

Prüfung des Frost- Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)

Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 84

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.

Prüfung des Frost- Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)

von

Christoph Gehlen
Dirk Lowke
Charlotte Milachowski

cbm Centrum Baustoffe und Materialprüfung
Technische Universität München

**Berichte der
Bundesanstalt für Straßenwesen**

Brücken- und Ingenieurbau Heft B 84

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 **Forschung kompakt** berichtet. Dieser Dienst wird kostenlos abgegeben; Interessenten wenden sich bitte an die Bundesanstalt für Straßenwesen, Stabsstelle Presse und Öffentlichkeitsarbeit.

Impressum

Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.460/2008/DRB:
Untersuchungen zur Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)

Projektbetreuung
Franka Tauscher

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

Redaktion
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 978-3-86918-180-6

Bergisch Gladbach, Dezember 2011

Kurzfassung – Abstract

Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)

Eine Bewertung für Betone, die den Anforderungen der Expositionsklasse XF2 genügen sollen, ist derzeit nur nach dem deskriptiven Konzept möglich. Um den Frost-Tausalz-Widerstand von Betonen in der Expositionsklasse XF2 durch ein Laborprüfverfahren nachweisen zu können, wurde in den letzten Jahren das modifizierte CDF-Verfahren (XF2) entwickelt, das einen abgeschwächten Frost-Tausalz-Angriff gemäß XF2-Exposition erzeugt und eine Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstandes bei mäßiger Sättigung zulässt. Hierbei wird bei gleicher Abkühlrate wie beim bekannten CDF-Verfahren für die Exposition XF4 die Minimaltemperatur auf -10 °C angehoben und die Prüfdauer auf 14 Frost-Tau-Wechsel verkürzt. Aufgrund der geringen Datenbasis war es bisher nicht möglich, ein Abnahmekriterium festzulegen, mit dem für die Expositionsklasse XF2 geeignete Betonzusammensetzungen zuverlässig von ungeeigneten unterschieden werden können. Auch konnte das Prüfverfahren für eine Validierung noch nicht ausreichend charakterisiert werden. Eine Validierung des Prüfverfahrens würde es ermöglichen, Betonmischungen auch in der Expositionsklasse XF2 zu bewerten. Die Ziele des Forschungsvorhabens waren deshalb, eine Empfehlung für ein an der Praxis orientiertes Abnahmekriterium zu geben und das modifizierte CDF-Verfahren (XF2) zu validieren.

Da eine Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstands über ein Laborprüfverfahren nur dann möglich ist, wenn ein an der Praxis orientierter Grenzwert vorliegt, wurde auf Basis der Prüfung von 17 verschiedenen Betonrezepturen eine Empfehlung für ein Abnahmekriterium von 1.000 g/m^2 mittlerer aufsummierter Abwitterung nach 14 Frost-Tau-Wechseln gegeben. Dieses Kriterium gilt für die untersuchten Betone, die bis auf die Mindestdruckfestigkeit die Anforderungen an die DIN-Normen erfüllen.

Um die Prüfstreuung des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2) zu beurteilen und damit die Qualität des Prüfverfahrens abschätzen zu können, wurden die Präzisionsdaten in Anlehnung an DIN ISO 5725 ermittelt. Die Präzision ist ein wichtiges Kriterium für die Qualität eines Prüfverfahrens. Die Wiederholpräzision wurde am cbm der TU München durch

die Prüfung von 29 Betonen mit 17 verschiedenen Zusammensetzungen bestimmt. Bei einer mittleren Abwitterung von 1.500 g/m^2 lag die Wiederholpräzision mit rund 13 % leicht über der Wiederholpräzision, die für das bereits bekannte CDF-Verfahren ermittelt wurde. Für eine mittlere aufsummierte Abwitterung von 1.000 g/m^2 ergibt sich ein Variationskoeffizient von 13,9 %. Die Präzision unter Zwischenbedingungen umfasst den Einfluss aus der Betoncharge (Zeit) sowie aus unterschiedlichen Bearbeitern und Prüfgeräten. Die in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Untersuchungen zeigten mit einem Variationskoeffizienten von 18 % bei einer mittleren Abwitterung von 1.000 g/m^2 eine verhältnismäßig geringe Streuung der Prüfergebnisse unter Zwischenbedingungen.

Die Vergleichspräzision gibt das Maximum der Streuung an. Sie wird durch Messungen unter veränderlichen Bedingungen (verschiedenen Labors, verschiedenen Bearbeitern und verschiedener Geräteausstattung) ermittelt. Zur Bestimmung der Vergleichspräzision wurde ein Ringversuch durchgeführt, an dem sich fünf deutsche Institute beteiligten. Untersucht wurden drei Betone, die sich deutlich in ihrem Frost-Tausalz-Widerstand unterschieden. Die Betonqualitäten konnten eindeutig voneinander unterschieden werden. Alle Institute ermittelten für jeden Beton eine Steigung im Abwitterungsverlauf, die der erwarteten Schädigung entsprach. Bei einer mittleren Abwitterung von 1.000 g/m^2 ergab sich ein Variationskoeffizient unter Vergleichsbedingungen von 26 %.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass das modifizierte CDF-Verfahren (XF2) gemäß DIN EN ISO 17025 validiert ist. Die Korrelation zur Praxis wurde bereits in einem vorangegangenen Forschungsvorhaben festgestellt. Für die hier untersuchten Betone wurde ein Abnahmekriterium von 1.000 g/m^2 mittlerer aufsummierter Abwitterung nach 14 Frost-Tau-Wechseln abgeleitet. Die Präzision des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2) liegt in der Größenordnung anderer etablierter Festbetonprüfungen (zum Beispiel der Druckfestigkeitsprüfung). Demnach liefert das modifizierte CDF-Verfahren (XF2) reproduzierbare und präzise Ergebnisse.

Testing the freeze-thaw-resistance of concrete by the „modified CDF-method XF2“

Currently there is no test method for evaluating concrete compositions which should fulfil the requirements of the exposure class XF2. Therefore, the “modified CDF method XF2” was developed in recent years. Compared to the established CDF method for evaluating concretes in the exposure class XF4 the cooling ratio is unchanged. The minimum temperature changed to -10°C and the test period was shortened to 14 freeze-thaw-cycles. Due to the small data base a resistance limit has not been determined yet. Such a resistance limit allows a distinction between resistant and non-resistant concrete. To verify the test method, it must be assessed in accordance with DIN ISO 5725. Such verification would show that the test method is approved with respect to practical performance. Therefore, the aims of this study were to define a resistance limit which represents the practical knowledge and to verify the test method.

To determine a resistance limit, 17 different concrete compositions have been analysed. All concretes meeting strictly all the design specifications of standards had a mean scaling below 1000 g/m^2 . Therefore, the resistance limit after 14 freeze-thaw-cycles for the analysed concrete compositions is 1000 g/m^2 mean scaling. To evaluate the scatter of the “modified CDF method XF2” the precision was determined in accordance with ISO 5725. The precision of a test method is the basis of any acceptance criterion for the quality assessment of a product.

The repeatability covering the scatter of the materials and the test method was determined by evaluating 29 different concretes with 17 different compositions. The coefficient of variation for repeatability after 14 freeze-thaw-cycles at 1500 g/m^2 mean scaling has been established at 13%. Thus, the scatter of the “modified CDF method XF2” is slightly higher than the scatter of the established CDF method. Under consideration of the scatter of the material, the scatter of the “modified CDF test XF2” is very good. At 1000 g/m^2 mean scaling the coefficient of variation for repeatability after 14 freeze-thaw-cycles was 13,9%.

The scatter between laboratories contains the impact of different operators and different equipment. In this research project investigations

under intermediate precision conditions varying the factors time, operator and equipment have been carried out. The results showed a high precision under intermediate conditions. The coefficient of variation of reproducibility has been established at 18% at 1000 g/m^2 mean scaling.

The precision under reproducibility conditions indicates the maximum of the scatter. To assess the reproducibility a round robin test is necessary. To determine the reproducibility a collaborative assessment experiment was carried out. Five German institutes participated. Three concrete series with expected very high, intermediate and very low freeze resistance were tested. At a mean scaling of 1000 g/m^2 the reproducibility coefficient of variance has been established at 26%. Thus, the precision of the “modified CDF method XF2” is in the range of other established test methods for hardened concrete (i.e. measurement of compressive strength). In summary, the results of this research project showed that the “modified CDF method XF2” is precise and reliable.

Inhalt

1	Einleitung und Problemstellung	7	5.7.1 Rohdichte und Druckfestigkeit	21
			5.7.2 Luftporenkennwerte	22
2	Zielsetzung und Lösungsweg	7	5.7.3 Frost-Tausalz-Widerstand	22
3	Laborprüfverfahren zur Beurteilung der Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton	8	6 Ergebnisse der Untersuchungen zum Abnahmekriterium	23
3.1	Unterschiede in den Expositions-klassen XF2 und XF4	8	6.1 Ergebnisse der Frischbeton-untersuchungen	23
3.2	Laborprüfverfahren	8	6.2 Ergebnisse der Festbeton-untersuchungen	23
3.2.1	Allgemeines	8	6.2.1 Rohdichte und Druckfestigkeit	23
3.2.2	Laborprüfverfahren zur Beurteilung von Betonen in der Expositions-klasse XF4	9	6.2.2 Frost-Tausalz-Widerstand	25
3.2.3	Laborprüfverfahren für Betone in der Expositions-klasse XF2	10	7 Ergebnisse der Untersuchungen zur Ermittlung der Präzision	29
4	Validierung von Prüfverfahren	12	7.1 Wiederholpräzision	29
4.1	Zweck und Vorgehen	12	7.2 Untersuchungen zur Ermittlung der Präzision unter Zwischen-bedingungen (M = 1)	31
4.2	Präzision eines Prüfverfahrens	12	7.2.1 Frischbetonkennwerte	31
4.2.1	Definitionen	12	7.2.2 Rohdichte und Druckfestigkeit	31
4.2.2	Ermittlung der Präzision	14	7.2.3 Frost-Tausalz-Widerstand	31
5	Untersuchungsprogramm	16	7.3 Untersuchungen zur Ermittlung der Präzision unter Zwischen-bedingungen (M = 3)	32
5.1	Übersicht	16	7.3.1 Frischbetonkennwerte	32
5.2	Ausgangsstoffe	16	7.3.2 Rohdichte und Druckfestigkeit	32
5.2.1	Zemente	16	7.3.3 Frost-Tausalz-Widerstand	33
5.2.2	Wasser	16	7.4 Präzision unter Zwischen-bedingungen	33
5.2.3	Gesteinskörnungen	16	7.5 Präzision unter Vergleich-bedingungen	34
5.2.4	Zusatzmittel	18	7.5.1 Planung des Ringversuches	34
5.3	Zusatzstoffe	18	7.5.2 Ergebnisse	35
5.4	Zusammensetzung der Betone	18	8 Validierung des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2)	39
5.4.1	Untersuchungen zum Abnahme-kriterium	18	8.1 Charakterisierung des Prüfverfahrens	39
5.4.2	Untersuchungen zur Präzisions-datenermittlung	19	8.2 Vergleich mit Qualitätsanforderungen	39
5.5	Herstellung der Betone	21	8.3 Nachweis der Erfüllung	39
5.6	Frischbetonuntersuchungen	21		
5.7	Festbetonuntersuchungen	21		

9 Zusammenfassung und Ausblick ... 41

Literatur 42

Anhänge

Anhang 1: Zusätzliche Tabellen

Anhang 2: Statistische Auswertung nach ISO 5725

Anhang 3: Empfehlungen für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Betonen in der Expositionsklasse XF2

Diese Anhänge liegen dem Bericht als CD bei.

1 Einleitung und Problemstellung

Nach aktuellem Stand der Technik wird die Dauerhaftigkeit einzelner Betonbauteile über das so genannte deskriptive Konzept sichergestellt. Dieses, auf jahrzehntelanger Erfahrung beruhende Vorgehen schreibt die einzuhaltenden Mindestanforderungen an die Betonrezeptur vor (maximaler w/z-Wert, Mindestzementgehalt, Zementart, Luftgehalt im Frischbeton etc.). Durch diese eng begrenzten Vorschriften ist ein Einsatz von innovativen Baustoffen, bei denen keine Langzeiterfahrungen existieren, nicht bzw. nur bedingt möglich. Das „Lab-Performance-Konzept“ lässt hingegen Rückschlüsse auf das Verhalten von Beton in der jeweiligen Exposition zu. Hier kann die Eignung von Betonmischungen durch entsprechende Prüfverfahren direkt über deren Leistungsfähigkeit bestimmt werden.

Der Nachweis der Eignung von Mischungszusammensetzungen mit dem Lab-Performance-Konzept für Betonbauteile, die einer Frost-Tausalz-Belastung ausgesetzt sind, war bisher nur für Betone der Exposition XF4 möglich. Daher wurde in den letzten Jahren das modifizierte CDF-Verfahren (XF2) [55] entwickelt. Hierbei wird bei gleicher Abkühlrate wie im CDF-Verfahren [37] die Minimaltemperatur auf -10 °C angehoben und die Prüfdauer auf 14 Frost-Tau-Wechsel verkürzt. Aufgrund der geringen Datenbasis in [55] war es bisher noch nicht möglich, ein Abnahmekriterium zu finden, mit dem für die Expositionsklasse XF2 geeignete Betonzusammensetzungen zuverlässig von ungeeigneten unterschieden werden können.

Auch konnte das Prüfverfahren für eine Validierung noch nicht ausreichend charakterisiert werden. Im Rahmen der DIN ISO/IEC 17025 [19] sind eine Validierung einer Prüfmethode und damit auch die Ermittlung der Messunsicherheiten vorgeschrieben. Hierdurch wird nachgewiesen, dass eine Prüfmethode die speziellen Anforderungen für den jeweiligen Gebrauch erfüllt.

2 Zielsetzung und Lösungsweg

Die Ziele dieses Forschungsvorhabens waren die Empfehlung eines Abnahmekriteriums für normkonforme Betone im Bereich der Bundesfernstraßen sowie die Ermittlung der Präzision des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2). Unter Einbeziehung der Ergebnisse aus [55] wird damit eine Validierung des Prüfverfahrens möglich. Die Validierung weist nach, dass ein Prüfverfahren unter Berücksichtigung der ermittelten Unsicherheiten geeignet ist, eine vorgegebene spezifische Prüfaufgabe zu erfüllen [28]. Sie stellt somit die Grundlage für eine normative Regelung dar. Die beiden Ziele sind schematisch in Bild 1 zusammengefasst.

Durch Prüfung von 17 verschiedenen Betonzusammensetzungen, die einerseits die Anforderungen an die Mischungszusammensetzung nach den gültigen Regelwerken erfüllen, sowie solche, die andererseits gezielt davon abweichen, wurde eine Empfehlung für ein Abnahmekriterium gegeben. Das Abnahmekriterium gilt für die in diesem Forschungsvorhaben untersuchten Betone, die bis auf die Mindestdruckfestigkeitsklasse die Anforderungen an die Norm erfüllen. Die Überprüfung der Eig-

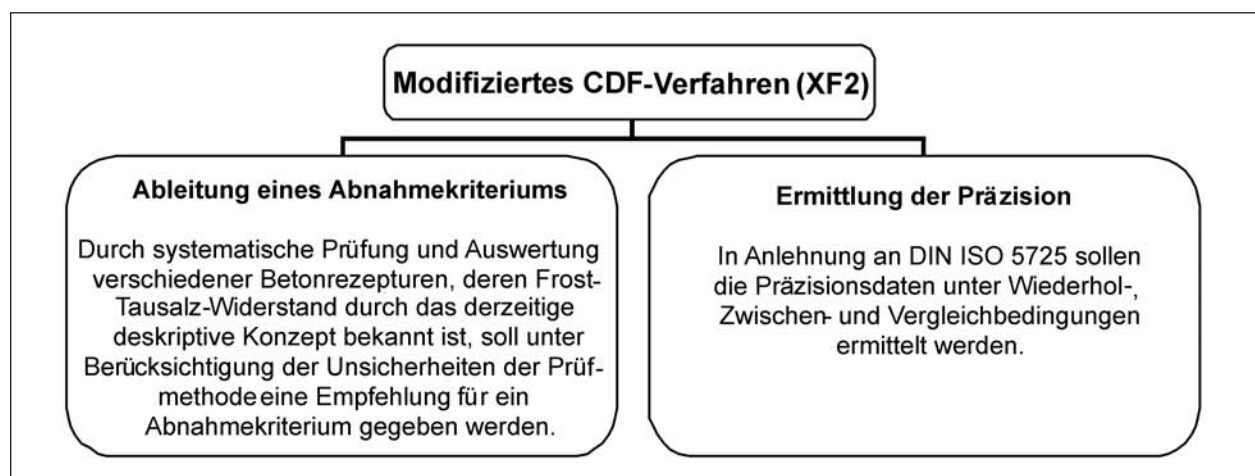


Bild 1: Schematische Übersicht über das Untersuchungskonzept dieses Forschungsvorhabens

nung von Gesteinskörnungen sowie die Überprüfung von Betonzusammensetzungen mit Luftporenbildnern sind derzeit mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) noch nicht möglich.

Um nachzuweisen, dass das Prüfverfahren zuverlässige und reproduzierbare Ergebnisse liefert, wurde die Präzision in Anlehnung an DIN ISO 5725 [18] ermittelt. Nach SETZER [55] ist prinzipiell eine Übertragung der Präzisionsdaten des bekannten CDF-Verfahrens auf das neu entwickelte Prüfverfahren möglich, da bis auf die Minimaltemperatur die Randbedingungen gleich gehalten werden. Daher wurde im Rahmen dieses Forschungsvorhabens ein im Vergleich zur Präzisionsdatenermittlung des CDF-Verfahrens deutlich kleineres Untersuchungsprogramm durchgeführt, das – unter Berücksichtigung der breiten Datenbasis des bekannten CDF-Verfahrens – für eine Bewertung der Präzisionsdaten nach DIN ISO 5725 ausreichend ist. Hierzu wurde u. a. ein Ringversuch, an dem fünf Prüfinstitute teilnahmen, durchgeführt. Die Bewertungs- und Abnahmekriterien wurden überprüft und die Streuung des Verfahrens ermittelt. Die Präzisionsdatenermittlung dient der Charakterisierung eines Prüfverfahrens und ist damit ein wesentlicher Bestandteil der Validierung eines Prüfverfahrens.

3 Laborprüfverfahren zur Beurteilung der Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton

3.1 Unterschiede in den Expositionsklassen XF2 und XF4

Nach aktuellem Stand der Normung wird ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand von Betonen durch die Betonrezeptur erreicht. Nach DIN 1045-2:2008-08 [6] werden Betone, die einer Frost-Tausalz-Belastung ausgesetzt sind, in Abhängigkeit der erwarteten Angriffsstärke in die Expositionsklasse XF2 oder XF4 eingeteilt. Die Angriffsstärke wird hierbei nach dem erwarteten Feuchtepotenzial bestimmt. Betone, die einer ständigen Durchfeuchtung mit Taumitteln bei gleichzeitigem Frostangriff ausgesetzt sind, werden der Expositionsklasse XF4 zugeordnet (z. B. Brückenkappen). Bauteile, bei denen lediglich eine mäßige Durchfeuchtung erwartet wird, werden der Expositionsklasse XF2 zugeschrieben [55]. Hierzu zählen z. B. Flächen im Spritzwasser- und Sprühnebelbereich von tausalz-

belasteten Flächen, an denen das Sprüh- bzw. Spritzwasser ablaufen kann und an denen kein Spritzwasser ansteht, das kapillar aufsteigen und eine hohe Wassersättigung verursachen kann. Eine Unterscheidung der Angriffsstärke hinsichtlich der Temperatur (Minimaltemperatur, Anzahl Frost-Tau-Wechsel etc.) ist nicht vorgesehen.

Für die Praxis bedeutet diese Unterteilung, dass bei der XF2-Exposition ein geringeres Angebot an Tausalzlösung im Vergleich zur Expositionsklasse XF4 vorliegt. Im Bereich XF2 sind die Austrocknungsphasen ausgeprägter als bei XF4 und damit die Schädigungsphasen, also Phasen, während denen eine hohe Lösungssättigung bei gleichzeitiger Frost-Tau-Wechsel-Belastung auftritt, seltener. Der Zeitraum, in dem eine vollständige Sättigung der oberflächennahen Betonrandzone erreicht ist, ist damit der entscheidende Unterschied zwischen XF2 und XF4. Er bewirkt, dass Betone mit gleicher Zusammensetzung in der Expositionsklasse XF2 eine längere Lebensdauer aufweisen als Betone der Expositionsklasse XF4.

Baupraktisch werden Betone für die Expositionsklasse XF2 in der Regel nicht mit Luftporenmittel hergestellt. In der ZTV-ING 3-1 [72] ist für den Bereich der Expositionsklasse XF2 ein maximaler w/z-Wert von 0,50 vorgeschrieben. Zudem wird für ausgewählte Bauteile (Widerlager, Stützen, Pfeiler etc.) im Bereich XF2 eine Mindestdruckfestigkeitsklasse von C 30/37 vorgeschrieben. Die Verwendung verschiedener Zementarten ist nach ZTV-ING 3-1 [72] eingeschränkt. So dürfen in der Expositionsklasse XF4 CEM-II/B-M-Zemente nur mit Zustimmung des Auftraggebers, Zemente mit Hüttensanden nur mit einem Hüttensandgehalt von maximal 50 M.-% eingesetzt werden.

Weitere Anforderungen sind die Einhaltung einer Mindestbetondeckung von 40 mm und ein Nennmaß von 45 mm.

3.2 Laborprüfverfahren

3.2.1 Allgemeines

Zur Ermittlung und Beurteilung der Frost-Tausalz-Beständigkeit von Betonen kommen generell indirekte und direkte Prüfverfahren in Betracht. Bei einem indirekten Prüfverfahren wird aus den Eigenschaften des Betons auf seinen Frost-Tausalz-Widerstand geschlossen. Bei den direkten Verfahren hingegen wird der Beton einer zyklischen Frost-

Tau-Belastung ausgesetzt und die Menge an abgewittertem Material bestimmt. Die Abwitterung stellt dabei ein Maß für die äußere Schädigung dar.

Um Betonrezepturen, für die in der Praxis noch keine ausreichenden Erfahrungen vorliegen, sicher beurteilen zu können, muss ein Verfahren angewendet werden, mit dem innerhalb möglichst kurzer Zeit Betonzusammensetzungen auf ihre Frost-Tausalz-Beständigkeit geprüft werden können. Um dies zu erreichen, werden an ein so genanntes Lab-Performance-Prüfverfahren folgende Anforderungen gestellt [57]:

- einheitlich und einfach durchführbar,
- korrelierbar mit den Erfahrungen in der Praxis,
- wirtschaftlich,
- präzise.

Ein Prüfverfahren sollte immer reproduzierbare und vergleichbare Ergebnisse liefern. Hierzu muss es möglichst fehlerunanfällig sein. Idealerweise werden durch ein Lab-Performance-Prüfverfahren die Verhältnisse in der Praxis zeitraffend simuliert. Die wichtigsten bestehenden direkten Laborprüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands werden nachfolgend vorgestellt.

3.2.2 Laborprüfverfahren zur Beurteilung von Betonen der Expositionsklasse XF4

Nach derzeitigem Stand der Regelwerke [2, 14] sind in Deutschland das Plattenprüfverfahren, das Würfelverfahren und das CDF-Verfahren zur direkten Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands von Beton zulässig. Eine Übersicht über das Vorgehen bei der Probenpräparation, der Simulation des Schadensangriffes und die Schadensaufnahme dieser drei Prüfverfahren ist in Tabelle 1 zu-

	Plattenprüfverfahren	Würfelverfahren	CDF-Verfahren
1	2	3	4
Lagerung	7 d unter Wasser, 21 d 20 °C/65 % r. F.	7 d unter Wasser, 20 d 20 °C/65 % r. F.	7 d unter Wasser, 21 d 20 °C/65 % r. F.
Probenvorbehandlung	Zusägen der Seitenflächen erforderlich; Aufkleben einer Randeinfassung	-	Abdichten der Seitenflächen mit aluminiumkaschiertem Butylkautschukband oder Epoxidharz
Prüfkörper und -fläche	Geschnittene Innenfläche von 150 x 150 x 50 mm ³ großen Probekörpern	geschalte Flächen von Würfeln mit 100 mm Kantenlänge	Gegen Teflon geschalte Fläche von einer Prüffläche ≥ 800 cm ²
Beaufschlagungsrichtung	einseitig	allseitig	einseitig
Prüfalter	28 d	27 d	28 d
Sättigung vor der FTW-Belastung	3 ± 1 Tage in Leitungswasser	1 Tag in 3%iger NaCl-Lösung	7 Tage in 3%iger NaCl-Lösung
Dauer eines FTWs	24 h	24 h	12 h
Dauer der Prüfung	3 + 56 = 59 Tage	1 + 50 = 51 Tage	7 + 14 = 21 Tage
T _{min} /T _{max}	-18 °C/+20 °C in Prüflösung	-15 °C/+20 °C mittig in Probe	-20 °C/+20 °C unter Prüfbehälter
Temperaturregelung	Luftkühlung Temperaturaufzeichnung auf der Oberseite eines Probekörpers (in der Prüflösung)	Luftkühlung Temperaturaufzeichnung mittig in Referenzprobekörpern	Flüssigkeitskühlung Permanente Steuerung
Temperaturtoleranz	4 bis 6 K	2 K	0,5 K
Bestimmung der Abwitterung	Lose Partikel werden von der Prüffläche abgebürstet, abfiltriert und getrocknet	Lose Partikel werden von der Prüffläche abgebürstet, abfiltriert und getrocknet	Lose Partikel werden von der Prüffläche mittels Ultraschallbads gelöst, abfiltriert und getrocknet
Kriterium	Abwitterung < 1.000 g/m ² nach 56 FTW	Abwitterung < 3 M.-% nach 50 FTW; Abwitterung < 5 M.-% nach 100 FTW	Abwitterung < 1.500 g/m ² nach 28 FTW

Tab. 1: Übersicht der in Deutschland zugelassenen Laborprüfverfahren für Betone im Bereich XF4

sammengefasst. Ein ausführlicher Vergleich aller international zugelassenen Frost- und Frost-Tausalz-Prüfverfahren befindet sich z. B. in [1].

Die Lagerung bis zum Prüfbeginn ist bei den drei Verfahren ähnlich. Beim Würfelverfahren beginnt die Vorsättigung bei einem Probenalter von 27 Tagen. Bei dem Plattenprüfverfahren und dem CDF-Verfahren beginnt die Vorsättigung nach 28 Tagen. Die Probenvorbereitung inklusive der Vorsättigung unterscheidet sich stark voneinander. Beim Würfelverfahren dauert die Vorsättigung einen Tag, beim Plattenverfahren drei Tage, beim CDF-Verfahren sieben. Nach [24] führt eine Vorsättigung der Probekörper von 7 Tagen zur Einstellung eines praxisnahen Sättigungsgrades unter XF4-Bedingungen. In [53] wurde dargestellt, dass die geringere Wasseraufnahme bei Verkürzung der Vorsättigungsdauer auf einen Tag durch das Frostsaugen während der ersten Frost-Tau-Wechsel ausgeglichen wird. Bei den beiden anderen Verfahren ist die Vorsättigungsdauer mit einem (Würfelverfahren) bzw. drei Tagen (Plattenprüfverfahren) deutlich kürzer. Beim Plattenverfahren wird anstelle der Prüflösung eine Vorlagerung in Leitungswasser vorgeschrieben. Die Prüflösung ist bei allen drei Verfahren 3%ige NaCl-Lösung. Untersuchungen von HARTMANN [24] ergaben, dass sich im Bereich von ein bis drei Prozent ein Maximum der Schädigung einstellt.

Temperaturmessungen von SETZER [57] zeigten, dass sich bei einer Auslastung von 25 Proben im Gefrierschrank beim Plattenprüfverfahren eine maximale Temperaturdifferenz von 4 Kelvin in den einzelnen Proben einstellen kann. Um dies zu unterbinden, ist beim CDF-Verfahren die Prüfung in einer gefüllten Prüfruhe vorgeschrieben. Bei den anderen beiden Prüfverfahren können diese Ungenauigkeiten auftreten.

Zur Bestimmung der Abwitterung wird der Probekörper beim Plattenprüfverfahren und beim Würfelverfahren manuell von losen Bestandteilen abgebürstet. Durch eine dreiminütige Reinigung im Ultraschallbad wird der manuelle Einfluss bei der Bestimmung der losen Abwitterungen beim CDF-Verfahren unterbunden [1]. In den Normen ist beim Plattenprüf- und beim Würfelverfahren eine Toleranz von ± 2 Kelvin bei der Tiefsttemperatur möglich. Diese hat nach Untersuchungen von HARTMANN [24] einen signifikanten Einfluss auf die entstehenden Abwitterungen. Durch die Verwendung

einer Temperierflüssigkeit wird beim CDF-Verfahren eine präzise Temperaturbeanspruchung im Prüfsystem geschaffen [1]. Der Toleranzbereich der Tiefsttemperatur liegt hier bei $\pm 0,5$ Kelvin. Durch den 12-stündigen Temperaturzyklus kann beim CDF-Verfahren eine kürzere Prüfdauer realisiert werden.

Der Streubereich des Würfelverfahrens wird von WISCHERS und KRELL [33] mit ± 3 M.-% angegeben.

Aufgrund der Vorteile gegenüber anderen Verfahren wurde das CDF-Verfahren als Basis für die Entwicklung eines Laborprüfverfahrens für die Expositionsklasse XF2 herangezogen [55].

3.2.3 Laborprüfverfahren für Betone der Expositionsklasse XF2

Während in Österreich nach ÖNORM B 3303 Betone im Bereich XF2 durch Vergleich mit einem Referenzbeton beim Plattenprüfverfahren bewertet werden, gibt es in Deutschland bislang kein anerkanntes Prüfverfahren, um Betone im Bereich XF2 zuverlässig zu beurteilen. Das bekannte CDF-Verfahren lässt nur eine Beurteilung von Betonrezepturen im Bereich XF4 zu und prüft damit für den Bereich XF2 zu scharf. In Deutschland existiert eine beträchtliche Anzahl an Verkehrsbauteilen, die dieser Expositionsklasse zuzuordnen ist, sodass ein Prüfverfahren für diesen Bereich enorme wirtschaftliche und durch die Möglichkeit der Verwendung neuer Ausgangsstoffe auch ökologische Vorteile hätte.

Basierend auf dem CDF-Verfahren wurde in [55] eine Laborprüfmethode entwickelt, die eine Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstandes bei einer mäßigen Wassersättigung (Expositionsklasse XF2) ermöglicht. Hierbei wurden die allgemeinen Anforderungen an ein Prüfverfahren (vgl. Kapitel 3.2.1) mit einbezogen.

Zahlreiche Laboruntersuchungen, bei denen die Einflussparameter

- Nachbehandlung,
- Vorsättigungsdauer,
- Wechsellagerung,
- Konzentration der NaCl-Lösung und
- Minimaltemperatur

variiert und analysiert wurden, zeigten, dass eine Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstands gegenüber einer XF2-Exposition über eine Einstellung eines mäßigen Feuchtigkeitsgehalts nicht eindeutig möglich ist [55]. Vielmehr kann ein abgeschwächter Frost-Tausalz-Angriff, wie er bei der Exposition XF2 zu verzeichnen ist, durch die Anhebung der Minimaltemperatur in Kombination mit einer verkürzten Prüfdauer zeitraffend und praxiskonform simuliert werden [55].

Eine unterschiedliche Nachbehandlungsqualität wirkt sich insbesondere auf die Oberflächenqualität des Betons (unterschiedliche Ausbildung der Porenstruktur in der Betonrandzone etc.) aus. Um die Nachbehandlungsqualität zu erhöhen und die Lösungsaufnahme der Proben während der Vorsättigung zu verringern, wurden Probekörper nach der Herstellung in Folie verpackt, anstatt sie unter Wasser zu lagern. Die sich bei der zyklischen Frost-Tau-Belastung einstellende Schädigung trat daraufhin nur zeitversetzt, im gleichen Ausmaß, auf.

Als zweiter Parameter wurde die Vorsättigung statt sieben nur einen Tag bzw. überhaupt nicht durchgeführt. Die Untersuchungen zeigten, dass sich dann die Aufnahme an Prüflösung in die Phase der Frost-Tausalz-Beanspruchung verschiebt.

In einem weiteren Schritt wurde die Möglichkeit der Verringerung der Lösungsaufnahme durch Unterbrechung der Lösungszufuhr (Wechselagerung) untersucht. Auch diese Untersuchungen führten lediglich zu einer Unterbrechung der Lösungsaufnahme und somit nicht zu einer Simulation eines abgeschwächten Angriffs.

In einer weiteren Untersuchungsreihe wurden die Konzentrationen der Prüflösungen von 0,1 % bis 18 % variiert. Es wurde bestätigt, dass Tausalz-Konzentrationen von 1 bis 3 M.-% zu den höchsten Schädigungsgraden führen. Dies kann durch die Überlagerung zweier gegenläufiger Effekte erklärt werden: Mit steigender Tausalz-Konzentration wird der Anteil an gefrierbarem Wasser verringert und der mögliche osmotische Druck erhöht [1]. Zudem führt eine Erhöhung der Tausalzkonzentration zu einer Gefrierpunktniedrigung und damit zu einer Verminderung der Eisbildung. Auf der anderen Seite hat gelöstes Salz eine hygroskopische Wirkung, sodass mit steigender Taumittelkonzentration weniger Wasser verdunsten kann [43, 59]. Für die Simulation eines abgeschwächten Frost-Tausalz-Angriffs für die Expositionsklasse XF2 ist eine Än-

derung der NaCl-Konzentration ungeeignet, da sich Schädigungen unterschiedlicher Betonzusammensetzungen mit einer 3%igen Lösung am besten voneinander unterscheiden lassen [55].

Der Einfluss der Minimaltemperatur bei der Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands von Beton bei Laborprüfverfahren wurde bereits vielfach diskutiert [3, 24 und 52]. Um die Effizienz der Mikroslinsepumpe sowie die Menge an gefrierbarem Wasser zu reduzieren, wurden in [55] Untersuchungen mit einem modifizierten Temperaturzyklus durchgeführt. Hierbei wurde bei gleicher Abkühl- und Auftaugeschwindigkeit die Minimaltemperatur auf -10 °C angehoben. Es zeigte sich, dass die Eisbildung in den Kapillarporen verringert wird, was zur Folge hat, dass ein geringerer Feuchtigkeits-transport zwischen den Poren stattfindet und somit der kritische Sättigungsgrad und damit der Schadenszeitpunkt zeitlich verzögert eintreten. Die Untersuchungen in [55] bewiesen, dass die Modifizierung des Temperaturzyklus eine Abschwächung des Schädigungsgrades in Abhängigkeit von der Mischungszusammensetzung bewirkt.

Auch der Einfluss des Härtegrades des verwendeten Wassers spielt bei der Frost-Tausalz-Prüfung eine Rolle. So wurde in vergangenen Untersuchungen festgestellt, dass durch die Verwendung von Leitungswasser mit geringer Härte Abweichungen in den ermittelten Abwitterungen von bis zu 20 % möglich sind. Beim Vergleich von demineralisiertem Wasser und Leitungswasser hoher Härte wurden bei der reinen Frostprüfung ohne Tausalz sogar Abweichungen von 400 % in der Menge an abgewittertem Material festgestellt [24].

Letztendlich ergaben die Untersuchungen in [55], dass eine Anhebung der Minimaltemperatur auf -10 °C einen abgeschwächten Frost-Tausalz-Angriff im Labor simuliert. Die Abwitterungen liegen signifikant unter denen des bekannten CDF-Verfahrens. Die innere Schädigung setzt zeitverzögert ein. Über die Abwitterung können für den Bereich XF2 unterschiedliche Betonqualitäten bereits nach 14 Frost-Tau-Wechseln unterschieden werden.

Die Korrelation des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2) mit der Praxis wurde in [55] durch Auslagerungsversuche im Bereich XF2 und XF4 untersucht. Diese Auslagerungsversuche zeigten, dass die Schädigungsentwicklung von Betonen bei einem Frost-Tausalz-Angriff aufgrund der langen Austrocknungsperioden in den Sommern über

mehrere Winter hinweg kumulativ und nicht progressiv verläuft. Die Schädigung ist die Folge einer lokalen Übersättigung der äußersten Randzone. Die Aufsättigung des Zementsteingefüges scheint bei Außenbauteilen aufgrund sich ändernder thermischer Randbedingungen und des damit verbundenen dynamischen Prozesses in geringeren Schichtdicken als beim CDF-Verfahren zu erfolgen. Somit entstehen trotz vergleichbarer Anzahl an Frost-Tau-Wechseln in der Praxis geringere Schädigungen. Damit liegt die Prüfung mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) auf der sicheren Seite. Die Untersuchungen in [55] bestätigten, dass der bei einer Frost-Tausalz-Beanspruchung maßgebende Schädigungsmechanismus für Außenbauteile mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) im Labor beschleunigt abläuft.

4 Validierung von Prüfverfahren

4.1 Zweck und Vorgehen

Bevor eine Prüfmethode in der Praxis Anwendung findet, sollte sie gemäß der Norm ISO/IEC 17025 [19] validiert worden sein.

Unter Validierung wird die Bestätigung einer Prüfmethode „durch Untersuchung und Bereitstellung eines Nachweises, dass die besonderen Anforderungen für einen speziellen beabsichtigten Gebrauch erfüllt werden“ [19], verstanden.

Nach [5] gliedert sich eine Validierung in die drei Arbeitsschritte

- **Charakterisierung des Prüfverfahrens**
Genauere Beschreibung des Verfahrens in einer Verfahrensanweisung und Ermittlung der benötigten Merkmalswerte (Verfahrenskenngrößen) und damit der Leistungsfähigkeit des Prüfverfahrens für einen bestimmten Anwendungsbereich. Die Breite dieses Bereiches legt das Labor selbst fest.
- **Vergleich mit Qualitätsforderungen**
Vergleich der bei der Charakterisierung ermittelten Merkmalswerte des Prüfverfahrens mit den für die Lösung der vorliegenden Prüfaufgabe benötigten Eigenschaften (Qualitätsanforderungen) des Prüfverfahrens.

- **Nachweis der Erfüllung**
Führung eines Nachweises, dass die Qualitätsforderungen in diesem speziellen Fall wirklich erfüllt sind.

Jedes Messverfahren weist in der Regel Fehler auf. Hierbei wird zwischen systematischen und zufälligen Fehlern unterschieden. Systematische Fehler können durch sorgfältige Kalibrierung, Geräteauswahl und Messdurchführung weitestgehend vermieden werden. Unvermeidbare systematische Fehler, die aufgrund schwankender Versuchsbedingungen oder fehlerbehafteter Messinstrumente entstehen, können durch Korrekturfaktoren berücksichtigt werden [18]. Zudem streuen Messwerte zufällig um einen wahren Wert. Diese zufällige Messabweichung ist unvermeidbar. Sie ist allerdings in ihrem Verhalten berechenbar. Hierbei kommt insbesondere der Präzision des Prüfverfahrens eine maßgebende Rolle zu. Hierdurch können die tatsächlichen Abweichungen zweier Materialien bzw. eines Materials mit einem festgelegten Grenzwert ermittelt werden. Die Ermittlung der Präzisionsdaten in Anlehnung an DIN ISO 5725 [18] wird nachfolgend erläutert.

4.2 Präzision eines Prüfverfahrens

4.2.1 Definitionen

Ein großer Teil des Forschungsvorhabens beschäftigt sich mit der Bestimmung der Präzision in Anlehnung an DIN ISO 5725 [18]. Hierbei bezeichnet der Begriff Präzision das Ausmaß der gegenseitigen Annäherung zwischen unabhängigen Ermittlungsergebnissen, die unter definierten Bedingungen gewonnen wurden. Sie wird durch die Standardabweichung σ der Ergebnisse wiederholter, unabhängiger Analysen quantifiziert. Die Präzision beschreibt ausschließlich zufallsbedingte Abweichungen, die bei jedem Prüfverfahren auftreten. Sie ist von der Genauigkeit der Messmethodik und der Homogenität des zu untersuchenden Materials abhängig. Eine Betrachtung der Präzision ist bei jedem Prüfverfahren sinnvoll, da Untersuchungen an vermutlich identischem Material unter vermeintlich identischen Bedingungen im Allgemeinen nicht zu identischen Ergebnissen führen. Dies liegt an unvermeidlichen Zufallsabweichungen, die jedem Messverfahren eigen sind. Schwankungen, die hierauf zurückzuführen sind, müssen bei der praktischen Interpretation berücksichtigt werden.

4.2.1.1 Wiederholpräzision

Die Wiederholpräzision ist die Präzision unter Wiederholbedingungen. Unter Wiederholbedingungen werden Bedingungen bei der Gewinnung von unabhängigen Ermittlungsergebnissen verstanden, bei denen dasselbe Verfahren am identischen Untersuchungsobjekt im selben Labor durch denselben Bearbeiter mit derselben Geräteausstattung in kurzen Zeitabständen angewendet wird. Mit der Wiederholpräzision wird das Minimum der Streuungen bestimmt. Die Streuungsmaße der Wiederholpräzision werden mit dem Index r charakterisiert.

Die Wiederholstandardabweichung σ_r ist die Standardabweichung von Ermittlungsergebnissen, die unter Wiederholbedingungen gewonnen wurden. Die Wiederholvarianz σ_r^2 kann gemäß Gleichung 1 berechnet werden. Sie beinhaltet die Prüfstreuung innerhalb der Labore und die Streuung des Materials selbst.

$$\sigma_r^2 = \frac{\sum \sigma_i^2}{p} \quad \text{Gleichung 1}$$

Hierbei ist p die Anzahl der Labore indiziert mit i. Die Wiederholpräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens ist für jedes prüfende Labor annähernd gleich. Daher kann eine allgemein durchschnittliche Wiederholpräzision eingeführt werden [1]. Sie beinhaltet die Streuung aus Prüfung und Material.

Die Wiederholgrenze r definiert den Betrag, unter dem die Differenz zwischen zwei unter Wiederholbedingungen gewonnenen Ermittlungsergebnissen mit einer Wahrscheinlichkeit von 95 % erwartet werden kann. Sie wird nach folgender Gleichung bestimmt:

$$r = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sqrt{\sigma_r^2} = 2,83 \cdot \sigma_r \quad \text{Gleichung 2}$$

Die Vergleichsgrenze R ergibt sich analog. Eine Differenz zwischen zwei einzelnen Ergebnissen, die unter Wiederhol- bzw. Vergleichbedingungen entsteht, wird nach SETZER [62] bei korrekter Durchführung der Prüfung im Durchschnitt nicht öfter als einmal in 20 Fällen einen Wert über r bzw. R überschritten. Zur Beschreibung der Präzision können auch die Standardabweichung und der Variationskoeffizient verwendet werden.

4.2.1.2 Streuung zwischen den Labors

Die Streuung zwischen den Labors umfasst den Einfluss verschiedener Bearbeiter und Prüfgeräte. Die Streuungsmaße werden mit dem Index L charakterisiert. Die Varianz σ_L^2 wird wie folgt berechnet:

$$\sigma_L^2 = \frac{\sum (\bar{y}_i - \hat{y})^2}{p-1} - \frac{\sigma_r^2}{n} \quad \text{Gleichung 3}$$

mit \bar{y}_i = Mittelwert des Labors i und $\hat{y} = \frac{\sum \bar{y}_i}{p}$;

n = Anzahl der Messergebnisse je Messreihe

4.2.1.3 Präzision unter Zwischenbedingungen

Die Präzision unter Zwischenbedingungen erhält man, wenn die Parameter Bearbeiter, Prüfgerät und Zeit variiert werden [1]. Die Streuungsmaße werden mit dem Index z charakterisiert. Als Ergebnis erhält man die Präzision unter Zwischenbedingungen mit M-abweichenden Randbedingungen $s_{z(M)}$. Dabei gibt der Faktor M an, wie viele Randbedingungen (Zeit, Laborant und Prüfgerät) variiert wurden.

4.2.1.4 Vergleichpräzision

Die Vergleichpräzision wird durch Messungen unter veränderlichen Bedingungen bestimmt, d. h. unterschiedliche Labore, Bearbeiter und Prüfgeräte. Sie beinhaltet die Wiederholpräzision und die Streuung zwischen den Labors. Die Streuungsmaße der Vergleichpräzision werden mit dem Index R charakterisiert.

Die Vergleichsvarianz σ_R^2 beinhaltet die Wiederholvarianz σ_r^2 und die Varianz zwischen den Labors σ_L^2 (vgl. Gleichung 4).

$$\sigma_R^2 = \sigma_r^2 + \sigma_L^2 \quad \text{Gleichung 4}$$

Ein Ringversuch ist ein Versuch, an dem sich mehrere Labors beteiligen. Er dient z. B. der Ermittlung der Präzision oder der Richtigkeit eines Messverfahrens nach DIN ISO 5725 [18].

Zur Untersuchung der Präzision unter Vergleichbedingungen werden der Mittelwert m, die Standardabweichung σ , die Varianz σ^2 und der Variationskoeffizient v nach der allgemeinen statistischen Methode bestimmt. Danach werden die Ermittlungsergebnisse auf mögliche und statistische Ausreißer hin untersucht. Ein Ausreißer ist ein Wert in-

nerhalb einer Serie von Werten, der mit den anderen Werten dieser Serie nicht verträglich ist.

Hier werden die Übereinstimmung der h - und k -Werte nach Mandel sowie der Grubbs-Test und der Cochran-Test angewendet [18]. Der k -Test und der Cochran-Test untersuchen Labors mit Streuungen, die nach oben – also aufgrund zu hoher Streuungen – von den anderen Labors abweichen. Der h -Test und der Grubbs-Test betrachten die Verteilung der Mittelwerte. Die Tests berücksichtigen nur einseitige Ausreißer.

Bei einem signifikanten Ergebnis kann daraus geschlossen werden, dass zwischen den Messwerten der einzelnen Labore Unterschiede bestehen. In diesem Fall muss durch eine Ursachenanalyse geklärt werden, ob es sich um systematische Fehler oder um unvermeidbare systematische Abweichungen zwischen den Messwerten der Labore (z. B. nicht völlig identische Techniken der Bearbeiter, Unterschiede in Messgeräten, die auch bei gleicher Marke auftreten können, nicht völlige Homogenität der verschickten Proben u. a.) handelt.

Bestätigt die Ursachenanalyse, dass systematische Fehler gemacht worden sind, so sollte den jeweiligen Umständen entsprechend eine Korrektur der Werte vorgenommen oder eine Wiederholung des Versuchs durchgeführt werden. Ist dies nicht möglich, sind die Messwerte zu eliminieren. Ergibt die Ursachenanalyse, dass keine systematischen Fehler gemacht worden sind, so können die Abweichungen als Zufallsschwankungen des betreffenden Labors um den Gesamtmittelwert aufgefasst werden; die Messwerte gehen dann in die weiteren Berechnungen ein.

Die aus einem Ringversuch ermittelten Präzisionswerte gelten nur für Untersuchungen, die nach dem vereinheitlichten Messverfahren durchgeführt werden [26].

4.2.1.5 Richtigkeit

Die Richtigkeit eines Prüfverfahrens ist die qualitative Bezeichnung für das Ausmaß der systematischen Abweichung des erhaltenen Messergebnisses vom wahren Wert. Dabei liegt der wahre Wert gegebenenfalls außerhalb des Bereiches der Zufallsstreuung. Die Richtigkeit spielt dann eine Rolle, wenn ein wahrer Wert für ein gemessenes Merkmal denkbar ist.

Bei der systematischen Abweichungskomponente handelt es sich um die Differenz zwischen dem Erwartungswert der Ermittlungsergebnisse und einem anerkannten Bezugswert.

Richtigkeit bezieht sich folglich auf das Ausmaß der Annäherung zwischen dem Mittelwert einer großen Anzahl von Ermittlungsergebnissen und dem wahren oder richtigen Wert. Dagegen bezieht sich die Präzision auf das Ausmaß der gegenseitigen Annäherung von Ermittlungsergebnissen.

Der Begriff Genauigkeit bezieht sich folglich auf die Richtigkeit und die Präzision.

4.2.2 Ermittlung der Präzision

Zuerst muss ein Prüfverfahren genau definiert werden, damit eine standardisierte Prüfung in jedem beliebigen Labor möglich ist. Danach kann unter festgelegten Randbedingungen die Präzision des Verfahrens bestimmt werden.

Nach DIN ISO 5725 führen neben der Materialstreuung die Parameter

- Bearbeiter,
- verwendete Geräte,
- Kalibrierung der Geräte,
- Umgebung (Temperatur, Feuchte etc.),
- Zeitabstand zwischen den Messungen

zu Schwankungen in den Messergebnissen.

Unter Wiederholbedingungen werden diese Parameter unverändert gehalten, während sie unter Vergleichbedingungen variiert werden. Durch Untersuchungen unter Wiederhol- und Vergleichbedingungen werden das Minimum und das Maximum der Präzision ermittelt.

Die Präzision eines Messergebnisses hängt von der Genauigkeit der Messmethodik und der Homogenität des untersuchten Materials ab. Eine Trennung der Material- und Prüfstreuung ist bei zerstörenden Prüfverfahren nicht möglich. Bei der Ermittlung der Präzisionsmaße eines Prüfverfahrens muss das untersuchte Material möglichst homogen sein. Die Materialstreuung muss deutlich unterhalb der Prüfstreuung liegen [1].

Zur Untersuchung der Präzision werden die Standardabweichung σ , die Varianz σ^2 und der Varia-

tionskoeffizient v_i^2 nach der allgemeinen statistischen Methode untersucht.

Die totale Varianz kann aus den Varianzen der einzelnen Prüfparameter durch Addition ermittelt werden:

$$\sigma_i^2 = \sum_i \sigma_i^2 \quad \text{Gleichung 5}$$

Die totale Standardabweichung ist die Wurzel der totalen Varianz:

$$\sigma_t = \sqrt{\sigma_i^2} \quad \text{Gleichung 6}$$

Der totale Variationskoeffizient berechnet sich als Quotient aus totaler Standardabweichung und Mittelwert:

$$v_i = \frac{\sigma_t}{\bar{x}} \quad \text{Gleichung 7}$$

Die ermittelten Präzisionsdaten liefern statistische Schätzwerte und sind daher immer auch mit Unsicherheiten behaftet.

Die Wiederhol- und Vergleichpräzision sind für jedes Merkmalsniveau zu bestimmen. In der Regel besteht zwischen dem Merkmalsniveau und der Wiederholstandardabweichung, der Vergleichstandardabweichung und der Standardabweichung zwischen den Labors ein funktionaler Zusammenhang. Eine mögliche funktionale Beziehung nach DIN ISO 5725 für die Standardabweichung ist die Exponentialfunktion

$$\sigma_{r,R,L} = C_{r,R,L} \cdot m^{d_{r,R,L}} \quad \text{Gleichung 8}$$

mit $d \leq 1$.

Aus der funktionalen Korrelation zwischen dem Merkmalsniveau und der Wiederhol- und Vergleichstandardabweichung kann die Entwicklung des zu erwartenden Variationskoeffizienten in Abhängigkeit von der mittleren Abwitterung hergeleitet werden. Für den Variationskoeffizienten kann folgender funktionaler Zusammenhang bestehen:

$$v_{r,R,L} = C_{r,R,L} \cdot m^{d_{r,R,L}-1} \quad \text{Gleichung 9}$$

4.2.2.1 Statistisches Modell

Nach DIN ISO 5725 ergibt sich folgendes statistisches Modell:

Jedes Messergebnis y ist die Summe des Gesamtmittelwerts m , der Streuung zwischen den Labors B und der zufällig auftretenden Ergebnisabweichung e :

$$y = m + B + e \quad \text{Gleichung 10}$$

Die Streuung zwischen den Labors B umfasst die Streuung verschiedener Bearbeiter und unterschiedlicher Prüfgeräte. Unter Wiederholbedingungen wird die Streuung als konstant angenommen. Bei Messungen unter Vergleichbedingungen verhält sie sich wie eine Zufallsgröße. Sie wird als Varianz zwischen den Instituten ausgedrückt.

Die zufällig auftretende Ergebnisabweichung e , die in jedem Labor auftritt, wird als laborinterne Varianz bezeichnet. Für das angewandte statistische Modell wird davon ausgegangen, dass die Differenzen zwischen den Labors klein sind. Folglich kann ein gemeinsamer Wert für die laborinterne Varianz berechnet werden.

4.2.2.2 Darstellung der Ergebnisse

Die Labore werden durch den Index i (Nr. des Labors) gekennzeichnet. Die Anzahl der am Ringversuch beteiligten Laboratorien wird durch den Index p ($i = 1, 2, \dots, p$) gekennzeichnet.

Innerhalb jedes Labors werden die Messwerte in chronologischer Reihenfolge der Versuchsdurchführung durch den Index k gekennzeichnet. Die Anzahl der Messwerte im i -ten Labor ist n_i .

Der k -te Messwert im i -ten Labor wird mit x_{ik} ($k = 1, 2, \dots, n_i$) bezeichnet.

Der Ringversuch wird so geplant, dass die Anzahl der Messwerte in allen Labors gleich ist ($n_i = n$ für alle i).

Die Gesamtzahl der Messergebnisse in allen p Laboratorien wird mit N bezeichnet.

5 Untersuchungsprogramm

5.1 Übersicht

Die Ziele dieses Forschungsvorhabens waren die Empfehlung eines Abnahmekriteriums sowie die Präzisionsdatenermittlung des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2) in Anlehnung an DIN ISO 5725 [18]. Um dies zu erreichen, gliederte sich das Versuchsprogramm in die nachfolgend aufgeführten Teile:

- Untersuchungen zum Abnahmekriterium,
- Ermittlung der Präzision.

Hierbei diente der erste Teil der Ermittlung einer Empfehlung für ein Abnahmekriterium, das zielsicher geeignete Betone von ungeeigneten unterscheidet. Der zweite Teil befasste sich mit der Präzisionsdatenermittlung in Anlehnung an DIN ISO 5725 [18]. Dadurch kann die Qualität der Prüfergebnisse beurteilt werden und damit das Risiko für den Auftragnehmer und den Lieferanten eingeschätzt werden.

5.2 Ausgangsstoffe

5.2.1 Zemente

Um den Einfluss der Zementart auf das modifizierte CDF-Verfahren (XF2) herauszuarbeiten, wurden fünf verschiedene Zemente in das Untersuchungsprogramm aufgenommen. Hierbei wurden insbesondere solche Zemente ausgewählt, die erfahrungsgemäß in der Expositionsklasse XF2 häufig Anwendung finden. Der verwendete CEM I 32,5 R, CEM II/B-S 32,5 R sowie der CEM III/A 42,5 N stammten aus demselben Werk. Ebenso stammten der CEM I 42,5 N sowie der CEM II/A-LL 32,5 R aus einem Werk. Die Eigenschaften der Zemente sind im Anhang dargestellt. Der Hüttensandgehalt des verwendeten CEM III/A 42,5 N betrug 49 M.-% und lag damit knapp unter dem nach ZTV-ING 3-1 vorgeschriebenen Maximalwert von 50 M.-% für Kapfen oder Betonschutzwände.

5.2.2 Wasser

Für die Herstellung der Betone wurde Wasser aus dem Münchener Trinkwassernetz verwendet. Der Härtegrad des Wassers liegt bei 15,2° deutscher Härte (dH) und ist nach dem Waschmittelgesetz dem Härtebereich „hart“ zuzuordnen [29].

5.2.3 Gesteinskörnungen

Der Einfluss der Gesteinskörnung auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Betonen wird in der Literatur ausgiebig diskutiert [20, 25].

National sind vier Prüfmethode zur Bestimmung des Widerstandes gegen Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beanspruchung von Gesteinskörnungen für Beton zulässig:

- der Frost-Tau-Wechsel-Versuch mit Wasser (F) nach DIN EN 1367-1, bei dem die natürlichen Frost-Tau-Wechsel an wassergesättigten Gesteinskörnungen in einem Kälteschrank simuliert werden („Dosenfrost“),
- das Magnesiumsulfat-Verfahren (MS) nach DIN EN 1367-2, das die Frost-Tausalz-Beanspruchung von Gesteinskörnungen durch wiederholte Sättigung der Gesteinskörnung mit einer Magnesiumsulfatlösung und anschließender Trocknung simuliert, indem ein Kristallisationsdruck aufgebaut wird, der dem Druck beim Gefrieren ähnelt,
- der Frost-Tau-Wechsel-Versuch mit 1%iger NaCl-Lösung (FTS) nach DIN EN 1367-6, bei dem durch „Dosenfrost mit 1%iger NaCl-Lösung“ die natürlichen Frost-Tau-Wechsel unter niedrig konzentrierter Salzeinwirkung simuliert werden,
- der Betonversuch nach DIN V 18004 [10], Kapitel 4.3.

In der aktuellen Fassung der „Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING)“ [12] wird unter Bezug zur DIN V 20000-103 das Magnesiumsulfat-Verfahren ausgeschlossen. Das nationale Anwendungsdokument für den Bereich der ZTV Beton-StB [13], die TL Gestein-StB [14], lässt lediglich den Frost-Tau-Wechsel-Versuch mit 1%iger NaCl-Lösung zu.

Die Anforderungen an Gesteinskörnungen für Beton hinsichtlich ihres Widerstandes gegen Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung, gegen Frost-Tausalz-Beanspruchung bzw. gegen Magnesiumsulfat sind national je nach Anwendungsgebiet gemäß DIN V 20000-103 in DIN 1045-2, den ZTV-ING und für den Bereich der ZTV Beton-StB in den TL Gestein-StB geregelt. Dabei gelten für die verschiedenen Anwendungsbereiche z. T. unterschiedliche Anforderungen.

Die Ergebnisse aus den verschiedenen Prüfverfahren (Frost-Tau-Wechsel-Versuch nach DIN EN 1367-1 (F), Frost-Tausalz-Versuch nach DIN EN 1367-6 (FTS), Magnesiumsulfat-Verfahren nach DIN EN 1367-2 (MS) und Betonversuch nach DIN V 18004, Abschnitt 4.3 (BV) werden in diesem Bericht vereinfacht als „Frost-Tausalz-Widerstand“ (FTS-Wert) und „Magnesiumsulfat-Widerstand“ (MS-Wert) und „Betonversuch-Widerstand“ (BV-Wert) bezeichnet.

Es handelt sich hierbei um Abwitterungen innerhalb vorgeschriebener Kornklassen, die in Massenprozent (bei F-Wert, FTS-Wert und MS-Wert) oder in Gramm pro Quadratmeter (BV-Wert) angegeben werden.

In Tabelle 2 sind die Anforderungen der verschiedenen Vorschriften (DIN 1045-2, ZTV-ING, Teil 3-1 und TL Gestein-StB) an den Widerstand gegen Frostbeanspruchung und Magnesiumsulfat (F-Wert, FTS-Wert, MS-Wert, BV-Wert) von Gesteinskörnungen zur Verwendung im Beton zusammengefasst.

Für den Einsatz in der Expositionsklasse XF2 muss eine Gesteinskörnung entweder eine Ma-

Anwendungsgebiet	MS-Wert	FTS-Wert	BV-Wert
	DIN EN 1367-2	DIN EN 1367-6	DIN V 18004, Abschn. 4
1	2	3	4
DIN 1045-2	MS ₂₅	≤ 8 M.-%	≤ 500 g/m ² ²⁾
ZTV-ING, Teil 3-1		≤ 8 M.-% ¹⁾	≤ 500 g/m ² ³⁾
<p>1) für die Bundesländer Bayern und Baden-Württemberg wurde der Grenzwert auf 25 M.-% festgelegt</p> <p>2) gilt nur für das Plattenverfahren nach E DIN EN 12390-9:2002-5, Abschnitt 6 nach 56 Frost-Tau-Wechseln</p> <p>3) gilt für das Plattenverfahren nach E DIN EN 12390-9: 2002-5 Abschnitt 6 nach 56 Frost-Tau-Wechseln oder das CDF-Verfahren nach E DIN EN 12390-9, Abschnitt 8 nach 28 Frost-Tau-Wechseln; zudem darf es bei visueller Prüfung der Prüfoberfläche keine Hinweise auf Verwitterung mehrerer Gesteinskörnungen geben</p>			

Tab. 2: Zusammenstellung der Anforderungen an den Magnesiumsulfat-Widerstand (MS-Wert), den Frost-Tausalz-Widerstand (FTS-Wert) und den Betonversuch-Widerstand (BV-Wert) für Gesteinskörnung in der Expositions-klasse XF2

gnesiumsulfat-Widerstandsfähigkeit nach DIN EN 1367-2 [16] von 25 M.-%, einen Frost-Tausalz-Widerstand nach DIN EN 1367-6 ≤ 8 M.-% oder eine Abwitterung ≤ 500 g/m² im Betonversuch mit dem Plattenverfahren nach DIN EN 12390-9, Abschnitt 6 [14] aufweisen.

Um den Einfluss der Gesteinskörnung auf das modifizierte CDF-Verfahren (XF2) zu untersuchen, wurden drei verschiedene Gesteinskörnungen „GK1“, „GK2“ und „GK3“ geprüft, die sich in ihrer Frost-Tausalz-Beständigkeit deutlich unterscheiden. Die Gesteinskörnung „GK1“ ist mit einem Masseverlust beim Magnesiumsulfat-Verfahren von 6,6 % und einem Masseverlust beim Frost-Tausalz-Versuch von 3,0 % als Frost-Tausalz-beständig einzustufen. Sie entstammt der Münchner Schotterebene und besteht hauptsächlich aus calcitischem Material. Sie wurde in den Korngruppen 0/4, 4/8 und 8/16 geliefert. Bei der Korngruppe 0/4 handelt es sich um einen Natursand. Die Korngruppen 4/8 und 8/16 bestehen aus Kies. Die Dichte des Sandes beträgt 2,72 kg/dm³, die Dichte der Korngruppe 4/8 beträgt 2,76 kg/dm³ und die der Korngruppen 8/16 2,73 kg/dm³.

Bei der Gesteinskörnung „GK2“ handelt es sich um einen Splitt aus Muschelkalk, der bei der Prüfung nach dem Frost-Tausalz-Versuch einen Masseverlust von 28,3 % aufweist und damit für den Einsatz in der Expositionsklasse XF2 ungeeignet ist. Die Lieferkörnung 2/5 besitzt eine Dichte von 2,69 kg/dm³. Die Körnungen 5/8, 8/11 sowie 11/16 weisen eine Dichte von 2,70 kg/dm³ auf. Bei der Gesteinskörnung „GK3“ handelt es sich um runden Kies, der nach den derzeit gültigen Prüfverfahren an der Gesteinskörnung ebenfalls nicht in der Exposition XF2 verwendet werden darf. So weist die „GK3“ einen FTS-Wert von 29,4 M.-% und einen MS-Wert von 47,6 M.-% auf. Die Lieferkörnung 2/8 der „GK3“ weist eine Dichte von 2,50 kg/dm³ auf, die Lieferkörnung 8/16 besitzt eine Dichte von 2,59 kg/dm³.

Um den Einfluss des Sandes nicht zusätzlich zu berücksichtigen, wurde bei den Mischungen mit den Gesteinskörnungen „GK2“ und „GK3“ ein Frost- und Frost-Tausalz-beständiger Sand eingesetzt. Hierbei handelt es sich um Rheinsand der Lieferkörnung 0/2. Er besitzt eine Dichte von 2,60 kg/dm³.

Die verwendeten Sieblinien der Gesteinskörnungen sind in Bild 2 dargestellt.

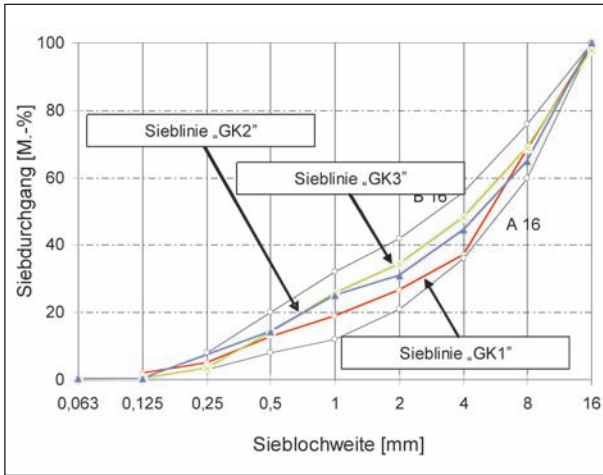


Bild 2: Sieblinien der verwendeten Gesteinskörnungen; GK1 = Münchener Möränenkies; GK2 = Kalksplitt (nicht geeignet für die Exposition XF2); GK3 = Zorgekies (nicht geeignet für die Exposition XF2)

5.2.4 Zusatzmittel

Standardmäßig wurden die untersuchten Betone ohne Luftporenbildner mit einem LP-Gehalt von 0,9 bis 1,5 Vol.-% hergestellt. Um den Einfluss künstlicher Luftporen auf das modifizierte CDF-Verfahren (XF2) zu untersuchen, wurde an einer ausgewählten Betonrezeptur (vgl. Tabelle 3) ein LP-Gehalt von 4,5 bis 5,0 Vol.-% eingestellt. Hierbei kam ein LP-Mittel auf Basis syntethischer Tenside zum Einsatz. Die wichtigsten Eigenschaften des verwendeten LP-Bidners sind im Anhang aufgeführt.

5.3 Zusatzstoffe

Da Steinkohlenflugasche im Bereich XF2 in den letzten Jahren vermehrt eingesetzt wurde, wird ihr Einsatz als Betonzusatzstoff auch für die Prüfungen zur Ableitung eines Abnahmekriteriums des modifizier-

Bezeichnung	Zementart	Zement-gehalt	SFA-Gehalt	LP-Gehalt	w/z _{eq}	GK	XF2-konform
[-]	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[Vol.-%]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7	8
CEM I 32,5 R/0,50	CEM I 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,50	GK1	ja
CEM I 32,5 R/0,55	CEM I 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,55	GK1	nein
CEM I 32,5 R/0,60	CEM I 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,60	GK1	nein
CEM I 32,5 R/0,50/GK2	CEM I 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,50	GK2	nein
CEM I 32,5 R/0,50/GK3	CEM I 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,50	GK3	nein
CEM I 42,5 N/0,50	CEM I 42,5 N	320	-	0,9-1,5	0,50	GK1	ja
CEM I 42,5 N/0,60	CEM I 42,5 N	320	-	0,9-1,5	0,60	GK1	nein
CEM II/A-LL32,5 R/0,50	CEM II/A-LL 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,50	GK1	ja
CEM II/A-LL32,5 R/0,60	CEM II/A-LL 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,60	GK1	nein
CEM II/A-LL32,5 R/0,60/LP	CEM II/A-LL 32,5 R	320	-	4,5-5,0	0,60	GK1	nein
CEM II/B-S32,5 R/0,50	CEM II/B-S 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,50	GK1	ja
CEM II/B-S32,5 R/0,60	CEM II/B-S 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,60	GK1	nein
CEM III/A 42,5 N/0,50	CEM III/A 42,5 N	320	-	0,9-1,5	0,50	GK1	ja
CEM III/A 42,5 N/0,55	CEM III/A 42,5 N	320	-	0,9-1,5	0,55	GK1	nein
CEM III/A 42,5 N/0,60	CEM III/A 42,5 N	320	-	0,9-1,5	0,60	GK1	nein
278 CEM I 32,5 R/106 SFA/0,50	CEM I 32,5 R + SFA1	278	106	0,9-1,5	0,50	GK1	ja
278 CEM I 32,5 R/106 SFA/0,60	CEM I 32,5 R + SFA1	278	106	0,9-1,5	0,60	GK1	nein

Tab. 3: Betonzusammensetzungen im Rahmen der Untersuchungen zum Abnahmekriterium

ten CDF-Verfahrens (XF2) herangezogen. Hierzu werden zwei ausgewählte Betonrezepturen mit Steinkohlenflugasche als Betonzusatzstoff hergestellt. Die hierbei verwendete Steinkohlenflugasche nach DIN EN 450-1 besitzt eine Rohdichte von $2,5 \text{ g/cm}^3$ und einen Freikalkgehalt von 1,43 M.-%. Weitere Angaben zu den Eigenschaften der Steinkohlenflugasche sowie die chemische Zusammensetzung sind im Anhang zusammengefasst.

5.4 Zusammensetzung der Betone

5.4.1 Untersuchungen zum Abnahmekriterium

Um eine Empfehlung für ein Abnahmekriterium geben zu können, wurde eine Reihe XF2-konformer Betone mit solchen, die der Normzusammensetzung nicht genügen, verglichen. Die in den derzeit gültigen Regelwerken festgelegten Mindestanforderungen spiegeln die Erfahrungen aus der Praxis wider und stellen dadurch einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand bei mäßiger Wassersättigung sicher. In der Praxis werden i. d. R. Betone ohne Luftporenmittel eingesetzt, da so der Mehraufwand in der Überwachung durch die Einstellung des richtigen Luftporengehaltes eingespart werden kann. Deshalb und weil der Einsatz von Luftporenbildnern erfahrungsgemäß alle anderen Einflüsse aus der Betonzusammensetzung überdeckt, wurden LP-Betone in diesem Forschungsvorhaben nur am Rand behandelt. Wird auf die Verwendung von LP-Bildnern verzichtet, so muss ein Beton in der Exposition XF2 nach DIN 10-45-2:2008-08 [17] einen maximalen w/z -Wert von 0,50, eine Mindestdruckfestigkeitsklasse von C 35/45 und einen Mindestzementgehalt von 320 kg/m^3 aufweisen.

Um eine ausreichende Basis zur Ableitung eines Akzeptanzkriteriums zu schaffen, muss die gesamte Palette üblicher Betone im Bereich XF2 untersucht werden. Die einzelnen Mischungszusammensetzungen sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Bei allen Betonrezepturen wurde eine Sieblinie A/B 16 verwendet.

Für die Bezeichnung der Betone wurde folgendes Schema gewählt:

Zementgehalt und -art/Gehalt an Steinkohlenflugasche/ w/z_{eq} /Gesteinskörnung.

Der Standardzementgehalt von 320 kg/m^3 sowie die Referenzgesteinskörnung „GK1“ wurden nicht mit in die Bezeichnung aufgenommen. Untersucht

wurden fünf verschiedene Zemente, drei verschiedene Gesteinskörnungen sowie eine Zement-Zusatzstoff-Kombination. Die w/z_{eq} -Werte variierten im Bereich von 0,5 und 0,6.

Für die Zement-Zusatzstoff-Kombination wurde eine Betonrezeptur mit Steinkohlenflugasche und CEM I 32,5 R gewählt. Nach DIN-Fachbericht 100 darf eine maximale Menge von 33 M.-% bezogen auf den Zementgehalt eingesetzt werden. Damit wurden $105,6 \text{ kg/m}^3$ Zement durch die in Kapitel 5.3 beschriebene Steinkohlenflugasche ausgetauscht. Nach dem DIN-Fachbericht 100 [17] ist der k -Wert-Ansatz für die Expositions-kategorie XF2 nicht zulässig. Die ZTV-ING 3-1 lässt in Beton von Tunnelinnenschalen im Bereich XF2 Abweichungen hiervon zu. Eigene Untersuchungen bestätigten die Frost-Tausalz-Beständigkeit von Flugasche [51]. Daher wurde bei den Rezepturen „278 CEM I 32,5 R/106 SFA/0,50“ und „278 CEM I 32,5 R/106 SFA/0,60“ der k -Wert-Ansatz zur Berechnung des äquivalenten w/z -Werts herangezogen. Die Mischungen enthielten $105,6 \text{ kg/m}^3$ Flugasche, von denen $0,33 \times 278 = 92 \text{ kg/m}^3$ angerechnet wurden. Der Mehlkorngelbheit betrug 400 kg/m^3 .

Um den Einfluss eines künstlichen Luftporenraumes zu berücksichtigen, wurde ein Beton unter Verwendung eines LP-Mittels hergestellt. Er wurde bei der Bezeichnung der Betone mit dem Kürzel „LP“ an letzter Stelle gekennzeichnet.

5.4.2 Untersuchungen zur Präzisionsdatenermittlung

5.4.2.1 Ermittlung der Wiederholpräzision

Nach DIN ISO 5725 [18] kann die Abschätzung der Wiederholpräzision an einem Institut erfolgen. Die ermittelten Werte sind dann durch Untersuchungen an anderen Instituten zu bestätigen. Die Wiederholpräzision wurde am cbm der TU München mit 2 Laboranten und 2 angeleiteten Laborhelfern bestimmt. Zudem kamen drei unterschiedliche Prüfgeräte zum Einsatz. Folglich kann von einer ungünstig hoch liegenden Prüfstreuung ausgegangen werden. Es wurden 29 Betone mit 17 unterschiedlichen Zusammensetzungen hergestellt und nach dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) geprüft.

5.4.2.2 Ermittlung der Präzision unter Zwischenbedingungen (M = 1)

In der Praxis erfolgt eine Prüfung i. d. R. unter Zwischenbedingungen, d. h., dass neben dem Faktor Zeit auch die Parameter Bearbeiter und Prüfgerät variieren. Um die Präzision unter Zwischenbedingungen unter Veränderung des Merkmals Zeit (M = 1) des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2) zu ermitteln, wurden die Betone „CEM I 32,5 R/0,50“ und „CEM I 32,5 R/0,60“ (vgl. Tabelle 1) an verschiedenen Tagen unter konstanten Prüfbedingungen hergestellt und nach dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) geprüft. Zur Bezeichnung der Betone wurde eine fortlaufende Nummerierung an das Ende angehängt (vgl. Tabelle 4).

5.4.2.3 Ermittlung der Präzision unter Zwischenbedingungen (M = 3)

Um die Streuung unter Zwischenbedingungen unter Veränderung der Merkmale Bearbeiter, Zeit (Betoncharge) und Prüfgerät zu ermitteln, wurde

der Beton „CEM I 32,5 R/0,50“ (vgl. Tabelle 3) am Institut des Auftragnehmers (cbm) zweimal hergestellt und mit zwei Laboranten und drei Prüfgeräten (Klimatruhen) geprüft. Die untersuchten Einflussfaktoren sind dabei der ausführende Laborant (L) und das verwendete Prüfgerät (T) sowie jeweils die unterschiedliche Betoncharge (hier nicht dargestellt). Eine schematische Übersicht über die Untersuchungen zeigt Tabelle 5.

5.4.2.4 Ermittlung der Vergleichpräzision

Um die Präzision unter Vergleichbedingungen zu ermitteln, wurde ein Ringversuch in Anlehnung an DIN ISO 5725 [18] durchgeführt, an dem sich fünf Prüfinstitute beteiligten. Die Herstellung der Betone erfolgte am Institut des Auftragnehmers (cbm). Die Zusammensetzung der hierbei untersuchten Betone ist in Tabelle 6 dargestellt. Um die Ergebnisermittlung nicht zu beeinflussen, wurden die Betone mit „RV01“, „RV02“ und „RV03“ bezeichnet.

Bezeichnung	Zementart	Zementgehalt	SFA-Gehalt	LP-Gehalt	w/z _{eq}	GK	XF2-konform
[-]	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[Vol.-%]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7	8
CEM I 32,5 R/0,50.1	CEM I 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,50	GK1	ja
CEM I 32,5 R/0,50.2	CEM I 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,50	GK1	ja
CEM I 32,5 R/0,50.3	CEM I 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,50	GK1	ja
CEM I 32,5 R/0,60.1	CEM I 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,60	GK1	nein
CEM I 32,5 R/0,60.2	CEM I 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,60	GK1	nein
CEM I 32,5 R/0,60.3	CEM I 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,60	GK1	nein

Tab. 4: Bezeichnung und Zusammensetzung der Betone zur Beurteilung der Präzision unter Wiederholbedingungen

Beton	Laborant 1	Laborant 2	Truhe 1	Truhe 2	Truhe 3	Bezeichnung
1	2	3	4	5	6	7
CEM I 32,5 R/0,50	x		x			CEM I 32,5 R/0,50.L1.T1
CEM I 32,5 R/0,50	x			x		CEM I 32,5 R/0,50.L1.T2
CEM I 32,5 R/0,50	x				x	CEM I 32,5 R/0,50.L1.T3
CEM I 32,5 R/0,50		x	x			CEM I 32,5 R/0,50.L2.T1
CEM I 32,5 R/0,50		x		x		CEM I 32,5 R/0,50.L2.T2
CEM I 32,5 R/0,50		x			x	CEM I 32,5 R/0,50.L2.T3

Tab. 5: Schematische Darstellung der Untersuchungen zur Ermittlung der Präzision unter Zwischenbedingungen (M = 3) und Bezeichnungen der Betone

Bez.	Zementart	Zement- gehalt	SFA- Gehalt	LP- Gehalt	w/z _{eq}	GK	XF2- konform
[-]	[-]	[kg/m ³]	[kg/m ³]	[Vol.-%]	[-]	[-]	[-]
1	2	3	4	5	6	7	8
RV01	CEM I 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,5	GK1	ja
RV02	CEM III/A-LL 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,5	GK1	ja
RV03	CEM III/A-LL 32,5 R	320	-	0,9-1,5	0,6	GK1	nein

Tab. 6: Betonzusammensetzungen im Rahmen der Untersuchungen zur Ermittlung der Präzision unter Vergleichbedingungen

5.5 Herstellung der Betone

Alle Probekörper wurden gemäß DIN EN 12390-2:2001-06 [12] hergestellt. Um eine Vergleichbarkeit der Laborprüfergebnisse der Betone untereinander zu gewährleisten, sollten alle Randbedingungen der Prüfung identisch sein. Dies gilt einerseits für die prüftechnischen Randbedingungen, wie z. B. die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel oder maximal und minimal auftretende Temperaturen, sowie für die betontechnologischen Randbedingungen, wie Verdichtbarkeit und Luftgehalt der hergestellten Frischbetone. Daher wurden alle hier vorgestellten Betone mit dem gleichen Mischregime hergestellt (vgl. Tabelle 7). Die Rüttelzeit variierte bei konstanter Frequenz (50 Hz, Schwingbreite 0,4 mm) in Abhängigkeit von der Konsistenz der Betone zwischen 10 und 60 Sekunden.

Für die Herstellung der Betone wurde stets derselbe Zwangsmischer mit einem Fassungsvermögen von 110 Litern verwendet. Eigenen Untersuchungen zufolge hat die Chargenmenge keinen signifikanten Einfluss auf die betontechnologischen Kennwerte. Durch Anpassung der Temperatur des Anmachwassers wurde eine Frischbetontemperatur von 20 ± 2 °C angestrebt.

5.6 Frischbetonuntersuchungen

Von allen Betonen wurden die relevanten Frischbetonkennwerte (Frischbetontemperatur, Konsistenz, Luftgehalt im Frischbeton) bestimmt. Eine Übersicht über die ermittelten Frischbetonkennwerte sowie den Zeitpunkt des Prüfbeginns nach Wasserzugabe zeigt Tabelle 8. Vor der Entnahme der für die jeweilige Prüfung benötigten Frischbetonmenge wurde der Beton jeweils kurz aufgemischt (10 Sekunden). Die Verarbeitbarkeit wurde in Abhängigkeit der Konsistenz entweder mit dem Verdichtungsmaß oder mit dem Ausbreitmaß bestimmt und in die in der DIN 1045-2:2008-08 [7] aufgeführten C- bzw. F-Klassen eingeteilt.

Zeit	Beschreibung	Mischen
[min:sec]	[-]	[-]
1	2	3
0:00 bis 1:00	Gesteinskörnung mit 1/3 des Anmachwassers mischen	ja
1:00 bis 4:00	Saugen der Gesteinskörnung	nein
4:00 bis 4:10	Zugabe des Bindemittels	nein
4:10 bis 4:40	Zugabe des restlichen Anmachwassers	ja
4:40 bis 5:40	Mischen	ja

Tab. 7: Mischregime

Kennwert	Normenverweis	Zeitpunkt nach vollständiger Wasserzugabe
[-]	[-]	[min]
1	2	3
Temperatur des Frischbetons	-	1
Konsistenz (Verdichtungsmaß)	DIN EN 12350-4:2000-06 [8]	10
Konsistenz (Ausbreitmaß)	DIN EN 12350-5:2000-06 [9]	10
Rohdichte	DIN EN 12350-6:2000-03 [10]	12
Luftporengehalt	DIN EN 12350-7:2000-11 [11]	12

Tab. 8: Frischbetonuntersuchungen

5.7 Festbetonuntersuchungen

5.7.1 Rohdichte und Druckfestigkeit

Für die Bestimmung der Druckfestigkeiten sowie der Festbetonrohddichte nach 28 Tagen wurden je Betonserie drei Würfel mit einer Kantenlänge von 150 mm hergestellt. Die Probekörper lagerten einen Tag im Klima 20 °C/98 % r. F. in der Schalung, anschließend wurden sie ausgeschalt und bis zur Prüfung bei 20 ± 2 °C unter Wasser gelagert („Wasserlagerung“ nach dem Referenzverfahren von DIN EN 12390-2 [12]).

Nach DIN-Fachbericht 100 [17] wird diese Lagerung nur dann durchgeführt, wenn sie vorab vereinbart wurde. Wenn nicht anders vereinbart, ist die Druckfestigkeit an Probewürfeln mit 150 mm Kantenlänge und unter den Lagerungsbedingungen nach DIN EN 12390-2, Anhang NA zu bestimmen. Die Prüfung der Rohdichte und der Druckfestigkeit erfolgte nach DIN EN 12390-3 [13].

5.7.2 Luftporenkennwerte

Bei der Betonmischung „CEM II/A-LL 32,5 R/0,60/LP“, die mit Luftporenbildner hergestellt wurde (vgl. Tabelle 1), wurden die Luftporenkennwerte am Festbeton gemäß DIN EN 480-11:2005-03 [7] ermittelt. Hierzu wurden zwei Probekörper (Würfel, $a = 150$ mm) hergestellt und einen Tag im Klima 20 °C/98 % r. F. gelagert. Anschließend wurden sie weitere 6 Tage unter Wasser (20 ± 2 °C) und bis zur Prüfung im Klima 20 ± 2 °C/65 % r. F. gelagert. Für die Ermittlung der Luftporenkennwerte wurde aus jedem Würfel eine Platte mit den Abmessungen $150 \cdot 100 \cdot 40$ mm³ entnommen. Je eine Seite wurde geschliffen und poliert. An diesen Seiten wurde die Porensehnenlängenverteilung bestimmt. Anschließend wurden der Abstandsfaktor \bar{L} , der Mikroluftporengehalt A_{300} und der Gesamtluftgehalt A ermittelt.

5.7.3 Frost-Tausalz-Widerstand

Der Frost-Tausalz-Widerstand wurde mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) [55] bestimmt. Hierzu wurden je Betonserie fünf Probekörper hergestellt (Würfel, $a = 150$ mm). Um den Einfluss des Schalölös zu vermeiden, wurden an zwei Seiten der Probekörperschalung Teflonscheiben angeordnet. Die Probekörper wurden nach einem Tag im Klima 20 °C/98 % r. F. ausgeschalt und lagerten sechs Tage unter Wasser. Nach sieben Tagen wurden sie gemäß [37] auf Standardabmessungen gesägt ($150 \cdot 110 \cdot 70$ mm³) und lagerten für weitere 21 Tage im Klima 20 °C/ 65 % r. F. Frühestens drei Tage bis unmittelbar vor dem Beginn der Vorsättigung wurden die Probekörper seitlich mit einem Haftgrundverbesserer (Primer) und aluminiumkaschierten Butylkautschukband abgedichtet. Ab einem Alter von 28 Tagen saugten die Probekörper über die geschaltete Stirnseite kapillar Tausalzlösung. Diese Lösung setzte sich aus 3 M.-% NaCl und 97 M.-% Leitungswasser zusammen.

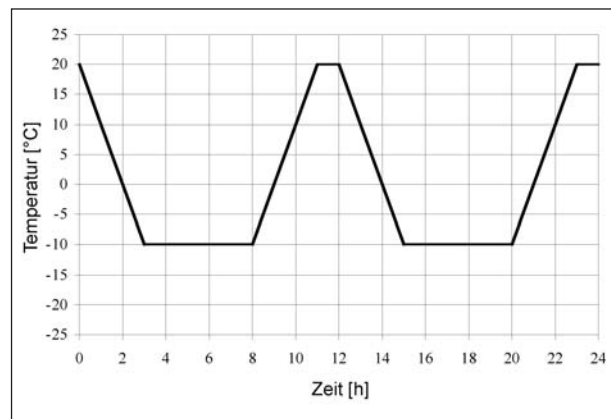


Bild 3: Temperaturprofil im Kühlmedium während zweier Frost-Tau-Zyklen beim modifizierten CDF-Verfahren (XF2)

Um den Einfluss der Wasserhärte auszuschließen, wurde jedoch bei der Ermittlung der Präzision unter Vergleichsbedingungen in allen fünf Prüfinstituten demineralisiertes Wasser vorgeschrieben. Nach der siebentägigen Vorsättigung wurden die Probekörper einer zyklischen Frost-Tau-Wechselbeanspruchung ausgesetzt. Der Temperaturzyklus während 24 Stunden ist in Bild 3 dargestellt.

Vor und während der Frost-Tau-Wechselbeanspruchung wurden die Lösungsaufnahme der Probekörper, die getrockneten Abwitterungen und die Ultraschalllaufzeit bestimmt. Aus der Änderung der Ultraschalllaufzeit wurde der relative dynamische E-Modul berechnet und aus diesem auf die innere Schädigung geschlossen. Die Abwitterungen wurden auf die Prüffläche bezogen in g/m² angegeben. Um die Trennschärfe des Verfahrens und den Verlauf der Schädigung durch die in [55] vorgeschlagene Frost-Tausalz-Beaufschlagung besser beurteilen zu können, wurden alle Probekörper mit 28 Frost-Tau-Wechseln belastet. Die Bewertung soll entsprechend [55] nach 14 Frost-Tau-Wechseln erfolgen.

6 Ergebnisse der Untersuchungen zum Abnahmekriterium

6.1 Ergebnisse der Frischbetonuntersuchungen

Die Frischbetonkennwerte der Betone für die Untersuchungen zum Abnahmekriterium sind in Tabelle 9 dargestellt.

Da bei der Herstellung der Betone auf den Einsatz von Fließmitteln verzichtet wurde, war die Konsistenz der einzelnen Betone unterschiedlich. Die Luftporengehalte im Frischbeton lagen im Bereich von 0,9 und 1,5 Vol.-%. Eine Ausnahme hiervon bildeten der Beton mit Luftporenmittel sowie der Beton, der mit der Gesteinskörnung „GK3“ hergestellt wurde. So wies der Beton mit künstlich eingeführten Luftporen nach 10 min einen Luftporengehalt von 4,6 Vol.-% auf. Der Beton mit der „GK3“ besaß nach 10 min einen Luftporengehalt von 2,4 Vol.-%. Bei allen Betonen kann von einer ausreichend guten Verdichtung ausgegangen werden. Die Verdichtungsfrequenz und Verdichtungszeit wurden bei der Herstellung an die Konsistenz des jeweiligen Betons angepasst.

6.2 Ergebnisse der Festbetonuntersuchungen

6.2.1 Rohdichte und Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeiten und Rohdichten nach 28-tägiger Lagerung unter Wasser nach DIN EN 12390-3:2002-04 [13] sind in Tabelle 10 dargestellt.

In Absprache mit dem Auftraggeber wurden die Druckfestigkeitsprüfungen an gesondert hergestellten Probekörpern, die nach DIN 12390-2, Anhang NA gelagert wurden, nachträglich geprüft. Die Ergebnisse sind den unter Wasser gelagerten Probekörpern in Tabelle 11 und 12 gegenübergestellt.

Der Unterschied in den Druckfestigkeiten und Rohdichten zwischen einem Beton mit einem w/z_{eq} -Wert von 0,50 und einem Beton gleicher Inhaltstoffe mit einem w/z_{eq} -Wert von 0,60 ist deutlich zu erkennen. Betone mit einem w/z_{eq} -Wert von 0,55 hingegen sind anhand der Druckfestigkeiten und Rohdichten nur schwer von solchen mit einem w/z_{eq} -Wert von 0,50 zu differenzieren.

Beton	LP-Gehalt	ρ_{FB}	Ausbreitmaß	Verdichtungsmaß	Konsistenzklasse	Temperatur
[-]	[Vol.-%]	[kg/m ³]	[mm]	[-]	[-]	[°C]
1	2	3	4	5	6	7
CEM I 32,5 R/0,50	1,5	2.460	n. b.	1,32	C1	19,7
CEM I 32,5 R/0,55	1,2	2.450	n. b.	1,13	C2	20,0
CEM I 32,5 R/0,60	0,9	2.430	440	n. b.	F3	19,9
CEM I 32,5 R/0,50/GK2	1,1	2.450	n. b.	1,23	C2	20,9
CEM I 32,5 R/0,50/GK3	2,4	2.310	n. b.	1,36	C1	22,0
CEM I 42,5 N/0,50	1,3	2.460	n. b.	1,24	C2	20,2
CEM I 42,5 N/0,60	1,0	2.430	435	n. b.	F3	19,8
CEM II/A-LL 32,5 R/0,50	1,4	2.480	n. b.	1,25	C2	19,8
CEM II/A-LL32,5 R/0,60	0,9	2.420	460	n. b.	F3	20,5
CEM II/A-LL32,5 R/0,60/LP	4,6	2.330	500	n. b.	F4	19,7
CEM II/B-S32,5 R/0,50	1,5	2.460	n. b.	1,27	C1	19,9
CEM II/B-S32,5 R/0,60	0,9	2.410	430	n. b.	F3	19,8
CEM III/A 42,5 N/0,50	1,3	2.450	n. b.	1,34	C1	18,8
CEM III/A 42,5 N/0,55	1,1	2.450	n. b.	1,25	C2	19,2
CEM III/A 42,5 N/0,60	1,1	2.410	380	n. b.	F2	19,7
278 CEM I 32,5 R/106 SFA/0,50	1,5	2.430	n. b.	1,34	C1	20,1
278 CEM I 32,5 R/106 SFA/0,60	1,2	2.420	425	n. b.	F3	20,1
n. b. nicht bestimmt						

Tab. 9: Frischbetonkennwerte der Betone für die Untersuchungen zum Abnahmekriteriums

Beton	Druckfestigkeit „Wasserlagerung“		Rohdichte „Wasserlagerung“	
	Mittelwert	Variationskoeffizient	Mittelwert	Variationskoeffizient
[-]	[N/mm ²]	[%]	[kg/m ³]	[%]
1	2	3	4	5
CEM I 32,5 R/0,50	45,5	3,4	2.430	0,2
CEM I 32,5 R/0,55	42,0	2,0	2.420	0,4
CEM I 32,5 R/0,60	36,0	1,9	2.400	0,3
CEM I 32,5 R/0,50/GK2	43,5	5,3	2.420	0,4
CEM I 32,5 R/0,50/GK3	48,5	2,5	2.340	0,2
CEM I 42,5 N/0,50	55,5	1,0	2.430	0,4
CEM I 42,5 N/0,60	44,5	2,5	2.420	0,3
CEM II/A-LL 32,5 R/0,50	45,5	1,9	2.450	0,3
CEM II/A-LL 32,5 R/0,60	34,5	3,3	2.420	0,1
CEM II/A-LL 32,5 R/0,60/LP	25,0	1,8	2.320	0,4
CEM II/B-S32,5 R/0,50	43,0	2,1	2.420	0,2
CEM II/B-S32,5 R/0,60	32,5	4,5	2.400	0,6
CEM III/A 42,5 N/0,50	54,0	1,2	2.420	0,4
CEM III/A 42,5 N/0,55	52,0	5,1	2.430	0,2
CEM III/A 42,5 N/0,60	45,0	1,7	2.380	0,8
278 CEM I 32,5 R/106 SFA/0,50	46,5	2,3	2.430	0,2
278 CEM I 32,5 R/106 SFA/0,60	35,5	1,7	2.390	0,1

Tab. 10: Rohdichte und Druckfestigkeit der Betone nach 28 Tagen, Wasserlagerung

Beton	Mittlere Druckfestigkeit „Wasserlagerung“	Variationskoeffizient „Wasserlagerung“	Mittlere Druckfestigkeit „Trockenlagerung“	Variationskoeffizient „Trockenlagerung“
	[N/mm ²]	[%]	[N/mm ²]	[%]
1	2	3	4	5
CEM I 32,5 R/0,50	45,5	3,4	48,5	0,4
CEM I 32,5 R/0,55	42,0	2,0	45,5	1,7
CEM I 32,5 R/0,60	36,0	1,9	39,0	1,9
CEM I 32,5 R/0,50/GK2	43,5	5,3	45,0	1,7
CEM I 32,5 R/0,50/GK3	48,5	2,5	52,0	0,4
CEM I 42,5 N/0,50	55,5	1,0	60,5	1,3
CEM I 42,5 N/0,60	44,5	2,5	48,5	1,6
CEM II/A-LL 32,5 R/0,50	45,5	1,9	54,0	1,5
CEM II/A-LL 32,5 R/0,60	34,5	3,3	39,0	2,2
CEM II/A-LL 32,5 R/0,60/LP	25,0	1,8	27,5	1,3
CEM II/B-S32,5 R/0,50	43,0	2,1	47,5	2,6
CEM II/B-S32,5 R/0,60	32,5	4,5	39,0	4,1
CEM III/A 42,5 N/0,50	54,0	1,2	61,5	4,5
CEM III/A 42,5 N/0,55	52,0	5,1	56,0	3,5
CEM III/A 42,5 N/0,60	45,0	1,7	49,5	1,4
278 CEM I 32,5 R/106 SFA/0,50	46,5	2,3	52,0	1,0
278 CEM I 32,5 R/106 SFA/0,60	35,5	1,7	39,5	1,1

Tab. 11: Gegenüberstellung der 28-d-Druckfestigkeiten, die bis zur Prüfung unter Wasser gelagert wurden („Wasserlagerung“) mit 28-d-Druckfestigkeiten und Rohdichten, die nach sieben Tagen Wasserlagerung bis zur Prüfung im Klima 20 °/65 % r. F. lagerten („Trockenlagerung“)

Beton	Mittlere Rohdichte „Wasserlagerung“	Variationskoeffizient „Wasserlagerung“	Mittlere Rohdichte „Trockenlagerung“	Variationskoeffizient „Trockenlagerung“
[-]	[kg/m ³]	[%]	[kg/m ³]	[%]
1	2	3	4	5
CEM I 32,5 R/0,50	2.430	0,2	2.420	0,6
CEM I 32,5 R/0,55	2.420	0,4	2.410	0,3
CEM I 32,5 R/0,60	2.400	0,3	2.370	0,6
CEM I 32,5 R/0,50/GK2	2.420	0,4	2.430	0,8
CEM I 32,5 R/0,50/GK3	2.340	0,2	2.320	0,4
CEM I 42,5 N/0,50	2.430	0,4	2.420	0,2
CEM I 42,5 N/0,60	2.420	0,3	2.410	0,3
CEM II/A-LL 32,5 R/0,50	2.450	0,3	2.420	0,4
CEM II/A-LL 32,5 R/0,60	2.420	0,1	2.370	0,6
CEM II/A-LL 32,5 R/0,60/LP	2.320	0,4	2.300	0,5
CEM II/B-S32,5 R/0,50	2.420	0,2	2.410	0,5
CEM II/B-S32,5 R/0,60	2.400	0,6	2.400	0,6
CEM III/A 42,5 N/0,50	2.420	0,4	2.440	0,9
CEM III/A 42,5 N/0,55	2.430	0,2	2.430	0,8
CEM III/A 42,5 N/0,60	2.380	0,8	2.380	0,7
278 CEM I 32,5 R/106 SFA/0,50	2.430	0,2	2.440	0,5
278 CEM I 32,5 R/106 SFA/0,60	2.390	0,1	2.410	0,6

Tab. 12: Gegenüberstellung der 28-d-Rohdichten, die bis zur Prüfung unter Wasser gelagert wurden, mit denen, die nach DIN 12390-2, Anhang NA gelagert wurden

6.2.2 Frost-Tausalz-Widerstand

In Bild 4 sind die Abwitterungen s in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel n der XF2-konformen Betone abgebildet. Dargestellt ist jeweils der Mittelwert aus fünf Probekörpern einer Betonserie. Die dazugehörigen Einzelergebnisse unter Angabe der Mittelwerte und Variationskoeffizienten können dem Anhang entnommen werden.

Alle XF2-konformen Betone weisen nach 14 Frost-Tau-Wechseln eine maximale mittlere aufsummierte Abwitterung von 920 g/m² auf. Die höchste Abwitterung weist der Beton „CEM II/A-LL 32,5 R/0,50“ auf. Die mittlere Abwitterung s der Betone, die nach aktuellem Stand der Normung im Bereich XF2 nicht eingesetzt werden dürften, sind in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel in Bild 5 dargestellt.

Hier liegen die mittleren aufsummierten Abwitterungen nach 14 Frost-Tau-Wechseln in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung zwischen 79 und 1.989 g/m². Die Betone mit einem w/z_{eq} von 0,60 weisen z. T. deutlich höhere Abwitterungen auf als Betone mit einem niedrigeren w/z_{eq} -Wert. Eine Aus-

nahme hiervon bildet der Beton, der mit Luftporenbildner hergestellt wurde. So weist der Beton „CEM II/A-LL 32,5 R/0,60/LP“ nach 14 Frost-Tau-Wechseln eine mittlere Abwitterung von 89 g/m² auf.

Die Gesteinskörnung „GK1“ (nicht in den Bezeichnungen der Betone aufgeführt) erwies sich bei den Prüfungen an der Gesteinskörnung als Frost-Tausalz-beständig. Dies bestätigen die Untersuchungen im Beton. So weist der Beton „CEM I 32,5 R/0,50“ nach 14 Frost-Tau-Wechseln eine mittlere aufsummierte Abwitterung von 271 g/m² auf (vgl. Bild 4). Während die Gesteinskörnung „GK3“ die schlechtesten Werte bei den Prüfungen an der Gesteinskörnung aufwies, weist der Beton, der mit der „GK3“ hergestellt wurde, nach 14 Frost-Tau-Wechseln lediglich eine mittlere aufsummierte Abwitterung von 79 g/m² auf. Der Beton mit der Gesteinskörnung „GK2“, der nach den Prüfungen an der Gesteinskörnung (vgl. Kapitel 5.2.3) nicht im Bereich XF2 eingesetzt werden dürfte, weist mit 1.532 g/m² nach 14 Frost-Tau-Wechseln einen deutlich schlechteren Frost-Tausalz-Widerstand im Beton auf als die Betone mit „GK1“ und „GK3“.

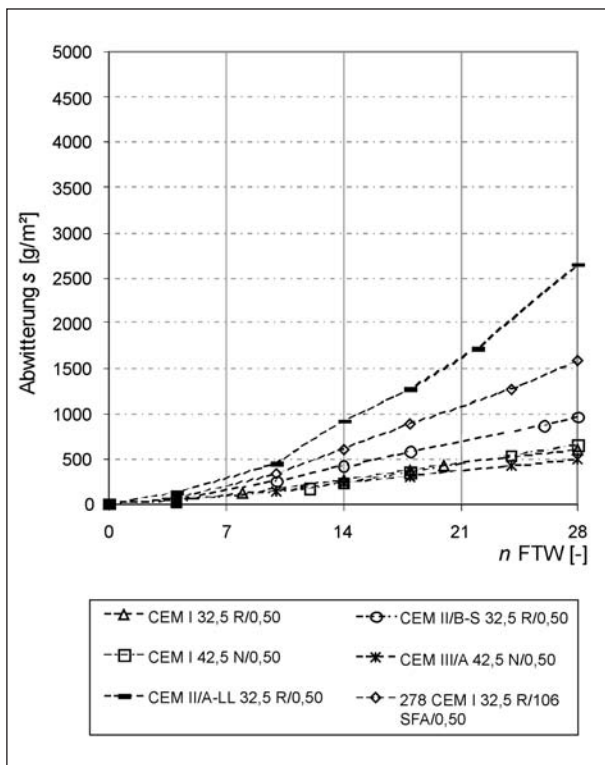


Bild 4: Mittlere aufsummierte Abwitterungen s der XF2-konformen Betone in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel n

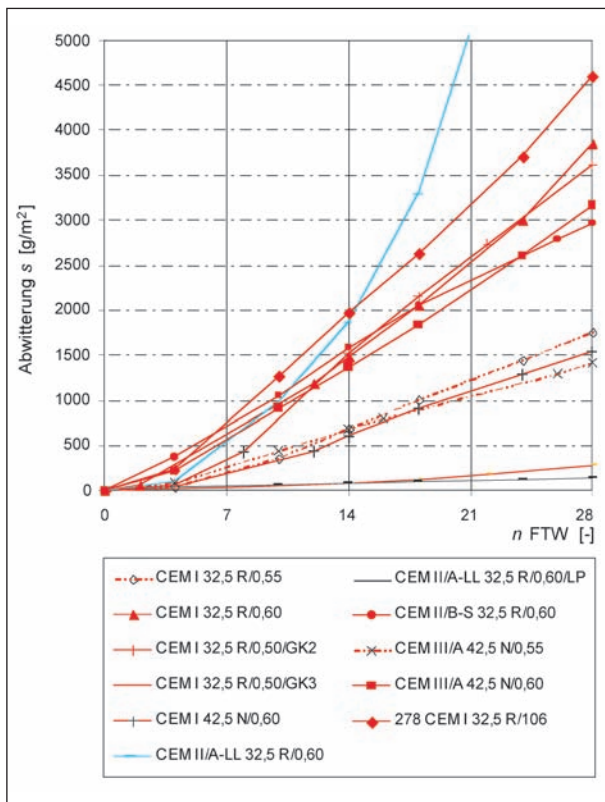


Bild 5: Mittlere aufsummierte Abwitterungen s der nicht XF2-konformen Betone in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel n

Die unterschiedlichen Betonrezepturen unterscheiden sich deutlich in ihrem Abwitterungsverhalten. Jedoch stellt sich bei allen Betonen mit vergleichsweise hohen Abwitterungen bereits nach wenigen Frost-Tau-Wechseln ein progressiver Verlauf im Abwitterungsverhalten der Betone ein, sodass eine verlängerte Prüfdauer von 28 Frost-Tau-Wechseln keine zusätzlichen Ergebnisse liefert. Bild 4 und Bild 5 bestätigen folglich die in [55] gefundene Erkenntnis, dass eine Unterscheidung der Frost-Tausalz-Beständigkeit der einzelnen Betonrezepturen bereits nach 14 Frost-Tau-Wechseln möglich ist.

Bild 6 zeigt die mittlere Abwitterung nach 14 Frost-Tau-Wechseln von 17 verschiedenen Betonen, die am cbm geprüft wurden. Die Betone, die nach dem aktuellen Stand der Normung im Bereich XF2 eingesetzt werden dürfen, sind grün markiert, die nicht XF2-konformen Betone sind rot dargestellt. Die Variationskoeffizienten der Betone lagen nach 14 Frost-Tau-Wechseln zwischen 5 und 30 % (vgl. auch Tabelle A8, Anhang).

Ziel der Untersuchungen war die Bestimmung eines Abnahmekriteriums für Betone im Bereich der Bundesfernstraßen. Dieses Abnahmekriterium gilt nur für die untersuchten Betone, die bis auf die Anforderungen an die Mindestdruckfestigkeitsklasse normkonform sind. Aufgrund der Ergebnisse der bisherigen Untersuchungen wird deutlich, dass ein solches Abnahmekriterium bisher nicht für die Beurteilung von Betonen mit künstlichen Luftporen geeignet ist. Zudem eignet es sich

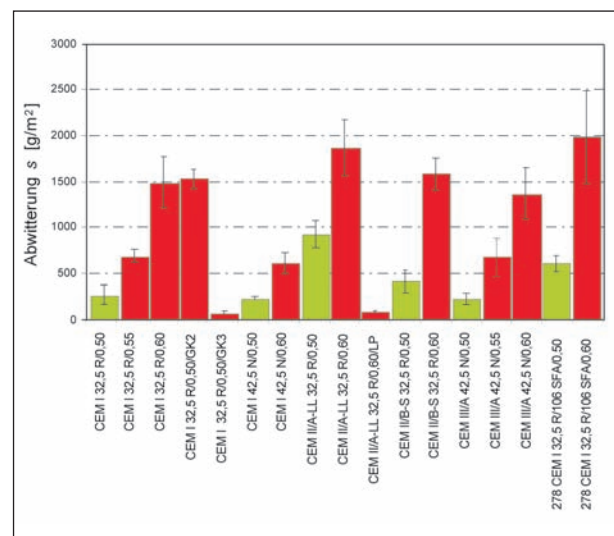


Bild 6: Mittlere aufsummierte Abwitterungen und Standardabweichungen der 17 verschiedenen Betone nach 14 Frost-Tau-Wechseln

nicht, um die Gesteinskörnung im Beton zu evaluieren.

Aufgrund der Streuung der Ergebnisse in einem sehr geringen Bereich der mittleren Abwitterung ($< 500 \text{ g/m}^2$) und einem sehr hohen Bereich der Abwitterung ($> 3.000 \text{ g/m}^2$) und der ersten Ergebnisse mit dem Prüfverfahren wurde in [55] bereits ein Bereich für ein mögliches Abnahmekriterium zwischen 1.000 und 1.800 g/m^2 vorgeschlagen. Um das Risiko des Auftraggebers, einen normgemäßen und nicht jedoch beständigen Beton einzubauen, zu minimieren, darf ein Abnahmekriterium nicht zu hoch gewählt werden (vgl. Bild 7). Die Wahl eines zu niedrigen Wertes würde andererseits zu einem unwirtschaftlichen Einsatz von Betonrezepturen führen. Bei einem Wert von 1.000 g/m^2 bestehen alle normkonformen Betone. Zudem bestehen auch einige nicht konformen Betone. Hierzu zählen die beiden Betone, die mit CEM I 32,5 R und CEM III/A 42,5 N sowie einem w/z-Wert von 0,55 hergestellt wurden. Zudem würde ein Beton mit einem w/z-Wert von 0,60 und einem Zement höherer Mahlfeinheit bestehen (CEM I 42,5 N). Entscheidend für den Vorschlag eines konkreten Wertes für ein Abnahmekriterium war die Voraussetzung, dass alle XF2-konformen Betone bestehen. Daher wird für den Bereich der Bundesfernstraßen ein Abnahmekriterium von 1.000 g/m^2 mittlerer aufsummierter Abwitterung nach 14 Frost-Tau-Wechseln (vgl. Bild 5 und Bild 7) vorgeschlagen. Dieses Kriterium gilt nur für die

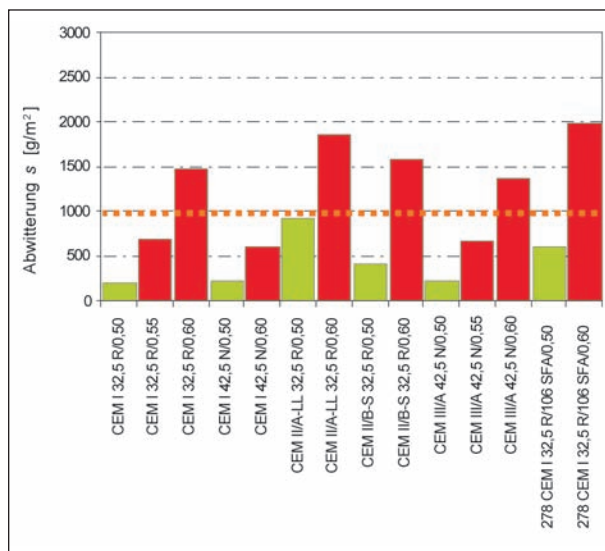


Bild 7: Mittlere aufsummierte Abwitterungen der normkonformen und nicht normkonformen Betone nach 14 Frost-Tau-Wechseln zur Empfehlung eines Abnahmekriteriums

untersuchten Betone, die bis auf die Mindestdruckfestigkeit die Anforderungen an die DIN-Normen erfüllen.

Der Abfall des relativen dynamischen E-Moduls der 17 Betone ist in Bild 8 in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel dargestellt. Hierbei zeigte sich, dass lediglich bei den Betonen „278 CEM I 32,5 R/106 SFA/0,60“ und „CEM III/A-LL 32,5R/0,60“, die auch die höchsten äußeren Schädigungen aufwiesen (vgl. Bild 5), nach 14 Frost-Tau-Wechseln ein Abfall im relativen dynamischen E-Modul beobachtet werden konnte. Alle anderen geprüften Betone wiesen nach 14 Frost-Tau-Wechseln einen relativen dynamischen E-Modul von 99 bis 102 % und nach 28 FTW von 86 bis 103 % auf. Somit zeigt sich, dass auch bei der Prüfung mit einer erhöhten Minimaltemperatur die Abwitterung als maßgebendes Kriterium bei der Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Betonen besser geeignet ist.

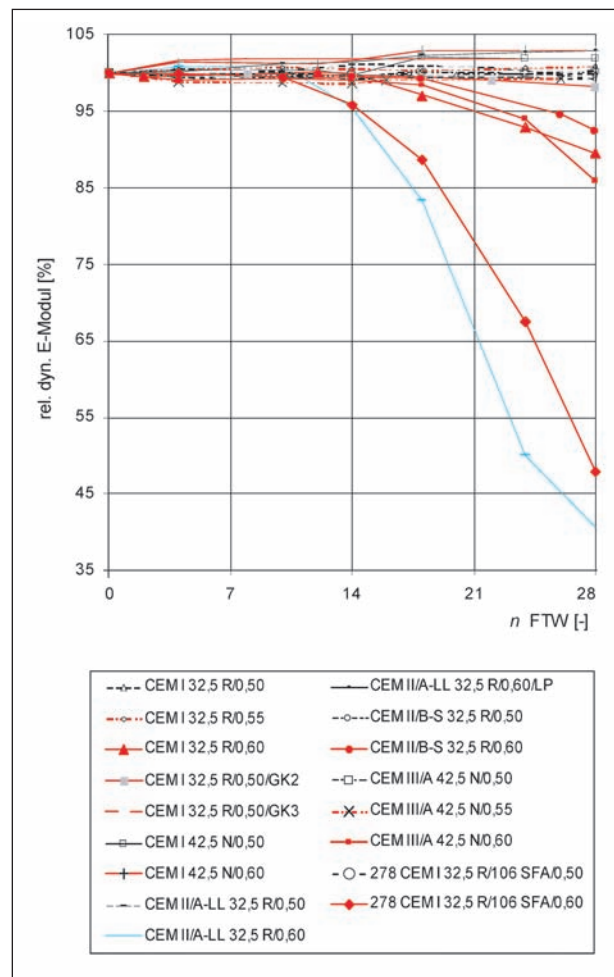


Bild 8: Relativer dyn. E-Modul in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel n

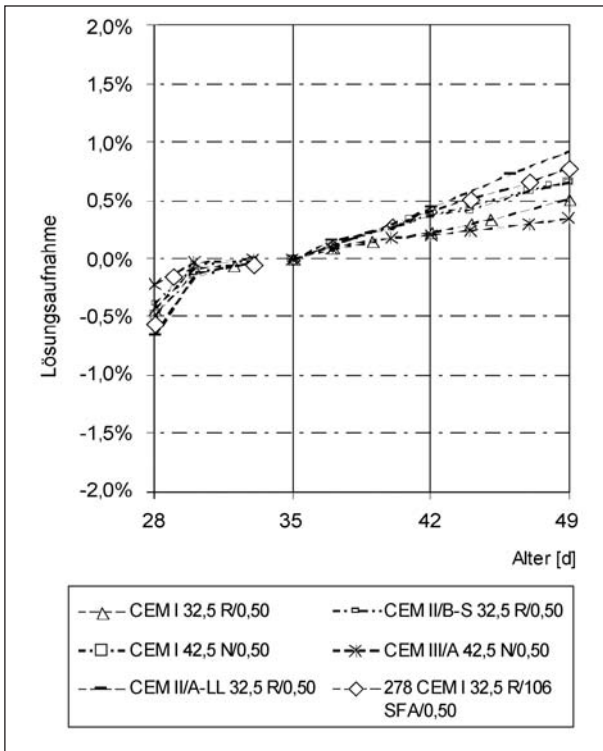


Bild 9: Massebezogene Aufnahme an 3%iger NaCl-Lösung der XF2-konformen Betone in Abhängigkeit vom Alter der Proben; das kapillare Saugen begann im Alter von 28 d; das Frostsaugen begann im Alter von 35 d

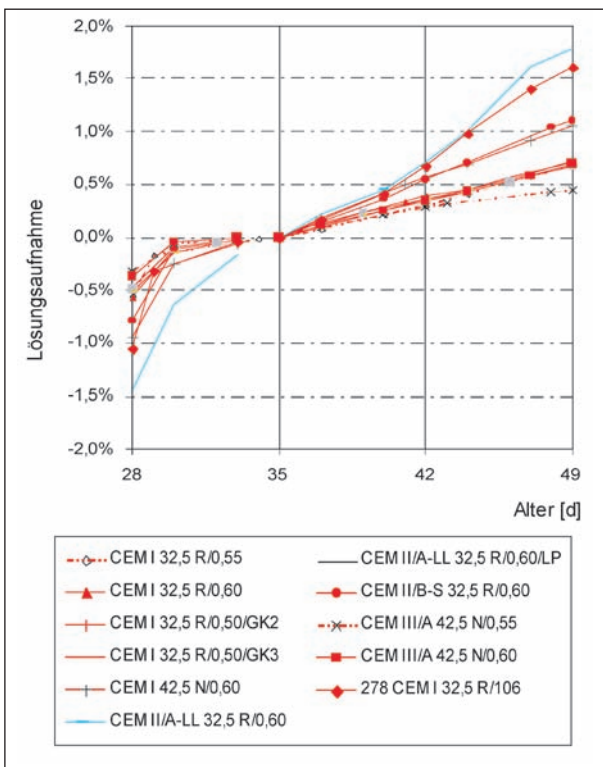


Bild 10: Massebezogene Aufnahme an 3%iger NaCl-Lösung der nicht XF2-konformen Betone in Abhängigkeit vom Alter der Proben; das kapillare Saugen begann im Alter von 28 d; das Frostsaugen begann im Alter von 35 d

Bild 9 und Bild 10 zeigen die massebezogene Lösungsaufnahme der im Rahmen der Untersuchungen zum Abnahmekriterium geprüften Betone. Hierbei wiesen nicht XF2-konforme Betone tendenziell eine höhere Lösungsaufnahme auf als solche, die den Vorgaben der Normen entsprechen. So lag der maximale Wert des Frostsaugens nach 14 Frost-Tau-Wechseln (42 d) bei den XF2-konformen Betonen bei 0,44 %, während zum selben Zeitpunkt nicht XF2-konforme Betone bereits eine Lösungsaufnahme von 0,67 % aufwiesen. Dieses Verhalten ist auf den erhöhten Kapillarporenraum bedingt durch den höheren w/z_{eq} -Wert zurückzuführen.

Bild 11 zeigt die Abwitterung der verschiedenen Betone in Relation zum Frostsaugen. Es gibt einen von der jeweiligen Betonrezeptur abhängigen Zusammenhang. Mit Ausnahme des Betons mit Mi-

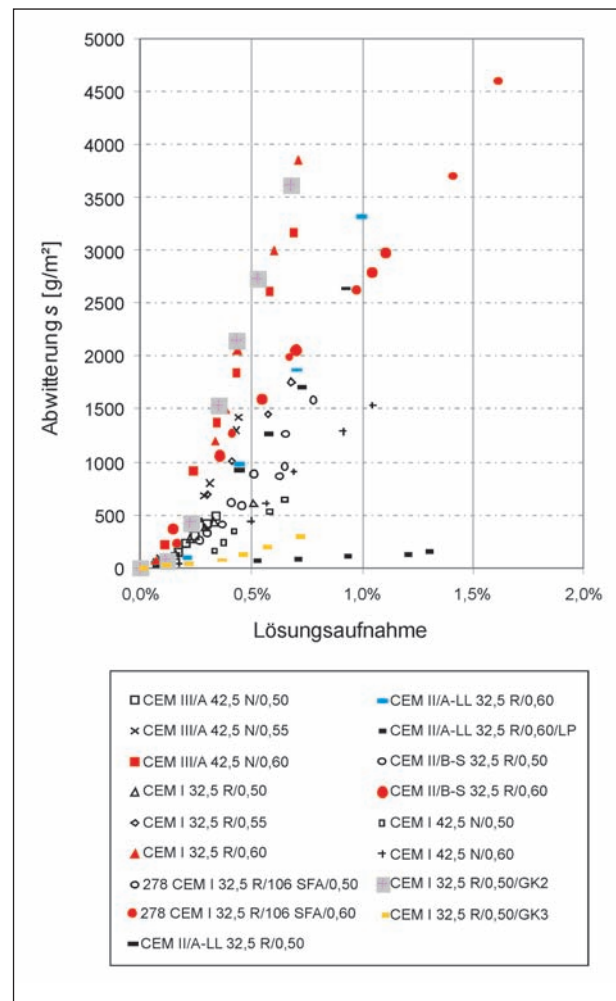


Bild 11: Mittlere aufsummierte Abwitterungen in Abhängigkeit zur massebezogenen Aufnahme an 3%iger NaCl-Lösung während der Frost-Tausalz-Prüfung mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) von 17 verschiedenen Betonen

kroloftporen wird in Bild 11 zudem deutlich, dass mit steigender Abwitterungsmenge auch das Frostsaugen zunimmt.

Der Zusammenhang zwischen den gemessenen Parametern Abwitterung, Lösungsaufnahme und rel. dyn. E-Modul ist exemplarisch für vier Betone in Bild 12 dargestellt. Betone, die einen deutlichen Abfall im relativen dynamischen E-Modul aufweisen (vgl. Bild 8), zeigen einen Schnittpunkt des rel. dyn. E-Moduls mit dem Verlauf der aufsummierten mittleren Abwitterung bei einer Lösungsaufnahme von 1,3 bis 1,4 M.-% (vgl. Bild 12, rechte Spalte). Für Betone, die keinen deutlichen Abfall im relativen dynamischen E-Modul aufweisen, existiert ein solcher Zusammenhang nicht (vgl. Bild 12, linke Spalte).

7 Ergebnisse der Untersuchungen zur Ermittlung der Präzision

7.1 Wiederholpräzision

Zur Abschätzung der Wiederholpräzision wurde am cbm der TU München ein breites Spektrum konstruktiver Betone geprüft. Neben fünf verschiedenen Zementarten wurden Betone mit verschiedenen Gesteinskörnungen und Zusatzstoffen hergestellt. Die Prüfungen erfolgten an drei verschiedenen Prüfgeräten und wurden von zwei Laboranten sowie zwei angeleiteten Laborhelfern durchgeführt. Die Prüfstreuung des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2) mit einem Prüfgerät und einem Laborant wird

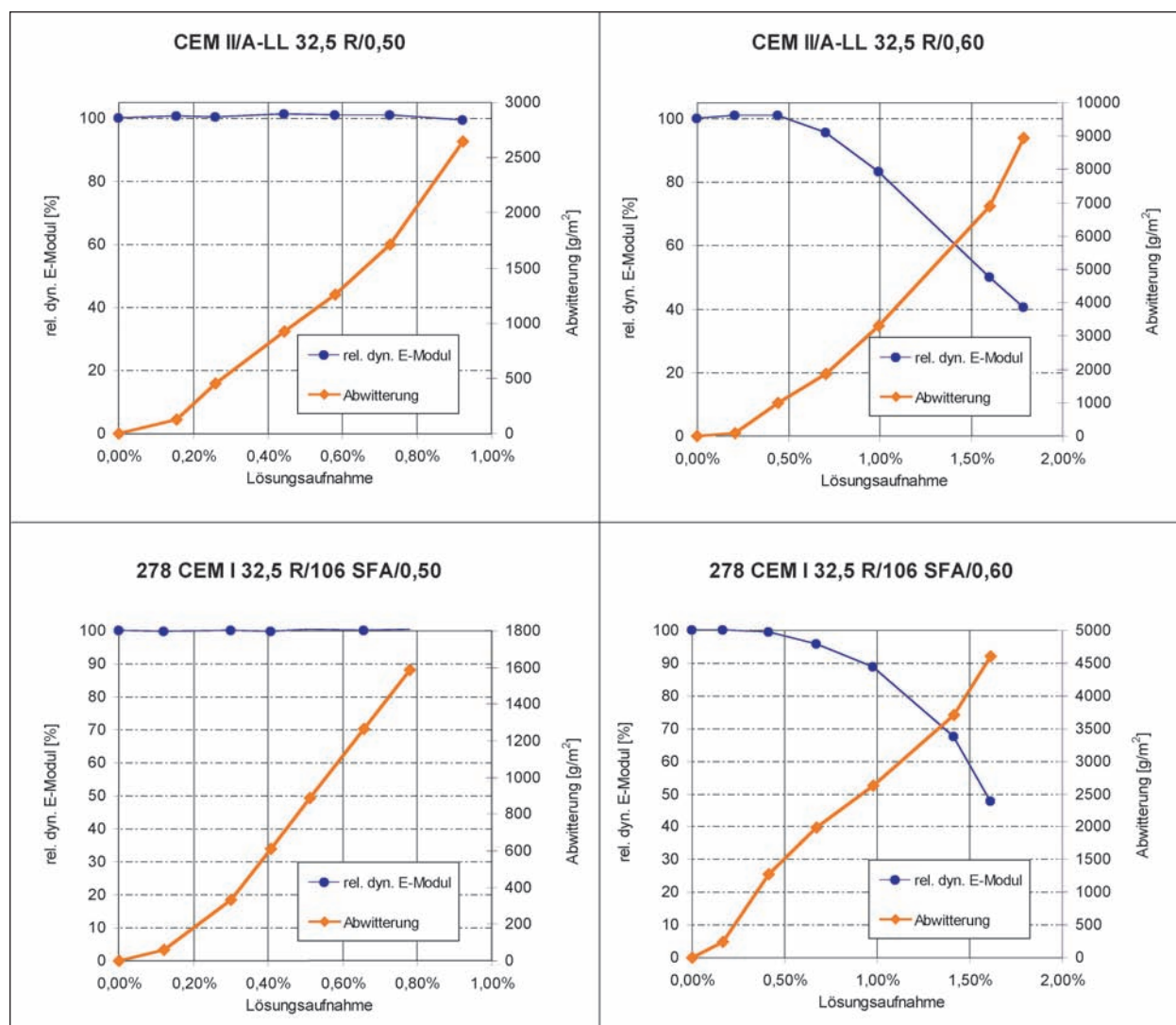


Bild 12: Mittlere aufsummierte Abwitterung, relativer dynamischer E-Modul und massebezogene Lösungsaufnahme in Abhängigkeit von der Anzahl an Frost-Tau-Wechseln für die Betone „CEM II/A-LL 32,5 R/0,50“ (links oben), „CEM II/A-LL 32,5 R/0,60“ (rechts oben), „278 CEM I 32,5 R/106 SFA/0,50“ (links unten) und „278 CEM I 32,5 R/106 SFA/0,60“ (rechts unten)

daher unterhalb der ermittelten Wiederholpräzision liegen.

Nach DIN ISO 5725 kann zwischen dem Streuungsmaß und dem Merkmal eine funktionale Beziehung bestehen. Eine Regressionsbetrach-

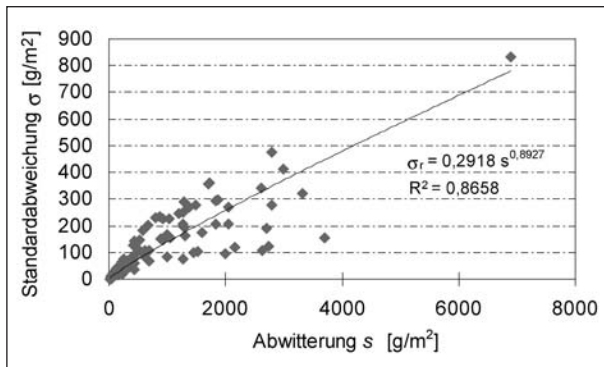


Bild 13: Funktionaler Zusammenhang zwischen der Standardabweichung und der mittleren aufsummierten Abwitterung von 29 Betonen mit 17 unterschiedlichen Zusammensetzungen

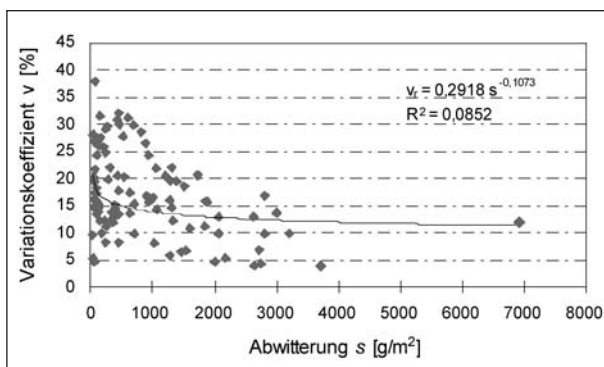


Bild 14: Der Variationskoeffizient als Funktion der mittleren aufsummierten Abwitterung s ermittelt aus 29 Prüfungen von 17 unterschiedlich zusammengesetzten Betonen

tung der 29 Frost-Tausalz-Prüfungen ($n = 5$) ergab den in Bild 13 dargestellten Zusammenhang zwischen der Standardabweichung und der mittleren Abwitterung s . Die Trennschärfe nimmt mit steigender Abwitterung zu. Aufgrund der im Vergleich zu der Datenbasis, die für die Veröffentlichung der Präzisionsdaten des CDF-Verfahrens vorlag [24], geringen Datenmenge wird empfohlen, den hier ermittelten Zusammenhang noch durch weitere Untersuchungen zu verifizieren.

Bild 14 zeigt den Variationskoeffizienten als Funktion der mittleren aufsummierten Abwitterung. Ab einer mittleren aufsummierten Abwitterung von 300 g/m^2 flacht die Kurve deutlich ab. Die Streuung verändert sich ab einer mittleren aufsummierten Abwitterung von 1.000 g/m^2 mit einem Variationskoeffizienten von $13,9 \%$ nur noch geringfügig. Bei einer mittleren aufsummierten Abwitterung von 1.500 g/m^2 liegt der Variationskoeffizient bei $13,3 \%$. AUBERG [1] ermittelte bei einer mittleren aufsummierten Abwitterung von 1.500 g/m^2 für das bekannte CDF-Verfahren für die Expositionsklasse XF4 einen Variationskoeffizienten von $10,3 \%$ als mittleren Erwartungswert für die Wiederholpräzision. Die hier durchgeführten Untersuchungen ergaben damit eine gegenüber dem bekannten CDF-Verfahren höhere Streuung der Prüfergebnisse. Für das vorgeschlagene Abnahmekriterium für die untersuchten normkonformen Betone von 1.000 g/m^2 ergibt sich ein Variationskoeffizient von $13,9 \%$. Nach RÜSCH et al. liegt der Variationskoeffizient der Betondruckfestigkeit für die Druckfestigkeit von Normalbetonen zwischen 6 und 14% [48]. Die Wiederholpräzision des modifizierten CDF-Verfahrens

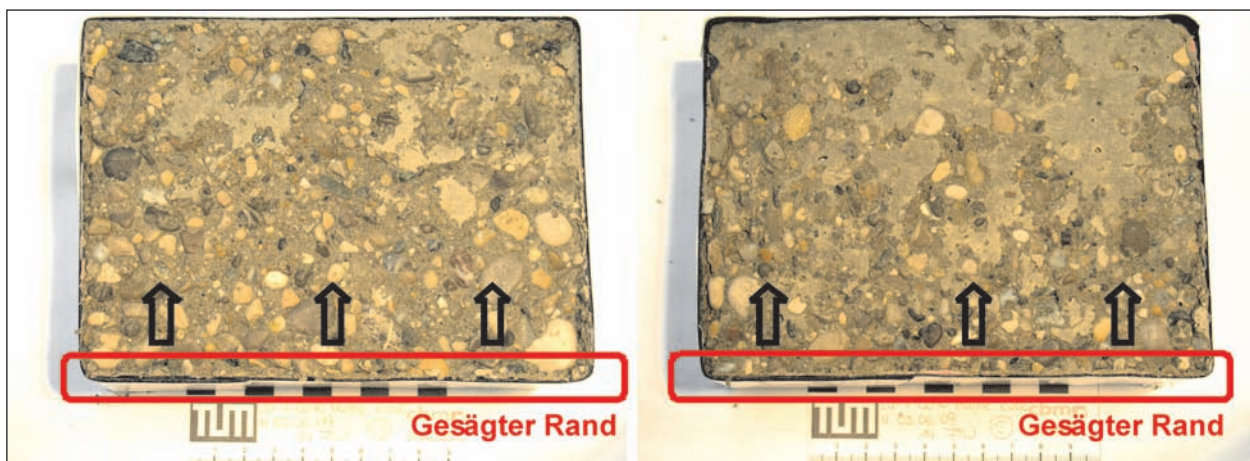


Bild 15: Beispiel für die flächenhafte Abwitterung der Probekörper anhand der Probekörper 3 und 5 des Betons „RV02“ nach 14 Frost-Tau-Wechseln

rens (XF2) liegt somit in ähnlicher Größenordnung anderer anerkannter Festbetonprüfungen. Eine trennscharfe Bewertung von Betonen mit unterschiedlichem Frost-Tausalz-Widerstand ist folglich mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) möglich.

Die geprüften Betonserien begannen tendenziell von der gesägten Prüffläche her abzuwittern (vgl. Bild 15). Dieses Verhalten war bei Betonen mit geringem Frost-Tausalz-Widerstand ausgeprägter. Die gesägte Seite scheint daher bereits eine mechanische Vorschädigung aufzuweisen. Die Abwitterungen waren in der Regel durch ein flächiges Ablösen der oberen Zementleimschicht gekennzeichnet. Lokal begrenzte Popouts, die bei nicht frostbeständiger Gesteinskörnung typischerweise auftreten, waren nur vereinzelt feststellbar.

7.2 Untersuchungen zur Ermittlung der Präzision unter Zwischenbedingungen (M = 1)

7.2.1 Frischbetonkennwerte

Die Ergebnisse der Frischbetonkennwerte sind in Tabelle 13 dargestellt.

7.2.2 Rohdichte und Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeiten und Rohdichten nach 28 Tagen sind in Tabelle 14 dargestellt.

7.2.3 Frost-Tausalz-Widerstand

Die mittleren aufsummierten Abwitterungen der Betone „CEM I 32,5 R/0,50“ und „CEM I 32,5 R/0,60“, die dreimal in kurzen Zeitabständen hintereinander

Beton	LP-Gehalt	Rohdichte	Ausbreitmaß	Verdichtungsmaß	Konsistenzklasse	Temperatur
[-]	[Vol.-%]	[kg/dm ³]	[mm]	[-]	[-]	[°C]
1	2	3	4	5	6	7
CEM I 32,5 R/0,50.1	1,5	2.460	n. b.	1,32	C1	19,7
CEM I 32,5 R/0,50.2	1,1	2.470	n. b.	1,30	C1	20,2
CEM I 32,5 R/0,50.3	1,1	2.490	n. b.	1,26	C1	20,9
CEM I 32,5 R/0,60.1	1,0	2.420	430	n. b.	F3	21,9
CEM I 32,5 R/0,60.2	0,9	2.430	440	n. b.	F3	19,9
CEM I 32,5 R/0,60.3	0,7	2.490	500	n. b.	F4	20,7

n. b. nicht bestimmt

Tab. 13: Frischbetonkennwerte der Betone

Beton	Druckfestigkeit		Rohdichte	
	Mittelwert	Variationskoeffizient	Mittelwert	Variationskoeffizient
[-]	[N/mm ²]	[%]	[kg/m ³]	[%]
1	2	3	4	5
CEM I 32,5 R/0,50.1	45,5	3,3	2.430	0,2
CEM I 32,5 R/0,50.2	46,0	4,7	2.440	0,2
CEM I 32,5 R/0,50.3	44,5	4,8	2.440	0,3
CEM I 32,5 R/0,60.1	35,0	1,1	2.410	0,3
CEM I 32,5 R/0,60.2	36,0	1,9	2.400	0,3
CEM I 32,5 R/0,60.3	34,0	3,2	2.420	0,6

Tab. 14: Rohdichte und Druckfestigkeit der Betone nach 28 Tagen, Wasserlagerung

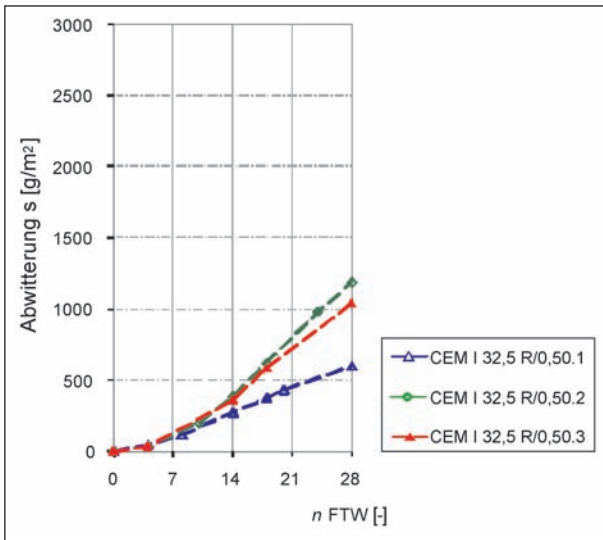


Bild 16: Mittlere aufsummierte Abwitterungen s der dreimal hintereinander hergestellten und geprüften Betone „CEM I 32,5 R/0,50“ (Zwischenbedingung $M = 1$)

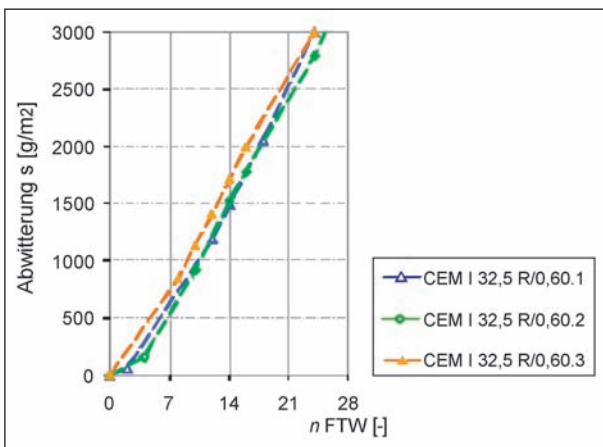


Bild 17: Mittlere aufsummierte Abwitterungen s der dreimal hintereinander hergestellten und geprüften Betone „CEM I 32,5 R/0,60“ (Zwischenbedingung $M = 1$)

der hergestellt und geprüft wurden, sind in Abhängigkeit von der Anzahl an Frost-Tau-Wechseln in den Bildern 16 und 17 dargestellt. Während sich bei dem Beton „CEM I 32,5 R/0,60“ nach 4 Frost-Tau-Wechseln bei den wiederholten Mischungen ein ähnlicher Verlauf einstellt, weicht der Abwitterungsverlauf des Betons „CEM I 32,5 R/0,50.1“ deutlich von den wiederholten Mischungen ab. Da die Betone unter den exakt gleichen Bedingungen hergestellt und geprüft wurden, konnte für das unterschiedliche Abwitterungsverhalten keine Ursache gefunden werden. Daher wurden alle Betone bei der Auswertung berücksichtigt. Die Einzelergebnisse der Prüfungen mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) sind dem Anhang zu entnehmen. Der Variationskoeffizient bei einer mittleren Abwitterung von 1.500 g/m^2 beträgt $17,0 \%$ und liegt damit deutlich über dem Streubereich des bekannten CDF-Verfahrens. Hier wurde bei 1.500 g/m^2 ein Variationskoeffizient von 11% ermittelt [1].

7.3 Untersuchungen zur Ermittlung der Präzision unter Zwischenbedingungen ($M = 3$)

7.3.1 Frischbetonkennwerte

Die Ergebnisse der Untersuchungen am Frischbeton sind in Tabelle 15 aufgeführt.

7.3.2 Rohdichte und Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeiten und Rohdichten nach 28 Tagen sind in Tabelle 16 dargestellt.

Beton	LP-Gehalt	Rohdichte	Ausbreitmaß	Verdichtungsmaß	Konsistenzklasse	Temperatur
[-]	[Vol.-%]	[kg/dm ³]	[mm]	[-]	[-]	[°C]
1	2	3	4	5	6	7
CEM I 32,5 R/0,50.L1.T1	1,5	2.460	n. b.	1,32	C1	19,7
CEM I 32,5 R/0,50.L1.T2	1,5	2.460	n. b.	1,32	C1	19,7
CEM I 32,5 R/0,50.L1.T3	1,5	2.460	n. b.	1,32	C1	19,7
CEM I 32,5 R/0,50.L2.T1	1,1	2.490	n. b.	1,26	C1	20,9
CEM I 32,5 R/0,50.L2.T2	1,1	2.490	n. b.	1,26	C1	20,9
CEM I 32,5 R/0,50.L2.T3	1,1	2.490	n. b.	1,26	C1	20,9
n. b. nicht bestimmt						

Tab. 15: Frischbetonkennwerte der Betone

Beton	Druckfestigkeit		Rohdichte	
	Mittelwert	Variationskoeffizient	Mittelwert	Variationskoeffizient
[-]	[N/mm ²]	[%]	[kg/m ³]	[%]
1	2	3	4	5
CEM I 32,5 R/0,50.L1.T1	45,5	3,4	2.430	0,2
CEM I 32,5 R/0,50.L1.T2	45,5	3,4	2.430	0,2
CEM I 32,5 R/0,50.L1.T3	45,5	3,4	2.430	0,2
CEM I 32,5 R/0,50.L2.T1	44,5	4,8	2.440	0,3
CEM I 32,5 R/0,50.L2.T2	44,5	4,8	2.440	0,3
CEM I 32,5 R/0,50.L2.T3	44,5	4,8	2.440	0,3

Tab. 16: Rohdichte und Druckfestigkeit der Betone nach 28 Tagen

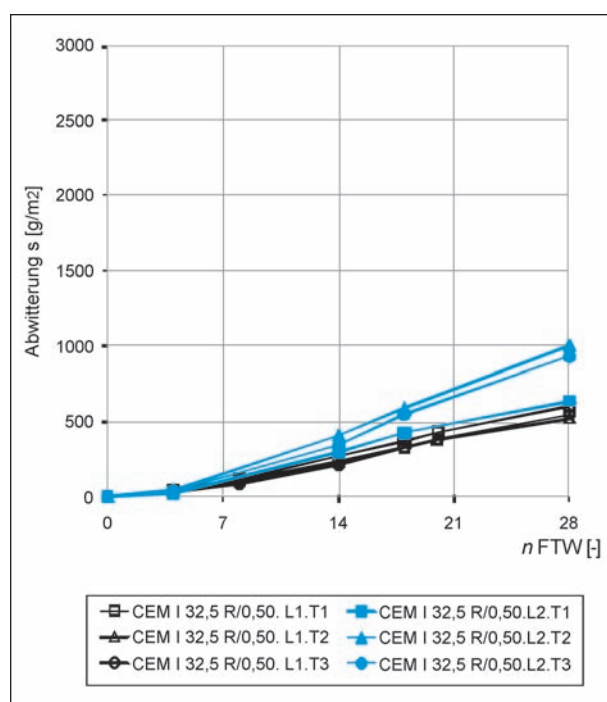


Bild 18: Mittlere aufsummierte Abwitterungen s des Betons „CEM I 32,5 R/0,50“ in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, der zweimal hergestellt wurde und von zwei unterschiedlichen Laboranten in drei verschiedenen Prüfgeräten geprüft wurde (Zwischenbedingung $M = 3$)

7.3.3 Frost-Tausalz-Widerstand

Um die Streuung unter Zwischenbedingungen unter Veränderung der Merkmale Bearbeiter, Zeit (Betoncharge) und Prüfgerät zu ermitteln, wurde der Beton „CEM I 32,5 R/0,50“ mit zwei Laboranten und drei Prüfgeräten (Klimatruhen) geprüft. Um die Materialstreuung so gering wie möglich zu halten,

wurde der Beton „CEM I 32,5 R/0,50.L1.T1“ bis „CEM I 32,5 R/0,50.L1.T3“ in einer Mischung hergestellt. Die Ergebnisse der Prüfungen in drei verschiedenen Truhen sind in Bild 18 sowie im Anhang dargestellt.

Die Messergebnisse des Bearbeiters „L2“ lagen nach 14 Frost-Tau-Wechseln leicht über denen des Bearbeiters „L1“. Insgesamt konnte eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse unter Zwischenbedingungen ($M = 3$, Bearbeiter, Zeit und Prüfgerät) festgestellt werden. Die Streuung unter Zwischenbedingungen ($M = 3$) liegt in der Größenordnung der Wiederholstreuung (vgl. Kapitel 7.4).

7.4 Präzision unter Zwischenbedingungen

Um die Reproduzierbarkeit von Messergebnissen bewerten zu können, wurden zwei Betone zeitversetzt dreimal hintereinander hergestellt und im gleichen Alter geprüft (vgl. Kapitel 7.2). Um die Streuung aus Herstellung, Prüfgerät und Bearbeiter beurteilen zu können, wurde ein Beton zweimal hergestellt und in drei Geräten von zwei verschiedenen Bearbeitern geprüft (vgl. Kapitel 5.3). Nach DIN ISO 5725 kann zwischen der Standardabweichung und dem arithmetischen Mittelwert des Merkmals eine funktionale Beziehung bestehen. Eine Regressionsanalyse ergab, dass die unter Wiederholbedingungen sowie unter Zwischenbedingungen ($M = 1$) ermittelten Variationskoeffizienten durch eine Exponentialfunktion in funktionalen Zusammenhang ge-

	Wiederholpräzision		Präzision unter ZB (M = 1)		Präzision unter ZB (M = 3)	
	σ	v	σ	v	σ	v
1	2	3	4	5	6	7
Funktionale Beziehung	$\sigma_r = 0,2918 s^{0,893}$	$v_r = 0,2918 s^{-0,107}$	$\sigma_{z1} = 0,481 s^{0,86}$	$v_r = 0,481 s^{-0,14}$	$\sum_{z3} = \sigma_r$	$v_{z3} = v_r$

Tab. 17: Präzisionsdaten für das modifizierte CDF-Verfahren (XF2) in Anlehnung an DIN ISO 5725

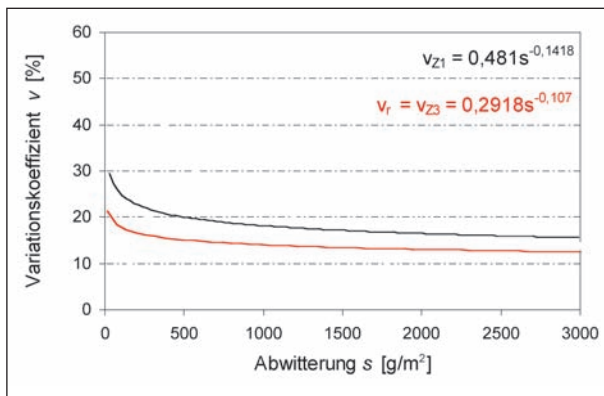


Bild 19: Der Variationskoeffizient v als Funktion der mittleren aufsummierten Abwitterung s ermittelt aus den Untersuchungen zur Präzision unter Wiederhol- und Zwischenbedingungen

bracht werden können (vgl. Tabelle 17 und Bild 19). Diese funktionalen Zusammenhänge sind in Bild 19 grafisch dargestellt. Die Präzision unter Zwischenbedingungen ($M = 1$) liegt damit leicht höher als die Präzision unter Wiederholbedingungen ($v_r \approx v_{z1}$), vgl. Tabelle A20 und Bild 19. Die Streuung unter Zwischenbedingungen unter Veränderung der Merkmale Prüfgerät, Zeit und Bearbeiter ($M = 3$) liegt in derselben Größenordnung der Wiederholstreuung ($v_r = v_{z3}$), vgl. Tabelle A21 und Bild 19. Die Ermittlung des Frost-Tausalz-Widerstandes für Betone im Bereich XF2 ist unter Berücksichtigung der Materialstreuung folglich präzise und reproduzierbar.

7.5 Präzision unter Vergleichbedingungen

7.5.1 Planung des Ringversuches

Erst die Durchführung und statistische Auswertung eines Ringversuchs ermöglichen es, zuverlässige Aussagen über die Eignung und Leistungsfähigkeit eines Prüfverfahrens zu treffen. Die Durchführung und Analyse eines Ringversuchs nach DIN ISO 5725 [18] sind daher ein wesentlicher Bestandteil dieses Forschungsvorhabens. Voraussetzung für die Auswertung eines Ringversuchs ist das Vorlie-

gen einer standardisierten Prüfmethode [18]. Zudem soll das untersuchte Material homogen und nicht aus verschiedenen Losen oder Sendungen stammen. Da es sich bei Beton um inhomogenes Material handelt und die Proben bei der Prüfung zerstört werden, ist dies nur bedingt bzw. nicht möglich. Daher ist die genaue Betrachtung der einzelnen Randbedingungen sehr wichtig.

Die Anzahl der Prüfinstitute (p) sowie die Anzahl der Messwerte (n) je Messreihe wurden vom Ringversuchsleiter (cbm) vorgegeben.

Die Prüfung erfolgte nach dem BAW-Merkblatt „Frostprüfung“ [2] mit folgender Änderung:

Die Maximaltemperatur beträgt statt -20 °C nur -10 °C. Dadurch wird ein im Vergleich zur Exposition XF4 abgeschwächter Angriff simuliert. Die Dauer eines Frost-Tau-Wechsels sowie Abkühl- und Auftaugeschwindigkeit von 10 K/h werden nicht verändert. Die Haltezeit bei der Minimaltemperatur wird von drei auf fünf Stunden verlängert.

Für den Ringversuch wurden Institute ausgewählt, die als repräsentativ für die Gesamtheit aller Laboratorien angesehen werden können. An dem „Ringversuch XF2“ nahmen die folgenden Institute teil:

- MPA BAU, Centrum Baustoffe und Materialprüfung (cbm) der TU München (I 1),
- Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin (I 2),
- Institut für Bauforschung RWTH Aachen (ibac), Aachen (I 3),
- Verein Deutscher Zementwerke (VDZ), Düsseldorf (I 4),
- WISSBAU Beratende Ingenieurgesellschaft mbH, Essen (I 5).

Eine Prüfanweisung mit den einzelnen Terminen sowie eine Beschreibung des gesamten Prüfablaufs inklusive Vorbereitung wurden vom Ver-

suchsleiter (cbm) an die teilnehmenden Institute verschickt (vgl. Tabelle 18). Der Abgabetermin der Messergebnisse wurde auf Anfang August 2009 festgelegt.

Datum	Betonalter	Vorgehen	Institut
[-]	[d]	[-]	[-]
1	2	3	4
03.06.09	0	Herstellen der Betone	cbm
10.06.09	7	Sägen der Probekörper	cbm
23.06.09	20	Einpacken der Probekörper in Folie	cbm
23.06.09	20	Verschicken der Probekörper	cbm
26.06.09	23	Auspacken der Probekörper	alle
29.06.09	25	Abdichten der Seitenflächen	alle
01.07.09	28	Beginn des kapillaren Saugens	alle
08.07.09	35	Beginn der Frost-Tau-Belastung	alle
22.07.09	49	Ende der Frost-Tau-Belastung	alle
bis 01.08.09	-	Übermittlung der Messergebnisse	alle

Tab. 18: Prüfplan für die Durchführung des „Ringversuches XF2“

Art der Abdichtung	Datum	Institut
1	2	3
Primer und Butylkautschukband	29.06.2009	I 1 (cbm)
Epoxidharz	26.06.2009	I 2 (BAM)
Primer und Butylkautschukband	29.06.2009	I 3 (ibac)
Primer und Butylkautschukband	29.06.2009	I 4 (VDZ)
Primer und Butylkautschukband	29.06.2009	I 5 (wissbau)

Tab. 19: Abdichtung der Seitenflächen an den einzelnen Instituten

Damit die ermittelte Streuung der Prüfmethode direkt zugeordnet werden kann und die Materialstreuung so klein wie möglich ist, wurden die zu prüfenden Betonserien in einer Charge am Institut des Auftragnehmers (cbm) hergestellt. Für jedes prüfende Labor wurden drei Serien mit je fünf Probekörpern hergestellt. Der Prüfplan für den Ringversuch ist in Tabelle 18 dargestellt.

Am 03. Juni 2009 wurden drei Betone gemäß dem in Kapitel 5.5 vorgestellten Mischregime hergestellt. Jede Mischung hatte ein Volumen von 100 Litern. Aus organisatorischen Gründen wurden die Probekörper nicht wie bei den anderen Untersuchungen in Stahlschalungen, sondern in Kunststoffschalungen mit eingelegten Teflonscheiben hergestellt. Die Probekörper wurden einen Tag in der Schalung bei 20 °C/> 98 % r. F. gelagert. Anschließend verblieben sie bis zum Alter von sieben Tagen in Wasserlagerung bei 20 ±2 °C. Nach sieben Tagen wurden die Probekörper gemäß den Angaben in [37] gesägt und lagerten bis zum Alter von 20 Tagen im Klima 20 °C/65 % r. F. Dann wurden die Probekörper einzeln verschweißt und in jeweils einer mit Styropor ausgekleideten Kunststoffbox an die teilnehmenden Institute versandt. Dort wurden sie im Alter von 23 Tagen ausgepackt und zwei Tage später abgedichtet.

Die Art der Abdichtung war zwischen den im BAW-Merkblatt möglichen Varianten frei wählbar. Bis auf das Institut 2 dichteten alle Institute die Seitenflächen am 29.06.2009 mit Haftgrundmittel und aluminiumkaschierten Butylkautschukband ab (vgl. Tabelle 19).

7.5.2 Ergebnisse

7.5.2.1 Frischbetonkennwerte

Die Ergebnisse der Untersuchungen am Frischbeton sind in Tabelle 20 aufgeführt.

Beton	LP-Gehalt	Rohdichte	Ausbreitmaß	Verdichtungsmaß	Konsistenzklasse	Temperatur
[-]	[Vol.-%]	[kg/dm ³]	[mm]	[-]	[-]	[°C]
1	2	3	4	5	6	7
RV01 („CEM I 32,5 R/0,50“)	1,5	2.470	n. b.	1,29	C1	20,8
RV02 („CEM II/A-LL 32,5 R/0,50“)	0,9	2.480	n. b.	1,27	C1	19,1
RV03 („CEM II/A-LL 32,5 R/0,60“)	1,0	2.420	42,0	n. b.	F2	20,1

Tab. 20: Frischbetonkennwerte der Betone

Beton	Druckfestigkeit		Rohdichte	
	Mittelwert	Variationskoeffizient	Mittelwert	Variationskoeffizient
[-]	[N/mm ²]	[%]	[kg/m ³]	[%]
1	2	3	4	5
RV01 („CEM I 32,5 R/0,50“)	42,5	3,8	2.420	0,4
RV02 („CEM III/A-LL 32,5 R/0,50“)	45,5	2,3	2.420	0,1
RV03 („CEM III/A-LL 32,5 R/0,60“)	35,0	4,4	2.410	0,4

Tab. 21: Rohdichte und Druckfestigkeit der Betone nach 28 Tagen, Wasserlagerung

7.5.2.2 Rohdichte und Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeiten und Rohdichten nach 28 Tagen sind in Tabelle 21 dargestellt.

7.5.2.3 Frost-Tausalz-Widerstand

Alle der fünf ursprünglich am Ringversuch beteiligten Institute haben die Prüfung zu den vorgegebenen Zeitpunkten durchgeführt und die Ergebnisse an den Ringversuchsleiter übermittelt. Die Einzelergebnisse sind im Anhang aufgeführt. Die mittlere Abwitterung in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel ist in den Bildern 20 bis 22 dargestellt. Bei den drei geprüften Serien zeigt sich eine gute Übereinstimmung der Messergebnisse der verschiedenen Institute. Die verschiedenen Betonqualitäten konnten eindeutig voneinander unterschieden werden.

Die Steigung der Abwitterungsverläufe der verschiedenen Betone ist ab dem vierten Frost-Tau-Wechsel bei allen drei Betonen ähnlich. Das Institut 2 misst minimal höhere Abwitterungen als die anderen Institute (vgl. Bild 20 bis 22).

Bei der Serie RV01 („CEM I 32,5 R/0,50“) ist das Institut I 3 nach 4 Frost-Tau-Wechseln als statistischer Ausreißer gekennzeichnet und bei der Auswertung nicht berücksichtigt worden (vgl. Tabelle A21). Die Ergebnisse des Ringversuchs und die statistische Auswertung sind im Anhang aufgeführt. Aus den ermittelten Werten wurden die Präzisionsdaten in Anlehnung an DIN ISO 5725 [18] (vgl. Kapitel 4.2) bestimmt. Die Werte sind im Anhang abgebildet. Gemäß DIN ISO 5725 konnten die Standardabweichung sowie der Variationskoeffizient mit dem arithmetischen Mittelwert des Merkmals in funktionalen Zusammenhang gebracht werden (vgl. Tabelle 22

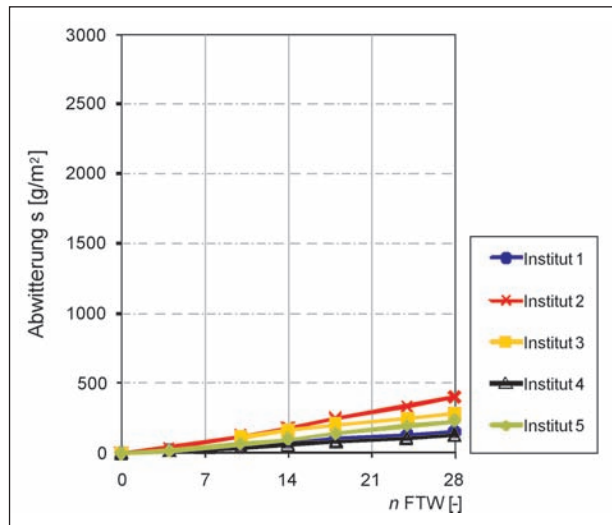


Bild 20: Mittlere aufsummierte Abwitterungen s des Betons RV01 („CEM I 32,5 R/0,50“) in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel n geprüft an fünf verschiedenen Instituten zum selben Zeitpunkt

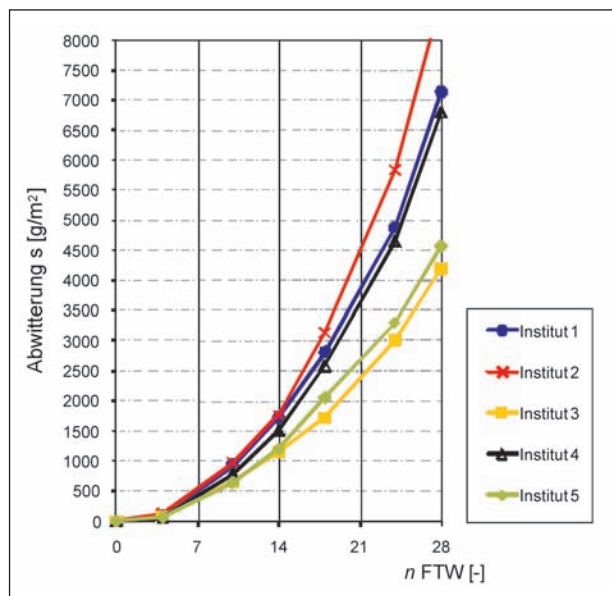


Bild 21: Mittlere aufsummierte Abwitterungen s des Betons RV02 („CEM III/A-LL 32,5 R/0,50“) in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel n geprüft an fünf verschiedenen Instituten zum selben Zeitpunkt

und Bild 23). Demnach liegt die Wiederholpräzision aus mehreren Instituten deutlich über der Wiederholpräzision, die in den Untersuchungen an einem Institut ermittelt wurde (vgl. Kapitel 7.1).

Wie aus Bild 23 hervorgeht, nimmt die Präzision des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2) mit stei-

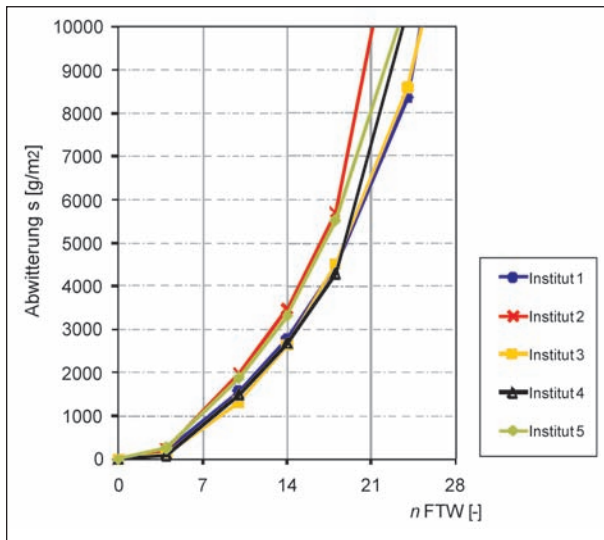


Bild 22: Mittlere aufsummierte Abwitterungen s des Betons RV03 („CEM II/A-LL 32,5 R/0,60“) in Abhängigkeit von der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel n geprüft an fünf verschiedenen Instituten zum selben Zeitpunkt

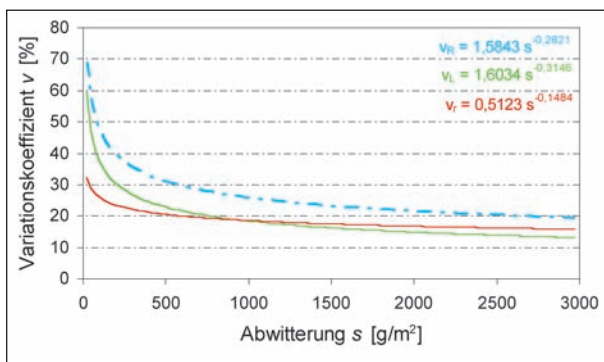


Bild 23: Der Variationskoeffizient v als Funktion der mittleren Abwitterung s ermittelt aus den Untersuchungen zur Präzision unter Wiederhol- und Zwischenbedingungen

gender Abwitterung zu. Dies konnte auch bei dem bekannten CDF-Verfahren beobachtet werden [1]. Bei gleichem Merkmalsniveau zeigen Betonserien mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand geringere Variationskoeffizienten als Betone mit mittlerem Frost-Tausalz-Widerstand. Für eine mittlere Abwitterung von 1.500 g/m^2 konnten beim Ringversuch ein Variationskoeffizient unter Wiederholbedingungen von $17,3 \%$ und ein Variationskoeffizient unter Zwischenbedingungen von $16,1 \%$ ermittelt werden. Folglich ergibt sich bei einer mittleren aufsummierten Abwitterung von 1.500 g/m^2 ein Variationskoeffizient unter Vergleichbedingungen von $23,3 \%$. Die Präzision des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2) liegt demnach über der Präzision des bekannten CDF-Verfahrens für den Bereich XF4. Hierfür wurde ein Variationskoeffizient der Vergleichpräzision bei 1.500 g/m^2 mittlerer Abwitterungen von 18% ermittelt. Für eine mittlere aufsummierte Abwitterung von 1.000 g/m^2 ergab sich beim Ringversuch ein Variationskoeffizient unter Wiederholbedingungen von $18,3 \%$. Der Variationskoeffizient unter Zwischenbedingungen ergibt sich bei einer mittleren Abwitterung von 1.000 g/m^2 zu $18,2 \%$. Folglich liegt bei einer mittleren aufsummierten Abwitterung von 1.000 g/m^2 der Variationskoeffizient unter Vergleichbedingungen bei $25,9 \%$. Berücksichtigt man den Einfluss der Materialstreuung, kann beim modifizierten CDF-Verfahren (XF2) von einer guten Präzision unter Vergleichbedingungen ausgegangen werden.

Die erhöhte Wiederholpräzision des Ringversuchs kann nach SETZER [59] auf spezielle Probleme eines jeden Ringversuches zurückgeführt werden.

Betrachtet man die mittlere aufsummierte Abwitterung des Betons RV02 („CEM II/A-LL 32,5 R/0,50“), so liegt diese nach 14 Frost-Tau-Wechseln oberhalb des in Kapitel 6.2 empfohlenen Abnahmekriteriums von 1.000 g/m^2 für die untersuchten Betone, die bis auf die Anforder-

	Wiederholpräzision		Präzision unter ZB (M = 1)		Präzision unter ZB (M = 3)	
	σ	v	σ	v	σ	v
1	2	3	4	5	6	7
Funktionale Beziehung	$\sigma_r = 0,512 \text{ s}^{0,852}$	$v_r = 0,512 \text{ s}^{-0,148}$	$\sigma_z = 1,603 \text{ s}^{0,685}$	$v_z = 1,603 \text{ s}^{-0,315}$	$\sigma_R = 1,584 \text{ s}^{0,738}$	$v_R = 1,584 \text{ s}^{-0,262}$

Tab. 22: Präzisionsdaten für das modifizierte CDF-Verfahren (XF2) nach DIN ISO 5725, Ringversuch

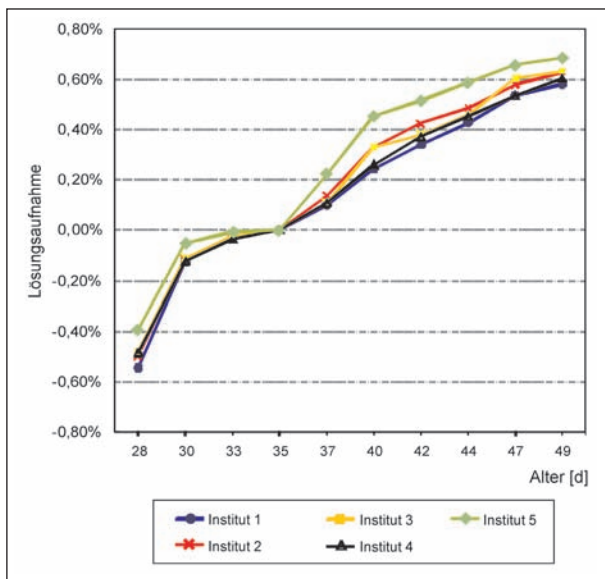


Bild 24: Massebezogene Lösungsaufnahme des Betons RV01 („CEM I 32,5 R/0,50“) in Abhängigkeit vom Alter der Betonprobekörper geprüft an fünf verschiedenen Instituten zum selben Zeitpunkt

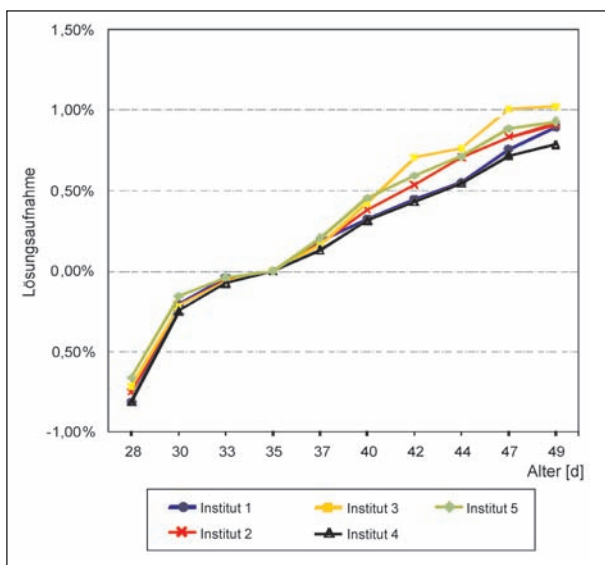


Bild 25: Massebezogene Lösungsaufnahme des Betons RV02 („CEM II A-LL 32,5 R/0,50“) in Abhängigkeit vom Alter der Betonprobekörper geprüft an fünf verschiedenen Instituten zum selben Zeitpunkt

rungen an die Mindestdruckfestigkeitsklasse normkonform sind. In Absprache mit dem Auftraggeber flossen die Ergebnisse des Ringversuchs nicht in die Empfehlung eines Abnahmekriteriums mit ein.

Die Lösungsaufnahme der Betone, die im Rahmen des Ringversuchs geprüft wurden, ist in den Bildern 24 bis 26 dargestellt. Auch hier bestätigt sich die gute Vergleichbarkeit der Prüfung an mehreren Instituten. Hierbei war beim Beton RV03 („CEM II/A-LL 32,5 R/0,60“) aufgrund der starken Schädigung ab dem 14. Frost-Tau-Wechsel (Probekörperalter von 42 d) die Dichtheit der seitlichen Abdichtung nicht mehr gewährleistet (vgl. auch Bild 27).

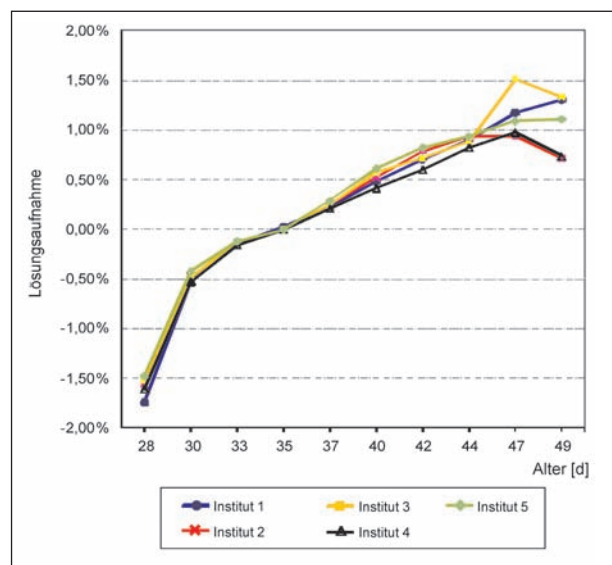


Bild 26: Massebezogene Lösungsaufnahme des Betons RV03 („CEM II A-LL 32,5 R/0,60“) in Abhängigkeit vom Alter der Betonprobekörper geprüft an fünf verschiedenen Instituten zum selben Zeitpunkt



Bild 27: Oberfläche eines Probekörpers des Betons RV03 („CEM II A-LL 32,5 R/0,60“) vor (links) sowie nach 14 (Mitte) und 28 (rechts) Frost-Tau-Wechseln geprüft am Institut des Auftraggebers

8 Validierung des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2)

8.1 Charakterisierung des Prüfverfahrens

Für die Charakterisierung eines Prüfverfahrens kommen verschiedene Methoden zur Anwendung. Eine Möglichkeit ist die systematische Untersuchung und Festlegung der Einflussgrößen auf das Prüfergebnis. Dies wurde insbesondere für das CDF-Verfahren für die Expositionsklasse XF4 in Arbeiten von SETZER et al. [1, 24, 54] betrieben und kann auf das modifizierte CDF-Verfahren (XF2) übertragen werden. Für Letzteres wurde in [55] weitere Untersuchungen durchgeführt, die u. a. den Einfluss der Vorlagerung und des Prüfmediums herausarbeiteten. In diesem Forschungsvorhaben wurden zudem die Präzisionsdaten nach DIN ISO 5725 bestimmt. Unter Berücksichtigung der Materialstreuung liefert das modifizierte CDF-Verfahren (XF2) reproduzierbare und präzise Ergebnisse (vgl. Kapitel 7). Hierzu ist die Einhaltung der Prüfvorschrift wichtig. So hat neben der Probennachbehandlung, der Dauer der Vorsättigung und der Art des Prüfmediums insbesondere die Minimaltemperatur einen entscheidenden Einfluss auf das Prüfverfahren [55].

8.2 Vergleich mit Qualitätsanforderungen

Bereits 1955 wurde in der Qualitätskontrolle eine statistische Betrachtung eingeführt. Unter der Annahme, dass in einem Festigkeitsbereich von 25 bis 60 N/mm² die Standardabweichung der Wiederholpräzision konstant ist, kann bei der Festigkeitsprüfung allgemein von einer mittleren Standardabweichung von 4,5 N/mm² ausgegangen werden. Dieser Wert wurde vielfach bestätigt [23, 49]. Rein rechnerisch ergibt sich damit für die Druckfestigkeitsprüfung eine Prüfstreuung von 7,5 % bis 18 %. RÜSCH et al. ermittelten für den Variationskoeffizient der Betondruckfestigkeit von Normalbetonen einen Bereich zwischen 6 und 14 % [66]. Für das modifizierte CDF-Verfahren (XF2) ergibt sich eine Wiederholpräzision von knapp 14 % bei einer mittleren Abwitterung von 1.000 g/m². Die Präzision des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2) liegt damit in derselben Größenordnung wie die Präzision der Druckfestigkeitsprüfung.

8.3 Nachweis der Erfüllung

Der Nachweis der Erfüllung lässt eine Aussage über die Praxistauglichkeit eines Prüfverfahrens zu. Durch Auslagerungsversuche in den Expositionsclassen XF2 und XF4 wurde in [55] bereits der Nachweis der Erfüllung erbracht. An den Standorten Meschede im Sauerland und Farchant bei Garmisch-Partenkirchen wurden Betone verschiedener Zusammensetzung für drei (Meschede) bzw. vier Winter (Farchant) ausgelagert [55]. Bei beiden Auslagerungsorten wurden ca. 20 Frosttage mit Niederschlag ermittelt [55]. Die Temperaturunterschiede an Frosttagen mit Niederschlag lagen in Farchant mit 11,4 K um 4,3 K höher als in Meschede. Die Frostbeanspruchung in Farchant kann nach [55] als extrem eingestuft werden, während sie in Meschede als durchschnittlich zu bewerten ist.

Die Untersuchungen in [55] bestätigten, dass normkonforme Betone nach einer vierjährigen Auslagerung in der Praxis keine Schädigungen zeigten. In der Expositionsklasse XF2 wies am Auslagerungsort Meschede lediglich der Beton mit Portlandhüttenzement und einem w/z-Wert von 0,60 deutliche Abplatzungen an der Oberfläche nach zwei Wintern auf. Nach drei Wintern wies zudem der Beton mit Portlandzement und einem w/z-Wert von 0,70 Abwitterungen an der Oberfläche auf.

Aus den Untersuchungen in [55] kann gefolgert werden, dass normkonform hergestellte Betone mit Portlandzement auch mit kleinen Änderungen in der Zusammensetzung Frost-Tausalz-beständig sind. So zeigten sich hier erst bei w/z-Werten von 0,70 Schädigungen in der Praxis. Bei normkonform hergestellten Betonen mit Portlandhütten- und Hochofenzementen führen geringe Änderungen der Zusammensetzung zu deutlich niedrigeren Frost-Tausalz-Widerständen. So zeigten Betone mit Portlandhütten- und Hochofenzement und einem w/z-Wert von 0,60 bereits nach einem bzw. zwei Wintern Abplatzungen an der Oberfläche. In Farchant nahmen die Abwitterungen über mehrere Winter hinweg deutlich zu. Folglich reagieren Betone mit Portlandhütten- und Hochofenzement auf eine Erhöhung des w/z-Wertes und damit eine Erhöhung an kapillaraktiven Poren im Gefüge empfindlicher als Betone mit reinem Portlandzement.

Vor der Auslagerung wurden zudem Betone identischer Zusammensetzung in [55] mit dem modifi-

zierten CDF-Verfahren (XF2) geprüft. In Tabelle 23 sind die mittleren aufsummierten Abwitterungen vier ausgewählter Betone nach 14 Frost-Tau-Wechseln, die in [55] sowie im Rahmen dieses Forschungsvorhabens mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) geprüft wurden, den Ergebnissen der Praxisauslagerung gegenübergestellt. Die in Tabelle 23 dargestellten Betone besitzen eine ähnliche Zusammensetzung. Die verwendeten Sieblinien sowie die Charge der Gesteinskörnungen der Untersuchungen in [55] wichen von den Untersuchungen in diesem Forschungsvorhaben ab. Die Betone unterschieden sich in ihrem Mischregime bei der Herstellung. Zudem stammten die Zemente dieses Forschungsvorhabens aus anderen Herstellwerken als die in [55] verwendeten Zemente.

Der Schädigungskategorie „0“ wurden Betonoberflächen zugeordnet, die keine Schädigungen zeigten. Die Schädigungsklasse „1“ umfasste Betonoberflächen, die einzelne frei liegende Gesteinskörnungen aufwiesen. Die genaue Beschreibung der Schadenskategorien ist [55] zu entnehmen. Betone, die in der Prüfung mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) eine mittlere aufsummierte Abwitterung nach 14 Frost-Tau-Wechseln $< 1.500 \text{ g/m}^2$ besaßen, wiesen demnach in der Praxis nach drei bzw. vier Wintern keine Schäden auf. Der Beton mit 320 kg/m^3 CEM II/A-LL 32,5 R und einem w/z-Wert von 0,50 zeigte bei den Auslagerungsversuchen ebenfalls keine Schäden. In der Laborprüfung am cbm (vgl. Abschnitt 7.4.2) wies der Beton mit ähnli-

cher Zusammensetzung hingegen eine mittlere aufsummierte Abwitterung von 1.730 g/m^2 nach 14 Frost-Tau-Wechseln auf, während er in den Untersuchungen zum Abnahmekriterium am cbm (vgl. Abschnitt 6.2.2) deutlich geringere Abwitterungen zeigte. Die Unterschiede in den Frischbetonkennwerten waren marginal, sodass eine Ursache für die unterschiedlichen gemessenen Abwitterungsmengen hier nicht gefunden wurde. Die Prüfung des Ringversuches selbst unterschied sich von den beiden anderen Prüfungen in den folgenden Punkten:

Die 3%ige NaCl-Lösung wurde beim Ringversuch mit demineralisiertem Wasser hergestellt, während bei den Untersuchungen zum Abnahmekriterium Leitungswasser anstelle des demineralisierten Wassers verwendet wurde. Anstelle von Stahlschalungen wurden beim Ringversuch Kunststoffschalungen bei der Herstellung verwendet. Das Volumen der Mischung lag deutlich über dem Mischungsvolumen der anderen Betone. Während der 21-tägigen Trocknungsphase waren die Probekörper des Ringversuchs für eine Dauer von drei Tagen in Folie eingepackt.

Nach aktuellem Stand der Kenntnis kann keinem dieser Unterschiede die Ursache vollständig zugeschrieben werden. Aufgrund dieser Ergebnisse wird allerdings empfohlen, bei der Herstellung von Proben für die Prüfung mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) Stahlschalungen zu verwenden.

Betonzusammensetzung: xx kg/m ³ Zement/Zement- art/w/z-Wert	Schadens- kategorie nach vier Wintern nach [55]	Mittlere Abwitterung nach 14 FTW nach [55] ¹⁾	Mittlere Abwitterung nach 14 FTW aus den Unter- suchungen zur Eingrenzung eines Bereiches für ein Ab- nahmekriterium (Abschnitt 6.2.2)	Mittlere Abwitterung nach 14 FTW aus dem Ringversuch geprüft am cbm (Abschnitt 7.4.2)
[-]	[-]	[g/m ²]	[g/m ²]	[g/m ²]
1	2	3	4	5
320/ CEM I 32,5 R/0,50	0	ca. 530	271	76
320/ CEM I 32,5 R/0,60	0	ca. 1.150	1.493	n. b.
320/ CEM II/A-LL 32,5 R/0,50	0	ca. 850	921	1.730
320/CEM II/A-LL 32,5 R/0,60	1 ²⁾ bzw. 3 ³⁾	ca. 1.800	1.872	2.788

n. b. nicht bestimmt
¹⁾ die Abwitterung wurde nur nach 12 und 16 Frost-Tau-Wechseln bestimmt, sodass der Tabellenwert einen interpolierten, gerundeten Wert wiedergibt
²⁾ Schadenskategorie, die am Auslagerungsstandort Meschede nach drei Wintern ermittelt wurde
³⁾ Schadenskategorie, die nach 4 Wintern am Auslagerungsort Farchant ermittelt wurde

Tab. 23: Gegenüberstellung der Praxisuntersuchungen aus [55] mit im Labor mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2) gemessenen mittleren Abwitterungen

9 Zusammenfassung und Ausblick

Für Betone, die den Anforderungen der Expositions-kategorie XF2 (mäßige Wassersättigung) nach DIN EN 206-1 genügen sollen, gibt es derzeit noch kein anerkanntes Laborprüfverfahren, mit dem die Eignung des Frost-Tausalz-Widerstands nachgewiesen werden kann. Hierbei beschreibt die Expositions-kategorie XF2 Umgebungsbedingungen, bei denen der Baustoff weniger häufig einem Frost-Tausalz-Angriff bei gleichzeitigem Wasserangebot ausgesetzt ist, als dies bei der Expositions-kategorie XF4 („hohe Wassersättigung mit Tausalz“) der Fall ist. Dies trifft in der Regel auf alle Bauteile im Sprühnebel- und Spritzwasserbereich von Meerwasser oder tausalzbehandelten Verkehrsflächen zu, bei denen anstehendes Wasser abfließen kann.

Bekannte Laborprüfverfahren wie das Würfelprüfverfahren oder das CDF-Verfahren prüfen bei hoher Sättigung. Sie bilden eine deutlich schärfere Frost- und Frost-Tausalz-Beanspruchung ab, als sie Betone im Bereich XF2 in der Praxis erfahren. Die Bewertung von XF4-Betonen erfolgt beim CDF-Verfahren nach 28 Frost-Tau-Wechseln. Für XF2-Betone ist eine Schädigung bereits zu einem früheren Zeitpunkt möglich, da hier durch das Fehlen eines künstlichen Mikroluftporengefüges eine im Vergleich zu XF4-Betonen schnellere Schädigung eintreten kann.

Ziel des Forschungsvorhabens war die Validierung eines Laborprüfverfahrens, das einen abgeschwächten Frost-Tausalz-Angriff gemäß XF2-Exposition erzeugt und eine Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstandes bei mäßiger Sättigung zulässt.

Da eine Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstands über ein Laborprüfverfahren nur dann möglich ist, wenn ein an der Praxis orientierter Grenzwert vorliegt, wurde auf Basis der Prüfung von 17 verschiedenen Betonrezepturen eine Empfehlung für ein Abnahmekriterium gegeben. Es wurden Betone untersucht, für die aus Erfahrungen sowie den derzeit gültigen Normen der Frost-Tausalz-Widerstand hinreichend genau abgeschätzt werden konnte. Die Untersuchungen zeigten, dass alle Betone, die den Anforderungen der aktuellen Normen für die Expositions-kategorie XF2 genügen, nach 14 Frost-Tau-Wechseln eine mittlere aufsummierte Abwitterung unterhalb 1.000 g/m^2 aufwiesen. Die Untersuchun-

gen bestätigten zudem, dass eine Verlängerung der Prüfdauer auf 28 Frost-Tau-Wechsel keine zusätzlichen Erkenntnisse liefert. Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen wurde für Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen ein Abnahmekriterium von 1.000 g/m^2 mittlerer aufsummierter Abwitterung nach 14 Frost-Tau-Wechseln vorgeschlagen. Dieses Abnahmekriterium gilt nur für die untersuchten Betone, die bis auf die Anforderungen an die Mindestdruckfestigkeitsklasse normkonform sind.

Um die Prüfstreuung des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2) zu beurteilen und damit die Qualität des Prüfverfahrens abschätzen zu können, wurden in diesem Forschungsvorhaben Untersuchungen zur Ermittlung der Präzision in Anlehnung an DIN ISO 5725 durchgeführt.

Die Wiederholpräzision, also das Minimum der Streuung, lag mit einem Variationskoeffizienten von 13,3 % bei einer mittleren aufsummierten Abwitterung von 1.500 g/m^2 leicht über der Wiederholpräzision, die für das bereits bekannte CDF-Verfahren ermittelt wurde. Bei einer mittleren aufsummierten Abwitterung von 1.000 g/m^2 beträgt der Variationskoeffizient 13,9 %. Gemäß DIN ISO 5725 konnte zwischen der Standardabweichung und dem arithmetischen Mittelwert der Abwitterung ein funktionaler Zusammenhang gefunden werden. Die Trennschärfe nahm mit steigender Abwitterung zu.

Durch die Ermittlung der Präzisionsmaße unter Zwischenbedingungen wird die Eignung eines Prüfverfahrens quantifiziert, Ermittlungsergebnisse unter festgelegten Bedingungen zu wiederholen. So werden in der Praxis in der Regel die Parameter Betoncharge (Zeit), Bearbeiter und Prüfgerät (Klimatruhe) variiert. Die in diesem Forschungsvorhaben durchgeführten Untersuchungen unter Zwischenbedingungen zeigten mit einem Variationskoeffizienten von 17 % bei einer mittleren aufsummierten Abwitterung von 1.500 g/m^2 eine verhältnismäßig geringe Streuung der Prüfergebnisse. Die Streuung unter Zwischenbedingungen lag in etwa in der Größenordnung der Wiederholstreuung. Hieraus kann geschlossen werden, dass der Einfluss der Parameter Zeit, Bearbeiter und Prüfgerät keinen signifikanten Einfluss auf das Prüfergebnis hat.

Die Vergleichpräzision wurde anhand eines Ringversuchs ermittelt. An dem Ringversuch beteiligten

sich fünf deutsche Institute. Untersucht wurden drei verschiedene Betone, für die ein hoher, ein mittlerer sowie ein geringer Frost-Tausalz-Widerstand erwartet wurde. Dieses Ergebnis konnte von allen Instituten bestätigt werden. Auch wurde in allen Instituten der für den jeweiligen Beton typische Verlauf der mittleren aufsummierten Abwitterung ermittelt. Zwischen dem Variationskoeffizienten bzw. der Standardabweichung und dem arithmetischen Mittelwert der Abwitterung konnte gemäß DIN ISO 5725 ein funktionaler Zusammenhang gefunden werden. Die Untersuchungen zur Ermittlung der Präzision unter Vergleichbedingungen ergaben einen Variationskoeffizienten unter Vergleichbedingungen von 23 % bei einer mittleren Abwitterung von 1.500 g/m². Dieser liegt damit leicht über dem für das bekannte CDF-Verfahren bestimmten Variationskoeffizienten von 18 % bei einer mittleren Abwitterung von 1.500 g/m². Bei einer mittleren Abwitterung von 1.000 g/m² wurde ein Variationskoeffizient unter Vergleichbedingungen von 26 % ermittelt.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die Präzision des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2) in der Größenordnung anderer etablierter Festbetonprüfungen liegt (z. B. der Druckfestigkeitsprüfung). Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens belegen, dass das modifizierte CDF-Verfahren (XF2) reproduzierbare und präzise Ergebnisse liefert.

Literatur

- [1] AUBERG, R.: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton mit dem CDF- und CIF-Test. Dissertation im Fachbereich Bauwesen der Universität Essen. Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft Heft 6, ISBN 3-8265-4716-0, Shaker Verlag Aachen, 1998
- [2] Bundesanstalt für Wasserbau: BAW-Merkblatt „Frostprüfung“. Stand: Dezember 2004
- [3] BREIT, W.; SIEBEL, E.: Final standard methods for testing the resistance of concrete to freezing and thawing, report be-tb-1489-4/1998, 1998
- [4] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 560: Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse (Sachstandbericht), Berlin Beuth Verlag, 2003
- [5] DAR/ATF 27/96, Validierung im Prüfwesen; <http://www.dar.bam.de/pdf/027atf96.pdf>
- [6] DIN 1045-2: 2008-08: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1; Beuth Verlag; Berlin, 2008
- [7] DIN EN 480-11:2005-03: Zusatzmittel für Beton, Mörtel und Einpressmörtel – Prüfverfahren – Teil 11: Bestimmung von Luftporenkennwerten in Festbeton; Deutsche Fassung EN 480-11:2005; Beuth Verlag; Berlin, 2003
- [8] DIN EN 12350-4:2000-06: Prüfung von Frischbeton – Teil 4: Verdichtungsmaß, Deutsche Fassung EN 12350-5:1999, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2000
- [9] DIN EN 12350-5:2000-06: Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß, Deutsche Fassung EN 12350-5:1999, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2000
- [10] DIN EN 12350-6:2000-06: Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohddichte, Deutsche Fassung EN 12350-6:1999, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2000
- [11] DIN EN 12350-7:2000-11: Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Luftporengehalte, Druckverfahren, Deutsche Fassung EN 12350-7:2000, Beuth Verlag GmbH, Berlin 2000
- [12] DIN EN 12390-2:2001-06: Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfung, Deutsche Fassung EN 12390-2:2000, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2001
- [13] DIN EN 12390-3:2002-04: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern, Deutsche Fassung EN 12390-3:2001, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2001
- [14] DIN EN 12390-9: 2002-05: Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalzwiderstand, Abwitterung, Deutsche Fassung prEN 12390-9:2002, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2002
- [15] DIN EN 12620:2002 + A1:2008: Gesteinskörnungen für Beton, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2008

- [16] DIN EN 1367-2:2007-09: Prüfverfahren für thermische Eigenschaften und Verwitterungsbeständigkeit von Gesteinskörnungen – Teil 2: Magnesiumsulfat-Verfahren, Deutsche Fassung prEN 1367-2:2007 Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2007
- [17] DIN-Fachbericht 100: Beton – Zusammenstellung von DIN EN 206-1 und DIN 1045-2, Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2001
- [18] DIN ISO 5725: Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen, Deutsche Norm, Nov. 1997
- [19] DIN EN ISO/IEC 17025: Allgemeine Anforderungen an die Kompetenz von Prüf- und Kalibrierlaboratorien (ISO/IEC 17025:2005), deutsche und englische Fassung EN ISO/IEC 17025:2005
- [20] DOMBROWSKI, K.: Einfluss von Gesteinskörnungen auf die Dauerhaftigkeit von Beton. Dissertation an der Fakultät Bauingenieurwesen der Bauhaus-Universität Weimar, 2003
- [21] FAGERLUND, G.: The influence of slag cement on the frost-resistance of the hardened concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, 1982
- [22] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Merkblatt über die statistische Auswertung von Prüfergebnissen, Ausgabe 2000
- [23] GAST, R., HEIDRICH, G.: Statistische Auswertung der von der Landesgewerbeanstalt Bayern in Nürnberg ermittelten Ergebnisse der Betondruckfestigkeits-Güteprüfung der Jahre 1979/1980, Kurzberichte der Bauforschung 8/84, S. 639-647
- [24] HARTMANN, V.: Optimierung und Kalibrierung der Frost-Tausalz-Prüfung von Beton, Dissertation an der Universität Essen, 1992
- [25] HEINE, P.: Gesteinskörnung im Beton unter Frost-Tau-Belastung – Auswirkungen auf Prüfung und Anwendung, Dissertation an der Universität Duisburg-Essen, 2004
- [26] http://www.beuth.de/sixcms_upload/media/2359/lmbg35_mai_2003.pdf
- [27] <http://www.dar.bam.de/pdf/027atf96.pdf>, in der Fassung vom 29.05.2009
- [28] <http://www.ndt.net/article/dgzfp/pdf/zfp114-Taffe.pdf>, in der Fassung vom 13.05.2009
- [29] <http://www.swm.de/de/produkte/mwasser/wassertipps.html>, in der Fassung vom 25.05.2009
- [30] <http://www.seco.admin.ch/sas/bau/00113/index.html?lang=en> in der Fassung vom 13.08.2009
- [31] <http://www.sika.at/upload/doc/doc1898.PDF>, in der Fassung von 17.05.2009
- [32] http://www.uni-due.de/ibpm/Projekte/CDF_deutsch.pdf, in der Fassung vom 13.04.2008
- [33] KRELL, J., WISCHERS, G.: Einfluss der Feinstoffe im Beton auf Konsistenz, Festigkeit und Dauerhaftigkeit. Beton Nr. 9, 1988, S. 356-404
- [34] KREYSZIG, E.: Statistische Methoden und ihre Anwendungen, Vandenhoeck & Ruprecht, Göttingen, 1974
- [35] LITVAN, G. G.: Frost action in cement paste. Materials and Structures Vol. 6 (1973), S. 276-282
- [36] LITVAN, G. G.: Phase transitions of adsorbates. VI: Mechanism of frost action in hardened cement paste. Journal of the Amer. Ceram. Soc. Vol. 55 (1972), S. 38-42
- [37] Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ (BAW-Merkblatt „Frostprüfung“) Dezember 2004, Bundesanstalt für Wasserbau, Eigenverlag, Karlsruhe, Hamburg, Ilmenau 2004
- [38] Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton, Ausgabe 2004, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe Betonstraßen, Eigenverlag, Köln 2004
- [39] MÜLLER, C.: Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen im Betonbau – Nachhaltige Lösungen für das Bauen mit Beton, Beton- und Stahlbetonbau 104 (2009), Heft 2, 1991, S. 105-112
- [40] ÖNORM B 3303: Betonprüfung, Österreichisches Normungsinstitut (ON), BA – 1020 Wien, 2002-09-01

- [41] Richtlinie für die Erteilung von Zulassungen für anorganische Betonzusatzstoffe (Zusatzrichtlinie), Mitteilungen Deutsches Institut für Bautechnik 24, 1993
- [42] PLÄHN, J., GOLZ, W.: Vergleichsuntersuchungen an vier Prüfverfahren für den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton, Straße und Autobahn (Heft 1/84), 1984
- [43] PLANK, J.: Unterlagen zur Vorlesung Bauchemie, TU München, 2005
- [44] PODVALNYI, A. M.: Phenomenological aspect of concrete durability theory. *Materials and Structures* Vol. 9 (1976), S. 151-162
- [45] POWERS, T. C.: A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. *ACI Journal* Vol. 41 (1945), S. 245-272
- [46] POWERS, T. C.: Resistance of concrete to frost at early ages. *Proceedings RILEM Symp. Winter Concreting, Session C*, S. 1-47
- [47] POWERS, T. C.: Basic considerations pertaining to freezing and thawing tests. *ASTM Proceedings* Vol. 55 (1955), S. 1132-1155
- [48] RÜSCH, H., SELL, R., RACKWITZ, R.: Statistische Analyse der Betonfestigkeit, Heft 206, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Wilhelm Ernst & Sohn Verlag, Berlin 1969
- [49] SCHICKERT, G., RACKWITZ, R.: Statistische Untersuchungen zum Qualitätsangebot bei Beton. *Beton* Heft 7/77, S. 277-281
- [50] SCHIEßL, P., BRANDES, C.: Alterungseinfluss auf den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton unterschiedlicher Zusammensetzung (V 405), Forschungsbericht Schlusssentwurf, 2004
- [51] SCHIEßL, P., SKARABIS, J.: Oberflächendauerhaftigkeit von Straßenbeton mit Flugasche, VGB-Fachtagung am 10.04.2008
- [52] SCHIEßL, P., WIEGRING, K., BRANDES, C.: Streuung der Ergebnisse von Frost- und Frost-Tausalzprüfverfahren (Literaturauswertung), Forschungsbericht F2013/99, 2002
- [53] SETZER, M. J.: Grundlagen zu Frost-Tau-Prüfverfahren – Oberflächenabwitterung und innere Schädigung
- [54] SETZER, M. J., AUBERG R.: Nachweis der Präzisionsmaße „Vergleich- und Wiederholstreuung“ von Frost- und Frost-Tausalz-Prüfverfahren durch Europäische Ringversuche, *Wiss. Z. Hochschule Architektur Bauwesen – Weimar*, 1994, S. 143-149
- [55] SETZER, M. J., SCHIEß, L. P., PALECKI, S., BRANDES, C., KECK, H. J.: Entwicklung eines Prüfverfahrens nach dem Performance Concept für Betone in der Expositionsklasse XF2, Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 56, 2007
- [56] SETZER, M. J., AUBERG, R.: CIF-Test – Prüfverfahren des Frostwiderstands von Beton. *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, 64 (4/1998), 94-105
- [57] SETZER, M. J., AUBERG R.: Frost-Tausalz-Widerstand von Betonpflastersteinen, Universität – Gesamthochschule Essen, Forschungsbericht aus dem Fachbereich Bauwesen, August 1994
- [58] SETZER, M. J., JANSSEN, D. J., FAGERLUND, G.: RILEM TC 117 FDC: CDF Test – Test method for the freeze-thaw resistance of concrete – tests with sodium chloride solution (CDF). *RILEM Recommendation TC117-FDC: Freeze-thaw and de-icing resistance of concrete. Materials and Structures* Vol. 29 (1996) 523-528
- [59] SETZER, M. J., AUBERG, R. HARTMANN, V.: Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Transportbeton, Forschungsbericht aus dem Fachbereich Bauwesen, Universität Duisburg-Essen, Heft 62, 1994
- [60] SETZER, M. J., HARTMANN, V.: CDF-Test – Prüfvorschrift. *Betonwerk + Fertigteil-Technik*, 57 (9/1991), 83-86
- [61] SETZER, M. J.: Die Mikroislinsepumpe – Eine neue Sicht bei Frostangriff und Frostprüfung. *ibausil – 15. Intern. Baustofftagung, Weimar 2003*. S. 2-1321 bis 2-1338. Bauhaus Universität Weimar (2003)
- [62] SETZER, M. J.: Statistische Auswertung eines Ringversuches mit dem CIF- und CDF-Test, Essen, 2005
- [63] SIEBEL et al.: Sachstandsbericht „Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxis-

- verhältnisse“; Deutscher Ausschuss für Stahlbeton Heft 560, ISBN 3-410-56760-6, Beuth Verlag, Berlin, 2005
- [64] SIEBEL, E.: Ringversuch zum Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton (Prüfbericht Nr. B 1429), Düsseldorf 1992
- [65] SIEBEL, E., BREIT W.: Ergebnisse eines Europäischen Ringversuches, Sonderdruck aus Betonwerk und Fertigteiltechnik 11, 1999
- [66] SIEBEL, E., BREIT, W.: Final Report Be-TB-1489-4/1998, Standard Methods for Testing the Resistance of Concrete to Freezing and Thawing, Düsseldorf, 1998
- [67] SPRINGENSCHMID, R.: Grundlagen und Praxis der Herstellung und Überwachung von Luftporenbeton. Zement und Beton 47 (1969) H. 1, S. 19-25
- [68] STARK, J., LUDWIG, H.-M.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton – ein rein physikalisches Problem? Wissenschaftliche Zeitung der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar 40 (1994), S. 95-104
- [69] TAUSCHER, F.: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen – Beanspruchung, Beurteilung und Betonqualität, Bundesanstalt für Straßenwesen, Heft B 70, 2009
- [70] WEIGLER, H., KARL, S.: Beton. Arten – Herstellung – Eigenschaften. Ernst & Sohn Verlag, Berlin, S. 462-463
- [71] ZTV Beton – StB 01: Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für den Bau von Fahrbahndecken aus Beton, Ausgabe 2001, FGSV Verlag GmbH, Köln 2001
- [72] ZTV-ING: Zusätzliche technische Vertragsbedingungen und Ingenieurbauten: Teil 3: Massivbau, Verkehrsblatt-Verlag Borgmann GmbH & Co KG, Dortmund 2009

Schriftenreihe

Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen

Unterreihe „Brücken- und Ingenieurbau“

2001

- B 28: Erfassung und Bewertung von reaktionsharzgebundenen Dünnebelägen auf Stahl
Eilers € 11,00
- B 29: Ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung der Karbonatisierungstiefe und des Chloridgehaltes von Beton
Gatz, Quaas € 12,00
- B 30: Materialkonzepte, Herstellungs- und Prüfverfahren für elutionsarme Spritzbetone
Heimbecher € 11,00
- B 31: Verträglichkeit von reaktionsharzgebundenen Dünnebelägen mit Abdichtungssystemen nach den ZTV-BEL-ST
Eilers, Stoll € 10,50
- B 32: Das Programm ISOCORRAG: Ermittlung von Korrosivitätskategorien aus Massenverlusten
Schröder € 11,50
- B 33: Bewährung von Belägen auf Stahlbrücken mit orthotropen Fahrbahnplatten
Eilers, Sczyslo € 17,00
- B 34: Neue reaktionsharzgebundene Dünnebeläge als Fahrbahnbeläge auf einem D-Brücken-Gerät
Eilers, Ritter € 13,00

2002

- B 35: Bewährung 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 Wespennest
€ 11,50
- B 41: Temperaturmessung an der Unterseite orthotroper Fahrbahnplatten beim Einbau der Gussasphalt-Schutzschicht
Eilers, Kühler, Quaas € 12,50
- B 42: Anwendung des Teilsicherheitskonzeptes im Tunnelbau
Städig, 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
Hemmer-Halswick, Ullrich € 12,50

2004

- 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
Hemmer-Halswick € 13,00

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, Wiggerhauser € 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, Staack € 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, Lähler € 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 Expositionsklasse 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 - Bewährung
Schröder € 13,50

- B 61: **Untersuchung von Korrosion an Fußplatten von Schutzplankenpfosten**
Schröder, Staech € 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 Expositionsklasse XF4**
Brameshuber, 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.
Frieße, 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**
Wagener, Grossmann, Hintzke, Sieger € 18,50
- B 70: **Frost-Tausalz-Widerstand von Beton in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen**
Tauscher € 14,50

2010

- B 71: **Empfehlungen für geschweißte KK-Knoten im Straßenbrückenbau**
Kuhlmann, Euler € 22,50
- B 72: **Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von permanenten Anti-Graffiti-Systemen**
Weschpfennig, Kropf, von Witzzenhausen € 13,50
- B 73: **Brand- und Abplatzverhalten von Faserbeton in Straßentunneln**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Dehn, Nause, Juknat, Orgass, König € 21,00
- B 74: **Verwendung von Anti-Graffiti-Systemen auf Mauerwerk**
Müller € 14,00
- B 75: **Sachstand Verstärkungsverfahren – Verstärken von Betonbrücken im Bestand**
Schnellenbach-Held, Peeters, Scherbaum € 13,50

2011

- B 76: **Instandsetzung und Verstärkung von Stahlbrücken unter Berücksichtigung des Belagssystems**
Sedlacek, Paschen, Feldmann, Geßler, Möller, Steinauer, Scharnigg € 17,00
- B 77: **Anpassung von DIN-Fachberichten "Brücken" an Euro-codes**
Teil 1: DIN-FB 101 "Einwirkung auf Brücken"
Teil 2: DIN-FB 102 "Betonbrücken"
Teil 3: DIN-FB 103 "Stahlbrücken"

Teil 4: DIN-FB 104 "Verbundbrücken"

- Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Freundt, Böning, Maurer, Arnold, Gedwien, Müller, Schrick, Tappe, Kuhlmann, Rasche, Froschmeier, Euler, Hanswille, Brauer, Bergmann € 29,50
- B 78: **Bemessung von Wellstahlbauwerken – Vergleich nach den bisherigen und den neuen Richtlinien**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Kuhlmann, Günther, Krauss € 18,50
- B 79: **Untersuchungen zur Querkraftbemessung von Spannbe-tonbalken mit girlandenförmiger Spanngliedführung**
Dieser Bericht liegt nur in digitaler Form vor und kann kostenpflichtig unter www.nw-verlag.de heruntergeladen werden.
Maurer, Kiziltan, Zilch, Dunkelberg, Fitik (in Vorbereitung)
- B 80: **Lautsprecheranlagen und akustische Signalisierung in Straßentunneln**
Mayer, Reimann, Löwer, Brettschneider, Los € 16,00
- B 81: **Quantifizierung der Lebensdauer von Betonbrücken mit den Methoden der Systemanalyse**
Müller, Vogel, Neumann € 14,50
- B 82: **Verkehrslastmodelle für die Nachrechnung von Straßenbrücken im Bestand**
Freundt, Böning € 16,00
- B 83: **Konzeption zur Nachrechnung bestehender Straßenbrücken**
Maurer, Kolodziejczyk, Zilch, Dunkelberg € 16,00
- B 84: **Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)**
Gehlen, Lowke, Milachowski € 15,00

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.

Anhänge

- A1 Zusätzliche Tabellen
- A2: Statistische Auswertung nach ISO 5725
- A3: Empfehlungen für die Prüfung des
Frost-Tausalz-Widerstandes von Betonen
in der Expositionsklasse XF2

A1 Zusätzliche Tabellen

Tabelle A1: Eigenschaften der verwendeten Zemente

Eigenschaft	Einheit	CEM I 32,5 R	CEM I 42,5 N	CEM II/A-LL 32,5 R	CEM II/B-S 32,5 R	CEM III/A 42,5 N
1	2	3	4	5	6	7
physikalische Eigenschaften						
Dichte	g/cm ³	3,14	3,08	3,02	3,14	3,04
spezifische Oberfläche	cm ² /g	3050	3600	3050	3100	4050
chemische Analyse						
Glühverlust	M.-%	2,53	2,08	7,29	2,56	1,69
CO ₂ -Gehalt	M.-%	2,54	2,14	7,28	2,22	1,02
Na ₂ O-Äqu.	M.-%	0,86	0,70	0,43	0,75	0,77
Cl-Gehalt	M.-%	0,08	0,01	0,06	0,06	0,06
SO ₃ -Gehalt	M.-%	2,63	2,70	3,01	2,33	2,84

Tabelle A2: Zusammenstellung ermittelten Magnesiumsulfat-Widerstände (MS-Wert), der Frost-Tausalz-Widerstände (FTS-Wert) und den Betonversuch-Widerstand (BV-Wert) in der Expositionsklasse XF2

Anwendungsgebiet	MS-Wert [M.-%]	FTS-Wert [M.-%]
	DIN EN 1367-2	DIN EN 1367-6
1	2	3
GK1	6,6	3,0
GK2	15,8	28,3
GK3	47,6	29,4

Tabelle A3: Zusammenstellung der Eigenschaften der verwendeten Steinkohlenflugasche

Eigenschaft	Luftporenbildner
1	2
Farbe	braun
Zugabeform	flüssig
Hauptwirkstoff	synthetische Tenside
Dichte bei 20 °C	1,01 ± 0,03 g/cm ³
pH-Wert	ca. 7
maximal zulässige Dosierung	0,8 M.-% bez. auf Zementgehalt

Tabelle A4: Materialspezifische Kennwerte der Steinkohlenflugasche SFA

Parameter		Einheit	SFA
1		2	3
Dichte		g/cm ³	2,508
Druckfestigkeit	28 d	N/mm ²	49,20
	90 d		62,10
Aktivitätsindex (Druckfestigkeit)	28 d	%	83,10
	90 d		95,10
Biegezugfestigkeit	28 d	N/mm ²	7,90
	90 d		9,10
Aktivitätsindex (Biegezugfestigkeit)	28 d	%	91,50
	90 d		105,40
Kornanteil ≤ 0,04 mm (Trocken)		M.-%	74,50
Kornanteil ≥ 0,045 mm (Nasssiebung)			23,50
Wasseranspruch		%	24,50

Tabelle A5: Hauptbestandteile der verwendeten Steinkohlenflugasche (SFA)

Prüfgröße		Einheit	SFA
1		2	3
Glühverlust bei 1000°C		M.-%	2,49
Gesamtschwefel	SO ₃		2,36
Chlorid	Cl ⁻		0,02
Freikalk	CaO _{frei}		1,43

Tabelle A6: Luftporenkennwerte

Beton	Luftporen- gehalt	Mikroluftporen- gehalt	Abstandsfaktor	Gesamtlänge der Messlinien
	A	A ₃₀₀	\bar{L}	l
	[Vol.-%]	[Vol.-%]	[mm]	[mm]
1	2	3	4	5
CEM II A-LL 32,5 R/0,60/LP	5,06	1,76	0,29	2405

Tabelle A7: Mittlere aufsummierte Abwitterungen der Betone für die Untersuchungen zum Abnahmekriterium

Beton	Abwitterung [g/m ²]					
	4 FTW	10 FTW	14 FTW	18 FTW	24 FTW	28 FTW
1	2	3	4	5	6	7
CEM I 32,5 R/0,50	46	119 _(8FTW)	271	376	431 _(20FTW)	602
CEM I 32,5 R/0,55	54	364	687	1006	1452	1757
CEM I 32,5 R/0,60	60 _(2FTW)	1194 _(12FTW)	1493	2055	2993	3853
CEM I 32,5 R/ 0,50/GK2	72	434 _(8FTW)	1532	2153	2735 _(22FTW)	3615
CEM I 32,5 R/ 0,50/GK3	19	39 _(8FTW)	79	127	191 _(22FTW)	290
CEM I 42,5 N/0,50	29	166 _(12FTW)	233	350	533	651
CEM I 42,5 N/0,60	47	442 _(12FTW)	611	904	1292	1535
CEM II A-LL 32,5 R/0,50	129	453	921	1262	1709	2645
CEM II A-LL 32,5 R/0,60	94	990 _(8FTW)	1872	3318	6901 _(22FTW)	8950
CEM II A-LL 32,5 R/0,60/LP	42	69 _(8FTW)	89	107	128 _(22FTW)	148
CEM II B-S 32,5 R/0,50	53	256	416	583	869 _(26FTW)	960
CEM II B-S 32,5 R/0,60	370	1057	1590	2052	2795 _(26FTW)	2791
CEM III/A 42,5 N/0,50	40	150	231	308	421	492
CEM III/A 42,5 N/0,55	90	439	678	798	1296 _(26FTW)	1421
CEM III/A 42,5 N/0,60	220	922	1371	1837	2626	3170
278 CEM I 32,5 R/ 106 SFA/0,50	63	335	613	888	1265	1586
278 CEM I 32,5 R/ 106 SFA/0,60	239	1274	1986	2630	3704	4602

Tabelle A8: Variationskoeffizienten der Betone für die Untersuchungen zum Abnahmekriterium

Beton	Variationskoeffizient [%]					
	4 FTW	10 FTW	14 FTW	18 FTW	24 FTW	28 FTW
1	2	3	4	5	6	7
CEM I 32,5 R/0,50	20	15 _(8FTW)	20	15	14 _(20FTW)	18
CEM I 32,5 R/0,55	15	13	10	8	7	6
CEM I 32,5 R/0,60	15 _(2FTW)	21 _(12FTW)	19	13	14	17
CEM I 32,5 R/ 0,50/GK2	17	8 _(8FTW)	7	5	5 _(22FTW)	6
CEM I 32,5 R/ 0,50/GK3	10	5 _(8FTW)	18	26	26 _(22FTW)	28
CEM I 42,5 N/0,50	28	10 _(12FTW)	8	12	20	22
CEM I 42,5 N/0,60	20	18 _(12FTW)	18	17	15	13
CEM II A-LL 32,5 R/ 0,50	32	30	16	16	21	31
CEM II A-LL32,5 R/ 0,60	28	17 _(8FTW)	16	10	12 _(22FTW)	10
CEM II A-LL32,5 R/ 0,60/LP	16	15 _(8FTW)	15	14	15 _(22FTW)	16
CEM II B-S32,5 R/ 0,50	22	30	31	31	27 _(26FTW)	27
CEM II B-S32,5 R/ 0,60	14	14	11	10	10 _(26FTW)	10
CEM III/A 42,5 N/0,50	27	28	25	22	21	20
CEM III/A 42,5 N/0,55	24	32	30	29	22 _(26FTW)	22
CEM III/A 42,5 N/0,60	29	24	20	16	13	10
278 CEM I 32,5 R/ 106	18	13	14	17	20	20
278 CEM I 32,5 R/ 106	11	6	5	4	4	6

Tabelle A9: Mittlere Abwitterungen der Betone für die Untersuchungen zur Ermittlung der Präzision unter Zwischenbedingungen (M=1, Zeit)

Beton	Abwitterung [g/m ²]					
	4 FTW	10 FTW	14 FTW	18 FTW	24 FTW	28 FTW
1	2	3	4	5	6	7
CEM I 32,5 R/0,50.1	46	119 _(8FTW)	271	376	431 _(20FTW)	602
CEM I 32,5 R/0,50.2	33	n.b.	360	584	n.b.	1041
CEM I 32,5 R/0,50.3	38	196	388	619	985	1188
CEM I 32,5 R/0,60.1	60 _(2FTW)	1194 _(12FTW)	1493	2055	2993	3853
CEM I 32,5 R/0,60.2	130	877	1465	1752 _(16 FTW)	2148	2904
CEM I 32,5 R/0,60.3	844 _(8FTW)	1135	1711	1996 _(16 FTW)	2999	4107

Tabelle A10: Variationskoeffizienten der Betone für die Untersuchungen zur Ermittlung der Präzision unter Zwischenbedingungen (M=1, Zeit)

Beton	Variationskoeffizient [%]					
	4 FTW	10 FTW	14 FTW	18 FTW	24 FTW	28 FTW
1	2	3	4	5	6	7
CEM I 32,5 R/0,50.1	20	15 _(8FTW)	20	15	14 _(20FTW)	18
CEM I 32,5 R/0,50.2	37	n.b.	28	30	n.b.	39
CEM I 32,5 R/0,50.3	56	51	40	31	27	24
CEM I 32,5 R/0,60.1	15 _(2FTW)	21 _(12FTW)	19	13	14	17
CEM I 32,5 R/0,60.2	20	30	29	29 _(16FTW)	22	18
CEM I 32,5 R/0,60.3	25 _(8FTW)	24	22	21 _(16 FTW)	20	20

Tabelle A11: Mittlere Abwitterungen der Betone für die Untersuchungen zur Ermittlung der Präzision unter Zwischenbedingungen

Beton	Abwitterung [g/m ²]					
	4 FTW	10 FTW	14 FTW	18 FTW	24 FTW	28 FTW
1	2	3	4	5	6	7
CEM I 32,5 R/0,50.L1.T1	46	119 _(8FTW)	271	376	431 _(20FTW)	602
CEM I 32,5 R/0,50.L1.T2	43	110 _(8FTW)	238	331	381 _(20FTW)	523
CEM I 32,5 R/0,50.L1.T3	33	86 _(8FTW)	214	329	384 _(20FTW)	544
CEM I 32,5 R/0,50.L2.T1	33	n.b.	360	584	n.b.	1041
CEM I 32,5 R/0,50.L2.T2	48	n.b.	407	590	n.b.	1004
CEM I 32,5 R/0,50.L2.T3	45	n.b.	406	648	n.b.	1127

n.b. nicht bestimmt

Tabelle A12: Variationskoeffizienten der Betone für die Untersuchungen zur Ermittlung der Präzision unter Zwischenbedingungen

Beton	Variationskoeffizient [%]					
	4 FTW	10 FTW	14 FTW	18 FTW	24 FTW	28 FTW
1	2	3	4	5	6	7
CEM I 32,5 R/0,50.L1.T1	20	15 _(8FTW)	20	15	14 _(20FTW)	18
CEM I 32,5 R/0,50.L1.T2	19	26 _(8FTW)	30	29	29 _(20FTW)	31
CEM I 32,5 R/0,50.L1.T3	5	14 _(8FTW)	12	14	15 _(20FTW)	18
CEM I 32,5 R/0,50.L2.T1	37	n.b.	28	30	n.b.	39
CEM I 32,5 R/0,50.L2.T2	6	n.b.	15	16	n.b.	18
CEM I 32,5 R/0,50.L2.T3	32	n.b.	44	40	n.b.	43

n.b. nicht bestimmt

Tabelle A13: Mittlere aufsummierte Abwitterungen der Serie RV01 („CEM I 32,5 R/0,50“) aus dem Ringversuch

Ergebnisse des jeweiligen Instituts	Abwitterung [g/m ²]					
	4 FTW	10 FTW	14 FTW	18 FTW	24 FTW	28 FTW
1	2	3	4	5	6	7
I 1	22	50	76	102	128	150
I 2	41	124	181	250	334	403
I 3	41	111	159	204	250	281
I 4	16	41	61	83	107	126
I 5	15	63	100	134	192	229

Tabelle A14: Variationskoeffizienten der Serie RV01 („CEM I 32,5 R/0,50“) aus dem Ringversuch

Ergebnisse des jeweiligen Instituts	Variationskoeffizient [%]					
	4 FTW	10 FTW	14 FTW	18 FTW	24 FTW	28 FTW
1	2	3	4	5	6	7
I 1	23	26	24	21	23	21
I 2	10	11	13	14	14	12
I 3	33	33	33	29	30	30
I 4	29	44	50	47	37	32
I 5	17	43	55	61	75	77

Tabelle A15: Mittlere aufsummierte Abwitterungen der Serie RV02 („CEM II/A-LL 32,5 R/0,50“) aus dem Ringversuch

Ergebnisse des jeweiligen Instituts	Abwitterung [g/m ²]					
	4 FTW	10 FTW	14 FTW	18 FTW	24 FTW	28 FTW
1	2	3	4	5	6	7
I 1	90	929	1730	2810	4874	7138
I 2	120	971	1777	3142	5833	8691
I 3	72	651	1150	1726	3020	4195
I 4	54	788	1504	2584	4648	6794
I 5	65	630	1201	2051	3306	4575

Tabelle A16: Variationskoeffizienten der Serie RV02 („CEM II/A-LL 32,5 R/0,50“) aus dem Ringversuch

Ergebnisse des jeweiligen Instituts	Variationskoeffizient [%]					
	4 FTW	10 FTW	14 FTW	18 FTW	24 FTW	28 FTW
1	2	3	4	5	6	7
I 1	28	25	21	19	14	18
I 2	22	15	10	17	17	11
I 3	34	25	16	19	25	26
I 4	32	14	15	19	21	13
I 5	47	25	19	24	23	24

Tabelle A17: Mittlere aufsummierte Abwitterungen der Serie RV03 („CEM II/A-LL 32,5 R/0,60“) aus dem Ringversuch

Ergebnisse des jeweiligen Instituts	Abwitterung [g/m ²]					
	4 FTW	10 FTW	14 FTW	18 FTW	24 FTW	28 FTW
1	2	3	4	5	6	7
I 1	190	1572	2788	4467	8364	14351
I 2	232	1986	3475	5698	14056	26001
I 3	109	1329	2640	4512	8592	13373
I 4	85	1491	2671	4286	10383	17937
I 5	261	1882	3308	5516	10668	16786

Tabelle A18: Variationskoeffizienten der Serie RV03 („CEM II/A-LL 32,5 R/0,60“) aus dem Ringversuch

Ergebnisse des jeweiligen Instituts	Variationskoeffizient [%]					
	4 FTW	10 FTW	14 FTW	18 FTW	24 FTW	28 FTW
1	2	3	4	5	6	7
I 1	25	12	12	12	14	13
I 2	18	12	13	10	15	18
I 3	49	23	13	10	16	21
I 4	25	13	12	9	16	18
I 5	34	16	12	13	19	22

A2 Statistische Auswertung nach ISO 5725

Tabelle A19: Ermittlungsergebnisse unter Zwischenbedingungen (M=1, Zeit)

	CEM I 32,5 R/0,50		CEM I 32,5 R/0,60	
	4 FTW	14 FTW	4 FTW	14 FTW
1	2	3	4	5
Anzahl der Labors p	3	3	2	3
Anzahl der Messungen n	5	5	5	5
$T1 = \text{Summe } y_i$	116	1018	259	4485
$T2 = \text{Summe } y_i^2$	4597	352945	33652	6787736
$T3 = \text{Summe } s_i^2$	673	37602	933	344879
$m_i = T1/p$	39	339	130	1495
$\sigma_r^2 = T3/p$	264	12534	466	114960
$\sigma_T^2 = (p \cdot T2 - T1^2) / (p(p-1)) - \sigma_r^2 / n$	130	12330	0	141324
$\sigma_{z1}^2 = \sigma_T^2 + \sigma_r^2$	354	24864	466	256284
σ_r	15	112	22	339
σ_T	11	111	0	376
σ_{z1}	19	157	22	506
v_r	39	33	17	23
v_T	29	33	0	25
v_{z1}	49	46	17	34

Tabelle A20: Ermittlungsergebnisse unter Zwischenbedingungen (M=3; Bearbeiter, Zeit und Prüfgerät)

	CEM I 32,5 R/0,50	
	4 FTW	14 FTW
1	2	3
Anzahl der Labors p	3	3
Anzahl der Messungen n	4	4
T1 = Summe y_i	249	1782
T2 = Summe y_i^2	10749	555204
T3 = Summe s_i^2	185	30684
$m_i = T1/p$	83	594
$\sigma_r^2 = T3/p$	62	10228
$\sigma_{OD}^2 = (p \cdot T2 - T1^2) / (p(p-1)) - \sigma_r^2 / n$	0	0
$\sigma_{z3}^2 = \sigma_{OD}^2 + \sigma_r^2$	62	10228
σ_r	8	101
σ_{OD}	0	0
σ_{z3}	8	101
v_r	9	17
v_{OD}	0	0
v_{z1}	9	17

Tabelle A21: Ausreißer Tests zum Ringversuch für die Serie RV01 („CEM I 32,5 R/0,50“)

	RV01 („CEM I 32,5 R/0,50“)		
	4 FTW	10 FTW	14 FTW
1	2	3	4
Mandel`s k	I3 - outlier	I3 - straggler	I3, I5 - straggler
Mandel`s h	I1 - straggler	kein	kein
Grubbs I für einen Ausreißer	kein	kein	kein
Grubbs II für zwei Ausreißer	kein	I5 - straggler	kein
Grubbs I für einen Mittelwert	kein	kein	kein
Grubbs II für zwei Mittelwerte	kein	kein	kein

Tabelle A22: Ausreißer Tests zum Ringversuch für die Serie RV02 („CEM II/A-LL 32,5 R/0,50“)

	RV02 („CEM II A-LL 32,5 R/0,50“)		
	4 FTW	10 FTW	14 FTW
1	2	3	4
Mandel`s k	kein	I1 - straggler	kein
Mandel`s h	kein	kein	kein
Grubbs I für einen Ausreißer	kein	kein	kein
Grubbs II für zwei Ausreißer	kein	kein	I2 - straggler
Grubbs I für einen Mittelwert	kein	kein	kein
Grubbs II für zwei Mittelwerte	kein	kein	kein

Tabelle A23: Ausreißer Tests zum Ringversuch für die Serie RV03 („CEM II/A-LL 32,5 R/0,60“)

	RV03 („CEM II A-LL 32,5 R/0,60“)		
	4 FTW	10 FTW	14 FTW
1	2	3	4
Mandel`s k	I5 - straggler	kein	kein
Mandel`s h	kein	kein	kein
Grubbs I für einen Ausreißer	kein	I2 - straggler	kein
Grubbs II für zwei Ausreißer	I5 - straggler	kein	kein
Grubbs I für einen Mittelwert	kein	kein	kein
Grubbs II für zwei Mittelwerte	kein	kein	kein

Tabelle A24: Ermittlungsergebnisse unter Vergleichbedingungen für die Serie RV01 („CEM I 32,5 R/0,50“)

	RV01 („CEM I 32,5 R/0,50“)		
	4 FTW	10 FTW	14 FTW
1	2	3	4
Anzahl der Labors p	4	5	5
Anzahl der Messungen n	5	5	5
$T1 = \text{Summe } y_i$	95	389	577
$T2 = \text{Summe } y_i^2$	2691	35844	77408
$T3 = \text{Summe } s_i^2$	73	2769	7488
$m_i = T1/p$	24	78	115
$\sigma_r^2 = T3/p$	18	554	1498
σ_L^2	161	1283	2432
$\sigma_R^2 = \sigma_L^2 + \sigma_r^2$	180	1837	2433
σ_r	4	24	39
σ_L	13	36	49
σ_R	13	43	63
v_r	18	30	34
v_L	54	46	43
v_R	57	55	54
r	12	67	109
R	38	121	177

Tabelle A25: Ermittlungsergebnisse unter Vergleichbedingungen für die Serie RV02 („CEM II/A-LL 32,5 R/0,50“)

	RV02 („CEM II A-LL 32,5 R/0,50“)		
	4 FTW	10 FTW	14 FTW
1	2	3	4
Anzahl der Labors p	5	5	5
Anzahl der Messungen n	5	5	5
$T1 = \text{Summe } y_i$	401	3970	7363
$T2 = \text{Summe } y_i^2$	34893	3248589	11180720
$T3 = \text{Summe } s_i^2$	3165	137869	302725
$m_i = T1/p$	80	794	1473
$\sigma_r^2 = T3/p$	633	27574	60545
σ_L^2	548	18639	72359
$\sigma_R^2 = \sigma_L^2 + \sigma_r^2$	1181	46213	132904
σ_r	25	166	246
σ_L	23	136	269
σ_R	34	215	365
v_r	31	21	17
v_L	29	17	18
v_R	43	27	25
r	71	470	696
R	97	608	1031

Tabelle A26: Ermittlungsergebnisse unter Vergleichbedingungen für die Serie RV03 („CEM II/A-LL 32,5 R/0,60“)

	RV03 („CEM II A-LL 32,5 R/0,60“)		
	4 FTW	10 FTW	14 FTW
1	2	3	4
Anzahl der Labors p	5	5	5
Anzahl der Messungen n	5	5	5
$T1 = \text{Summe } y_i$	877	8260	14881
$T2 = \text{Summe } y_i^2$	177209	13944909	44891545
$T3 = \text{Summe } s_i^2$	15475	308099	715838
$m_i = T1/p$	175	1652	2976
$\sigma_r^2 = T3/p$	3095	61620	143168
σ_L^2	5190	62898	121700
$\sigma_R^2 = \sigma_L^2 + \sigma_r^2$	8284	12518	26467
σ_r	56	248	378
σ_L	72	251	349
σ_R	91	353	515
v_r	32	15	13
v_L	41	15	12
v_R	52	21	17
Γ	156	702	1070
R	257	998	1456

A3 Empfehlung für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands von Betonen in der Expositionsklasse XF2

Inhaltsverzeichnis

Vorbemerkung	15
1 Einleitung	16
2 Normative Verweisungen	16
3 Definitionen	17
4 Prüfeinrichtung	17
5 Probekörper	22
5.1 Grundsätzliche Anforderungen	22
5.2 Standardprobekörper zur Prüfung von Beton	22
5.2.1 Abmessungen	22
5.2.2 Herstellung der Probekörper	22
5.2.3 Prüfungen am Frischbeton	23
5.2.4 Nachbehandlung der Probekörper	23
5.2.5 Gewinnung der Probekörper	24
6 Ablauf der Prüfung	24
6.1 Allgemeines	24
6.2 Trockenlagerung	25
6.3 Vorsättigung	25
6.3.1 Probenvorbereitung und Abdichtung	25
6.3.2 Vorsättigung mit Prüfliquidität durch kapillares Saugen	26
6.4 Frost-Tau Belastung	26
7 Messungen	27
7.1 Prüfablauf	27
7.2 Bestimmung der Oberflächenabwitterung	28
7.2.1 Messdurchführung	28
7.2.2 Auswertung der Abwitterung	28
7.3 Messung der Lösungsaufnahme	28
7.3.1 Messdurchführung	28
7.3.2 Auswertung der Flüssigkeitsaufnahme	29
7.4 Messung der Ultraschalllaufzeit (innere Schädigung)	29

7.4.1	Messaufbau	29
7.4.2	Kalibrierung	30
7.4.3	Messdurchführung	31
7.4.4	Auswertung des relativen dynamischen E-Moduls	31
8	Bewertung Frost-Tausalz-Widerstand nach dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)	32
8.1	Maßgebendes Abnahmekriterium Abwitterung	32
9	Bericht	32
10	Anforderungen an das Labor und Rückstellproben	33
11	Präzisionsdaten	33
11.1	Allgemeines	33
11.2	Präzision für die Abwitterung des modifizierten CDF-Tests (XF2)	34

Vorbemerkung

Die vorliegende Empfehlung beschreibt die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands von Betonen der Expositionsklasse XF2 in Brücken und Ingenieurbauwerken im Bereich der Bundesfernstraßen. Die Empfehlung beruht im Wesentlichen auf den Ergebnissen dieses Forschungsvorhabens. Derzeit liegt für die Durchführung dieser Prüfung kein genormtes Prüfverfahren vor.

Für die Prüfung des Frostwiderstands von Betonen in der Expositionsklasse XF3 ist der CIF-Test /8/, für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands von Betonen in der Expositionsklasse XF4 der CDF-Test /9/ anzuwenden. Beide Prüfverfahren sind als RILEM-Empfehlung sowie im BAW-Merkblatt „Frostprüfung“ /10/ veröffentlicht.

Die nachfolgende Prüfbeschreibung beruht im Wesentlichen auf dem BAW-Merkblatt /10/ und ist um die Modifizierung des CDF-Verfahrens für Betone im Bereich XF2 angepasst. Diese Modifikationen betreffen die Probenherstellung, den Frost-Tau-Zyklus, die Prüfdauer, das Abnahmekriterium sowie die Präzisionsdaten.

Das für die Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstands in der Expositionsklasse XF2 vorgeschlagene Abnahmekriterium wurde auf der Basis von Prüfungen normkonform und nicht normkonform zusammengesetzter Betone ermittelt. Es gilt nur für Betone, die bis auf die Mindestdruckfestigkeitsklasse die Anforderungen an die Norm erfüllen. Das empfohlene Abnahmekriterium kann nicht für die Bewertung von Betonen, die mit künstlich eingeführten Mikroluftporen hergestellt wurden, herangezogen werden und gilt weder für die Bewertung bestehender Bauwerke im Rahmen von Bauwerksuntersuchungen noch für die Bewertung von Betonen, die unter den von dieser Empfehlung abweichenden Randbedingungen hergestellt oder vorgelagert wurden. Zudem eignet es sich derzeit nicht, um die Gesteinskörnung im Beton zu evaluieren.

1 Einleitung

CDF bedeutet "Capillary suction of De-icing chemicals and Freeze-thaw test". Das modifizierte CDF-Verfahren (XF2) ermöglicht – wie das CDF-Verfahren auch – eine Bestimmung der Lösungsaufnahme und der inneren Gefügeschädigung über die Messung des relativen dynamischen E-Moduls während einer zyklischen Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung. Wie beim CDF-Verfahren liegt auch beim modifizierten CDF-Verfahren (XF2) ein einaxialer Wärme- und Feuchtigkeitstransport in Gegenwart einer definierten Prüfflüssigkeit vor. Als Prüfflüssigkeit ist eine definierte Tausalzlösung (3 %-ige NaCl-Lösung) zu verwenden. Nach wie vor ist der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands die Oberflächenabwitterung für eine Beurteilung maßgebend. Der relative dynamische E-Modul sollte immer ergänzend mit gemessen werden.

2 Normative Verweisungen

- /1/ DIN EN 12350-1 bis 7: Prüfung von Frischbeton, Teile 1 bis 7.
- /2/ DIN EN 12390-1: Prüfung von Festbeton, Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen, Teil 1.
- /3/ DIN EN 12390-2: Prüfung von Festbeton, Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen, Teil 2.
- /4/ DIN 18551: Spritzbeton, Herstellung und Güteüberwachung.
- /5/ DIN EN 12504-4: Prüfung von Beton in Bauwerken – Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit, Teil 4.
- /6/ ISO 5725/1 to 6 - 1990: Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. (Genauigkeit – Übereinstimmung und Präzision – von Messmethoden und Ergebnissen).
- /7/ VDI/VDE 3522: Zeitverhalten von Berührungsthermometern, (Time performance of contact thermometers), Juni 1987.
- /8/ CIF Test - Testmethode zur Bestimmung des Frost-Widerstands von Beton (CIF). Final Recommendation of RILEM TC 176-IDC "Internal Damage of Concrete due to frost action": Test methods of frost resistance of concrete. Materials and Structures, Vol. 37 - No 274 (12.2004) p. 742-75.
- /9/ CDF Test - Testmethode zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands von Beton – Prüfung mit einer Natriumchloridlösung (CDF). RILEM Recommendation TC117-FDC: Freeze-thaw and de-icing resistance of concrete. Materials and Structures Vol. 29 (1996) 523-528.
- /10/ Bundesanstalt für Wasserbau: BAW-Merkblatt „Frostprüfung“. Stand: Dezember 2004.

3 Definitionen

- a) *Frost-Tausalz-Widerstand* ist der Widerstand gegenüber Frost-Tau-Wechseln mit einer Tausalzlösung als Prüf Flüssigkeit.
- b) Die *Prüf Flüssigkeit* ist die Flüssigkeit, die während der Prüfung vom Probekörper aufgenommen wird.
- c) *Abwitterung* ist der durch Frost-Tau- oder Frost-Taumittel-Beanspruchung verursachte Materialverlust der Oberfläche des Betons.
- d) *Innere Schädigung* ist die Schädigung des inneren Betongefüges (auch ohne sichtbare äußere Schäden), die zu einer Veränderung der Betoneigenschaften führt (z.B. eine Verminderung des dynamischen Elastizitätsmoduls, der Biegezugfestigkeit und der Dichtigkeit der Betonrandzone gegenüber Schadstoffen).
- e) Der *Referenzpunkt* ist der physikalische Messpunkt, an dem der Temperaturzyklus geregelt wird.
- f) Die *Referenztemperatur* ist die gemessene Temperatur am Referenzpunkt.
- g) Die *Prüffläche* ist die Fläche eines Probekörpers, über die der Temperaturwechsel bzw. die Aufnahme der Prüf Flüssigkeit während des Prüfvorganges stattfindet.
- h) Die *Durchschallungsachse* ist die gedachte direkte Verbindung der Mittelpunkte der Ultraschallprüfkopfflächen von Sender und Empfänger.
- i) Die *Durchschallungsstrecke* ist die kürzeste Strecke auf der Durchschallungsachse zwischen dem Ultraschallsender und dem Ultraschallempfänger über die die Ultraschalllaufzeit gemessen wird.
- j) Die *Ultraschalllaufzeit* ist die Zeit, die ein Ultraschallsignal benötigt, um die Durchschallungsstrecke zwischen dem Ultraschallsender und dem Ultraschallempfänger zurückzulegen.
- k) Als *Ankopplungsmedium* wird die verwendete Prüf Flüssigkeit eingesetzt. Es ermöglicht eine reproduzierbare Signalübertragung zwischen den Ultraschallprüfköpfen und dem Probekörper.

4 Prüfeinrichtung

- a) *Klimaraum*: Temperatur von (20 ± 2) °C und relative Luftfeuchtigkeit von 65 ± 5 %. Im Klimaraum muss die Verdunstung einer nach oben offenen Wasserfläche 45 ± 15 g/(m²h) betragen. Normalerweise wird dies mit einer Windgeschwindigkeit von $\leq 0,1$ m/s erreicht. Zur Messung der Verdunstung ist eine Schale mit einer Tiefe von ca. 40 mm und einer Querschnittsfläche von 225 ± 25 cm² zu verwenden. Die Schale ist bis 10 ± 1 mm unter den Rand zu füllen.
- b) *Seitliche Abdichtung*: Aluminiumfolie mit Butylklebung (Referenzverfahren) oder Epoxidharz (Alternativverfahren). Die Abdichtung muss bei einer Temperatur von -10 °C

- dauerhaft sein. Sie darf bei Erreichen der Mindesttemperatur nicht spröde werden und sich vom Probekörper nicht lösen. Ein geeigneter Primer ist zu verwenden.
- c) *Prüf­flüssigkeit*: Standard-Tausalzlösung (97 M.-% demineralisiertes Wasser und 3 M.-% NaCl).
- d) *Prüf­behälter* (Abb. 1 und 2): Die Prüf­behälter bestehen aus rostfreiem Stahl. Die Größe eines Prüf­behälters ist so zu wählen, dass die Luftschicht zwischen den vertikalen Flächen des Probekörpers und dem Prüf­behälter auf 30 ± 20 mm begrenzt ist^{1,2}. Es ist zusätzlich ein Abstandhalter von $5 \pm 0,1$ mm und ein Deckel erforderlich.

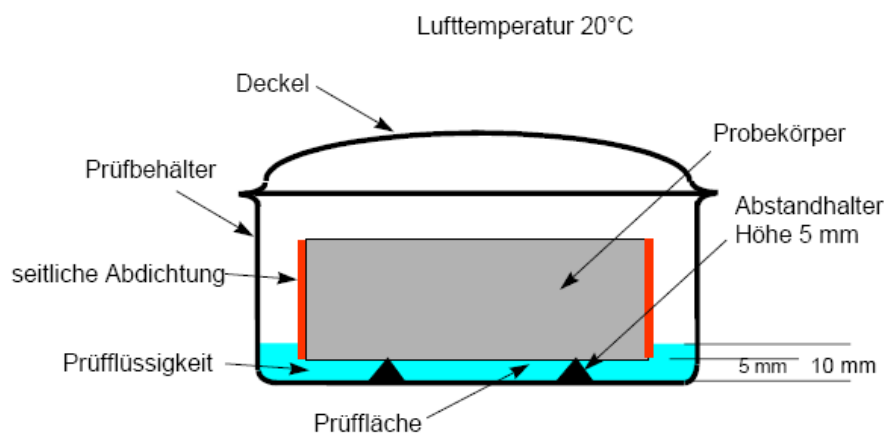


Abbildung 1: Kapillares Saugen /10/

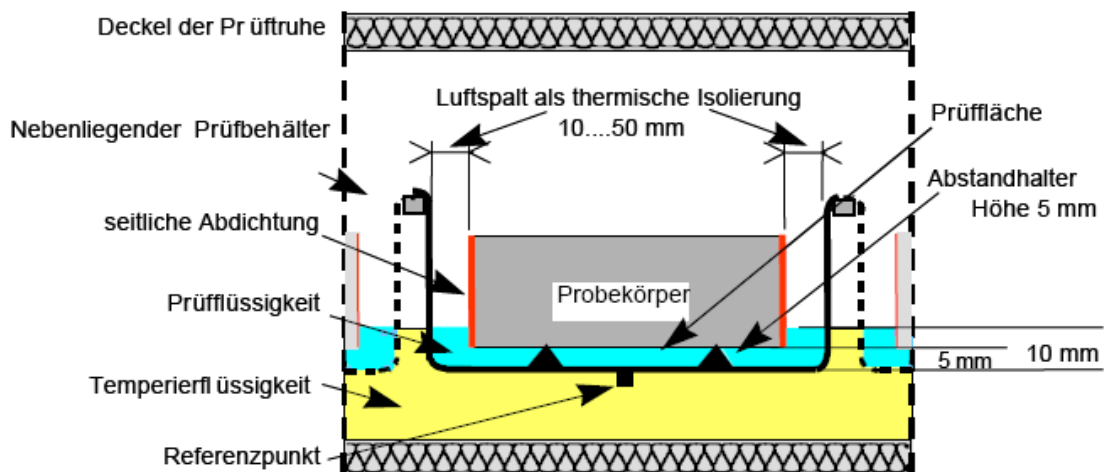


Abbildung 2: Prüf­behälter mit Probekörper im Flüssigkeitstemperierbad /10/

¹ Die Luftschicht zwischen den vertikalen Flächen der Prüfkörper und dem Prüfbehälter wirkt als Wärmedämmung.
² Die Edelstahlbehälter sind in verschiedenen modularen Größen angepasst, so dass die gleichen Randbedingungen für jede Prüfkörpergröße angetroffen werden.

- e) *Temperaturkontrollierte Prüfruhe* (Abb. 3): Es wird eine Truhe mit Flüssigkeitstemperierbad verwendet. Die Temperatur des Temperierbads wird durch ein geeignetes Gerät gesteuert. Die Wärme- und Kühlleistung und die Regeleinheit müssen in der Lage sein, das Temperatursystem am Referenzpunkt, entsprechend dem Temperaturzyklus (Abb. 4), zu regulieren.

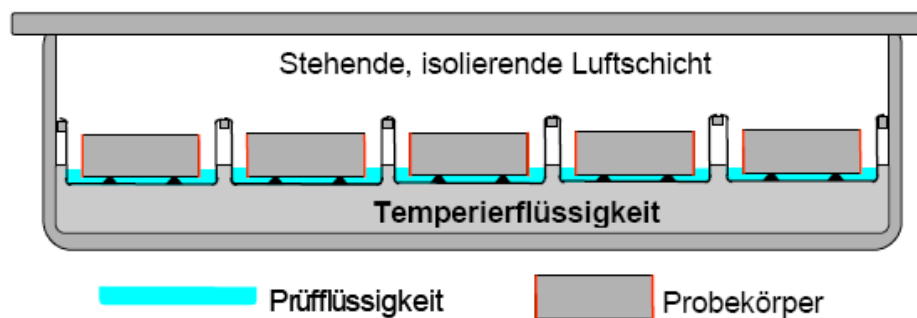


Abbildung 3: Temperaturkontrollierte Prüfruhe /10/

Die Prüfruhe muss mit Halterungen für die Prüfbehälter über dem Temperierbad ausgestattet sein, die eine Eintauchtiefe der Prüfbehälter von 15 ± 3 mm sicherstellen. Das Temperierbad muss bei nicht vollständiger Belegung mit Probekörpern vollflächig, z.B. durch leere Prüfbehälter, abgedeckt werden³.

Für die Überwachung und Regelung der Referenztemperatur wird ein Prüfbehälter an einer repräsentativen Stelle des Bades (in der Regel in der Mitte des Bades) verwendet. Die Referenztemperatur wird in der Temperierflüssigkeit des Temperierbades an der Unterseite eines Prüfbehälters gemessen. Der Referenzpunkt ist in engem thermischem Kontakt in der Mitte des Behälterbodens angeordnet.

Für die Messung wird ein Temperaturmesser mit einer Toleranz von maximal $\pm 0,05$ K bei 0 °C verwendet. Er muss ein quaderförmiges Gehäuse mit den Maßen $50 \times 6 \times 6$ mm $\pm 0,2$ mm haben. Er wird mit einer Seitenfläche (50×6 mm) so befestigt, dass die Längsseite des Fühlers in Strömungsrichtung weist. Die Zeitkonstante des Fühlers (ohne Befestigungseinrichtung), bestimmt nach VDI/VDE 3522 im strömenden Wasserbad, muss $6,3$ s $\pm 0,8$ s betragen. Zur Kalibrierung wird die Minimaltemperatur bei -20 °C verwendet.

Das Gerät muss einen Frost-Tau-Wechsel nach dem in Abbildung 4 gezeigten Temperaturzyklus sicherstellen.

³ Bei der Durchführung des Tests in einem kryogenen Bad ist keine Abdeckung der Prüfbehälter erforderlich, da der Prüfruhendeckel einen genügenden Verdunstungsschutz schafft, während die Wände der Probenbehälter als Kühlfalle dienen.

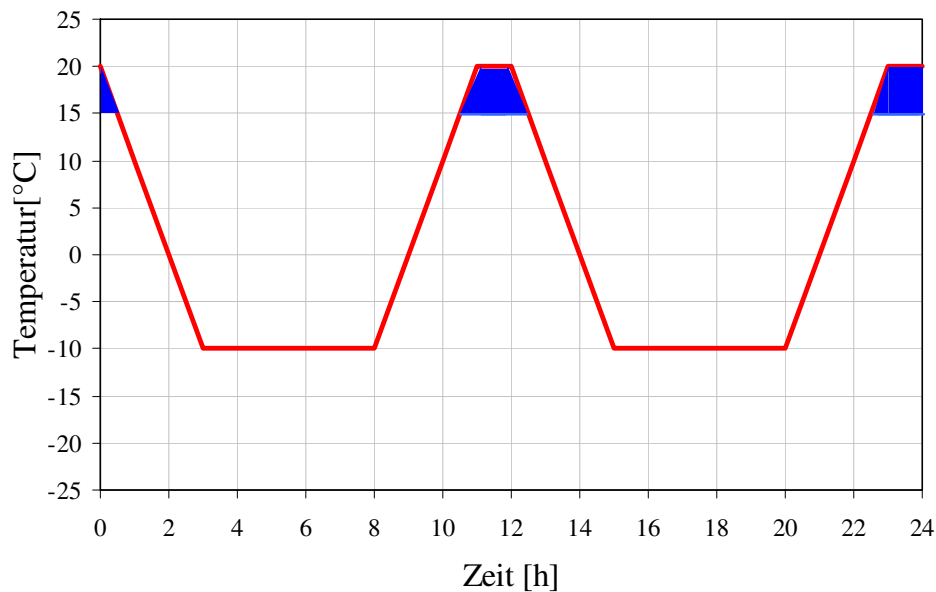


Abbildung 4: Kontrolltemperatur-Zyklus. Im gekennzeichneten Temperaturbereich $> 15\text{ °C}$ (blaue Fläche) dürfen die Messungen nach Abschnitt 7 durchgeführt werden.

Ein *Frost-Tau-Wechsel* dauert 12 Stunden. Die Temperatur wird beginnend bei $+20\text{ °C}$ in 3 Stunden mit einer konstanten Abkühlrate von 10 K/h gesenkt. Sie wird dann 5 Stunden lang bei -10 °C konstant gehalten und in 3 Stunden mit einer Heizrate von 10 K/h wieder auf $+20\text{ °C}$ erhöht. Sie wird bei $+20\text{ °C}$ über 1 Stunde konstant gehalten. Der Temperaturzyklus wird am Referenzpunkt überwacht. Die Abweichung der Temperatur gemessen am Referenzpunkt darf zumindest bei der Minimaltemperatur nicht mehr als $\pm 0,5\text{ K}$ und $\pm 1\text{ K}$ bei den übrigen Temperaturen betragen. Eine konstante Zeitverschiebung zwischen den einzelnen Prüfbehältern ist zulässig. Die Temperaturtoleranz darf unmittelbar nach der ersten Eisbildung für ein Intervall von maximal 10 Minuten überschritten werden.

- f) *Vorrichtung zur Einstellung der Flüssigkeitshöhe*: z.B. durch ein Sauggerät (Abb. 5). Das Sauggerät kann aus einer Kapillare mit einer Abstandhalterung von $10 \pm 1\text{ mm}$ bestehen, die mit einer Wasserstrahlpumpe verbunden ist, wodurch die überschüssige Flüssigkeit aus den Prüfbehältern abgesaugt wird.

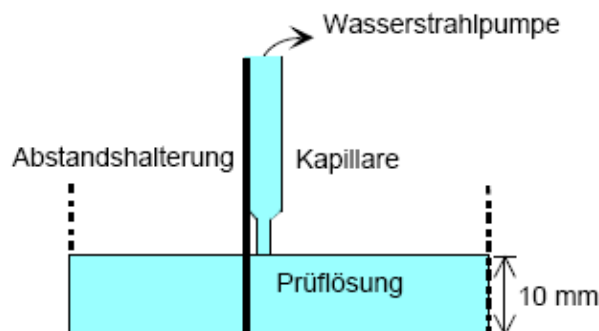


Abbildung 5: Absaugeinrichtung /10/

- g) *Ultraschallbad (Abb. 6):* Die Abmessungen des Ultraschallbades müssen so groß sein, dass kein mechanischer Kontakt im Bereich des Übertragungsmediums zwischen Prüfbehälter und Ultraschallgerät vorhanden ist.

Zusätzlich muss ein Mindestabstand zwischen dem Prüfbehälter und dem Boden des Bades von mindestens 15 mm sichergestellt sein. Das Ultraschallbad muss folgende Leistungsdaten aufweisen: ERS Leistung 250 W; HF Höchstleistung 450 W bei doppeltem Halbwellen-Betrieb; Frequenz 35 kHz.

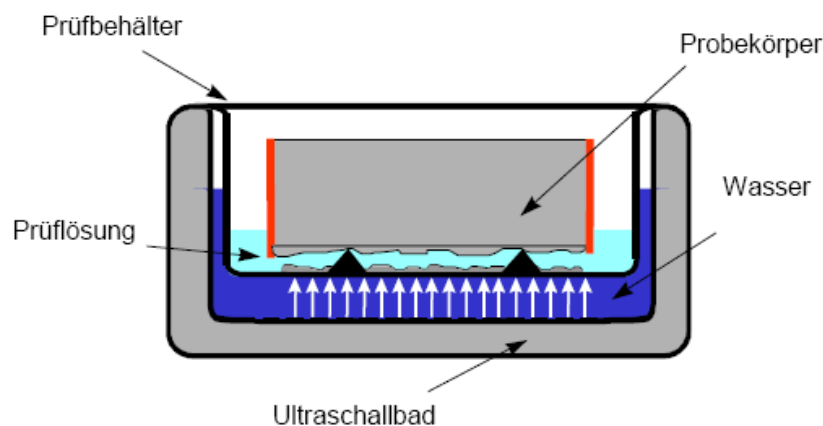


Abbildung 6: Ultraschallbad /10/

- h) *Gerät zur Messung der Ultraschalllaufzeit:* Die Ultraschalllaufzeit kann mit einem handelsüblichen Ultraschallmessgerät gemessen werden, das zur Bestimmung der Laufzeiten von Longitudinalwellen bei direkter Durchschallung von Beton gemäß DIN EN 12504-4 geeignet ist. Um den Messwert auf Plausibilität prüfen zu können, empfiehlt sich ein Gerät mit Anzeige des Signalbilds (Empfangsamplitude). Der Frequenzbereich der Prüfköpfe muss im Bereich von 50 und 150 kHz liegen. Die Prüfköpfe sollten einen Durchmesser von 30 ± 10 mm besitzen.
- i) *Prüfbehälter für Ultraschalllaufzeitmessung:* Zur Messung der Laufzeit wird ein Behälter aus elektrisch nicht leitendem Material (z.B. Polymethylmethacrylat) verwendet. Die Ultraschallprüfköpfe müssen so angebracht werden, dass die Achse der Durchschallungstrecke parallel in einem Abstand von 35 mm zur Prüffläche liegt (z.B. Aufnahme in einer Aussparung zweier gegenüberliegender Seitenflächen, Abb. 9). Die Abmessungen müssen so dimensioniert sein, dass eine Kalibrierung nach Abschnitt 7.4.2 möglich ist.
- j) *Kalibrierprüfkörper:* Ein Kalibrierprüfkörper wird zur Kalibrierung des Ultraschallmessaufbaus eingesetzt. Der Kalibrierprüfkörper hat die Abmessungen $150 \times 120 \times 70$ mm³ ($\pm 0,1$ mm) und ist mit einer definierten mitgelieferten Ultraschalllaufzeit sowie mit Messmarken versehen.
- k) *Probentrageblech:* Ein Trageblech (vorzugsweise aus 1 mm dickem V2A-Stahl) mit Tragegriffen hilft der einfachen Handhabung der Probekörper während der Messung der Flüssig-

keitsaufnahme und der Ultraschalllaufzeit. Die Größe des Trageblechs muss größer als die Prüffläche sein, so dass der Verlust von Abwitterungspartikeln verhindert wird. Die seitliche Aufkantung muss $10 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ betragen.

- l) *Trockenschrank*: Es wird ein Trockenschrank mit einer Temperatur von $110 \pm 5 \text{ °C}$ benutzt.
- m) *Papierfilter*: Zur Aufnahme der Abwitterungen werden Papierfilter benutzt.
- n) *Waage*: Gewicht der Abwitterung; Genauigkeit von $\pm 0,01 \text{ g}$.
- o) *Waage*: Gewicht des Probekörpers; Genauigkeit von $\pm 0,1 \text{ g}$.
- p) *Schieblehre*: Mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1 \text{ mm}$.
- q) *PTFE-Platten*: Für Standardschalungen $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$ werden PTFE-Platten $150 \times 150 \times 2 \text{ mm}$ (z.B. Teflon) verwendet.

5 Probekörper

5.1 Grundsätzliche Anforderungen

Eine Prüfserie besteht aus mindestens 5 Probekörpern mit einer Gesamtprüffläche von mindestens $0,08 \text{ m}^2$. Die Höhe der Probekörper beträgt $70 \text{ mm} (\pm 2 \text{ mm})$.

5.2 Standardprobekörper zur Prüfung von Beton

5.2.1 Abmessungen

Der Standardprobekörper hat die Dimensionen (Länge x Breite x Höhe) $150 \times 150 \times 70 \text{ mm}$ ($\pm 2 \text{ mm}$). Der Probekörper darf in der Breite auf minimal 100 mm verkleinert werden.

5.2.2 Herstellung der Probekörper

Zur Prüfung von Betonmischungen werden die Probekörper in 150 mm Würfelformen gemäß DIN EN 12390-1 /2/ gefertigt. Beim Mischen des Betons sind die Anforderungen der DIN 1045-2, Abschnitt 9.8, einzuhalten. Für die Probekörperherstellung sind Stahlschalungen zu verwenden. Die Herstellung und Verdichtung der Probekörper erfolgen gemäß DIN EN 12390-2 /3/, wobei für die Verdichtung ein Rütteltisch zu verwenden ist. Die Zeit bis zur vollständigen Verdichtung ist entsprechend der Konsistenz des Betons ausreichend lang zu wählen. Der Frostwiderstand von Beton hängt wesentlich von der Porenstruktur, insbesondere dem nicht kapillaraktiven Luftgehalt und der Dichtigkeit ab. Hieraus resultiert, dass unterschiedlich stark verdichtete Betone sich auch im Frostwiderstand unterscheiden können. Aus diesem Grund ist eine vollständige Verdichtung des Betons für die Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstands besonders wichtig. Die Verdichtung muss so lange erfolgen, bis merklich keine weitere Luft aus dem Frischbeton entweicht. Der Beton darf sich nicht entmischen oder Wasser absondern.

Bei Verwendung von Zusatzmitteln sind die bei der Bauwerkserstellung zu erwartenden Zugabemengen zu verwenden.

Die Frischbetonrohddichte, der Luftgehalt im Frischbeton und die Konsistenz sind gemäß DIN EN 12350 /1/ zu prüfen und zu dokumentieren.

In der Würfelschalung ist an zwei gegenüberliegenden Seitenflächen jeweils eine vertikale PTFE-Scheibe fest anzuordnen. Die PTFE-Scheiben dürfen nicht mit Trennmitteln behandelt werden. Die Betonoberfläche an der PTFE-Scheibe ist die Prüffläche. Das Größtkorn der Gesteinskörnung des Betons darf nicht größer als ein Drittel der kleineren Durchschallungstrecke sein.

5.2.3 Prüfungen am Frischbeton

Bei der Herstellung der Betonprobekörper für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands von Beton im Bereich XF2 sind die folgenden Frischbetonprüfungen durchzuführen:

- Bestimmung der Konsistenz nach DIN EN 12350-4 oder DIN EN 12350-5
- Bestimmung der Frischbetonrohddichte nach DIN EN 12350-6 und
- Bestimmung des Luftgehalts nach DIN EN 12350-7.

Der Luftgehalt sollte zwischen 5 und 20 min nach der Wasserzugabe bestimmt werden. Bei Betonen, die ohne künstlich eingeführte Luftporen hergestellt werden, muss der Luftgehalt bei einem Größtkorn von 16 mm $1,5 \pm 0,5$ Vol.-% betragen.

5.2.4 Nachbehandlung der Probekörper

Die Probekörper werden für 24 ± 2 Stunden in der Schalung belassen, wobei die freie Oberseite vor Austrocknung geschützt wird. Danach werden die Probekörper ausgeschalt. Wenn die Festigkeitsentwicklung des Betons langsam ist, kann die Ausschallfrist auf 48 ± 2 Stunden verlängert werden.

Nach dem Ausschalen werden die Probekörper in Leitungswasser bei (20 ± 2) °C gelagert. Die Dauer der Wasserlagerung nach dem Ausschalen hängt vom Zeitpunkt des Beginns der Vorsättigung der Proben (kapillares Saugen) ab (siehe Abschnitt 6). Sofern nicht anders vereinbart, beginnt die Vorsättigung zum Zeitpunkt des Nachweises der Druckfestigkeitsklasse. Daraus ergeben sich folgende Fristen:

Bei Betonen gemäß DIN 1045 beträgt die Dauer der Wasserlagerung grundsätzlich 6 Tage (bis zum 7. Tag), die Vorsättigung beginnt am 28. Tag.

Bei Betonen, bei denen der Nachweis der Druckfestigkeitsklasse nach 56 Tagen zulässig ist, kann die Dauer der Wasserlagerung 13 Tage⁴ (bis zum 14. Tag) betragen, sofern auch die Vorsättigung erst am 56. Tag beginnt.

⁴ Bei 48 Stunden Schalzeit entsprechend 1 Tag weniger Wasserlagerungsdauer.

5.2.5 Gewinnung der Probekörper

Unmittelbar nach der Wasserlagerung werden die Proben auf die Standardhöhe gesägt. Nach dem Sägeschnitt erhält man je einen Standardprobekörper und eine Rückstellprobe (Abb. 7). Falls eine Reduzierung der Breite des Probekörpers vereinbart wurde, kann entlang der abgezogenen Oberfläche eine Seite bis auf eine minimal zulässige Breite von 110 mm zugesägt werden (variabler Schnitt). Dieser Behandlung folgt die Trockenlagerung.

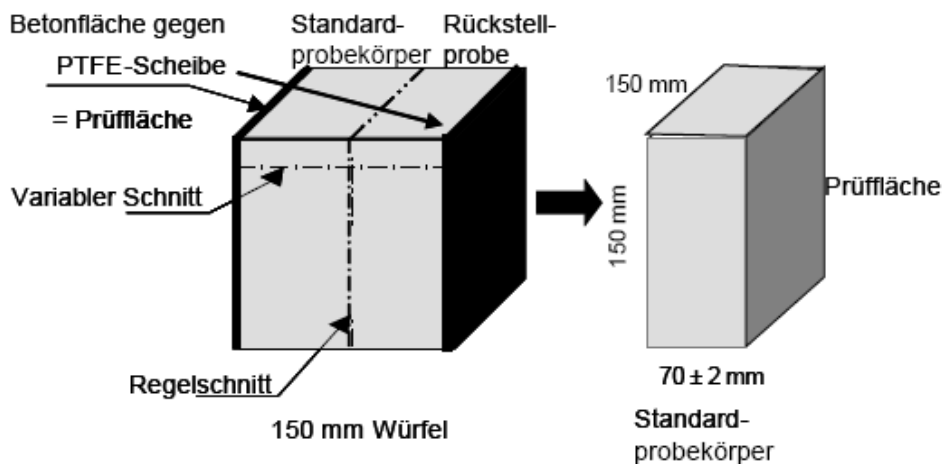


Abbildung 7: Zusägen des Probekörpers und der Rückstellprobe bei seitlicher PTFE-Scheiben-Anordnung /10/

6 Ablauf der Prüfung

6.1 Allgemeines

Das Prüfverfahren beinhaltet drei Schritte: Die Trockenlagerung, die Vorsättigung durch kapillares Saugen und die Frost-Tau-Wechsel. Die Prüfung beginnt im Anschluss an die Nachbehandlungsperiode unmittelbar nach Gewinnung der Probekörper.

Maßgebend für den Frostbeginn ist der Beginn der Vorsättigung durch kapillares Saugen. Bei Betonen gemäß DIN EN 206 / DIN 1045-2 beginnt die Vorsättigung grundsätzlich zum Zeitpunkt des Nachweises der Druckfestigkeitsklasse im Alter von 28 Tagen. Sofern der Nachweis der Druckfestigkeitsklasse im Alter von 56 Tagen erfolgt, kann auch die Vorsättigung im Alter von 56 Tagen beginnen⁵.

⁵ Langsam erhärtende Betone weisen erst in einem höheren Alter eine vergleichbare Leistungsfähigkeit wie schnell erhärtende Betone auf. Dies gilt auch im Hinblick auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand. Dem entsprechend kann für solche Betone, bei denen ein Nachweis der Druckfestigkeitsklasse im Alter von 56 Tagen erfolgt, die Feucht- bzw. Wasserlagerungsdauer auf 14 Tage und die Lagerungsdauer im Klimaraum auf 42 Tage verlängert werden.

Bei Probekörpern, die gemäß Abschnitt 5.2.1 oder 5.2.2 hergestellt wurden, sind die in der nachfolgenden Tabelle festgelegten Zeiträume einzuhalten:

Tabelle 6.1: Lagerungsdauern vor Frostbeginn

Lagerung und Herstellung	Nachbehandlung ⁶ (Schalung und Wasserlagerung nach Abschnitt 5.2)	Trockenlagerung im Klimaraum nach Abschnitt 6.3	Vorsättigung durch kapillares Saugen nach Abschnitt 6.3
Beginn der	Lagerungsdauern [d]		
1	2	3	4
28. Tag	7	21 ± 1	7
56. Tag	14	42 ± 1	7

Bei Zementen mit hohen Hüttensandanteilen (Verwendung gemäß DIN EN 206 / DIN 1045-2 für Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand eingeschränkt) wirkt sich der positive Einfluss der verlängerten Nachbehandlung ggf. weniger aus, da bei der verlängerten Klimaraumlagerung ein verstärkter Carbonatisierungsfortschritt mit nachteiligem Einfluss auf die Abwitterung nicht ausgeschlossen werden kann.

6.2 Trockenlagerung

Die Probekörper werden in einem Klimaraum gemäß Abschnitt 4a) bei (20 °C / 65% r. F.) zur Oberflächentrocknung gelagert. Die Lagerungsdauer beträgt nach Tabelle 6.1 bei einem Prüfalter des Betons von 28 Tagen 21 ± 1 Tage, bei einem Prüfalter des Betons von 56 Tagen 42 ± 1 Tage. Die Probekörper sind in einem Abstand von mindestens 50 mm auf eine Seitenfläche zu stellen, so dass die Prüfflächen freistehend sind. Die Gewichtsveränderung ist zu messen.

Während der Klimaraumlagerung ist die Einhaltung der zulässigen Verdunstungsrate gemäß 4a) regelmäßig zu überprüfen.

6.3 Vorsättigung

6.3.1 Probenvorbereitung und Abdichtung

Die Seitenflächen müssen abgedichtet werden. Die Proben müssen insbesondere an den Seitenflächen sauber und trocken sein. Vor und nach dem Abdichten müssen die Probekörper mit einer Genauigkeit von ± 0,1 g gewogen werden, um die Referenzmasse – ohne Abdichtung – zur Berechnung der Flüssigkeitsaufnahme zu bestimmen.

⁶ Eine gegenüber den Vorgaben der Tabelle 6.1 verlängerte Feucht- bzw. Wasserlagerung (ggf. bis zum Beginn der Prüfung) kann sich infolge eines zum Frostbeginn erhöhten Wassersättigungsgrades der Poren ungünstig auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand auswirken.

Vor der Abdichtung der Seitenflächen müssen diese mit einem entsprechenden Primer behandelt werden. Eine der folgenden zwei Methoden muss zum Abdichten der seitlichen Oberflächen angewandt werden:

a) Abdichtung durch Aluminiumfolie mit Butylklebung (Referenz):

Die Aluminiumfolie mit Butylklebung wird frühestens 3 Tage bis unmittelbar vor dem Beginn der Vorsättigung auf die Seitenflächen mit einer Überlappung von 20 mm fest aufgerollt. Das Butylband muss so aufgebracht werden, dass ein dauerhafter Verbund gewährleistet ist.

b) Abdichtung mit Epoxidharz (Alternative):

Ein lösungsmittelfreies Epoxidharz wird 2 bis 4 Tage vor Beginn der Vorsättigung auf die Seitenflächen aufgebracht, so dass ein ausreichendes Erhärten des Epoxidharzes gewährleistet ist.

6.3.2 Vorsättigung mit Prüfflüssigkeit durch kapillares Saugen

Nach der Trockenlagerung werden die Probekörper mit der Prüffläche nach unten auf die 5 mm hohen Abstandhalter in die Prüfbehälter gelegt. Anschließend wird die Prüfflüssigkeit bis auf eine Höhe von 10 ± 1 mm in den Behälter eingefüllt, ohne dass die Proben von oben feucht werden. Als Prüfflüssigkeit wird eine 3%-ige NaCl-Lösung verwendet.

Während des kapillaren Saugens muss der Prüfbehälter mit einem Deckel verschlossen werden. Während des kapillaren Saugens darf kein Kondensat vom Deckel auf den Probekörper tropfen. Das kapillare Saugen dauert 7 Tage bei einer Temperatur von (20 ± 2) °C. Während des kapillaren Saugens muss, abhängig vom Saugvermögen des Materials, der Flüssigkeitsstand kontrolliert und in regelmäßigen Abständen reguliert werden. Die Gewichtszunahme der Probekörper wird regelmäßig alle 2-3 Tage gemessen.

6.4 Frost-Tau Belastung

Die Frost-Tau-Wechsel-Prüfung ist eine zyklische Belastung. Dabei werden die Probekörper in einer temperaturkontrollierten Prüftruhe einem Temperaturzyklus nach Abschnitt 4 (Abb. 4) unterworfen. Für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands sind 14 Frost-Tau-Wechsel erforderlich.

Vor Beginn der Frost-Tau-Wechsel werden lose anhaftende Teilchen und Schmutz von der Prüffläche der Probekörper mittels Behandlung in einem Ultraschallbad, wie in Abschnitt 7.2 beschrieben, entfernt. Das entfernte Material wird verworfen.

Wenn während der Frost-Tau-Wechselprüfung eine Unterbrechung der zyklischen Belastung auftritt (Anlagenausfall, etc.) müssen die Probekörper in der Prüflösung verbleiben und vor Austrocknung geschützt werden.

Eine Unterbrechung kann sich insbesondere bei längerer Dauer auf das Prüfergebnis auswirken und muss im Prüfbericht benannt und bei der Auswertung berücksichtigt werden.

7 Messungen

7.1 Prüfablauf

Messungen werden zu Beginn der Frostprüfung (0 Frost-Tau-Wechsel) und nach jedem 4. bis maximal jedem 6. Frost-Tau-Wechsel, sowie nach dem 14. Frost-Tau-Wechsel durchgeführt. Die Messgrößen müssen bei Temperaturen über 15 °C gemessen werden (ausgefüllte Fläche in Abb. 4).

Folgende Messabfolge ist einzuhalten (vgl. Abb. 8):

1. Oberflächenabwitterung
2. Lösungsaufnahme
3. Messung der Ultraschalllaufzeit

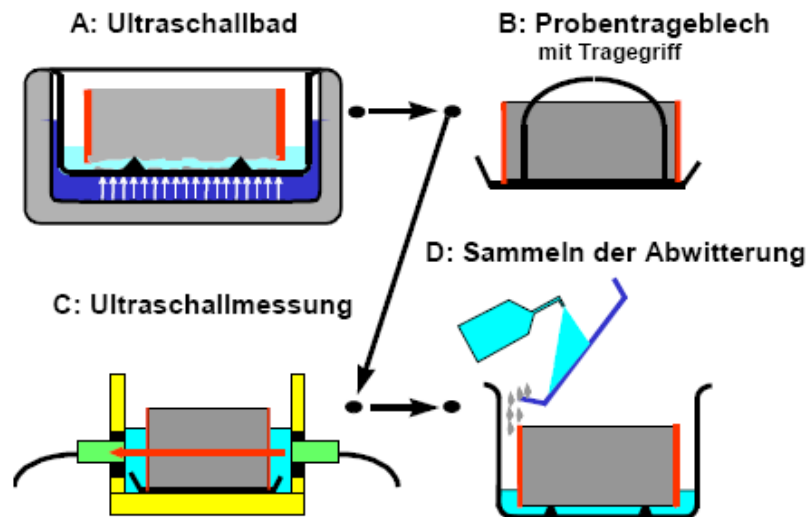


Abbildung 8: Messabfolge mit Ultraschalllaufzeitmessung /10/

Nach der Abwitterungsbestimmung ist der Probekörper auf dem Probentrageblech anzuordnen, um zusätzlich abwitterndes Material während der weiteren Messabfolge zu sammeln. Die auf dem Trageblech gesammelte Abwitterung wird in den Prüfbehälter zurückgegeben und bei der nächsten Messung der Abwitterung berücksichtigt. Wenn die Messabfolge unterbrochen wird, muss der Probekörper in den Prüfbehälter mit der Prüfliquidität zurückgelegt werden, um ein Austrocknen zu verhindern.

7.2 Bestimmung der Oberflächenabwitterung

7.2.1 Messdurchführung

Um lose anhaftendes, abgewittertes Material von der Prüffläche abzulösen, wird der Prüfbehälter in die Übertragungsflüssigkeit eines Ultraschallbads getaucht und für drei Minuten der Ultraschall-Reinigung ausgesetzt (Abbildung 6).

Die Prüfflüssigkeit, welche die Abwitterung enthält, wird abgefiltert. Der Papierfilter wird danach bei $(110 \pm 5) \text{ }^\circ\text{C}$ für 24 Stunden getrocknet und mind. 1 h bei $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ und $(60 \pm 10) \%$ r. F. abgekühlt. Die Masse des Filters μ_f und den getrockneten Abwitterungen μ_b wird mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01 \text{ g}$ gemessen. Vor der Verwendung ist der leere Papierfilter ebenfalls gemäß vorgenannter Beschreibung zu trocknen, und die Masse des leeren Filters μ_f mit der gleichen Genauigkeit zu bestimmen. Die Masse des abgewitterten Materials μ_s ist dann:

$$\mu_s = \mu_b - \mu_f \quad (1)$$

7.2.2 Auswertung der Abwitterung

Zu jedem Messzeitpunkt und für jeden Probekörper ist die Gesamtmenge des abgewitterten Materials m_n bezogen auf die Prüffläche nach dem n-ten Wechsel zu berechnen:

$$m_n = \frac{\sum \mu_s}{A} \quad (2)$$

m_n ist die Gesamtmenge des abgewitterten Materials bezogen auf die Prüffläche zum jeweiligen Prüftermin in g/m^2

μ_s ist die Masse des abgewitterten Materials zum jeweiligen Prüftermin mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01 \text{ g}$. Die Summe wird über alle Messungen bis zum n-ten Wechsel gebildet.

A ist die Größe der Prüffläche in m^2 . Sie wird auf der Basis der linearen Abmessungen berechnet. Diese werden durch den Mittelwert von mindestens zwei Messungen gerundet auf die nächsten 0,1 mm bestimmt.

Der Mittelwert und die Standardabweichung müssen bestimmt werden. Das Ergebnis muss auf Ausreißer überprüft werden.

7.3 Messung der Lösungsaufnahme

7.3.1 Messdurchführung

Nachdem das abgewitterte Material von der Probefläche entfernt worden ist, werden die Probekörper vertikal auf eine saugende Fläche (Labortuch) gelegt, um Wasser von der Testfläche ablaufen zu lassen. Die Seitenflächen und die obere Seite der Probekörper müssen vorsichtig mit einem Labortuch abgetrocknet werden. Um den Verlust von abgewittertem Material zu vermei-

den, wird die Waage mit dem aufgelegten Probentrageblech (Abschnitt 7.1) tariert und danach das Gewicht des Probekörpers auf dem Trageblech mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ g gemessen.

7.3.2 Auswertung der Flüssigkeitsaufnahme

Die Flüssigkeitsaufnahme eines jeden Probekörpers Δw_n nach dem n-ten Zyklus wird berechnet durch:

$$\Delta w_n = \frac{w_n - w_1 + \sum \mu_s}{w_0} \cdot 100 \quad (3)$$

Δw_n ist die Flüssigkeitsaufnahme eines jeden Probekörpers zum jeweiligen Prüftermin in M.-%

μ_s ist die Masse des abgewitterten Materials in g zum jeweiligen Prüftermin, gemessen mit einer Genauigkeit von 0,01 g. Die Summe wird über alle Messungen bis zum n-ten Zyklus gebildet.

w_0 ist die Referenzmasse eines jeden Probekörpers ohne die Masse der Versiegelung nach der Trockenlagerung in g.

w_1 ist die Masse eines jeden Probekörpers einschließlich der Versiegelungsmasse bevor die Vorsättigung beginnt in g.

w_n ist die Masse eines jeden Probekörpers zum jeweiligen Prüftermin in g.

Der Mittelwert und die Standardabweichung der Massenzunahme müssen ermittelt werden. Die Ergebnisse müssen auf Ausreißer überprüft werden.

7.4 Messung der Ultraschalllaufzeit

7.4.1 Messaufbau

Zur Messung der Ultraschalllaufzeit wird ein Behälter nach Abschnitt 4i) verwendet. Das Ankoppelungsmedium ist die verwendete Prüfflüssigkeit. Die Temperatur des Ankoppelungsmediums und des Probekörpers muss bei (20 ± 5) °C liegen.

Die Ultraschalllaufzeit wird mit einem Ultraschallmessgerät nach Abschnitt 4h) gemessen. Die Ultraschallprüfköpfe werden so angeordnet, dass die Achse der Durchschallungstrecke in einem Abstand von 35 mm parallel zur Prüffläche liegt. Der Behälter wird mit der Prüfflüssigkeit bis 10 mm oberhalb der Ultraschallprüfköpfe, jedoch nicht oberhalb der Oberkante des Probekörpers, befüllt. Die Oberseite der Probekörper muss unbedingt trocken bleiben.

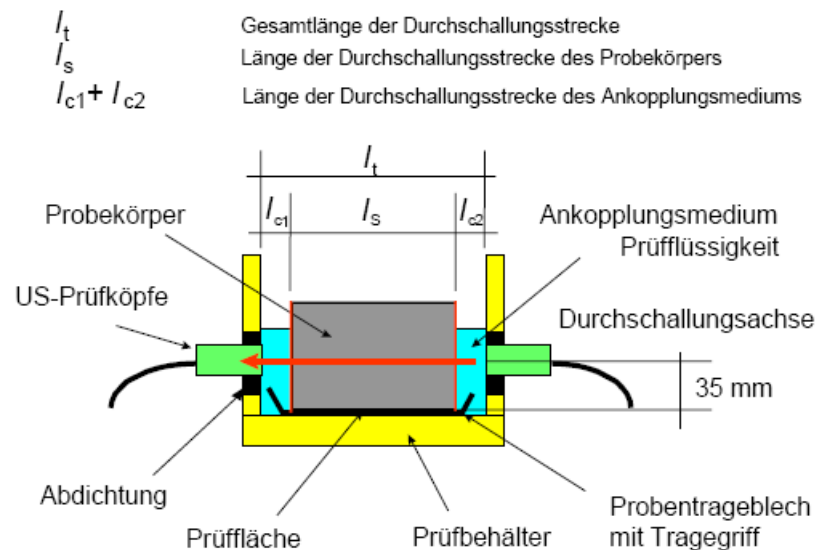


Abbildung 9: Messaufbau zur Bestimmung der Ultraschalllaufzeit /10/

7.4.2 Kalibrierung

Vor Beginn eines Messzyklus muss der Messaufbau wie folgt überprüft werden:

Referenzmessung mit Hilfe des Kalibrierprüfkörpers

Das Ultraschallmessgerät wird überprüft, indem die Messköpfe mit einem geeigneten Ankopplungsmedium (z.B. Fett) auf die Messmarken direkt an den Kalibrierprüfkörper angekoppelt werden. Die so gemessene Ultraschalllaufzeit muss mit der Angabe auf dem Kalibrierprüfkörper übereinstimmen. Bei Abweichungen ist eine Kalibrierung der Ultraschalllaufzeit (Einstellung entsprechend der Angabe auf dem Kalibrierprüfkörper) vorzunehmen.

Überprüfung der Vorlaufzeit

Der Kalibrierprüfkörper wird nach Abbildung 9 in dem Behälter angeordnet. Anschließend werden die Prüfköpfe so verschoben, dass die Wasservorlaufstrecke beidseitig jeweils 5 mm (± 1 mm) beträgt (Festlegung definierter Prüfkopfabstand l_t). Die Vorlaufzeit ergibt sich aus der Differenz der bei dieser Anordnung gemessenen Laufzeit und der am Kalibrierkörper ermittelten Laufzeit.

Alternativ kann ein definierter Prüfkopfabstand l_t festgelegt werden, indem die Prüfköpfe so verschoben werden, dass die aktuell gemessene Laufzeit der Laufzeit des Kalibrierprüfkörpers $+10 \mu\text{s}$ ($+ 0,1 \mu\text{s}$) entspricht.

7.4.3 Messdurchführung

Wie in Abbildung 9 gezeigt, wird der Probekörper auf dem Probentrageblech in den Prüfbehälter zur Ultraschalllaufzeitmessung positioniert. Die bei der ersten Messung auf dem Probekörper markierten Durchschallungsachsen müssen bei allen weiteren Untersuchungen eingehalten werden. An jedem Probekörper wird in zwei senkrecht zueinander stehenden Durchschallungsachsen die Laufzeit gemessen.

Bei rechteckigen Probekörpern müssen die Ankoppelungsstellen mittig zwischen den beiden Probekörperkanten liegen. Vor Beginn des kapillaren Saugens wird die zu durchschallende Probenlänge ohne die seitliche Abdichtung mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm gemessen. Das seitliche Abdichtungsmaterial der Probekörper wird bei dieser Länge nicht berücksichtigt. Nach der Vorlagerung und jeweils nach einer definierten Anzahl an Frost-Tau-Wechseln wird die kürzeste Ultraschalllaufzeit mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ μ s bestimmt. Bei der Messung ist der Probekörper geringfügig zu verschieben, wobei die kürzeste Laufzeit aufgezeichnet wird. Es ist darauf zu achten, dass an den Prüfköpfen und an den Seiten der Probekörper keine Luftblasen anhaften, sowie die seitliche Abdichtung fest am Probekörper anliegt. Während der Durchführung der Messabfolge muss ein Luftkontakt der Prüffläche so kurz wie möglich sein, ein Befeuchten der Oberseite der Probekörper ist zu vermeiden.

7.4.4 Auswertung des relativen dynamischen E-Moduls

Die Ultraschalllaufzeit im Ankopplungsmedium t_c wird aus der Laufstrecke im Ankopplungsmedium l_c und der Geschwindigkeit des Ultraschallsignals im Ankopplungsmedium v_c berechnet. Die Laufstrecke im Ankopplungsmedium l_c wird aus der Differenz des Prüfkopfabstands und der Probekörperabmessung l_s für jede Durchschallungsachse mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm bestimmt (Abbildung 9).

$$t_c = \frac{l_c}{v_c} \quad (4)$$

t_c ist die Durchschallungszeit im Ankopplungsmedium in μ s.

l_c ist die Durchschallungsstrecke aus $l_{c1} + l_{c2}$ im Ankopplungsmedium in mm.

v_c ist die Geschwindigkeit des Ultraschallsignals im Ankopplungsmedium. Sie kann bei $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ zu 1490 m/s angenommen werden.

Die Änderung der Durchschallungsgeschwindigkeit τ_n nach n Frost-Tau-Wechseln wird für jeden Probekörper und jede Durchschallungsachse getrennt berechnet:

$$\tau_n = \frac{t_{cs} - t_c}{t_n - t_c} \quad (5)$$

τ_n ist die relative Durchschallungsgeschwindigkeit.

t_{cs} ist die Gesamt-Durchschallungszeit nach kapillarem Saugen (cs) in μ s, vor dem ersten Frost-Tau-Wechsel in μ s.

t_n ist die Gesamt-Durchschallungszeit nach n Frost-Tau-Wechseln in μ s.

Anstelle der Durchschallungsgeschwindigkeit ist es zweckdienlich, die innere Schädigung durch den relativen dynamischen E-Modul $R_{u,n}$ aus der Ultraschalllaufzeit zu beschreiben. Bei der vorliegenden Prüfmethode wird der relative dynamische E-Modul nach n Frost-Tau-Wechseln mit folgender Beziehung berechnet:

$$R_{u,n} = \tau_n^2 \tag{6}$$

Der Mittelwert aus den Werten beider Durchschallungsachsen gibt den relativen dynamischen E-Modul des Probekörpers an. Es besteht die Option, den relativen dynamischen E-Modul in Prozent auszudrücken.

Der Mittelwert und die Standardabweichung des relativen dynamischen E-Moduls einer Prüferie müssen bestimmt werden. Das Ergebnis muss auf Ausreißer überprüft werden.

8 Bewertung Frost-Tausalz-Widerstand nach dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)

8.1 Maßgebendes Abnahmekriterium Abwitterung

Für Betone in Brücken und Ingenieurbauwerken an Bundesfernstraßen nach ZTV-ING, die bis auf die Anforderungen an die Mindestdruckfestigkeit die Anforderungen der DIN-Normen erfüllen, werden folgende Abnahmekriterien vorgeschlagen:

Tabelle 8.1 Abnahmekriterien Abwitterung modifiziertes CDF-Verfahren (XF2)

Abnahmekriterium	
1	2
Mittelwert der Prüferie	$\leq 1000 \text{ g/m}^2$ nach 14 Frost-Tau-Wechseln
95%-Quantile der Prüferie	$\leq 1300 \text{ g/m}^2$ nach 14 Frost-Tau-Wechseln

9 Bericht

Der Prüfbericht muss mindestens folgende Angaben enthalten:

1. Verweis auf diese Prüfempfehlung.
2. Bezeichnung, Herkunft, Abmessungen und Gewicht der Probekörper bei Probeneingang/nach Herstellung und nach Abschluss der Trocknung.
3. Auftraggeber und verantwortliche Stelle der Probekörperherstellung.
4. Hinweis auf Art der Prüfung, z.B. Eignungs- oder Güteprüfung.
5. Angaben zur Betonzusammensetzung und Ausgangsstoffe mit Produktbezeichnung.
6. Frischbetonkennwerte: Rohdichte, Verdichtungszeit und -maß, Luftgehalt.

7. Dauer der Wasser- und Trockenlagerung.
8. Zusammensetzung der Prüfflüssigkeit.
9. Angabe der durchgeführten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln.
10. Änderung des relativen dynamischen E-Moduls aus der Ultraschalllaufzeit für jeden Probekörper, sowie den Mittelwert und die Standardabweichung in %, gerundet auf die nächsten 1 % in Abhängigkeit der durchgeführten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln der Zwischenmessungen und der Endmessung.
11. Die Masse des abgewitterten Materials für jeden Probekörper sowie den Mittelwert und die Standardabweichung in g/m^2 gerundet auf die nächsten $1 \text{ g}/\text{m}^2$ in Abhängigkeit der durchgeführten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln der Zwischenmessungen und der Endmessung.
12. Die Masse der aufgesaugten Lösung während des kapillaren Saugens und während der Frost-Tau-Prüfung (Frostsaugen) für jeden Probekörper sowie den Mittelwert und die Standardabweichung in M-% und auf $0,01 \text{ M}\%$ gerundet in Abhängigkeit der durchgeführten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln der Zwischenmessungen und der Endmessung.
13. Augenscheinliche Beurteilung (Risse, Abwitterung von Gesteinskörnungspartikeln) vor Beginn und wenigstens nach Beendigung der Prüfung. In den Prüfbericht ist exemplarisch zumindest für einen repräsentativen Probekörper ein Foto der Prüffläche vor und nach Beendigung der Prüfung aufzunehmen.
14. Jegliche Abweichung von dem hier beschriebenen Verfahren.
15. Beurteilung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstands gemäß den Abnahmekriterien.

10 Anforderungen an das Labor und Rückstellproben

Es müssen mindestens folgende Unterlagen archiviert werden:

1. Prüfprotokoll und Prüfbericht
2. Temperaturkurven zum Ist-Temperaturverlauf während des Prüfzeitraums

Nach Vereinbarung sind die Rückstellproben zu lagern bzw. an den Auftraggeber zu übergeben.

11 Präzisionsdaten

11.1 Allgemeines

Das Minimum der Streuung wird durch die Wiederholpräzision angegeben, das Maximum durch die Vergleichpräzision. Die Präzision des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2) wurden in Anlehnung an die DIN ISO 5725 für Betone bestimmt, die dem Abschnitt 5.2.1 entsprechen.

11.2 Präzision für die Abwitterung des modifizierten CDF-Tests (XF2)

Die Präzisionsdaten für die Abwitterung sind in Tabelle 11.1 und 11.2 dargestellt. Die Präzisionsdaten gelten für Laborbetone, die nach Abschnitt 7.2 geprüft werden.

Die Präzision unter Wiederholbedingungen wurde durch 29 Prüfungen von 17 unterschiedlichen konstruktiven Betonen in einem Labor ermittelt. Die Präzision unter Vergleichbedingungen wurde durch einen Ringversuch ermittelt, an dem sich fünf deutsche Institute beteiligt hatten.

Tabelle 11.1: Wiederholpräzision für die mittlere aufsummierte Abwitterung mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)

	Wiederholpräzision	
	Standardabweichung	Variationskoeffizient
1	2	3
Funktionale Beziehung	$\sigma_r = 0,2918 \text{ s}^{0,893}$	$v_r = 0,2918 \text{ s}^{-0,107}$
1000 g/m ² mittlere Abwitterung	139 g/m ²	13,9 %
1500 g/m ² mittlere Abwitterung	200 g/m ²	13,3 %

Tabelle 11.2: Vergleichpräzision für die mittlere aufsummierte Abwitterung mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2)

	Vergleichpräzision	
	Standardabweichung	Variationskoeffizient
1	2	3
Funktionale Beziehung	$\sigma_R = 1,584 \text{ s}^{0,738}$	$v_R = 1,584 \text{ s}^{-0,262}$
1000 g/m ² mittlere Abwitterung	259 g/m ²	25,9 %
1500 g/m ² mittlere Abwitterung	350 g/m ²	23,3 %