

**Schädigung von XF1- und XF2-  
Betonen im CIF- und CDF-Test  
– Auswertung vorhandener  
Versuche und Literaturübersicht**

T 3175

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2008

ISBN 978-3-8167-7794-6

Vervielfältigung, auch auszugsweise,  
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

**Fraunhofer IRB Verlag**

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

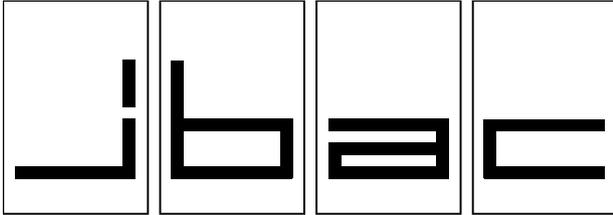
70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

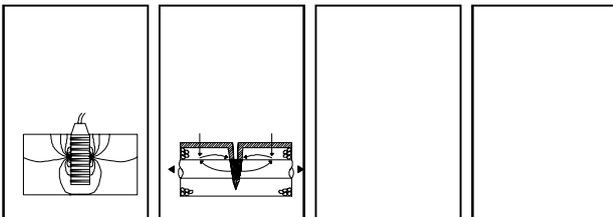
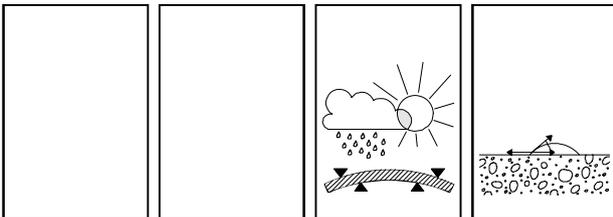
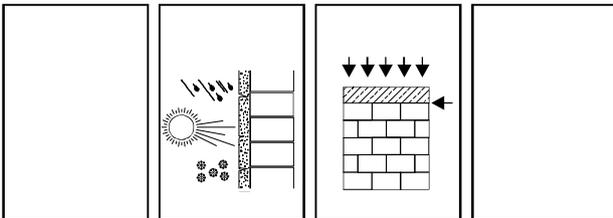
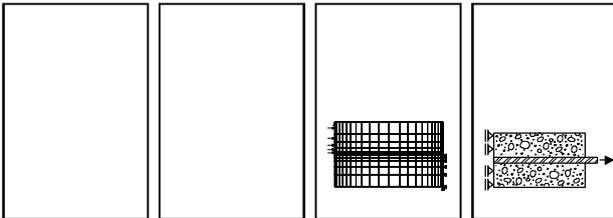
Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail [irb@irb.fraunhofer.de](mailto:irb@irb.fraunhofer.de)

[www.baufachinformation.de](http://www.baufachinformation.de)



INSTITUT FÜR BAUFORSCHUNG AACHEN



FORSCHUNG · ENTWICKLUNG  
 ÜBERWACHUNG  
 PRÜFUNG · BERATUNG

RHEINISCH-  
 WESTFÄLISCHE  
 TECHNISCHE  
 HOCHSCHULE  
 AACHEN

**RWTH**  
 AACHEN  
 UNIVERSITY

## Forschungsbericht F 7050

Schädigung von XF1- und  
 XF2-Betonen im CIF- und CDF-Test -  
 Auswertung vorhandener Versuche  
 und Literaturübersicht

Cv/Fk

0. Ausfertigung

## **THEMA**

Schädigung von XF1- und XF2-Betonen  
im CIF- und CDF-Test -  
Auswertung vorhandener Versuche  
und Literaturübersicht

**Forschungsbericht Nr.**

F 7050  
vom 08.02.2008

**Projektbearbeitung**

Prof. Dr.-Ing. W. Brameshuber

Dipl.-Ing. V. Cvetković

Dipl.-Ing. F. Spörel

**Auftraggeber/  
Förderer**

Deutsches Institut für Bautechnik (DIBt)

Kolonnenstr. 30L  
10829 Berlin

**Auftragsdatum  
Aktenzeichen**

04.01.2007

ZP 52-5-7.276-1258/07

Dieser Bericht umfasst    Seiten, davon    Textseiten.

Soweit Versuchsmaterial nicht verbraucht ist, wird es nach 4 Wochen vernichtet. Eine längere Aufbewahrung bedarf einer schriftlichen Vereinbarung.

## INHALTSVERZEICHNIS

Seite

1	PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG .....	1
2	STAND DER WISSENSCHAFT UND TECHNIK .....	2
2.1	Schädigung von Beton durch Frost-Tau-Wechsel.....	2
2.1.1	Schädigungsarten .....	2
2.1.2	Schädigungsmechanismen .....	2
2.1.3	Schädigungsrelevante Einflüsse .....	3
3	STAND DER NORMUNG .....	4
4	LABORPRÜFVERFAHREN .....	6
4.1	Allgemeines .....	6
4.2	CDF-Test und CIF-Test .....	6
4.2.1	Allgemeines .....	6
4.2.2	Differenzierung zwischen CDF- und CIF-Test.....	7
4.2.3	Prüfkörper .....	8
4.2.4	Durchführung der Prüfung .....	8
4.2.5	Messverfahren .....	9
4.2.6	Abnahmekriterien.....	10
4.3	Übertragbarkeit auf Praxisverhältnisse .....	11
4.4	Alternative Prüfansätze .....	13
5	ERGEBNISSE.....	13
5.1	Vorgehensweise und Kriterien bei der Auswertung .....	13
5.2	CIF-Test.....	16
5.3	CDF-Test .....	17
6	ZUSAMMENFASSUNG .....	18
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN .....	20
8	LITERATUR.....	21
	Tabellen .....	A1-A9
	Bilder.....	B1-B2

## 1 PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG

Betonbauteile müssen für ihre geplante Lebensdauer einen ausreichenden Widerstand gegen die zu erwartenden Umwelteinflüsse aufweisen. Grundsätzlich gehört dazu auch der Widerstand gegen Frost- und Frost-Taumittel-Angriff. Für Betone, die den Anforderungen der Expositionsklassen XF1 oder XF2 nach EN 206-1:2001-07 /DIN 01a/ bzw. DIN 1045-2:2001-07 /DIN 01b/ genügen müssen, gibt es zur Zeit kein geeignetes Prüfverfahren, mit dem die Eignung des Frost- oder Frost-Taumittel-Widerstands für diese Beanspruchungen nachgewiesen werden kann. Das gleiche gilt für Sonderbetone mit von der Norm abweichenden Zusammensetzungen, die für einen Einsatz unter XF1- oder XF2-Umgebungsbedingungen – also bei mäßiger Wassersättigung – vorgesehen sind. Gängige Laborprüfverfahren wie das Würfelprüfverfahren /DIN06a/ oder der CIF- bzw. CDF-Test /SET04, SET96/ prüfen bei hoher Sättigung und bilden eine deutlich schärfere Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung ab, als diese Betone unter Praxisbedingungen erfahren. Im Rahmen von Zulassungsverfahren wird derzeit in Ermangelung eines geeigneten Prüfverfahrens auf das Würfelprüfverfahren zurückgegriffen. Üblicherweise werden die Prüfungen der Sonderbetone dabei mit einem Wasserzementwert von 0,60 durchgeführt, also i. d. R. einem höheren Wert als dem vom Antragssteller geplanten. Im Hinblick auch auf diese Problematik wurden erste Versuche zur Bewertung von Betonen für die Expositionsklasse XF2 mit einem modifizierten CDF-Verfahren in /SET07/ durchgeführt (s. auch Kapitel 4.4).

Für XF3- oder XF4-Betone wird in Abhängigkeit vom Prüfverfahren die innere Schädigung oder die Abwitterung beim CIF- bzw. CDF-Test nach i. d. R. 28 Frost-Tau-Wechseln als Bewertungskriterium betrachtet. Für XF1- oder XF2-Betone ist eine Schädigung im CIF- bzw. CDF-Test bereits zu einem früheren Zeitpunkt zu erwarten, da diese Betone meist ein Porensystem mit einer höheren Kapillarporosität besitzen. Bei einer Frostbeanspruchung unter mäßiger Sättigung haben diese Betone dadurch zwar meist einen noch ausreichenden Expansionsraum für das gefrierende Wasser, allerdings kann aufgrund der Porosität auch eine schnellere Flüssigkeitsaufnahme und damit auch eine frühere Frostschädigung eintreten. Da unter XF1- und XF2-Bedingungen für entsprechend zusammengesetzte Betone eine langfristige kritische Sättigung aber per Definition ausgeschlossen ist, ist für grenzwertige Zusammensetzungen entscheidend, ob diese trotzdem unter XF1- und XF2-Randbedingungen eine kurzfristige kritische Sättigung erfahren können. Dies wäre nur möglich, wenn in diesen Expositionsklassen, bei denen unter Praxisbedingungen ein begrenztes Wasserangebot z. B. in Form von Spritzwasser oder Sprühnebel vorliegen kann, bedingt durch die Betonzusammensetzung in kurzer Zeit entsprechend viel Flüssig-

keit aufgenommen wird. Dies müsste sich im Labormaßstab in einer schnelleren Schädigung unter den deutlich schärferen Randbedingungen im CIF- oder CDF-Test bemerkbar machen.

Ein möglicher Ansatz, mit den zur Zeit angewendeten Prüfverfahren zu einer Aussage hinsichtlich einer Beurteilung von XF1- und XF2-Betonen zu kommen, liegt daher in der Betrachtung der Geschwindigkeit, mit der die Betone eine Schädigung erfahren. Dieser Ansatz wird im vorliegenden Forschungsbericht durch Auswertung von bereits vorhandenen Daten verfolgt. Ziel der Untersuchungen ist es, eigene Ergebnisse und Literaturdaten von CIF- und CDF-Tests an XF1- und XF2-Betonen und Betonen, die diesen Anforderungen nicht genügen, im Hinblick auf die Geschwindigkeit der eintretenden Schädigung auszuwerten. Es soll ein Beitrag zur Klärung der Frage geleistet werden, ob für XF1- und XF2-Betone bereits eine geringere Anzahl an Frost-Tau-Wechseln für ein Erreichen der Grenzwerte der inneren Schädigung beim CIF-Test bzw. der Abwitterung beim CDF-Test charakteristisch ist. Zur Abgrenzung und zum Vergleich sollen auch Betone in die Auswertung einbezogen werden, die die Anforderungen an die Zusammensetzung entsprechend einer XF1- oder XF2-Exposition nicht erfüllen.

## **2 SCHÄDIGUNG VON BETON DURCH FROST-TAU-WECHSEL**

### **2.1 Schädigungsarten**

Unter Frostbeanspruchung mit und ohne Taumittleinwirkung lassen sich zwei Schädigungsarten beobachten: das oberflächliche Abwittern von Beton sowie die innere Gefügeschädigung, die sich durch Risse und i. d. R. eine Schwächung der Kontaktzone zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskörnung äußert. Beide Schädigungen können unabhängig voneinander auftreten.

### **2.2 Schädigungsmechanismen**

Nach Erkenntnissen von Setzer /SET97a, SET99/ und Fagerlund /FAG99a, FAG99b, FAG00/ hat ein Frost- bzw. Frost-Taumittel-Angriff nur dann schädigende Auswirkungen, wenn zumindest lokal ein kritischer Wassersättigungsgrad im Beton vorhanden ist. Bei der Sättigung von Beton kann grundsätzlich zwischen der kapillaren Sättigung unter isothermen Bedingungen und einer künstlichen Flüssigkeitsaufnahme unter wiederholten Frost-Tau-Wechseln unterschieden werden. Setzer erklärt die künstliche Sättigung mit dem sog. Mikroislinsenmodell (z. B. /SET97b/), das eine Umverteilung von nicht gefrorenem Was-

ser im Beton von den kleineren hin zu größeren Poren auslöst und Schwinderscheinungen im Gelporenbereich bewirkt. Aufgrund des entstehenden Druckunterschieds kann die außen anstehende Flüssigkeit in den Beton gesaugt werden. Die Gefügezerstörung setzt ein, wenn durch die Volumenzunahme des gefrierenden Wassers Spannungen auftreten, die die Zugfestigkeit des Betons überschreiten. Abhängig von der Sättigungsgeschwindigkeit können frostinduzierte Schäden auch bereits nach einer geringen Anzahl an Frost-Tau-Wechseln auftreten. Betone, die gemäß den Mindestanforderungen der Expositionsklasse XF1 oder XF2 zusammengesetzt sind, haben durch die höheren zulässigen Wasserzementwerte zumeist eine höhere Kapillarporosität als vergleichbare Betone für die Expositionsklasse XF3 oder XF4 und erreichen einen kritischen Sättigungsgrad potentiell schneller, wenn ein entsprechendes Feuchtigkeitsangebot vorliegt.

Bei gleichzeitigem Angriff durch Taumittel treten darüber hinaus lösende chemische Schädigungsprozesse auf, die hauptsächlich die Betonrandzone betreffen. Abhängig von der Betonzusammensetzung können sich dabei der Karbonatisierungsgrad und die damit verbundenen chemischen Umwandlungsvorgänge massiv auf die Abwitterung auswirken (vgl. /STA94/, /STA97a/, /AUB99/).

## **2.3 Schädigungsrelevante Einflüsse**

Bei der Schädigung von Beton spielen verschiedene Aspekte eine Rolle. Die wichtigsten schädigungsrelevanten Einflussgrößen sind auf der Widerstandsseite die Betonzusammensetzung (z. B. Zementart und -gehalt, Luftporengehalt und -verteilung, Zugabe von Betonzusatzstoffen und -zusatzmitteln, Gesteinskörnung), technologische Einflüsse (z. B. Wasserzementwert, Herstellung, Transport, Einbau, Verdichtung, Nachbehandlung) und auf der Einwirkungsseite umweltbedingte Faktoren (z. B. Temperatur, Feuchtigkeitsangebot, chemischer Angriff beispielsweise durch Taumittel).

Die Betonzusammensetzung muss sowohl die konstruktiven Erfordernisse erfüllen als auch die Beständigkeit eines Betonbauteils gegenüber den zu erwartenden Umwelteinflüssen gewährleisten. Die Dauerhaftigkeit wird i. d. R. durch Mindestanforderungen an die Zusammensetzung sichergestellt, die in Normen und anderen technischen Regelwerken festgelegt sind (z. B. in EN 206-1 /DIN01a/, DIN 1045-2 /DIN01b/ oder ZTV-W LB 215 /ZTV04/). Grundlegend für einen hohen Widerstand gegenüber einer Frost- bzw. Frost-Taumittel-Belastung ist die Verwendung von frostbeständigen Gesteinskörnungen.

Der Einfluss der Zementart auf den Frostwiderstand macht sich hauptsächlich durch die unterschiedliche Porenstruktur des Betons bemerkbar. Bei reinem Frostangriff spielt die Kapillarporosität eine entscheidende Rolle. Neben dem Wasserzementwert und der Nachbehandlung bestimmen auch die Mahlfineinheit, die Hydratationsgeschwindigkeit und die Zementart die Ausbildung der Porenstruktur. Beispielsweise zeigen CEM III-Betone mit einem hohen Hüttensandanteil bei gleichem Hydratationsgrad eine dichtere Struktur im Kernbereich als CEM I-Betone (vgl. z. B. /AUB99/). Der Hydratationsgrad und die Mikrostruktur des Betons als Ganzes sind für den Frost-Taumittel-Widerstand weniger entscheidend als die Eigenschaften der nur wenige Millimeter dünnen Oberflächenschicht (vgl. z. B. /STA97a/). Abhängig von der Zementart wirkt sich die Karbonatisierung unterschiedlich auf die Betonoberfläche aus. Während bei CEM I-Betonen der Unterschied bei der Porengrößenverteilung zwischen der karbonatisierten Oberfläche und dem nicht karbonatisierten Kern nur gering ist, zeigen CEM III-Betone in der karbonatisierten oberflächennahen Schicht eine ausgeprägte Kapillarporosität gegenüber einer dichten Struktur im Kernbeton (vgl. z. B. /AUB99/). In der Betonrandzone steigt damit die Menge des makroskopisch gefrierbaren Wassers und es stellt sich außerdem eine von Kern abweichende Chloridverteilung ein. Bei Laborprüfungen zum Frost-Taumittel-Widerstand zeigt sich dieser strukturelle Unterschied in einer stärkeren anfänglichen Abwitterung und anschließendem degressivem Schädigungsverlauf. Stark und Ludwig /STA97a/ sowie Auberg /AUB99/ konnten nachweisen, dass der Übergang zum degressiven Kurvenverlauf der Abwitterung während des CDF-Tests mit der Karbonatisierungstiefe der getesteten CEM III-Betone korreliert. Der Wechsel von der stärkeren Anfangsabwitterung zum moderateren weiteren Schädigungsfortschritt fällt mit dem Übergang der Abwitterung der karbonatisierten Betonrandzone zum nicht karbonatisierten Kernbereich zusammen. Umgekehrt führt die Karbonatisierung bei CEM I-Betonen zu einer etwas dichteren Randschicht, die ähnlich einer Schutzschicht einen anfangs verzögerten Schädigungsverlauf bewirkt. Nachdem diese Schicht abgewittert ist, setzt eine verstärkte Oberflächenschädigung ein.

### **3 STAND DER NORMUNG**

In der europäischen Betonnorm EN 206-1:2001-07 /DIN01a/ und den dazugehörigen Anwendungsregeln DIN 1045-2:2001-07 /DIN01b/ sind bezüglich der Frostbeanspruchung vier Expositionsklassen beschrieben, die sich im Hinblick auf Feuchtigkeitsangebot und Taumittleinwirkung unterscheiden. Die Expositionsklassen XF1 bis XF4 spiegeln in vereinfachter Form die unterschiedlichen Angriffsgrade wider, die bei mäßiger und hoher Wassersättigung sowohl mit als auch ohne Taumittleinwirkung auftreten können (vgl. Ta-

belle A1, Anhang A). Die Einstufung eines Betons hinsichtlich des Frost- bzw. Frost-Taumittel-Widerstands erfolgt über seine Zusammensetzung, da abhängig von der Expositions-klasse unterschiedliche Anforderungen u. a. an die Zementart, den Mindestzement-gehalt, die Gesteinskörnung, den Wassorzementwert, die Mindestfestigkeitsklasse und ggf. an den Mindestluftgehalt gestellt werden (vgl. Tabelle A2). Dieses Vorgehen wird *beschreibender Ansatz* oder auch *design concept* genannt. Die Beurteilung der Eignung eines Betons für eine Expositions-klasse hängt bei diesem Verfahren einzig von der Zusam-mensetzung ab. Das design concept beruht auf jahrzehntelanger Praxiserfahrung mit einer begrenzten Auswahl an Betonen und Betonausgangsstoffen. Für Betone, Betonausgangs-stoffe und Kombinationen von Betonausgangsstoffen, für die Langzeiterfahrungen fehlen, und die daher normativ nicht erfasst sind, müssen die erforderlichen Eigenschaften durch geeignete Prüfungen nachgewiesen werden.

Der Ansatz des sog. (*lab*) *performance concept* beruht auf dem Nachweis der geforderten Eigenschaften für die zu erwartende Exposition mittels einer Kurzzeitprüfung. Dabei wer-den im Labor Umweltverhältnisse simuliert, die im Zeitraffer zu einer beschleunigten Alte-rung bzw. Schädigung des Betons führen und damit eine Prognose über seine Dauerhaf-tigkeit ermöglichen. Die im Labor nachgestellten Umweltbedingungen sollen dem Beton-angriff, der der entsprechenden Expositions-klasse zugrunde liegt, möglichst nahekommen und dabei die zulässigen Extrema abdecken. Dieser Methodik wird erstmals in Anhang J der EN 206-1:2001-07 /DIN01a/ in Grundzügen Rechnung getragen. Die aktuelle Entwick-lung deutet darauf hin, dass zukünftig vermehrt auch eine Kombination aus Mindestanfor-derungen an die Betonzusammensetzung und zusätzlichen Frost- und Frost-Taumittel-Prüfungen gefordert werden könnte, wie das bereits z. T. in den ZTV-W LB 215 /ZTV04/ vorgesehen ist.

Für die Laborprüfung des Frost- und Frost-Taumittel-Widerstands werden in Deutschland i. d. R. Prüfverfahren genutzt, die in der Vornorm DIN CEN/TS 12 390-9:2006-08 /DIN06a/ und der technischen Spezifikation CEN/TR 15 177:2006-06 /DIN06b/ beschrieben sind. In DIN CEN/TS 12 390-9 sind drei Verfahren aufgeführt, mit denen die Oberflächenschädi-gung in Form von Abwitterungen erfasst wird (Plattenprüfverfahren, Würfelprüfverfahren, CF-/CDF-Prüfverfahren), während in CEN/TR 15 177 drei Prüfverfahren zur Messung der inneren Gefügestörung festgelegt sind (Balkenprüfverfahren, Plattenprüfverfahren, CIF-Prüfverfahren).

Im Rahmen von allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen wird in Deutschland derzeit noch bevorzugt das Würfelprüfverfahren angewandt, da damit bereits langjährige Erfah-rungen vorhanden sind und eine entsprechend breite Basis an Vergleichsdaten vorliegt.

Bei Betonbauteilen, die den speziellen Anforderungen der ZTV-W unterliegen, ist die Prüfung des Frost- bzw. Frost-Taumittel-Widerstands überwiegend mit dem CIF- bzw. dem CDF-Test vorgesehen (vgl. /ZTV04, /BAW04/).

## **4 LABORPRÜFVERFAHREN**

### **4.1 Allgemeines**

Zur Bestimmung des Frost- und Frost-Taumittel-Widerstands wurden unterschiedliche Prüfverfahren entwickelt. Diese Verfahren unterscheiden sich in der Art der Probenpräparation (Nachbehandlung, Vorbereitung der Prüfkörper), der Schadenserzeugung (z. B. Feuchte- und Temperaturbelastung) und der Schadensaufnahme (z. B. Abwitterung, Längenänderung, Festigkeitsverlust). Eine vergleichende Darstellung der international gebräuchlichsten Frostprüfverfahren kann z. B. /AUB99/ entnommen werden. Der Schwerpunkt der Betrachtungen liegt im Folgenden auf dem CDF- bzw. CIF-Test.

Der wesentliche Unterschied zwischen dem Würfelprüfverfahren und dem CDF- bzw. CIF-Test ist die Prüfanordnung. Beim Würfelprüfverfahren werden die Prüfkörper während der Frost-Tau-Zyklen vollständig in die Prüflösung untergetaucht, wodurch sie allseitig gefrieren können. Die Prüfkörper beim CIF- bzw. CDF-Test haben hingegen nur an ihrer Unterseite Kontakt zur Prüflüssigkeit, was im Gegensatz zum Würfelprüfverfahren zu einem den Praxisbedingungen entsprechenden einachsigen Feuchtigkeits- und Wärmetransport führt. Beide Prüfverfahren prüfen unter hoher Wassersättigung, was dem Angriff entspricht, der den Expositionsklassen XF3 und XF4 zugrunde liegt. Durch die unterschiedliche Belastungsintensität bei mäßiger und hoher Wassersättigung gibt es mit diesen Verfahren keine direkte Möglichkeit, den Frostwiderstand von Betonen, die den Anforderungen der Expositionsklassen XF1 oder XF2 genügen müssen, für diese Beanspruchung zu prüfen.

### **4.2 CDF-Test und CIF-Test**

#### **4.2.1 Allgemeines**

Der **CDF-Test** (Capillary Suction of Deicing Chemicals and Freeze Thaw Test) dient der Beurteilung des Frost-Taumittel-Widerstands von Beton. Maßgeblich ist die Oberflächenschädigung, die durch die Messung der Abwitterungsmenge erfasst wird. Üblicherweise wird als Prüflösung 3 %-ige NaCl-Lösung eingesetzt. Bei der Entwicklung des Prüfverfahrens im RILEM TC 117 war unter der Bezeichnung CF-Test anfänglich auch die Messung

der Abwitterung bei reinem Frostangriff eingeschlossen. Bei ansonsten gleicher Prüfungsdurchführung wird dabei anstelle der Salzlösung demineralisiertes Wasser verwendet. Dieser Ansatz wurde aufgrund der verminderten Präzision durch die geringere Abwitterungsrate bei reiner Frostbeanspruchung im Vergleich zum kombinierten Frost-Taumittel-Angriff im RILEM TC 117 nicht weiter verfolgt /SIE05/, das Verfahren ist aber in /DIN06a/ wieder aufgenommen worden. Um zu einer größeren Aussagegenauigkeit des CF-Tests zu kommen, wurde die Prüfdauer auf 56 FTW heraufgesetzt.

Zur Erfassung der inneren Gefügezerstörung bei reinem Frostangriff wurde aufbauend auf dem CDF-Test der **CIF-Test** (Capillary Suction, Internal Damage and Freeze Thaw Test) entwickelt. Die Prüfung erfolgt wie beim CF-Test mit demineralisiertem Wasser, im Gegensatz dazu ist das maßgebende Prüfkriterium allerdings die innere Schädigung, welche über den relativen dynamischen E-Modul bestimmt wird. Als zusätzliche Kriterien werden die Feuchtigkeitsaufnahme und die Oberflächenabwitterung gemessen. In der Prüfvorschrift des RILEM TC 176 zum CIF-Test /SET04/ wird empfohlen, auch beim CDF-Test zusätzlich zur Abwitterung auch die Feuchtigkeitsaufnahme und die innere Schädigung zu bestimmen. Bei beiden Prüfverfahren können sämtliche Messungen am selben Prüfkörper erfolgen.

#### 4.2.2 Differenzierung zwischen CDF- und CIF-Test

Eine detaillierte Beschreibung des CDF- bzw. CIF-Tests findet sich in /SET96/ bzw. /SET04/, die deutsche Übersetzung kann z. B. /SET06a/ bzw. /SET06b/ entnommen werden. Beide Prüfverfahren zeichnen sich durch eine gute Wiederhol- und Vergleichspräzision aus, die in mehreren Ringversuchen ermittelt wurden (vgl. /AUB99, HAR93/, GEI96/). Da CIF- und CDF-Test die gleiche Prüfmethodik nutzen, bezieht sich die nachstehende Beschreibung auf beide Prüfverfahren. Unterschiede bestehen lediglich in folgenden Punkten:

- Verwendung unterschiedlicher Prüflösungen (CIF-Test: demineralisiertes Wasser; CDF-Test: 3-%ige NaCl-Lösung).
- Maßgebendes Prüfkriterium (CIF-Test: Messung der Ultraschalllaufzeit zur Bestimmung des relativen dynamischen E-Moduls, zusätzliche Messung der Wasseraufnahme; CDF-Test: Bestimmung der Abwitterung).

### 4.2.3 Prüfkörper

Die Prüfung mittels CIF- bzw. CDF-Test kann sowohl an eigens für den Test hergestellten Standardprüfkörpern als auch an verschieden geformten Betonerzeugnissen und Bauteilproben durchgeführt werden. Zur Kompensation von Materialstreuungen sollen 5 Prüfkörper mit einer zu prüfenden Gesamtfläche von mindestens 0,08 m<sup>2</sup> geprüft werden. Die Standardprüfkörper müssen je nach den zugrunde gelegten Richtlinien Abmessungen von 140 · 150 · 70 mm<sup>3</sup> /DIN06a/ aufweisen oder dürfen auf 110 · 150 · 70 mm<sup>3</sup> /BAW04, SET96, SET04/ reduziert werden. Der Frost- bzw. Frost-Taumittel-Angriff erfolgt nur über eine Seite des Prüfkörpers. Die zu prüfende Seitenfläche wird bei der Herstellung parallel zur Einfüllrichtung gegen eine unbehandelte PTFE-Platte geschalt, um einen möglichen Einfluss des Trennmittels auf den Frost- bzw. Frost-Taumittel-Widerstand ausschließen zu können.

### 4.2.4 Durchführung der Prüfung

Nach der Herstellung schließt sich eine dreigeteilte Vorlagerung an:

- 1 Tag in der Schalungsform,
- 6 Tage Nachbehandlung unter Wasser bei 20 °C,
- 21 Tage Rücktrocknung bei (20 ± 2) °C und (65 ± 6) % rel. Luftfeuchte (Normalklima 20/65 nach DIN 50 014:1985-07 /DIN85/).

Zur Verhinderung von Seitenabwitterungen bei der Befrostung werden die Prüfkörper während der Trockenlagerung seitlich mit aluminiumkaschiertem Butylkautschukband oder lösemittelfreiem Epoxidharz abgedichtet.

Nach der Rücktrocknung folgt die 7-tägige Hauptlagerung. Dabei werden die Prüfkörper mit der PTFE-geschalteten Prüffläche nach unten in die Prüfbehälter auf 10 mm hohe Abstandhalter gelegt und soviel Prüflösung eingefüllt, dass die Prüffläche etwa 5 mm tief eingetaucht ist. Aufgrund dieser Prüfanordnung wird ein reproduzierbarer, materialspezifischer Sättigungsgrad durch kapillares Saugen unter isothermen Bedingungen erreicht /SET94/.

Die Belastung der Prüfkörper durch definierte Frost-Tau-Zyklen beginnt im Alter von 35 Tagen und erfolgt in einer speziellen Klimatruhe. Die Prüfbehälter werden wie bei der

Hauptlagerung bestückt und in ein Temperierbad gehängt. Über die Prüfflüssigkeit wird der Temperaturverlauf aus dem Temperierbad an die Betonprüfkörper übertragen. Damit wird neben dem einachsigen Feuchtetransport während der Frost-Tau-Wechsel (FTW) auch ein eindimensionaler Wärmefluss sichergestellt.

Ein FTW dauert 12 Stunden, so dass pro Tag zwei Zyklen stattfinden können, die dem nachstehenden Verlauf folgen:

- Absenkung der Temperatur von +20 °C auf -20 °C innerhalb von 4 Stunden,
- 3 Stunden Haltezeit bei -20 °C,
- Erhöhung der Temperatur von -20 °C auf +20 °C innerhalb von 4 Stunden,
- 1 Stunde Haltezeit bei +20 °C.

Somit ist die Abkühl- und Auftaurate auf 10 K/h festgelegt. Die Abweichungen von der Soll-Temperaturkurve sollen nicht größer als  $\pm 0,5$  K sein, so dass zur Überprüfung die Ist-Temperatur in der Kühlflüssigkeit auf der Behälterunterseite gemessen wird.

#### **4.2.5 Messverfahren**

Im Temperaturbereich zwischen +15 °C und +20 °C können die jeweiligen Messungen zur Überprüfung der Betonschädigung erfolgen, wobei ein Abstand von 4 bis maximal 6 FTW eingehalten werden sollte, um den Schädigungsverlauf über die Versuchsdauer zuverlässig charakterisieren zu können. Die Messungen zu den jeweiligen Prüfterminen umfassen beim CIF-Test in dieser Reihenfolge:

- die Oberflächenabwitterung,
- die Feuchtigkeitsaufnahme,
- die Ultraschalllaufzeit zur Ermittlung der relativen inneren Gefügeschädigung.

Beim CDF-Test ist nur die Bestimmung der Abwitterung vorgesehen /DIN06a, SET96/, es wird aber empfohlen, ergänzend auch die Messung der Ultraschalllaufzeit und die Feuchtigkeitsaufnahme durchzuführen /SET04/.

Für die Bestimmung der Oberflächenabwitterung wird der Prüfbehälter in ein Ultraschallbad eingehängt und 3 Minuten lang beschallt. Die noch an der Prüffläche anhaftenden Partikel werden dadurch abgelöst und fallen in die Prüflösung. Im Anschluss wird diese filtriert, das Filtrat für 24 Stunden bei 105 °C getrocknet und nach der Abkühlung gewogen.

Die Feuchtigkeitsaufnahme wird durch Wägung bestimmt und errechnet sich aus der Massedifferenz zwischen dem trockenen Prüfkörper vor Beginn der Hauptlagerung und dem mit Prüflüssigkeit beaufschlagten Prüfkörper zu festgelegten Prüfterminen während des kapillaren Saugens und der FTW.

Aussagen über die Gefügeschädigung im Beton durch die wiederholten FTW können durch die Änderung des relativen dynamischen E-Moduls gemacht werden. Dafür wird die Messung der Ultraschalllaufzeit angewandt, die vor Beginn der Befrostung und zu den jeweiligen Prüfterminen während der FTW erfolgt. Die Prüfkörper werden in ein Messbecken eingehängt und die Ultraschalllaufzeit wird in Quer- und Längsrichtung in zwei genau definierten Achsen der Prüfkörper gemessen. Aus der Ultraschalllaufzeit und der Prüfkörpergeometrie kann der relative dynamische E-Modul bestimmt werden.

#### 4.2.6 Abnahmekriterien

Das Kriterium für den Frost-Taumittel-Widerstand bei Prüfung mit dem **CDF-Test** ist die Oberflächenabwitterung nach 28 FTW in  $\text{g}/\text{m}^2$ . Sie soll nach /SET96, DIN06a und BAW04/  $1.500 \text{ g}/\text{m}^2$  nicht überschreiten. Die Grundlagen dieser Festlegung können /SET94/ entnommen werden.

Die Bewertung des Frostwiderstands mit dem **CIF-Test** erfolgt anhand der Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls. Je nach zugrunde gelegtem Regelwerk gilt ein Beton unter hoher Wassersättigung (Expositionsklasse XF3) als frostbeständig, wenn der relative dynamische E-Modul bezogen auf den Ausgangswert der ungeschädigten Probe nach 56 FTW (/DIN06b/), mindestens 28 FTW (/BAW04/) bzw. einer zu vereinbarenden, den Praxisanforderungen angepassten Anzahl von FTW (/SET04/) 75 % (/BAW04/) bzw. 80 % (/SET04/) nicht unterschreitet. Eine Übersicht kann Tabelle 1 entnommen werden.

**Tabelle 1:** Maßgebende und zusätzliche Abnahmekriterien unterschiedlicher Regelwerke zum CIF-Test und zum CDF-Test

Norm oder Richtlinie	CIF-Test (XF3)		CDF-Test (XF4)	
	RDM <sup>1)</sup>	Abwitterung <sup>2)</sup>	Abwitterung <sup>1)</sup>	RDM <sup>2)</sup>
1	2	3	4	5
RILEM Recommendation zum CIF-Test /SET04/	80 % nach n FTW <sup>3)</sup>	-	-	-
RILEM Recommendation zum CDF-Test /SET96/	-	-	≤ 1.500 g/m <sup>2</sup> nach 28 FTW	-
DIN-Fachbericht CEN/TR 15177:2006-06 /DIN06b/	Beurteilung <sup>4)</sup> nach 56 FTW	-	-	-
DIN CEN/TS 12390-9:2006-08 /DIN06a/	-	-	≤ 1.500 g/m <sup>2</sup> nach 28 FTW <sup>5)</sup>	-
BAW-Merkblatt „Frostprüfung“ /BAW04/	75 % nach ≥ 28 FTW	≤ 1.000 g/m <sup>2</sup> nach 28 FTW	≤ 1.500 g/m <sup>2</sup> nach 28 FTW	75 % nach ≥ 28 FTW

- 1) maßgebendes Abnahmekriterium
- 2) zusätzliches Abnahmekriterium
- 3) Anzahl der FTW ist zu vereinbaren
- 4) kein Grenzwert angegeben
- 5) gilt für CF- und CDF-Test

### 4.3 Übertragbarkeit auf Praxisverhältnisse

Ziel von Frost-Laborprüfungen ist eine möglichst genaue Prognose, ob ein Betonbauteil während der geplanten Lebensdauer einen ausreichenden Widerstand gegenüber einem Frost- bzw. Frost-Taumittel-Angriff aufweist. Die Diskrepanz zwischen den komplexen, variierenden Umweltbedingungen, denen ein Beton in der Praxis ausgesetzt sein kann, und der möglichst exakten Vorgabe von Randbedingungen, die zur reproduzierbaren Durchführung von Laborprüfungen notwendig sind, erschwert die Übertragbarkeit von Laborergebnissen auf die Praxis in hohem Maße. Intensiv mit dieser Problematik beschäftigt sich u. a. eine Arbeitsgruppe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb), die mit dem Sachstandsbericht „Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse“ /SIE05/ einen umfassenden Überblick über die relevanten Aspekte gibt.

Da Laborprüfungen stets vereinfachende Konventionen sind, die nicht die gesamte Bandbreite der natürlichen Umweltbedingungen wiedergeben können, ist eine vollständige Abbildung der im Einzelfall vorliegenden Einflüsse kaum möglich. Die Berücksichtigung der relevanten Faktoren wie Feuchtigkeitsangebot, Minimaltemperatur, Gefrierate, Häufigkeit und Dauer der Frost-Tau-Wechsel, Vorliegen von Taumitteln usw. bezieht sich entsprechend immer nur auf einen kleinen Ausschnitt der möglichen Umweltbelastungen. Jeder

dieser Faktoren kann in der Praxis mehr oder weniger stark ausgeprägt sein und wird selten genau mit den Randbedingungen der Laborprüfung übereinstimmen. Darüber hinaus werden eine Reihe von Maßgaben definiert (etwa Nachbehandlungsart und -dauer, Sättigungsgrad, Prüfalter), die zwar eine einheitliche Prüfung und damit eine möglichst hohe Präzision gewährleisten sollen, gleichzeitig aber weder die technologischen Praxiseinflüsse (z. B. Transport, Einbau, Verdichtung, Nachbehandlung) noch die unterschiedliche Erhärtungscharakteristik verschiedener Betone berücksichtigen. Den üblichen Laborprüfverfahren ist gemeinsam, dass die Prüfung i. d. R. in einem Betonalter von 28 Tagen beginnt. Für einen ausreichenden Frost- bzw. Frost-Taumittel-Widerstand ist die Dichtheit des Gefüges sowie die Festigkeit zum Zeitpunkt der ersten Befrostung entscheidend. CEM III-Betone und flugaschehaltige Betone bilden bei gleichem Hydratationsgrad ein wesentlich dichteres Porengefüge mit vermehrter Gelporosität und einem geringeren Anteil an Kapillarporen als CEM I-Betone aus, erhärten allerdings wesentlich langsamer. Aufgrund des kurzen Vorlagerungszeitraums bei Laborprüfverfahren erreichen sie bis zum Prüfbeginn einen geringeren Hydratationsgrad und damit eine entsprechend geringere Gefügedichtheit und Festigkeit als reine CEM I-Betone (vgl. etwa /LUD94, VIR90/). Dies hat zur Folge, dass diese Betone aufgrund des frühen Prüfzeitpunkts die Frost- und Frost-Taumittel-Prüfungen häufig nicht bestehen, obwohl sie sich in der Praxis bewährt haben. Weichen Prüf- und Praxisbedingungen in wesentlichen Aspekten voneinander ab, wird in erster Linie festgestellt, inwieweit ein Beton unter den Konditionen der Frost-Laborprüfung widerstandsfähig ist. Die Interpretation dieser Prüfergebnisse im Hinblick auf das Verhalten unter Praxisbedingungen erfordert einen hohen Sachverstand.

Ein weiterer Gesichtspunkt, der die Übertragbarkeit der Ergebnisse der Laborprüfung auf die Praxis erschwert, ist die zeitraffende Simulation der natürlichen Umweltverhältnisse im Labor. Um eine den Praxisverhältnissen entsprechende Schädigung zu erreichen, wird die Belastung, die innerhalb einer Zeitspanne von i. d. R. mehreren Jahrzehnten auftritt, unter Laborverhältnissen innerhalb weniger Tage simuliert. In der Konsequenz muss dabei in kurzer Zeit eine sehr viel höhere Belastungsintensität erzeugt werden, d. h. die Prüfbedingungen sind schärfer als die zu erwartenden Umweltbedingungen. Das kann dazu führen, dass Betone, die unter den zu erwartenden Praxisverhältnissen frost- bzw. froस्ताumittelbeständig sind, die Laborprüfung nicht bestehen.

Zur Beurteilung der Tauglichkeit von Betonen ist es weiterhin erforderlich, geeignete Grenzwerte hinsichtlich eines Schädigungsgrads festzulegen. Dies kann nur anhand von praktischen Anforderungen erfolgen und bedarf einer hinreichend hohen Präzision und Trennschärfe des Laborprüfverfahrens.

#### **4.4 Alternative Prüfansätze**

Ein Ansatz zur Prüfung von Betonen, die die Anforderungen der Expositionsklasse XF2 erfüllen sollen, wurde in dem von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geförderten Forschungsvorhaben „Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositionsklasse XF2“ /SET07/ untersucht. Die Untersuchung vergleicht den regulären CDF-Test mit modifizierten Varianten. Betrachtet wurde, welchen Einfluss u. a. die Nachbehandlung, Vorlagerungsdauer, Anhebung der Minimaltemperatur, unterschiedliche NaCl-Konzentrationen und eine reduzierte Frost-Tau-Wechsel-Anzahl auf die Schädigung haben. Fazit der Untersuchungen ist der Vorschlag, einen abgeschwächten CDF-Test für die Prüfung von Betonen für die Expositionsklasse XF2 einzusetzen. Dabei soll die Prüfdauer von 28 auf 14 Frost-Tau-Wechsel verkürzt und die Minimaltemperatur von  $-20\text{ °C}$  auf  $-10\text{ °C}$  angehoben werden. Weiterer Untersuchungsbedarf besteht im Hinblick auf die Festlegung eines Akzeptanzkriteriums. Aufgrund der geringen Datenbasis wird hierzu keine Empfehlung gemacht, es wird aber angenommen, dass es sich in einem Bereich zwischen  $1.000\text{ g/cm}^2$  und  $1.800\text{ g/cm}^2$  befinden wird.

Zur Bewertung von XF1- bzw. XF2-Betonen mit dem CIF- bzw. CDF-Test ist weiterhin grundsätzlich von Interesse, bereits vorhandene Prüfergebnisse entsprechender Betonzusammensetzungen zusammenzutragen und auszuwerten. Ziel wäre es zu untersuchen, ob für diese Betone im CIF- bzw. CDF-Test charakteristische Schädigungsmerkmale festgestellt werden können. In dem vorliegenden Bericht wird daher eine Auswertung eigener Untersuchungen und weiterer Literaturdaten vorgenommen, die einen Überblick über die Schädigungsgeschwindigkeit von XF1- und XF2 Betonen unter den Bedingungen des standardisierten CDF- und CIF-Tests gibt. Es wird die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel erfasst, die bis zum Erreichen der derzeit allgemein anerkannten Grenzwerte der inneren Schädigung beim CIF-Test bzw. der Abwitterung beim CDF-Test stattgefunden haben.

## **5 ERGEBNISSE**

### **5.1 Vorgehensweise und Kriterien bei der Auswertung**

In die Auswertung sind Ergebnisse von eigenen Prüfungen sowie von weiteren veröffentlichten Prüfungen zum Frost- bzw. Frost-Taumittel-Widerstand eingegangen, die gemäß den Prüfvorschriften des CIF-Tests /SET04/ bzw. des CDF-Tests /SET96/ bestimmt worden und aufgrund ihrer Zusammensetzung für eine XF1- oder XF2-Exposition nach /DIN01a/ und /DIN01b/ geeignet sind. Diesen werden zum Vergleich und zur Abgrenzung zusätzlich Betone gegenübergestellt, die diese Anforderungen unterschreiten. Betone, die

hingegen normgemäß in der Expositionsklasse XF3 bzw. XF4 eingesetzt werden dürfen, sind nicht Gegenstand dieser Untersuchung. Die Ergebnisse wurden hinsichtlich der Schädigungsgeschwindigkeit der Betone ausgewertet. Maßgebend hierfür war die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel bis zum Unterschreiten des jeweiligen Abnahmekriteriums.

Die am Institut für Bauforschung Aachen (ibac) durchgeführten Frostprüfungen sind sehr gut dokumentiert, so dass die Auswertung unmittelbar an den vorliegenden Rohdaten erfolgen kann. Für die Auswertung von externen Literaturdaten stehen i. d. R. Diagramme zur Verfügung, aus denen der Schädigungsverlauf über die Zeit hervorgeht. Der Zeitpunkt, d. h. die Anzahl der FTW, an dem der Grad der Schädigung das entsprechende Akzeptanzkriterium bzw. den Grenzwert erreicht, kann somit direkt abgelesen werden. Bei beiden Vorgehensweisen handelt es sich überwiegend um interpolierte Ergebnisse.

Grundvoraussetzung für die Literaturlauswertung ist eine ausreichende Dokumentation der jeweiligen Versuchsergebnisse. Dazu gehören zum einen Angaben zur Betonzusammensetzung (z. B. Zementgehalt, Wasserzementwert, ggf. Luftgehalt), da ansonsten keine Möglichkeit besteht, die Betone auf Basis des design concept einer Expositionsklasse zuzuordnen. Zum anderen müssen die genauen Prüfbedingungen bekannt sein, denn ein direkter Vergleich der Versuchsergebnisse kann nur erfolgen, wenn die gleichen prüftechnischen Randbedingungen vorliegen. Es werden ausschließlich Laboruntersuchungen ausgewertet, die den Prüfvorschriften zum CDF- bzw. CIF-Test entsprechen (s. /SET96, SET04/). Betone, bei denen die Vorlagerungsart oder -dauer, die Konzentration der Prüf-flüssigkeit, die Prüfkörpergeometrie, die Minimaltemperatur, die Frostzyklendauer, das Prüfalter oder andere maßgebliche Parameter abweichen, werden nicht berücksichtigt.

Die Beurteilung erfolgt getrennt für den CDF- und CIF-Test. Um die verschiedenen Einflüsse hinsichtlich der Zusammensetzung herausstellen zu können, werden die Betone anhand ihrer Rezeptur zunächst als für die Expositionsklasse XF1 (CIF-Test) bzw. XF2 (CDF-Test) geeignet oder ungeeignet eingestuft. Die weitere Sortierung berücksichtigt – in dieser Reihenfolge – die unterschiedlichen Zementarten, Wasserzementwerte und Zementgehalte. Entsprechend den Festlegungen in EN 206-1:2001-07 /DIN01a/ und DIN 1045-2:2001-07 /DIN01b/ ist es für eine XF2-Exposition zulässig, Betone mit und ohne künstlich eingeführte Luftporen zu verwenden. In Anlehnung an diese Vorgaben wird im Folgenden zwischen der Expositionsklasse XF2a (mit künstlich eingeführten Luftporen) und XF2b (ohne künstlich eingeführte Luftporen) unterschieden, so dass auch eine Unterteilung ausgehend vom Luftgehalt berücksichtigt wird.

Die Ergebnisse der Auswertungen zum Frostwiderstand mit dem CIF-Verfahren sind in den Tabellen A3 und A4 zusammengestellt. In den Übersichtstabellen für XF1-Betone und Betone, die die Anforderungen dieser Expositionsklasse unterschreiten, erfolgt ggf. eine zusätzliche Unterteilung nach den verwendeten Zementarten (CEM I und CEM III). Nach gleichem Schema erfolgt die Darstellung der Ergebnisse zum Frost-Taumittel-Widerstand (CDF-Verfahren, Tabellen A5 bis A7).

Tabelle 2 gibt eine zusammenfassende Übersicht über die ermittelte Anzahl der Frost-Taumittel-Wechsel in Abhängigkeit der Expositionsklasse. Aufgrund der geringen Probenanzahl wird an dieser Stelle auf eine Darstellung von CEM II-Betonen verzichtet. Die Einzelergebnisse dieser Betone können den Tabellen A5 bis A7, entnommen werden.

**Tabelle 2:** Mittlere Anzahl der Frost-Taumittel-Wechsel (FTW) bis zum Erreichen des Akzeptanzkriteriums im CIF-Test und im CDF-Test

Parameter	CIF-Test <sup>1)</sup>		CDF-Test <sup>2)</sup>		
	XF1	<XF1	XF2a <sup>3)</sup>	XF2b <sup>4)</sup>	<XF2
1	2	3	4	5	6
<b>Mittlere Anzahl der FTW aller ausgewerteten Betone</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>25</b>	<b>12</b>	<b>9</b>
<i>Standardabweichung</i>	9,4	10,8	14,4	5,2	2,6
<i>Anzahl ausgewerteter Betone</i>	27	7	6	27	7
Mittlere Anzahl der FTW der CEM I-Betone	<b>21</b>	5)	6)	<b>14</b>	5)
<i>Standardabweichung</i>	10,5	5)	6)	4,4	5)
<i>Anzahl ausgewerteter Betone</i>	17	5)	6)	15	5)
Mittlere Anzahl der FTW der CEM III-Betone	<b>19</b>	5)	5)	<b>8</b>	5)
<i>Standardabweichung</i>	7,5	5)	5)	4,2	5)
<i>Anzahl ausgewerteter Betone</i>	10	5)	5)	9	5)

1) Akzeptanzkriterium: rel. dyn. E-Modul = 80 %

2) Akzeptanzkriterium: Abwitterung = 1.500 g/m<sup>2</sup>

3) Luftporenbetone

4) Betone ohne künstlich eingeführte Luftporen

5) Probenanzahl ist für differenzierte Betrachtung zu gering

6) vorliegende CEM I-Zemente blieben nach 56 FTW unter dem Akzeptanzkriterium von 1.500 g/m<sup>2</sup>

## 5.2 CIF-Test

Für die Prüfung des Frostwiderstands mit dem CIF-Test ist der relative dynamische Elastizitätsmodul (RDM) maßgebend. Derzeit gibt es für die Expositionsklasse XF3 zwei allgemein akzeptierte Grenzwerte. Wird eine Prüfung nach dem BAW-Merkblatt „Frostprüfung“ /BAW04/ vereinbart, darf der RDM nach 28 FTW nicht unter 75 % des Ausgangswerts fallen. Nach RILEM-Recommendation /SET04/ hingegen besteht ein Beton die Prüfung, wenn er 80 % des Ausgangswerts nicht unterschreitet, wobei die Anzahl der durchzuführenden FTW im Einzelfall festgelegt wird (i. d. R. 28 oder mehr FTW). Für die vorliegende Untersuchung werden die Betone nach RILEM-Recommendation ausgewertet und die Anzahl der FTW festgestellt, die bis zum Erreichen des 80 %-Werts durchgeführt wurden. Als zusätzliche Informationen werden – soweit vorhanden – die Abwitterungsmenge zu diesem Zeitpunkt und der RDM nach 28 FTW angegeben. Eine Gesamtübersicht aller ausgewerteten Betone, deren Frostwiderstand mit dem CIF-Test überprüft wurde, befindet sich in den Tabellen A3 und A4.

Die 27 ausgewerteten XF1-Betone erreichen im Durchschnitt nach 20 FTW einen RDM von 80 %. Damit tritt wegen des höheren Wasserzementwerts eine Schädigung der Gefügestruktur schneller ein, als bei Betonen, die den Anforderungen einer XF3-Exposition genügen müssen. Die Werte der XF1-Betone bewegen sich dabei zwischen 5 FTW (bei Verwendung von Grauwacke) und 37 FTW (bei Zusatz von Flugasche und Silikastaub; vgl. Tabelle A3), was sich in einer entsprechend hohen Standardabweichung von 9,4 niederschlägt. Eine nach CEM I- und CEM III-Betonen differenzierte Betrachtung liefert ein ähnliches Bild (vgl. Bild B2). Die 17 untersuchten CEM I-Betone erreichen das Grenzkriterium im Mittel nach 21 FTW bei einer Standardabweichung von 10,5, wobei die Spanne ebenfalls zwischen 5 und 37 FTW liegt. Bei den weiteren 10 Betonen (CEM III/A und CEM III/B) fällt der RDM nach durchschnittlich 19 FTW auf 80 % des Ausgangswerts. Die schnellste Schädigung wird bereits nach 7 FTW erreicht, die langsamste nach 30 FTW (Standardabweichung 7,5). Somit deutet sich an, dass die verwendete Zementart bei den ausgewerteten XF1-Betonen im CIF-Test keinen signifikanten Einfluss auf die Schädigungsgeschwindigkeit zu haben scheint. Das entspricht auch den derzeitigen Festlegungen in EN 206-1:2001-07 /DIN01a/ bzw. DIN 1045-2:2001-07 /DIN01b/, wonach bei Zementen, die als geeignet für den Anwendungsbereich der Exposition Frostangriff (XF) gelten, nicht weiter nach Zementarten unterschieden wird.

Bei den untersuchten Betonen, die die Anforderungen der Expositionsklasse XF1 nicht erfüllen, zeigt sich kein wesentlicher Unterschied hinsichtlich der mittleren Schädigungsgeschwindigkeit im Vergleich zu den bereits diskutierten XF1-Betonen (vgl. Tabelle A4,

Anhang A und Bild B1, Anhang B). Trotz eines höheren Wasserzementwerts lag auch bei den für eine XF1-Exposition nicht zulässigen Betonen die Anzahl der FTW im Mittel bei 20 bis zum Erreichen des Akzeptanzkriteriums. Die Anzahl der FTW liegt in einer Spanne zwischen 10 und 43 Zyklen bei einer Standardabweichung von 10,8. Bei diesem Vergleich muss allerdings berücksichtigt werden, dass lediglich 7 Betone (CEM I und CEM III/A) zur Auswertung zur Verfügung standen. Damit sind an dieser Stelle weder gesicherte Aussagen im Hinblick auf eine Abgrenzung der XF1-Betone zu den Betonen, die diese Anforderung unterschreiten, noch zu einem eventuellen Einfluss der verwendeten Zementarten möglich.

### 5.3 CDF-Test

Bei der Prüfung des Frost-Taumittel-Widerstands mit dem CDF-Test ist die Abwitterungsmenge das Hauptkriterium. Für Betone, die gemäß den Anforderungen der Expositionsklasse XF4 nach EN 206-1:2001-07 /DIN01a/ bzw. DIN 1045-2:2001-7 /DIN01b/ zusammengesetzt sind, darf eine Abwitterungsmenge von 1.500 g/m<sup>2</sup> nach 28 FTW nicht überschritten werden. Da erwartet werden kann, dass nach XF2-Anforderungen konzipierte Betone eine höhere Sättigungsgeschwindigkeit aufweisen und dadurch eine schnellere Schädigung erfahren, ist für die vorliegende Untersuchung von XF2-Betonen der Zeitraum bis zum Erreichen dieses Schädigungsgrades maßgebend. Für jeden der untersuchten Betone wird daher die Anzahl der FTW ermittelt, die erforderlich war, um die als Grenzwert festgelegte Abwitterungsmenge von 1.500 g/m<sup>2</sup> zu erreichen. Sofern angegeben, werden informativ auch der RDM zum Zeitpunkt, an dem der Grenzwert erreicht wurde, und die Abwitterungsmenge nach 28 FTW zusätzlich aufgenommen. Eine Gesamtübersicht aller ausgewerteten Betone, deren Frost-Taumittel-Widerstand mit dem CDF-Test überprüft wurde, kann den Tabellen A5 bis A7, entnommen werden.

Der Vergleich zeigt, dass sich bei den untersuchten Betonen mit (XF2a) und ohne künstlich eingeführte Luftporen (XF2b) eine jeweils charakteristische Anzahl an FTW bis zum Erreichen des Schädigungskriteriums herauskristallisiert (vgl. Tabellen A5 bis A7, Bild B3). Diese liegt im Mittel mit 25 bzw. 12 FTW jeweils unterhalb der für XF4-Betone geforderten Mindestanzahl von 28 FTW, wobei jedoch beachtet werden muss, dass die XF2a-Betone nur in geringer Anzahl (6 Betone) vorlagen. Diese wurden unter Verwendung von CEM II und CEM III hergestellt und erreichen das Schädigungskriterium nach durchschnittlich 25 FTW. Die einzelnen Betone bewegen sich in einem Bereich von 10 bis 45 FTW (Standardabweichung 14,4; vgl. Tabelle A5), wobei sich die beiden untersuchten CEM II-Betone mit 39 bzw. 45 Zyklen als am widerstandsfähigsten gezeigt haben. Entsprechende CEM I-

Betone lagen zwar vor, blieben aber auch nach 56 FTW unter dem Grenzkriterium von 1.500 g/m<sup>2</sup> und wurden in diesem Forschungsvorhaben daher nicht weiter untersucht.

Die 27 ausgewerteten XF2b-Betone erreichen im Mittel das Grenzkriterium nach 12 FTW, die Spanne bewegt sich hierbei zwischen minimal 3 und maximal 23 FTW (Standardabweichung 5,3; vgl. Tabelle A6). Bei einer nach Zementarten differenzierten Betrachtung und unter Berücksichtigung der unterschiedlichen Probenanzahl deutet sich eine tendenziell höhere Dauerhaftigkeit der CEM I-Betone gegenüber den CEM III-Betonen an (vgl. Tabelle A6, Bild B4). Die 15 untersuchten CEM I-Betone weisen bis zum Erreichen einer Abwitterungsmenge von 1.500 g/m<sup>2</sup> durchschnittlich 14 FTW auf, während es bei den neun CEM III-Betonen 8 FTW sind. Die Einzelergebnisse umfassen dabei einen Bereich von 8 bis 23 FTW bei einer Standardabweichung von 4,4 (CEM I) bzw. 3 bis 15 FTW bei einer Standardabweichung von 4,2 (CEM III). Aufgrund der geringen Anzahl von lediglich 3 vorliegenden CEM II-Betonen wird auf eine detailliertere Auswertung dieser verzichtet. Die Einzelergebnisse können Tabelle A6, entnommen werden.

Gleichzeitig deutet sich an, dass Betone, deren Zusammensetzung die Anforderungen an die Expositionsklasse XF2 nicht erfüllen, tendenziell niedrigere Werte aufweisen, allerdings überschneiden sich die Streubereiche der XF2b-Betone mit diesen Betonen, wodurch eine Abgrenzung erschwert wird (vgl. Tabellen A6 und A7).

## 6 ZUSAMMENFASSUNG

Für den Nachweis des Frost- oder Frost-Taumittel-Widerstands von Betonen für die Expositionsklasse XF1 oder XF2 gemäß EN 206-1:2001-07 /DIN 01a/ bzw. DIN 1045-2:2001-07 /DIN 01b/ existiert derzeit kein geeignetes Prüfverfahren. Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, Daten aus vorliegenden CIF- und CDF-Tests von XF1- und XF2-Betonen im Hinblick auf die Schädigungsgeschwindigkeit auszuwerten. Es sollte geklärt werden, ob bei diesen Betonen eine geringere Anzahl an Frost-Tau-Wechseln (FTW) als bei XF3- bzw. XF4-Betonen bis zum Erreichen der jeweiligen Grenzwerte charakteristisch ist. Die Erkenntnisse der Untersuchung könnten dazu beitragen, die bisher genutzten Laborprüfverfahren hinsichtlich der festgelegten Anzahl an FTW zu überarbeiten und damit an die Gegebenheiten der XF1- bzw. XF2-Betone anzupassen, ohne die Prüfverfahren an anderer Stelle modifizieren zu müssen. Zur Abgrenzung wurde ein Vergleich zu Betonen gezogen, die aufgrund ihrer Zusammensetzung die Anforderungen für die Expositionsklasse XF1 bzw. XF2 nicht erfüllen.

Die beim CIF-Test für den Frostwiderstand maßgebliche Größe ist der Abfall des relativen dynamischen Elastizitätsmoduls (RDM) als Indikator für die innere Gefügeschädigung des Betons. Nach RILEM-Recommendation /SET04/ beträgt das Abnahmekriterium 80 % des ursprünglichen RDM. Im Forschungsvorhaben wurden eigene Versuche und weitere Literaturdaten ausgewertet, und es wurde untersucht, nach wie vielen FTW die XF1-Betone diesen Grenzwert erreichen. Bei der Bewertung des Frost-Taumittel-Widerstands mit dem CDF-Verfahren ist die Oberflächenabwitterung maßgebend. Betone, die den Anforderungen der Expositionsklasse XF4 genügen müssen, dürfen nach 28 FTW nicht mehr als 1.500 g/m<sup>2</sup> Abwitterung aufweisen. Für die vorliegende Untersuchung wurde für XF2-Betone die Anzahl der FTW bis zum Erreichen dieses Grenzwerts ermittelt.

Insgesamt wurden 34 Betone ausgewertet, die mit dem CIF-Verfahren geprüft wurden, davon entsprechen 27 den Anforderungen an die Expositionsklasse XF1. Weitere 7 Betone weisen einen höheren als den normativ als Mindestanforderung festgelegten Wassermenge-Wert von 0,60 auf. Weiterhin wurden 40 mit dem CDF-Verfahren getestete Betone untersucht, von denen 33 aufgrund ihrer Zusammensetzung für den Einsatz in Expositionsklasse XF2 geeignet sind. Von diesen wurden sechs Betone mit künstlich eingeführten Luftporen hergestellt. Sämtliche Betone sind im Anhang A tabellarisch aufgelistet und nach der verwendeten Zementart gruppiert. Einen Überblick über die wesentlichen Ergebnisse gibt Tabelle 2.

Die ausgewerteten XF1-Betone weisen im CIF-Test eine mittlere Anzahl von 20 FTW bis zum Erreichen eines RDM von 80 % auf. Signifikante Unterschiede zwischen XF1-Betonen, die mit CEM I bzw. CEM III hergestellt wurden, konnten nicht festgestellt werden. Da die untersuchten Betone, die den normativen Anforderungen einer XF1-Exposition nicht genügen, einen Wert von 80 % des RDM ebenfalls nach im Schnitt 20 FTW erreichen, scheint eine Abgrenzung von den XF1-Betonen kaum möglich. Dabei muss jedoch die geringere Probenanzahl der nicht XF1-konformen Betone berücksichtigt werden, so dass im Hinblick auf die Unterscheidbarkeit zum derzeitigen Zeitpunkt keine repräsentative Aussage gemacht werden kann.

Bei der Prüfung des Frost-Taumittel-Widerstands mit dem CDF-Test erreichen die Mittelwerte der untersuchten XF2-Betone das Akzeptanzkriterium von 1.500 g/m<sup>2</sup> vor dem 28. FTW. Vorbehaltlich der geringen Probenanzahl zeigen sich die Luftporenbetone (XF2a) mit durchschnittlich 25 FTW als am widerstandsfähigsten im Labortest. Der verhältnismäßig hohe Wert wird hauptsächlich durch die Ergebnisse der CEM II-Betone beeinflusst. Dahinter zurück bleiben die ausgewerteten XF2b-Betone (ohne künstlich eingeführte Luftporen) mit im Schnitt 12 FTW. Unter Berücksichtigung der verwendeten Zement-

arten erscheinen die mit CEM I hergestellten Betone mit 14 FTW geringfügig widerstandsfähiger als die CEM III-Betone mit durchschnittlich 8 FTW, wobei bei den letzteren die Probenanzahl geringer war. Betone unterhalb der XF2-Anforderungen an die Betonzusammensetzung weisen eine Abwitterungsmenge von 1.500 g/m<sup>2</sup> bereits nach durchschnittlich 9 FTW auf. In der Tendenz liegen sie damit unterhalb der Ergebnisse der normkonformen XF2-Betone, allerdings überschneiden sich die Streubereiche beider Gruppen (vgl. Tabellen A6 und A7).

## 7 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Derzeit besteht die Problematik bei der Bewertung des Frost- und Frost-Taumittel-Widerstands von Betonen, die gemäß den Anforderungen von EN 206-1:2001-07 /DIN 01a/ bzw. DIN 1045-2:2001-07 /DIN 01b/ für die Expositionsklasse XF1 oder XF2 zusammengesetzt sind, darin, dass für diese Betone kein Prüfverfahren zum Nachweis ihrer Eignung unter den Bedingungen einer XF1- bzw. XF2-Exposition vorhanden ist. Im Rahmen dieser Untersuchung wurde daher eine Auswertung vorliegender eigener Daten und Literaturdaten von herkömmlichen CIF- und CDF-Tests durchgeführt. Ziel war es festzustellen, ob der Schädigungsfortschritt von XF1- und XF2-Betonen unter den Randbedingungen des herkömmlichen CIF- bzw. CDF-Tests schneller voranschreitet als bei Betonen, die für die Expositionsklasse XF3 bzw. XF4 geeignet sind. Die ausgewerteten Daten deuten an, dass sowohl für XF1- als auch XF2-Betone im Durchschnitt eine geringere Anzahl an Frost-Tau-Wechseln (FTW) bis zum Erreichen des jeweiligen Akzeptanzkriteriums wahrscheinlich ist. Daher erscheint es grundsätzlich möglich, die bisher genutzten CIF- und CDF-Tests zur Beurteilung dieser Betone heranzuziehen, sofern es gelingt, eine jeweils charakteristische Anzahl an FTW für den CIF- bzw. CDF-Test abzuleiten und somit die Prüfdauer, d. h. die Zyklenzahl bis zum Erreichen des Schädigungskriteriums, an die jeweiligen Gegebenheiten anzupassen. Nach dem derzeitigen Erkenntnisstand liegt eine sinnvoll zu wählende Zyklenzahl für XF1- und XF2-Betone zwischen 6 und 10 Zyklen. Zur Untermauerung sollten weitere in Essen durchgeführte Untersuchungen analog ausgewertet werden. Dieser Vorschlag stellt eine Alternative zum Ansatz des Forschungsvorhabens „Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositionsklasse XF2“ /SET07/ dar, der neben einer Verkürzung der Prüfdauer auch die Anhebung der Minimaltemperatur enthält.

Um zu einer Empfehlung hinsichtlich einer Verminderung der Anzahl an FTW bei der Prüfung von XF1- bzw. XF2-Betonen mit dem CIF- bzw. CDF-Test kommen zu können, sollten noch weitere Untersuchungen folgen. Insbesondere für Betone, die die Anforderungen der Expositionsklassen XF1 und XF2 nicht erfüllen, und für Luftporenbetone wird eine breitere Bewertungsbasis benötigt.

## 8 LITERATUR

- /AUB99/ Auberg, R.: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton mit dem CDF- und CIF-Test. Essen : Universität Gesamthochschule. - In: Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften (1999), Nr. 6 = Dissertation, 1998 = In: Beton 50 (2000), Nr. 7, S. 396
- /BAW04/ Bundesanstalt für Wasserbau (BAW): Merkblatt Frostprüfung von Beton (BAW-Merkblatt "Frostprüfung"), Ausgabe Dezember 2004. Karlsruhe, Hamburg, Ilmenau : Bundesanstalt für Wasserbau, 2004
- /BEV06/ Bevanda, I. ; Setzer, M. J.: Untersuchungen zur Feuchteverteilung während des Frostangriffs. Göttingen : Cuvillier. - In: Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften (2006), Nr. 10 Beiträge zur 6. CDF/CIF Fachtagung Prüfung des Frost- und Frost-Tausalzwiderstandes von Beton, 22. Februar 2006 in Duisburg-Essen, S. 121-131
- /BRA00/ Brameshuber, W. ; Schießl, P. ; Uebachs, S. ; Brandes, C. ; Eck, T.: Einfluss von Flugasche auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. Aachen : Institut für Bauforschung, 2005. - Forschungsbericht Nr. F 759
- /BRA02/ Brameshuber, W. ; Schröder, P.: Auswirkung der gemeinsamen Anrechnung von Silicastaub und Flugasche auf Festbetoneigenschaften. Aachen : Institut für Bauforschung, 2002. - Forschungsbericht Nr. F 758
- /BRA03/ Brameshuber, W. ; Pierkes, R.: Anrechnung von Flugasche in Beton bei Frost-Tausalzbelastungen gemäß der Expositionsklasse XF2. Essen : Universität Essen, 2003. - In: CDF- und CIF-Fachtagung, 5. Fachtagung des IBPM und WISSBAU, 6. November 2003 in Essen, S. 20-27
- /BRA07/ Brameshuber, W. ; Spörel, F.: Frostwiderstand (XF1 und XF3) von CEM III-Betonen - Langjährige Auslagerung im Vergleich zum Laborprüfverfahren. (Frost Resistance (XF1 and XF3) of CEM III-Concretes - Long Time Storage in Outdoor Conditions in Comparison to Labory Tests). CEMEX HOZ-Seminar, Duisburg 2007
- /DIN85/ DIN 50 014:1985-07. Klimate und ihre technische Anwendung – Normklimate
- /DIN01a/ EN 206-1:2001-07. Beton; Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206-1:2000; in Verbindung mit EN 206-1/A1:2004-10 und EN 206-1/A2:2005-09
- /DIN01b/ DIN 1045-2:2001-07. Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton; Teil 2: Beton – Festlegungen, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu EN 206-1; in Verbindung mit DIN 1045-2/A2:2007-06
- /DIN06a/ DIN CEN/TS 12 390-9 Vornorm 2006-08. Prüfung von Festbeton; Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung

- /DIN06b/ DIN-Fachbericht CEN/TR 15 177:2006-06 Prüfung des Frost-Tauwiderstandes von Beton – Innere Gefügestörung
- /FAG99a/ Fagerlund, G. ; Nordström, K.: Studies of the Internal Frost Resistance of HPC. Oslo : Norwegian Concrete Association, 1999. – In: Utilization of High Strength / High Performance Concrete, 5th International Symposium in Sandefjord, 20-24 June 1999, (Holand, I. ; Sellevold, E. J. (Eds.)), Vol. 2, S. 1092-1103
- /FAG99b/ Fagerlund, G. ; Nordström, K.: Effect of Water Storage Time on Frost Resistance of Concrete. Ottawa, NRC Research Press, 1999. – In: Durability of Building Materials and Components, Proceedings of the Eight International Conference, Vancouver, May 30 - June 3, 1999, (Lacasse, M. A. ; Vanier, D. J. (Eds.)), Vol. 1, S. 212-221
- /FAG00/ Fagerlund, G.: Frost Attack as a Moisture Mechanics Problem. Weimar : Bauhaus-Universität, 2000. - In: 14. Internationale Baustofftagung, - ibausil -, 20. - 23. September 2000 in Weimar, S. 1-0023-0037
- /GEI96/ Geiseler, J. ; Setzer, M. J. ; Stark, J. ; Auberg, R. ; Lang, E. ; Ludwig, M. ; FEHS: Untersuchungen zur Erhöhung des Frost-Tausalz-Widerstandes von HOZ-Betonen. Forschungsgemeinschaft Eisenhüttenschlacken; Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar; Universität Gesamthochschule Essen, 1996. – Abschlussbericht des Forschungsvorhabens AiF-FV 9429B
- /HAR93/ Hartmann, V.: Optimierung und Kalibrierung der Frost-Tausalz-Prüfung von Beton CDF-Test. Essen, Universität Gesamthochschule, Fachbereich Bauwesen, Diss., 1993
- /HEI00/ Heine, P. ; Setzer, M. J.: Innere Schädigung in Bezug auf die Dauerhaftigkeit von Zuschlägen in der Mörtelmatrix. Essen : Universität Gesamthochschule Essen, 2000. - In: CIF- und CDF-Test: Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton. 3. Fachtagung des IBPM und WISSBAU Essen, 5. Oktober 2000, 8 Seiten
- /HEI04/ Heine, P.: Gesteinskörnungen im Beton unter Frost-Tau-Belastung - Auswirkungen auf Prüfung und Anwendung. Aachen : Shaker, 2004 – In: Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft (2004), Nr. 7; zugl.: Duisburg-Essen, Univ., Diss., 2004
- /LAN03/ Lang, E. ; Sylla, H.-M.: Frostwiderstand von Beton Prüfung und Vergleich mit praktischen Erfahrungen. Weimar : Bauhaus-Universität, 2003. – In: 15. Internationale Baustofftagung, - 24.-27. September 2003, Weimar, S. 2-0831-2-0840
- /LOH03/ Lohaus, L. ; Petersen, L.: Einfluss der Betonrandzone auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. Weimar : Bauhaus-Universität, 2003. - In: 15. Internationale Baustofftagung, - 24.-27. September 2003, Weimar, S. 2-0779-2-0790

- /LUD94/ Ludwig, H.-M. ; Stark, J.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von hüttensandreichen HOZ-Betonen. – In: Wissenschaftliche Zeitschrift Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Universität 40 (1994), Nr. 5/6/7, S. 111-117. – 12. Internationale Baustofftagung -ibausil-, 22.-24.09.1994 in Weimar
- /REI05/ Reinhardt, H.-W. ; Huß, A.: Frostwiderstand von Beton ; Vergleich von Labor- und Auslaugversuchen. Berlin : Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2005. - In: Beiträge zum Kolloquium Frostwiderstand von Beton in Labor und Praxis am 29. und 30. September 2005 im Forschungsinstitut der Zementindustrie in Düsseldorf, S. 49-57
- /SET94/ Setzer, M. J.: Entwicklung und Präzision eines Prüfverfahrens zum Frost-Tausalz-Widerstand. In: Wissenschaftliche Zeitschrift Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Universität 40 (1994), Nr. 5/6/7, S. 87-93. - 12. Internationale Baustofftagung -ibausil-, 22.-24.09.1994 in Weimar
- /SET96/ Setzer, M. J. ; Fagerlund, G. ; Janssen, D. J.: CDF-Test – Test method for the freeze-thaw resistance of concrete – tests with sodium chloride solution (CDF). In: Materials and Structures (RILEM) 29 (1996), Nr. 193, S. 523-528 (Deutsche Übersetzung kann z. B. /SET06a/ entnommen werden)
- /SET97a/ Setzer, M. J.: Innere Schädigung von Beton durch Frost-Tau-Angriff. Weimar : Bauhaus-Universität, 1997. – In: 13. Internationale Baustofftagung ibausil, 24. bis 26. September 1997 in Weimar, S. 1-0591–1-0610
- /SET97b/ Setzer, M. J.: Basis of Testing the Freeze-Thaw Resistance: Surface and Internal Deterioration. London : E & FN SPON, 1997. – In: Frost Resistance of Concrete. Proceedings of the International RILEM Workshop, University of Essen, September 22-23, 1997, (Setzer, M. J.; Auberg, R. (Eds.)), S. 157-173
- /SET99/ Setzer, M. J.: Mikroeislinnenbildung und Frostscha den. Stuttgart : ibidem, 1999. – In: Werkstoffe im Bauwesen – Theorie und Praxis: Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. H. W. Reinhardt, (Eligehausen, R. (Ed.)), S. 397-413
- /SET04/ Setzer, M. J. ; Heine, P. ; Kasperek, S. ; Palecki, S. ; Auberg, S. ; Feldrappe, V. ; Siebel, E. ; RILEM ; RILEM TC 176 IDC: Test Methods of Frost Resistance of Concrete; CIF-Test: Capillary Suction, Internal Damage and Freeze Thaw Test – Reference Method and Alternative Methods A and B. In: Materials and Structures (RILEM) 37 (2004), Nr. 274, S. 743-753 (Deutsche Übersetzung kann z. B. /SET06b/ entnommen werden)
- /SET06a/ Setzer, M. J. ; Fagerlund, G. ; Janssen, D. J.: CDF-Test - Prüfverfahren des Frost-Tau-Widerstands von Beton – Prüfung mit Taumittel-Lösung (CDF). RILEM Recommendation. Göttingen : Cuvillier. - In: Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften (2006), Nr. 10 Beiträge zur 6. CDF/CIF Fachtagung Prüfung des Frost- und Frost-Tausalzwiderstandes von Beton, 22. Februar 2006 in Duisburg-Essen, S. 132-137

- /SET06b/ Setzer, M. J. ; Heine, P. ; Kasperek, S. ; Palecki, S. ; Auberg, R. ; Feldrappe, V. ; Siebel, E.: Recommendation des RILEM TC 176: Prüfverfahren des Frost-Tau-Widerstands von Beton. Göttingen : Cuvillier. - In: Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften (2006), Nr. 10 Beiträge zur 6. CDF/CIF Fachtagung Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-widerstandes von Beton, 22. Februar 2006 in Duisburg-Essen, S. 138-149
- /SET07/ Setzer, M. J. ; Keck, H.-J. ; Palecki, S. ; Schießl, P. ; Brandes C.: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositions-kategorie XF2. BAST-Bericht B 56, Bergisch Gladbach: Bundesanstalt für Straßenwesen, 2007
- /SIE05/ Siebel, E. ; Brameshuber, W. ; Brandes, C. ; Dahme, U. ; Dehn, F. ; Dombrowski, K. ; Feldrappe, V. ; Guse, U. ; Huß, A. ; Lang, E. ; Lohaus, L. ; Müller, C. ; Müller, H.S. ; Palecki, S. ; Petersen, L. ; Schröder, P. ; Setzer, M. J. ; Weise, F. ; ET AL: Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse. Berlin : Beuth. - In: Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (2005), Nr. 560
- /STA94/ Stark, J. ; Ludwig, H.-M.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton - ein rein physikalisches Problem? – In: Wissenschaftliche Zeitschrift Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Universität 40 (1994), Nr. 5/6/7, S. 95-104. - 12. Internationale Baustofftagung -ibaasil-, 22.-24.09.1994 in Weimar
- /STA97a/ Stark, J. ; Ludwig, H.-M.: Freeze-Deicing Salt Resistance of Concretes Containing Blast-Furnace Slag-Cement. London : E & FN Spon, 1997. - In: Freeze-Thaw Durability of Concrete. Proceedings of the International Workshop, Sainte-Foy, Quebec, 1997, (Marchand, J. ; Pigeon, M. ; Setzer, M. (Eds.)), S. 107-120
- /STA97b/ Stark, J. ; Ludwig, H.-M.: Influence of Water Quality on the Frost Resistance of Concrete. London : E & FN Spon, 1997. - In: Freeze-Thaw Durability of Concrete. Proceedings of the International Workshop, Sainte-Foy, Quebec, 1997, (Marchand, J. ; Pigeon, M. ; Setzer, M. (Eds.)), S. 157-164
- /STA97c/ Stark, J. ; Ludwig, H.-M.: Frost-Tausalz-Widerstand von HOZ-Betonen. In: Beton 47 (1997), Nr. 11, S. 646-648,650-652,655-656
- /VIR90/ Virtanen, J. ; Helsinki University of Technology: Effects of Mineral-By-Products on the Frost-Resistance of Concrete. Espoo: Helsinki University of Technology, Department of Structural Engineering, 1990 – Report Nr. 107 = Dissertation
- /XU03/ Xu, X. ; Setzer, M. J.: Korrelation von CDF-/CIF-Prüfungen mit dem Praxisverhalten. Berlin : Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, 2003. - In: Beiträge zum 43. Forschungskolloquium am 09./10. Oktober 2003 an der Ruhr-Universität Bochum, S. 169-176
- /ZTV04/ Bundesministerium für Verkehr, Bau- und Wohnungswesen ; BMV ; ZTV-W: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen – Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 215), Ausgabe 2004

Tabelle A1: Expositionsklassen bezogen auf die Umgebungsbedingungen nach EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2001-07 /DIN01a, DIN01b/

Klassenbezeichnung	Beschreibung der Umgebung	Beispiele für die Zuordnung von Expositionsklassen (informativ)
1	2	3
<b>Frostangriff mit und ohne Taumittel</b>		
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

**Tabelle A2:** Anforderungen an die Betonzusammensetzung in Abhängigkeit der Expositionsklasse XF nach EN 206-1:2001-07 und DIN 1045-2:2001-07 /DIN01a, DIN01b/

Anforderungen	XF1	XF2		XF3		XF4
1	2	3	4	5	6	7
max. Wasserzementwert	0,60	0,55 <sup>1)</sup>	0,50 <sup>1)</sup>	0,55	0,50	0,50 <sup>1)</sup>
min. Druckfestigkeitsklasse	C25/30	C25/30	C35/45 <sup>2)</sup>	C25/30	C35/45 <sup>2)</sup>	C30/37
min. Zementgehalt	280	300	320	300	320	320
min. Zementgehalt bei Anrechnung von Zusatzstoffen	270	270 <sup>1)</sup>	270 <sup>1)</sup>	270	270	270 <sup>1)</sup>
min. Luftgehalt	-	3)	-	3)	-	3), 4)
Anforderungen an Gesteinskörnung	F <sub>4</sub>	MS <sub>25</sub>	MS <sub>25</sub>	F <sub>2</sub>	F <sub>2</sub>	MS <sub>18</sub>

- 1) Die Anrechnung auf den Mindestzementgehalt und den Wasserzementwert ist nur bei Verwendung von Flugasche zulässig. Weitere Zusatzstoffe des Typs II dürfen zugesetzt, aber nicht auf den Zementgehalt oder den Wasserzementwert angerechnet werden. Bei gleichzeitiger Zugabe von Flugasche und Silikastaub ist eine Anrechnung auch für die Flugasche ausgeschlossen
- 2) Bei langsam oder sehr langsam erhärtenden Betonen ( $r < 0,30$ ) eine Festigkeitsklasse niedriger. Die Druckfestigkeit zur Einteilung in die geforderte Druckfestigkeitsklasse ist auch in diesem Fall an Probekörpern im Alter von 28 Tagen zu bestimmen
- 3) Der mittlere Luftgehalt im Frischbeton unmittelbar vor dem Einbau muss bei einem Größtkorn der 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
- 4) Erdfeuchter Beton mit  $w/z \leq 0,40$  darf ohne Luftporen hergestellt werden

**Tabelle A3:** Übersicht über alle mit dem **CIF-Test** geprüften Betone, die aufgrund ihrer Zusammensetzung die Anforderungen der **Expositions-klasse XF1** gemäß EN 206-1:2001-07 /DIN01a/ und DIN 1045-2:2001-07 /DIN01b/ erfüllen

Zementart	Zement- gehalt z	FA- Gehalt f	Silika- gehalt s	(w/z) <sub>eq</sub> - Wert	Expositions- klasse	CIF-Test			Quelle	
						FTW bis RDM = 80 %	Abwitterung bei RDM = 80 %	RDM nach 28 FTW		
-	kg/m <sup>3</sup>			-	-	-	g/m <sup>2</sup>	%	-	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
CEM I 32,5 N	320	-	-	0,60	XF1	<b>27</b>	100	70	/SET07/	
	360	-	-	0,60		<b>8</b>	50	30	/XU03/	
CEM I 32,5 R	270	89	-	0,60		<b>29</b>	280	85	/BRA02/ <sup>(1)</sup>	
	270	-	30	0,60		<b>18</b>	100	40	/BRA02/ <sup>(1)</sup>	
	270	89	14	0,60		<b>37</b>	470	96	/BRA02/ <sup>(1)</sup>	
	270	89	30	0,60		<b>17</b>	170	32	/BRA02/ <sup>(1)</sup>	
	280	-	-	0,60		<b>36</b>	250	90	/REI05/	
	300	-	-	0,60		<b>28</b>	1700	80	/LOH03/	
	300	-	-	0,60		<b>35</b>	240	95	/BRA02/ <sup>(1)</sup>	
	300	-	-	0,60		<b>15</b>	k. A.	k. A.	/HEI04/ <sup>(2)</sup>	
	300	-	-	0,60		<b>5</b>	k. A.	k. A.	/HEI04/ <sup>(3)</sup>	
	300	-	-	0,60		<b>10</b>	k. A.	<sup>4)</sup>	/HEI04/ <sup>(5)</sup>	
	300	-	-	0,60		<b>7</b>	k. A.	k. A.	/HEI04/ <sup>(6)</sup>	
	300	-	-	0,60		<b>10</b>	k. A.	k. A.	/HEI04/ <sup>(7)</sup>	
	320	-	-	0,60		<b>19</b>	k. A.	60	/AUB99/	
	320	-	-	0,60		<b>24</b>	200	73	/SET07/	
	330	-	-	0,55		<b>24</b>	50	72	/BEV06/	
Auswertung der CEM I-Betone						<b>Mittelwert</b>	<b>21</b>	-		
						<i>Standard- abweichg.</i>	10,5			

Tabelle A3: Fortsetzung

Zementart	Zement- gehalt z	FA- Gehalt f	Silika- gehalt s	(w/z) <sub>eq</sub> - Wert	Expositions- klasse	CIF-Test			Quelle
						FTW bis RDM = 80 %	Abwitterung bei RDM = 80 %	RDM nach 28 FTW	
-	kg/m <sup>3</sup>			-	-	-	g/m <sup>2</sup>	%	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CEM III/ A 32,5 N	270	50	-	0,60	XF1	<b>7</b>	20	22	/BRA07/ <sup>8)</sup>
	270	89	-	0,60		<b>19</b>	180	57	/BRA02/ <sup>1)</sup>
	270	-	30	0,60		<b>12</b>	150	30	/BRA02/ <sup>1)</sup>
	270	81	14	0,60		<b>30</b>	680	85	/BRA02/ <sup>1)</sup>
	270	32	30	0,60		<b>15</b>	380	30	/BRA02/ <sup>1)</sup>
	300	-	-	0,60		<b>30</b>	300	85	/BRA02/ <sup>1)</sup>
	320	-	-	0,60		<b>22</b>	650	66	/AUB99/
CEM III/ B 42,5 N	320	-	-	0,60		<b>21</b>	200	70	/SET07/
CEM III/ B 42,5 R	295	-	-	0,61		<b>14</b>	400	44	/BEV06/
	330	-	-	0,55		<b>24</b>	200	75	/BEV06/
Auswertung der CEM III-Betone					<b>Mittelwert</b>	<b>19</b>	-		
					<i>Standard- abweichg.</i>	7,5			
<b>Gesamtauswertung aller Betone</b>					<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>	-		
					<i>Standard- abweichg.</i>	9,4			

- 1) 3 PK, Gesamtprüffläche < 0,08 m<sup>2</sup>
- 2) Verwendete Gesteinskörnung: Granit
- 3) Verwendete Gesteinskörnung: Grauwacke
- 4) Versuchabbruch nach etwa 14 FTW
- 5) Verwendete Gesteinskörnung: Rheinkies
- 6) Verwendete Gesteinskörnung: Moränekies
- 7) Verwendete Gesteinskörnung: Weserkies
- 8) 4 PK, Gesamtprüffläche < 0,08 m<sup>2</sup>

**Tabelle A4:** Übersicht über alle mit dem **CIF-Test** geprüften Betone, die aufgrund ihrer Zusammensetzung die Anforderungen der **Expositions-klasse XF1** gemäß EN 206-1:2001-07 /DIN01a/ und DIN 1045-2:2001-07 /DIN01b/ **unterschreiten**

Zementart	Zement- gehalt z	FA- Gehalt f	Silika- gehalt s	(w/z) <sub>eq</sub> - Wert	Expositions- klasse	CIF-Test			Quelle
						FTW bis RDM =80 %	Abwitterung bei RDM =80 %	RDM nach 28 FTW	
-	kg/m <sup>3</sup>			-	-	-	g/m <sup>2</sup>	%	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CEM I 32,5 R	250	-	-	0,80	< XF1	<b>24</b>	130	73	/RE105/
	250	-	-	0,80		<b>14</b>	200	35	/RE105/
	290	-	-	0,65		<b>16</b>	40	71	/RE105/
	290	-	-	0,65		<b>19</b>	70	52	/RE105/
CEM III/ A 32,5 N	250	-	-	0,80		<b>17</b>	315	63	/RE105/
	270	-	-	0,70		<b>10</b>	350	<sup>9)</sup>	/AUB99/
	290	-	-	0,65		<b>43</b>	780	92	/RE105/
<b>Gesamtauswertung aller Betone</b>					<b>Mittelwert</b>	<b>20</b>			
					<i>Standard- abweichg.</i>	10,8	-	-	-

9) Versuchabbruch nach 18 FTW

**Tabelle A5:** Übersicht über alle mit dem **CDF-Test** geprüften Betone, die aufgrund ihrer Zusammensetzung die Anforderungen der **Expositionsklasse XF2a** (mit künstlich eingeführten Luftporen) gemäß EN 206-1:2001-07 /DIN01a/ und DIN 1045-2:2001-07 /DIN01b/ **erfüllen**

Zementart	Zement- gehalt z	FA- Gehalt f	Silika- gehalt s	(w/z) <sub>eq</sub> - Wert	Expositions- klasse	CDF-Test			Quelle
						FTW bis Abwitterung = 1.500 g/m <sup>2</sup>	RDM bei Abwitterung = 1.500 g/m <sup>2</sup>	Abwitterung nach 28 FTW	
-	kg/m <sup>3</sup>			-	-	-	%	g/m <sup>2</sup>	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CEM II/B-S 32,5R	270	90	0,55	4,2	XF2a	<b>39</b>	100	1200	/BRA00/
	270	90	0,55	4,8		<b>45</b>	92	1100	/BRA00/
CEM III/A 42,5N	300	-	0,55	4,5		<b>25</b>	98	1650	/BRA00/
	270	90	0,55	4,5		<b>18</b>	81	2100	/BRA00/
	270	90	0,55	4,5		<b>12</b>	89	3200	/BRA00/
CEM III/B 32,5N	300	-	0,55	4,9		<b>10</b>	98	3800	/BRA00/
<b>Gesamtauswertung aller Betone</b>						<b>Mittelwert</b>	<b>25</b>		
					<i>Standard- abweichg.</i>	14,4	-	-	-

**Tabelle A6:** Übersicht über alle mit dem **CDF-Test** geprüften Betone, die aufgrund ihrer Zusammensetzung die Anforderungen der **Expositions-kategorie XF2b** (ohne künstlich eingeführte Luftporen) gemäß EN 206-1:2001-07 /DIN01a/ und DIN 1045-2:2001-07 /DIN01b/ **erfüllen**

Zementart	Zement- gehalt z	FA- Gehalt f	(w/z) <sub>eq</sub> -Wert	Expositions- klasse	CDF-Test			Quelle
					FTW bis Abwitterung = 1.500 g/m <sup>2</sup>	RDM bei Abwitterung = 1.500 g/m <sup>2</sup>	Abwitterung nach 28 FTW	
-	kg/m <sup>3</sup>		-	-	-	%	g/m <sup>2</sup>	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9
CEM I 32,5 N	320	-	0,50	XF2b	<b>10</b>	k. A.	<sup>10), 11)</sup>	/SET07/
	320	-	0,50		<b>9</b>	96	<sup>10), 12)</sup>	/SET07/
	350	-	0,50		<b>14</b>	k. A.	2700	/STA97a/
	360	-	0,50		<b>13</b>	98	5900	/XU03/
CEM I 32,5 R	270	90	0,50		<b>21</b>	41	2750	/BRA00/
	320	-	0,50		<b>8</b>	99	<sup>10), 12)</sup>	/SET07/
	320	-	0,50		<b>18</b>	98	2800	/SET07/
	320	-	0,50		<b>23</b>	89	2000	/BRA00/
	350	-	0,50		<b>15</b>	k. A.	2200	/LUD94/
	350	-	0,50		<b>13</b>	k. A.	3750	/STA97c/
	360	-	0,50		<b>10</b>	k. A.	5800	/LOH03/
CEM I 42,5 R	380	-	0,50		<b>10</b>	92	6500	/HEI00/
	270	90	0,50		<b>16</b>	98	3000	/BRA03/
	300	70	0,50		<b>12</b>	99	6000	/BRA03/
	320	-	0,50		<b>14</b>	98	4500	/BRA03/
Auswertung der CEM I-Betone					<b>Mittelwert</b>	<b>14</b>		
				<i>Standard- abweichg.</i>	4,4	-	-	-

Tabelle A6: Fortsetzung

Zementart	Zement- gehalt z	FA- Gehalt f	(w/z) <sub>eq</sub> -Wert	Expositions- klasse	CDF-Test			Quelle
					FTW bis Abwitterung = 1.500 g/m <sup>2</sup>	RDM bei Abwitterung = 1.500 g/m <sup>2</sup>	Abwitterung nach 28 FTW	
-	kg/m <sup>3</sup>	-	-	-	-	%	g/m <sup>2</sup>	-
1	2	3	4	5	6	7	8	9
CEM III/ A 32,5 N	350	-	0,50	XF2b	3	k. A.	4400	/LUD94/
	350	-	0,50		15	k. A.	2648	/STA97c/
	350	-	0,50		9	k. A.	3000	/STA97c/
	350	-	0,50		3	k. A.	4321	/STA97c/
CEM III/ A 42,5 N	320	-	0,50		13	60	2750	/BRA00/
	270	90	0,50		8	38	4200	/BRA00/
CEM III/ B 32,5	340	40	0,46		5	k. A.	3000	/LAN03/ <sup>13)</sup>
	360	-	0,50		8	98	3000	/XU03/
CEM III/B 42,5 N	320	-	0,50		11	k. A.	2800	/SET07/
Auswertung der CEM III-Betone					<b>Mittelwert</b>	<b>8</b>	-	-
				<i>Standard- abweichg.</i>	4,2			
CEM II/ A-LL 32,5 R	320	-	0,50	XF2b	14	95	4000	/SET07/
CEM II/ B-S 32,5 R	270	90	0,50		15	41	3500	/BRA00/
	320	-	0,50		23	48	2000	/BRA00/
<b>Gesamtauswertung aller Betone</b>				<b>Mittelwert</b>	<b>12</b>	-	-	-
				<i>Standard- abweichg.</i>	5,3			

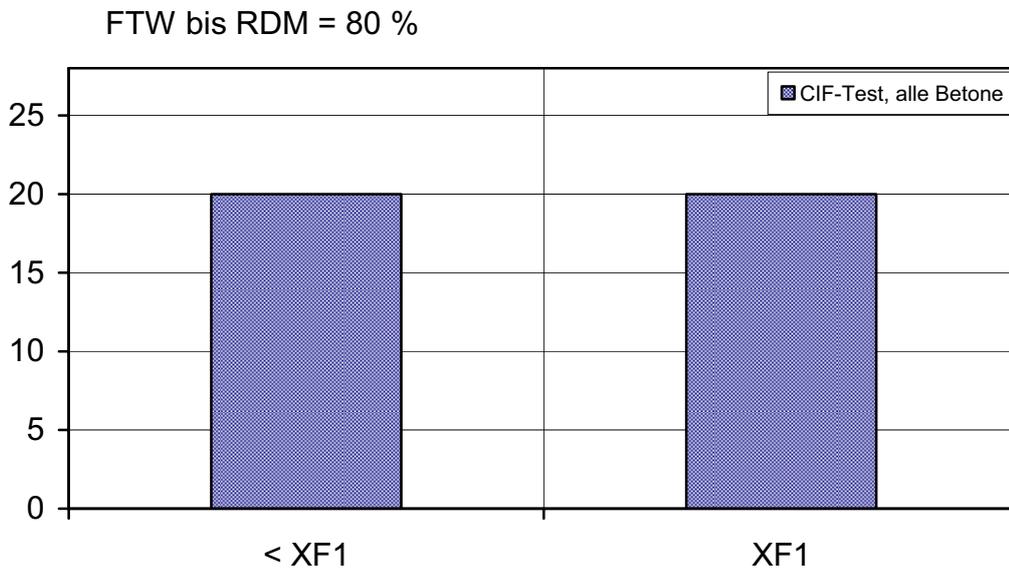
10) Daten liegen bis 5.000 g/m<sup>2</sup> vor11) 5.000 g/m<sup>2</sup> bei ~23 FTW12) 5.000 g/m<sup>2</sup> bei ~26 FTW

13) NW/HS/NA

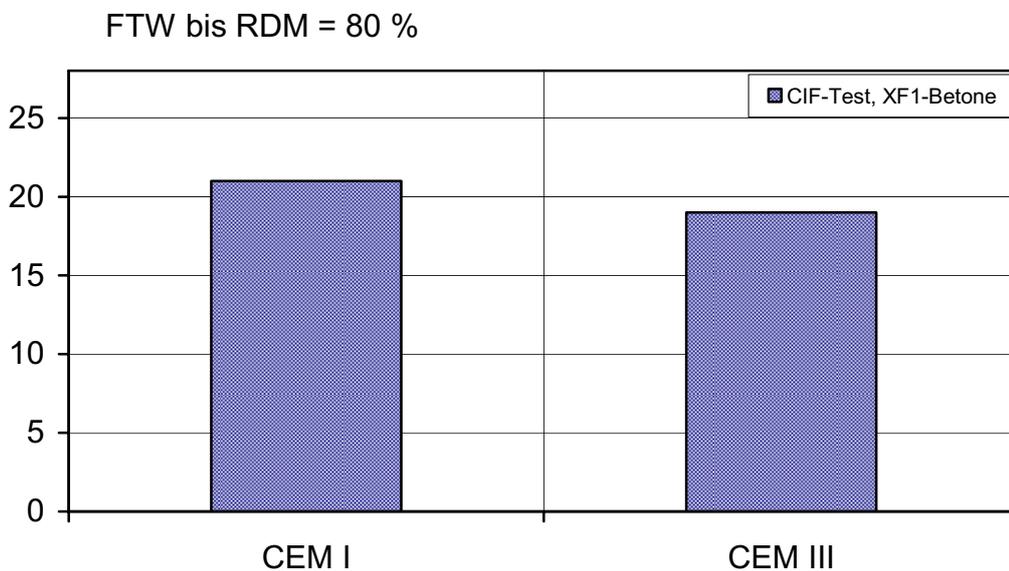
**Tabelle A7:** Übersicht über alle mit dem **CDF-Test** geprüften Betone, die aufgrund ihrer Zusammensetzung die Anforderungen der **Expositions-klasse XF2** gemäß EN 206-1:2001-07 /DIN01a/ und DIN 1045-2:2001-07 /DIN01b/ **unterschreiten**

Zementart	Zement- gehalt z	FA- Gehalt f	$(w/z)_{eq}$ -Wert	Expositions- klasse	CDF-Test			Quelle	
					FTW bis Abwitterung = 1.500 g/m <sup>2</sup>	RDM bei Abwitterung = 1.500 g/m <sup>2</sup>	Abwitterung nach 28 FTW g/m <sup>2</sup>		
-	kg/m <sup>3</sup>		-	-	-	%	g/m <sup>2</sup>	-	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	
CEM I 32,5 N	320	-	0,60	< XF2	<b>6</b>	96	<sup>10), 15)</sup>	/SET07/	
	360	-	0,60		<b>12</b>	55	7400	/XU03/	
CEM I 32,5 R	300	-	0,60		<b>6</b>	k. A.	<sup>14), 16)</sup>	/LOH03/	
	320	-	0,60		<b>10</b>	95	<sup>10), 17)</sup>	/SET07/	
	320	-	0,60		<b>12</b>	86	<sup>10), 15)</sup>	/SET07/	
CEM II/ ALL 32,5 R	320	-	0,60		<b>10</b>	95	<sup>10), 18)</sup>	/SET07/	
CEM III/ B42,5N	320	-	0,60		<b>7</b>	98	3700	/SET07/	
<b>Gesamtauswertung aller Betone</b>					<b>Mittelwert</b>	<b>9</b>			
					<i>Standard- abweichg.</i>	2,6	-	-	-

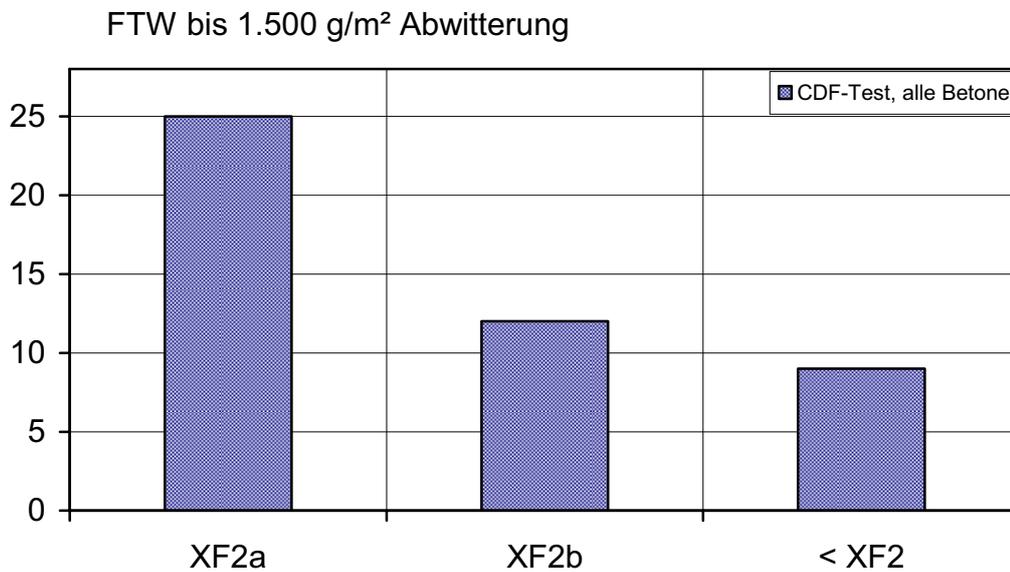
- 10) Daten liegen bis 5.000 g/m<sup>2</sup> vor  
 14) Daten liegen bis 7.000 g/m<sup>2</sup> vor  
 15) 5.000 g/m<sup>2</sup> bei ~22 FTW  
 16) 7.000 g/m<sup>2</sup> bei ~26 FTW  
 17) 5.000 g/m<sup>2</sup> bei ~24 FTW  
 18) 5.000 g/m<sup>2</sup> bei ~25 FTW



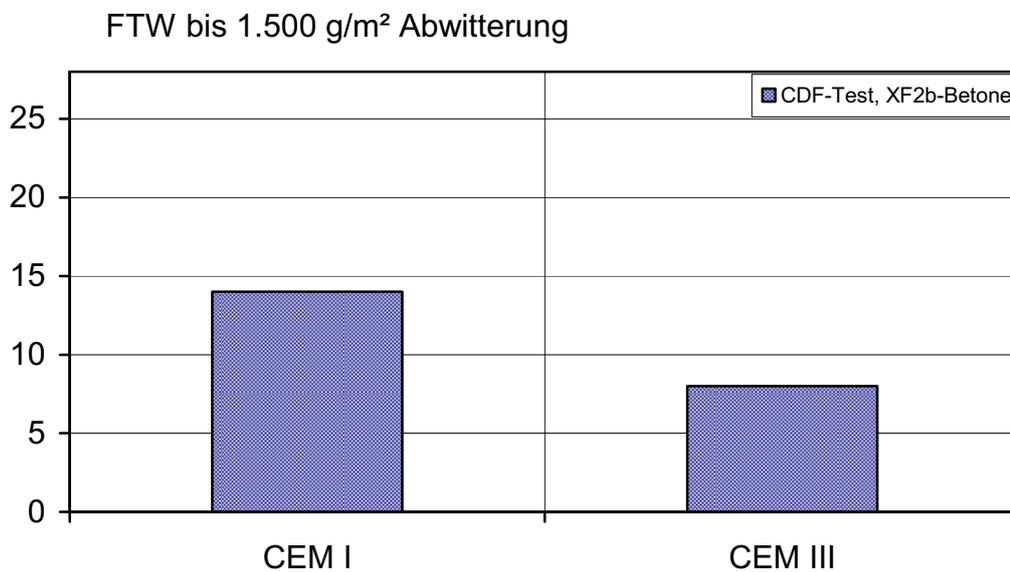
**Bild B1:** CIF-Test – mittlere Anzahl der FTW bis zum Abfall des relativen dynamischen E-Moduls (RDM) auf 80 %, unterteilt nach für eine XF1-Exposition normkonformen Zusammensetzungen (XF1) und nicht-normkonformen Zusammensetzungen (< XF1)



**Bild B2:** CIF-Test – mittlere Anzahl der FTW bis zum Abfall des relativen dynamischen E-Moduls (RDM) auf 80 %. Betone mit einer für eine XF1-Exposition normkonformen Zusammensetzungen unterteilt nach vorkommenden Hauptzementarten (CEM I, CEM III)



**Bild B3:** CDF-Test – mittlere Anzahl der FTW bis zum Erreichen einer Abwitterungsmenge von 1.500 g/m<sup>2</sup>, unterteilt nach Zusammensetzungen mit (XF2a) und ohne künstlich eingeführten Luftporen (XF2b) sowie nicht-normkonforme Zusammensetzungen (< XF2)



**Bild B4:** CDF-Test – mittlere Anzahl der FTW bis zum Erreichen einer Abwitterungsmenge von 1.500 g/m<sup>2</sup>. Betone ohne künstlich eingeführte Luftporen (XF2b) unterteilt nach Hauptzementarten (CEM I, CEM III)