

Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 70

The logo consists of the word "bast" in a bold, lowercase, green sans-serif font. The letters are slightly shadowed, giving it a 3D appearance. The logo is positioned in the bottom right corner of the page.

Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen

**Beanspruchung, Beurteilung
und Betonqualität**

von

Franka Tauscher

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 70

bast

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

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

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

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

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

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

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt F1100.2101002 des Arbeitsprogramms der Bundesanstalt für Straßenwesen:
Dauerhaftigkeit von Beton in Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen
– Beanspruchung, Beurteilung und Betonqualität
Teil 1: Frost- und Tausalz

Herausgeber

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

Redaktion

Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit

Druck und Verlag

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

ISSN 0943-9293
ISBN 978-3-86509-957-0

Bergisch Gladbach, September 2009

Kurzfassung – Abstract

Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen

Der Frost- und Tausalzwiderstand ist für die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken an Bundesfernstraßen von hoher Bedeutung. Die neuen Normen, zusammengefasst im DIN-Fachbericht 100, unterscheiden zwei Beanspruchungskollektive: Frost- und Tausalzeinwirkung bei hoher Wassersättigung, bezeichnet als Expositionsklasse XF4, und Frost- und Tausalzeinwirkung bei mäßiger Wassersättigung, bezeichnet als Expositionsklasse XF2. Unbekannt war bisher, welche Wassersättigung mäßige von hoher unterscheidet und welche Auswirkungen eine Frost-Tausalz-Beanspruchung im Beton des Bauwerks hat. Auch fehlte ein Prüfverfahren für die Expositionsklasse XF2. Das Prüfverfahren sollte dem Performance Concept gerecht werden, also die Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Betons ohne genaue Kenntnis seiner Zusammensetzung ermöglichen.

Die in ZTV-ING 3-1 getroffene Zuordnung der Bauteile zu den Expositionsklassen XF2 bzw. XF4 ist durch die Messungen im Bauwerksbeton bestätigt worden. Im Beton der Bauteile mit nicht vorwiegend horizontaler Oberfläche (XF2), wie z. B. Widerlager, Pfeiler und Tunnelwänden, werden im Vergleich zur Wassersättigung unter Atmosphärendruck eindeutig niedrigere Sättigungsgrade beobachtet als im Luftporenbeton der Brückenkappe (XF4), obwohl kein wirksames Luftporensystem eingeführt wurden. Nur in seltenen Fällen und nur in der äußersten Randzone des Bauwerksbetons mit nicht vorwiegend horizontaler Oberfläche (XF2) wird eine Sättigung beobachtet, die der Sättigung unter Atmosphärendruck entspricht oder diese überschreitet. Die Eignung von Beton ohne Luftporen in der Expositionsklasse XF2 für Verkehrsbauwerke wird bestätigt. Betone ohne Luftporen sind unter Beachtung von ZTV-ING 3-1 in XF2 die wirtschaftlichere Lösung.

In Tunnelbauwerken können noch über 100 m hinter dem Tunnelportal Frost-Tauwechsel im Beton mit derselben Häufigkeit auftreten wie im Portalbereich selbst. Die Forderung der Expositionsklasse XF2 nach ZTV-ING 3-1 für Beton in Portalbereichen von Tunneln wie auch in dem Bereich dazwischen erscheint angemessen.

Das neu entwickelte Prüfverfahren für Beton in der Expositionsklasse XF2, das modifizierte CDF-Verfahren XF2, ist ein Prüfverfahren nach dem Prinzip der Leistungsfähigkeit. Es erfasst den physikalischen Versagensmechanismus unter Frost-Tausalz-Beanspruchung im Beton und es bildet die reale Beanspruchung von Beton im Bauwerk ab. Die Prüfung wird im Labor durchgeführt, weshalb das modifizierte CDF-Verfahren XF2 als Prüfverfahren nach dem Lab-Performance-Concept bezeichnet wird. Ob und inwieweit der mögliche chemische Schädigungsmechanismus einer Frost-Tausalz-Beanspruchung mit diesem Verfahren erfasst werden kann, ist noch nicht geklärt.

Sobald die Reproduzierbarkeit der Versuche durch das neue externe Projekt (Fe 15.460/2008/DRB) bestätigt wird und die Abnahmekriterien angemessen festgelegt werden können, erscheint es möglich, die Prüfung von Beton für XF2 mit dem modifizierten CDF-Verfahren XF2 in den ZTV-ING 3-1 zur Überprüfung von solchen Betonzusammensetzungen einzuführen, die mit noch nicht in der Praxis bewährten Ausgangsstoffen hergestellt werden. Der Nachweis der Grundanforderungen von ZTV-ING 3-1 und DIN-Fachbericht 100 an die Betonausgangsstoffe wird jedoch weiterhin erforderlich bleiben.

Über das ursprüngliche Ziel hinaus konnte gezeigt werden, dass Frost-Tausalzschäden auch im Beton der Expositionsklasse XF2 auftreten können, wenn die Porosität der Betonzusammensetzung, hier abgebildet durch den w/z-Wert, nicht ZTV-ING 3-1 entspricht. In solchen Fällen bildet sich in der obersten Randzone des Betons ein starker Feuchtegradient aus und nur dort tritt eine Schädigung auf.

Auch wurde gezeigt, dass Überschreitungen des kritischen Sättigungsgrades im Bauwerksbeton in der Expositionsklasse XF2 wesentlich seltener auftreten als in der Expositionsklasse XF4, wenn ein vergleichbarer Beton ohne Luftporen betrachtet wird. Man muss davon ausgehen, dass bei mäßiger Wassersättigung XF2 die Austrocknungsphasen ausgeprägter sind als bei hoher Wassersättigung XF4 und dass daher die Schädigungsphase, also der Zeitraum, in dem gleichzeitig eine hohe Wassersättigung vorliegt und Frost-Tau-Wechsel auftreten, seltener ist. Dieser Zeitfaktor bewirkt, dass ein Beton, der unter XF4-Beanspruchung nach kurzer

Dauer erheblich geschädigt würde unter XF2-Beanspruchung eine erheblich verlängerte Lebensdauer hat.

Resistance of concrete to freezing and de-icing salts for bridges and civil engineering structures on federal roads

Frost and de-icing-salt resistance is of high importance for the durability of concrete structures on federal highways. The new standards, which are summarised in the technical DIN report 100, discriminate between two stress groups: frost and de-icing-salt effects at high water saturation are described as exposure class XF4, and frost and de-icing salt exposure at moderate water saturation are labelled as exposure class XF2. However, it was not defined what constitutes the difference between moderate and high water saturation and what effects frost and de-icing salt stress have on the concrete of building structures. There was also no test method for exposure class XF2. The test method should comply with the performance concept, i.e. it should make it possible to determine the capability of the concrete without a detailed knowledge of its composition.

The allocation of the components to exposure classes XF2 and XF4 in ZTV-ING 3-1 was validated by measurements taken in the concrete of constructions. The concrete components that do not primarily have horizontal surfaces (XF2), such as abutments, pillars and tunnel walls, clearly show lower saturation levels when compared to full saturation under atmospheric pressure than the porous concrete of the bridge cap (XF4), although no effective air pore system had been introduced. Saturation that equals or exceeds saturation under atmospheric pressure is only observed on rare occasions and only in the most outward edge zone of concrete constructions that do not primarily have horizontal surfaces (XF2). The suitability of concrete without air pores for exposure class XF2 of traffic constructions was confirmed. Concrete types without air pores provide a more economic solution when ZTV-ING 3-1 is taken into account.

Freeze-thaw cycles in tunnel constructions can be as frequent in the concrete up to 100m behind the tunnel portal as they are directly at the tunnel portal. The requirements of exposure class ZF2 according to ZTV-ING 3-1 for concrete in the portal area of

tunnels as well as in the area between them appear to be appropriate.

The newly developed test method for concrete of exposure class XF2, the modified CDF method XF2, is a test method according to the performance concept. It registers the physical failure mechanism due to frost and de-icing-salt stress in concrete and models the real stress of the concrete in the construction. The test is performed in a laboratory. The modified CDF method XF2 is therefore also called a test method according to the lab performance concept. It has not yet been established whether and to what extent this method explains the possible chemical damage mechanism of frost and de-icing-salt stress.

It seems possible to use the modified CDF method XF2 in ZTV-ING 3-1 for investigating concrete compositions that have not yet been produced by using raw materials tested in practice, once the reproducibility of the tests has been confirmed by the new external project (FE 15.460/2008/DRB) and appropriate acceptance criteria have been stipulated. However, proof that the raw materials for the concrete comply with the basic requirements in ZTV-ING 3-1 and the technical DIN report 100 will still be required.

In addition to the original objectives, it could be shown that frost and de-icing-salt damage can also happen in concrete of exposure class XF2 when the porosity of the concrete composition, here represented by the w/z value, does not comply with ZTV-ING 3.1. In such cases, a strong humidity gradient is formed in the topmost edge zone of the concrete and the damage only occurs in this area.

It was also shown that the critical saturation level in the concrete of constructions is much less often exceeded in exposure class XF2 than in exposure class XF4 when comparable concrete without air pores is considered. It must be assumed that the drying phases are more pronounced during moderate water saturation in XF2 than during high water saturation in XF4, and that the damage phase, i.e. the period when high water saturation occurs at the same time as freeze/thaw cycles, is more rare. This time factor ensures that concrete that would show severe damage under XF4 conditions has a much longer life span under XF2 conditions.

Inhalt

1	Einleitung	7	5.4	Unterschiede der Beanspruchung bei hoher (XF4) und bei mäßiger (XF2) Wassersättigung	25
1.1	Allgemeines	7			
1.2	Problemstellung	7			
1.3	Zielsetzung	8			
1.4	Durchführung	8			
2	Grundsätzliches zum Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Verkehrsbauwerken	9	6	Prüfverfahren für den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton	26
2.1	Definition der Frost-Tausalz-Beanspruchung in den Regelwerken	9	6.1	Prüfverfahren für Beton in XF4	26
2.2	Schädigungsmechanismus	9	6.2	Prüfverfahren für Beton in XF2	27
2.3	Schädigung des Betons und Schadensentwicklung	11	7	Bewertung von Beton mit den Prüfverfahren	29
2.4	Abgrenzung mäßige Wassersättigung des Betons von hoher Wassersättigung	13	7.1	Beton in der Expositionsklasse XF4 ...	29
			7.2	Beton in der Expositionsklasse XF2 ...	30
			7.3	Schadensbild von Beton in XF2	31
3	Sachstand zur Beanspruchung von Beton in Verkehrsbauwerken vor Projektbeginn	15	8	Offene Fragen	31
3.1	Einwirkungen auf Betonbauwerke an Bundesfernstraßen	15	9	Zusammenfassung und Schlussfolgerung	32
3.2	Zuordnung der Bauteile zu den Expositionsklassen XF2 und XF4	16	10	Literatur	34
4	Untersuchungen im Rahmen des Projekts	17			
5	Ergebnisse zur Frost-Tausalz-Beanspruchung von Beton in Verkehrsbauwerken	19			
5.1	Witterung und Verkehr	19			
5.1.1	Witterung	19			
5.1.2	Tausalz aus Verkehr	20			
5.2	Temperatur und Sättigungsgrad in Bauwerksbeton in XF2	20			
5.3	Temperatur und Sättigungsgrad in Bauwerksbeton in XF4	24			

1 Einleitung

1.1 Allgemeines

Der Frost- und Tausalz widerstand ist für die Dauerhaftigkeit von Bauwerken an Bundesfernstraßen von hoher Bedeutung. Alle Bauwerke an Bundesfernstraßen sind als Außenbauteile der Witterung und als Bauteile am Rande stark befahrener Straßen zusätzlich Spritzwasser, Sprühnebel und saisonal auch Tausalzen ausgesetzt. Die Frost-Tausalz-Beanspruchung des Betons resultiert aus der Wassersättigung, aus der jahreszeitlich bedingten Tausalzbeanspruchung und aus der Temperaturwechselbeanspruchung mit Temperaturen oberhalb und unterhalb des Gefrierpunktes. Gegenüber anderen Außenbauteilen folgt die Wassersättigung des Betons im Bauwerk nicht nur aus Luftfeuchte und Niederschlag, sondern zusätzlich aus Spritzwasser und Sprühnebel, die durch den Straßenverkehr aufgewirbelt werden und die saisonal auch tausalzhaltig sind. Schmelzwasser aus tausalzhaltigem Schnee und Eis am Fahrbahnrand oder auf Brückenkappen wirkt ebenfalls auf den Bauwerksbeton ein.

Durch Öffnung des europäischen Marktes und die rasche technische Weiterentwicklung bei Baustoffen und Bauverfahren werden in Deutschland mehr und mehr Betonausgangsstoffe verwendet, mit denen es keine Langzeiterfahrung im konstruktiven Ingenieurbau an Bundesfernstraßen gibt. Die Entwicklung der Betonnormen DIN EN 206-1 [1] und DIN 1045-2 [2] zeigt, dass die Dauerhaftigkeitseigenschaften von Beton nicht mehr indirekt über Rezepturen, sondern über prüfbare Zusammenhänge beschrieben werden sollen (Performance Concept oder Konzept der Leistungsfähigkeit). Der Baustoffwiderstand soll den Einwirkungen der Umgebung auf das Bauwerk angepasst werden. Für die Entwicklung von entsprechenden Prüfverfahren müssen neben den maßgebenden Versagensmechanismen im Beton auch die tatsächlichen Belastungen des Betons durch Umwelteinflüsse bekannt sein.

1.2 Problemstellung

Die Betonnormen, DIN EN 206-1 und DIN 1045-2, zusammengefasst in DIN-Fachbericht 100 [3], beschreiben die Umwelteinwirkungen durch Frost und Tausalz aus Straßenverkehr mit den Expositions-klassen XF2 und XF4. Mit den Expositions-klassen

werden zwei Beanspruchungskollektive unterschieden: Frost- und Tausalzeinwirkung bei hoher Wassersättigung, bezeichnet als Expositions-klasse XF4, und Frost- und Tausalzeinwirkung bei mäßiger Wassersättigung, bezeichnet als Expositions-klasse XF2. Die Definition einer mäßigen oder hohen Wassersättigung ergibt sich aus der Langzeiterfahrung mit unterschiedlich exponierten Bauteilen, z. B. Brückenkappe oder Widerlager. Dabei zählt die Brückenkappe mit ihrer nahezu horizontalen Betonoberfläche zu XF4, ein Bauteil, das, mit Luftporenbeton hergestellt werden muss, um den Sättigungsgrad des Betons im gesamten Bauteilquerschnitt unterhalb des für Frost-Tausalz-Schäden kritischen Wertes zu halten. Das Widerlager mit seiner nicht vorwiegend horizontalen Betonoberfläche zählt zu XF2, ein Bauteil, das nicht mit Luftporenbeton hergestellt werden muss. Am Fuß des Widerlagers wird das Spritzwasser durch konstruktive Maßnahmen abgeleitet.

Welcher Sättigungsgrad allerdings eine hohe (XF4) von einer mäßigen (XF2) Wassersättigung unterscheidet und welche Werte sich in der Praxis unter dem Einfluss von Chloriden aus Tausalz im Bauwerksbeton tatsächlich einstellen, ist ebenso wenig bekannt wie die bei Frost im Bauwerksbeton auftretenden Temperaturen.

Diese Zuordnung der Bauteile zu den Expositions-klassen nach EN 206-1 [1] erfolgte im Jahr 2000/2001 mit ZTV-ING 3-1 [4]. Zu der Zeit lagen keine Erfahrungen mit den neuen Normen EN 206-1 und DIN 1045-2 vor, sodass die Zuordnung zu den Expositions-klassen XF2 und XF4 auch über den Vergleich der bewährten Betonzusammensetzungen nach DIN 1045:88-07 und ZTV-K 96 mit den Betonzusammensetzungen nach den neuen Normen erfolgte.

Für die Beanspruchung Expositions-klasse XF4 gibt es Prüfverfahren, z. B. das CDF-Verfahren, um den Widerstand an Betonprüfkörpern zu messen. Für die Expositions-klasse XF2 gibt es noch kein entsprechendes Prüfverfahren. Das bisher übliche Vorgehen, den Frost- und Tausalz widerstand von Beton durch deskriptive Anforderungen an die Grenzwerte der Betonzusammensetzung sicherzustellen, ist in der heutigen Zeit nur noch schwer durchsetzbar, denn vor Aufnahme neuer Stoffe in technische Regelwerke für den Brücken- und Ingenieurbau müssen baupraktische Langzeiterfahrungen mit den Betonausgangsstoffen vorliegen. Die Entwicklung neuer Baustoffe, insbesondere bei Ze-

ment und Betonzusatzmitteln, schreitet so schnell voran, dass eine solche Langzeiterfahrung, die mit einer eingeschränkten Verwendung der Stoffe einhergeht, nur sehr schwer gesammelt werden kann.

1.3 Zielsetzung

Das Ziel des AP-Projektes ist, ein Prüfverfahren zur Beurteilung des Frost- und Tausalzwidehrstands in der Expositions-klasse XF2 zu entwickeln und die 2000/2001 in ZTV-ING 3-1 [4] getroffene Zuordnung der Bauteile zu den Expositions-klassen XF2 und XF4 wissenschaftlich abzusichern.

Das zu entwickelnde Prüfverfahren soll die Beurteilung eines Betons nach seiner Leistungsfähigkeit erlauben (Prüfverfahren nach dem Performance Concept).

Das Prüfverfahren soll die physikalischen und ggf. chemischen Versagensmechanismen im Beton bei Frost-Tausalz-Beanspruchung möglichst genau erfassen und die Beanspruchung des Betons im Bauwerk so abbilden, dass alle relevanten Umwelteinwirkungen aus Klima und Nutzung durch Straßenverkehr in der Expositions-klasse XF2 abgedeckt werden. Dabei soll das Prüfverfahren die bekannten Einflüsse der Betonzusammensetzung auf den Frost-Tausalz-Widerstand widerspiegeln, zu reproduzierbaren Ergebnissen führen und mit ausreichender Genauigkeit geeigneten und nicht geeigneten Beton unterscheiden können.

Voraussetzung für die Entwicklung des Prüfverfahrens ist die realitätsnahe Erfassung der schädigungsrelevanten Betonbeanspruchung während der Frost-Tau-Wechsel im Bauwerksbeton.

Die Bewertung der mit dem zu entwickelnden Prüfverfahren erzielten Ergebnisse, d. h. Abnahmekriterien für den Beton in der Prüfung, soll über die Langzeiterfahrung mit Betonen bewährter Zusammensetzung für die Beanspruchung Expositions-klasse XF2 erfolgen. Es sollen keine unrealistischen Anforderungen an den Beton in der Prüfung gestellt werden, aber die Beurteilung soll in jedem Fall auf der sicheren Seite liegen.

1.4 Durchführung

Die Klärung der offenen Fragen erfolgte mit Hilfe externer Forschungsprojekte, die vom BMVBS (FE 15.324/2000/FR) bzw. von der BAST (FE 89.0169/2005/AP) vergeben wurden.

Die realitätsnahe Erfassung der Frost-Tauwechsel-Beanspruchung im Beton von Verkehrsbauwerken in der Expositions-klasse XF2 wurde im Rahmen des externen Forschungsprojekts FE 15.324/2000/FR „Europäische Bemessungsvorschriften für den Brückenbau – Beanspruchung von Betonbauwerken“ [5] ermittelt. Alle Messungen erfolgten im Bauwerksbeton von Bauwerken, die unter Verkehr stehen. Als Beispiele für Bauteile in der Expositions-klasse XF2 wurden Mittelpfeiler und Überbau von Brücken sowie Tunnelwände ausgewählt. Mit diesen ausgewählten Bauteilen wurde die unterschiedliche Intensität der Frost-Tausalz-Beanspruchung in Hinblick auf Wassersättigung und Chloridbeaufschlagung durch Straßenverkehr abgebildet. Mittelpfeiler und Tunnelwand werden sowohl durch Spritzwasser als auch durch Sprühnebel und der Brückenüberbau wird ausschließlich mit Sprühnebel beaufschlagt.

Diese Messungen wurden durch das externe Forschungsprojekt FE 89.0169/2005/AP „Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositions-klasse XF4“ [6] ergänzt. Mit den Messungen in einer Brückenkappe sollte vor allem der Unterschied der schädigungsrelevanten Frost-Tausalz-Beanspruchung zwischen der Expositions-klasse XF2 und der Expositions-klasse XF4, d. h. der Unterschied zwischen mäßiger Wassersättigung und hoher Wassersättigung, dargestellt werden. Die Ergebnisse der beiden Projekte sind direkt miteinander vergleichbar, da dieselben Messverfahren eingesetzt und beide Projekte vom selben Forschungsnehmer bearbeitet wurden.

Die Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Überprüfung des Frost-Tausalz-Widerstands von Beton für die Expositions-klasse XF2 erfolgte mit dem externen Forschungsprojekt FE 15.367/2002/DRB „Prüfverfahren nach dem Performance Concept – Beton in der Expositions-klasse XF2“ [7]. Im Rahmen dieses Projektes wurden auch Betonprüfkörper im Mittelstreifen einer Autobahn und einer 4-spurigen Bundesstraße der Witterung so ausgesetzt, dass entweder die horizontale Fläche (XF4-Bedingungen) oder die vertikale Fläche (XF2-Bedingungen) mit Niederschlag und tausalzhaltigem Sprühnebel aus dem Straßenverkehr beaufschlagt waren. Die Betonprüfkörper wurden vor der Auslagerung mit dem neu entwickelten Prüfverfahren XF2 geprüft. Zusammen mit den Untersuchungen zur Schädigung der Prüfkörper während der Auslagerung war es dann möglich, Abnahmekriterien der neuen Prü-

fung für Beton vorzuschlagen, der für Verkehrsbauwerke in XF2 geeignet ist.

Die Ergebnisse der externen Projekte werden im vorliegenden Bericht zusammengefasst und bewertet. Anschließend werden die sich ergebenden Schlussfolgerungen für die Festlegungen in den ZTV-ING 3-1 gezogen.

2 Grundsätzliches zum Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Verkehrsbauwerken

2.1 Definition der Frost-Tausalz-Bearbeitung in den Regelwerken

Die Einwirkungen der Umgebung auf Beton werden nach DIN-Fachbericht 100 [3] in Expositionsklassen unterteilt. Frostangriff mit und ohne Taumittel wird den Expositionsklassen XF zugeordnet. Wenn durchfeuchteter Beton erheblichem Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse gemäß DIN-Fachbericht 100, Tabelle 1, zugeordnet werden (Tabelle 2.1). Unter Taumittelwirkung ist Beton mit mäßiger Wassersättigung und Tausalz die Expositionsklasse XF2 und Beton mit hoher Wassersättigung die Expositionsklasse XF4 zugeordnet.

Für Betonzusammensetzungen und Betonausgangstoffe werden in DIN-Fachbericht 100, Abschnitt 5.3 und Tabellen F.2.2 „Grenzwerte der Betonzusammensetzung“, F.3.1 bis F.3.4 „Anwendungsbereiche für Zemente“ und F.4.1 „Höchstzulässiger Mehlkorngelalt“, Anforderungen für die

jeweilige Expositionsklasse genannt. Bei Übereinstimmung der Betonzusammensetzung mit diesen Anforderungen gilt als nachgewiesen, dass der Beton unter Beanspruchung entsprechend der jeweiligen Expositionsklasse über eine Nutzungsdauer von mindestens 50 Jahren dauerhaft ist; sachgerechter Einbau, sachgerechte Nachbehandlung, angemessene Betondeckung und angemessene Instandhaltung vorausgesetzt.

Für Ingenieurbauwerke an Bundesfernstraßen wird die Expositionsklasse XF2 mit ZTV-ING 3-1 [4], Abschnitt 4, (11), konkretisiert. Die Bedingungen gemäß der Expositionsklasse XF2 liegen in aufgehenden Bauteilen dann vor, wenn im Fußbereich an der nicht überwiegend horizontalen Betonoberfläche (wie z. B. Widerlagerwand, gekrümmte Tunnelinnenschale) durch konstruktive Maßnahmen das tausalzhaltige Spritzwasser abgeleitet wird. Durch diese Maßnahme kann kein Wasser aus Pfützen, das nicht unmittelbar im Anschluss an das Niederschlags- oder Spritzwasserereignis abfließt, am Wand- oder Stützenfuß über Kapillarkräfte im Beton aufsteigen und dort zu lang anhaltender Durchfeuchtung im Sinne der hohen Wassersättigung führen.

2.2 Schädigungsmechanismus

In der Betonmatrix, das ist der Beton abzüglich der Gesteinskörnung, liegen Poren mit ganz unterschiedlicher Porenweite in unmittelbarer Nachbarschaft vor. Sind die Poren wiederum durch Poren unterschiedlicher Porenweite miteinander verbunden, entsteht ein vernetztes Porensystem, welches mit Wasser gefüllt werden kann. Dieses Poren-

Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen (informativ)
5 Frostangriff mit und ohne Taumittel		
Wenn durchfeuchteter Beton erheblichem Angriff durch Frost-Tau-Wechsel ausgesetzt ist, muss die Expositionsklasse wie folgt zugeordnet werden:		
XF1	mäßige Wassersättigung, ohne Taumittel	Außenbauteile
XF2	mäßige Wassersättigung, mit Taumittel	Bauteile im Sprühnebel- oder Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen, soweit nicht XF4; Betonbauteile im Sprühnebelbereich von Meerwasser
XF3	hohe Wassersättigung, ohne Taumittel	offene Wasserbehälter; Bauteile in der Wasserwechselzone von Süßwasser
XF4	hohe Wassersättigung, mit Taumittel	Verkehrsflächen, die mit Taumitteln behandelt werden; Überwiegend horizontale Bauteile im Spritzwasserbereich von taumittelbehandelten Verkehrsflächen; Räumlerlaufbahnen von Kläranlagen; Meerwasserbauteile in der Wasserwechselzone

Tab. 2.1: Expositionsklassen für Frosteinwirkungen nach DIN-Fachbericht 100 [3]

system ist die offene (mit Wasser füllbare) Porosität der Betonmatrix.

Dem Schädigungsmechanismus im Beton liegen verschiedene Effekte zugrunde, die auf makroskopischer, mikroskopischer und nanoskopischer Ebene der Porengröße wirken. Der Wissenstand zum Schädigungsmechanismus ist in dem Sachstandbericht des DAfStb [8] sehr detailliert dargestellt. An dieser Stelle wird ein Überblick mit Schwerpunkt Frost- und Tausalzeinwirkung auf Beton gegeben.

Auf makroskopischer Ebene (Poren größer rd. 1 mm) können als Folge der unterschiedlichen Temperatúrausdehnungskoeffizienten von Zementstein und Eis schon bei rd. 15 Kelvin Zugspannungen an Porenwänden entstehen, die im Bereich der Betonzugfestigkeit liegen [8].

Auf mikroskopischer Ebene (Poren kleiner rd. 1 mm und größer rd. 1×10^{-7} m) werden der Hydraulische Druck, der Kapillare Effekt, die Mikroislinsenpumpe und, bei Einwirkung von Tausalzen, chemische und physikalische Veränderungen unterschieden.

Der Hydraulische Druck resultiert aus der 9%igen Volumenausdehnung des Wassers beim Phasenübergang vom flüssigen (Wasser) zum festen Medium (Eis). Ist diese Expansion behindert, entsteht ein Innendruck im Porensystem, dessen Größe abhängig ist von der

- Länge der Strecken zwischen Ort der Eisbildung und Ausweichraum,
- Kristallisationsgeschwindigkeit des Eises,
- Abkühlungsgeschwindigkeit,
- Menge an gefrierbarem Wasser.

Der Kapillare Effekt beruht auf der Radius-Gefrierpunkt-Beziehung, nach der die Gefriertemperatur in engen Poren erniedrigt ist. Dadurch können nebeneinander Eis in größeren Poren und Wasser in kleineren Poren vorliegen. Durch den gegenüber Wasser reduzierten Dampfdruck über Eis entstehen erhebliche Unterdrücke im Gelporensystem, die einen Wassertransport aus den Gelporen hin zum Eis in den größeren Poren in Gang setzen, wo das Wasser gefriert und expandiert.

Durch den wachsenden Eisdruck bei behinderter Expansion und/oder wachsende Eigenspannungen infolge Behinderung des Transports des Gelporenwassers im Porensystem können irreversible Deformationen der Betonmatrix hervorgerufen wer-

den. Die Folge ist eine Gefügezerstörung der Betonmatrix.

Mit der Mikroislinsenpumpe wird der Kapillare Effekt unter Berücksichtigung der Nanoebene des Porensystems im Beton (Poren kleiner rd. 1×10^{-7} m) und der Oberflächenphysik erweitert. Dabei werden auch die Prozesse berücksichtigt, die während des Auftauens des Betons zwischen den Frostzyklen auftreten, wenn der Beton mit Wasser in Kontakt steht.

Das Entstehen von Unterdruck und Transportvorgängen im Gelporensystem (Poren im Nanometerbereich zwischen rd. 1×10^{-9} m und 100×10^{-9} m) wird durch physikalische und chemische Bedingungen für die gleichzeitige Existenz von Wasserdampf, Wasser und Eis jeweils als stabile Phase erklärt. Im nanoporösen Porensystem gelten Gesetze der Oberflächenphysik, die im Submikrobereich dominieren. Ungefrorenes Wasser in Gelporen kann im 3-Phasen-Gleichgewicht Wasserdampf-Wasser-Eis nur dann vorliegen, wenn in ihm ein Unterdruck entsteht, der mit fallender Temperatur zunimmt. Beim Abkühlen des Betons entsteht so ein Unterdruck im Gelporensystem, der einen Transport des Wassers aus den Gelporen hin zum makroskopischen Eis initiiert. Wenn das Eis im Porenraum genügend Expansionsraum hat, beobachtet man eine plötzliche Kontraktion des Porensystems, die als Gefrierschwinden bezeichnet wird. Beim Erwärmen kehrt sich dieser Vorgang um. Das noch am Eis angefrorene Wasser kann nicht so schnell in den Gelporenraum zurückströmen, wie der Porenraum expandiert. Wird der Betonmatrix bzw. der Betonoberfläche in diesem Moment von außen freies Wasser angeboten, z. B. wenn Flüssigkeit im Überschuss an der Betonoberfläche ansteht, so wird dies Wasser zusätzlich in das Gelporensystem aufgesaugt. Bei Wiederholung des Abkühl- und Auftauvorgangs wirkt das 3-Phasen-System im nanoporösen Bereich als Frostpumpe, durch die der Sättigungsgrad des Betons kontinuierlich ansteigt. Der Sättigungsgrad kann dabei die Sättigung unter normalen Klimabedingungen ohne Frost-Tau-Wechsel weit übersteigen. Sobald das Eis nicht mehr genügend Expansionsraum hat, wird, wie unter dem Effekt Hydraulischer Druck beschrieben, die Betonmatrix irreparabel geschädigt.

Tausalz kann durch chemische Reaktionen den Frostschaden in der Betonmatrix vergrößern. Vor allem die Chloridionen reagieren mit den Zementphasen. Die Reaktionsprodukte haben ein größe-

res Volumen als die Ausgangsstoffe und können Gefügeschäden verursachen. Auch kann die Kapillarporosität durch Auslaugung des Calciumhydroxids der Betonmatrix vergrößert werden. Dies führt zu einer Abnahme der Festigkeit des Gefüges, Zunahme der Kapillarporosität und zu einer beschleunigten Wasseraufnahme. Nach der Tausalzart differenziert ist die auslaugende Wirkung von Magnesiumchlorid ($MgCl_2$) größer als von Natriumchlorid ($NaCl$). Auf den Ablauf der chemischen Reaktionen hat die Temperatur einen wesentlichen Einfluss [8].

Tausalz verändert auch die Gefriertemperatur von Wasser und beeinflusst so den Kapillaren Effekt, d. h. den Unterdruck im Gelporensystem und die Radius-Gefrierpunkt-Beziehung. Der Gefrierpunkt der Flüssigkeit und der Dampfdruck über der tausalzhaltigen Flüssigkeit werden bei gleicher Porengröße erniedrigt. In den Gelporen liegt bei sonst gleichen Randbedingungen mehr ungefrorenes Wasser vor und der Unterdruck im Gelporensystem wird größer, sodass durch die Mikroislinsen- oder Frostpumpe der Sättigungsgrad des Gefüges zunimmt, wenn während des Auftauens weitere Flüssigkeit aufgenommen werden kann.

Auch Gesteinskörner mit offener Porosität können durch Frost- und Frost-Tausalzeinwirkung zerstört werden. Die Porosität von Gesteinskörnern ist jedoch nicht so fein und erstreckt sich nicht über mehrere Größenordnungen wie im Zementstein, sodass die Gefrierpunktniedrigung und die Mikroislinsenpumpe eigentlich nicht schadensursächlich sein können. In der Regel ist in Gesteinskörnung für Beton der Hydraulische Druck schadensursächlich.

2.3 Schädigung des Betons und Schadensentwicklung

Frostschäden können im Beton auftreten,

- wenn die Betonausgangsstoffe keinen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen oder nicht frostbeständige Stoffe wie z. B. Holzpartikel, lehmhaltige Bestandteile oder Humus in den Frischbeton gelangen,
- wenn nicht frost-tausalzbeständige Gesteinskörner im Beton enthalten sind,
- wenn das Luftporensystem im Beton nicht wirksam ist,
- wenn das Gelporenwasser der Betonmatrix gefriert oder

- wenn während des Frostereignisses der kritische Sättigungsgrad der Betonmatrix überschritten wird, d. h., wenn die Porosität des Betons zu hoch und die Festigkeit zu gering ist.

Die Verwendung nicht geeigneter Stoffe im Beton kann durch Beachtung der bekannten Regelwerke ausgeschlossen werden. Für die Entwicklung des neuen Prüfverfahrens XF2 und die Bewertung der Ergebnisse der Messungen im Bauwerksbeton ist die Schädigung der Betonmatrix entscheidend.

Das Gelporenwasser in der Betonmatrix kann erst unterhalb von -25 °C bis -30 °C Betontemperatur gefrieren. Dann ist der Hydraulische Druck als Folge der Eisbildung so groß, dass Betongefüge zerstört wird. Die niedrigste Temperatur, die nach neuen Forschungsergebnissen in Bauwerksbeton in Deutschland im Beobachtungszeitraum von rd. 4 Winterperioden gemessen wurde, betrug -21 °C an Eistagen. Die Temperaturen an schadensrelevanten Frosttagen mit Frost-Tau-Wechsel erreichten diese Minimaltemperatur nicht [5].

Im Temperaturbereich von 0 °C bis rd. -25 °C ist die Schädigung eine Folge der Wasserfüllung der Poren, der Wasseraufnahme durch Frostsaugen während der Frost-Tau-Wechsel, dem Sättigungsgrad und der Festigkeit.

Als Sättigungsgrad wird das Verhältnis von wassergefüllten Poren zu luftgefüllten Poren bezeichnet. Der kritische Sättigungsgrad steht für den Zustand, in dem die Höhe der frostinduzierten Zugspannungen im Betongefüge dessen Zugfestigkeit erreicht oder überschreitet. Überschreitet der aktuelle Sättigungsgrad beim Frostereignis den kritischen Sättigungsgrad, führt das Gefrieren der Porenflüssigkeit zu irreparabler Gefügezerstörung [9].

Im gefrorenen Beton können darüber hinaus zusätzliche Spannungen bei plötzlichen Temperaturveränderungen (s. Kapitel 2.2) von mehr als ca. 15 Kelvin durch die unterschiedlichen Temperaturendeckungskoeffizienten von Zementstein und Eis entstehen.

Die Schädigung des Betons von Bauwerken beginnt von der Oberfläche ausgehend in den Poren, die beim Frostereignis bis zur kritischen Sättigung mit Wasser gefüllt sind. Durch das Gefrieren wird das Gefüge irreparabel gestört, verliert seine Festigkeit und beim nächsten Angebot von Wasser an der Oberfläche wird die weitere Wasseraufnahme des Betons beschleunigt erfolgen.

Beim nächsten Frostereignis durchdringt das Wasser die vorher geschädigte Schicht schneller und dringt in die bis dahin ungeschädigte Betonzone ein. Wird hier der kritische Sättigungsgrad überschritten, wird beim Gefrieren das Gefüge irreparabel gestört, verliert seine Festigkeit und eine weitere Wasseraufnahme erfolgt beschleunigt.

Diese Prozesskette setzt sich mit weiteren Frost-Tau-Wechseln bei gleichzeitigem Angebot von Wasser von außen bis in den Betonkern fort. Je dicker die wassergesättigte Betonrandzone bei Frostbeanspruchung ist, desto tiefer schreitet die Schadensfront bei jedem Frost-Tau-Wechsel in den Querschnitt fort.

Dabei ist es, wie die neuen Forschungsergebnisse zeigen [7], unerheblich, ob die Frost-Tauwechsel in unmittelbarer Folge einwirken oder ob der Beton zwischenzeitlich austrocknen kann.

Die Gefügeschäden werden unter Mitwirkung von Tausalz verstärkt (s. Kapitel 2.2). Beim Eindringen von tausalzhaltigem Wasser in Beton dringt das Wasser schneller ein als das darin gelöste Salz. Ein deutliches Nachlaufen der Eindringfront des Salzes im Vergleich zum Wasser ist feststellbar [10]. Bei Mitwirkung von Tausalzen ist die Salzkonzentration an der Oberfläche hoch und schon mit Beginn der ersten Gefügeschädigung treten Abwitterungen an der Betonoberfläche auf.

Schädigende Treibreaktionen, die als Folge der Tausalzeinwirkung auf Zementphasen auftreten, laufen gegenüber der Flüssigkeitssättigung des Betons in einem Frost-Tau-Zyklus verlangsamt ab, können aber bei längerer Verweildauer der tausalzhaltigen Flüssigkeit und Temperaturen um rd. 10 °C erhebliche Gefügestörungen verursachen.

Der Schadensfortschritt des Betons im Bauwerk wird von der Menge an Wasser und der Geschwindigkeit, mit der das Wasser eindringt, geprägt. Die Geschwindigkeit wird maßgeblich durch die Größe, Menge und Vernetzung der Kapillarporen in der Betonmatrix beeinflusst. So nimmt ein Beton mit stark vernetzten relativ großen Poren (z. B. Beton mit $w/z \geq 0,70$ oder Beton mit kleinerem w/z -Wert und geringem Hydratationsgrad) sehr schnell viel Wasser auf. Das Kapillarporensystem eines solchen Betons ist kontinuierlich ausgebildet. Der für eine Frostschädigung kritische Sättigungsgrad wird nach kurzer Zeit der Wassereexposition überschritten, das Gefüge bei Frost-Tauwechsel-Beanspruchung zerstört. Im Gegensatz dazu nimmt ein Beton mit stark

vernetzten relativ kleinen Poren (z. B. Beton mit $w/z < 0,40$ und hohem Hydratationsgrad) nahezu kein Wasser auf. Das Kapillarporensystem ist diskontinuierlich. Der kritische Sättigungsgrad kann bei einem so dichten Beton nur dann überschritten werden, wenn bei sehr häufigen Frost-Tau-Wechseln und gleichzeitigem Angebot von Wasser von außen mit der Mikroislinsenpumpe ausreichende Mengen an Wasser in Gefüge transportiert werden können.

Je größer die Kapillaraktivität der Betonmatrix ist, desto tiefer reicht die wassergefüllte Zone in das Bauwerk hinein, desto schneller erfolgt die Wasseraufnahme und desto tiefer reichen die Gefügestörungen infolge der Frost-Tau-Wechsel in das Bauwerk hinein.

Die Schadensintensität einer Frost-Tausalz-Beanspruchung von Beton wird vor allem vom Sättigungsgrad des Porensystems, dem Temperaturminimum bei Frost, dem Temperaturhub beim Abkühlen und Erwärmen, der Anzahl der Frost-Tauwechsel und von der Tausalzbelastung bestimmt.

Wirksame Maßnahmen zur Reduzierung der Schädigung und Schädigungsgeschwindigkeit sind Maßnahmen zur Reduzierung der Kapillaraktivität, Maßnahmen zur Reduzierung der Kapillarporosität und Maßnahmen zur Erhöhung der Betonzugfestigkeit.

Luftporen im Beton reduzieren die Kapillaraktivität. Sie unterbrechen die Kapillarporen und vergrößern den Ausweichraum für gefrierendes Wasser. Ein Schaden entsteht im Luftporenbeton nicht, weil der Sättigungsgrad von Luftporenbeton bei gleichem Wassergehalt geringer ist als der des Betons ohne Luftporen. Auch wird durch Verkürzung der Strecke zwischen dem Ort der Entstehung des Eises und dem Ausweichraum der Hydraulische Druck im Porensystem reduziert. Dafür müssen allerdings bestimmte Anforderungen an den Luftporengehalt, den Gehalt an Mikroluftporen und den Abstand dieser Mikroluftporen untereinander erfüllt werden [12]. Der Luftporenbeton wird in der Regel mit speziellen Betonzusatzmitteln, den Luftporenbildern, hergestellt.

Wirksame Maßnahmen zur Reduzierung der Kapillarporosität sind z. B.:

- Reduzierung des w/z -Wertes und damit Reduzierung der Porengrößen und Erhöhung der Vernetzung der Poren,

- Erhöhung des Hydratationsgrades, z. B. durch verlängerte Nachbehandlung oder höheres Betonalter,
- Reduzierung des Blutens von Beton.

Wirksame Maßnahmen zur Erhöhung der Festigkeit des Betons sind z. B.:

- Reduzierung des w/z-Wertes,
- Erhöhung des Hydratationsgrades, z. B. durch verlängerte Nachbehandlung oder höheres Betonalter.

Keine Schäden entstehen, wenn das Porensystem der Betonoberfläche ausreichend dicht und fest ist und dadurch kein oder nur so wenig Wasser eindringen kann, dass eine kritische Sättigung nicht erreicht wird. Eine Erhöhung des kritischen Sättigungsgrades mit der Frostpumpe gemäß dem Mikroislinsenmodell von SETZER während der Frost-Tau-Wechsel muss hierbei berücksichtigt werden.

Der Konstruktionsbeton für Bauteile an Bundesfernstraßen liegt mit $w/z \leq 0,50$ bei ausreichender Nachbehandlung und mit den zulässigen Betonausgangstoffen auch ohne künstliche Luftporen zwischen den genannten Extremen der Schadensentwicklung. Der Beton nimmt relativ langsam durch Kapillaraktivität anstehendes Wasser in sein Gefüge auf. Das Kapillarporengefüge ist nicht kontinuierlich ausgebildet. Allein durch die Kapillaraktivität wird in einem solchen Beton der für eine Frostschädigung kritische Sättigungsgrad nicht erreicht. Durch die Wirkung der Mikroislinsenpumpe während der Frost-Tau-Wechsel kann jedoch der kritische Sättigungsgrad im Bauwerksbeton erreicht werden. Der Konstruktionsbeton für Bauteile in XF4 wird immer mit Luftporen hergestellt, sodass der Sättigungsgrad geringer ist als in einem vergleichbaren Beton ohne Luftporen in XF2.

2.4 Abgrenzung mäßiger Wassersättigung des Betons von hoher Wassersättigung

Durchfeuchteter Beton kann, so die Normen [3], bei erheblichem Angriff durch Frost-Tau-Wechsel geschädigt werden. Zur Beschreibung der Intensität oder Stärke des Frostangriffs werden in den Normen die Expositionsklassen XF für mäßige Wassersättigung und für hohe Wassersättigung unterschieden. Mit zunehmender Wassersättigung

nimmt die Intensität des Frostangriffs zu. Die Intensität bzw. Schärfe des Frostangriffs auf das Betongefüge wird in XF2 und XF4 durch Tausalzeiwirkung noch verstärkt.

In den Expositionsklassen der hohen Wassersättigung, XF3 und XF4, zeigen die Beispiele für die Zuordnung der Expositionsklassen (Tabelle 2.1), dass dem Beton während der Frost-Tau-Wechsel ausreichend Wasser von außen zur Verfügung steht, um durch Kapillarwirkung einen hohen Sättigungsgrad im Gefüge bis in tiefere Zonen des Bauteils aufrecht erhalten zu können. Falls die Anforderungen der Regelwerke nicht eingehalten würden, wären Gefügestörungen über weite Teile des Betonquerschnitts möglich. Die Tragfähigkeit des Bauteils könnte in Frage gestellt werden.

In den Expositionsklassen der mäßigen Wassersättigung, XF1 und XF2, zeigen die Beispiele (Tabelle 2.1), dass der Beton während der Frost-Tau-Wechsel entweder nur kurzzeitig mit Spritzwasser oder nur mit dem vergleichsweise geringen Wasserangebot des Sprühnebels beaufschlagt wird. Es steht nicht fortwährend Wasser außen am Beton an. Ein hoher Sättigungsgrad wird sich nur in einer oberflächennahen Zone des Betonbauteils einstellen können. Falls die Anforderungen der Regelwerke nicht eingehalten würden, wären Gefügestörungen in der oberflächennahen Zone zu erwarten. Dann wittert die Betonoberfläche ab, ohne dass die Tragfähigkeit des Bauteils unmittelbar betroffen wäre. Allerdings erhöhen solche Gefügestörungen die Porosität, sodass neben Wasser auch Chloride oder Kohlendioxid schneller eindringen können und so die wirksame Betondeckung der Bewehrung reduziert werden kann. Beides würde zu einer Verkürzung der Nutzungsdauer des Bauteils führen.

Welcher Grad der Wassersättigung mäßige von hoher Wassersättigung unterscheidet, wird in den Normen nicht mitgeteilt.

Ohne Tausalzeiwirkung kennt die Norm die Expositionsklassen XF1 für mäßige und XF3 für hohe Wassersättigung, mit Taumittleinwirkung die Expositionsklassen XF2 und XF4. Durch die Tausalzeiwirkung werden der Hydraulische Druck und der Kapillareffekt verstärkt und unter Umständen wirken die chemischen Treib- bzw. Auslaugreaktionen zerstörend (s. Kapitel 2.2).

Der Sättigungsgrad, den die Betonmatrix des Bauteils bei Wasserangebot von außen und durch die Mikroislinsenpumpe während der Frost-Tau-

Wechsel erreichen kann, wird von der Porenstruktur des jeweiligen Betons (Zement, Zusatzstoffe, Zusatzmittel, w/z-Wert, Zementleimgehalt, Nachbehandlung, Betonalter) bestimmt. Damit ist der Sättigungsgrad keine Größe, die ausschließlich von den Einwirkungen der Umgebung auf den Beton bestimmt wird, wie die Expositionsklassen XF1, XF2 bzw. XF3 und XF4 suggerieren. Der Sättigungsgrad, bei dem jeder weitere Frostangriff Gefügeschädigungen zur Folge hat, wird nicht nur von den Umgebungsbedingungen, sondern ganz wesentlich auch von der Zusammensetzung und der Nachbehandlung des Betons bestimmt.

Auch chemische Reaktionen können die mit Flüssigkeit füllbare Porosität vergrößern. So werden z. B. durch die Karbonatisierung Hydratationsprodukte im hüttensandreichen Zementstein poröser. Bei gleichem Wassergehalt kann der Sättigungsgrad der karbonatisierten Betonrandzone von Beton mit hohem Hüttensandgehalt deshalb größer sein als im nicht-karbonatisierten Betoninneren und, bei Überschreiten des kritischen Sättigungsgrads, abwittern.

Die Anforderungen der Norm an die Betonzusammensetzung unter Frost-Tausalz-Einwirkung stellen somit eine Beispiel- oder Grenzporosität für einen Beton dar, dessen Frost-Tausalz-Widerstand bei ordnungsgemäßem Einbringen, Verdichten und Nachbehandeln über die beabsichtigte Nutzungsdauer gegeben ist. Anforderungen stellt die Norm an die Grenzwerte der Betonzusammensetzung, die Zementart und den Mehlkorngelalt. Tabelle F2.2. aus dem DIN-Fachbericht 100 (Tabelle 2.2) zeigt, dass unter Tausalzeinwirkung Luftporen erforderlich sind, damit Beton mit $w/z \leq 0,50$ einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand bei hoher Wassersättigung XF4 hat. Der gleiche Beton, jedoch ohne Luftporen, weist einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand bei mäßiger Wassersättigung auf. Bei höherer Kapillarporosität ($w/z \leq 0,55$) sind auch in XF2 Luftporen erforderlich.

Weicht die Porosität eines Betons von der „Grenzporosität“ des Betons nach Norm zur negativen Seite hin ab, können Gefügeschäden bei sonst gleichen Umgebungsbedingungen nicht ausgeschlossen werden. Dies gilt sowohl für die Betonrandzone wie auch für den Kernbeton.

Nr.	Expositionsklassen	Betonkorrosion												
		Frostangriff				Aggressive chemische Umgebung			Verschleißbeanspruchungh					
		XF1	XF2		XF3		XF4	XA1	XA2	XA3	XM1	XM2		XM3
1	Höchstzulässiger w/z	0,60	0,55 ^g	0,50 ^g	0,55	0,50	0,50 ^g	0,60	0,50	0,45	0,55	0,55	0,45	0,45
2	Mindestdruckfestigkeitsklasse ^b	C25/30	C25/30	C35/45 ^e	C25/30	C35/45 ^e	C30/37	C25/30	C35/45 ^{d,e}	C35/45 ^d	C30/37 ^d	C30/37 ^d	C35/45 ^d	C35/45 ^d
3	Mindestzementgehalt ^c in kg/m ³	280	300	320	300	320	320	280	320	320	300 ⁱ	300 ⁱ	320 ⁱ	320 ⁱ
4	Mindestzementgehalt ^c bei Anrechnung von Zusatzstoffen in kg/m ³	270	g	g	270	270	g	270	270	270	270	270	270	270
5	Mindest-Luftgehalt in %	—	f	—	f	—	f, j	—	—	—	—	—	—	—
6	Andere Anforderungen	Gesteinskörnungen für die Expositionsklassen XF1 bis XF4 (siehe DIN V 20000-103 und DIN V 20000-1104)						—	—	l	—	Oberflächenbehandlung des Betons ^k	Hartstoffe nach DIN 1100	
		F ₄	MS ₂₅		F ₂		MS ₁₈							

b, c, d und e siehe Fußnoten in Tabelle F.2.1.
 f Der mittlere Luftgehalt im Frischbeton unmittelbar vor dem Einbau muss bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 8 mm $\geq 5,5\%$ (Volumenanteil), 16 mm $\geq 4,5\%$ (Volumenanteil), 32 mm $\geq 4,0\%$ (Volumenanteil) und 63 mm $\geq 3,5\%$ (Volumenanteil) betragen. Einzelwerte dürfen diese Anforderungen um höchstens 0,5 % (Volumenanteil) unterschreiten
 g Zusatzstoffe des Typs II dürfen zugesetzt, aber nicht auf den Zementgehalt oder den w/z angerechnet werden
 h Es dürfen nur Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620 unter Beachtung der Festlegungen von DIN 20000-103 verwendet werden
 i Höchstzementgehalt 360 kg/m³, jedoch nicht bei hochfesten Betonen
 j Erdfeuchter Beton mit $w/z \leq 0,40$ darf ohne Luftporen hergestellt werden
 k Z. B. Vakuumieren und Flügelglätten des Betons
 l Schutzmaßnahmen siehe Kapitel 5.3.2

Tab. 2.2: Grenzwerte der Betonzusammensetzung für Frost XF1, XF2, XF3 und XF4 nach Tabelle F.2.2 DIN-Fachbericht 100 [3]

3 Sachstand zur Beanspruchung von Beton im Bauwerk vor Projektbeginn

3.1 Einwirkungen auf Betonbauwerke an Bundesfernstraßen

Alle Bauwerke an Bundesfernstraßen sind als Außenbauteile der Witterung und als Bauteile am Rande stark befahrener Straßen zusätzlich Spritzwasser, Sprühnebel und saisonal auch Tausalzen ausgesetzt. Die Frost-Tausalz-Beanspruchung des Betons resultiert aus Niederschlag, aus der jahreszeitlich bedingten Tausalzbeanspruchung und aus der Temperaturwechselbeanspruchung mit Temperaturen oberhalb und unterhalb des Gefrierpunktes. Gegenüber anderen Außenbauteilen folgt die Wassersättigung des Betons im Bauwerk nicht nur aus Luftfeuchte und Niederschlag, sondern zusätzlich aus Spritzwasser und Sprühnebel, die durch den Straßenverkehr aufgewirbelt werden und die saisonal auch tausalzhaltig sind, siehe Bilder 3.1 und 3.2. Schmelzwasser aus tausalzhaltigem Schnee und Eis am Fahrbahnrand oder auf Brückenkappen wirkt ebenfalls auf den Bauwerksbeton ein.

Die Schadensintensität einer Frost-Tausalz-Beanspruchung von Beton in Bauwerken an Bundesfernstraßen wird vor allem vom Sättigungsgrad des Porensystems, dem Temperaturminimum bei Frost, dem Temperaturhub beim Abkühlen und Erwärmen, der Anzahl der Frost-Tauwechsel und von der Tausalzmenge bestimmt.

Messungen, mit denen diese Auswirkungen von Frostereignissen im Bauwerksbeton erfasst werden

können, sind zu Beginn des Projektes nur wenige bekannt. Temperatur und Feuchtegehalt wurden im Beton von 2 Brücken in Süddeutschland über 4 Jahre hinweg gemessen [13]. Die Temperaturmessung im Beton erfolgte kontinuierlich. Hinsichtlich der frostrelevanten Temperaturbeanspruchung wurde Folgendes festgestellt [14]:

- Die Temperaturbeanspruchung des Betons im Brückenbauwerk hängt in hohem Maß von der geographischen Lage ab, obwohl die Brücken nur rd. 150 km voneinander entfernt lagen.
- Die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (FTW), d. h. die Anzahl der Nulldurchgänge der Temperatur, hängt erheblich von der Lage im Bauwerk ab. An der Brückenoberseite wurden i. M. 25 bzw. 50 FTW je Jahr gemessen, an der Brückenunterseite aufgrund der geschützten Lage und der Wärmekapazität des Betonüberbaus nur jeweils 5 FTW.
- Die Anzahl der FTW im Beton (Kappenersatz) nimmt mit der Tiefe im Bauteil erheblich ab. 50 mm unterhalb der Oberfläche wurden nur noch 60 bis 70 % der Werte an der Oberfläche erreicht.
- Die häufigste Amplitude der Frost-Tau-Zyklen beträgt rd. 10 Kelvin. In dieser Größe tritt sie auch nur im oberflächennahen Bereich auf. Die häufigsten Tauzyklen begannen bei -2 °C.
- Die Höchsttemperaturen an der Bauteiloberfläche liegen bei rd. 47 bzw. 41 °C und die Tiefsttemperaturen bei rd. -12 bzw. -15 °C.
- Bei Tausalz-Streuung ist keine schockartige Abkühlung der Betonoberfläche festzustellen.



Bild 3.1: Verkehr auf einer Brücke: Spritzwasser trifft Brückenkappen und Sprühnebel trifft Überbau, Pfeiler und Bogen



Bild 3.2: Verkehr auf der Straße: Spritzwasser trifft Schutzplanke und Pfeiler der Überführung und Sprühnebel trifft Pfeiler und Widerlager und ggf. den Überbau

Feuchtemessungen wurden an Ersatzbrückenkappen durchgeführt, die einen Teil der Mittelkappe ersetzen. Durch Abspalten von einzelnen Scheiben von der Ersatzbrückenkappe vor Ort zum jeweiligen Messzeitpunkt wurde die gravimetrische Bestimmung des Feuchteprofils bis in 50 mm Betontiefe im Labor möglich. Es zeigte sich eine zeitliche Veränderung der Betonfeuchte über das Jahr hinweg, die mit der Witterung in Zusammenhang stand. Diese zeitliche Veränderung trat nicht nur an der Oberfläche, sondern auch tiefer im Beton auf. An einer der beiden Brücken wurden oberflächennah in rd. 5 mm Tiefe Wassergehalte von 2,7 bis 7,7 Masse-% und in 45 bis 50 mm Tiefe zwischen 3,2 und 5,2 Masse-% ermittelt [14].

Kontinuierliche Feuchtemessungen wurden durch Messverfahren, die auf dem Verfahren der elektrischen Widerstandsmessung beruhen, möglich. Durch Messungen mit der BOX-Methode wurden in einem Brückenmittelpfeiler in Schweden folgende Ergebnisse abgeleitet [15]:

- Der Temperatureinfluss auf den gemessenen Widerstand ist sehr hoch und muss bei der Ableitung des Feuchtegehalts aus den Messwerten berücksichtigt werden.
- Die Schwankungen im gemessenen Wassergehalt sind gering.
- Der in Bodennähe gemessene Wassergehalt ist höher als der in einer Höhe von ca. 1 m gemessene Wassergehalt. Die Messstelle in Bodennähe wurde dabei sowohl durch Spritzwasser als auch durch Wasser, das von der Straße abfließt, beeinflusst.

Mit den zu Projektbeginn vorliegenden Ergebnissen aus Bauwerksmessungen konnten zwar die Temperaturverläufe in den obersten 50 mm des Bauwerksbetons, die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel und singuläre Werte zum Wassergehalt des Betons ermittelt werden. Es war jedoch nicht möglich, gleichzeitig Temperatur und Wassergehalt im Beton auch während eines Frostereignisses zu bestimmen. Denn nur aus diesen Werten lässt sich die Intensität des Frostereignisses ableiten. Auch wurde der Sättigungsgrad des Bauwerksbetons nicht ermittelt.

Der Chloridgehalt wie auch das Chlorideindringverhalten in Bauwerksbeton wurde vielfach bestimmt. Der gemessene Chloridgehalt wird jedoch deutlich von der Art der Probenentnahme aus dem Bauteil und vom Verfahren, mit dem der Chloridgehalt be-

stimmt wird, beeinflusst. So ist z. B. die durch Bohrmehlentnahme gewonnene Probenmenge gering, wenn ein Chloridtiefenprofil ermittelt werden soll. Größere Probemengen und damit höhere Genauigkeiten werden durch Bohrkernentnahme möglich, insbesondere bei vorwiegend horizontalen Flächen, wie z. B. Betonstraßen oder Brückenkappen. Auch werden unterschiedliche Verfahren zur Bestimmung des Chloridgehalts angewandt [8]. Deswegen sind veröffentlichte Ergebnisse von Chloridtiefenprofilen nicht immer vergleichbar und nicht immer wird die angewandte Methode zur Bestimmung des Chloridgehalts angegeben.

Aus diesen Gründen werden in [8] am Beispiel eines Brückenpfeilers die für die Frost-Tausalz-Belastung wichtigen Informationen zu Chloridgehalt und Chloridprofil am Pfeilerfuß und in 1,5 m Höhe angegeben.

Die Chloridprofile zeigen, dass im Bereich des Pfeilerfußes ($h = 0$) ein Auswaschen der Chloride aus der Betonoberfläche außerhalb des Winterdienstes durch nicht-tausalzhaltiges Spritzwasser erfolgt. In 1,5 m Höhe des Pfeilers wird dieser Effekt nicht festgestellt, sodass die Vermutung nahe liegt, dass der Beton in dieser Höhe nur noch durch Sprühnebel und nicht mehr durch Spritzwasser beaufschlagt wird. Der Chloridgehalt wird für den 40 Jahre alten Betonpfeiler mit rd. 0,30 Masse-% vom Beton an der Oberfläche und rd. 0,04 Masse-% bzw. 0,05 Masse-% in Höhe der Bewehrung im Sprühnebel bzw. im Spitzwasserbereich angegeben.

3.2 Zuordnung der Bauteile zu den Expositionsklassen XF2 und XF4

Die Zuordnung von Bauteilen an Bundesfernstraßen zu den Expositionsklassen erfolgte im Jahr 2000/2001. Welche Bauteile während eines Frostereignisses von mäßiger und von hoher Wassersättigung betroffen sind, konnte infolge fehlender Bauwerksmessungen nicht sicher beantwortet werden. Erfahrungen mit den neuen Normen lagen zu der Zeit auch nicht vor. So wurde die Zuordnung typischer Bauteile von Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen zu den Expositionsklassen XF2 und XF4 über den Vergleich der bewährten Betonzusammensetzungen nach DIN 1045:88-07 und ZTV-K 96 mit den Betonzusammensetzungen nach DIN-Fachbericht 100 getroffen.

Aus den Erfahrungen mit dem Frost-Tausalz-Widerstand von Bauwerken an Bundesfernstraßen, die durch Tausalzverwendung, hohe Fahrgeschwindigkeit und vergleichsweise hohe Verkehrsdichte besonders intensiv mit tausalzhaltigem Spritzwasser und Sprühnebel beansprucht werden, war bekannt, dass Kappenbeton mit Luftporen hergestellt werden muss, wenn der höchstzulässige w/z-Wert 0,50 beträgt. Widerlagerwände, Pfeilerscheiben und Tunnelwände, an deren Fuß das tausalzhaltige Wasser abgeleitet wird, weisen einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand auch ohne Luftporen auf. Damit ist die Verwendung von Beton ohne Luftporen in diesen Bauteilen mit vorwiegend vertikal orientierten Flächen ohne Einbußen bei der Dauerhaftigkeit die wirtschaftlichere Lösung.

Zur wissenschaftlichen Absicherung der so getroffenen Zuordnung von Bauteilen des Brücken- und konstruktiven Ingenieurbaus an Bundesfernstraßen sind jedoch Untersuchungen am Bauwerksbeton erforderlich.

4 Untersuchungen im Rahmen des Projekts

Die Frost-Tauwechsel-Beanspruchung im Beton von Verkehrsbauwerken in der Expositionsklasse XF2 wurde im Rahmen des externen Forschungsprojekts FE 15.324/2000/FR „Europäische Bemessungsvorschriften für den Brückenbau – Beanspruchung von Betonbauwerken“ [5] ermittelt. Als Beispiele für Bauteile in der Expositionsklasse XF2 wurden Mittelpfeiler und Überbau von Brücken sowie Tunnelwände ausgewählt. Mit diesen ausgewählten Bauteilen wird die unterschiedliche Intensität der Frost-Tausalz-Beanspruchung in Hinblick auf Wassersättigung und Chloridbeaufschlagung durch Straßenverkehr abgebildet. Mittelpfeiler und Tunnelwand werden sowohl durch Spritzwasser als auch durch Sprühnebel und der Brückenüberbau wird ausschließlich mit Sprühnebel beaufschlagt.

In den Wänden wurden die Messstellen oberhalb von rd. 1 m Höhe angeordnet. Dies hatte den Vorteil, dass mit Fremdeinwirkung infolge Straßenbetriebs auf die Messstellen nicht zu rechnen war und dass in dieser Höhe die Frostbeanspruchung als maximal angenommen wurde. Näher zum Bauteilfuß war nach den Ergebnissen von [14] die Beeinflussung der Oberflächentemperatur der Wand durch die Wärmekapazität des Bodens bzw. der

Betonfahrbahn anzunehmen. An diesen Messstellen wurden Feuchtegehalt und Temperatur des Bauwerksbetons kontinuierlich über 5 Jahre hinweg in 7 mm bis 87 mm Tiefe gemessen. Die Messung von Temperatur und Feuchte in gleicher Tiefenlage ermöglichte die Berücksichtigung des Temperatureinflusses auf die Messwerte der Feuchte, was nach [15] erforderlich war. Die Feuchtemessung erfolgte über die Messung des Elektrolytwiderstands.

In den Tunnelbauwerken interessierten zusätzlich dazu die Änderung der Feuchte- und Temperaturbedingungen im Bauwerksbeton des Portalbereichs und des Bereiches zwischen den Portalen. Der Übergang zwischen Portal- und Innenbereich wurde bis ca. 300 m in den Tunnel hinein untersucht.

Bei der Frost-Tausalzbeanspruchung von Beton in Verkehrsbauwerken in der Expositionsklasse XF4, das sind z. B. Kappen und Betonschutzwände, ging man zu Beginn des Projektes davon aus, dass die Wassersättigung hoch sei und nicht näher beschrieben werden müsse. Im Verlauf des Projekts stellte sich jedoch heraus, dass zusätzlich zu den Messungen in XF2-Bauteilen Messungen in XF4-Bauteilen erforderlich wurden. Ein direkter Vergleich der Beanspruchung des Bauwerksbetons in den beiden Expositionsklassen ist nur möglich, wenn Wassergehalt und Sättigungsgrad mit demselben Mess- und Auswerteverfahren ermittelt werden. Dazu wurde das externe Forschungsprojekt FE 89.0169/2005/AP „Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4“ [6] vergeben. Mit diesem externen Projekt wurden Messungen in der Brückenkappe einer der Brücken vorgenommen, die auch im Rahmen des Forschungsprojekts FE 15.324/2000/FR [5] untersucht wurden. Die Messungen erfolgten mit demselben Verfahren und in den gleichen Tiefenlagen im Bauteilbeton.

Die Entwicklung eines Prüfverfahrens zur Überprüfung des Frost-Tausalz-Widerstands von Beton für die Expositionsklasse XF2 erfolgte im externen Forschungsprojekt FE 15.367/2002/DRB „Prüfverfahren nach dem Performance Concept – Beton in der Expositionsklasse XF2“ [7]. Im Rahmen dieses Projekts wurden Untersuchungen durchgeführt, mit denen das anerkannte CDF-Verfahren (XF4) so modifiziert wird, dass die Schadensintensität einer Frost-Tausalz-Beanspruchung in XF2 angemessen abgebildet wird.

Parallel zur den Laborversuchen wurden mit den gleichen Ausgangsstoffen und Rezepturen Beton-

prüfkörper hergestellt. Diese wurden im Mittelstreifen einer Autobahn und einer 4-spurigen Bundesstraße der Witterung so ausgesetzt, dass entweder die horizontalen Flächen (XF4-Bedingungen) oder die vertikalen Flächen (XF2-Bedingungen) mit tau-salzhaltigem Sprühnebel und Spritzwasser aus dem Straßenverkehr beaufschlagt waren. Mit diesen Auslagerungsversuchen soll ein Zusammenhang zwischen den Ergebnissen der Prüfung mit dem neu entwickelten Prüfverfahren XF2 an separaten Prüfkörpern und dem Verhalten von Beton im Bauteil hergestellt werden.

In Betonbauteile von Verkehrsbauwerken dringen Wärme bzw. Kälte und Wasser von der Oberfläche her eindimensional ein. Diese Bedingungen wurden in den Auslagerungsversuchen nachgestellt, indem die nicht der Witterung ausgesetzten Flächen so gedämmt waren, dass der Wärmetransport in den Prüfkörpern nur eindimensional erfolgte. Die Abdichtung der nicht-exponierten Flächen war so dicht, dass auch bei horizontal exponierter Oberfläche kein Wasser seitlich in die Prüfkörper eindringen konnte.

Die so ausgelagerten Betonprüfkörper wurden vor der Auslagerung mit dem CDF-Verfahren (XF4) und dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) im Labor geprüft. Während der Auslagerung im Mittelstreifen wurden die Betonprüfkörper in regelmäßigen Intervallen vor Ort hinsichtlich Wassergehalt und Frostschäden (Gefügeschädigung und Abwitterung) untersucht. Damit wurde es möglich, die Schadensentwicklung über die Auslagerungsdauer von rd. 4 Winterperioden zu erfassen.

Um zu überprüfen, ob die tatsächliche Beanspruchung des Bauwerksbetons (vertreten durch die unter definierten Bedingungen hergestellten ausgelagerten Prüfkörper) mit der Beanspruchung in der Frostprüfung im Labor in geeigneter Weise wiedergegeben wird, werden in jeweils einem der ausgelagerten Betonprüfkörper (XF2 bzw. XF4) der elektrolytischer Widerstand und die Temperatur mit demselben Verfahren gemessen [7] wie in den Bauwerken der Projekte FE 15.324/2000/FR (XF2) [5] und FE 89.0169/2005/AP (XF4) [6].

Die Ergebnisse der Feuchte- und Temperaturmessungen am Bauwerksbeton der Brücken und Tunnel aus dem externen Projekt FE 15.324/2000/FR (XF2) [5] wurden im Projekt FE 15.367/2002/ DRB [7] berücksichtigt. Sie dienen der Festlegung einer geeigneten Bewertung von Betonen für Verkehrsbauwerke in der neuen Prüfung XF2.

Die mit den externen Projekten untersuchten Bauwerke wurden so ausgewählt, dass der Beton eine möglichst intensive Frost-Tausalz-Beanspruchung erfährt. In Anlehnung an die Frostzonenkarte aus dem Straßenbau [16] wurden entsprechende Regionen ausgewählt. Mit Unterstützungen des Referats S 18 im BMVBS und der zuständigen Straßenbauverwaltung der Bundesländer wurden Bauwerke identifiziert, die für die Messungen geeignet waren. Nur mit der aktiven Unterstützung der Forschungsnehmer durch Mitarbeiter der Straßenbauverwaltung waren die Bauwerksmessungen und Auslagerungen möglich.

Bauwerksmessungen wurden durchgeführt

- an einer Überführung der BAB A 46 Arnberg – Bestwig, Brücke Riedbüsche bei Meschede (Baujahr 1998), Frostzone III,
- an einer Überführung der BAB A 10 Berliner Ring im Bereich Neuenhagen, Fredersdorfer Straße (Neubau, Baujahr 2002), Frostzone II,
- an einem kurzen Tunnel (450 m) in geschlossener Bauweise im Zuge der 4-spurig ausgebauten



Bild 4.1: Übersicht der Orte mit Bauwerksmessungen, der Auslagerungsorte und der Wetterstationen (nach [7])

ten B 14 Stuttgart-Heslach – Stadtmitte, Gäubahntunnel (Neubau, Verkehrsfreigabe April 2002), Frostzone I und

- an einem langen Tunnel (2.380 m) im Zuge der vierspurig autobahnähnlich ausgebauten B 2/ B 23 in Höhe Farchant bei Garmisch-Partenkirchen, Nordportal in offener Bauweise (Verkehrsfreigabe Mai 2000), Frostzone III.

Prüfkörper zur Verifikation des neu zu entwickelnden Prüfverfahrens XF2 wurden im Mittelstreifen der BAB A 46 in Höhe der Brücke Riedbüsche und im Mittelstreifen der B 2/B 23 vor dem Nordportal des Tunnels Farchant ausgelagert.

Die geographische Lage der Bauwerke und Auslagerungsorte ist Bild 4.1 dargestellt.

5 Ergebnisse zur Frost-Tausalz-Beanspruchung von Beton in Verkehrsbauwerken

5.1 Witterung und Verkehr

Nach heutigem Kenntnisstand zeichnen folgende Kenngrößen die Schärfe eines Frost-Tausalz-Angriffs aus:

- Minimaltemperatur,
- Anzahl der Frost-Tau-Wechsel,
- Feuchtebelastung,
- Tausalzbelastung.

Erkenntnisse zu Minimaltemperatur und Anzahl der Frost-Tau-Wechsel in der Luft sowie Niederschlag werden den Wetterdaten des Deutschen Wetterdienstes entnommen. Die Feuchtebelastung des Bauwerkbetons resultiert aus dem Niederschlag, aber insbesondere aus dem Spritzwasser und Sprühnebel, der durch die fahrenden Autos von der Fahrbahn aufgewirbelt wird. Wird in der Winterperiode (d. h. im Winterdienst) Tausalz gestreut, sind Spritzwasser und Sprühnebel tausalzhaltig. Der Bauwerksbeton wird dann neben der Feuchte mit Tausalz beaufschlagt. Tausalzhaltiges Wasser gefriert erst bei Temperaturen unterhalb von 0 °C, so dass der Bauwerksbeton auch bei Temperaturen unterhalb des Gefrierpunkts mit Flüssigkeit beaufschlagt wird.

5.1.1 Witterung

Minimaltemperatur, Anzahl der Frost-Tau-Wechsel der Luft und Feuchtebelastung, hier hilfswise aus Niederschlagsereignissen abgeleitet, werden aus Messungen des Deutschen Wetterdienstes abgeleitet und mit Aufzeichnungen an den Auslagerungsorten ergänzt [5, 6, 7].

Die Auswertung der Aufzeichnungen der Wetterstationen zeigt, dass die gewählten Orte als repräsentativ für Frostereignisse in Deutschland angesehen werden können [7] (siehe Bilder 5.1, 5.2 und 5.3). Differenziert werden Eistage, Frosttage und Frosttage mit Niederschlag. Eistage sind die Tage, an denen das Wasser durchgehend gefroren vorliegt. Die Temperatur liegt unterhalb des Gefrierpunktes von Wasser (0 °C). Frosttage sind die Tage, an denen das Wasser auftauen und/oder einfrieren kann. Die Maximaltemperatur liegt an Frosttagen über dem Gefrierpunkt und die Minimaltemperatur unterhalb des Gefrierpunkts. Frosttage sind Tage mit Frost-Tau-Wechseln. Entscheidend für die Schärfe der Betonbeanspruchung sind die Frosttage, an denen zusätzlich Niederschlag auftritt. Dann kann der Beton in XF2 Wasser aufnehmen, das durch den Straßenverkehr als Spritzwasser und Sprühnebel und durch Niederschlag auf die Betonoberfläche trifft. Der Beton in XF4 kann Spritzwasser aus Verkehr und größere Mengen Wasser aus Niederschlag aufnehmen. Dieses Wasserangebot an der Betonoberfläche kann möglicherweise die Mikroislinsepumpe aktivieren, sodass das Porengefüge durch Frost-Tau-Wechsel über den kritischen Sättigungsgrad hinaus Wasser aufnehmen kann.

Die Lufttemperatur an den untersuchten Bauwerken betrug im Messezeitraum minimal -21 °C und

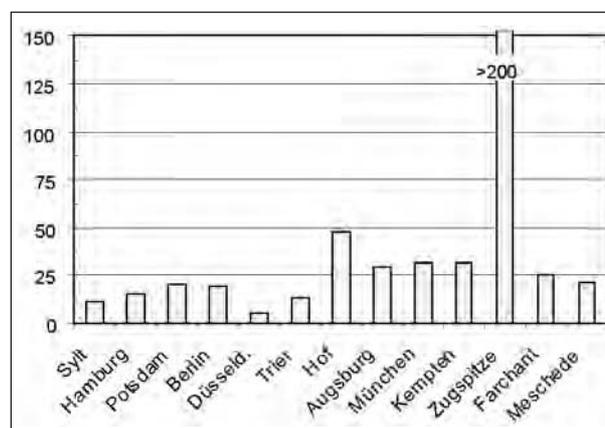


Bild 5.1: Durchschnittliche Anzahl an Eistagen [7]

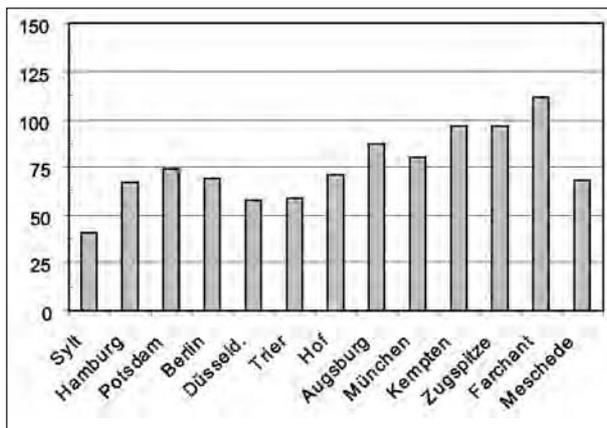


Bild 5.2: Durchschnittliche Anzahl an Frosttagen [7]

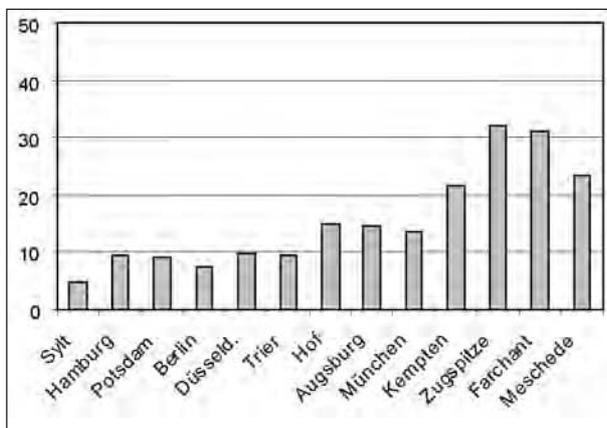


Bild 5.3: Durchschnittliche Anzahl an Frosttagen mit Niederschlag [7]

maximal 38 °C, bestimmt an den nächstgelegenen Wetterstationen [5, 7]. Die Betontemperatur kann, wie in den Kapiteln 5.2 und 5.3 gezeigt wird, von der Lufttemperatur abweichen.

5.1.2 Tausalz aus Verkehr

Die Tausalzbeanspruchung wird von den örtlichen Witterungsverhältnissen, der Bedeutung der Straße im Verkehrsverbund und den regionalen Streueigenschaften (ggf. präventive Streumaßnahmen), der Verkehrsdichte und dem Abstand der Betonfläche von der Fahrbahn (d. h. Spritzwasser- und Sprühnebelmenge, die die Betonoberfläche erreicht) geprägt. Damit ist die direkte Erfassung der Tausalzbeanspruchung des Betons erschwert, zumal in der tausalzfreien Saison durch Spritzwasser Salz aus dem Bauwerksbeton ausgewaschen wird [14].

Eine gute Orientierung für die Tausalzbeanspruchung des Bauwerksbetons gibt die Tausalzbeanspruchung der Betonprüfkörper, die im Mittelstreifen

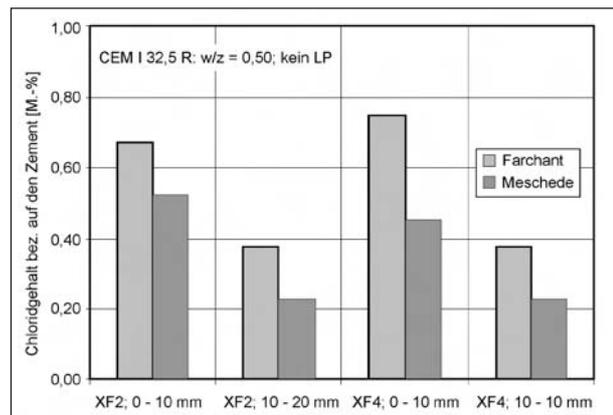


Bild 5.4: Chloridgehalt der Betonprüfkörper in 0 bis 10 mm und 10 bis 20 mm Tiefe nach der Auslagerung [7]. XF2 kennzeichnet die lotrecht orientierten Flächen, XF4 die horizontal orientierten. Die XF4-Flächen wurden nicht so unmittelbar mit Tausalz oder tausalzhaltigem Schnee beaufschlagt wie Brückenkappen

fen der Autobahn ausgelagert waren. Obwohl die Prüfkörper nur über 3 Winter ausgelagert waren, liegen die in den Tiefenlagen 0 bis 10 mm und 10 bis 20 mm an Bohrmehlproben bestimmten Chloridgehalte (Bild 5.4) im Bereich der Werte, die von Bauwerksbetonen stark befahrener Straßen mit 0,2 bis 2,0 Masse-% bekannt sind [7]. Der Chloridgehalt der Tunnel- und Brückenbauteiloberflächen liegt im Rahmen dieser Werte, sodass davon ausgegangen werden kann, dass die Chloridbelastung der Bauteiloberflächen, so sie für Frost-Tau-Wechsel relevant ist, als repräsentativ anzusehen ist. Ein höherer Chloridgehalt im Beton würde die Abwitterungen in der Tendenz reduzieren, wie die Ergebnisse der Variation der Natriumchloridkonzentration im CDF-Versuch nach [7] zeigen.

5.2 Temperatur und Sättigungsgrad in Bauwerksbeton in XF2

Das Ziel der Untersuchungen war, den tatsächlich im Bauwerksbeton auftretenden Sättigungsgrad und die Temperatur zu erfassen. Denn nur dann, wenn der für den betrachteten Beton kritische Sättigungsgrad überschritten wird und gleichzeitig das Wasser im Betongefüge gefriert, sind Frost-Tausalz-Schäden die Folge. Dazu ist eine kontinuierliche Erfassung der Messwerte, insbesondere während der Frostereignisse, Voraussetzung.

Im Rahmen der Untersuchungen wurden Multiring-Elektroden (MRE) sowie Temperatursensoren eingesetzt. Die MRE ermöglicht eine tiefenabhängige Messung, sodass in Abschnitten von ca. 5 mm

Tiefe innerhalb der Betondeckung bis in Tiefen von ca. 90 mm des unbeeinflussten Betons an acht unterschiedlichen Stellen der elektrolytische Widerstand erfasst wird [5, 6, 7]. In den gleichen Tiefen und Tiefenstufen wird die Betontemperatur gemessen. Der elektrolytische Widerstand von Beton steht in engem Zusammenhang zum Wassergehalt des Betons. Der Elektrolytwiderstand von Beton wird deutlich von der Temperatur beeinflusst. Mit der gleichzeitig in derselben Tiefenlage gemessenen Betontemperatur konnte der Einfluss der Temperatur auf den Elektrolytwiderstand jedoch kompensiert werden.

Für eine Übertragung der gemessenen Elektrolytwiderstände in Wassergehalt bzw. Wassersättigungsgrad wurde im Labor eine Kalibrierung vorgenommen. Die Kalibrierung erfolgte mit Hilfe der Zweielektroden-Methode (TEM) an Betonscheiben, deren Wassergehalt, Gesamtporosität und Wassersättigungsgrad im Labor bestimmt wurden [5, 6]. Die Probekörper mit 20 mm Dicke waren für die Untersuchung mit der Zweielektroden-Methode auf verschiedene Wassergehalte zwischen vollständiger Wassersättigung und trockenem Zustand eingestellt worden. Durch Messung des elektrolytischen Widerstandes der so konditionierten Scheiben war es möglich, einen funktionalen Zusammenhang zwischen elektrolytischem Widerstand und Wassergehalt bzw. Wassersättigungsgrad über den gesamten Sättigungsbereich des untersuchten Betons zu bestimmen. Zur Ermittlung des Einflusses des Chloridgehalts auf den Elektrolytwiderstand wurden weitere Betonscheiben mit 3%iger Natriumchloridlösung (NaCl-Lösung) getränkt.

In der Brücke Riedbüsche bei Meschede und im Tunnel Farchant bei Garmisch-Partenkirchen wurden die Elektroden in schon unter Verkehr stehende Bauwerke eingesetzt. Dazu wurden Löcher in den Bauteilbeton gebohrt und MRE eingeführt. Der Verbund zwischen Beton und MRE wurde durch Ankopplungsmörtel von 2 mm Stärke durchgängig hergestellt. Der mit der MRE gemessene Widerstand ist dann der des Ankopplungsmörtels. Unter der Annahme, dass die dünne Mörtelschicht innerhalb kurzer Zeit im Feuchtegleichgewicht mit dem Bauwerksbetons ist, wurde eine Kalibrierung auf Basis der Adsorptionsisothermen von Ankopplungsmörtel und Beton vorgenommen [5].

Die im Folgenden dargestellten Wassergehalte und Sättigungsgrade sind als Abschätzung zu verstehen, da die vorgestellten Kalibriermethoden auf kei-

nem großen Erfahrungsschatz beruhen. Aus diesem Grund erfolgt auch keine Berücksichtigung des Einflusses von Chlorid auf den aus der Widerstandsmessung abgeleiteten Wassergehalt. Die im Rahmen des Forschungsprojektes durchgeführten Untersuchungen haben gezeigt, dass ohne Berücksichtigung des Chloridgehalts höhere Wassergehalte berechnet werden und damit der ungünstigere Fall des Sättigungsgrades im Bauwerksbeton abgebildet wird [5].

Die Ermittlung von Wassergehalt und Sättigungsgrad im Bauwerksbeton aus den Messungen mit der gewählten Kombination von MRE und Temperatursensor hat sich dennoch bewährt. Auf diese Weise konnten Daten im Beton kontinuierlich über fast 5 Jahre und auch unmittelbar vor, während und nach Frostereignissen erfasst werden.

Die klimatischen Verhältnisse im Bauwerksbeton weichen von den an nahe gelegenen Wetterstationen aufgezeichneten Werten für Temperatur und Niederschlag ab. Im Bauwerksbeton werden weniger Eistage (Temperatur ständig unter 0 °C) und Frosttage (Temperatur durchschreitet 0 °C im Laufe eines Tages) gemessen als an den nahe gelegenen Wetterstationen. Großen Einfluss auf die Anzahl der Frost-Tauwechsel im Beton hat die Sonneneinstrahlung. So wurde im Bauwerksbeton eine größere Anzahl Frost-Tauwechsel gemessen als in der Luft, wenn der Bauwerksbeton durch die Sonne beschienen wurde (siehe Portal Gäubahntunnel in Tabelle 5.1). Durch die Sonneneinstrahlung können auch bei sehr niedrigen Lufttemperaturen Frost-Tauwechsel im Bauwerksbeton auftreten [5]. Auch die Lage der Messpunkte im Bauwerk hat die Anzahl der Frost-Tauwechsel im oberflächennahen Beton beeinflusst.

Die Tiefsttemperaturen im Bauwerksbeton liegen zwischen -14 °C und -21 °C. Der Wert von -21 °C wird nur einmal im Beobachtungszeitraum von 4 Wintern erreicht. Diese tiefen Temperaturen werden allerdings nur an Eistagen erreicht. Die tiefsten Temperaturen bei Frost-Tauwechsel im Beton betragen maximal -10 °C. Die meisten Frost-Tauwechsel finden mit Tiefsttemperaturen zwischen 0 °C und -5 °C statt. Nur in Einzelfällen werden Temperaturen darunter gemessen (s. Tabelle 5.1).

Die häufigste Abkühlrate während eines Frost-Tauwechsels liegt bei 1 Kelvin je Stunde (1 K/h). Die Maximalwerte von 3 K/h in Tunnelwänden und von 6 K/h in Brückenpfeilern werden nur vereinzelt gemessen. Die maximale Temperaturspanne (Tempe-

Bauwerk	Messwerte Luft am Bauwerk ¹⁾		Messwerte im Bauwerksbeton						
	Anzahl Eistage	Anzahl Frosttage	Anzahl Frosttage	Anzahl Frosttage $T_{\min} < -5 \text{ °C}$	Anzahl Frosttage mit Niederschlag	Max. Temperaturspanne	Maximale/häufigste Abkühlrate	Maximale/häufigste Auftaurate	Min. Temperatur
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[K]	[K/h]	[K/h]	[°C]
Tunnel Farchant (Garmisch Partenkirchen)	35	100							
Portal			30	2	8	ca. 12	2/1	2,5/1	-19
40 m im Tunnel			30	2					
100 m im Tunnel			30	3					
200 m im Tunnel			30	1					
Gäubahntunnel (Stuttgart)	20	50							
Portal			59	7	13	ca. 20	2/1	3/1,5	-21
40 m im Tunnel			45	2					
100 m im Tunnel			40	1					
Brücke Riedbüsche (Meschede)	20	60	50	10	10	ca. 15	3/1	6/1	-14
Brücke Berlin	15	40	40	4	10	ca. 15	2,5/1	6/1	-16

¹⁾ Ermittelt aus Aufzeichnungen nahe gelegener Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes

Tab. 5.1: Temperaturbeanspruchung des oberflächennahen Bauwerksbetons in XF2 im Winter als Mittelwerte pro Jahr [nach 5]. Definition von Frost- und Eistagen gemäß Kapitel 5.1.1

raturhub) während der Einfrier- bzw. Auftauphase im Beton betrug 20 K. Diese Zusammenstellung zeigt, dass die im Bauwerksbeton auftretenden Temperaturbedingungen deutlich von denen in der Frostprüfung mit dem CDF-Test abweichen (s. Kapitel 6.1). Die thermische Beanspruchung des Prüfkörpers im CDF-Test ist deutlich schärfer als die des Betons im Bauwerk.

Die Anzahl der Frost-Tauwechsel im Beton liegt im Mittel zwischen 30 und 60 im Jahr. Sie hängt von der geografischen Lage des Bauwerks und örtlichen Bedingungen, wie z. B. der Sonneneinstrahlung auf den Bauwerksbeton oder einer Schneedecke, ab. Schadensrelevant sind jedoch nur die Frost-Tauwechsel mit gleichzeitigem Niederschlag. Denn Frostschäden können bei den verwendeten Betonrezepturen nur auftreten, wenn während des Auftauens Wasser von der Oberfläche mit der Mikroislinsenpumpe in das Betongefüge aufgenommen werden kann (vgl. Kapitel 2.3). Die Ergebnisse der Untersuchungen deuten darauf hin, dass die Mikroislinsenpumpe auch im Bauwerksbeton in XF2 aktiviert werden kann [5].

Über den gesamten Beobachtungszeitraum wurde keine Aufsättigung des Bauwerksbetons gemessen, wie sie im CDF-Test beobachtet wird. Die kontinuierliche Wasseraufnahme der Betonprüfkörper im CDF-Test ist eine Folge der schnell aufeinanderfolgenden Frost-Tauwechsel in der Prüfung, aber keine Bedingung für einen Frostschaden. In [7] wird gezeigt, dass bei einer Unterbrechung der kapillaren Wasseraufnahme in der Prüfung der Schadensmechanismus ebenfalls unterbrochen wird. Daraus wurde der Schluss gezogen, dass ein Schaden im Beton nur dann fortschreitet, wenn Frost-Tauwechsel und Flüssigkeitsangebot gleichzeitig einwirken.

Schadensrelevante Frost-Tauwechsel wurden im Bauwerksbeton 8- bis 13-mal pro Jahr festgestellt. Das entspricht nur rund $\frac{1}{4}$ der gemessenen Frost-Tauwechsel. Die so bestimmte Anzahl an Frost-Tauwechseln im Beton liegt auf der sicheren Seite, denn der Gefrierpunkt wurde in der Auswertung auf 0 °C gelegt. Bei Berücksichtigung der Gefrierpunktniedrigung in kleinen Poren und der Erniedrigung der Gefriertemperatur durch das im Porenwasser

gelöste Chlorid würde die Frostbeanspruchung geringer und dementsprechend würde die Anzahl der Frost- und Eistage im Bauwerksbeton reduziert werden [5].

Die Ergebnisse der Messungen mit MRE und Temperatursensoren im Bauwerksbeton werden in den Bildern 5.5 und 5.6 beispielhaft für alle Bauwerksmessungen in lotrechten Betonflächen (XF2) von Bauteilen ohne Luftporenbeton dargestellt

Im Bauwerksbeton werden jahreszeitliche Schwankungen mit im Winter ansteigendem und im Sommer fallendem Sättigungsgrad gemessen. Im Sommer wird kein Einfluss von Niederschlägen auf den Sättigungsgrad festgestellt. Der Beton trocknet langsam und gleichmäßig aus. Die Anstiege des Sättigungsgrades im Winter können den Niederschlägen zugeordnet werden. Der Randbereich ist im Sommer trockener als der innere Bereich. Im Winter liegen hingegen im Randbereich höhere Sättigungsgrade vor als im inneren Bereich.

Der Sättigungsgrad steigt im Winter im Randbereich bis ca. 20 bis 25 mm unterhalb der Betonoberfläche witterungsbedingt an. In den lotrechten Bauteiloberflächen (XF2) ist dann der Sättigungsgrad höher als im Sommer. In größerer Tiefe bewegen sich die gemessenen Sättigungsgrade in der Größenordnung der Sättigung, die sich bei 85 % bis 95 % relativer Luftfeuchte im Beton einstellt, also weit unterhalb einer kritischen Sättigung.

Insgesamt stellen sich im Beton der untersuchten Bauwerke vergleichbare Sättigungsgrade ein. Hohe Sättigungsgrade, die im Bereich der Sättigung unter Atmosphärendruck der jeweiligen Betone liegen, sind unwahrscheinlich und tiefer als ca. 7 mm eher selten zu erwarten. Die Gefahr einer Frostschädigung der Bauteile besteht damit nicht.

Die Wände des Tunnels Farchant wurden mit Luftporenbeton hergestellt. Deshalb liegt der Sättigungsgrad unterhalb der in den anderen Bauwerken festgestellten Werte (siehe Bilder 5.5, 5.6 und 5.9). Auch in Einzelfällen, bei denen die Aktivität der Mikroislinsenpumpe vermutet werden kann [5], liegt der Sättigungsgrad des LP-Betons weit unterhalb der Sättigung unter Atmosphärendruck und noch weiter unterhalb der schadenskritischen Werte.

Ein deutlicher Anstieg des Sättigungsgrades erfolgt meist, wenn ein Wasserangebot durch Niederschlag oder auftauenden Schnee vorliegt und gleichzeitig die Beton- und Umgebungstemperatur

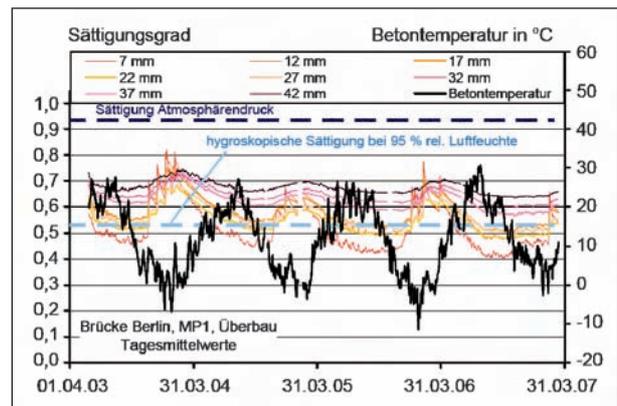


Bild 5.5: Verlauf des Sättigungsgrades und der Betontemperatur, die über 3,5 Winter an der Unterseite des Holkastens des Überbaus der Brücke in Berlin, A 10, bestimmt wurden [5]

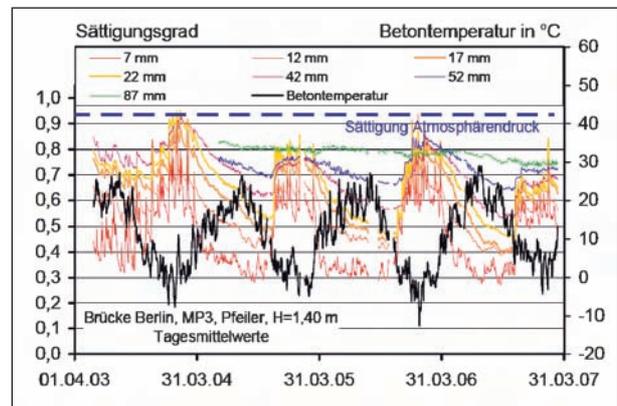


Bild 5.6: Verlauf des Sättigungsgrades und der Betontemperatur, die über 3,5 Winter am Brückenpfeiler der Brücke in Berlin, A 10, bestimmt wurden [5]

ansteigt und den Gefrierpunkt von Wasser (0 °C) überschreitet. Das sind die Bedingungen, unter denen die Mikroislinsenpumpe aktiviert werden kann [5, 7]. Der Sättigungsgrad überschreitet dabei allerdings nur vereinzelt und nur im oberflächennahen Bereich den Sättigungsgrad unter Atmosphärendruck, siehe auch Bild 5.6. Der Sättigungsgrad unter Atmosphärendruck ist der Sättigungsgrad, der sich ohne Wirkung der Mikroislinsenpumpe im wassergelagerten Beton einstellt. Diese Effekte wurden bei den XF2 zugeordneten Bauteilen jedoch nur am obersten Messpunkt ca. 7 mm unter der Betonoberfläche und nur vereinzelt festgestellt.

Über den Sättigungsgrad der Betonoberfläche bis zu 7 mm Tiefe kann zwar keine messtechnisch abgesicherte Aussage getroffen werden, aber es erscheint gerechtfertigt, in diesen Fällen auch dort eine Sättigung mindestens so hoch wie in 7 mm Tiefe anzunehmen. Theoretisch könnte in dieser

Oberflächenschicht der kritische Sättigungsgrad des Betons als Folge der Aktivität der Mikroeislin-senpumpe erreicht werden. Frostschäden sind je-doch an den Bauteiloberflächen nicht aufgetreten.

So hohe Sättigungsgrade in 7 mm Tiefe unterhalb der Oberfläche von XF2-Bauteilen wie in Bild 5.6 dargestellt wurden im Beobachtungszeitraum von 4 Wintern 1- bis 2-mal gemessen.

5.3 Temperatur und Sättigungsgrad in Bauwerksbeton in XF4

Bauwerksmessungen zu Betontemperatur und Sät-tigungsgrad in der Expositions-kategorie XF4 erfolgten an einer Brückenkappe. In eine Kappe der Brücke Riedbüsche waren gleichzeitig mit Pfeiler und Überbau eine Multiringelektrode (MRE) und Tem-peratursensoren eingebaut worden. Die Sensoren wurden nachträglich in Bohrlöcher versenkt. Der Kontakt zwischen Beton und MRE wurde mit einem Ankopplungsmörtel hergestellt [6]. Die Brücke Riedbüsche bei Meschede überführt eine Kreis-straße, die nach Auskunft der Autobahnmeisterei gerne als Abkürzung benutzt und im Winter mit Tau-salz eisfrei gehalten wird.

Die Ausführungen in Kapitel 5.2 zu Unterschieden zwischen den Wetterdaten einer nahe gelegenen Wetterstation und den im Bauwerksbeton be-stimmten gelten für die Brückenkappe gleicher-weise. Die an der Brückenkappe ermittelte Tempera-turbeanspruchung ist in Tabelle 5.2 zusammenge-stellt.

Wie auch an den Brückenbauteilen in XF2 wird die tiefste Betontemperatur (hier -15 °C) an einem Eis-tag bestimmt. Die tiefste Temperatur im Zusam-menhang mit einem Frost-Tauwechsel beträgt -10 °C. Am häufigsten traten Frost-Tauwechsel mit Tiefsttemperaturen zwischen 0 und -5 °C auf. Tem-peraturhub und Abkühlrate der Brückenkappe in XF4 unterscheiden sich im oberflächennahen Be-reich nicht von den Werten, die in den XF2-Bauteilen bestimmt wurden. Allerdings ist die Anzahl der Frost-Tauwechsel mit Niederschlag im Kappenbeton deutlich höher als in den vertikal ausgerichteteten Betonbauteilen. Dies kann auf die vorwiegend hori-zontale Ausrichtung der Kappenoberfläche und das Eindringen von Schmelzwasser aus dem aufliegen-den Schnee in den Beton zurückgeführt werden. Wie auch im Portal des Gäubahntunnels (s. Kapitel 5.2) treten durch die Sonneneinstrahlung in der Kappe Frosttage häufiger auf als in Pfeiler und Überbau. Die schadensrelevanten Frost-Tauwech-sel treten in der Brückenkappe in XF4 im Mittel des Beobachtungszeitraums rd. 30 % häufiger auf als an den Bauteilen in XF2. Sie betragen rd. 50 % aller Frost-Tauwechsel in XF4. Das Eindringen des Schmelzwassers aus Schnee in eine Betonober-fläche konnte in [7] durch Messungen mit MRE und Temperatursensoren nachvollzogen werden, siehe Bild 5.7. Dargestellt ist die Messung in der lotrech-ten Oberfläche (XF2) eines ausgelagerten Prüfkör-pers. Der teilweise durch Tauvorgänge als Nass-schnee vorliegende Schnee lag über einen Zeit-raum von 7 Tagen direkt an der Betonoberfläche an, sodass Wasser kapillar eindringen konnte. Der Schnee war sozusagen zwischen Schutzplanke

Bauwerk	Messwerte Luft am Bauwerk ¹⁾		Messwerte im Bauwerksbeton						
	Anzahl Eistage	Anzahl Frosttage	Anzahl Frosttage	Anzahl Frosttage $T_{\min} < -5 \text{ °C}$	Anzahl Frosttage mit Niederschlag	Max. Temperatur- spanne	Maximale/häu- figste Abkühlrate	Maximale/häufig- ste Auftaurate	Min. Temperatur
	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[K]	[K/h]	[K/h]	[°C]
Brücke Riedbüsche (Meschede)	20	60							
Pfeiler und Überbau (XF2)			50	10	10	ca. 15	3/1	6/1	-14
Brückenkappe (XF4)			68	13	35	ca. 15	5/1	5/1	-15

¹⁾ Ermittelt aus Aufzeichnungen nahe gelegener Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes

Tab. 5.2: Temperaturbeanspruchung des oberflächennahen Bauwerksbetons in XF2 und XF4 an der Brücke Meschede im Winter als Mittelwerte pro Jahr (nach [5, 6]). Definition von Frost- und Eistagen gemäß Kapitel 5.1.1

und Probekörper eingeklemmt. Der gemessene Widerstand, der an der Ordinate im Bild 5.7 aufgetragen ist, wird mit zunehmendem Wassergehalt bzw. Sättigungsgrad kleiner.

Die Ergebnisse der Messungen mit MRE und Temperatursensoren im Bauwerksbeton der Kappe in XF4 sind in Bild 5.8 über den gesamten Messzeitraum dargestellt.

Im Bauwerksbeton der Kappe in XF4 werden keine jahreszeitlichen Schwankungen des Sättigungsgrades festgestellt. Auch Niederschläge beeinflussen den Sättigungsgrad des Betons nicht. Nur der 7 mm unterhalb der Betonoberfläche bestimmte Sättigungsgrad scheint geringfügig von Witterungseinflüssen beeinflusst zu sein (s. Bild 5.8). Der Sättigungsgrad weist 7 mm unterhalb der Betonoberfläche die geringsten Werte auf und nimmt mit zu-

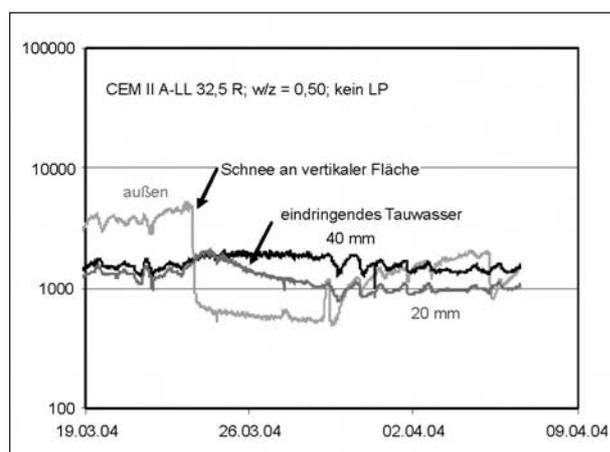


Bild 5.7: Verlauf der gemessenen Widerstände an Ring 1 der MRE (Tiefe = 40 mm), Ring 4 (Tiefe = 20 mm) und Ring 8 (außen); Auslagerung Farchant Exposition XF2. Ausschnitt mit Schnee an der Betonoberfläche [7]

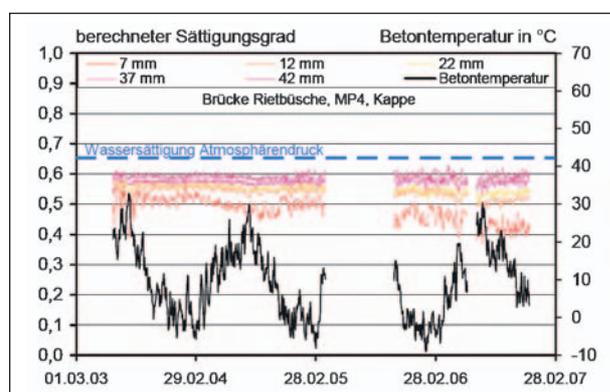


Bild 5.8: Verlauf des Sättigungsgrades und der Betontemperatur, die über 3 Winter in der Brückenkappe der Brücke Meschede, A 46, bestimmt wurden. Die Brückenkappe ist aus LP-Beton [6]

nehmender Tiefe zu. Die Sättigungsgrade liegen jedoch immer deutlich unterhalb der Sättigung unter Atmosphärendruck, sodass ein schadensrelevanter Sättigungsgrad nicht erreicht wird. Der niedrige Sättigungsgrad in der nahezu horizontal ausgerichteten Brückenkappe ist plausibel, denn die Brückenkappe ist mit LP-Beton hergestellt worden.

Die Messwerte im Kappenbeton geben keinen Hinweis auf eine Aktivierung der Mikroislinsenpumpe, obwohl die dafür typischen Witterungsrandbedingungen (Anstieg der Betontemperatur über 0 °C in Kombination mit Niederschlägen oder auftauendem Schnee) gegeben sind. Hier stellt sich die Frage, ob die Kalibriermethode der nachträglich eingebauten MRE an ihre Grenze stößt oder ob die unterschiedliche Wasseraufnahmegeschwindigkeit von Ankoppelmörtel und Kappenbeton die Messung der Aktivierung der Mikroislinsenpumpe verhindert [6].

Die Veränderung des Sättigungsgrades des Kappenbetons in Bild 5.8 wird nach [6] dennoch richtig wiedergegeben. Vergleichbar gleichmäßige Verläufe wurden ausschließlich an Messpunkten mit hohem Sättigungsgrad im Bereich einer XF3- und XF4-Beanspruchung beobachtet [17].

5.4 Unterschiede der Beanspruchung bei hoher (XF4) und bei mäßiger (XF2) Wassersättigung

Als eines der Ergebnisse der Untersuchungen für das Prüfverfahren für Beton in XF2 [7] werden die Begriffe ‚mäßige‘ und ‚hohe‘ Wassersättigung als missverständlich bezeichnet. Korrekter wäre es, von einem weniger häufigen Angebot von Wasser bzw. Taumittellösung in der Expositionsklasse XF2 im Vergleich zur Expositionsklasse XF4 zu sprechen. Das bedeutet aber nicht, dass in der Praxis bei XF2 nicht zeitweise der kritische Sättigungsgrad überschritten werden kann. Man muss davon ausgehen, dass bei „mäßiger Wassersättigung“ XF2 die Austrocknungsphasen ausgeprägter sind als in „hoher Wassersättigung“ XF4 und dass daher die Schädigungsphase, also Phasen, in denen gleichzeitig eine hohe Wassersättigung vorliegt und Frost-Tauwechsel auftreten, seltener ist. Daher ist der Zeitfaktor der entscheidende Unterschied für das Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchungskollektiv in XF2 bzw. XF4. Der Zeitfaktor bewirkt, dass Betone, die unter XF4 in einem sehr frühen Stadium erheblich geschädigt würden, unter XF2 deutlich verlängerte Lebensdauern haben [7].

Die Untersuchungen an den Betonbauwerken zeigen ebenfalls, dass schadensrelevante Unterschiede im Sättigungsgrad zwischen Beton in der Expositionsklasse XF2 und XF4 bestehen.

In der Expositionsklasse XF2 wird die Aktivierung der Mikroislinsepumpe beobachtet: Nur in seltenen Fällen, in der vorliegenden Untersuchung 1- bis maximal 2-mal pro Jahr, wird ein Sättigungsgrad beobachtet, der den freiwilligen Sättigungsgrad (Sättigungsgrad unter Atmosphärendruck) des Betons überschreitet und das Erreichen des kritischen Sättigungsgrades möglich werden lässt. Im restlichen Zeitraum des Jahres ist der aktuelle Sättigungsgrad des Betons kleiner als der natürliche Sättigungsgrad. Die Aktivierung der Mikroislinsepumpe scheint auf die ersten rd. 7 mm bis 12 mm des Betons beschränkt zu sein [5]. Diese Beobachtungen am Bauwerksbeton stimmen mit der Interpretation der mäßigen Wassersättigung XF2 aus [7] überein. Auch in XF2 kann oberflächennah der kritische Sättigungsgrad bei Frost-Tauwechseln überschritten werden, allerdings eher seltener als in XF4 in vergleichbarem Beton ohne Luftporen.

In der Expositionsklasse XF4 liegt in der Praxis immer Luftporenbeton vor. Die Luftporen erhöhen den Porenraum des Betons, sodass eine kritische Wassersättigung nicht erreicht werden kann (s. Kapitel 2.3). Die Messungen in der Brückenkappe bestätigen dies, es werden keine Effekte festgestellt, die auf eine Aktivierung der Mikroislinsepumpe hindeuten.

Zur Erörterung der Frage, ob der Luftporenbeton die Ursache für den nahezu gleichmäßigen Verlauf der Feuchte in der Expositionsklasse XF4 ist, wird im Folgenden die Messung an der Brückenkappe (Bild 5.8) mit der Messung im Luftporenbeton des Tunnels Farchant in XF2 verglichen (Bild 5.9).

In Luftporenbeton in XF2 wird kein so gleichmäßiger Verlauf des Sättigungsgrades beobachtet wie in XF4. Im Luftporenbeton in XF2 sind in den Winterperioden Schwankungen im Sättigungsgrad festzustellen (Bild 5.9). Vereinzelt erinnern die plötzlichen Anstiege des Sättigungsgrades bei tiefen Temperaturen an die Aktivierung der Mikroislinsepumpe im Beton ohne Luftporen (Bild 5.6).

In der Expositionsklasse XF2 ist der Sättigungsgrad des oberflächennahen Betons in der Winterperiode größer als der Sättigungsgrad in größerer Tiefe des Bauteils (Bilder 5.5 und 5.6). In der Expositionsklasse XF4 wird genau das Gegenteil beobachtet.

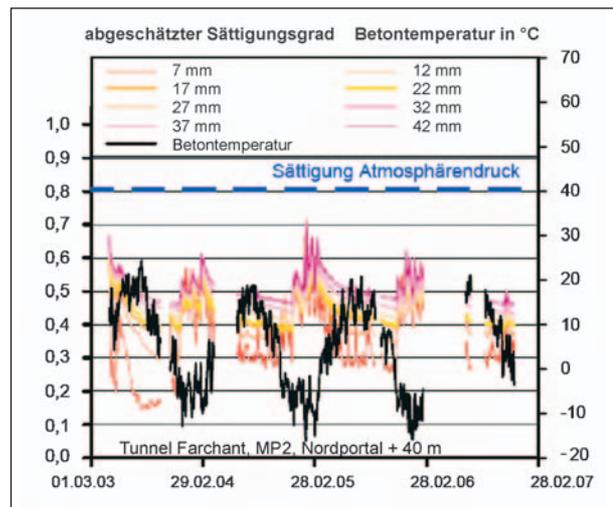


Bild 5.9: Verlauf von Sättigungsgrad und Temperatur in einem Luftporenbeton in XF2 [5]

Der Sättigungsgrad des oberflächennahen Betons ist im Winter kleiner als der Sättigungsgrad in größerer Tiefe des Bauteils (Bild 5.8). Diese Beobachtung in der Brückenkappe wird nach [6, 17] durch Messungen an Wasserbauwerken mit hoher Wassersättigung in XF3 bzw. XF4 bestätigt. Auch im Luftporenbeton in der Expositionsklasse XF2 wird der Sättigungsgrad des in 7 mm Tiefe liegenden Messpunktes kleiner bestimmt als in größerer Betontiefe (Bild 5.9).

6 Prüfverfahren für den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton

6.1 Prüfverfahren für Beton in XF4

Zur Überprüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes eines Betons für die Expositionsklasse XF4, dessen Ausgangsstoffe und Herstellung den ZTV-ING [4] und den Normen [3] entsprechen, ist das CDF-Verfahren [18] in Deutschland gut eingeführt. Untersuchungen im Rahmen des Forschungsschwerpunktes „Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) haben die Eignung des CDF-Verfahrens zur Beurteilung von Beton in der Expositionsklasse XF4 bestätigt.

Mit dem CDF-Verfahren kann die Eignung einer Betonmischung über die Prüfung der geforderten Eigenschaften beurteilt werden. Die Prüfung erfolgt an einem Prüfkörper im Labor und nicht am Bauwerksbeton, sodass das CDF-Verfahren ein Prüfverfahren nach dem so genannten Lab-Performan-

ce-Concept ist. Der Nachweis der geforderten Eigenschaften gilt jedoch nur mit Einschränkungen. Mit dem CDF-Verfahren wird der physikalische Schädigungsmechanismus eines Frost-Tausalz-Angriffs (siehe Kapitel 2.2) erfasst. Wie weit der chemische Schädigungsmechanismus mit diesem Prüfverfahren erfasst werden kann, ist noch nicht abschließend beantwortet worden.

Bei den meisten Bauteilen ist die Fläche, an der Flüssigkeit und Temperatur auf den Beton einwirken können, relativ ausgedehnt und eben. Während einer Frostbelastung des Bauwerksbetons dringt deshalb in der Abkühlphase eine Kälte- welle parallel zur Betonoberfläche ein und während der Auftauphase eine Wärmewelle. Die Flüssigkeit bewegt sich in derselben Richtung. Der Wärme- und Feuchtetransport ist eindimensional und gleichgerichtet. Nur dann kann das Frostsaugen, eine Folge der Aktivierung der Mikroeislin- senpumpe, auftreten [7].

Das CDF-Verfahren ist so konzipiert worden, dass das Prinzip der Frost-Tauwechsel-Bedingungen in realen Bauteilen abgebildet wird. Die gesamte Prüf- einrichtung, eine speziell ausgerüstete Klimatrube, ist so konzipiert, dass der Wärme- und Feuchte- transport im Prüfkörper eindimensional erfolgt. Der Temperaturzyklus beginnt bei +20 °C und fällt mit 10 K/h auf -20 °C ab. Die Haltezeit der Temperatur von -20 °C beträgt 3 Stunden. Anschließend steigt die Temperatur mit 10 K/h auf +20 °C an, wo sie für 1 Stunde gehalten wird. Die Zeit für einen Frost- Tau-Zyklus beträgt 12 Stunden, sodass die Prüf- dauer für die festgelegten 28 Frost-Tau-Wechsel angemessen kurz ist. Die festgelegte Prüfkörper- höhe von 70 mm sichert einen Wärmefluss adäquat zur Realität [7, 8].

Die Frostprüfung erfolgt an Beton, der bis zum natürlichen Sättigungsgrad durchfeuchtet ist und somit eine hohe Wassersättigung aufweist. Vor der Frostprüfung nimmt der Beton über 7 Tage die Prüf- flüssigkeit, eine 3%ige NaCl-Lösung, kapillar auf. Während der Frost-Tau-Zyklen wird die Mikroeislin- senpumpe aktiviert und der Beton nimmt darüber hinaus weitere Prüf flüssigkeit auf. Der Sättigungs- grad des Prüfkörpers wird dadurch über den natür- lichen Sättigungsgrad (Sättigungsgrad ohne Frost oder erhöhten Druck) hinaus erhöht. Gefügeschädi- gungen treten dann auf, wenn der kritische Sätti- gungsgrad des Betons überschritten ist (siehe hier- zu auch Kapitel 2.3).

Werden Betone geprüft, deren w/z-Wert den Nor- men für XF4 entspricht, tritt die Schädigung in Form von Abwitterungen auf.

Werden Betone ohne Luftporen geprüft, deren w/z- Wert höher und deren Festigkeit geringer ist, kön- nen sich im Prüfkörper, als Folge der Überschrei- tung der Zugfestigkeit während der Prüfung, Risse bilden, bevor signifikante Abwitterungen gemessen werden.

6.2 Prüfverfahren für Beton in XF2

Das Prüfverfahren für Beton in der Expositionsklas- se XF2 wurde im Rahmen des Forschungsprojekts FE 15.367/2002/DRB [7] erarbeitet. Ein Prüfverfah- ren zur Beurteilung der Eignung eines Betons über die Prüfung der geforderten Eigenschaften, d. h. ein Prüfverfahren nach dem Performance Concept, muss demnach zwei Aufgaben lösen:

- Der Angriff, der einer Expositionsklasse zugrun- de gelegt ist, muss sicher simuliert werden. Dabei soll die schädigende Beanspruchung aber so simuliert werden, dass innerhalb eines kurzen Zeitraums, d. h. innerhalb der Eignungs- prüfung von 28 Tagen, die Beurteilung der Dau- erhaftigkeit des Betons unter realen Beanspru- chungen möglich ist. Um diese Anforderung zu erfüllen, muss die Schädigung in der Prüfung schneller erfolgen als in der Praxis. Das bedeu- tete aber auch, dass die Beanspruchung in der Prüfung intensiver bzw. schärfer sein muss als in der Praxis und dabei dennoch den Schädi- gungsmechanismus realistisch simulieren muss.
- Das Verfahren muss verlässliche Ergebnisse er- zeugen, die auch von der Prüf stelle und vom Prüfer so weit als möglich unabhängig sind, d. h., die Präzision gemäß ISO 5725 muss nach- gewiesen sein.

Das Prüfverfahren ist damit ein Werkzeug, das die Naturgesetze beachtet, die zum Schaden führen. Es bildet, ebenso wie das deskriptive Verfahren der Normen, nur den zulässigen Extremfall ab [7].

Daraus folgt aber auch, dass die Prüfung des Frost- Tausalz-Widerstandes von Beton bei „mäßiger“ Wassersättigung XF2 zu einer entsprechenden Schädigung des Prüfkörpers in der Prüfung führen muss. Nur dann können die Bewertungskriterien so festgelegt werden, dass die Eignung des Betons in

der Praxis richtig erfasst wird, d. h., wenn eine kritische Wassersättigung in XF2 nur im oberflächennahen Bereich und nicht so häufig auftritt wie bei hoher Wassersättigung XF4 in einem vergleichbaren Beton ohne Luftporen.

Ausgehend vom CDF-Verfahren XF4 wurden im Rahmen des Forschungsprojektes [7] Untersuchungen in Form von Parametervariationen durchgeführt, mit denen das Prüfverfahren so abgeschwächt wird, dass eine Beurteilung eines Betons für XF2 möglich ist. Das CDF-Verfahren XF4 erfüllt die Anforderung nach der richtigen Erfassung des Schädigungsmechanismus und die Präzision des Verfahrens gemäß ISO 5725 ist nachgewiesen [18] (siehe hierzu auch Kapitel 6.1).

Zur Abschwächung des Frost-Tausalz-Angriffs in der Prüfung wurden mit dem Ziel der Reduzierung der Wasseraufnahme der Prüfkörper untersucht:

- die Lagerung der Prüfkörper bis zur kapillaren Wasseraufnahme in Folie anstelle von Wasserlagerung und
- die Verkürzung der Dauer der kapillaren Wasseraufnahme von 7 auf 2 Tage.

Diese beiden Maßnahmen führen nicht zum Ziel, weil das Frostsaugen in der Prüfung die reduzierte kapillare Wasseraufnahme kompensiert.

Mit dem Ziel, der Reduzierung der Schädigungsgeschwindigkeit in der Prüfung wurden untersucht:

- die Prüfkörper zeitweise ohne Prüflösung der Frost-Tau-Wechselbeanspruchung auszusetzen (Wechselagerung) anstelle von kontinuierlicher Frost-Tau-Wechselbeanspruchung mit Prüflösung,
- eine Veränderung der NaCl-Konzentration der Prüflösung zu kleineren und größeren Werten als 3 %,
- die Erhöhung der Minimaltemperatur in der Prüfung von -20 °C auf -10 °C sowie
- Kombinationen von NaCl-Konzentration und Minimaltemperatur.

Die Wechselagerung führt zu dem Ergebnis, dass durch eine Unterbrechung der Feuchtaufnahme während der Befrostung die Schädigung unterbrochen wird, die Schädigungsgeschwindigkeit aber gleich bleibt. Das heißt, der Beton trocknet in Frost-Tau-Wechseln aus, wenn keine Prüflösung ansteht. Er nimmt beim nächsten Angebot von Prüflösung in

den Frost-Tau-Wechseln mit derselben Geschwindigkeit die Lösung auf wie in der Prüfung ohne Unterbrechung der Aktivität der Mikroeislinsepumpe. Dieses Erkenntnis ist für den Schädigungsprozess in XF2 in der Praxis von Bedeutung, führt jedoch bei der Suche nach geeigneter Abschwächung des Prüfverfahrens nicht zum Ziel.

Die Variationen der NaCl-Konzentration der Prüflösung zwischen 3 % und 8 % verlangsamt den Schadensverlauf und reduziert die Abwitterungen, sodass eine Unterscheidung verschiedener Betonqualitäten erst nach längerer Prüfdauer möglich wird. Höhere Konzentrationen als 8 % reduzieren die Schädigung so stark, dass keine Unterscheidung der Betonqualitäten mehr möglich ist. Eine Reduzierung der NaCl-Konzentration auf Werte zwischen 0,1 und 1 % reduziert zwar die Schädigung. Die Einstellung einer solch niedrigen Konzentration über den gesamten Prüfzeitraum ist jedoch im Labor schwierig. Beträgt die NaCl-Konzentration zwischen 1 % und 3 % wird in der Prüfung ein Schadensmaximum erreicht, womit Untersuchungen von [19] ergänzt werden, in denen das Schädigungsmaximum für 3%ige NaCl-Lösung bestimmt wurde.

Zielführend ist die Anhebung der Minimaltemperatur von -20 °C auf -10 °C. Die Abwitterung in der Prüfung wird in Abhängigkeit von der Betonqualität reduziert und die Aufnahme der Prüflüssigkeit wird zeitlich verzögert.

Bei den Kombinationen von Anhebung der Minimaltemperatur auf -10 °C und Veränderung der NaCl-Konzentration stellt sich heraus, dass bei dieser Mindesttemperatur und höheren NaCl-Konzentrationen als 3 % die Eisbildung in der Prüfung ausbleibt und die Schädigung zu sehr abgeschwächt ist.

Als wirksamste Maßnahmenkombination zur Abschwächung des CDF-Verfahrens XF4 für die Prüfung von Betonen für XF2 ergibt sich die Anhebung der Mindesttemperatur auf -10 °C unter Beibehaltung der NaCl-Konzentration der Prüflösung von 3 %.

Das „modifizierte Prüfverfahren XF2“, die modifizierte CDF-Prüfung XF2, übernimmt die Konzeption, die Prüfeinrichtung und die Prüfkörperpräparation des CDF-Verfahrens. Geändert ist Folgendes:

- Die Minimaltemperatur der Frost-Tau-Zyklen beträgt -10 °C.
- Die Prüfdauer beträgt 14 Frost-Tauwechsel.

- Das Abnahmekriterium, d. h. die maximal zulässige Abwitterung, muss angepasst werden (siehe auch Kapitel 7.2).

Der Temperaturzyklus des modifizierten CDF-Verfahrens XF2 beginnt bei +20 °C und fällt mit 10 K/h auf -10 °C ab. Die Haltezeit der Temperatur von -20 °C beträgt 5 Stunden. Anschließend steigt die Temperatur mit 10 K/h auf +20 °C an, wo sie für 1 Stunde gehalten wird.

Die Laboruntersuchungen zeigen, dass in den Prüfungen von Betonen mit dem modifizierten CDF-Verfahren XF2 deutlich geringere Abwitterungen ermittelt werden als mit dem CDF-Verfahren XF4. Eine klare Trennung zwischen Betonen mit einem normgemäßen w/z-Wert von 0,50 und Betonen mit einem darüberliegenden w/z-Wert wurde festgestellt [7].

Mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) können verschiedene Betonqualitäten unterschieden werden und es ist möglich, Betonzusammensetzungen, die nach Norm für XF2 geeignet sind, von solchen zu unterscheiden, die nicht für XF2 geeignet sind. Die Abwitterung in der Prüfung darf 3.000 kg/m² nicht überschreiten, weil dann aufgrund der starken Schädigung des Prüfkörpers die Streuung der Ergebnisse zu groß wird. Für eine Abwitterung in der Prüfung von 1.500 g/m² nach 28 Frost-Tau-Wechseln liegen für XF4-Betone Präzisionsdaten vor [7].

7 Bewertung von Beton mit den Prüfverfahren

7.1 Beton in der Expositions-klasse XF4

Im Rahmen des Forschungsvorhabens [7] wurden Betone hinsichtlich ihres Verhaltens in der Expositions-klasse XF4 und XF2 untersucht. Hierzu wurden Betone hergestellt, die aufgrund ihrer Zusammensetzung entweder der Expositions-klasse XF4 oder der Expositions-klasse XF2 entsprachen oder nur für geringere Klassen als XF2 geeignet sind, d. h. nicht für XF2 geeignet sind. An den Betonen wurden Untersuchungen im Labor durchgeführt und es wurden Prüfkörper derselben Zusammensetzung im Mittelstreifen von 4-spurigen stark befahrenen Straßen der Beanspruchung durch Witterung und Verkehr ausgesetzt, siehe auch Kapitel 4. Die Prüfkörper für die Expositions-klasse XF4 wurden so gelagert, dass die horizontal ausgerichtete Beton-

fläche mit Spritzwasser und Sprühnebel aus Straßenverkehr beaufschlagt wurde. Durch den Vergleich der Schädigung im Labor und in der Praxis sollte die Korrelation zwischen der Belastung im Rahmen der Frostprüfung im Labor und der Auslagerung unter Witterung und Verkehr untersucht werden.

Im Rahmen der Auslagerungsversuche wurden jeweils 5 Probekörper einer Betonzusammensetzung bei Meschede im Sauerland über 3 und bei Farchant nahe Garmisch-Partenkirchen über 4 Winterperioden hinweg auf Schäden und Schadensentwicklung untersucht. In regelmäßigen Intervallen wurden die Masse der Probekörper sowie die innere Schädigung bestimmt und die Schädigung der exponierten Oberfläche wurde visuell erfasst.

Die Ergebnisse der Laborprüfung zeigen, dass Betone, die gemäß der normativen Vorschriften für XF4 hergestellt worden waren, in der CDF-Prüfung (XF4) die Anforderungen für XF4, höchstzulässige Abwitterung nach 28 Frost-Tauwechseln 1.500 g/m², erfüllen. Auch dann, wenn die von der Norm geforderte Mindestdruckfestigkeitsklasse C30/37 nicht erreicht worden war [7]. Die Anforderungen an die Betonzusammensetzung sind nach Norm [3] und ZTV-ING 3-1 [4] gleich. Die Mindestbetonfestigkeitsklasse beträgt nach ZTV-ING 3-1 jedoch C25/30 und weicht damit von der Norm ab.

Allerdings besteht auch ein Luftporenbeton mit CEM-I-32,5R-Zement und w/z = 0,60 ebenfalls den CDF-Test (XF4). Dieser Beton wäre aufgrund des w/z-Wertes nach Norm nicht für XF4 geeignet. Hier scheint sich der w/z-Wert nachrangig zum Vorhandensein von Luftporen auszuwirken [7]. Verglichen mit den zulässigen Zementen für XF4 ist der Klinkeranteil dieses Zementes hoch. Der Zement stellt auch nicht den gerade noch zulässigen Extremfall der gemäß Norm geeigneten Zusammensetzung dar.

Die Untersuchungen während der Auslagerung unter XF4-Bedingungen zeigen, dass keine Reduzierung des dynamischen E-Moduls infolge der Verkehrs- und Witterungsbeanspruchung erfolgt. Gefügeschäden werden somit nicht registriert. An der Oberfläche von Betonen mit Luftporenbildnern wurden sehr geringe Schädigungen festgestellt. Es waren oberhalb kleiner Zuschläge Abplatzungen zu erkennen. Dagegen wiesen Betone, die ohne Luftporenbildner hergestellt worden waren, deutliche Schädigungen in Form größerer Abplatzungen der Oberfläche auf.

Das Ergebnis der Untersuchungen ist, dass Betone, die mit dem CDF-Verfahren (XF4) als geeignet für die Expositionsklasse XF4 beurteilt werden, keine bis sehr geringe Schädigungen der Oberfläche aufweisen. Dazu gehört allerdings auch ein Luftporenbeton, dessen w/z-Wert nicht der Norm entsprach. Alle Betone ohne Luftporenbilder, die somit nicht normgemäß zusammengesetzt waren, weisen in der Auslagerung über 4 Winter Schäden auf, die sich über die Anzahl der Winter aufsummieren.

Zusammen mit den Ergebnissen weiterer Untersuchungen im Forschungsschwerpunkt „Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) [20] wird bestätigt, dass ein Beton für die Expositionsklasse XF4 geeignet ist, wenn die zulässige Abwitterung von 1.500 g/m² nach 28 Frost-Tauwechseln in der Prüfung mit dem CDF-Verfahren (XF4) nicht überschritten wird und gleichzeitig die Ausgangsstoffe die Anforderung der Normen erfüllen.

7.2 Beton in der Expositionsklasse XF2

Im Rahmen des Forschungsvorhabens [7] wurden Betone hinsichtlich ihres Verhaltens in der Expositionsklasse XF4 und XF2 untersucht. Hierzu wurden Betone hergestellt, die aufgrund ihrer Zusammensetzung entweder der Expositionsklasse XF4 oder der Expositionsklasse XF2 entsprachen oder nur für geringere Klassen als XF2, d. h. nicht für XF2, geeignet sind. An den Betonen wurden Untersuchungen im Labor durchgeführt und es wurden Prüfkörper derselben Zusammensetzung im Mittelstreifen von 4-spurigen stark befahrenen Straßen der Beanspruchung durch Witterung und Verkehr ausgesetzt, siehe auch Kapitel 4. Die Prüfkörper für die Expositionsklasse XF2 wurden so gelagert, dass die lotrecht ausgerichtete Betonfläche mit Spritzwasser und Sprühnebel aus Straßenverkehr beaufschlagt wurde. Durch den Vergleich der Schädigung im Labor und in der Praxis sollte die Korrelation zwischen der Belastung im Rahmen der Frostprüfung im Labor und der Auslagerung unter Witterung und Verkehr untersucht werden.

Im Rahmen der Auslagerungsversuche wurden jeweils 5 Probekörper einer Betonzusammensetzung bei Meschede im Sauerland über 3 und bei Farchant nahe Garmisch-Partenkirchen über 4 Winter-

perioden hinweg auf Schäden und Schadensentwicklung untersucht. In regelmäßigen Intervallen wurden die Masse der Probekörper sowie die innere Schädigung bestimmt und die Schädigung der exponierten Oberfläche wurde visuell erfasst.

Während der Dauer der Auslagerung wurden keine Gefügeschäden in den Betonen festgestellt. Der dynamische E-Modul der Prüfkörper nahm auch bei den Betonen ohne Luftporen infolge der Verkehrs- und Witterungsbeanspruchung nicht ab.

Die Oberfläche der gemäß der Expositionsklasse XF2 ausgelagerten Prüfkörper wies teilweise Schädigungen auf. Die Schädigungen einer Probekörperserie traten bei Würfeln gleicher Serie jeweils sehr gleichmäßig intensiv auf [7].

Schädigungen der exponierten Oberfläche wiesen die Betone auf, die aufgrund ihrer Zusammensetzung nicht den ZTV-ING 3-1 [4] und nicht den Normen [3] entsprechen. Auch in der Expositionsklasse XF2 nimmt der Schädigungsgrad mit zunehmender Anzahl der Winter kumulativ zu. Eine Auf-sättigung der Oberfläche über die Auslagerungsdauer wurde hier wie auch im Bauwerksbeton (vgl. Kapitel 5.2) nicht beobachtet. Die Schädigung der Betone mit CEM-II/A-LL- und CEM-III/A-Zementen tritt zu einem früheren Zeitpunkt auf als die der Betone mit CEM-I-Zement. Die Festigkeitsklasse der Zemente betrug 32,5R und für die CEM-III/A-Zemente 32,5. Daraus lässt sich ableiten, dass die Betone mit CEM-I-Zementen eine etwas höhere Reserve gegen Schädigungen aufweisen, wenn die Kapillarporosität nicht normgemäß ist.

Keine Schädigungen in der Auslagerung wiesen Betone auf, deren Zusammensetzung den ZTV-ING 3-1 [4] für XF2 entsprechen. Gegenüber den Normen ist in ZTV-ING auch für Luftporenbeton der w/z-Wert auf maximal 0,50 begrenzt. Diese Ergebnisse bestätigen, dass in der Expositionsklasse XF2 kein Luftporenbeton erforderlich ist, um Beton mit einem guten Frost-Tausalz-Widerstand herzustellen.

Allerdings wies, wie in der Expositionsklasse XF4 (Kapitel 7.1), auch Beton mit CEM-I-32,5R-Zement mit einem nicht normgemäßen w/z-Wert von 0,60 sowohl mit als auch ohne Luftporen keine Schäden auf. Dieser Zusammenhang muss beachtet werden, wenn in Zukunft allein das modifizierte CDF-Verfahren XF2 zur Prüfung der Eignung eines Betons herangezogen werden sollte.

Im Rahmen der Prüfung mit dem modifizierten CDF-Verfahren XF2 zeigten die Betone, die nicht normgemäß und gemäß ZTV-ING zusammengesetzt waren, deutlich höhere Abwitterungen als Betone mit XF2-Zusammensetzung. Betone mit w/z-Wert von 0,50 (ZTV-ING-gemäß) weisen nach 14 Frost-Tau-Wechseln eine Abwitterung unterhalb von 1.500 g/m² auf. Nicht norm- und ZTV-ING-gemäß zusammengesetzte Betone mit höherem w/z-Wert weisen Abwitterungen auf, die deutlich höher liegen. Allerdings weisen einzelne Betone in der Auslagerung unter XF2-Bedingungen keine Schäden auf, die in der Prüfung höhere Abwitterungen als 1.500 g/m² zeigten (s. o.).

Eine abschließende Beurteilung der Betone mit dem modifizierten CDF-Verfahren XF2 ist aufgrund der vorliegenden Untersuchungen allerdings nicht möglich. Es treten Widersprüche zwischen dem Schadensbild von Betonen in der Auslagerung und der Höhe der Abwitterungen im modifizierten CDF-Test XF2 auf. Zur endgültigen Festlegung eines Abnahmekriteriums liegen zurzeit zu wenige Ergebnisse von unterschiedlich zusammengesetzten Betonen vor. Hier ist weiterer Forschungsbedarf gegeben.

7.3 Schadensbild von Beton in XF2

An ausgewählten Betonen wurde mit Multiringelektroden (MRE) die Widerstandverteilung in den ausgelagerten Würfeln bis in eine Tiefe von 40 mm ermittelt. In denselben Tiefen wurde die Temperatur bestimmt, sodass die temperaturkompensierten Widerstände betrachtet werden. Wie in Kapitel 5 dargestellt, weisen Beton mit hohem Wassergehalt einen geringen elektrolytischen Widerstand und Beton mit niedrigem Wassergehalt einen hohen elektrolytischen Widerstand auf. Die Messung des Widerstands beginnt ca. 7 mm unterhalb der Betonoberfläche.

Während der Auslagerung im Mittelstreifen der stark befahrenen Straßen wurden bei den XF2-Prüfkörpern in 7 mm Tiefe Widerstände ermittelt, die einer geringen Wassersättigung des Betons entsprechen. Aufgrund eines solch geringen Sättigungsgrades wäre kein Frost-Tausalz-Schaden zu erwarten gewesen. Dennoch wiesen die in unmittelbarer Nachbarschaft ausgelagerten Prüfkörper zum Teil gravierende Oberflächenschäden auf. Dies lässt den Schluss zu, dass die kritische Sättigung nur in der äußersten Randzone des Betons erreicht wird, die

durch die Multiringelektrode aufgrund ihrer geringsten Tiefenlage von ca. 7 mm unter der Betonoberfläche nicht messbar ist. Durch den starken Feuchtgradient in der obersten Randzone des Betons erfolgt auch nur dort eine Schädigung [7].

Im Laborversuch mit dem modifizierten CDF-Verfahren XF2 ist aufgrund der fortlaufenden Sättigung und der nicht gegebenen Austrocknung sowie der deutlich größeren Temperaturunterschiede zwischen Minimal- und Maximaltemperatur eine deutlich tiefere Randschicht des Prüfkörpers wassergesättigt. Allein daraus ergibt sich im Laborversuch eine deutlich höhere Abwitterung als in der Praxis beobachtet wird. Die Tendenz des Schädigungsgrades ist aber aufgrund der gleichen Schädigungsmechanismen im Laborversuch wie in der Praxis identisch.

Weiterhin wurde mit den Auslagerungsversuchen gezeigt, dass der Temperaturhub für die Schadensintensität als maßgebend anzusehen ist [7]. Es konnte eine klare Zuordnung der Schadensintensität zum Auslagerungsort festgestellt werden. Betonproben, die in Meschede ausgelagert waren, wiesen teilweise geringere Schädigungen auf als Betone in Farchant. Bei gleicher Anzahl an Frosttagen mit Niederschlag wurden in Meschede ein durchschnittlicher Temperaturunterschied von 7,1 Kelvin und in Farchant ein Temperaturunterschied von 11,4 Kelvin nachgewiesen [7].

8 Offene Fragen

Die Messungen am Bauwerksbeton bilden den Sättigungsgrad des Betons auf der sicheren Seite liegend ab. Genauere Aussagen wären möglich [5, 6], wenn in der Auswertung der Bauwerksmessungen

- ein sättigungsabhängiger b-Wert bei der Kompensierung des Temperatureinflusses auf den Elektrolytwiderstand berücksichtigt werden kann,
- der Einfluss des Chloridgehalts auf den elektrolytischen Widerstand genauer bestimmt werden kann und
- die Karbonatisierung des oberflächennahen Betons bei der Kalibrierungsmethode berücksichtigt werden kann.

Auch stellt sich die Frage, wie gut der Einfluss der in Deutschland vorherrschenden Witterungsbedin-

gungen auf die Klimabedingungen im Bauwerksbeton mit Messungen über einen Zeitraum von 4 Wintern wiedergegeben wird. Der Vergleich der Daten der Wetterstationen in der Nähe der Bauwerke mit den Klimabedingungen im Bauwerksbeton legt nahe, dass mit den vorhandenen Messungen repräsentative Winter abgebildet werden [7, 20]. Damit kann zwar nicht ausgeschlossen werden, dass vereinzelt niedrigere Temperaturen im Bauwerksbeton auftreten oder der kritische Sättigungsgrad des oberflächennahen Betons im Bauwerk in XF2 häufiger als 1- bis 2-mal im Jahr bei Frost-Tauwechseln erreicht werden kann. Aber die Messungen zeigen auch, dass die Tiefsttemperatur im Bauwerk an Eistagen und nicht an den schadensrelevanten Frosttagen auftreten.

Bei den Messungen am Bauwerksbeton wurde in den Luftporenbetonen im Winter oberflächennah ein geringerer Sättigungsgrad festgestellt als in größerer Tiefe [6]. Hier stellt sich die Frage, ob der oberflächennah als kleinster Wert bestimmte Sättigungsgrad durch andere Effekte, wie z. B. durch Veränderungen in der Porenstruktur des Bauwerksbetons, beeinflusst wird.

In Bezug auf das neue modifizierte CDF-Verfahren XF2 konnten im Rahmen der Forschungsprojekte nicht alle Fragen geklärt werden.

Das Abnahmekriterium für Beton in XF2 konnte nicht abschließend festgelegt werden. Hierzu sind weitere Prüfungen von Betonen mit unterschiedlicher Zusammensetzung erforderlich. Auch sollte durch einen Ringversuch die aus dem CDF-Verfahren XF4 vermutete Wiederhol- und Vergleichspräzision für das modifizierte CDF-Verfahren XF2 bestätigt werden.

Offen ist auch noch die Frage, wie sich poröse Sande mit hoher Wasseraufnahme in der Prüfung mit dem modifizierten CDF-Verfahren XF2 darstellen. In der Prüfung im Luftporenbeton mit dem CDF-Verfahren XF4 steht für expandierende kleine Bestandteile, wie z. B. Sande, möglicherweise ausreichend Porenraum zur unschädlichen Ausdehnung zur Verfügung. In der Prüfung des für XF2-Bauteile bewährten Betons ohne Luftporen mit dem modifizierten CDF-Verfahren XF2 steht dieser Ausweichraum nicht zur Verfügung und Gefügeschäden können die Folge sein. In diesem Zusammenhang schließt sich auch die Frage an, ob ein solcher Effekt in der Baupraxis relevant ist oder ob es sich um einen mit der Prüfung erzeugten künstlichen Effekt handelt.

Bevor das modifizierte CDF-Verfahren XF2 als Lab-Performance-Verfahren das deskriptive Konzept der heutigen Regelwerke voll ersetzen kann, stellen sich folgende Fragen:

- Das modifizierte CDF-Verfahren XF2 beruht ausschließlich auf der Beurteilung der Abwitterung des Betons in der Prüfung. Hier stellt sich die Frage, ob Betone, deren Festigkeit so gering ist, dass Gefügestörungen ohne Vorankündigung durch Abwitterungen erfolgen, mit dem modifizierten CDF-Verfahren XF2 erfasst werden können.
- Das modifizierte CDF-Verfahren XF2 bildet den physikalischen Schädigungsmechanismus einer Frost-Tausalz-Beanspruchung von Bauwerksbeton ab. Es stellt sich die Frage, inwieweit die chemischen Schädigungsmechanismen mit dieser Kurzzeitprüfung erfasst werden können und ob der Einfluss der chemischen Schädigung, z. B. nicht frosttausalzbeständiger Hydratationsprodukte oder Ausgangsstoffe, mit dem Prüfverfahren abgebildet werden kann.

Bis zur Klärung dieser Fragen wird es weiterhin erforderlich sein, ergänzend zur Prüfung mit dem modifizierten CDF-Verfahren XF2 frosttausalzbeständige Ausgangsstoffe und eine Mindestfestigkeitsklasse als deskriptive Anforderungen zu stellen.

9 Zusammenfassung und Schlussfolgerung

Der Frost- und Tausalzwiderstand ist für die Dauerhaftigkeit von Bauwerken an Bundesfernstraßen von hoher Bedeutung. Die neuen Normen, zusammengefasst im DIN-Fachbericht 100, unterscheiden zwei Beanspruchungskollektive: Frost- und Tausalzeinwirkung bei hoher Wassersättigung, bezeichnet als Expositionsklasse XF4, und Frost- und Tausalzeinwirkung bei mäßiger Wassersättigung, bezeichnet als Expositionsklasse XF2. Unbekannt war bisher, welche Wassersättigung mäßige von hoher unterscheidet und welche Auswirkungen eine Frost-Tausalz-Beanspruchung im Beton des Bauwerks hat. Auch fehlte ein Prüfverfahren für die Expositionsklasse XF2. Das Prüfverfahren sollte dem Performance Concept gerecht werden, also die Ermittlung der Leistungsfähigkeit des Betons ohne genaue Kenntnis seiner Zusammensetzung ermöglichen.

Durch kontinuierliche Messung des elektrolytischen Widerstands und der Temperatur im Bauwerksbeton

konnten mit den Projekten FE 15.324/2000/FR „Europäische Bemessungsvorschriften für den Brückenbau – Beanspruchung von Betonbauwerken“ und FE 89.0169/2005/AP „Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4“ über 4 Winterperioden hinweg Daten in unterschiedlichen Tiefenlagen im Beton erhoben werden. Der Chloridgehalt des Betons wurde punktuell erfasst. Nach entsprechender Kalibrierung erlauben diese Daten Aussagen über den Sättigungsgrad des Betons zwischen rd. 7 mm und rd. 90 mm unterhalb der frost-tausalz-beanspruchten Betonoberfläche. Auf diese Weise konnten die schadensrelevanten Auswirkungen der Frost-Tauwechsel-Beanspruchung des Bauteils im Bauwerksbeton abgebildet werden.

Aus der Zusammenschau der Ergebnisse der Projekte FE 15.324/2000/FR, FE 89.0169/2005/AP und den Beobachtungen an Betonprüfkörpern, die im Rahmen des Projektes FE 15.367/2002/DRB „Prüfverfahren nach dem Performance Concept – Beton in der Expositionsklasse XF2“ im Mittelstreifen von 4-spürigen Straßen mit hohem Verkehrsaufkommen über 3 bis 4 Winterperioden der Witterung ausgesetzt waren, konnten die schadensrelevanten Unterschiede der Beanspruchung des Betons in XF2 und XF4 dargestellt werden. Auch konnten neue Erkenntnisse zum Schädigungsprozess im Bauwerksbeton infolge Frost-Tausalz-Beanspruchung in der Expositionsklasse XF2 gewonnen werden.

Das neue Prüfverfahren für Beton in der Expositionsklasse XF2, das modifizierte CDF-Verfahren XF2, wurde im Rahmen des Projektes FE 15.367/2002/DRB durch angemessene Modifikationen des bekannten CDF-Verfahrens XF4 entwickelt. Die Prüfung des Betons erfolgt mit dem neuen modifizierten CDF-Verfahren XF2, ebenso wie mit dem bekannten Verfahren XF4, im Labor. Mit Kenntnis der Beanspruchung des Bauwerksbetons aus den Projekten FE 15.324/2000/FR und FE 89.0169/2005/AP und der Beanspruchung der ausgelagerten Betonprüfkörper dieses Projekts wurde es möglich, das bekannte Verfahren XF4 durch gezielte Modifikationen so abzuschwächen, dass Beton für XF2 sicher beurteilt werden kann, ohne unrealistisch hohe Anforderungen zu stellen.

Die in ZTV-ING 3-1 getroffene Zuordnung der Bauteile zu den Expositionsklassen XF2 bzw. XF4 ist durch die Messungen im Bauwerksbeton bestätigt worden. Im Beton der Bauteile mit nicht vorwiegend

horizontaler Oberfläche (XF2), wie z. B. Widerlager, Pfeiler und Tunnelwänden, werden im Vergleich zur Wassersättigung unter Atmosphärendruck eindeutig niedrigere Sättigungsgrade beobachtet als im Luftporenbeton der Brückenkappe (XF4), obwohl kein wirksames Luftporensystem eingeführt wurden. Nur in seltenen Fällen und nur in der äußersten Randzone des Bauwerksbetons mit nicht vorwiegend horizontaler Oberfläche (XF2) wird eine Sättigung beobachtet, die der Sättigung unter Atmosphärendruck entspricht oder diese geringfügig überschreitet. Diese grundsätzlich unterschiedlichen Verhältnisse in Bereichen mit hoher Wassersättigung (XF3) und mäßiger Wassersättigung (XF1) werden durch Messungen an Schleusenbauwerken ohne tausalzhaltiges Wasser bestätigt.

Frost-Tausalzschäden können aber auch im Beton der Expositionsklasse XF2 auftreten, wie die Kombination von Auslagerungsversuchen und Messungen des elektrolytischen Widerstands des Betons zeigen. Entspricht der w/z-Wert der Betonzusammensetzung nicht ZTV-ING 3-1 und nicht DIN-Fachbericht 100, bildet sich in der obersten Randzone des Betons ein starker Feuchtegradient aus und nur dort tritt eine Schädigung auf. Solche Überschreitungen des kritischen Sättigungsgrades treten im Bauwerksbeton in der Expositionsklasse XF2 wesentlich seltener auf als in der Expositionsklasse XF4, wenn ein vergleichbarer Beton ohne Luftporen betrachtet wird.

Mit den Bauwerksmessungen und der Kombination von Auslagerungsversuchen und Messungen des elektrolytischen Widerstands im Beton wird auch die Eignung von Beton ohne Luftporen in der Expositionsklasse XF2 für Verkehrsbauwerke bestätigt. Betone ohne Luftporen sind unter Beachtung von ZTV-ING 3-1 in XF2 die wirtschaftlichere Lösung.

In Tunnelbauwerken können auch noch 100 m hinter dem Tunnelportal Frost-Tauwechsel im Beton mit derselben Häufigkeit auftreten wie im Portalbereich selbst. Erst ab rd. 200 m Abstand vom Portal scheint die Anzahl der Frost-Tauwechsel im Beton in der Tendenz abzunehmen. Die Forderung der Expositionsklasse XF2 nach ZTV-ING 3-1 für Beton zwischen den Portalbereichen von Tunneln erscheint angemessen.

Das neu entwickelte Prüfverfahren für Beton in der Expositionsklasse XF2, das modifizierte CDF-Verfahren XF2, ist ein Prüfverfahren nach dem Prinzip der Leistungsfähigkeit. Es erfasst den physikalischen Versagensmechanismus unter Frost-Tau-

salz-Beanspruchung im Beton und es bildet die reale Beanspruchung von Beton im Bauwerk ab. Die Prüfung wird im Labor durchgeführt, weshalb das modifizierte CDF-Verfahren XF2 als Prüfverfahren nach dem Lab-Performance-Concept bezeichnet wird.

Allerdings ist die Beanspruchung des Betons in der Prüfung intensiver als im Beton des Bauwerks. Sie führt zu einer höheren Schädigung des Prüfkörpers, als diese im realen Bauwerk zu erwarten ist. Dieser Zeitraffereffekt in der Prüfung ist erforderlich, um die dauerhafte Eignung des Betons innerhalb kurzer Zeit, der im Betonbau üblichen 28-Tage-Frist, beurteilen zu können. Die bekannten Einflüsse der Betonzusammensetzung auf den Frost-Tausalz-Widerstand werden mit dem Prüfverfahren abgebildet. Die Unterscheidung von geeigneten und nicht geeigneten Betonen ist möglich. Das Prüfverfahren lässt eine gute Reproduzierbarkeit erwarten.

Abnahmekriterien für das modifizierte CDF-Verfahren XF2 konnten allerdings noch nicht endgültig festgelegt werden. Hier fehlen noch weitere Untersuchungen an Betonen unterschiedlicher Zusammensetzung, damit die Beurteilung eines Betons in jedem Fall auf der sicheren Seite liegt, aber dennoch keine unrealistischen Anforderungen gestellt werden.

Zur weiteren Klärung der Reproduzierbarkeit und der Abnahmekriterien des modifizierten CDF-Tests XF2 wurde bereits ein Forschungsprojekt, FE 15.460/2008/DRB, vergeben.

Das modifizierte CDF-Verfahren XF2 weist in physikalischer Hinsicht alle Kriterien einer Lab-Performance-Prüfung auf. Einschränkungen existieren jedoch für den chemischen Schädigungsmechanismus einer Frost-Tausalz-Beanspruchung. Ob und inwieweit nicht frost- und frosttausalzbeständige Betonausgangsstoffe oder Hydratationsprodukte des Betons mit diesem Verfahren erfasst werden können, ist noch nicht geklärt. Chemische Schädigungen können im Bauwerksbeton langsamer verlaufen und ggf. nicht in der üblichen 28-Tage-Frist mit dem modifizierten CDF-Verfahren XF2 erkannt werden.

Sobald die Reproduzierbarkeit der Versuche bestätigt wird und die Abnahmekriterien angemessen festgelegt werden können, erscheint es möglich, die Prüfung von Beton für XF2 mit dem modifizierten CDF-Verfahren XF2 in den ZTV-ING 3-1 zur

Überprüfung von solchen Betonzusammensetzungen einzuführen, die mit noch nicht in der Praxis bewährten Ausgangsstoffen hergestellt werden. Der Nachweis der Grundanforderungen von ZTV-ING 3-1 und DIN-Fachbericht 100 an die Betonausgangsstoffe wird jedoch weiterhin erforderlich bleiben.

10 Literatur

- [1] DIN EN 206-1, Beton – Teil 1: Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Deutsche Fassung EN 206-1
- [2] DIN 1045-2, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität. Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1
- [3] DIN-Fachbericht 100, Beton, Zusammenstellung von DIN EN 206-1, Beton – Teil 1 und DIN 1045-2, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2 – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1. Hrsg. DIN Deutsches Institut für Normung, Berlin-Wien-Zürich: Beuth, 2. Auflage 2005
- [4] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten, Teil 3, Massivbau, Abschnitt 1, Beton (ZTV-ING 3-1, Stand 07/06), Hrsg.: Bundesanstalt für Straßenwesen. Dortmund, Verkehrsblatt, 2003
- [5] BRAMESHUBER, W., SPÖREL, F., WARKUS, J.: Europäische Bemessungsvorschriften für den Brückenbau – Beanspruchung von Betonbauwerken, Forschungsbericht F790 zum Auftrag 15.324/2000/FR des BMVBS. Institut für Bauforschung (ibac) der RWTH Aachen, 2008
- [6] BRAMESHUBER, W., SPÖREL, F., WARKUS, J.: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositionsklasse XF4. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Brücken- und Ingenieurbau. Hrsg.: Bundesanstalt für Straßenwesen. Bremerhaven: NW, Heft B 64, 2008
- [7] SETZER, M. J., SCHIEßL, P., KECK, H.-J., PALECKI, S., BRANDES, C.: Prüfverfahren nach dem Performance Concept – Beton in der Expositionsklasse XF2. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen – Brücken- und Inge-

- nieurbau. Hrsg. Bundesanstalt für Straßenwesen. Bremerhaven, NW, Heft B 56, 2007
- [8] SIEBEL, E. u. a.: Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse, Sachstandbericht. Hrsg.: Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb). Berlin-Wien-Zürich: Beuth, Heft 560, 1. Auflage 2005
- [9] FAGERLUND, G.: The Critical Degree of Saturation Method of Assessing the Freeze/Thaw Resistance of Concrete. *Materiaux et Constructions RILEM 10*, Heft 58, 1997, S. 217-229
- [10] RUCKER, P., BEDDOE, R. E., KRUS, M.: Neue Erkenntnisse zu den Transportmechanismen von Feuchte und Chlorid in Beton. In: 15. Internationale Baustofftagung (ibausil). Hrsg: F. A. Finger Institut für Baustoffe, Prof. Dr.-Ing. Jochen STARK, Bauhaus-Universität Weimar, 2003, Seite 2-0893 – 2-0903
- [11] AUBERG, R.: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton mit dem CDF- und CIF-Test. Hrsg.: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing, habil. Max J. Setzer, Universität GH Essen. Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft (Dissertation), Aachen: Shaker, Heft 6, 1999
- [12] Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton. Arbeitsgruppe Betonstraßen. Hrsg.: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, 2004
- [13] HILSDORF, H. K., KOTTAS, R.: Beanspruchung von Brückenbauwerken durch Frost und Tausalze – Messungen an Brücken. Hrsg. Universität Karlsruhe, Institut für Massivbau und Baustofftechnologie, Abteilung Baustofftechnologie. Karlsruhe, 1995
- [14] HILSDORF, H. K., KOTTAS, R.: Beanspruchung von Brückenbauwerken durch Frost und Tausalze. Vorträge der DBV-Arbeitstagung am 16.06.1993 in Wiesbaden
- [15] HENRIKSEN, C. F.: In-Situ Monitoring of Concrete Structures. Lund: Lund Institute of Technology, Division of Building Materials, Report TVBM-3064, 1995. In: Corrosion of Reinforcement: Field and Laboratory Studies for Modelling and Service Life. February 1-2, 1995, Hrsg. Tuutti. K., S. 213-226
- [16] Richtlinie für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen, Ausgabe 2001, Hrsg. Forschungsgemeinschaft für das Straßen und Verkehrswesen, FGSV, Köln: Forschungsgemeinschaft für das Straßen und Verkehrswesen, FGSV, 2001, FGSV 499
- [17] BRAMESHUBER, W., SPÖREL, F.: Messung des tiefenabhängigen Feuchtegehalts an Betonbauwerken. In: Beiträge zum Kolloquium Frostwiderstand von Beton in Labor und Praxis am 29. und 30. September 2005. Hrsg.: Verein Deutscher Zementwerke, Düsseldorf. Erschienen im Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Berlin. S. 83-90
- [18] CEN/TS: Vornorm CEN/TS 12390-9:2006-08 Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung
- [19] VERBECK, C. J., KLIEGER, P.: Studies of salt scaling of concrete. *Highway Research Board Bulletin*, Vol. 150, 1957, S. 1-13
- [20] GUSE, U., NIEMANN, U.: Gesamtauswertung der Ergebnisse des Verbundforschungsvorhabens „Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse“, 2. Entwurf des Abschlussberichts zu Auftrag V 453 des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), 2008

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

1995

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

1996

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

1997

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

1998

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

1999

- B 22: Algorithmen zur Zustandsbewertung von Ingenieurbau-
werken
Haardt € 11,50

- B 23: Bewertung und Oberflächenvorbereitung schwieriger
Untergründe
Schröder, Sczyslo € 11,00

- B 24: Erarbeitung einer ZTV für reaktionsharzgebundene Dünn-
beläge auf Stahl
Eilers, Stoll € 11,00

- B 25: Konzeption eines Managementsystems zur Erhaltung von
Brücken- und Ingenieurbauwerken
Haardt € 12,50

- B 26: Einsatzmöglichkeiten von Kletterrobotern bei der Bauwerks-
prüfung
Krieger, Rath, Berthold € 10,50

- B 27: Dynamische Untersuchungen an reaktionsharzgebundenen
Dünnbelägen
Eilers, Ritter, Stoll € 11,00

2000

- B 28: Erfassung und Bewertung von reaktionsharzgebundenen
Dünnbelägen auf Stahl
Eilers € 11,00

- B 29: Ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung der Karbo-
natisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton
Gatz, Quaas € 12,00

- B 30: Materialkonzepte, Herstellungs- und Prüfverfahren für elutions-
arme Spritzbetone
Heimbecher € 11,00

- B 31: Verträglichkeit von reaktionsharzgebundenen Dünnbelägen
mit Abdichtungssystemen nach den ZTV-BEL-ST
Eilers, Stoll € 10,50

- B 32: Das Programm ISOCORRAG: Ermittlung von Korrosivitäts-
kategorien aus Massenverlusten
Schröder € 11,50

- B 33: Bewehrung von Belägen auf Stahlbrücken mit orthotropen
Fahrbahnplatten
Eilers, Sczyslo € 17,00

- B 34: Neue reaktionsharzgebundene Dünnbeläge als Fahrbahn-
beläge auf einem D-Brücken-Gerät
Eilers, Ritter € 13,00

2001

- B 35: Bewehrung von Brückenbelägen auf Betonbauwerken
Wruck € 11,50

- B 36: Fahrbahnübergänge aus Asphalt
Wruck € 11,00

- B 37: Messung der Hydrophobierungsqualität
Hörner, von Witzhausen, Gatz € 11,00

- B 38: Materialtechnische Untersuchungen beim Abbruch der
Talbrücke Haiger
Krause, Wiggerhauser, Krieger € 17,00

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

2003

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

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

- B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Städling, Krocker € 12,00

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

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

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

2004

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

2005

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

2006

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

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

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

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

B 52: Brückenseile mit Galfan-Überzug – Untersuchung der Haftfestigkeit von Grundbeschichtungen
Friedrich, Staeck € 14,50

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

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

2007

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

B 56: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositions-kategorie XF2
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Setzer, Keck, Palecki, Schießl, Brandes € 19,50

B 57: Brandversuche in Straßentunneln – Vereinheitlichung der Durchführung und Auswertung
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Steinauer, Mayer, Kündig € 26,50

B 58: Quantitative Risikoanalysen für Straßentunnel
Sistenich € 14,50

2008

B 59: Bandverzinkte Schutzplankenholme
Schröder € 12,50

B 60: Instandhaltung des Korrosionsschutzes durch Teilerneuerung - Bewehrung
Schröder € 13,50

B 61: Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutzplankenpfosten
Schröder, Staeck € 13,00

B 62: Bewährungsnachweis von Fugenfüllungen ohne Unterfüllstoff
Eilers € 12,00

B 63: Selbstverdichtender Beton (SVB) im Straßentunnelbau
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Heunisch, Hoepfner, Pierson (†), Dehn, Orgass, Sint € 17,50

B 64: Tiefenabhängige Feuchte- und Temperaturmessung an einer Brückenkappe der Expositions-kategorie XF4
Bramshuber, Spörel, Warkus € 12,50

2009

B 65: Zerstörungsfreie Untersuchungen am Brückenbauwerk A1 Hagen/Schwerte
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Friese, Taffe, Wöstmann, Zoega € 14,50

B 66: Bewertung der Sicherheit von Straßentunneln
Zulauf, Locher, Steinauer, Mayer, Zimmermann, Baltzer, Riepe, Kündig € 14,00

B 67: Brandkurven für den baulichen Brandschutz von Straßentunneln
Blosfeld € 17,50

B 68: Auswirkungen des Schwerlastverkehrs auf die Brücken der Bundesfernstraßen – Teile 1-4
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Kaschner, Buschmeyer, Schnellenbach-Held, Lubasch, Grünberg, Hansen, Liebig, Geißler € 29,50

B 69: Berücksichtigung der Belange behinderter Personen bei Ausstattung und Betrieb von Straßentunneln
Wagner, Grossmann, Hintzke, Sieger € 18,50

B 70: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen
Tauscher € 14,50

Alle Berichte sind zu beziehen beim:

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

Dort ist auch ein Kompletverzeichnis erhältlich.