

# Frost-Tausalz-Widerstand von Beton

## Ausgewählte Einflussgrößen für eine Modellierung

Christian Brandes

*concrete concepts Ingenieurgesellschaft mbH, München, Deutschland,  
E-Mail: brandes@concrete-concepts.eu, Telefon: +49(0)89 20208175*

### Kurzfassung

Eine Modellierung der Dauerhaftigkeit von Betonen, wie dies z.B. für den Betonentwurf bei der Korrosion bedingt aus eindringenden Chloriden oder der Carbonatisierung möglich ist, ist derzeit für einen Frost-Tausalz-Angriff noch nicht möglich. Viele Einflüsse, die sich auf die Ausbildung eines Schadens bedingt durch einen Frost-Tausalz-Angriff auswirken, wie z.B. die Betonzusammensetzung (Wassermenge, Einsatz von Mikroluftporenbildnern etc.), sind bekannt und hinreichend untersucht. In eigener Arbeit wurde der Einfluss des Angriffes, d.h. der auftretenden maßgebenden Frost-Tau-Wechsel anhand klimatische Variationen für Deutschland untersucht. Auf Seiten des Frost-Tausalz-Widerstandes wurde vor allem die zeitliche Entwicklung des Widerstandes, sowohl in jungem, als auch in höherem Alter, untersucht.

Es zeigte sich, dass schon geringe Unterschiede bei der Charakteristik des Angriffes (Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, Höhe der mittleren Temperaturunterschiede je Frost-Tau-Wechsel) zu deutlich unterschiedlichen Schadensbildern führen. Diese gravierenden Unterschiede werden bisher in der Norm nicht abgedeckt, da alle Betone der gleichen Expositionsklasse zugeordnet werden. Unter Berücksichtigung der möglichen Spannweite der Intensität eines Angriffes innerhalb einer Expositionsklasse folgt, dass für eine Modellierung der Frost-Tausalz-Schädigung in jedem Fall eine genaue Charakterisierung der klimatischen Bedingungen erfolgen muss. Lokale Gegebenheiten müssen Berücksichtigung finden.

In Bezug auf die zeitliche Änderung des Frost-Tausalz-Widerstandes zeigte sich, dass dieser über die lange Nutzungsdauer von Betonbauwerken (DIN 1045 sieht eine Nutzungsdauer von 50 Jahren vor) einer deutlichen Veränderung unterworfen ist. Eine alleinige Betrachtung des Widerstandes im Alter von 28 Tagen reicht demnach nicht aus. Für eine Modellierung der Schädigung über die

gesamte Nutzungsdauer muss die Veränderung des Widerstandes berücksichtigt werden. Die Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Veränderung des Widerstandes abhängig von der Betonzusammensetzung ist und somit der Widerstand durch eine Messung im Alter von 28 Tagen unter Berücksichtigung eines betonspezifischen Zeitfaktors beschrieben werden kann.

## 1 Modellierung des Frost-Tausalz-Widerstandes

Bauwerke sind während ihrer Nutzungsdauer unterschiedlichen Belastungen ausgesetzt. So sollen diese sowohl statische Lasten sicher in den Baugrund abtragen, als auch Angriffen aus der Umgebung Widerstand leisten. Zur Sicherstellung, dass diese Aufgaben während der gesamten Nutzungsdauer mit einer entsprechenden Sicherheit erreicht werden, stehen zumindest bei der Dimensionierung und Ausführung des Bauwerks bezüglich der statischen Lasten unterschiedliche und zumeist langjährig erprobte Berechnungsmethodiken zur Verfügung. Auf Seite der Dauerhaftigkeit ist eine direkte Bemessung, wie diese bei der Dimensionierung bezüglich der Lasten üblich ist, in der derzeitigen Normengeneration nicht üblich. Hier erfolgt in der Regel ein Nachweis der Dauerhaftigkeit über die Zusammensetzung des Betons. Grundlage für die Grenzwerte sind hierbei zumeist Erfahrungswerte aus der vorangegangenen Baupraxis. Die Belastungen aus der Umgebung werden entsprechend ihrer Belastungsart sowie ihrer Stärke so genannten Expositionsklassen zugeordnet, aus denen dann die Anforderungen an die Betonzusammensetzung folgen, wobei die jeweils schärfste Anforderung maßgebend ist. Das Problem bei diesem Vorgehen ist, dass neue und innovative Betone, die in dieser Exposition eingesetzt werden könnten, aufgrund fehlender Erfahrung in der Regel nicht eingesetzt werden. Des Weiteren ist es unter Anwendung des so genannten deskriptiven Modells nicht möglich, unterschiedliche Kenndaten (z.B. Wasserzementwert bzw. Mikroluftporengehalt) gegeneinander aufzurechnen oder von DIN 1045-2:2001-07 abweichende Lebensdauern zu berücksichtigen.

In DIN 1045-2:2001-07 ist allerdings vorgesehen, dass bei „alternativen leistungsbezogenen Entwurfsverfahren für die Dauerhaftigkeit“ auch von in DIN 1045 aufgeführter Zusammensetzung abweichende Betone verwendet werden können. Nach Anhang J kann hierbei auf Verwendung erprobter

Vorhersagemodelle gegebenenfalls unter Verwendung von Laborverfahren zurückgegriffen werden. Mittlerweile etablierte Vorhersagemodelle stehen für die Carbonatisierung sowie das Eindringen von Chloriden zur Verfügung, vgl. z.B. [1], [2]. Ein vergleichbares Vorhersagemodell existiert derzeit nicht für Frost-Tausalz-belastete Bauwerke.

Im Folgenden sollen einige der Eingangsgrößen, die einen Einfluss auf den Frost-Tausalz-Angriff besitzen und somit bei der Modellierung berücksichtigt werden müssen, diskutiert werden. Unterschieden werden hierbei Einflussgrößen, die sich auf den Widerstand des Bauteils bzw. des Bauwerks auswirken, bzw. Einflussgrößen, die sich auf die Stärke eines Frost-Tausalz-Angriffes auswirken.

## 2 Ausgewählte Einflussgrößen auf die Stärke eines Frost-Tausalz-Angriffes

### 2.1 Allgemeines

Die Stärke eines Frost-Tausalz-Angriffes ist gekennzeichnet durch die klimatischen Bedingungen, denen das Bauwerk ausgesetzt ist. Als primäre Eingangsgrößen sind hierbei die Temperatur sowie die Feuchtigkeit zu betrachten. Außerdem ist als sekundäre Kenngröße die Tausalzmenge, der ein solches Bauwerk ausgesetzt ist, zu berücksichtigen. Diese Kenngröße ist insofern sekundär, da sie neben den Anforderungen an die Nutzung des Bauwerks in der Regel von den klimatischen Bedingungen (primäre Kenngröße) abhängt.

Zu berücksichtigen bleibt außerdem, dass sich an einem Bauwerk unterschiedliche Mikroklimata einstellen können. So ist zum Beispiel damit zu rechnen, dass sonnenbeschienene Bauteile durch die höheren Temperaturen am Tag eine größere Anzahl an Frost-Tau-Wechseln je Jahr aufweisen, als dies bei Bauteilen, die nicht direkt von der Sonne beschienen werden, der Fall ist.

In einem ersten Schritt soll nun angenommen werden, dass bei ähnlichen Bauwerken (vergleichbare Nutzung) und ähnlichen primären klimatischen Eingangsgrößen auch eine ähnliche Belastung aus Tausalz entsteht, dies heißt, je kälter die klimatischen Bedingungen, desto mehr Tausalz. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Temperatur an der Oberfläche des Bauwerks sich affin zur Außentemperatur verhält. Ausgehend von diesen Annahmen kann bei

einer Verfeinerung der Eingangsdaten jederzeit eine Zuschärfung der Eingangsgrößen erfolgen.

## 2.2 Gegenüberstellung unterschiedlicher Klimaszenarien

Zur Charakterisierung der Einwirkungsgröße Temperatur wurden die Daten von insgesamt 13 über Deutschland verteilten Wetterstationen sowie von zwei eigenen Auslagerungsorten ausgewertet. Die Lage dieser Wetterstationen enthält Bild 1.



Bild 1: Lage der ausgewerteten Wetterstationen

Die in Deutschland für einen Frostangriff relevanten Gebiete wurden somit abgedeckt. Als Beobachtungszeitraum wurde Juli 1996 bis Juni 2005 gewählt, eine Saison wurde jeweils von Juli bis Juni des darauf folgenden Jahres definiert. Bei den folgenden Angaben handelt es sich jeweils um die durchschnittliche Anzahl je Saison als Mittel des Beobachtungszeitraumes.

Die Kennwerte „Minimaltemperatur“, „Maximaltemperatur“ (jeweils in einer Höhe von 1 m über Grund) sowie die Niederschlagsmenge über den Zeitraum eines Tages wurden betrachtet. Als Niederschlag wurde eine Niederschlagshöhe von mehr als 1 mm/Tag definiert. Entsprechend der vom Deutschen Wetterdienst verwendeten Terminologie werden Tage, an denen die Maximaltemperatur unter 0 °C liegt, als Eistag bezeichnet. Tage mit einem Nulldurchgang werden als Frosttage definiert. Eine Zusammenstellung der Ergebnisse, angegeben als Mittelwert je Jahr enthält Bild 2.

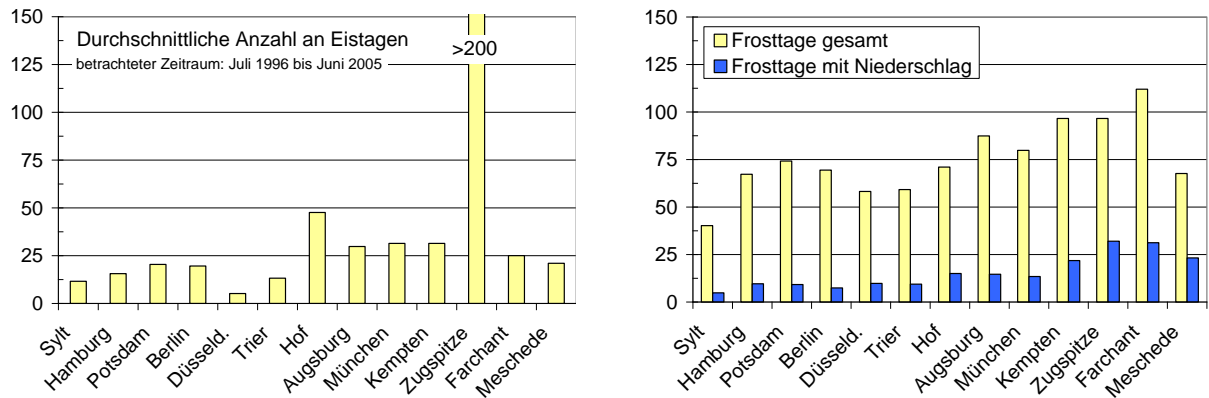


Bild 2: durchschnittliche Anzahl an Eistagen (links) sowie der Frosttage (rechts) je Jahr; betrachteter Zeitraum: Juli 1996 bis Juni 2005

Während die Anzahl der Eistage deutliche regionale Unterschiede aufweist, ist die Anzahl an Frosttagen bei den hier betrachteten Wetterstationen deutlich ähnlicher. So wurden Eistage von 5,2 (Düsseldorf) und 222 (Zugspitze) festgestellt. Die Anzahl an Frosttagen lag zwischen 40 (Sylt) und 112 (Farchant). Interessant ist hierbei, dass in Bezug auf eine Frostbelastung, die durch das zyklische Frieren und Auftauen bestimmt ist, nicht die Zugspitze als maßgebend anzusehen ist, sondern das in der Nähe, aber deutlich tiefer gelegene Farchant bei Garmisch-Partenkirchen.

Ist keine stetige Feuchtigkeitsquelle, wie dies zum Beispiel bei Wasserbauwerken der Fall ist, vorhanden, sondern resultiert die Feuchtebelastung nur aus der freien Bewitterung, so ist eine weitere Aufschlüsselung der Frosttage in Tage ohne und mit Niederschlag entscheidend, vgl. Bild 2 rechts. Eine Betrachtung nur dieser Frost-Tau-Wechsel ist vor allem im Bereich XF4 im Straßenbau vorzuziehen, da hier in der Regel eine ausreichende Drainage vorliegt. Hierbei wird deutlich, dass nur ein geringer Anteil der Frost-Tau-Wechsel je Saison als schadensinduzierend angesehen werden kann. So wurden in dem betrachteten Zeitraum zwischen 4,8 (Sylt) und 31,2 (Farchant) Frost-Tau-Wechsel mit Niederschlag festgestellt.

Neben der Anzahl an Frost-Tau-Wechseln muss aber auch deren Stärke beachtet werden. Dies kann z.B. durch die Betrachtung des Temperaturunterschieds der einzelnen Frost-Tau-Wechsel erfolgen. In Bild 3 ist dieser Temperaturunterschied an Frosttagen am Beispiel der beiden Stationen „Farchant“ (Alpenvorland) und „Meschede“ (Sauerland) dargestellt.

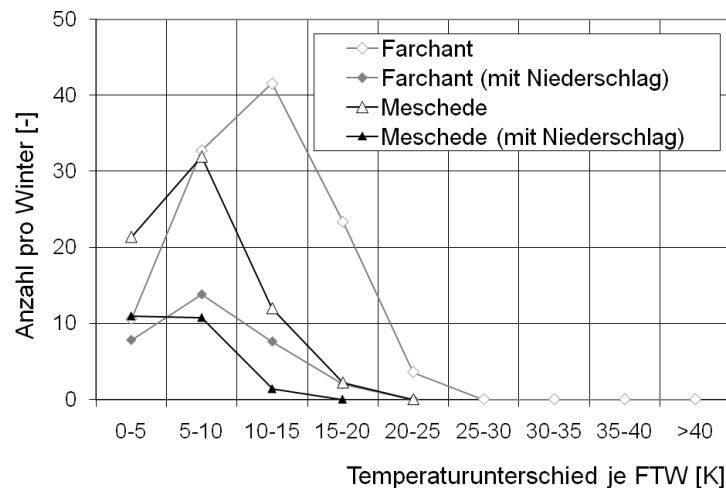


Bild 3: Temperaturunterschiede während Frost-Tau-Wechseln in Farchant und Meschede

Hierbei ist zu erkennen, dass bei Frost-Tau-Wechseln maximal Unterschiede von bis zu 25 K festgestellt werden konnten. Das Maximum der Temperaturdifferenzen liegt in Farchant in der Klasse „10 bis 15 K“, in Meschede eine Klasse niedriger. Werden nur die Frost-Tau-Wechsel bei gleichzeitigem Niederschlag betrachtet, so verschieben sich die Häufigkeitsverteilungen noch einmal in den gemäßigeren Bereich. Dies liegt an der mit Niederschlag einhergehenden Bewölkung und der wetterbedingten Dämpfung der Unterschiede zwischen Tag und Nacht.

Als Minimaltemperaturen wurden in der Ebene, also ohne Berücksichtigung der Wetterstation der Zugspitze, Werte von  $-21,9\text{ °C}$  ermittelt (Dezember 2001). Diese sind aber als deutliches Extrem anzusehen. In Farchant wurde im beobachteten Zeitraum eine Tiefsttemperatur von  $-15\text{ °C}$  durchschnittlich 3,5 mal je Winter unterschritten.

### 2.3 Feuchteverhältnisse in Frost-Tausalz-belasteten Betonen

Neben der Feuchtebelastung, die aus den klimatischen Bedingungen des jeweiligen Standorts resultiert, müssen die Feuchteverhältnisse, die sich im Bauteil einstellen, berücksichtigt werden<sup>1</sup>, vgl. [5]. In Untersuchungen wurden hierzu Probekörper hergestellt, die einer Frost-Tausalz-Belastung in der Praxis ausgesetzt wurden. Die Probekörper wurden hierbei an unterschiedlichen

<sup>1</sup> Diesem Bericht liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE-Nr. 15.367/2002/DRB durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde. Die Verantwortung für den Inhalt liegt alleine bei den Autoren.

Standorten (Farchant, Meschede, vgl. Bild 1) zwischen den Fahrspuren einer Autobahn gelagert. Die Oberflächen der Probekörper in der Exposition XF2 wurden hierbei senkrecht, die Oberflächen der Probekörper in der Exposition XF4 wurden waagrecht gelagert. Die Exposition XF4 entsprach demnach einer üblichen Belastung, wie sie zum Beispiel auf Brückenkappen zu finden ist.

Bei der Herstellung der Probekörper wurden Multiringelektroden eingebaut, mit denen in einer randnahen Zone der elektrolytische Widerstand des Betons über die Dauer der Lagerung aufgezeichnet werden konnte, vgl. Bild 4.

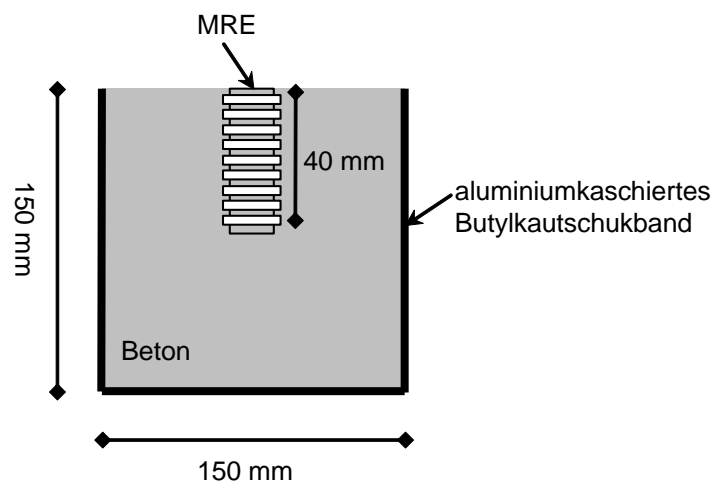


Bild 4: eingebaute Multiringelektrode in Probekörper

Die Messungen fanden über einen Zeitraum von mehreren Jahren statt. Neben der Feuchte, die einen maßgeblichen Einfluss auf den elektrolytischen Widerstand hat, wirkt sich vor allem die Temperatur auf den Widerstand aus. Aus diesem Grund wurden die gemessenen Widerstände temperaturkompensiert, vgl. auch [3], [4]. Ein ausgewähltes Beispiel der Messergebnisse ist in Bild 5 enthalten. Dargestellt ist hier der Zeitraum des ersten Auslagerungsjahres.

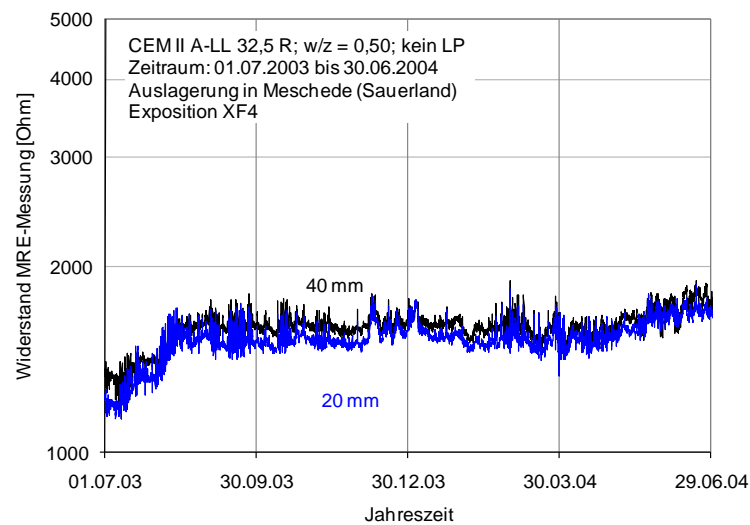


Bild 5: elektrolytischer Widerstand (temperaturkompensiert) in 20 bzw. 40 mm Tiefe

Gut zu erkennen ist bei der Betrachtung über den Zeitraum von einem Jahr, dass über den Sommer eine deutliche Zunahme des Widerstandes statt findet, d.h. der Beton in den Zonen „20 mm“ bzw. „40 mm“ langsam aber stetig austrocknet. Ab Herbst ist eine leichte Abnahme des Widerstandes, d.h. eine leichte Feuchtezunahme des Betons in den hier betrachteten Zonen zu erkennen. Entscheidend für eine spätere Modellierung des Frost-Tausalz-Angriffes ist, dass sich der Widerstand im Verlauf eines ganzen Jahres deutlich höher einstellt. Ein derartiges Verhalten war bei allen untersuchten Betonen unabhängig der Auslagerungsstelle und auch bei den späteren Beobachtungszeiträumen festgestellt worden. Die Abnahme des Widerstandes in den Herbst- bzw. Wintermonaten stellte sich allerdings aufgrund des höheren Feuchteangebotes bei den Betonen in der Expositionsklasse XF4 geringfügig ausgeprägter ein, als dies bei den Betonen in der Expositionsklasse XF2 der Fall war.

Wichtig für die weiteren Betrachtungen ist dies insofern, als dass keine Aufsättigungseffekte, wie diese teilweise befürchtet waren, während ganzer Jahresperioden festzustellen waren. D.h. zu Beginn einer Winterperiode war der „Nullzustand“ der Widerstände ähnlich und vor allem keiner reduzierenden Drift unterworfen, die ein Indiz für eine Aufsättigung gewesen wäre. Diese Ergebnisse werden gestützt durch die Ergebnisse der regelmäßige Wägung der Probekörper, die eine integrale Messung der Masseänderung des gesamten Probekörpers darstellt. Für die Modellierung des Frost-Tausalz-Angriffes



normaler XF4-Bauteile (ausreichende Dränage, keine ständige Feuchte) im Straßenwesen bedeutet dies, dass jeweils vor Beginn einer Winterperiode von ähnlichen Feuchteverhältnissen ausgegangen werden kann, in keinem Fall aber eine zunehmende Feuchte berücksichtigt werden muss.

## 2.4 Auswirkungen unterschiedlicher Klimaszenarien auf die Schädigung durch einen Frost-Tausalz-Angriff

Neben den Untersuchungen zu den klimatischen Kenndaten wurden an zwei charakteristischen Auslagerungsstellen (Farchant, Meschede, vgl. Kapitel 2.3) die Schädigungen, die sich infolge einer Frost-Tausalz-Belastung einstellen, an mehreren Betonen untersucht. Bei diesen Betonen handelte es sich vor allem um Betone, die entsprechend der aktuellen Normen, insbesondere DIN 1045-2:2001-07, nicht für die Exposition XF4 vorgesehen sind.

Die Probekörper mit dem Standort Farchant wurden im Herbst 2002 ausgelagert, die Probekörper in Meschede wurden im Sommer 2003 ausgelagert. Bei der Beurteilung der Schädigung fand sowohl eine Bewertung der inneren Schädigung über die Messung des Ultraschalls, als auch eine Bewertung der äußeren Schädigung über die Einstufung des visuell feststellbaren Schädigungsbildes statt, vgl. Tabelle 1. Die Schädigung der Probekörper wurde einmal jährlich nach der Winterperiode ermittelt.

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

Tabelle 1: Schädigungsklassen bei der Begutachtung der ausgelagerten Probekörper

Durch die Messung des Ultraschalls war über den Beobachtungszeitraum von 3 Jahren (Meschede) bzw. 4 Jahren (Farchant) keine innere Schädigung nachweisbar. Hier stellte sich vielmehr ein Anstieg der Ultraschallgeschwindigkeit in der Beobachtungsperiode des ersten Winters ein, die auf eine weitere Verfestigung der Betonstruktur (Nachhydratation) zurückzuführen ist. Nach diesem ersten Anstieg war kein Abfall der Ultraschallgeschwindigkeit in den nächsten Wintern zu beobachten.

Dagegen wurden bei der Beobachtung der äußeren Schädigungen durchaus Änderungen der Oberfläche festgestellt. Diese sind in Abhängigkeit des Auslagerungsortes in Tabelle 2 und Tabelle 3 dargestellt.

Nr.	Betonzusammensetzung			Schädigungsklasse			
	Zement	w/z-Wert	LP-Mittel	Winter 1	Winter 2	Winter 3	Winter 4
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7	8
A	CEM I 32,5 R	0,50	nein	1	2	2	2
D	CEM I 32,5 R	0,50	ja	0	1	1	1
E	CEM I 32,5 R	0,60	ja	1	1	1	1
F	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	nein	1	2	2	2

Tabelle 2: Schädigung der in Farchant ausgelagerten Probekörper, Expositionsklasse XF4

Nr.	Betonzusammensetzung			Schädigungsklasse		
	Zement	w/z-Wert	LP-Mittel	Winter 1	Winter 2	Winter 3
[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7
A	CEM I 32,5 R	0,50	nein	1	1	1
D	CEM I 32,5 R	0,50	ja	0	1	1
E	CEM I 32,5 R	0,60	ja	0	1	1
F	CEM II A-LL 32,5 R	0,50	nein	1	1	2

Tabelle 3: Schädigung der in Meschede ausgelagerten Probekörper, Expositionsklasse XF4

Im Bereich XF4 waren die an den Betonen mit Luftporenbildner festgestellten Schädigungen durchwegs sehr gering, hier waren nur oberhalb kleiner

Gesteinskörner Abplatzungen zu erkennen. Insbesondere wies auch der Beton, der mit einem Wasserzementwert von 0,60 hergestellt worden war und damit nicht den Anforderungen der DIN 1045-2:2001-07 für einen Beton der Expositionsklasse XF4 entsprach, diese geringen Schädigungen auf. Dagegen wiesen die beiden Betone, die ohne einen Luftporenbildner hergestellt worden waren, deutliche Schädigungen in Form größerer Abplatzungen an der Oberfläche auf.

Bei einem Vergleich der Schädigungen gleicher Betone aber unterschiedlicher Auslagerungsorte wird deutlich, dass die Betone in Farchant deutlich größere Schädigungen aufwiesen, als die Betone in Meschede. Als schadensinduzierend zählen bei der Auslagerung der Probekörper im Mittelbereich der Autobahn, bei der die Probekörper nur im Falle eines Regenereignisses auch nass werden (ausreichende Drainage), nur diejenigen Frost-Tau-Wechsel, an denen gleichzeitig Niederschlag vorhanden war. Dies waren in Farchant ca. 30 Wechsel je Jahr, in Meschede waren es mit ca. 25 ähnlich viele Wechsel. Zu beachten ist allerdings, dass sich die Wechsel in Farchant durch eine deutlich geringere Minimaltemperatur als die Wechsel in Meschede auszeichnen, vgl. Kapitel 2.2. Dies führte letztlich dazu, dass sich die Schädigung in Farchant deutlich schneller und in allen Fällen auch stärker ausbildete.

Die Ergebnisse zeigen, dass sich das Klima direkt auf die Angriffsstärke auswirkt und nominell gleiche Angriffsstärken (hier: Exposition XF4) zu deutlich unterschiedlichen Schadensbilder führen können. Dies galt bei den vorliegenden Untersuchungen schon bei zwei Auslagerungsorten mit nicht markant differierenden Angriffsstärken. Bei einer weitläufigeren Betrachtung unter der Berücksichtigung von Lagerungen in deutlich gemäßigteren Klimata (z.B. Sylt, Rheinland) ist zu erwarten, dass der Aspekt der Angriffsstärke sich noch einmal deutlich prägnanter auswirkt. Insofern ist für eine Modellierung des Schädigungsfortschrittes im Falle eines Frost-Tausalz-Angriffes eine genaue Kenntnis über das Klima weit über eine Einteilung in nur vier Expositionsclassen notwendig.

## 3 Einflussgrößen auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton

### 3.1 Allgemeines

Eine Reihe von Einflussgrößen wirken sich auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton aus. So sind dies zum Beispiel die Einflüsse aus der Zusammensetzung (Wasserzementwert, Zementart, Mikroluftporengehalt, etc.) oder aus der Verarbeitung (lokaler Wasserzementwert an der Oberfläche, Verdichtung, etc.). Diese Einflüsse sind soweit bekannt und in ihrer Auswirkung größtenteils auch umfassend erforscht.

Ein weiterer Einfluss auf den Frost-Tausalz-Widerstand ist die zeitliche Entwicklung des Widerstandes selbst. So finden die meisten Untersuchungen zum Frost-Tausalz-Widerstand in einem Alter von 28 Tagen statt. Durch Schadensfälle, z.B. im Falle von Räumerlaufbahnen aus Hochofenzementen oder bei einer frühen Verkehrsfreigabe von Verkehrsflächen im Spätherbst bzw. Winter, aber auch durch Untersuchungen im Labor ist bekannt, dass sich der Frost-Tausalz-Widerstand durchaus mit dem Alter ändert, vgl. z.B. [6], [7], [8].

Soll eine Modellierung der Schädigung infolge eines Frost-Tausalz-Angriffes erfolgen, so ist neben den bekannten Einflüssen aus der Zusammensetzung und der Verarbeitung auch die zeitliche Entwicklung des Widerstandes wichtig, da die Schädigung über einen im Vergleich zum Prüfalter von 28 Tagen deutlich längeren Zeitraum (DIN 1045 sieht einen Nutzungszeitraum von 50 Jahren vor) erfolgt.

Aus diesem Grund werden im Folgenden systematische Untersuchungen vorgestellt, deren Ziel die Quantifizierung des Alterseinflusses und die Herausarbeitung maßgebender Mechanismen auf den Frost-Tausalz-Widerstand ist. Unterschieden wird hierbei zwischen einem Angriff in jungem Alter (< 28 Tage) und einem späteren Angriff (> 28 Tage).

### 3.2 Frost-Tausalz-Widerstand in jungem Alter

Die Entwicklung des Frost-Tausalz-Widerstandes in jungem Alter wurde an praxisüblichen Straßenbetonen (Zementgehalt: 350 kg/m<sup>3</sup>; w/z = 0,40; LP-Gehalt: 4,5 Vol.-%; CEM I 32,5 R; unterschiedliche LP-Bildner) durchgeführt<sup>2</sup>,

<sup>2</sup>

Diesem Bericht liegen Teile der im Auftrag des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, vertreten durch die Bundesanstalt für Straßenwesen, unter FE-Nr. 08.179/2004/LGB „Luftporenkennwerte in Abhängigkeit der Art und Dosierung des LP-Bildners und Zusammenhang mit dem Frost-Tausalz-Widerstand ‚texturierter‘ Betonstraßendecken“ durchgeführten Forschungsarbeit zugrunde. Die Verantwortung für den Inhalt liegt alleine beim Autor.

vgl. [9]. Als Probekörper wurden Würfel hergestellt. Die Oberfläche der Würfel wurde abgezogen und entsprechend dem Vorgehen aus [11] texturiert und mit einem Nachbehandlungsmittel nachbehandelt. Die Betone wurden mit unterschiedlichen Frischbetontemperaturen zwischen 5 °C und 20 °C hergestellt und auch dementsprechend in einer Trockenlagerung bis zur jeweiligen Prüfung gelagert. Hintergrund für die unterschiedlichen Lagerungstemperaturen war, dass Schäden, die auf einen frühen Frost-Tausalz-Angriff zurückgeführt wurden, vor allem an Losen zu beobachten waren, die im Herbst bzw. Anfang des Winters hergestellt wurden. Die Betone dieser Bauabschnitte waren vor Beginn der Frost-Tausalz-Belastung also deutlich niedrigeren Temperaturen ausgesetzt, als sie sonst in der Laborlagerung üblich sind. Dieser Umstand sollte bei der Untersuchung, ab wann ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand erreicht wird, mit berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Ermittlung des Frost-Tausalz-Widerstandes des Betons mit einem synthetischen Tensid sind in **Bild 6** dargestellt.

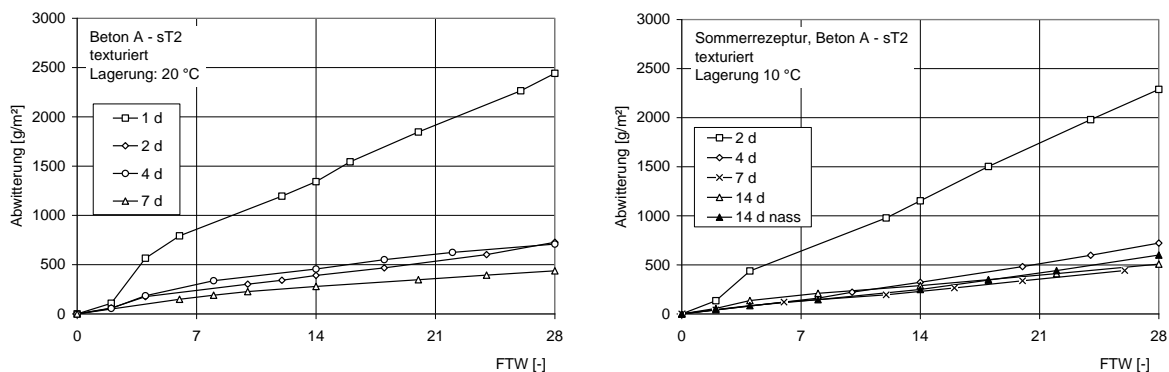


Bild 6: Abwitterung und Masseaufnahme in Abhängigkeit des Prüfzeitpunkts (Beton A - sT2, Oberfläche texturiert)

Die Ergebnisse der Probekörper, die bei 20 °C gelagert waren, zeigen eine deutliche Abhängigkeit der Schädigung in Bezug auf das Prüfalter, vgl. **Bild 6** links. So wiesen die Probekörper, die in einem Alter von einem Tag in die CDF-Truhe eingelagert wurden, eine Schädigung deutlich über 1.500 g/m<sup>2</sup> nach 28 Frost-Tau-Wechseln auf. Die Betone, die ab einem Alter von 2 Tagen geprüft wurden, wiesen unabhängig vom Alter eine deutlich niedrigere Abwitterung in Höhe von ca. 700 g/m<sup>2</sup> nach 28 Frost-Tau-Wechseln auf.

Beim Vergleich dieser für die Betonzusammensetzung relativ hohen Abwitterungen ist zu beachten, dass die Prüfungen direkt an der texturierten Oberfläche stattgefunden haben und nicht wie sonst üblich an einer glatt

geschalteten Oberfläche. In Vorversuchen hatte sich gezeigt, dass eine derartige Variation zu einer etwa doppelt so hohen Abwitterung im CDF-Test führt. Damit liegen die Abwitterungen, wie sie ab einem Alter von zwei Tagen ermittelt werden, in dem für diese Betonzusammensetzung erwarteten Bereich.

Interessant ist, dass alle Abwitterungsverläufe in etwa linear verlaufen. Es ist davon auszugehen, dass zumindest bei den in sehr jungem Alter eingelagerten Probekörpern eine weitere Hydratation auch noch während der Frost-Tausalz-Prüfung selbst stattfindet. Diese führt aber offensichtlich nicht zu einer Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstandes bzw. einer Verminderung der Abwitterungsrate.

Bei den Betonen der Lagerung 10 °C wurden erwartungsgemäß in jungem Alter deutlich höhere Abwitterungen, als diese bei der 20 °C Lagerung ermittelt wurden, gemessen, vgl. **Bild 6** rechts. So wiesen die Probekörper, welche in einem Alter von 2 Tagen in die Frosttruhe eingelagert wurden, Abwitterungen von ca. 2.300 g/m<sup>2</sup> nach 28 Frost-Tau-Wechseln auf. Zu diesem Zeitpunkt wurden bei den Probekörpern der 20 °C-Lagerung Abwitterungen von rund 700 g/m<sup>2</sup> ermittelt. Erst ab einem Prüfalter von 4 Tagen konnten auch für den bei 10 °C gelagerten Beton Abwitterungen in ähnlicher Höhe, die auf einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand schließen lassen, ermittelt werden. Bei der Prüfung der Probekörper, welche bei 5 °C hergestellt und gelagert wurden, konnte ebenfalls ab einem Alter von 4 Tagen ein ausreichend hoher Frost-Tausalz-Widerstand festgestellt werden.

Zur weiteren Untersuchung der Ursachen für die Entwicklung des Frost-Tausalz-Widerstandes wurden Probekörper mit Multiringelektroden, die an der Oberfläche einbetoniert wurden, hergestellt. Mit Hilfe dieser Methode wurde zu unterschiedlichen Zeitpunkten der elektrolytische Widerstand des Betons in insgesamt sieben Tiefenstufen ermittelt. Außerdem wurde an Mörtelproben, die entsprechend der anderen Probekörper gelagert waren, zu den Zeitpunkten des Frostbeginns der Hydratationsgrad an der Oberfläche sowie im Kern ermittelt. Zur besseren Vergleichbarkeit wurde der Hydratationsgrad, welcher in einem Alter von 14 Tagen im Kern der Probekörper festgestellt worden war, als Referenzwert zu 100 % angesetzt. Alle anderen Hydratationsgrade sind in Bezug auf diesen Referenzwert gesetzt.

Die Ergebnisse sind in **Bild 7** dargestellt.

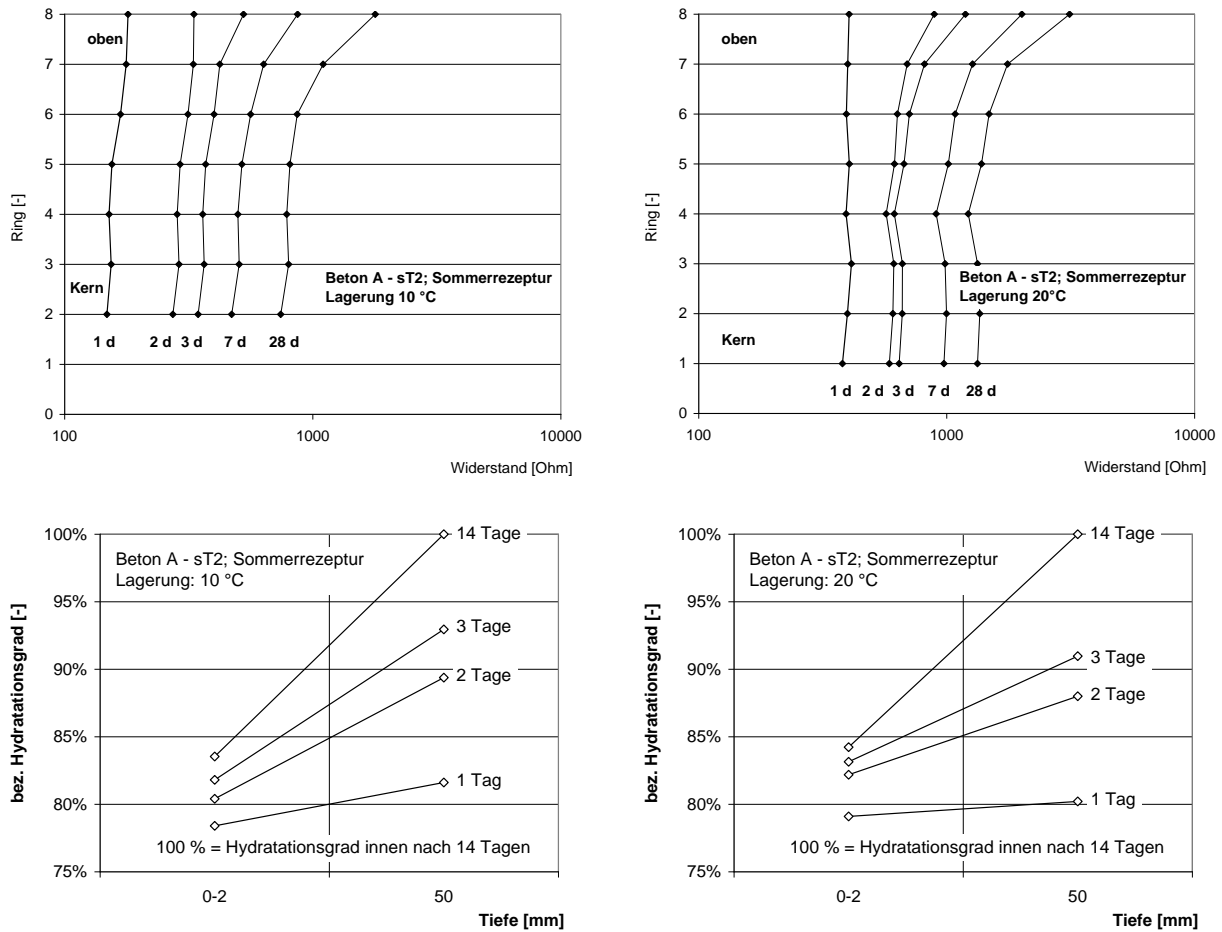


Bild 7: Entwicklung des elektrolytischen Widerstandes (oben) bzw. des Hydratationsgrades (unten); links: Lagerung 10 °C, rechts: Lagerung 20 °C

Betrachtet man die Entwicklung des elektrolytischen Widerstands im Kern der Probekörper, so wird eine deutliche Zunahme dieses Widerstands mit steigendem Alter sichtbar, vgl. **Bild 7** oben. Diese Zunahme ist auf die Hydratation und die damit verbundene Verringerung des Wassers im Porensystem zurückzuführen. Die stärkere Zunahme des Widerstands im oberflächennahen Randbereich ist zusätzlich durch eine Austrocknung, das heißt durch einen Wasserverlust nach außen gekennzeichnet. Betrachtet man die Entwicklung des Hydratationsgrades, so wird deutlich, dass durch die Austrocknung eine deutliche Verlangsamung der Hydratation im Randbereich schon ab einem Alter von einem Tag statt findet. Dies führt in der letztlich durch den Frost-Tausalz-Angriff beanspruchten Randzone (1.500 g/m<sup>2</sup> Abwitterung entsprechen einer durchschnittlichen Tiefe von 0,7 mm) zu einer Stagnation des Widerstandes, welcher allerdings schon in sehr jungem Alter (je nach Beton und Umgebungsbedingungen: 1 bis 4 Tage) erreicht wird.

Insgesamt zeigen die sowohl die Untersuchungen zur Abwitterung, als auch die Untersuchungen zum Austrocknungsverhalten und dem Hydratationsgrad an der Oberfläche, dass schon nach relativ kurzer Zeit (bei einer 20 °C Lagerung schon in einem Alter von 2 Tagen) eine Stagnation des Frost-Tausalz-Widerstandes statt findet. Die Untersuchungen zeigen, dass eine frühe Frost-Tausalz-Beanspruchung nur in sehr ungünstigen Fällen zu einer Schädigung führen kann. Vielmehr legen die Untersuchungen nahe, dass andere Einflüsse wie zum Beispiel ein unzureichendes LP Gefüge im Mörtelbereich, eine nicht optimal zusammengesetzte Mörtelphase bzw. eine zu dicke Mörtelschicht, eine schon sehr frühzeitig unterbrochene Hydratation (unzureichende Nachbehandlung, Temperaturen unter 0 °C) oder Mikrorisse bedingt durch Temperatur- bzw. Feuchtegradienten für Schäden verantwortlich sind.

### 3.3 Frost-Tausalz-Widerstand in höherem Alter

Normalfester Beton mit einem hohen Frost-Tausalz-Widerstand muss nach DIN 1045-2:2001-07 als Luftporenbeton unter Verwendung eines LP-Bildners hergestellt werden. Unter Einhaltung der Randbedingungen für die Zusammensetzung (w/z-Wert, Zementart und -gehalt) geht man davon aus, dass der Widerstand gegenüber einem Frost-Tausalz-Angriff während der gesamten Nutzungsdauer des Bauteils gegeben ist. Untersuchungen von Ludwig an Betonen mit Hochofenzement wiesen jedoch deutliche Unterschiede im Abwitterungsverhalten in Abhängigkeit des Carbonatisierungsfortschritts, d.h. in Abhängigkeit des Alters, auf, vgl. [6]. Langzeituntersuchungen aus Schweden, vgl. [8], zeigten ebenfalls, dass sich der Frost-Tausalz-Widerstand in Abhängigkeit von Betonalter und Umgebungsbedingungen mit der Zeit teilweise stark veränderte. Einige Betone, die ohne Luftporenbildner hergestellt worden waren, wiesen in höherem Prüfalter eine deutliche Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstandes auf. Hier wurden ähnlich niedrige Abwitterungen wie bei vergleichbaren Betonen mit Mikroluftporen ermittelt.

Ziel eigener Untersuchungen, vgl. [10], war es daher, Auswirkungen einer Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes in höherem Betonalter zu quantifizieren und mögliche Ursachen hierzu aufzuzeigen. Insbesondere sollte untersucht werden, ob Betone ohne LP Bildner in höherem Alter einen ähnlichen Frost-Tausalz-Widerstand wie Betone mit LP Bildner aufweisen. Aus diesem



Grund lag der Schwerpunkt der Untersuchungen auf Betonen ohne die Zugabe eines Luftporenmittels.

Nach den Vorschriften des CDF-Verfahrens wurden Probekörper hergestellt und zu unterschiedlichen Zeitpunkten auf deren Frost-Tausalz-Widerstand untersucht. Insgesamt wurden 12 unterschiedliche Betone untersucht. Bei den Betonen wurden der Wasserzementwert (0,40 bzw. 0,50) und der Zement (CEM I 32,5 R; CEM II/A-LL 32,5 R; CEM II/B-S 32,5 R) variiert. Außerdem wurden alle Betone jeweils mit und ohne Luftporenbildner hergestellt. Die Probekörper lagerten bis zur CDF-Prüfung bei drei unterschiedlichen Umgebungen, die Dauer der Lagerung betrug je nach Prüfzeitpunkt ein bis 24 Monate. Bei der Laborlagerung wurden die Probekörper im Normklima 20 °C/65 % r.F. gelagert. Bei den beiden anderen Lagerungen wurden die Probekörper im Außengelände der TU München gelagert. Hierbei waren die Probekörper einmal vor Regen geschützt, bei einer weiteren Lagerung waren die Prüfkörper der freien Witterung ausgesetzt.

Bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach der CDF-Vorschrift im Alter von 28 Tagen wiesen die Betone die erwartete Reihung und Höhe an Schädigung auf. So war eine klare Abhängigkeit des Frost-Tausalz-Widerstandes vom Wasserzementwert und von der Verwendung eines Luftporenbildners erkennbar. Es zeigte sich, dass die Betone ohne künstliche Mikroluftporen durchweg Abwitterungen über dem Akzeptanzkriterium von 1.500 g/m<sup>2</sup> aufwiesen, während die Betone mit künstlichen Mikroluftporen niedrigere Abwitterungen, die zumeist deutlich unter dem Akzeptanzkriterium lagen, zeigten. Im Vergleich zu den übrigen Variationen stellte sich bei der Prüfung nach 28 Tagen wie erwartet der Mikroluftporengehalt als maßgebend heraus.

In **Bild 8** sind die Abwitterungen in Abhängigkeit des Prüfalters für den Beton mit Portlandzement, einem Wasserzementwert von 0,40, ohne die Verwendung eines LP-Mittels dargestellt.

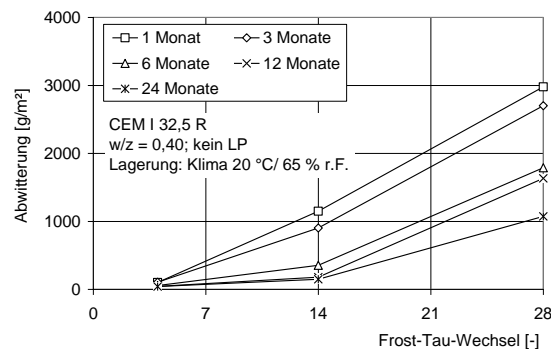


Bild 8: Abwitterung in Abhängigkeit des Prüfalters

Bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes in höherem Alter wiesen die Probekörper der Laborlagerung (Klima 20 °C/ 65 % r.F.) eine signifikant niedrigere Abwitterung auf als die Probekörper, die im Alter von 28 Tagen geprüft worden waren. Hierbei war vor allem eine deutliche Verringerung der Abwitterung zu Beginn der Frost-Tau-Beanspruchung zu verzeichnen, während die Abwitterung ab rund 14 Frost-Tau-Wechseln bis zum Ende der Untersuchungen unabhängig vom Prüfalter verlief. Dieser Effekt konnte darauf zurückgeführt werden, dass das Kapillarporensystem in der Randzone der Probekörper durch die Carbonatisierungsprodukte teilweise verengt bzw. unterbrochen wird. Während in den ersten Frost-Tau-Wechseln diese Verengungen die Schädigung verlangsamen, werden diese durch die Frost-Tau-Beanspruchung entfernt und das ursprüngliche Kapillarporensystem wird wieder freigelegt. Bei weiterer Prüfung findet somit bei allen Versuchen ein vergleichbarer Schädigungsfortschritt statt. Dies weist außerdem darauf hin, dass bei dieser Lagerung keine Verbesserung des Kernbetons stattfindet und dementsprechend nicht auf eine Nachhydratation der Probekörper geschlossen werden kann.

Im nachfolgenden Bild ist die Abwitterung, die sich bei diesem Beton im Alter von 24 Monaten gezeigt hatte, in Abhängigkeit der Lagerung dargestellt.

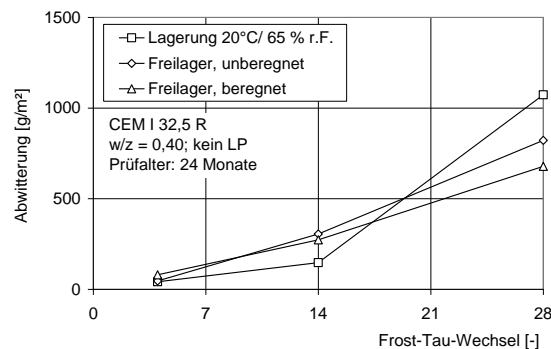


Bild 9: Abwitterung im Alter von 24 Monaten in Abhängigkeit der Lagerung

Auch bei den Probekörpern, die in der Auslagerung gelagert gewesen waren, stellte sich eine deutliche Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstandes ein. Allerdings war die Abwitterungsrate der Probekörper bei einer späteren Prüfung konstant, im Abwitterungsverlauf war kein Knickpunkt, wie dieser bei der Laborlagerung zu beobachten war, zu erkennen. Hierbei wiesen die Probekörper, die in der unberechneten Außenlagerung gelagert gewesen waren, eine geringere Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstandes als die Probekörper, die in der berechneten Außenlagerung (spätere Prüffläche oben) gelagert waren, auf. Bei den Probekörpern der Außenlagerungen fand durch die größere Feuchte in den Probekörpern keine wesentliche Carbonatisierung der Randzone statt. Hier war im Gegensatz zur trockenen Laborlagerung eine Nachhydratation möglich, die bei einer späteren Prüfung zu einem höheren Frost-Tausalz-Widerstand führte. Dieser Alterungseffekt konnte bei den Probekörpern aus Portlandhüttenzement stärker als bei den Betonen mit reinem Portlandzement beobachtet werden.

**Bild 10** zeigt schematisch die Abhängigkeit des Abwitterungsverlaufes vom jeweiligen Prüfzeitpunkt. Der Übergang zwischen Rand- und Kernzone kann unter der Voraussetzung einer konstanten Abwitterungsrate der carbonatisierten Randschicht bzw. der unbeeinflussten Kernzone abgeschätzt werden. Da die Abwitterung bei der Frost-Tausalz-Prüfung zu diskreten Frost-Tau-Wechseln ermittelt wird, kann der Knickpunkt nicht direkt ermittelt werden.

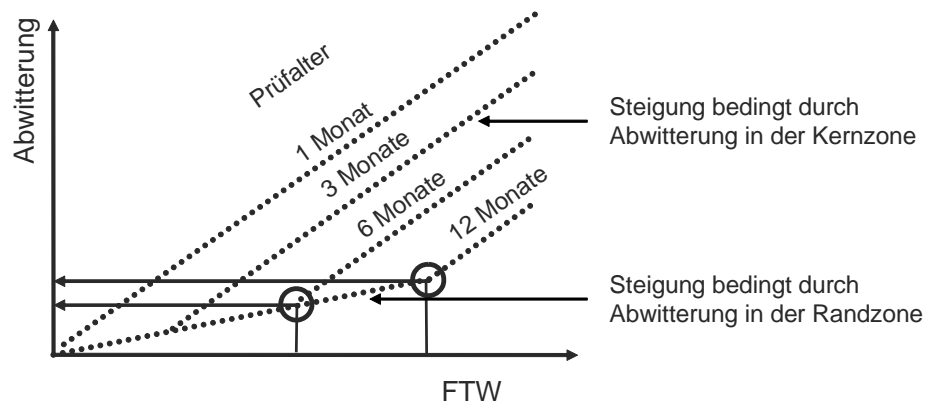


Bild 10: schematische Darstellung der Veränderung des Abwitterungsverlaufes in Abhängigkeit des Prüfzeitpunktes

Eine singuläre Betrachtung der aufsummierten Abwitterungsmenge, wie es noch bei der Prüfung nach 28 Tagen durch einen gleichmäßig aufgebauten Beton möglich ist, ist also bei einer Prüfung in höherem Alter nicht mehr möglich, da Veränderungen der Oberflächenstruktur das Abwitterungsverhalten entscheidend beeinflussen.

Trotz der Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstandes bei einer späteren Prüfung konnten Verbesserungen in der Größenordnung, wie sie nach Petersson [8] festgestellt worden waren, nicht nachgewiesen werden. So wiesen die Betone ohne künstliche Mikroluftporen in den eigenen Untersuchungen auch in höherem Alter größere Abwitterungen als die vergleichbaren Betone mit künstlichen Mikroluftporen auf. Dies kann unter anderem an einer längeren Auslagerung, der Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach einer anderen Vorschrift oder an einer anderen Betonzusammensetzung (z.B. Art des Zementes) liegen. Generell kann also aus diesen Ergebnissen nicht darauf geschlossen werden, dass Betone ohne Luftporenbildner, die erst einem späteren Frost-Tausalz-Angriff ausgesetzt werden, einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen und somit in diesen Fällen auf einen Luftporenbildner verzichtet werden kann.

Vielmehr können diese Untersuchungen dazu dienen, den Frost-Tausalz-Widerstand bestehender Bauwerke besser zu bewerten. Dies kann z.B. dadurch erfolgen, dass der Verlauf der Schädigung, wie er in den Verfahren zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes ermittelt wird, berücksichtigt wird und der Schädigungsfortschritt getrennt für die Bereiche „Randzone“ und „Kernbeton“ bewertet wird.

### 3.4 Fazit zum Alterseinfluss in Bezug auf die Modellierung der Frost-Tausalz-Schädigung

Die Ergebnisse der Untersuchungen zum Alterseinfluss des Frost-Tausalz-Widerstandes vom Beton zeigen deutlich, dass sich dieser im Laufe der Nutzungsdauer stark verändern kann. Im jungen Alter stellte sich als maßgebend die Möglichkeit der Hydratation, bedingt durch die vorherrschenden Temperaturen und die Feuchteverhältnisse, heraus. In höherem Alter war der Einfluss einer Nachhydratation nur in wenigen Fällen für eine Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstandes verantwortlich. Dies ist auch insofern nachzuvollziehen, als dass die durch einen Frost-Tausalz-Angriff beeinträchtigte Randzone in der Regel nur eine sehr geringe Dicke aufweist ( $1.500 \text{ g/m}^2$  entsprechen  $0,7 \text{ mm}$ ) und somit schnell austrocknet. Dagegen erwies sich die Carbonatisierung in höherem Alter als maßgebende Einflussgröße für die Veränderung des Frost-Tausalz-Widerstandes. In eigenen Untersuchungen, in denen vor allem Betone aus Portlandzement getestet wurden, erwies sich die Carbonatisierung als positiv für den Frost-Tausalz-Widerstand. In anderen Untersuchungen, z.B. [6], [7], wurde aber auch ein abnehmender Frost-Tausalz-Widerstand mit steigendem Alter festgestellt.

Alle Untersuchungen zeigen aber, dass bei einer Modellierung der Frost-Tausalz-Schädigung eine Berücksichtigung des Alters stattfinden muss. Eine alleinige Betrachtung des Widerstandes im Alter von 28 Tagen ist nicht ausreichend, um die Schädigung über die gesamte Nutzungsdauer eines Bauwerks abzubilden.

Die eigenen Untersuchungen sowie die verfügbaren Untersuchungen in der Literatur lassen aber vermuten, dass der Trend der Veränderung des Frost-Tausalz-Widerstandes abhängig von der Betonzusammensetzung (Zement, Mikroluftporengehalt etc.) ist. In diesem Fall kann unter Kenntnis eines Altersfaktors, der einmal betonspezifisch hergeleitet werden muss, durch eine Prüfung im Alter von 28 Tagen auf das Verhalten über die gesamte Nutzungsphase geschlossen werden.

## Abbildungsverzeichnis

Bild 1:	Lage der ausgewerteten Wetterstationen.....	4
Bild 2:	durchschnittliche Anzahl an Eistagen (links) sowie der Frosttage (rechts) je Jahr; betrachteter Zeitraum: Juli 1996 bis Juni 2005 .....	5
Bild 3:	Temperaturunterschiede während Frost-Tau-Wechseln in Farchant und Meschede .....	6
Bild 4:	eingebaute Multiringelektrode in Probekörper.....	7
Bild 5:	elektrolytischer Widerstand (temperaturkompensiert) in 20 bzw. 40 mm Tiefe.....	8
Bild 6:	Abwitterung und Masseaufnahme in Abhängigkeit des Prüfzeitpunkts (Beton A – sT2, Oberfläche texturiert) .....	13
Bild 7:	Entwicklung des elektrolytischen Widerstandes (oben) bzw. des Hydratationsgrades (unten); links: Lagerung 10 °C, rechts: Lagerung 20 °C .....	15
Bild 8:	Abwitterung in Abhängigkeit des Prüfalters .....	18
Bild 9:	Abwitterung im Alter von 24 Monaten in Abhängigkeit der Lagerung .....	19
Bild 10:	schematische Darstellung der Veränderung des Abwitterungsverlaufes in Abhängigkeit des Prüfzeitpunktes.....	20

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Schädigungsklassen bei der Begutachtung der ausgelagerten Probekörper .....	9
Tabelle 2: Schädigung der in Farchant ausgelagerten Probekörper, Expositionsklasse XF4 .....	10
Tabelle 3: Schädigung der in Meschede ausgelagerten Probekörper, Expositionsklasse XF4 .....	10

## Literaturverzeichnis

- [1] Gehlen, Chr.: Probabilistische Lebensdauerprognose von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion, Heft 510 des DAfStb, Beuth, 2000
- [2] Lay, Sascha: Abschätzung der Wahrscheinlichkeit tausalzinduzierter Bewehrungskorrosion – Baustein eines Systems zum Lebenszyklusmanagement von Stahlbetonbauwerken, Heft 568 des DAfStb, Beuth, 2007
- [3] Raupach, M.; Dauberschmidt, C.; Warkus, J.: Bestimmung der Feuchteverteilung in zementösen Baustoffen mit Einbausensoren; Soil Moisture Group der Universität Karlsruhe; In: Innovative Feuchtemessung in Forschung und Praxis, Bauwesen-Geotechnik-Umwelttechnik; Kolloquium mit Workshop; Karlsruhe 2003
- [4] Schießl, P.; Souchon, T.; Breit, W.: Berechnungsmodell zur Bestimmung von Feuchtigkeitsgehalten aus Widerstandswerten der Multi-Ring-Elektrode ermittelt in der Betonrandzone mittels Einbausensoren. Abschlussbericht F 538; Aachen 1997
- [5] Brandes, Chr.: Übertragbarkeit von Frost-Tausalz-Versuchen auf die Praxis; Beitrag zur 6. CDF-/ CIF-Fachtagung, Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton; Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften, Heft 10; Essen 2006
- [6] Ludwig, H.-M.: Zur Rolle der Phasenumwandlungen bei der Frost- und Frost-Tausalz-Belastung von Beton; Dissertation an der Fakultät Bauingenieurwesen der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar; Eigenverlag; Weimar 1996
- [7] Auberg, R.: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem CDF- und CIF-Test; Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Band 6; Aachen 1999
- [8] Petersson P.-E.: Scaling Resistance of Concrete Field Exposure Tests – Field Exposure Tests; inhouse publishing, Schweden
- [9] Brandes Chr., Strehlein D., Schnittger A., Schießl P.: Widerstand von Straßenbeton bei früher Frost-Tausalz-Beanspruchung; In: Beiträge zur Betonstraßentagung 2007 in Erfurt; Eigenverlag 2007



- [10] Brandes, Chr.: The aging influence within a durability test of concrete (performance concept) related to the freeze–thaw and deicing salt resistance; Beitrag zum 4th international ph.d. symposium in civil engineering; Springer–VDI–Verlag GmbH & Co. KG; Düsseldorf 2002
- [11] Wenzl, P., Beckhaus, K.: Dauerhaftigkeit von Betondeckenoberflächen – FE 8.157 /1999/LRB; Forschungsbericht, Bundesanstalt für Straßenwesen