innere Schädigung bzw. Rissbildung zu verzeichnen, die im darauffolgenden Winter weiter fortschritt, Abbildung 4.3.

Als wesentliches Ergebnis des Forschungsprojektes bezüglich Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand gilt die Feststellung, dass bei Anwesenheit von Tausalzen im Labor, in vielen Fällen die innere Schädigung überwiegt. Als Empfehlung geht hervor, dass zukünftig auch bei Prüfung des Frost-Taumittel-Angriffs die innere Schädigung bei Hochleistungsbeton als Bewertungskriterium herangezogen werden muss.

Im Sinne eines Fazits zeigen die hier vorgestellten Ergebnisse die Übertragbarkeit von CIF-Ergebnissen auf die Praxisverhältnisse. Dies ist jedoch mit Einschränkungen zu betrachten, u.a. auch aufgrund der kurzen Dauer der Praxisversuche²¹. Der Vergleich der Praxisergebnisse der beiden Projekte legt die Interpretation nahe, dass die „strenge“ Frostbeanspruchung, wie sie in Nordeuropa vorherrscht, die innere Schädigung „begünstigt“. Dagegen tritt im mitteleuropäischen Raum unter gleicher Exposition – eingestuft als Expositionsklasse XF3 – zuerst die äußere Schädigung auf.

4.2 Eigene Praxisuntersuchungen und -ergebnisse

Primär wird beim reinen Frostangriff von einer inneren Gefügezerstörung ausgegangen. Bei eigenen ausgelagerten Proben wurde festgestellt, dass unter den gegebenen Praxisbedingungen – eingestuft als reiner Frostangriff – eine Unterscheidung der Betonqualitäten anhand der Abwitterung nach nur einer Wintersaison möglich ist, siehe Kapitel 1. Diese Feststellung wird als Grundlage für weitere Praxisuntersuchungen genommen. Folgend sind die wesentlichen Ergebnisse mit besonderem Fokus auf die äußere Schädigung dargestellt.

4.2.1 Ausgelagerte Betone und Versuchsanordnung

Feldproben für die weiterführenden Untersuchungen wurden in Meißen (Ostdeutschland) im Winter 06/07 ausgelagert. Ergebnisse der ersten Auslagerung werden der Vollständigkeit wegen aufgeführt. Die erste Auslagerung erfolgte an zwei Standorten: Meißen und Holzkirchen (Süddeutschland) im Winter 05/06, siehe z.B. [Set08].

²¹Verbundprojekt DAfStb: 4 Jahre, CONLIFE: 3 Jahre

Tabelle 4.1: Zusammensetzung und Kennwerte der ausgelagerten Betone in Meißen im Winter 06/07.

Rezeptur	Betonserie	Auslagerung Bezeichnung	Zusammensetzung					Kennwerte		
			Zement- art	Zement- menge	Zuschlag	Wasser	w/z	Frischbeton Aussbreit- maß	LP- Gehalt	Festbeton Druck- festigkeit
			[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[-]	[cm]	[Vol.-%]	[MPa]
I	713	F	CEM I 32.5 R	330	1848	180	0.55	38	1.6	48
II	715	H	CEM I 32.5 R	295	1883	180	0.61	38	1.2	45
-	716	K	CEM I 32.5 R	260	1912	180	0.70	40	1.3	37
-	711	J	CEM III/B 42.5 N	360	1827	180	0.50	40	0.7	50
I-b	712	G	CEM III/B 42.5 N	330	1848	180	0.55	45	1.3	47
II-b	714	I	CEM III/B 42.5 N	295	1883	180	0.61	48	1.5	42

Details zur Zusammensetzung und zu den Eigenschaften der im Rahmen dieser Arbeit geprüften Betone (Auslagerungscharge II) enthält Tabelle 4.1.

Die Praxisversuche simulieren horizontale, direkt beaufschlagte Bauteile, die einer Frostbeanspruchung ausgesetzt sind. Um diese Bedingungen nachzustellen, wurden die Feldproben seitlich abgedichtet und gedämmt. Auf den Prüfflächen wurde ein seitlicher Überrand zum Auffangen des Regenwassers aufgebracht, Abbildung 4.4. Gemäß DIN EN 206-1 entspricht diese Beanspruchungsart der Expositionsklasse XF3. Ziel war es, vor allem die Schadensentwicklung unter tatsächlicher Frostbeanspruchung zu untersuchen, und mit dem Verhalten in Laborprüfungen zu vergleichen.

Der Frostwiderstand wird durch Parameter wie Herstellbedingungen, Alter, Feuchtegehalt sowie Carbonatisierung beeinflusst. Daher wird besonderen Wert darauf gelegt Betone auszulagern, die unter gleichen Bedingungen hergestellt, nachbehandelt bzw. vorgelagert worden sind wie die Laborproben. Alle Feldproben werden im selben Prüfalter ausgelagert d.h. nach 35 (± 3) Tage. Ferner, wurden zu Vergleichszwecken Proben aus der gleichen Herstellcharge im Labor mit dem (modifizierten) CIF-Test untersucht. Die Auslagerung der Feldproben erfolgte beabsichtigt im späten Herbst. Auf diese Weise sollte eine Nachhydratation und/oder -carbonatisierung der Betone vor den Frostbeanspruchung ausgeschlossen werden. Die Probengeometrie entspricht jener der Laborproben für den CIF-Test, d.h. 110 x 150 x 70 mm³.

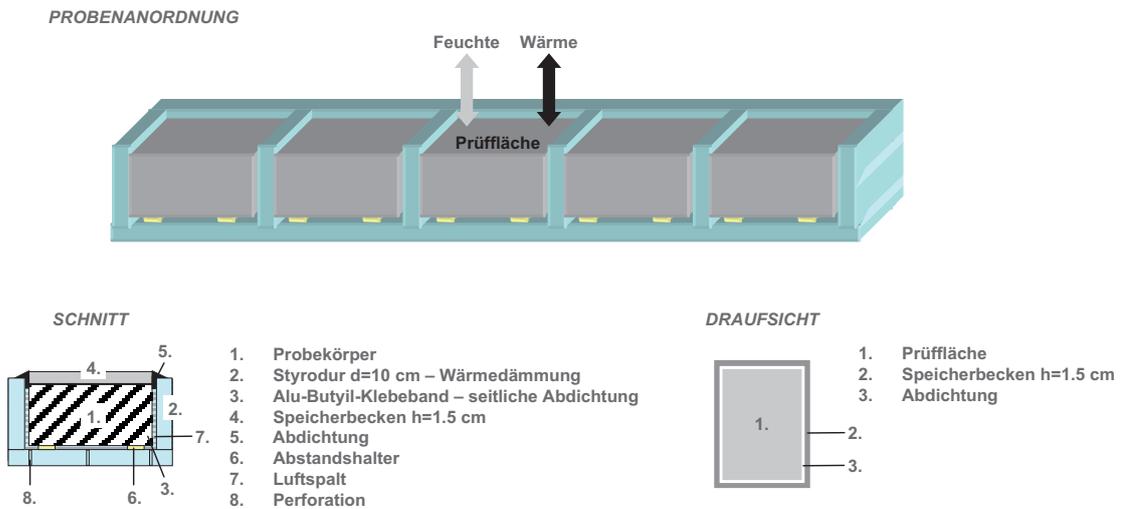


Abbildung 4.4: Anordnung der Praxisproben.

Während der Auslagerung werden nach jedem Winter an den Praxisproben folgende Kennwerte ermittelt:

- äußere Schädigung;
Die quantitative Bewertung des geschädigten Flächenanteils erfolgte, mittels Bildanalyseverarbeitung; bewertet wurde die geschädigte Teilfläche bezogen auf die exponierte Testfläche (in dm^2/m^2 entsprechend %). Zusätzlich wurde nach den Wintern das auf der

Testfläche befindliche abgelöste Material der Proben aufzufangen. Analog der Prüfvorschrift [BAW04] stellte die Gesamtmenge des abgelösten Materials die Abwitterung in g/m^2 dar.

- innere Gefügezerstörung (höhenabhängig);
Die Bestimmung der inneren Schädigung erfolgte per Ultraschalllaufzeitmessung in Anlehnung an die Prüfvorschrift [BAW04]. Als Bezugspunkt (100 %) wurde der Zeitpunkt des Beginns der Auslagerung gewählt.

Zusätzlich werden Feldproben mit modifizierten Multiring-Elektroden²² (MRE) ausgestattet. Die modifizierte MRE ist ein Feuchte-Temperatur-Sensor. Gemessen wird der elektrolytische Widerstand, welcher mittels Kalibrierkurven in entsprechende Feuchtegehalte umgerechnet wird. Detaillierte Angaben zum Aufbau, zur Funktionsweise und Auswertung sind in [Rau92] [SB07] zu finden. Im Rahmen der hier vorgestellten Praxisversuche werden MRE-Daten nicht zur üblichen Feuchtebestimmung verwendet, sondern zur Beurteilung der Frostbeanspruchung. Details dazu siehe folgenden Abschnitt sowie [Set08] [BS09].

4.2.2 Frostbeanspruchung in situ

Um eine Beziehung zwischen der auftretenden Schädigung infolge der Frostbeanspruchung unter realen Bedingungen aufzustellen, soll zuerst abgeklärt werden, unter welchen Randbedingungen es zu dem festgestellten Frostscha den in situ kommt. Dazu wird auf Messdaten aus dem SFB 398/Teilprojekt A11: „Lebensdauerbetrachtung von Beton unter speziellen Umwelteinflüssen wie Frost- und Frost-Tausalz-Beanspruchung“ [Set08] zurückgegriffen, dabei werden nur die frostrelevanten Zeiträume herangezogen, bei denen vollständige Messdaten vorliegen.

Voraussetzung für einen Frostscha den ist die Kombination – tiefe Temperaturen und hoher Sättigungsgrad. Üblicherweise werden die charakteristischen Frost-Kennwerte aus Wetterdaten (Niederschlagsmengen und Lufttemperatur) entnommen. Die Beurteilung der Intensität der Frostbeanspruchung eines Bauwerks erfolgt anhand der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, welche als (Temperatur-)Nulldurchgänge definiert sind. Dabei werden bei der Frostbeanspruchung drei maßgebliche Tagesszenarien unterschieden [SKP⁺07]:

- Frosttage – die Tagesmaximaltemperatur liegt über und die -minimaltemperatur unter 0°C ;
- Eistage – die Tageshöchsttemperatur liegt unter 0°C ;
- Frosttage mit Niederschlag.

²²Feuchte-Sensor mit integrierten Thermoelementen in Anlehnung an das Aachener Patent [Rau92]

Wie bereits erwähnt, erfolgt im Rahmen eigener Praxisversuche die Beurteilung der Frostbeanspruchung anhand der MRE-Daten. Hierbei wird die Temperaturabhängigkeit des Widerstandes zur Ermittlung der Gefrier- und Tautvorgänge im Beton genutzt. Wenn die Betontemperatur abfällt, steigt der Widerstand bei gleichem Feuchtegehalt an. Bei Gefriervorgängen nimmt der Widerstand überproportional zu, da das Eis praktisch wie ein Isolator wirkt. Für die Auswertung der Phasenumwandlung von Wasser in Eis wurde ein automatisches Datenanalyzesystem entwickelt. Dieses wird anhand experimenteller Laborergebnisse verifiziert. Bei der Datenanalyse wird ein Vorgang als Gefrier- oder Tauphase mittels einer Kriterienkombination von vorgegebener Minimaltemperatur und Signalabfall gezählt, welcher wiederum vom Feuchtegehalt bzw. von der Eisbildung abhängig ist. Details dazu in [Set08] [BS09]. Das Datenanalyzesystem liefert Daten über die Anzahl der Frost-Tau-Ereignisse einzeln für jeden Messpunkt, sowie die Dauer der einzelnen Phasenumwandlungen und die Abkühl-/Auftaugeschwindigkeit während der Phasenumwandlung. Zusätzlich werden auch die Daten nach den klassischen Auswertungskriterien für Frostereignisse geliefert: Nulldurchgänge der Lufttemperatur ergeben die Frost- bzw. Eistage.

Im Folgenden sind diese Daten auszugsweise dargestellt. Details sind [BS09] zu entnehmen. In dieser Arbeit sind die „Frost-Daten“ für folgende Punkte interessant:

- Saisonale- und/oder ortsabhängige unterschiedliche frostbedingte Schädigungsgrade sind besser interpretierbar, und
- die Schadensentwicklung im Labor und unter Praxisbedingungen lässt sich besser vergleichen.

Exemplarisch ist die Temperatur- und Feuchteabhängigkeit des Widerstands in Abbildung 4.5 verdeutlicht. Auszugweise ist in Abbildung 4.5 der Feuchteeintrag bis in die Tiefenstufe 3,4 cm einer Probe direkt nach dem Auslagern abgebildet. Der Logarithmus des Widerstands ist als Funktion der reziproken Betontemperatur dargestellt und folgt damit dem Ansatz der Arrhenius-Gleichung. Am 10.11. fällt der Widerstand in der Tiefe 0,7 cm ab, d.h. der erste Feuchteeintrag findet statt. Dies korreliert mit dem registrierten Niederschlagsereignis an diesem Tag (Abbildung 4.6). Darauf folgt eine Austrocknungsphase bis zum 15.11. Am 15.11. wird ein Frost-Tau-Wechsel gemessen, es wird aber kein Gefriervorgang im Beton registriert. Der Widerstand steigt zwar mit fallender Temperatur an, aber stetig linear und nicht sprunghaft, wie es charakteristisch für die Phasenumwandlung Wasser-Eis gewesen wäre, siehe Abbildung 4.7. Ferner findet am 15./16.11. ein erneuter Feuchteeintrag statt, der wiederum in einem Widerstandsabfall resultiert. Im Vergleich hierzu, wird in der Tiefe 3,4 cm im gleichen Zeitraum keine Feuchteänderung registriert, die Widerstandsänderung ist hier nur auf die Temperatur zurückzuführen.

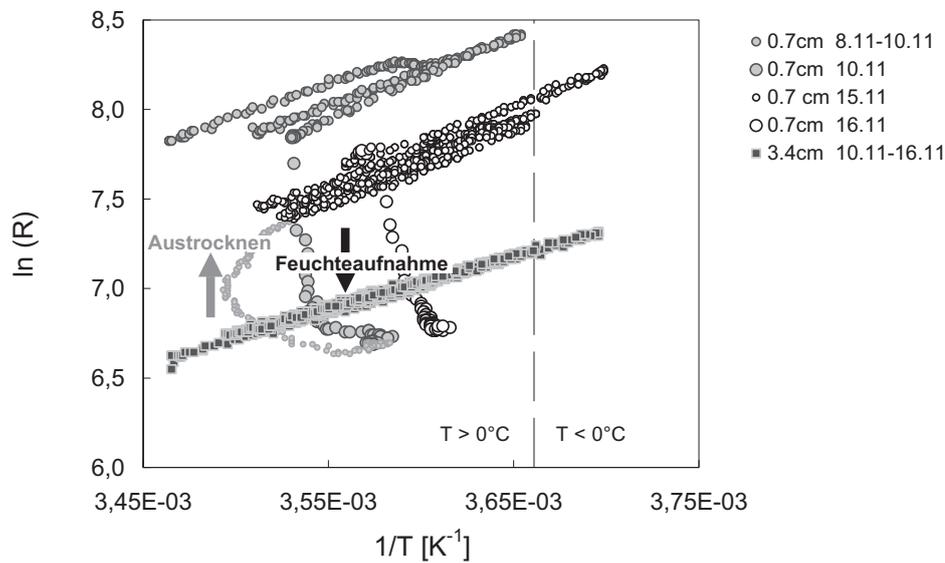


Abbildung 4.5: Feuchtetransport in der Betonradzone (Messpunkte 0,7 und 3,4 cm von der Betonoberfläche) einer Praxisprobe; der Logarithmus des Widerstands ist als Funktion der reziproken Betontemperatur dargestellt; die Feuchtaufnahme ist durch das Niveau der Kurve und das heißt den Nulldurchgang definiert, während die Steigung die Aktivierungsenergie b wiedergibt; entnommen aus [BS09].

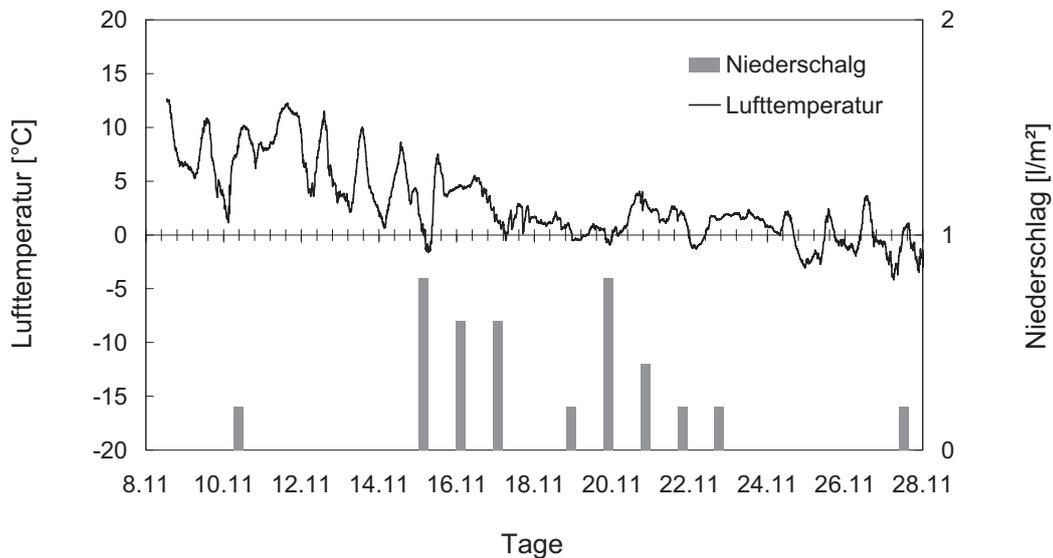


Abbildung 4.6: Lufttemperatur und Niederschlag; Auslagerungsort Meißen, Wetterstation vor Ort, 08.11.05–28.11.05; entnommen aus [BS09].

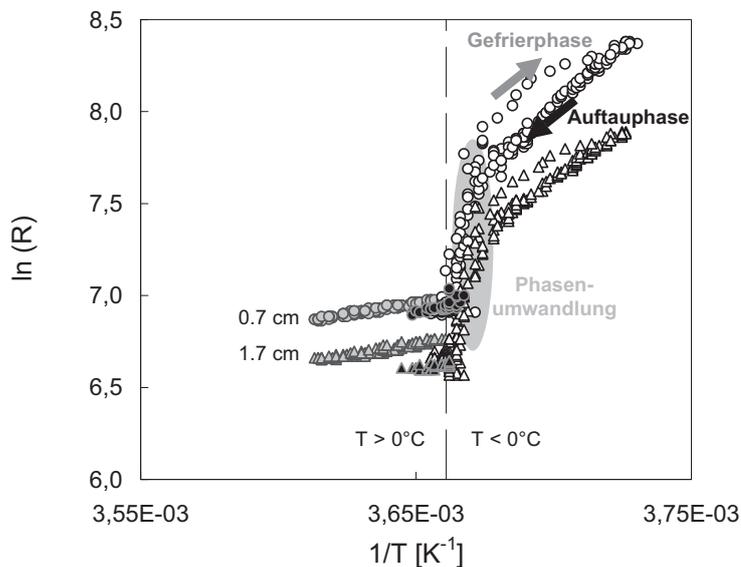


Abbildung 4.7: Exemplarische Darstellung eines Frostereignisses (25.–26.11.05) in der Betonrandzone (Messpunkte 0,7 und 1,7 cm von der Betonoberfläche) einer Praxisprobe; der Logarithmus des Widerstands ist als Funktion der reziproken Betontemperatur dargestellt; Daten aus [BS09].

Abbildung 4.7 zeigt Widerstandsverläufe in verschiedenen Tiefen einer Betonprobe während einer Gefrier-/Taufphase. Beim Gefriervorgang steigt der Widerstand bei Unterschreiten des „0 °C-Durchganges“ sprunghaft an. Der Gefriervorgang beginnt an der Oberfläche. Es bildet sich eine Eisfront, die ins Innere eindringt, siehe auch Abbildung 4.8. Des Weiteren ist ersichtlich, dass das (freie) Wasser kontinuierlich mit sinkender Temperatur gefriert. Während der Taufphase ist der umgekehrte Fall zu beobachten: Mit steigender Temperatur fällt der Widerstand sprunghaft ab. Die Schmelzfront schreitet ebenfalls von der Betonoberfläche ins Innere (Abbildung 4.8).

Im Folgenden bezeichnet der Begriff Frost-Tau-Ereignis²³ ein Gefrier-/Taufvorgang im Beton bzw. ein Frost-Tau-Ereignis bezeichnet die Phasenumwandlung Wasser-Eis-Wasser. Dies ist der wesentliche Unterschied zum gebräuchlichen Frost-Tau-Wechsel, welcher an Temperaturnulldurchgängen der Lufttemperatur und Tag/Nach-Zyklen gekoppelt ist. Mit dem Begriff Frostperiode wird der Zeitraum definiert, in dem Frost-Tau-Ereignisse auftreten, und deckt sich daher nicht mit dem kalendarischen Winter.

²³Abkürzung Frostereignis

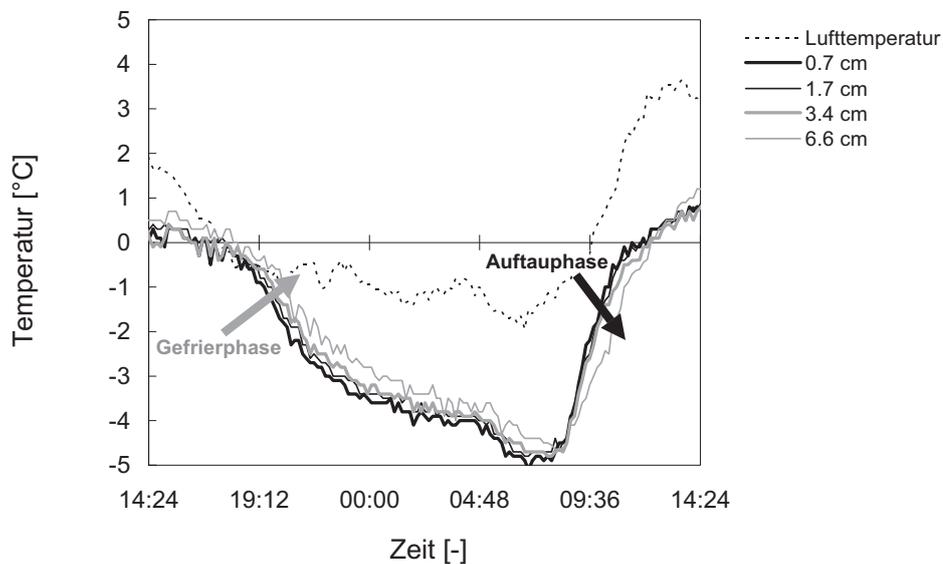


Abbildung 4.8: Exemplarische Darstellung des Temperaturverlaufes im Beton (Praxisprobe) während eines Frostereignisses (25.–26.11.05); der Wärmetransport ist eindimensional; Daten aus [BS09].

Die Datenanalyse ergab, dass der Feuchteeintrag ins Probeninnere in einer Frostperiode:

- Einzelnen Ereignissen zugeordnet werden kann, und
- größere Feuchteinträge ins Probeninnere vor und/oder zu Beginn der „Frostperiode“ erfolgten und diese dann eine Langzeitwirkung von mehreren Monaten haben.

Zudem konnten zwei charakteristische Frostbeanspruchungsarten identifiziert werden:

- Der Gefriervorgang findet nur in der Betonrandzone statt;
- nach einer Frostphase findet der Schmelzvorgang nur in der Betonrandzone statt, der Betonkern bleibt weiterhin im gefrorenen Zustand.

Letzteres ist insofern relevant, da die Frostpumpe während der Tauphase, mit eindringender Schmelzfront aktiviert wird. Zusammen mit der eindringen Schmelzfront kann, falls vorhanden, externes Wasser angesaugt werden.

Die Auswertung der Frostbeanspruchung in Abhängigkeit der Anzahl der Nulldurchgänge im Vergleich zur registrierten Anzahl der Gefrier-/Taufvorgänge in der Betonrandzone (Messpunkt: 0,7 cm) sind in Abbildung 4.9 zusammengestellt. Besonders von Interesse ist die Betonrandzone im Zusammenhang mit der festgestellten oberflächlichen Schädigung der ausgelagerten

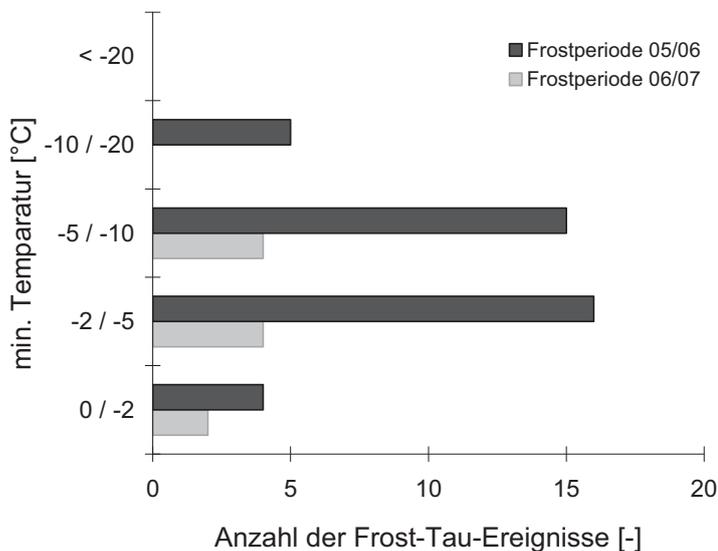


Abbildung 4.9: Gegenüberstellung der Häufigkeit der Frost-Tau-Ereignisse in Abhängigkeit von der Minimaltemperatur für Winter 05/06 und 06/07 in Meißen; Messpunkt 0,7 cm; entnommen aus [BS09].

Betone, die später erläutert wird. In beiden Frostperioden liegt die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (Frosttage) deutlich über der Anzahl der Frost-Tau-Ereignisse. In Abbildung 4.10 ist die Häufigkeit der Frost-Tau-Ereignisse in Abhängigkeit der Minimaltemperatur für den Messpunkt 0,7 cm der Frostperiode 05/06 und 06/07 in Meißen gegenübergestellt. Die einzelnen Frostperioden unterscheiden sich hinsichtlich der insgesamt aufgetretenen Anzahl der Frost-Tau-Ereignisse sowie der jeweiligen Minimaltemperaturen. Interessanterweise spielt sich in beiden Frostperioden 80% der Frost-Tau-Ereignisse im Temperaturbereich zwischen -2 und -10 °C ab, siehe Tabelle 4.2. Dies deckt sich mit Erfahrungen in [MG10]. Zwischen den einzelnen Proben pro Frostsaison gibt es keine bedeutenden Unterschiede in der Anzahl der Frostereignisse, es ist lediglich eine Abweichung von ± 1 Frostereignis festzustellen. Die winterlichen Mittelwerte der Abkühl- und Auftaugeschwindigkeiten im Winter 05/06 von 1,5 K/h und 2,2 K/h sind praktisch gleich denen im darauffolgenden Winter – 1,8 K/h und 2,4 K/h. Die max. datierten Abkühl- und Auftaugeschwindigkeiten im Winter 05/06 liegen bei 4,6 K/h und 5,5 K/h und im Winter 06/07 bei 2,7 K/h und 4,0 K/h. Festzuhalten ist, dass in den eigenen Feldversuchen hinsichtlich der frostrelevanten Umweltfaktoren vor allem die Anzahl der Frostereignisse dominiert, siehe Tabelle 4.3.

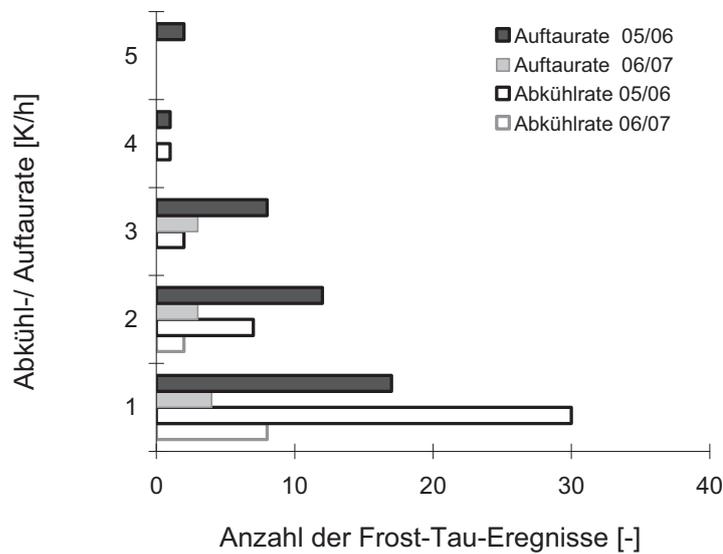


Abbildung 4.10: Gegenüberstellung der Häufigkeit der Frost-Tau-Ereignisse in Abhängigkeit der max. Abkühl- und Auftau geschwindigkeit für Winter 05/06 und 06/07 in Meißen; Messpunkt 0,7 cm; entnommen aus [BS09].

Tabelle 4.2: Anzahl der Frost-Tau-Ereignisse in Abhängigkeit der Temperaturklasse; Daten aus [BS09].

Temperaturklasse [°C]	Anzahl Frost-Tau-Ereignisse [%]	
	Frostperiode 05/06	Frostperiode 06/07
0 / -2	10	20
-2 / -5	40	40
-5 / -10	38	40
-10 / -20	12	0
> -20	0	0

Tabelle 4.3: Kennwerte der Frostbeanspruchung für Winter 05/06 und 06/07 in Meißen; entnommen aus [BS09]

Frostbeanspruchung	Frostperiode	
	05/06	06/07
Frosttage: $T_{\min} < 0^{\circ}\text{C}$, $T_{\max} > 0^{\circ}\text{C}$	73	30
Frosttage mit Niederschlag	35	12
Eistage: $T_{\max} < 0^{\circ}\text{C}$	35	4
<i>Frost-Tau-Ereignisse</i>	<i>40</i>	<i>10</i>

Ausgehend von den Überlegungen in [Sch02] [Ung04] liefern die gewonnenen Erkenntnisse auch eine Grundlage für die Ausarbeitung möglicher Frostszenarien hinsichtlich der Tiefeneinwirkung und Dauer der einzelnen Frostphasen [BS09]:

- Schnellwirkendes Ereignis – kurzfristige Auswirkung unmittelbar an der Betonoberfläche (Tiefeneinwirkung < 7 mm, messtechnisch nicht erfasst).
- Kleinereignis – Auswirkung von mehreren Stunden aufgrund des Tag/Nacht-Zyklus, entspricht dem gebräuchlichen Frost-Tau-Wechsel.
- Großereignis – entspricht dem Frostereignis; die Dauer geht über den Tag/Nacht-Zyklus hinaus; Tiefeneinwirkung bis ins Betoninnere, möglich ist ein zeitweises Auftauen der Betonrandzone.

4.2.3 Frostschädigung in situ

Im folgenden Abschnitt werden die ermittelten Daten zur Frostschädigung der Praxisproben vorgestellt. Die Praxisproben wurden nach jeder Frostperiode geprüft. Bestimmt wurde die äußere sowie die innere Schädigung und Feuchteaufnahme. Um die unterschiedliche Dauer der Frostperioden über die Jahre zu berücksichtigen, fanden die Inspektionstermine immer im Mai statt. Da Niederschlagsereignisse besonders stark den momentanen Feuchtegehalt der Probekörper beeinflussen können, wurde darauf geachtet, dass vor den Messterminen vor Ort mindestens eine Woche lang kein Niederschlag registriert wurde.

4.2.3.1 Äußere Schädigung

Für die Bewertung des Zustands frostgeschädigter Bauwerke existieren keine normativen Vorgaben oder Richtwerte. Es liegt kein Klassifizierungssystem vor, das ausgehend vom Zustand des frostgeschädigten Bauwerks (abgewitterte Oberfläche, Rissbildungen) dessen objektive Bewertung hinsichtlich des Schädigungsgrades bzw. der Einschränkung der Nutzungsfähigkeit ermöglicht [SBB⁺05]. Des Weiteren ist für die Beurteilung der äußeren Schädigung an realen Bauwerken grundsätzlich die vorgesehene Nutzung und Bedeutung mit zu berücksichtigen. So kommt dem gleichen Schädigungsgrad bei unterschiedlicher Nutzung eine andere Bedeutung zu.

Äußere Schäden zeigen sich in Form von Oberflächenabwitterungen. Dabei werden kleine Partikel – sandige Abwitterung oder dünne Schichten – Abplatzungen aus der Oberfläche des Betons herausgelöst oder abgesprengt, vgl. Abbildung 4.11. Im Labor wird die äußere Schädigung als die Menge des abgelösten Materials oder als Massenverlust der Probe erfasst. Damit ein direkter Vergleich mit Laborergebnissen möglich ist, wurde bei den Praxisproben in Anlehnung an die CIF-Prüfvorschrift [BAW04] das auf der exponierten Fläche abgelöste Material aufgefangen. Anschließend wurde der visuelle Schädigungsgrad in dm^2/m^2 – entspricht % – der Praxisproben bestimmt. Dazu wurde mittels Bildanalyseverarbeitung der geschädigte Anteil der Prüffläche ermittelt. Letztlich wurde die Abwitterung in g/m^2 mit dem visuellen Schädigungsgrades verglichen. Ferner, konnte anhand des visuellen Schädigungsgrad die Abwitterung von Betonproben, deren Abwitterung nicht vorliegt – in diesem Fall von Betonen der ersten Auslagerungscharge [Set08] –, abgeschätzt werden.

Bei CEM III/B-Praxisbetonen wurden Schäden schon in der ersten Frostperiode festgestellt. Die „ersten“ Schäden manifestieren sich als Abplatzungen dünner Zementsteinschichten, über-

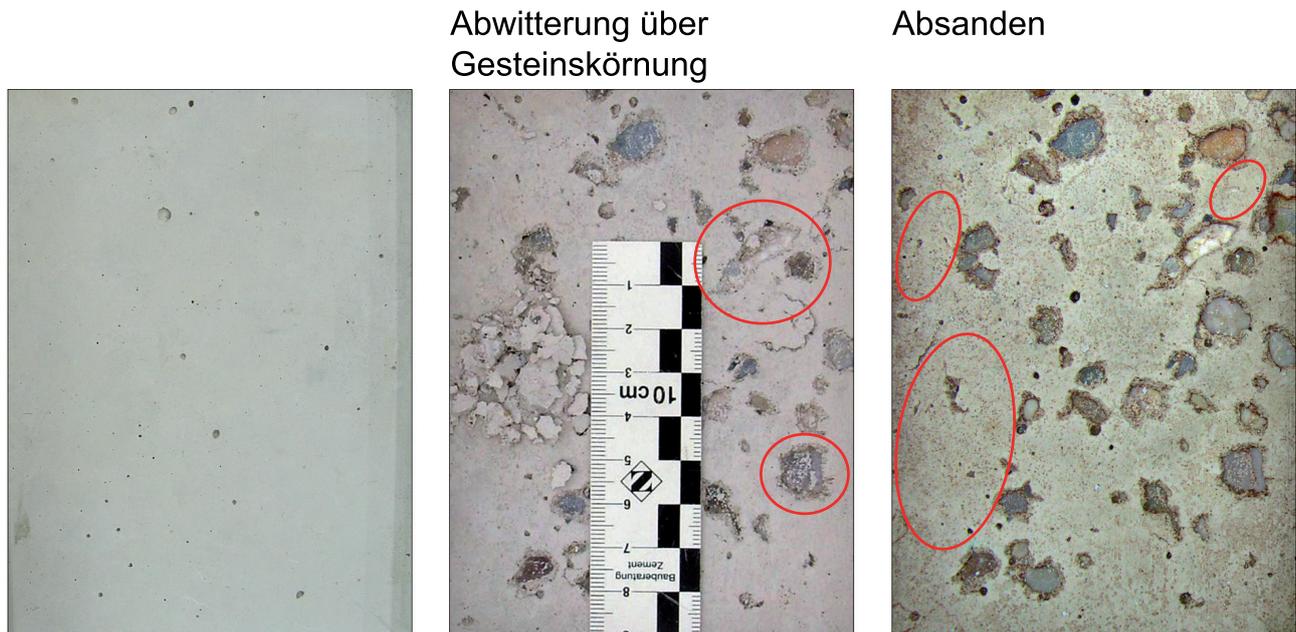


Abbildung 4.11: Entwicklung der äußeren Schädigung: Exemplarische Darstellung einer Praxisprobe G1 (CEM III/B-0,55); links – vor Auslagerung, Mitte – nach erster Frostperiode, rechts – nach zweiter Frostperiode.

wiegend über Gesteinskörnung. In darauffolgenden Frostperioden werden diese durch weitere Frostereignisse vergrößert. Des Weiteren war eine flächig-sandige Abwitterung zu beobachten. Dieses Schadensbild wird i.d.R. erst nach der zweiten Frostperiode deutlich. Insbesondere war dies bei den CEM I-Betonen zu beobachten. Schadensbilder der einzelnen Praxisproben sind den Anhang zu entnehmen.

In den folgenden Abbildungen sind die Ergebnisse der oberflächlichen Schädigung der einzelnen Proben in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung sowie Frostperiode dargestellt. Bewertet werden nur Proben ohne eingebauten MRE-Sensor. Dadurch soll eine eventuelle Beeinträchtigung der exponierten Oberfläche/Randzone durch Sensoren ausgeschlossen werden. Betrachtet man die Einzelergebnisse innerhalb einer Betonserie, so liegen diese in der gleichen Größenordnung, siehe Abbildung 4.12. Die einzige Ausnahme ist die Probe 2 der Serie I (CEM III/B; $w/z = 0,61$). Sie zeigt im Vergleich zu den restlichen Proben dieser Serie eine deutlich geringere oberflächliche Schädigung. Darüber hinaus ist die Schadensentwicklung innerhalb einer Betonserie deckungsgleich.

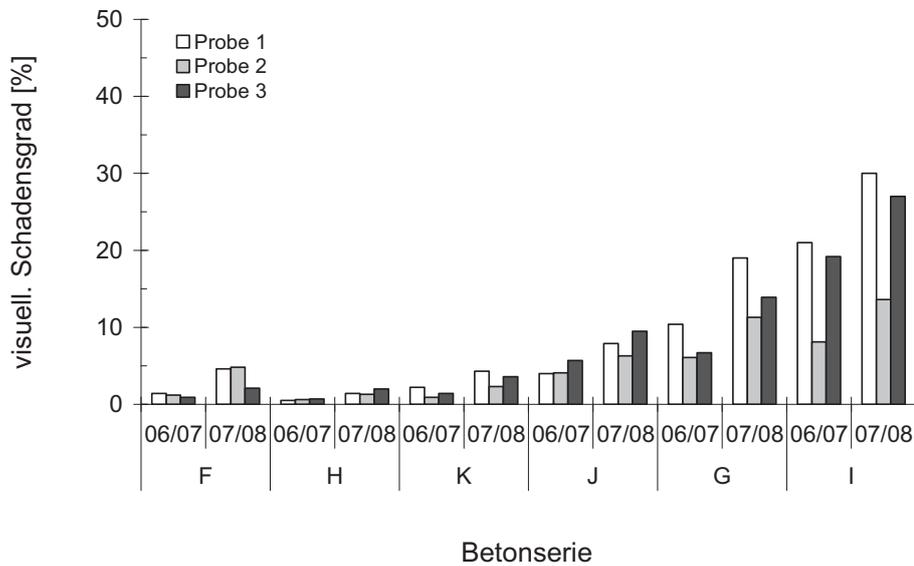


Abbildung 4.12: Visueller Schädigungsgrad (Einzelergebnisse) der ausgelagerten Proben in Abhängigkeit der Frostperiode und Betonzusammensetzung; Zusammensetzung und Eigenschaften siehe Tabelle 4.1.

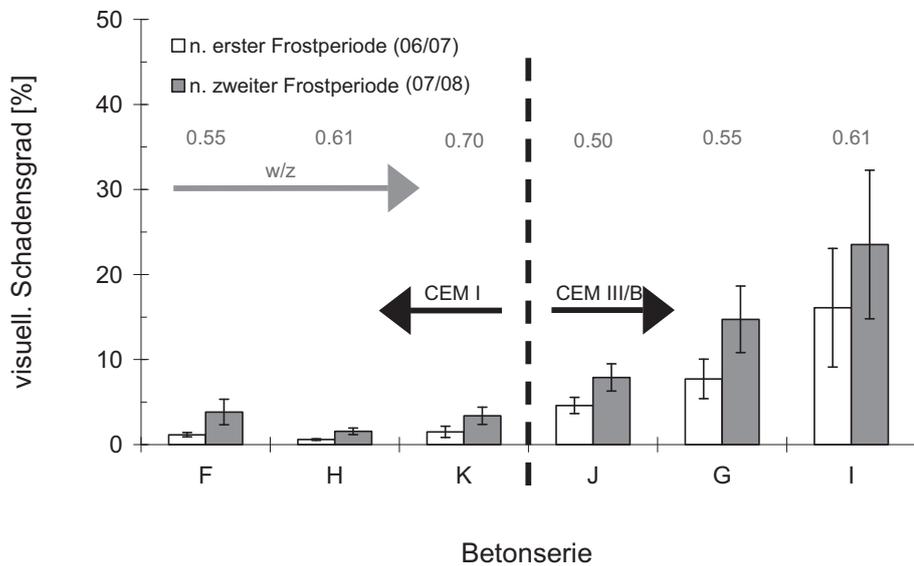


Abbildung 4.13: Entwicklung der äußeren Schädigung der Praxisbetone definiert als visueller Schädigungsgrad über die Auslagerungsdauer.

Abbildung 4.13 zeigt die Mittelwerte des visuellen Schädigungsgrades in Abhängigkeit der Betonserie nach der ersten bzw. nach der zweiten Frostperiode. Die äußere Schädigung steigt mit dem w/z-Wert an. Gleichzeitig ist der Einfluss der Zementart ausgeprägt: CEM III/B-Betone tendieren beim gleichen w/z-Wert zu deutlich größerer äußerer Schädigung. So liegt der visuelle Schädigungsgrad aller ausgelagerten CEM I-Betone nach der zweiten Frostperiode unter $5 \text{ dm}^2/\text{m}^2$. Bei den CEM III/B-Betonen erreicht diesen Wert die „beste“ Betonserie (w/z = 0,50) bereits nach der ersten Frostperiode.

Ferner, ist die Schadenszunahme bei den CEM III/B-Betonen deutlich progressiver im Vergleich zu den CEM I-Betonen, siehe Abbildung 4.14. Letztere haben praktisch keine nennenswerte Abwitterung. Gemäß Abbildung 4.16 entspricht ein visueller Schädigungsgrad von rd. $5 \text{ dm}^2/\text{m}^2$ einer Abwitterung von rd. $50 \text{ g}/\text{m}^2$. Die CEM III/B-Betone liegen teilweise mehrfach über dieser Abwitterung, so liegt z.B. die Abwitterung der Betonserie G mit einem w/z-Wert von 0,55 bei rd. $150 \text{ g}/\text{m}^2$. Zusätzlich sei angemerkt, dass die ermittelten Abwitterungen im Praxisversuch deutlich unter den Laborwerten liegen, siehe dazu Kapitel 5. Dabei darf nicht außer Acht gelassen werden, dass: (1) die Laborrandbedingungen – Minimaltemperatur -20°C und Abkühl-/Auftauzeit $10 \text{ K}/\text{h}$ – deutlich schärfere Randbedingungen sind und (2) ein Schädigungskriterium von $1000 \text{ g}/\text{m}^2$ nach 28 FTW definiert ist.

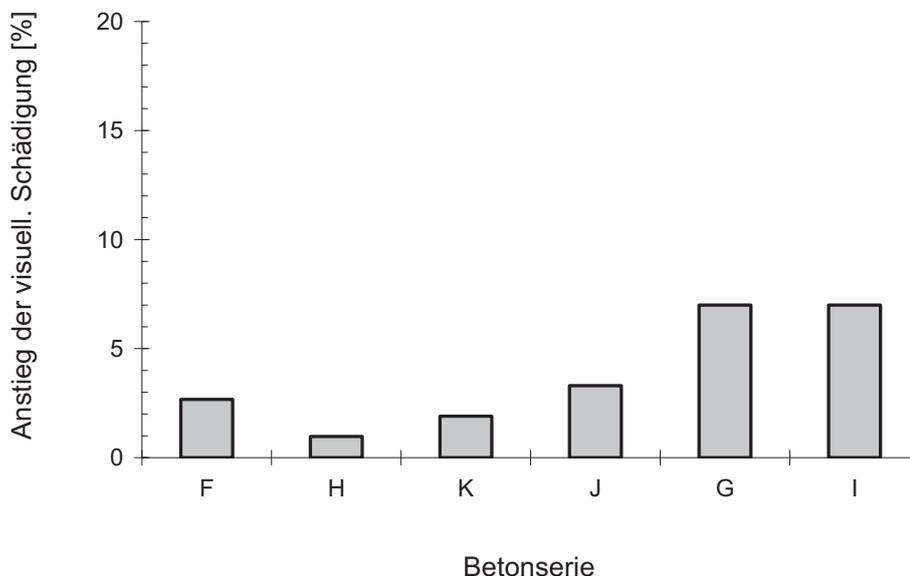


Abbildung 4.14: Zunahme der äußeren Schädigung der Praxisbetone nach Frostperiode 07/08 im Vergleich zum Vorjahr (Frostperiode 06/07); Zusammensetzung und Eigenschaften siehe Tabelle 4.1.

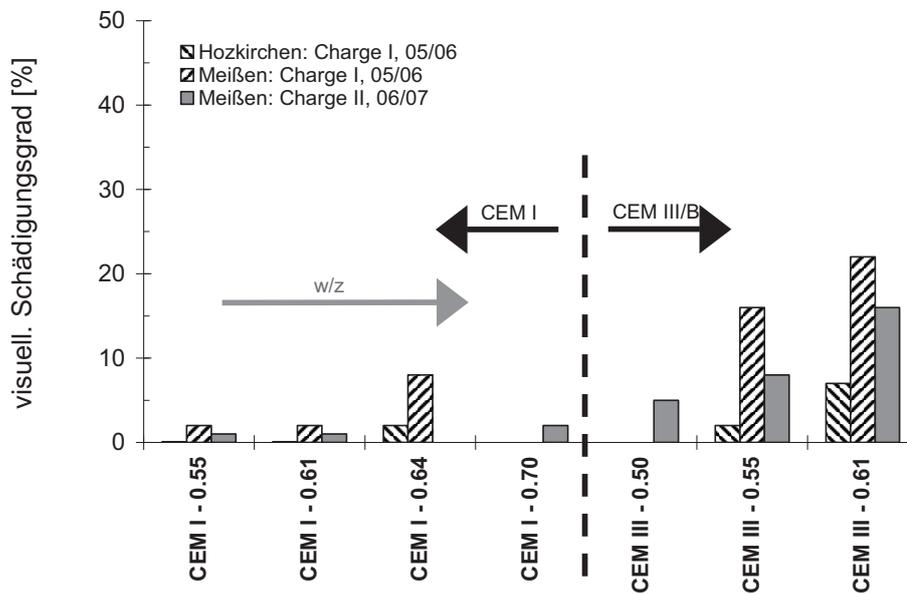


Abbildung 4.15: Visueller Schädigungsgrad (Mittelwert einer Betonserie) der Praxisbetone nach der ersten Frostperiode in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung, Auslagerungsort und Auslagerungsjahr; Daten zu Auslagerungscharge I sind [BS09] zu entnehmen.

Ein Vergleich der oberflächlichen Schädigung nach einer Frostperiode in Abhängigkeit der Betonqualität, des Auslagerungsjahres sowie -ortes ist in Abbildung 4.15 wiedergegeben. Bei allen ausgelagerten Proben ist eine präzise Zuordnung anhand des Schädigungsgrades und der Betonqualität möglich; miteinbezogen sind die Werte der Auslagerungscharge I. Die unterschiedliche klimatische Beanspruchung spiegelt sich im festgestellten Schädigungsgrad wider.

Betone der Auslagerungscharge I zeigen einen um den Faktor 1,5 bis 2 höheren Schädigungsgrad als die Betone der Auslagerungscharge II bei gleicher Zusammensetzung. Vergleicht man die Frostbeanspruchung der Betone in Meißen über die zwei Frostperioden, siehe Tabelle 4.3, so ist die höhere Schädigung nach den Frostperiode 05/06 der höheren Anzahl der Frostereignisse bzw. der stärkeren Temperaturbeanspruchung zuzuordnen. Unterschiede innerhalb der Auslagerungscharge 05/06 in Abhängigkeit des Auslagerungsortes bzw. der Klimabeanspruchung wurden ebenso ermittelt – generell sind die Proben in Meißen stärker geschädigt als jene in Holzkirchen. Festzuhalten ist: Die Staffelung der Schädigung der verschiedenen Betonarten – nicht der absolute Schädigungsgrad – ist an zwei Auslagerungsorten sowie über zwei Frostperioden identisch bzw. wiederholbar. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass sich die Staffelung der äußeren Schädigung, wie sie unter Praxisbedingungen festgestellt wurde, auch in der Schädigung der Laborbetonen widerspiegelt, siehe dazu Kapitel 5.

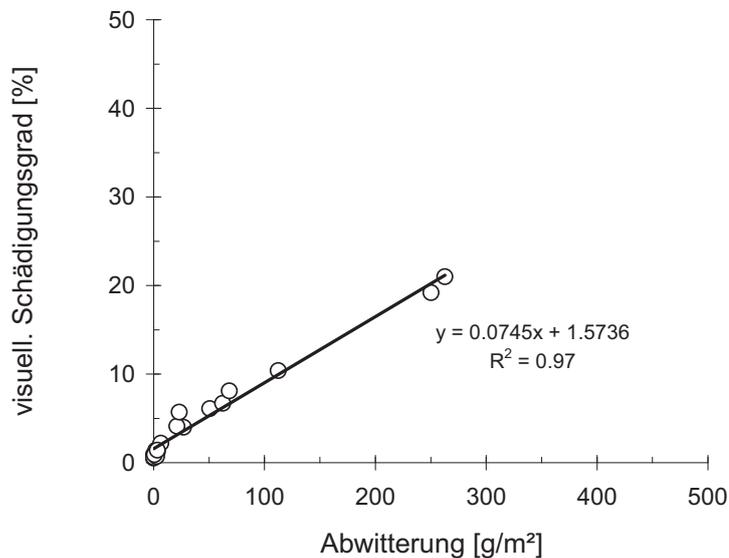


Abbildung 4.16: Abwitterung (Einzelergebnisse) der ausgelagerten Proben nach der ersten Frostperiode (06/07) gegenübergestellt dem visuellen Schädigungsgrad.

In Abbildung 4.16 ist die Abwitterung der Praxisbetone nach der ersten Frostperiode dem visuellen Schädigungsgrad gegenübergestellt. Es besteht ein funktioneller Zusammenhang zwischen dem visuellen Schädigungsgrad und der aufgefangenen Abwitterung (Bestimmtheitsmaß $R^2 = 0,97$).

Aus den Praxisuntersuchungen resultiert als wesentliches Erkenntnis, dass auch im Falle eines reinen Frostangriffes die äußere Schädigung nicht zu vernachlässigen ist.

4.2.3.2 Innere Schädigung und Feuchteaufnahme

Die innere Schädigung wird an den ausgelagerten Probekörpern in verschiedenen Höhen parallel zur Prüffläche ermittelt. Auf diese Weise können u.a. Schädigungsprofile erstellt werden. Die Abstände der einzelnen Achsen von der exponierten Oberfläche liegen bei 1,5, 3,5 (Probenmitte) und 5,0 cm. Die Bestimmung der inneren Schädigung erfolgt per Ultraschalllaufzeitmessung in Anlehnung an [Set04]. Die Ankopplung der Ultraschall-Prüfköpfe an die Prüfkörperoberfläche erfolgt direkt. Als Ankopplungsmittel wird Ultraschallgel verwendet. Pro Messebene wird die Ultraschalllaufzeit mehrfach gemessen. Das Ergebnis wird als reproduzierbar bewertet, wenn bei wiederholter Messung die Ultraschalllaufzeiten unter 1 % voneinander abweichen. Als Bezugspunkt ($RDM = 100 \%$) gilt der Zeitpunkt des Beginns der Auslagerung.

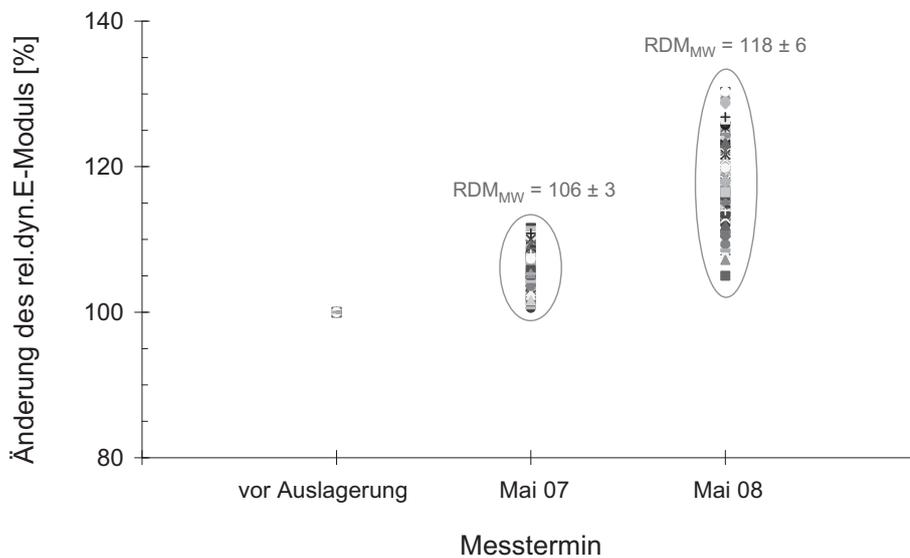


Abbildung 4.17: Änderung des rel. dyn. E-Moduls (Einzelergebnisse) der Praxisproben während der Auslagerungszeit.

Vorerst wird jedes Einzelergebnis für sich betrachtet, um eine mögliche Mikrorissbildung innerhalb einer Probe zu detektieren oder Unterschiede innerhalb einer Serie zu berücksichtigen, siehe Abbildung 4.17. Aus Abbildung 4.17 geht hervor, dass alle RDM-Einzelwerte – nach der ersten bzw. zweiten Frostperiode – über 100% (Bezugspunkt) liegen, d.h., es ist auf diese Weise keine innere Schädigung – Mikrorissbildung – feststellbar. Betrachtet man jedoch die Entwicklung des rel. dyn. E-Moduls über die Zeit, zeigt sich nach der zweiten Frostperiode eine deutliche Zunahme des rel. dyn. E-Moduls im Vergleich zum Ausgangspunkt.

Interessanterweise sind Unterschiede im RDM-Anstieg in Abhängigkeit der Zementart feststellbar, siehe Abbildung 4.18. So zeigen die CEM III/B-Betone einen RDM-Anstieg nach zwei Auslagerungsjahren von rd. 20% und die CEM I-Betone von rd. 15%. Der gleiche Trend, wenn auch deutlich weniger ausgeprägt, ist nach der ersten Frostperiode erkennbar: Bei den CEM III/B-Betonen liegt der RDM-Anstieg bei rd. 8% und bei den CEM I-Betonen bei rd. 4%. Ferner ist bei den CEM III/B-Betonen ein Trend in Abhängigkeit von der durchschalteten Probenhöhe zu verzeichnen: Die Rückseite, d.h. die Probenebene 5,0 cm von der Prüffläche zeigt den geringsten RDM-Anstieg. Die Änderung der RDM innerhalb einer Serie, bezogen jeweils auf die entsprechende Durchschalungsebene, ist einheitlich. Die Standardabweichung liegt i.d.R. unter 1,5%.

Der RDM-Anstieg kann mit der Gefügeverdichtung der Betone infolge einer Nachhydratation erklärt werden. Eine Verbesserung der US-Geschwindigkeit wegen zusätzlicher Feuchtaufnahme kann im vorliegenden Fall ausgeschlossen werden, siehe Abbildung 4.19.

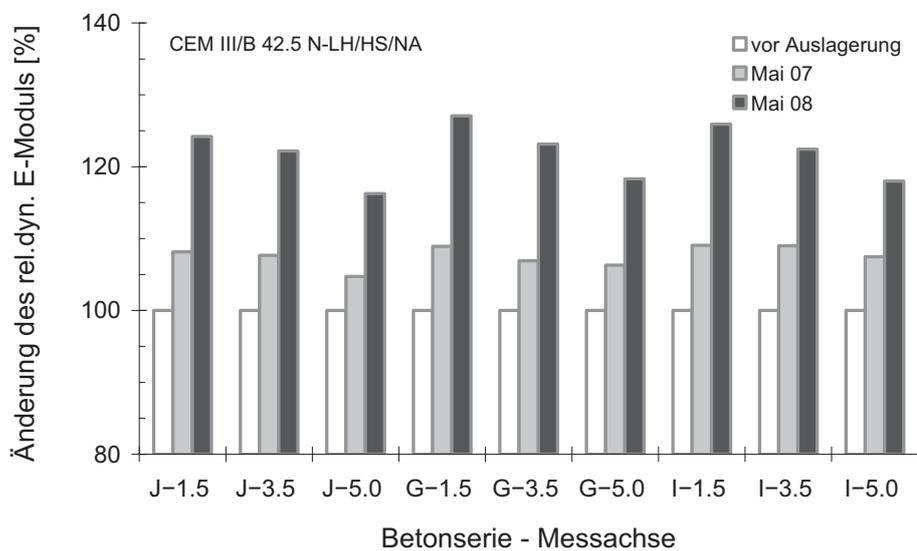
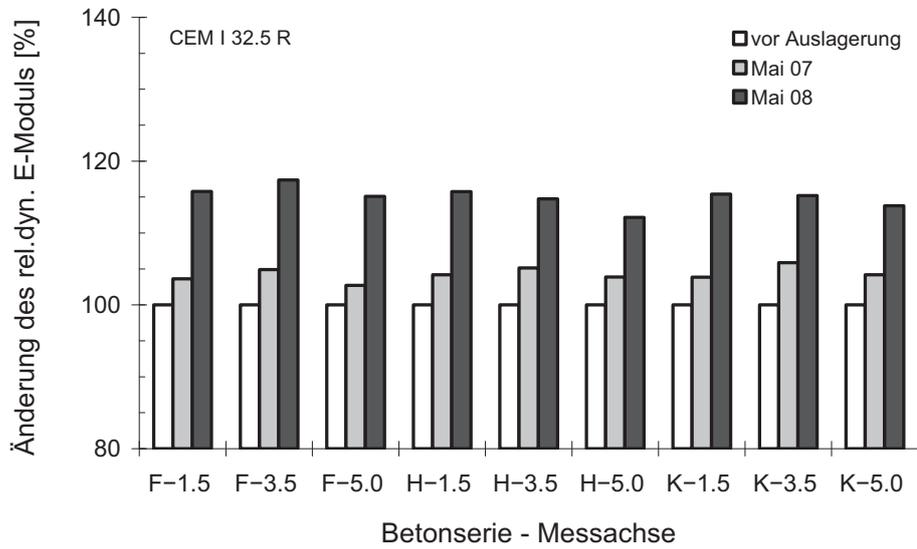


Abbildung 4.18: Mittelwerte der Änderung des rel. dyn. E-Moduls gesondert nach Betonserie in Abhängigkeit der Prüfachse; oben – CEM I-Betone, unten – CEM III/B-Betone; Zusammensetzung und Eigenschaften siehe Tabelle 4.1.

An dieser Stelle sei noch darauf hingewiesen, dass bei den Proben der ersten Auslagerungscharge keine so ausgeprägte RDM-Zunahme festgestellt wurde. Dies könnte damit erklärt werden, dass diese Proben einer viel schärferen Frostbeanspruchung im ersten Auslagerungsjahr ausgesetzt waren, siehe dazu [Set08].

Insgesamt können die Ergebnisse zur Bestimmung der inneren Schädigung wie folgt zusammengefasst werden:

- Nach zwei Wintern kann an keiner Probe eine innere Schädigung bzw. ein Abfall des rel. dyn. E-Moduls in den einzelnen Ebenen festgestellt werden.

In Abbildung 4.19 sind die Mittelwerte der Massenänderung der Praxisproben der jeweiligen Betonserien während der Auslagerung dargestellt. Als Nullmessung wurde die Masse der Probekörper zu Beginn der Auslagerung gewählt. Dass eine Sättigung der Proben möglich ist, wird durch auf die Prüffläche aufgebrachte Wasserspeicherbecken sichergestellt. Zum Vergleich sind in der gleichen Abbildung Laborwerte – Ergebnisse der Massenänderung der gleichen Betonserien (gleiche Herstellcharge) nach der Vorsättigung im CIF-Test dargestellt. Die Feuchtaufnahme liegt unter realen Klimabedingungen mit max. 0,2 M.-% weit unter der aufgenommenen Feuchte im Labor. Dort beträgt sie in Abhängigkeit der Betonqualität zwischen 0,77 und 1,27 M.-%.

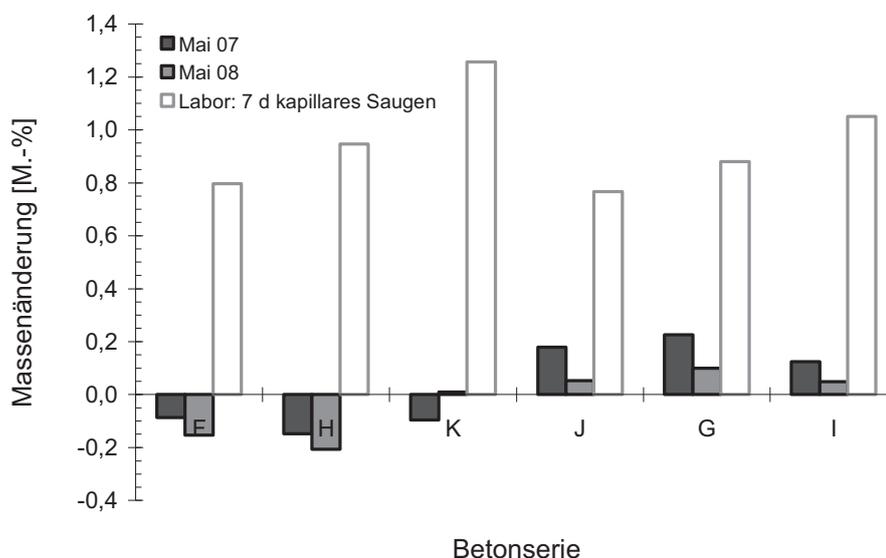


Abbildung 4.19: Massenänderung (Mittelwerte) bzw. Feuchtaufnahme der Praxisproben im Vergleich zu Laborproben gleicher Herstellcharge im CIF-Test nach der Vorsättigung; Zusammensetzung und Eigenschaften der Betone siehe Tabelle 4.1.

Hier ist zu beachten, dass die Messwerte vor Ort nur die aktuelle Feuchtesituation der Praxisproben darstellen. Aus diesem Grund wird auf eine tiefer greifende Interpretation verzichtet. Hinzu kommt der Massenverlust der Proben infolge der Abwitterung. Wesentlich ist, dass die Ergebnisse mit den MRE-Daten korrelieren. So konnte vor dem Messtermin Mai 07 eine 6-wöchige Austrocknungsphase der Proben und extrem niedrige Widerstandswerte registriert werden, Details siehe [Set08]. In Zusammenhang mit den MRE-Daten konnte auch festgestellt werden, dass unter den vorliegenden Praxisbedingungen (Simulation der XF3-Exposition) keine kontinuierliche Zunahme des Feuchtegehaltes über mehrere Jahre hinweg, d.h. eine Auf-sättigung der Proben stattfand. Die Proben trockneten in der Sommerphase (weiter) aus. Die wesentlichen Feuchteaufnahmen finden unmittelbar vor oder zu Beginn der Frostperiode statt. Letzteres deckt sich mit den Erfahrungen anderer Autoren wie z.B. [SKP⁺07]. Es ist aber zu beachten, dass sich der Frost-Tau-Wechsel-Angriff bei den Praxisbetonen auf eine relativ schmale Oberflächenschicht beschränkte, die weder bei der Ultraschalllaufzeit noch bei der MRE messtechnisch korrekt erfasst werden kann. Die deutlich schärfere Laborprüfung erzeugt ein tieferes Eindringen des Frost-Tau-Ereignisses und ist daher auch klar in größerer Tiefe erfassbar.

Im Sinne eines Fazits lässt sich festhalten, dass die ermittelte Massenänderung erstens eine Momentsituation ist. Zweitens ist die Feuchteaufnahme auf Basis der Probenmasse grundsätzlich ein integraler Wert, da sich diese auf die Gesamtprobe bezieht und keine Auskunft über das Feuchteprofil gibt. Bekanntlich tritt ein Frostschaden auch dann auf, wenn lokal die Sättigung der Porenstruktur den kritischen Sättigungsgrad überschreitet. In Bezug auf die eigenen Praxisuntersuchungen kann messtechnisch keine abgesicherte Aussage über den Sättigungsgrad bzw. Feuchtegehalt der äußeren Betonschicht getroffen werden. Dennoch explizieren die MRE-Daten des ersten Messpunktes – 0,7 cm unterhalb der exponierten Oberfläche – in Kombination mit dem aufgetretenen äußeren Schaden, dass der kritische Sättigungsgrad in der Oberflächenschicht überschritten wurde.

4.2.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse der Praxisuntersuchungen

Zusammenfassend können aus den Praxisuntersuchungen folgende Erkenntnisse abgeleitet werden:

- Bei allen ausgelagerten Proben ist bezüglich der äußeren Schädigung eine präzise Zuordnung anhand des Schädigungsgrades und der Betonqualität möglich: (1) Je größer der w/z-Wert der Betonmischung ist, desto größer ist die oberflächliche Schädigung; (2) die verwendete Zementart wirkt sich auf den Frostwiderstand aus – hüttensandhaltige Betone neigen unter sonst gleichen Randbedingungen zur größerer Oberflächenschädigung als

die Portlandbetone. Überdies ist die Staffelung der Schädigung über zwei Frostperioden identisch bzw. wiederholbar. Es konnte auch gezeigt werden, dass sich die Schädigung über die einzelnen Frost-Tau-Ereignisse bzw. Frostperioden aufsummiert.

- Eine innere Schädigung ist in der messtechnisch erforderlichen Tiefe nach zwei Frostperioden mittels Ultraschallaufzeitmessung in verschiedenen Probenkörperhöhen nicht erkennbar.

4.3 Praxisuntersuchungen im Vergleich zum (modifizierten) CIF-Test

Im Folgenden werden die Ergebnisse aus den Praxisuntersuchungen mit dem CIF-Test, d.h. mit den Ergebnissen im Labor verglichen. Die wesentliche Frage ist dabei: Wird durch die extreme Frostbeanspruchung im Zeitraffereffekt im CIF-Test die Schädigung beschleunigt oder werden eventuell Schädigungen hervorgerufen, die nicht in der Praxis vertretbar sind?

Bereits im Vorfeld sei darauf hingewiesen, dass die Temperatur- und Feuchteverhältnisse im Labor und in der Praxis grundsätzlich nicht 1:1 korreliert werden können, da der Temperaturzyklus und das Feuchteangebot im CIF-Test strengstens definiert bzw. kontrolliert sind. Die „natürliche“ Frostbeanspruchung dagegen ereignet sich unter verschiedenen Rahmenbedingungen. Des Weiteren simuliert der CIF-Test das Langzeitverhalten des Betons unter Frostangriff über mehrere Jahrzehnte (50 [din00] bzw. 100 Jahre [BAW04]) im Zeitraffereffekt. Dadurch ist es, im Labor im Vergleich zu realen Umweltbedingungen zwingend erforderlich eine sehr viel schärfere Feuchte- und Temperaturbeanspruchung zu erzeugen. Dies führt zu einer sicheren Bewertung der Betone mittels CIF-Test. Gleichzeitig wird der zulässige Extremfall abgebildet. Die im CIF-Test normierte Minimaltemperatur von -20 °C bildet den unter mitteleuropäischen Klimabedingungen auftretenden Extremwert ab.

Der Frostwiderstand ist von verschiedenen Parametern abhängig. Der Übersichtlichkeit wegen werden die betontechnologischen und umweltbedingten Einflüsse sowie der auftretende Schaden jeweils einzeln betrachtet. In Tabelle 4.4 sind die wesentlichen Einflussgrößen aufgelistet. Dieselbe Tabelle beinhaltet den Vergleich der Kenndaten unter Praxis- und Laborbedingungen.

Tabelle 4.4: Einflussgrößen auf den Frostwiderstand und deren Vergleich unter Praxis- und Laborbedingungen.

Praxisuntersuchung	CIF- bzw. modifizierter CIF-Test
betontechnologische Einflüsse	
Labor- und Praxisproben identisch: Ausgangsstoffe und Zusammensetzung, Herstellung und Nachbehandlung ¹⁾ , Prüfmuster ¹⁾	
frostrelevante Einflüsse	
<u>Temperatur</u>	
Wärmetransport erfolgt eindimensional über die Prüffläche	
min. gemessene Temperatur: -10 °C	min. Temperatur: -20 °C
80% der Frost-Tau-Ereignisse laufen im T _{min} -Bereich :-2 - -10 °C	
max. gemessene Abkühlrate: 2.7 K/h max. gemessene Auftaurate: 4.0 K/h	Abkühl- und Auftaurate: 10 K/h
mittlere Abkühlrate: 1.8 K/h mittlere Auftaurate: 2.4 K/h	
Anzahl der registrierten Frost-Tau-Ereignisse in der ersten Frostperiode: 10	Bewertung nach 28 Frost-Tau-Wechseln
<u>Feuchte</u>	
Feuchtetransport erfolgt eindimensional über die Prüffläche	
Feuchteangebot abhängig von Niederschlagsereignissen vor Ort	ständiges Feuchteangebot
Feuchtaufnahme kann Einzelereignissen zugeordnet werden	Feuchtaufnahme erfolgt kontinuierlich während der Vorlagerungs- und Befrostungsphase
Frostschaden	
äußere Schädigung: Abwitterung	
Grad der äußeren Schädigung - Abwitterung abhängig von der Betonqualität	
Reihung der Labor- und Praxisproben identisch; nimmt mit steigendem w/z-Wert und von CEM I Richtung CEM III/B zu	

¹⁾ erfolgt in Anlehnung an BAW-Merkblatt "Frostprüfung von Beton"

Aus betontechnologischer Sicht ist im vorliegenden Fallbeispiel der Frostwiderstand im Labor und in der Praxis direkt korrelierbar, da alle bekannten Einflussgrößen – Zusammensetzung, Herstellung, Nachbehandlung, Probenpräparation sowie -geometrie und Prüfalte – bei den Labor- und Praxisproben identisch sind. Im Labor sowie im Praxisversuch dringt die Feuchte- und Wärme- bzw. Kältefront eindimensional über die Prüffläche ins Probeninnere ein. Somit ist die Voraussetzung der realitätsnahen Abbildung der in Bauteilen auftretenden Frostbeanspruchung über die Betonteiloberfläche gegeben.

Die Abwitterung wird bei ständigem Feuchteangebot von der Tiefsttemperatur und der Dauer der Tiefsttemperaturphase beeinflusst. HARTMANN [Har93] hat festgestellt, dass im CDF-Test pro 1 K Temperaturabweichung von der Standardtemperatur -20 °C die Abwitterungsmenge um rd. 10 % vermindert wird. Tiefsttemperaturphasen unter 3 h bewirken eine Abnahme der Abwitterung um rd. 20 %. Dagegen beeinflusst die Änderung der Abkühl- bzw. Auftaugeschwindigkeit von 10 auf 5 K/h bei einer Tiefsttemperaturphase von 4 h die Abwitterungsmenge nicht [Har93]. Die minimal gemessene Tiefsttemperatur im Praxisversuch ist -10 °C . Insgesamt sind 10 Frost-Tau-Ereignisse registriert worden, davon haben 80 % eine Tiefsttemperatur im Temperaturbereich: -2 bis -10 °C . Pauschal kann die Frostperiode 06/07 als „milder Winter“ eingestuft werden, siehe zum Vergleich Frostperiode 05/06, Tabelle 4.2 und Abbildung 4.10. Die mittlere Abkühlrate sowie Auftaurate beträgt rd. 2 K/h.

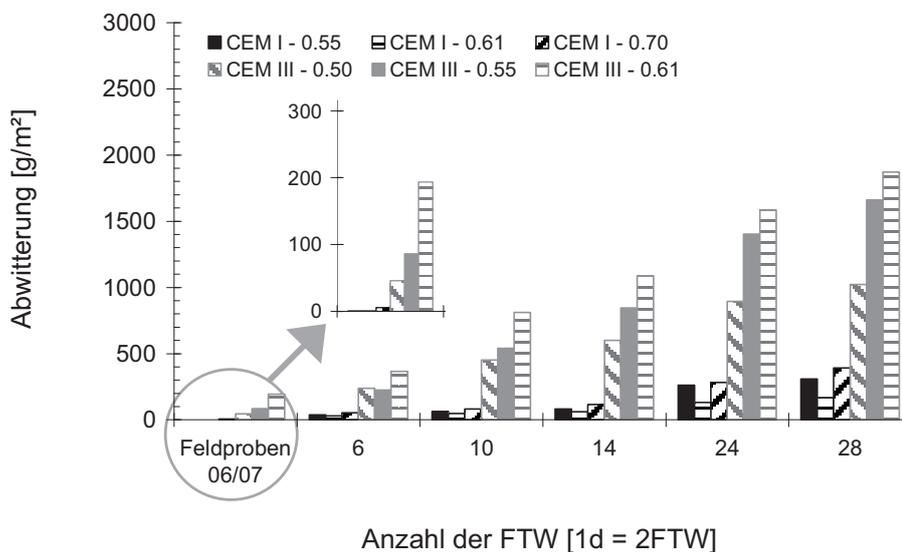


Abbildung 4.20: Vergleich der Schadensentwicklung von Betonen im (modifizierten) CIF-Test (CN-Prüflösung: $0,017\text{ mol/l}_{\text{eq.}}$) und unter Praxisbedingungen.

Die aufgefangene Menge an abgewittertem Material der ausgelagerten Proben nach der Frostperiode 06/07 mit 10 Frost-Tau-Ereignissen ist in Abbildung 4.20 in Abhängigkeit der Betonqualität dargestellt. Dasselbe Diagramm beinhaltet die Entwicklung der Abwitterung von Laborproben aus gleichen Herstellungschargen, geprüft im modifizierten CIF-Test mit einer $0,017 \text{ mol/l}_{\text{eq}}$ CN-Prüflösung. Die Ergebnisse werden in Kapitel 5 detaillierter diskutiert. Hier sei lediglich zusammengefasst:

- Eine „natürliche“ Frostbeanspruchung erzeugt messbare Oberflächenabwitterungen an ausgelagerten Proben, welche in Abhängigkeit der Betonqualität in gleicher Schadensreihung im Labor mit dem (modifiziertem) CIF-Test nachgestellt werden konnten.

Kapitel 5

Bewertung der Prüfergebnisse und Beurteilung des Frostwiderstandes mit dem modifizierten CIF-Test

Nachdem im vorangegangenen Abschnitt festgestellt werden konnte, dass die Variation der CN-Äquivalentkonzentration der Prüflösung im modifizierten CIF-Test die Abwitterungsmenge stark beeinflusst, stellt sich die Frage, ob die Trennschärfe bei der Beurteilung des reinen Frostwiderstandes auf Basis der Abwitterung gegeben ist. Dabei ist zwischen Abnahme- und Schädigungskriterium zu unterscheiden. Als Abnahmekriterium wird in dieser Arbeit eine FTW-Anzahl definiert, bis zu welcher das Schädigungskriterium von 1000 g/m^2 nicht überschritten werden darf. Ausgangspunkt ist das BAW-Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ [BAW04], nach dem ein Laborbeton als frostbeständig eingestuft wird, wenn die Abwitterung im CIF-Test nach 28 FTW unter 1000 g/m^2 liegt.

Abbildung 5.1 zeigt die erforderliche FTW-Anzahl bis zum Erreichen der 1000 g/m^2 -Grenzmarke der verschiedenen Betonqualitäten, getrennt nach w/z-Wert und Zementart, dargestellt über die Äquivalentkonzentration der CN-Prüflösung. Die Darstellung soll vorweg verdeutlichen, dass bei vergleichbaren Betonqualitäten gravierende Unterschiede in der erforderlichen Anzahl der FTW existieren, um die gleiche Schädigung (Abwitterungsmenge) zu erreichen. Gleichzeitig wird der Unterschied geringer, je höher die Äquivalentkonzentration der Prüflösung ist. Beide Beobachtungen sind wesentlich für die Bewertung eines Frostprüfverfahrens bzw. des modifizierten CIF-Test. Um überhaupt den Frostwiderstand von Laborbeton mit Hilfe des modifizierten CIF-Tests beurteilen zu können, muss eine klare Unterscheidung der verschiedenen Betonqualitäten gegeben sein.

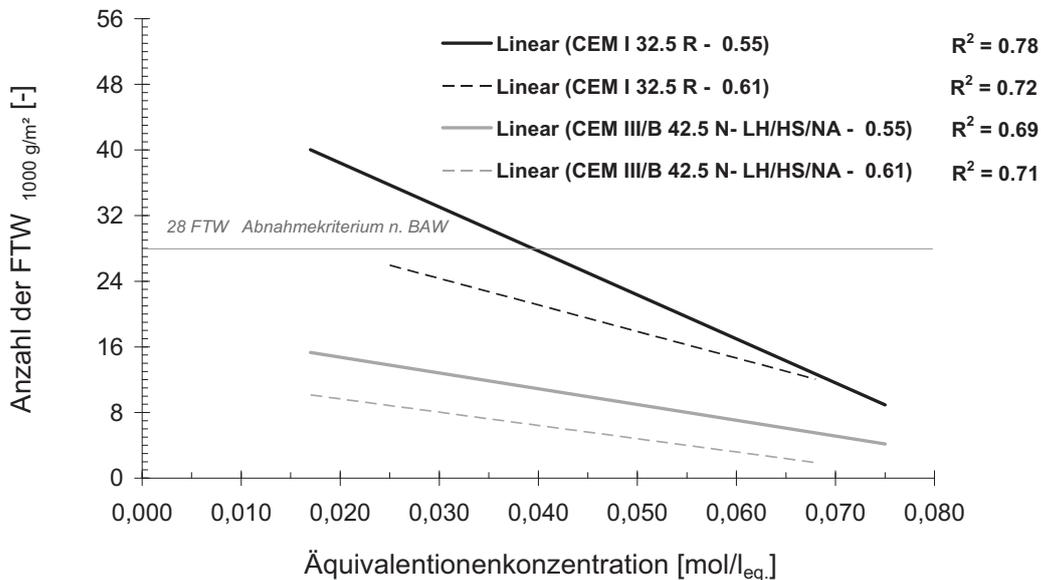


Abbildung 5.1: Erforderliche FTW-Anzahl für verschiedene Laborbetone bis zum Erreichen des Schädigungskriteriums nach BAW-Merkblatt [BAW04] in Abhängigkeit der Äquivalentenionenkonzentration der CN-Prüflösung.

Die dargestellten Ergebnisse in Abbildung 5.1 sind gemittelte Werte aller geprüften Betonserien gleicher Zusammensetzung für die jeweilige Äquivalentkonzentration der CN-Lösung. Die unterschiedlichen Zementchargen sowie Herstellwerke wurden nicht berücksichtigt, d.h., die Materialstreuung wird mit einbezogen und so der ungünstigere Fall betrachtet. Insofern sind Bestimmtheitsmaße der Messergebnisse von rd. 70 % ($R^2 = 0,70$) für eine Trendbetrachtung als ausreichend hoch zu sehen. Hinsichtlich des Trends sind die Differenzen zwischen den Betonzusammensetzungen deutlich. Erwartungsgemäß zeigt sich: Je höher der w/z-Wert, desto geringer ist die Anzahl der benötigten FTW bis zum Erreichen des Schädigungskriteriums von 1000 g/m^2 . Weiterhin ist bedeutend, dass die Betonqualitäten in Abhängigkeit der Zementart eindeutig voneinander differenziert werden können: Die CEM I-Betone sind bezüglich der äußeren Schädigung widerstandsfähiger gegenüber Frostangriff.

Im Kapitel 3 wurde bereits erläutert, dass die untersuchten Betonzusammensetzungen in Anlehnung an die Empfehlungen in EN 206-1 [din00] in Ergänzung der nationalen Anwendungsregeln in DIN 1045-2 [din98] als Grenzbetone für die Expositionsklasse XF3 bzw. XF1 definiert sind. Für die Bewertung ist es interessanter, dass die genannten Normen keine Anwendungsregeln der hier untersuchten Zementarten für die Expositionsklassen XF1 und XF3 empfehlen. Hingegen ist – wie in Abbildung 5.1 ersichtlich – die Zementart eine nicht vernachlässigbare Komponente in Bezug auf die äußere Schädigung beim reinen Frostangriff. Dieser Sach-

verhalt spiegelt sich auch in den eigenen Praxisversuchen klar wieder. Letzteres ist vor dem Hintergrund der Bemessung des Frostwiderstandes nach dem „performance concept“ bedeutend. Das heißt, im modifizierten CIF-Test sind die Praxisergebnisse adäquat wiedergegeben: CEM III-Betone wittern unter gleichen Randbedingungen stärker ab als CEM I-Betone.

Als zweiter Aspekt wird betrachtet, welche Äquivalentkonzentration der CN-Prüflösung geeignet ist, um im modifizierten CIF-Test die Praxisverhältnisse hinsichtlich der äußeren Schädigung korrekt abzubilden. Hierbei sei angemerkt, dass das Ziel dabei nicht ist, eine allgemein verbindliche Äquivalentkonzentration festzulegen. Als Vergleich werden vorerst Abwitterungsergebnisse für Betone gleicher Zusammensetzung im CIF-Test dargelegt. Im Diagramm in Abbildung 5.2 sind Mittelwerte der Abwitterungsmenge jeweils mehrerer Serien gleicher Qualität wiedergegeben. Grundsätzlich ist mit dem CIF-Test eine Unterscheidung der Betonqualitäten innerhalb der eigenen Untersuchungen anhand der Abwitterung möglich. Dies ist in Übereinstimmung mit den Ergebnissen in AUBERG [Aub99]. Des Weiteren bewirkt demineralisiertes Wasser als Prüflösung eine reproduzierbare Abwitterung. Gleichzeitig wird aber die Abwitterung reduziert, was in geringeren Absolutwerten resultiert. Wesentlich ist dabei, dass auch die notwendige Trennschärfe noch sehr gering ist. So haben beide CEM I-Betone (w/z -Wert 0,55 und 0,66) nach 28 FTW eine Abwitterung unter 100 g/m^2 . Eine trennscharfe Beurteilung der beiden Betone anhand der Abwitterung wäre damit nur näherungsweise gegeben.

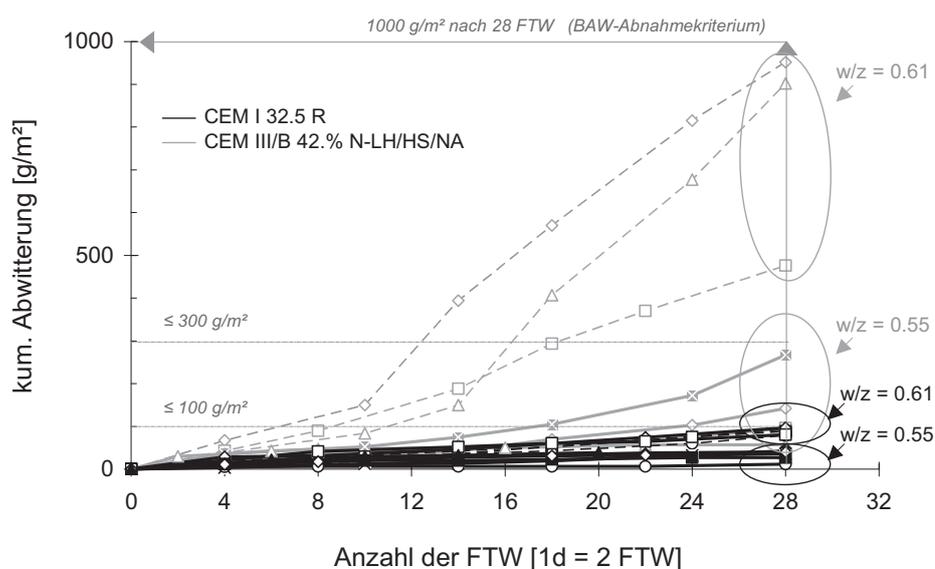


Abbildung 5.2: Vergleich der Abwitterungsmengen nach 28 FTW von CEM I- und CEM III/B-Betonen mit unterschiedlichen w/z -Werten (0,55 und 0,61) im CIF-Test (Prüflösung: demineralisiertes Wasser).

Werden die eigenen Praxisversuche zugrunde gelegt, so kann eine CN-Prüflösung mit einer Äquivalentkonzentration von $0,025 \text{ mol/l}_{\text{eq}}$ als Prüflösung im modifizierten CIF-Test vorgeschlagen werden. Betone mit Portlandzement und w/z-Wert 0,55 zeigen unter Praxisbedingungen keine Abwitterung und wären analog dazu auch unter Laborbedingungen frostbeständig. Die beiden CEM III-Betone erreichen das Schädigungskriterium – die 1000 g/m^2 -Grenzmarke – bereits in der ersten Prüfhälfte, was mit der starken Abwitterung unter Praxisbedingungen nach nur einem Winter korreliert. Zudem führen CN-Prüflösungen mit Äquivalentkonzentrationen von $>0,04 \text{ mol/l}_{\text{eq}}$ in mehreren Versuchsreihen zu einer starken oberflächlichen Schädigung der CEM I-Betone, die sich weder mit eigenen Praxisergebnissen deckt, noch durch Feldversuchsergebnisse anderer Autoren bestätigt werden kann. Die Schadensgeschwindigkeit nimmt so weit zu, dass die Schädigung über der Abwitterung der CEM-III Betone liegt, siehe Abbildung 5.3 und Abbildung 5.4. Eigene Praxisversuche sowie Ergebnisse von [RH06] [SKP⁺07] zeigen, dass Betone mit Portlandzement unter gleichen Randbedingungen keine oder geringere Oberflächenschädigungen im Vergleich zu CEM II- und CEM III-Betonen aufweisen.

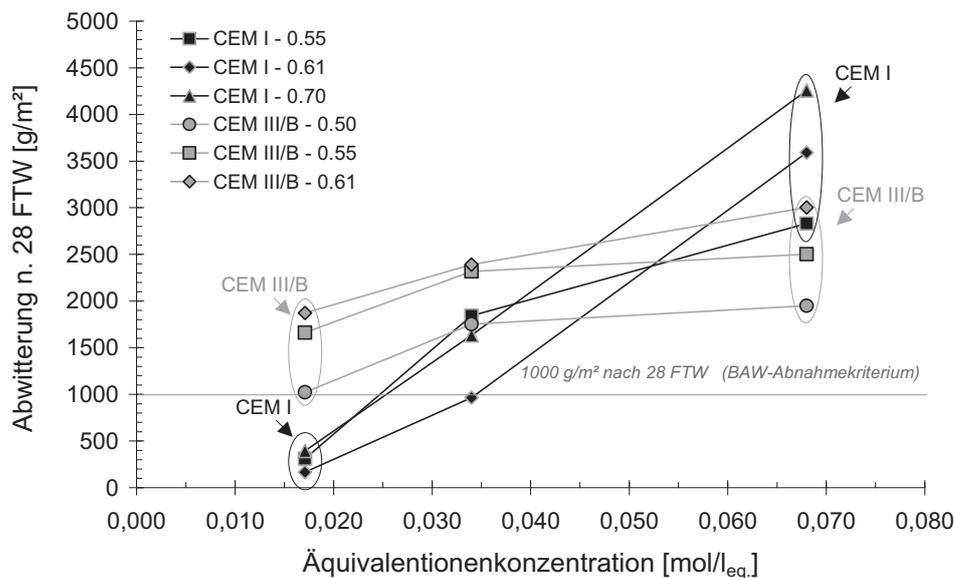


Abbildung 5.3: Abwitterung verschiedener Betonqualitäten nach 28 FTW in Abhängigkeit der Äquivalentkonzentration der CN-Prüflösung.

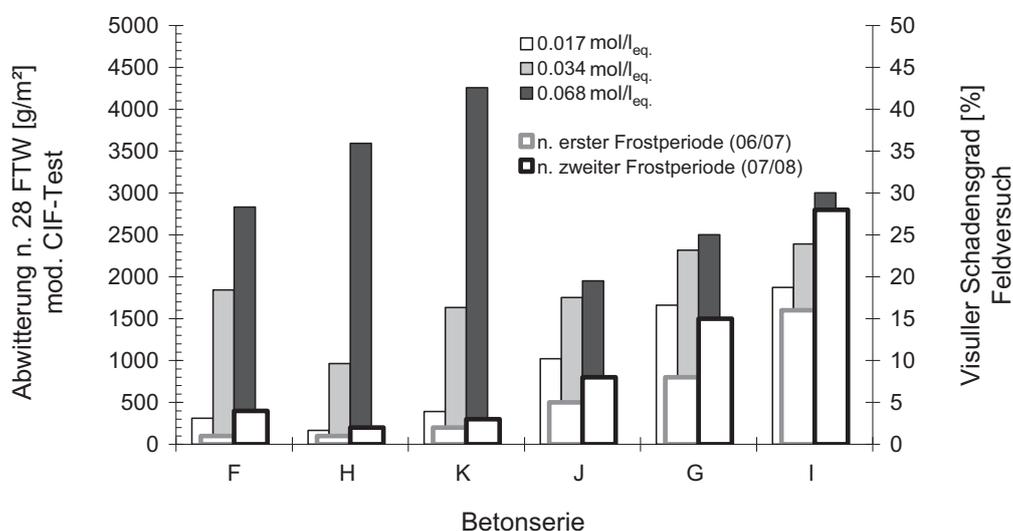


Abbildung 5.4: Gegenüberstellung der oberflächlichen Schädigung verschiedener Betonqualitäten ermittelt im Labor- (modifizierter CIF-Test: CN-Prüflösung) und Praxisversuch; die Labor- und Feldproben einer Betonzusammensetzung stammen aus der gleichen Herstellcharge.

Ein weiterer Aspekt, der für die Beurteilung des Frostwiderstandes anhand der Abwitterung mittels des modifizierten CIF-Tests wichtig ist, ist die klare Abgrenzung gegenüber anderen Angriffen bzw. gegenüber den Schädigungen, die durch diese Angriffe hervorgerufen werden. In diesem Zusammenhang ist insbesondere der Frost-Taumittel-Angriff von Interesse. In Abbildung 5.5 sind CDF-Ergebnisse der Referenzbetone dargestellt. Als Prüflösung wurde eine standardisierte 3 M.-% NaCl-Lösung eingesetzt. Bei gleichbleibender Staffelung der Schädigung in Abhängigkeit der Betonqualität bewirkt diese erwartungsgemäß eine insgesamt erheblich höhere Schädigung der Referenzbetone in kürzerer Prüfdauer. So ist der 1000 g/m^2 -Grenzwert spätestens nach 12 FTW überschritten.

Als Fazit kann gezogen werden:

- Die Korrelation der Laborergebnisse hinsichtlich der Intensität der äußeren Schädigung sowie deren zeitliche Schadensentwicklung im Vergleich zu Praxisergebnissen ist gegeben.
- Die klare Abgrenzung der im modifizierten CIF-Test ausgelösten Abwitterung im Vergleich zur erzeugten Abwitterung im CIF- und CDF-Test ist gegeben.
- Anhand der vorliegenden Ergebnisse kann als Prüflösung eine CN-Lösung mit einer Äquivalentkonzentration von $0,025 \text{ mol/l}_{\text{eq.}}$ empfohlen werden.

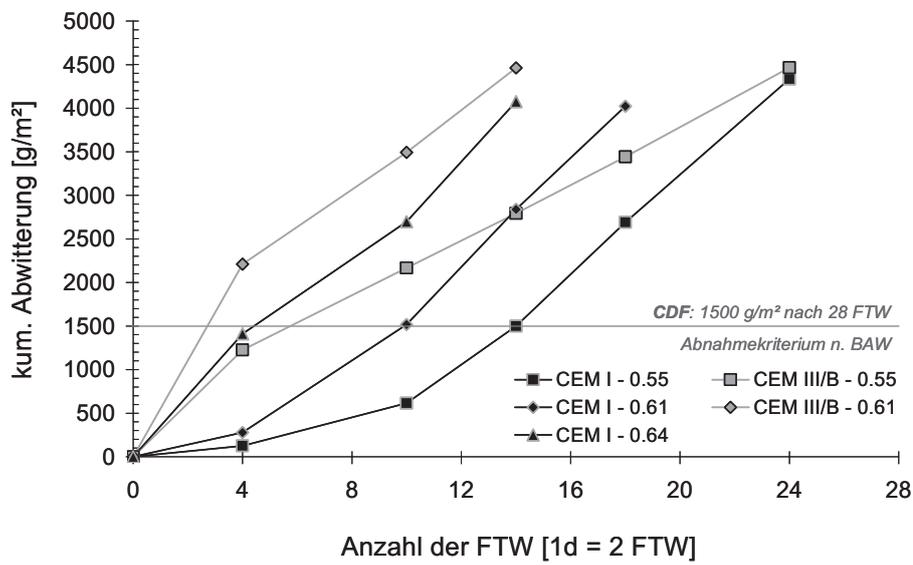


Abbildung 5.5: Abwitterung von CEM I- und CEM III/B-Betonen mit unterschiedlichen w/z -Werten im CDF-Test (Prüflösung: 3 M.-% NaCl-Lösung).

Kapitel 6

Zusammenfassung

Mittels der Frostpumpe wird während der Frost-Tau-Belastung Flüssigkeit mit gelösten Stoffen in den Beton hineingepumpt; dadurch wird nicht nur Wasser, sondern auch Ionen mit hineingesaugt. Bisher wurde nicht genau genug ermittelt, wie sich eine sehr geringe Ionenkonzentration auf die Frostschädigung auswirkt, die z.B. für Niederschlagswasser u.ä. Oberflächenwasser charakteristisch ist.

Ziel dieser Arbeit war es, die Auswirkung sehr geringer Ionenkonzentrationen auf die Betonschädigung infolge der reinen Frostbeanspruchung zu untersuchen. Es wurde der Frage nachgegangen, inwieweit sehr geringe Ionenkonzentrationen, die der Prüflösung beigefügt wurden, im CIF-Test die Abwitterung und innere Schädigung beeinflussen und wieweit diese Ergebnisse mit der Praxis von Auslagerungsversuchen korreliert werden können. Damit sollen zusätzliche Daten geliefert werden, um das Prüfverfahren für den reinen Frostangriff bei hoher Sättigung (XF3) noch aussagekräftiger, mit der Praxis korrelierbarer und damit belastbarer zu machen. Die hier vorgestellten Ergebnisse zeigen, dass Ionenkonzentrationen, die noch im Bereich des üblichen Niederschlags und der Trinkwasserverordnung liegen, die Abwitterung erheblich erhöhen.

Aus den Untersuchungen mit niedrig konzentrierten Prüflösungen im (modifizierten) CIF-Test sind nachstehende Schlussfolgerungen zu ziehen:

- Niedrig konzentrierte Prüflösungen bewirken im Vergleich zum demineralisierten Wasser durchgängig eine Zunahme der Abwitterung. Dagegen kann kein Einfluss auf die innere Schädigung und die Feuchteaufnahme festgestellt werden.
- Unterschiedliche Betonqualitäten können anhand der äußeren Schädigung im modifizierten CIF-Test quantitativ unterschieden werden.

- In Abhängigkeit von der Zementart besteht bei den untersuchten Betonen ein signifikanter Einfluss auf den Abwitterungsverlauf. Dieser wird primär vom Hüttensandgehalt der Zemente beeinflusst.
- Die Modifikation der Prüflösung beeinflusst nur die Schädigungsintensität, nicht aber den eigentlichen Schädigungsverlauf.
- Die „natürliche“ Frostbeanspruchung erzeugt messbare Oberflächenabwitterungen an ausgelagerten Proben, welche in Abhängigkeit der Betonqualität in gleicher Schadensreihung im Labor mit dem modifiziertem CIF-Test nachgestellt werden konnten.
- Die Abwitterung im modifizierten CIF Test lässt sich klar abgrenzen, und zwar sowohl von den Abwitterungsdaten im bisherigen CIF-Test, als auch von denen, die im CDF-Test bei ansonsten gleichen Material- und Prüfbedingungen gegeben sind.

Gemäß der CIF-Prüfvorschrift nach RILEM TC 176 IDC [Set04] bzw. BAW-Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ [BAW04] wird für die Beurteilung der Abwitterung bei reinem Frostangriff demineralisiertes Wasser als Prüflösung eingesetzt. Aufgrund der Erkenntnisse im Rahmen dieser Arbeit wird vorgeschlagen, als Prüflösung im CIF-Test eine Calciumnitrat-Lösung mit der Äquivalentenkonzentration von $0,025 \text{ mol/l}_{\text{eq}}$ zu definieren.

Literaturverzeichnis

- [Atk90] P. W. Atkins. *Physikalische Chemie*. VCH, Weinheim, 1990.
- [Aub99] R. Auberg. *Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frosttausalz-Widerstandes von Beton mit dem CDF- und CIF-Test*. PhD thesis, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Universität Essen, 1999.
- [Aub06] R. Auberg. Dauerhafte und kostenoptimierte Instandsetzung von abwasserberührten Stahlbetonbauteilen. In *Güteüberwachte Bauwerksinstandsetzung*, pages 1–11, 2006.
- [BAW04] BAW. *Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Frostprüfung von Beton*, 2004.
- [BLQE77] M. Brun, A. Lallemand, J. F. Quinson, and C. Eyraud. A new method for the simultaneous determination of the size and shape of pores: The thermoporometry. *Thermochemica Acta*, 21:59–88, 1977.
- [BS70] O. W. Blümel and R. Springenschmid. Grundlagen und Praxis der Herstellung und Überwachung von Luftporenbeton. *Straßen- und Tiefbau*, 24:85–98, 1970.
- [BS07] I. Bevanda and M. J. Setzer. Frost damage in laboratory and practice. In F. Stangenberg, O.T. Bruhns, D. Hartmann, and G. Meschke, editors, *Lifetime-Oriented Design Concepts*, pages 287–296. Aedificatio Publishers, 2007.
- [BS09] I. Bevanda and M. J. Setzer. Frost attack (with and without deicing agents). In F. Stangenberg, R. Breitenbücher, O. T. Bruhns, D. Hartmann, R. Höffer, M. Kuhl, and G. Meschke, editors, *Lifetime-Oriented Structural Design Concepts*, chapter 2.4.1, pages 93–108. Aedificatio Publishers, 2009.
- [Chu00] N. V. Churaev. *Liquid and Vapor Flows in Porous Bodies: Surface Phenomena*. Gordon and Breach Science Publishers, 2000.

- [CSWR00] N. V. Churaev, M. J. Setzer, O. Wowra, and M. Reick. Electrolytes in narrow pores. *International Journal for Restoration of Buildings and Monuments* 6, 1:87–101, 2000.
- [Dah06] U. Dahme. *Chlorid in karbonatisierendem Beton – Speicher- und Transportmechanismen*. PhD thesis, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Universität Duisburg-Essen, 2006.
- [Der75] B. V. Derjaguin. Untersuchungen des Spaltdrucks dünner Filme, deren Entwicklung, Ergebnisse und zu lösende aktuelle Probleme. *Colloid and Polymer Science*, 253:492–499, 1975.
- [din98] *DIN 1045: Beton- und Stahlbetonbau; Bemessung und Ausführung*, 1998.
- [din00] *DIN EN 206–Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität*, 2000.
- [din01] *DIN 4226–Teil 1: Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel – Teil 1: Normale und schwere Gesteinskörnungen*, 2001.
- [din02] *DIN EN 1008: Zugabewasser für Beton*, 2002.
- [din06] *Vornorm DIN CEN/TS 12390 Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung*, 2006.
- [din08] *DIN Fachbericht CEN/TR 15177: Prüfung des Frost-Tauwiderstandes von Beton – Innere Gefügestörung*, 2008.
- [EH75] D. H. Everett and J. M. Haynes. The thermodynamics of fluid interfaces in a porous medium – Part II. Capillary condensation, surface area and pore size distribution determination and hysteresis. *Zeitung für Physikalische Chemie Neue Folge*, 97:301–312, 1975.
- [Erb87] S. Erbaydar. *Eisbildung, Volumendilatationen und Wassertransport im Gefüge von Beton bei Temperaturen bis -60° C*. PhD thesis, TU München, 1987.
- [Fag73] G. Fagerlund. The significance of critical degree of saturation at freezing of porous and brittle materials. In *Durability of concrete: ACI symposium sessions*, volume 47, pages 13–65, 1973.
- [Grü81] P. Grübl. Über die Rolle des Eises im Gefüge zementgebundener Baustoffe. *Beton*, 31:54–58, 1981.
- [GS80] P. Grübl and A. Sotkin. Rapid ice formation in hardened cement paste, mortar and concrete due to supercooling. *Cement and Concrete Research*, 10:333–345, 1980.

- [Har93] R. Hartman. *Optimierung und Kalibrierung der Frost-Tausalz-Prüfung von Beton. CDF-Test*. PhD thesis, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Universität Essen, 1993.
- [Hei04] P. Heine. *Gesteinskörnungen im Beton unter Frost-Tau-Belastung – Auswirkung auf Prüfung und Anwendung*. PhD thesis, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Universität Duisburg-Essen, 2004.
- [HMR80] A. B. Harnik, U. Meier, and A. Rösli. Combined influence of freezing and deicing salt on concrete – physical aspects. In *Durability of building materials and components*, pages 474–484. American Society for Testing and Materials, 1980.
- [Hol04a] E. Holt. CONLIFE Deliverable Report 10: Recommendations for application of high-performance concrete. Technical report, Project Co-Ordinator: Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Universität Duisburg-Essen, 2004.
- [Hol04b] E. Holt. CONLIFE Deliverable Report 7: Durability data of field-testing. Technical report, Project Co-Ordinator: Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Universität Duisburg-Essen, 2004.
- [Isr91] J. N. Israelachwilli. *Interrmolecular and surface forces*. 2nd ed. Academic Press, Amsterdam, 1991.
- [Kas05] S. Kasperek. *Wärme- und Feuchtetransport in zementgebundenen Baustoffen während der Frostprüfung mit besonderer Beachtung des CIF-Testes*. PhD thesis, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Universität Duisburg-Essen, 2005.
- [Kro83] J. Kropp. *Karbonatisierung und Transportvorgänge in Zementstein*. PhD thesis, Universität Karlsruhe, 1983.
- [Kru08] J. Kruschwitz. *Instationärer Angriff auf nanostrukturierte Werkstoffe – eine Modellierung des Frostangriffs auf Beton*. PhD thesis, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Universität Duisburg-Essen, 2008.
- [Lie06] A. Liebrecht. *Phasenübergänge, Frostschwinden und Schrumpfvorgänge im Zementstein*. PhD thesis, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Universität Duisburg-Essen, 2006.
- [Lit73] G. Litvan. Frost action in cement paste. *Materials and Structures*, 34:293–298, 1973.

- [LP02] L. Lohaus and L. Petersson. Einfluss der Frostschädigung auf Betoneigenschaften. *Beton*, 12:588–596, 2002.
- [LS97] H.-M. Ludwig and J. Stark. Influence of C3A content on frost and scaling resistance. In *Proceedings of the 10th International Congress on the Chemistry of Cement*, pages 34–44, 1997.
- [Lud96] H.-M. Ludwig. *Zur Rolle von Phasenumwandlungen bei der Frost- und Frost-Tausalzbelastung von Beton*. PhD thesis, Bauhaus-Universität Weimar, 1996.
- [Lun97] P. Lunk. *Kapillares Eindringen von Wasser und Salzlösung in Beton*. PhD thesis, ETH Zürich, 1997.
- [MG10] H. Müller and U. Guse. *Zusammenfassender Bericht zum Verbundforschungsvorhaben: Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse*. Schriftreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2010.
- [Pal05] S. Palecki. *Hochleistungsbeton unter Frost-Tau-Wechselbelastung – Schädigungs- und Transportmechanismen*. PhD thesis, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Universität Duisburg-Essen, 2005.
- [PH53] T. C. Powers and R. A. Helmuth. Theory of volume changes in hardened portland cement pastes during freezing. In *Highway-Research Board Proceedings*, volume 32, pages 285–297, 1953.
- [Pow45] T. C. Powers. A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. *Journal of the American Concrete Institute*, 41:245–272, 1945.
- [Püh94] J. Pühringer. Zur Materialzerstörung durch Tausalzrostwechsel über die 3-prozentige NaCl-Lösung. *Bautenschutz und Bausanierung*, 8:46–51, 1994.
- [Rah00] H. Rahm. Untersuchungen von Regenwasser. In www.lims.uni-duisburg.de/Tagungen/UAT2000, 2000.
- [Rau92] M. Raupach. *Zur chloridinduzierten Makroelementkorrosion von Stahl in Beton*. PhD thesis, Schriftreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 1992.
- [RH79] A. Rösli and A. B. Harnik. Zur Frost-Tausalzbeständigkeit von Beton. *Schweizer Ingenieur und Architekt*, 46:1–12, 1979.
- [RH06] H.-W. Reinhardt and A. Huß. Vergleichsprüfungen des Frostwiderstandes und Vergleich mit der Praxis (DBV Nr. 247). Technical report, MPA Stuttgart, 2006.

- [SAL94] J. Stark, R. Auberg, and H.-M. Ludwig. RILEM TC-117 FDC – The influence of water quality on the frost resistance of concrete. Technical report, RILEM, 1994.
- [SB93] E. Siebel and W. Breit. Final report Be-TB-1489-4/1998, Standard methods for testing the resistance of concrete to freezing and thawing. Technical report, VDZ, 1993.
- [SB07] F. Spörel and W. Brameshuber. Monitoring the degree of water saturation in concrete structures. In M. J. Setzer, editor, *Transport in Concrete: Nano- to Macrostructure*, pages 105–115. Aedificatio Publishers, 2007.
- [SBB⁺05] E. Siebel, W. Brameshuber, C. Brandes, U. Dahme, F. Dehn, K. Dombrowski, V. Feldrappe, U. Guse, Huß A., E. Lang, L. Lohaus, C. Müller, H.S. Müller, S. Palecki, L. Petersen, P. Schröder, M. J. Setzer, and F. Weise. *Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse*. Schriftreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2005.
- [Sch02] Y. Schiegg. *Online-Monitoring zur Erfassung der Korrosion der Bewehrung von Stahlbetonbauten*. PhD thesis, ETH Zürich, 2002.
- [Set76] M. J. Setzer. New approach to describe frost action in hardened cement paste. In *Proceedings of the conference on hydraulic cement pastes: Their structure and properties*, 1976.
- [Set77] M. J. Setzer. *Einfluss des Wassergehaltes auf die Eigenschaften des erhärteten Betons*. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Heft 280, 1977.
- [Set97] M. J. Setzer. Basis of testing the freeze-thaw resistance: surface and internal deterioration. In M. J. Setzer and R. Auberg, editors, *Frost resistance of concrete*. E and FN Spon, 1997.
- [Set98] M. J. Setzer. Vortrag. 1998.
- [Set99] M. J. Setzer. Micro-ice-lens formation and frost damage. In J. Janssen, M. J. Setzer, and M. B. Snyder, editors, *Frost damage in concrete*, volume 25, pages 133–142. RILEM Publications, 1999.
- [Set01] M. J. Setzer. Micro-ice-lens formation in porous solid. *Journal of Colloid and Interface Science*, 243:193–201, 2001.
- [Set02] M. J. Setzer. Development of the micro-ice-lens model. In M. J. Setzer, R. Auberg, and H. J. Keck, editors, *Frost resistance of concrete - From nanostructure and pore*

- solution to macroscopic behaviour and testing*, volume 24, pages 133–142. RILEM Publications, 2002.
- [Set04] M. J. Setzer. CIF-test: Capillary suction, Internal damage and Freeze-thaw test. Reference method and alternative methods A and B. RILEM Recommendations TC 176-IDC – Test methods of frost resistance of concrete. *Materials and Structures*, 34:515–525, 2004.
- [Set05] M. J. Setzer. Statistische Auswertung eines Ringversuches mit dem CIF und CDF-Test. Technical report, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Universität Duisburg-Essen, 2005.
- [Set06a] M. J. Setzer. CDF/ CIF-Test – Korrekte Simulation eines praxismgerechten Frostangriffes im Rahmen einer Laborprüfung. In M. J. Setzer and Palecki, S., editors, *Beiträge zur 6. CDF/ CIF-Fachtagung*, pages 1–12. Cuvillier Verlag, 2006.
- [Set06b] M. J. Setzer. Das Feststoff-Porenwassersystem des Zementgels (Solid-liquid gel-system SLGL Modell. In J. Stark, editor, *16. Internationale Baustofftagung, Band 2*, pages 683–701. Aedificatio Publishers, 2006.
- [Set08] M. J. Setzer. SFB 398: Abschlussbericht Teilprojekt A11: Lebensdauerbetrachtung von Beton unter speziellen Umwelteinflüssen wie Frost- und Frost-Tausalzbeanspruchung. Technical report, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Universität Duisburg-Essen, 2008.
- [Set09a] M. J. Setzer. Persönliche Mitteilung. 2009.
- [Set09b] M. J. Setzer. Physikalische Grundlagen der Frostschädigung von Beton. In H. S. Müller, editor, *Dauerhafter Beton*, pages 5–10. Universitätsverlag Karlsruhe, 2009.
- [SJF96] M. J. Setzer, D. J. Janssen, and G. Fagerlund. 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*, 29:523–528, 1996.
- [SKP⁺07] M. J. Setzer, J.-H. Keck, S. Palecki, P. Schießel, and Ch. Brandes. *BAST Heft B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositions-kategorie XF2*. Bundesanstalt für Straßenwesen, 2007.
- [SL94] J. Stark and H.-M. Ludwig. Frost- und Tausalz-Widerstand von Beton – ein rein physikalisches Problem. *Wissenschaftliche Zeitung der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar*, 40:95–104, 1994.

- [Sto81] N. Stockhausen. *Dilatation hochporöser Festkörper bei Wasseraufnahme und Eisbildung*. PhD thesis, TU München, 1981.
- [SW01] J. Stark and B. Wicht. *Dauerhaftigkeit von Beton*. Birkhäuser Verlag, 2001.
- [TP07] F. Tauscher and L. Pisarsky. Frostschäden an Brückenkappen. *Deutscher Beton- und Bautechnik-Verein, Rundschreiben 215-Anlage 2*, 2007.
- [twv01] *Deutsche Trinkwasserverordnung: Verordnung über die Qualität von Wasser für den menschlichen Gebrauch*, 2001.
- [Ung04] H. Ungricht. *Wassergehalt und Chlorideingang in Beton – Einfluss der Exposition und der Betonzusammensetzung*. PhD thesis, ETH Zürich, 2004.
- [Wed97] G. Wedler. *Lehrbuch der Physikalischen Chemie*. Wiley VCH, 1997.
- [Wow97] O. Wowra. *Experimentelle Untersuchung der Chloridsorption an flaschenhydratisiertem Zementstein und ausgewählten Klinkerphasen in wässriger Lösung*. PhD thesis, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Universität Essen, 1997.
- [ztv96] *ZTV-W LB 219: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen des Wasserbaus, Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton*, 1996.
- [ztv00] *ZTV-W LB 215: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen des Wasserbaus, Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton*, 2000.
- [ztv07] *ZTV-ING 3-1: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten – Teil 3 Massivbau – Abschnitt 1 Beton*, 2007.

Abbildungsverzeichnis

1.1	Äußere Schädigung von Praxisproben nach einem Winter Auslagerung	2
1.2	Abwitterung von Laborproben ermittelt im CIF-Test	4
1.3	Versuchsprogramm	6
2.1	Äußere Schädigung: Schädigungsarten	10
2.2	Äußere Schädigung in der Wasser-Wechsel-Zone eines Kläranlagebeckens . . .	11
2.3	Innere Schädigung: A) Matrixschädigung und B) Kontaktzonenschädigung	12
2.4	Innere Schädigung: weitere Schädigungsarten	12
2.5	Radius-Gefrierpunkt-Beziehung (RGB)	14
2.6	Schematische Darstellung des Mikroeislinnen-Modells nach SETZER	18
2.7	Thermische Ausdehnung von Zementsteinproben nach unterschiedlicher Vorla- gerung	20
2.8	Thermische Dehnung von Betonproben (CIF-Test)	20
2.9	CIF-Test: Korrelation rel. dyn. E-Modul und Feuchteverlauf	21
2.10	Vergleich eines Frostangriffs in der Praxis mit dem in Prüfverfahren	23
2.11	CIF-Test: Abfall des rel. dyn. E-Moduls nach 28 FTW in Abhängigkeit des w/z- Wertes	26
2.12	CIF-Test: Typische Abwitterungsverläufe von CEM III/A-Betonen in Abhängigkeit des w/zWertes	26
2.13	CIF-Test: Kombinationsdiagramm – rel. dyn. E-Modul, Feuchteaufnahme und Testdauer	27
2.14	CIF-Test: Einfluss der Sieblinie und der Gesteinskörnungen auf die innere Schä- digung	28
2.15	CIF-Test: Verlauf des rel. dyn. E-Moduls in Abhängigkeit der Herstellcharge bei gleicher Betonzusammensetzung	28

3.1	Einfluss der Wasserqualität auf das Abwitterungsverhalten von CEM III/A- und CEM I-Beton mit unterschiedlichem Frostwiderstand	31
3.2	Gegenüberstellung der mittleren Abwitterung bei einer Prüfung mit demineralisiertem Wasser, Leitungswasser und hartem Wasser	32
3.3	Ablauf der Untersuchungen im CIF-Test	36
3.4	Versuchsparameter	39
3.5	Variationen der Prüflösungen gemäß TWV und DIN EN 1008	41
3.6	Abwitterungsverläufe beim CEM I-Beton in Abhängigkeit der verwendeten Prüflösung	42
3.7	Abwitterungsverläufe beim CEM III/B-Beton in Abhängigkeit der verwendeten Prüflösung	43
3.8	Abwitterungsverläufe beim CEM I-Beton in Abhängigkeit der Äquivalentionenkonzentration der Prüflösung	43
3.9	Gegenüberstellung der Abwitterung nach 28 FTW bewirkt mit demineralisiertem Wasser und PL II-b-I in Abhängigkeit der Betonqualität	44
3.10	Entwicklung der Abwitterung über die Prüfdauer in Abhängigkeit der Äquivalentionenkonzentration der CN-Prüflösung; CEM III/B-Beton, w/z = 0,55	46
3.11	Vergleich der Abwitterungsverläufe von CEM I- und CEM III/B-Betonen in Abhängigkeit der verwendeten Prüflösung	47
3.12	Abwitterungsverläufe beim CEM I-Beton in Abhängigkeit der verwendeten CN-Prüflösung; $c_{eq.} = 0,000-0,100 \text{ mol/l}_{eq.}$	48
3.13	Abwitterungsmenge nach 28 FTW in Abhängigkeit der Äquivalentionenkonzentration der CN-Prüflösung; CEM I-Beton, w/z = 0,55	49
3.14	Zusammenhang zwischen Abwitterungsmenge nach 28 FTW und Äquivalentionenkonzentration der CN-Prüflösung; CEM I-Beton, w/z = 0,55	50
3.15	Aufteilung der Abwitterungskurve in Abhängigkeit der CN-Prüflösung; CEM I-Beton	50
3.16	Zusammenhang zwischen Abwitterungsmenge nach 28 FTW und Äquivalentionenkonzentration der CN-Prüflösung getrennt nach Rand- und Kernschicht; CEM I-Beton	51
3.17	Abwitterungsverläufe beim CEM III/B-Beton in Abhängigkeit der verwendeten CN-Prüflösung; $c_{eq.} = 0,000-0,100 \text{ mol/l}_{eq.}$	53
3.18	Zusammenhang zwischen Abwitterungsmenge nach 28 FTW und Äquivalentionenkonzentration der CN-Prüflösung; CEM III/B-Beton, w/z = 0,55	53
3.19	Abwitterungsmenge nach 28 FTW in Abhängigkeit der Äquivalentionenkonzentration der CN-Prüflösung; CEM III/B-Beton, w/z = 0,55	54

3.20 Zusammenhang zwischen Abwitterungsmenge nach 28 FTW und Äquivalenten- tionenkonzentration der CN-Prüflösung getrennt nach Rand- und Kernschicht; CEM III/B-Beton	55
3.21 Vergleich der Abwitterungsmengen nach 28 FTW der CEM I- und CEM III/B- Betone in Abhängigkeit der Äquivalentenkonzentration der CN-Prüflösungen .	55
3.22 Vergleich der mittleren RDM-Verläufe einer CEM I-Betonserie im (modifizierten) CIF-Test mit unterschiedlichen CN-Prüflösungen	58
3.23 Vergleich der mittleren Feuchtaufnahme einer CEM I-Betonserie im (modifizier- ten) CIF-Test mit unterschiedlichen CN-Prüflösungen	59
3.24 Einfluss des Kations der Nitrat-Prüflösung auf die Abwitterung	60
3.25 Einfluss der Kationen/Anionen-Kombination auf die Abwitterung verschiedener Betonqualitäten	61
3.26 Interaktionsdiagramm: rel. dyn. E-Modul als Funktion der Feuchtaufnahme und Testdauer	62
3.27 Einfluss des Kations der Nitrat-Prüflösung auf die Abwitterung im Kernbereich .	63
3.28 Einfluss der Kationen/Anionen-Kombination auf die Abwitterung	64
3.29 Schematische Darstellung der Phasengrenze Geloberfläche–Porenlösung	65
3.30 Abwitterungsverläufe verschiedener Betone im modifizierten CIF-Test	70
3.31 Abwitterungsanstieg in Abhängigkeit des HÜS-Gehaltes der Betone	72
3.32 Steigungsquotient der geprüften Variationen in Abhängigkeit des HÜS-Gehaltes der Betone	72
3.33 Einfluss des Kations der Nitrat-Prüflösung auf die Abwitterung einer Betonher- stellcharge in unterschiedlichem Probenprüfalter	73
3.34 Einfluss der Kations der Nitrat-Prüflösung auf die Abwitterung im Probenprüfalter 360 d	74
3.35 Einfluss der Äquivalentenkonzentration der CN-Prüflösung auf die Abwitte- rung im unterschiedlichen Probenprüfalter einer Betonherstellcharge	75
3.36 Zusammenhang zwischen Abwitterungsmenge nach 14 FTW und Äquivalen- tionenkonzentration der CN-Prüflösung in Abhängigkeit des Prüfalters getrennt nach Rand- und Kernschicht; CEM III/B-Beton	76
3.37 Vergleich der Abwitterung von drei Betonserien geprüft mit CN-Prüflösung: $c_{eq.}$ $= 0,025 \text{ mol/l}_{eq.}$	76
4.1 Gegenüberstellung der äußeren Schädigung von Auslagerungsproben nach 4 Frostperioden und Laborproben (CIF-Test)	82

4.2	Rissbildung auf der exponierten Betonoberfläche nach einem Winter Auslagerung	83
4.3	Vergleich der inneren Schädigung von Laborproben im CIF-Test und Praxisproben	83
4.4	Anordnung der Praxisproben	86
4.5	Feuchtetransport in der Betonrandzone einer Praxisprobe	89
4.6	Lufttemperatur und Niederschlag in Meißen für den Zeitraum vom 8.11.05 bis 28.11.05	89
4.7	Exemplarische Darstellung eines Frostereignisses in der Betonrandzone einer Praxisprobe	90
4.8	Exemplarische Darstellung des Temperaturverlaufes im Beton (Praxisprobe) wäh- rend eines Frostereignisses	91
4.9	Gegenüberstellung der Häufigkeit der Frost-Tau-Ereignisse in Abhängigkeit von der Minimaltemperatur für Winter 05/06 und 06/07 in Meißen	92
4.10	Gegenüberstellung der Häufigkeit der Frost-Tau-Ereignisse in Abhängigkeit der max. Abkühl- und Auftaugeschwindigkeit für Winter 05/06 und 06/07 in Meißen .	93
4.11	Entwicklung der äußeren Schädigung einer Praxisprobe	96
4.12	Visueller Schädigungsgrad der ausgelagerten Proben in Abhängigkeit der Frost- periode und Betonzusammensetzung	97
4.13	Entwicklung der äußeren Schädigung der Praxisbetone definiert als visueller Schädigungsgrad über die Auslagerungsdauer	97
4.14	Zunahme der äußeren Schädigung der Praxisbetone nach Frostperiode 07/08 im Vergleich zum Vorjahr	98
4.15	Visueller Schädigungsgrad der Praxisbetone nach der ersten Frostperiode in Ab- hängigkeit der Betonzusammensetzung, Auslagerungsort und Auslagerungsjahr	99
4.16	Abwitterung ausgelagerter Proben nach der ersten Frostperiode (06/07) gegen- übergestellt dem visuellen Schädigungsgrad	100
4.17	Änderung des rel. dyn. E-Moduls der Praxisproben während der Auslagerungszeit	101
4.18	Mittewerte der Änderung des rel. dyn. E-Moduls gesondert nach Betonserie in Abhängigkeit der Prüfachse	102
4.19	Feuchteaufnahme der Praxisproben im Vergleich zu Laborproben (CIF-Test) . .	103
4.20	Vergleich der Schadensentwicklung von Betonen im (modifizierten) CIF-Test und unter Praxisbedingungen	107
5.1	Erforderliche FTW-Anzahl für verschiedene Laborbetone bis zum Erreichen des Schädigungskriteriums nach BAW-Merkblatt in Abhängigkeit der Äquivalentkon- zentration der CN-Prüflösung	110

5.2	Vergleich der Abwitterungsmengen nach 28 FTW von CEM I- und CEM III/B-Betonen mit unterschiedlichen w/z-Werten (0,55 und 0,61) im CIF-Test	111
5.3	Abwitterung verschiedener Betonqualitäten nach 28 FTW in Abhängigkeit der Äquivalentenionenkonzentration der CN-Prüflösung	112
5.4	Gegenüberstellung der oberflächlichen Schädigung verschiedener Betonqualitäten ermittelt im Labor- (modifizierter CIF-Test: CN-Prüflösung) und Praxisversuch	113
5.5	Abwitterung von CEM I- und CEM III/B-Betonen mit unterschiedlichen w/z-Werten im CDF-Test	114
A.1	Vergleich der mittleren RDM-Verläufe einer CEM III/B-Betonserie im (modifizierten) CIF-Test mit unterschiedlichen CN-Prüflösungen	ii
A.2	Vergleich der mittleren Feuchtaufnahme einer CEM III/B-Betonserie im (modifizierten) CIF-Test mit unterschiedlichen CN-Prüflösungen	iii
A.3	Betonserie F: Äußere Schädigung ausgelagerter Proben	iv
A.4	Betonserie G: Äußere Schädigung ausgelagerter Proben	v
A.5	Betonserie H: Äußere Schädigung ausgelagerter Proben	vi
A.6	Betonserie I: Äußere Schädigung ausgelagerter Proben	vii
A.7	Betonserie J: Äußere Schädigung ausgelagerter Proben	viii
A.8	Betonserie K: Äußere Schädigung ausgelagerter Proben	ix

Tabellenverzeichnis

2.1	Einteilung der Poren nach ihrer kapillaren Saughöhe	15
2.2	Schädigungsmechanismen infolge der Frostbeanspruchung	17
2.3	Überblick über die verschiedenen Frost-Laborprüfverfahren	24
3.1	Abwitterungsmengen nach 28 FTW im CF-Test	30
3.2	Betonzusammensetzungen für Laboruntersuchungen	34
3.3	Grenzwerte für einzelne Inhaltsstoffe für Trinkwasser, Zugabewasser für Beton und Regenwasser	37
3.4	Ionenradius und Radius mit Solvathülle	64
3.5	(Qualitativer) Einfluss des Probenprüfalters auf die Abwitterung für ausgewählte Prüflösungsvariationen	77
3.6	Carbonatisierungstiefen ermittelt nach DIN EN 14630	78
4.1	Zusammensetzung und Kennwerte der ausgelagerten Betone in Meißen im Win- ter 06/07	85
4.2	Anzahl der Frost-Tau-Ereignisse in Abhängigkeit der Temperaturklasse	93
4.3	Kennwerte der Frostbeanspruchung für Winter 05/06 und 06/07 in Meißen	94
4.4	Einflussgrößen auf den Frostwiderstand und deren Vergleich unter Praxis- und Laborbedingungen	106
A.1	Zusammensetzung der mehrkomponentigen Prüflösungen gemäß TWV und DIN EN 1008	i

Anhang A

ANHANG

Tabelle A.1: Zusammensetzung der mehrkomponentigen Prüflösungen gemäß TWV und DIN EN 1008.

Typ	Prüflösung	Äquivalentkonzentration $c_{eq.}$						Gesamtäquivalentkonzentration $\Sigma c_{eq.}^- = \Sigma c_{eq.}^+$
		Kation (+)			Anion (-)			
		Ca^{2+}	Mg^{2+}	Na^+	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}	
		[mol/l _{eq.}]						
		[mol/l _{eq.}]						
mehrkomponentige	PL I-a-I	0.0004	-	0.0013	0.0013	0.0004	-	0.0018
	PL I-b-I	0.0024	0.0021	0.0014	0.0033	0.0004	0.0021	0.0058
	PL I-b-II	0.0031	0.0027	0.0018	0.0043	0.0005	0.0027	0.0076
	PL I-b-III	0.0036	0.0031	0.0021	0.0050	0.0006	0.0031	0.0087
	PL II-a-I	0.0072	-	0.0013	0.0013	0.0072	-	0.0086
	PL II-b-Ia	0.0023	0.0021	0.0013	0.0033	0.0004	0.0021	0.0058
	PL II-b-Ib	0.0004	0.0040	0.0013	0.0033	0.0004	0.0021	0.0058

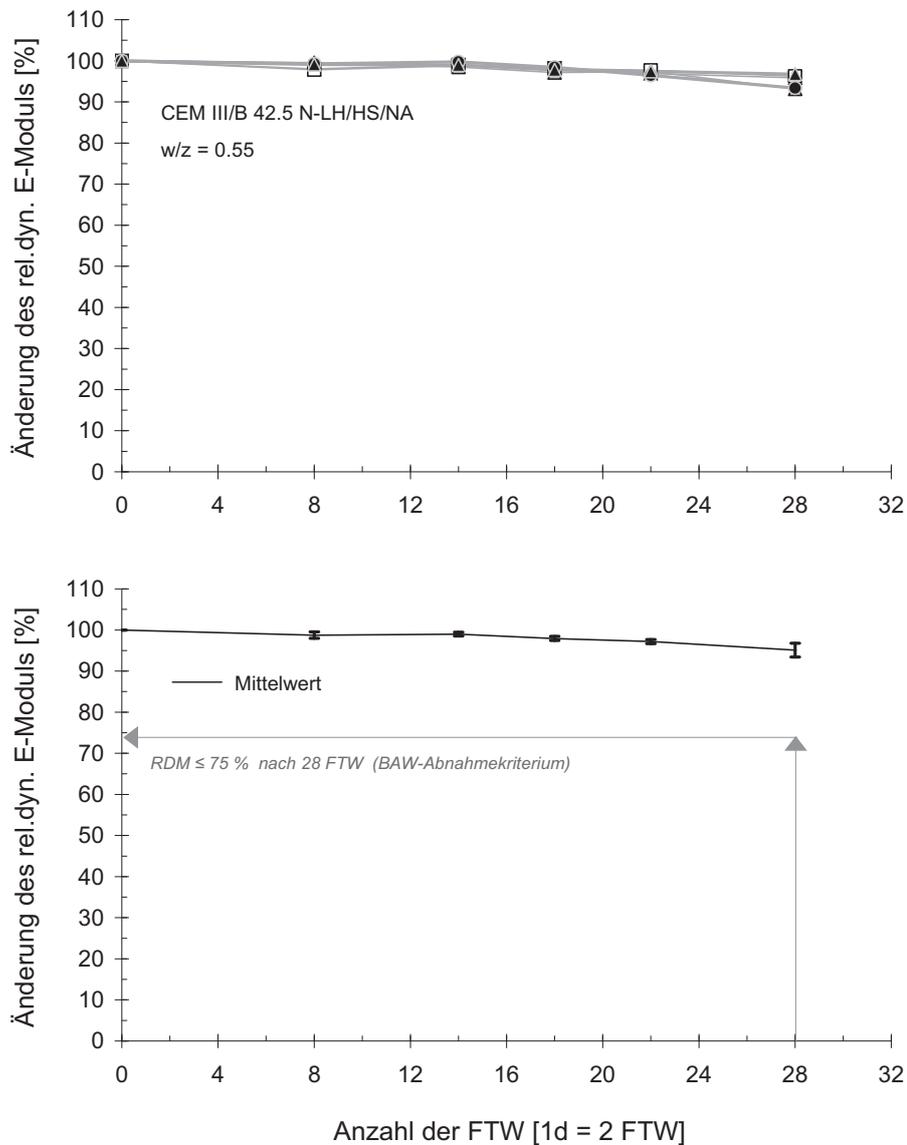


Abbildung A.1: Oben: Vergleich der mittleren RDM-Verläufe einer CEM III/B-Betonserie im (modifizierten) CIF-Test mit unterschiedlichen CN-Prüflösungen; in der Legende wird durchgehend die gleiche Symbolik für den RDM-Verlauf getrennt nach Prüflösung verwendet wie in Abbildung 3.17. Unten: Gesamtmittelwert des RDM-Abfalls mit Standardabweichung der gleichen Betonserie.

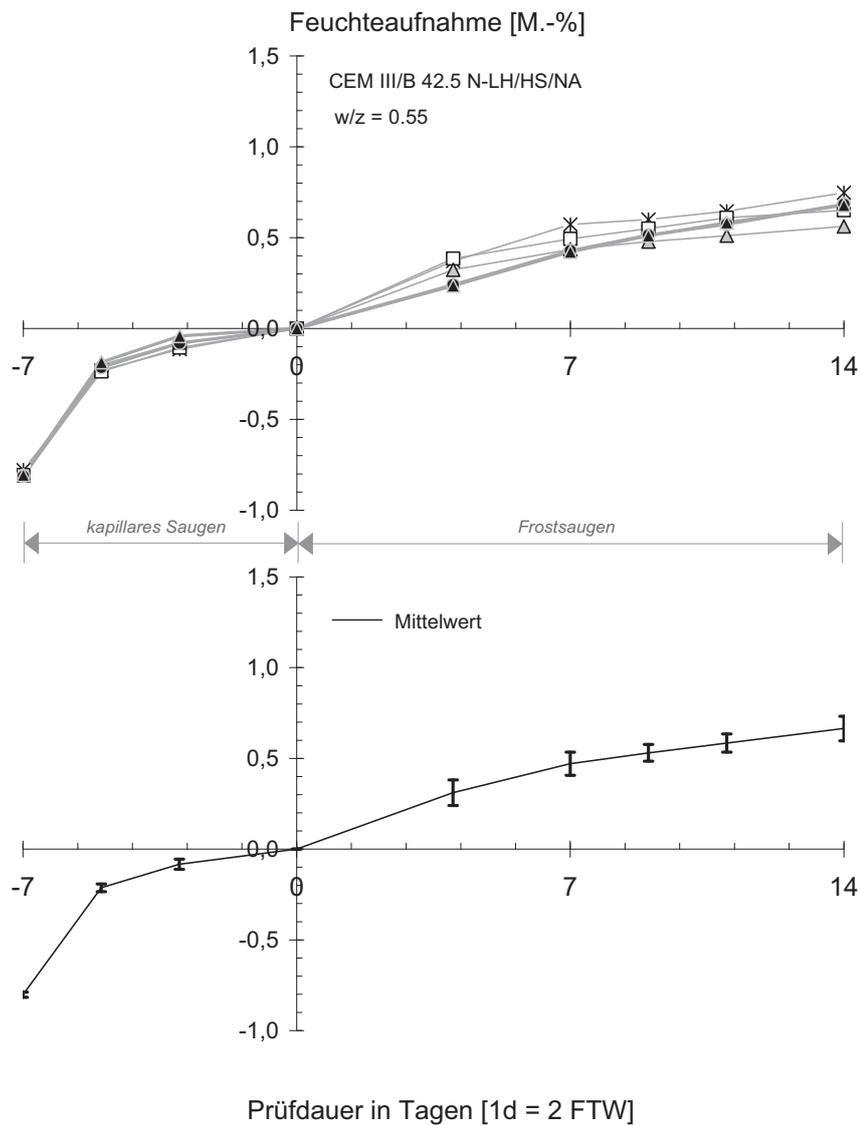


Abbildung A.2: Oben: Vergleich der mittleren Feuchtaufnahme einer CEM III/B-Betonserie im (modifizierten) CIF-Test mit unterschiedlichen CN-Prüflösungen; in der Legende wird durchgehend die gleiche Symbolik für die Feuchtaufnahme getrennt nach Prüflösung verwendet wie in Abbildung 3.17. Unten: Gesamtmittelwert der Feuchtaufnahme mit Standardabweichung der gleichen Betonserie.

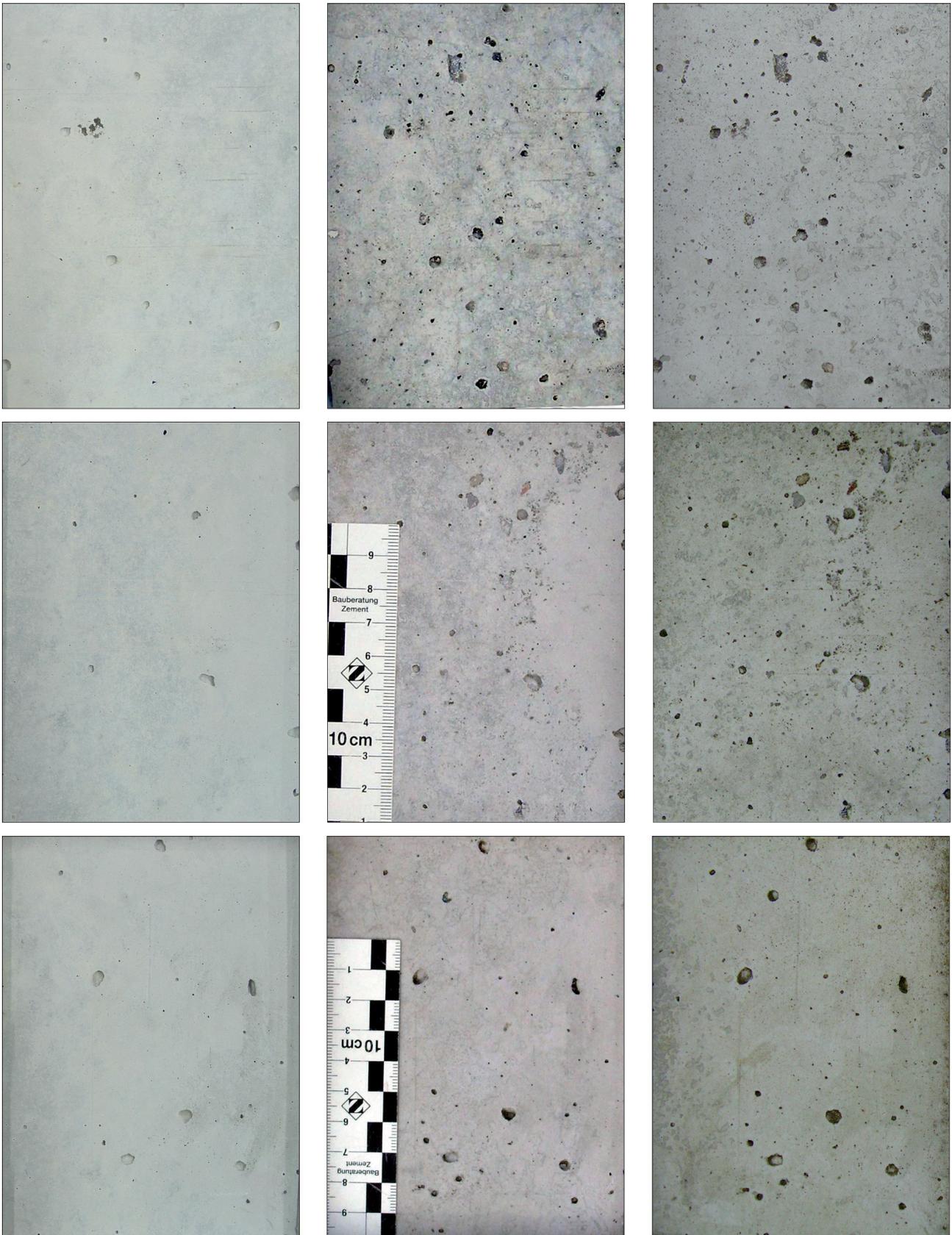


Abbildung A.3: Betonserie F: äußere Schädigung ausgelagerter Proben – links: vor Auslagerung; Mitte: nach Frostperiode 06/07; rechts: nach Frostperiode 07/08.

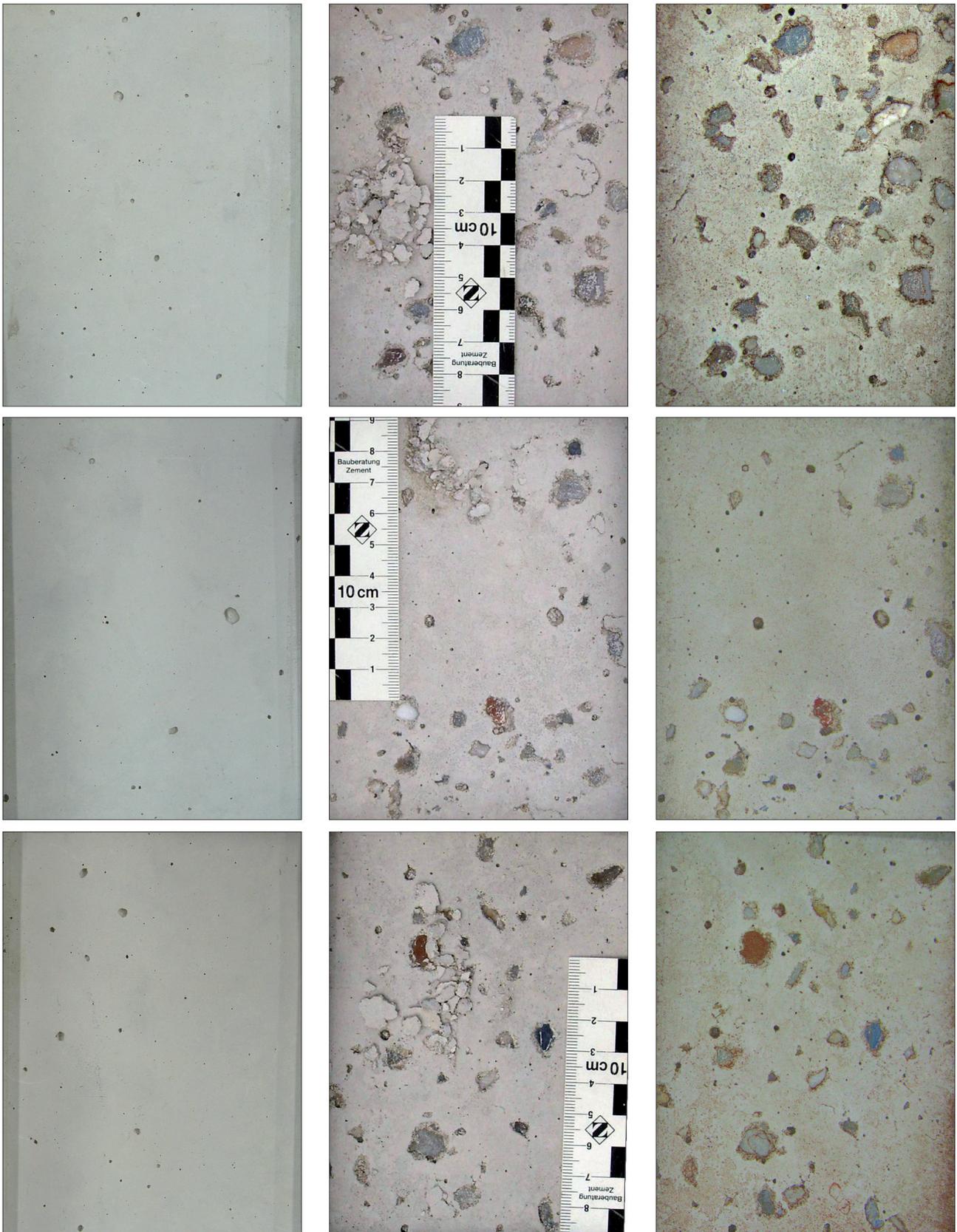


Abbildung A.4: Betonserie G: äußere Schädigung ausgelagerter Proben - links: vor Auslagerung; Mitte: nach Frostperiode 06/07; rechts: nach Frostperiode 07/08.



Abbildung A.5: Betonserie H: äußere Schädigung ausgelagerter Proben – links: vor Auslagerung; Mitte: nach Frostperiode 06/07; rechts: nach Frostperiode 07/08.

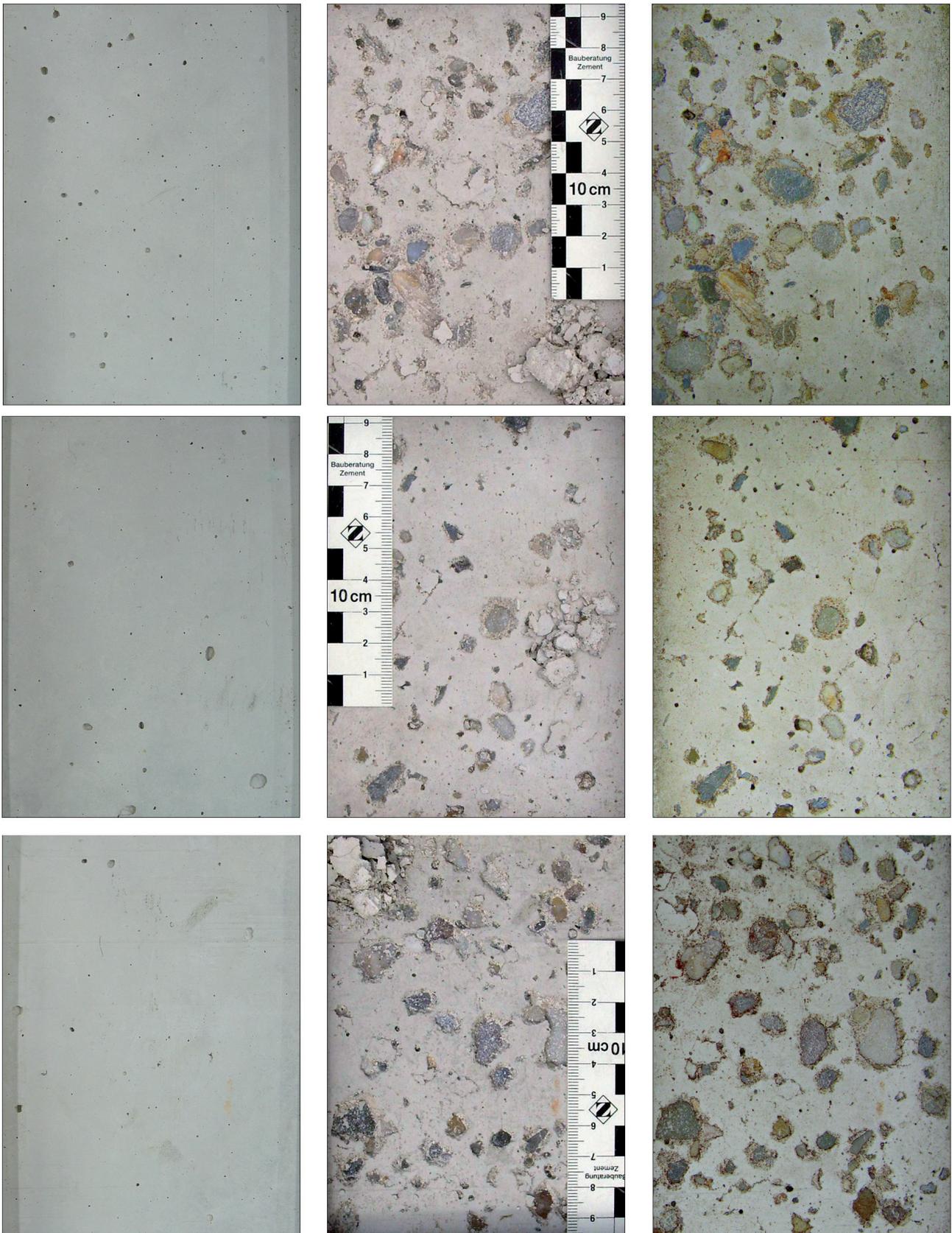


Abbildung A.6: *Betonserie I: äußere Schädigung ausgelagerter Proben – links: vor Auslagerung; Mitte: nach Frostperiode 06/07; rechts: nach Frostperiode 07/08.*

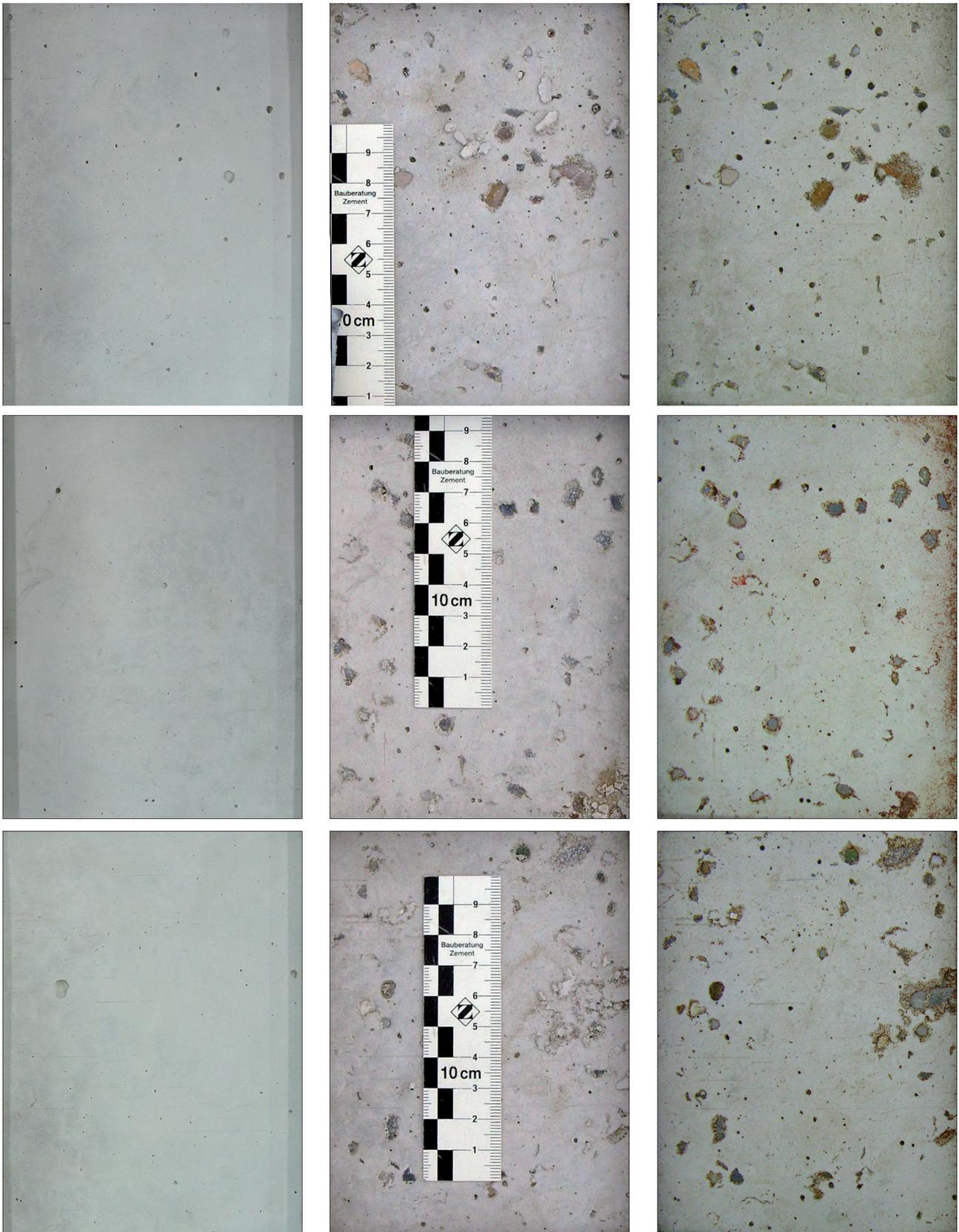


Abbildung A.7: Betonserie J: äußere Schädigung ausgelagerter Proben – links: vor Auslagerung; Mitte: nach Frostperiode 06/07; rechts: nach Frostperiode 07/08.

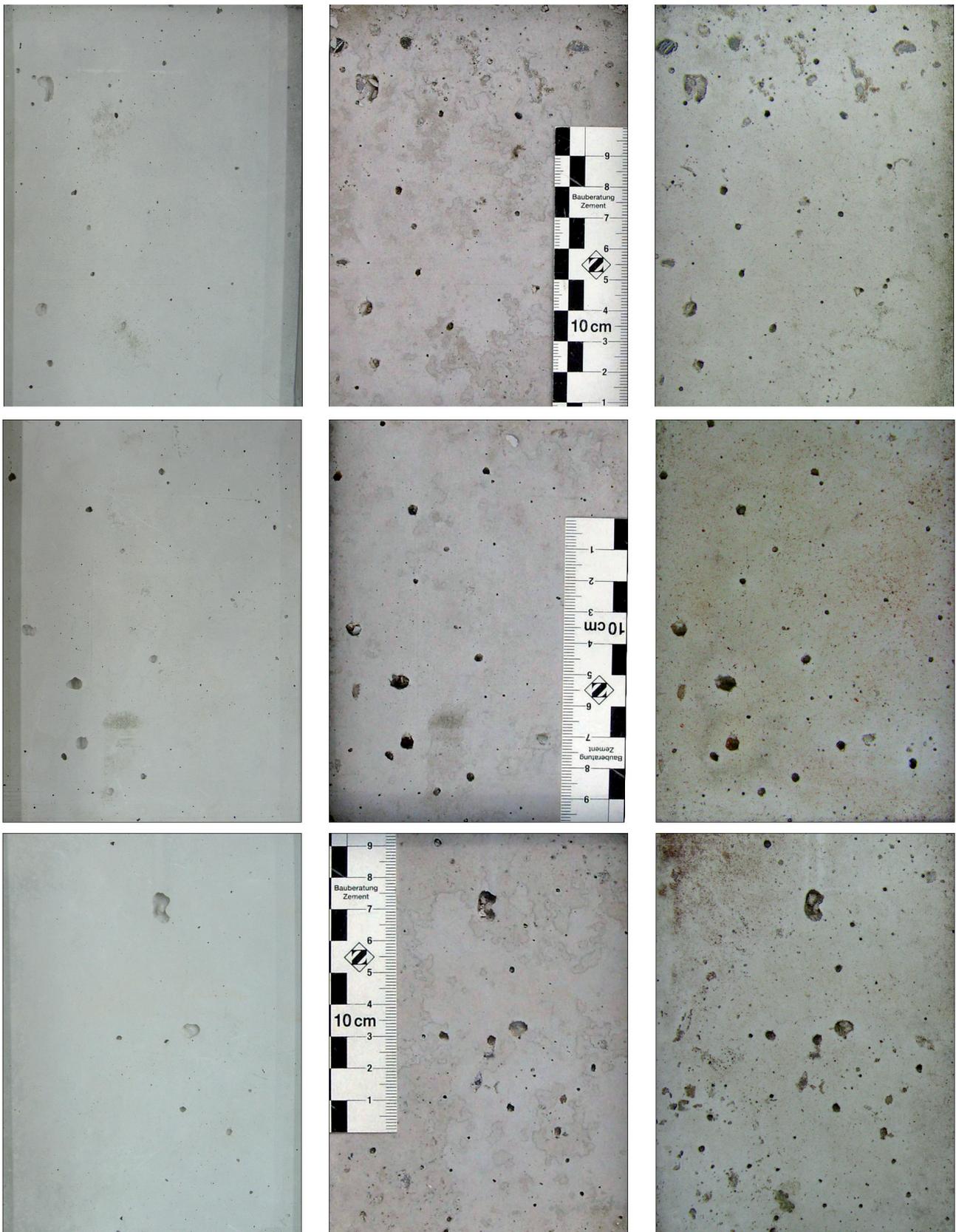


Abbildung A.8: *Betonserie K: äußere Schädigung ausgelagerter Proben – links: vor Auslagerung; Mitte: nach Frostperiode 06/07; rechts: nach Frostperiode 07/08.*

