



Fakultät Bauingenieurwesen

Fachbereich Baustoffkunde

Themensteller: Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. habil. Wolfgang Kusterle

Gegenüberstellung von Prüfverfahren zur Bestimmung der
Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit von Normalbetonen
unterschiedlicher Zusammensetzung

Bachelorarbeit

zur Erlangung des akademischen Grades

Bachelor of Engineering

Vorgelegt von:

Fabian Köppel

Matrikelnummer: 2642115

Wolfgang Klatt

Matrikelnummer: 2642013

Regensburg, März 2014

Kurzfassung

In der vorliegenden Bachelorarbeit werden verschiedene Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton miteinander verglichen. Der Vergleich umfasst die Verfahren CIF-, CDF-, Platten-, Würfel- und Balkenprüfung, die sowohl in der DIN CEN/TS 12390-9 bzw. im DIN-Fachbericht CEN/TR-15177, als auch in weiteren Regelwerken im In- und Ausland definiert sind.

Nach Beschreibung der theoretischen Grundlagen des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Angriffs und Vorstellung der ausgewählten Prüfverfahren, wird ein erster theoretischer Vergleich gezogen. Bei diesem werden zuerst für jedes Verfahren die Unterschiede zwischen den dafür bestehenden Regelwerken herausgearbeitet und danach die fünf Prüfungen umfassend miteinander verglichen. Unterschiede und Gemeinsamkeiten betreffen neben der Herstellung und Vorlagerung der Probekörper vor allem den Temperaturverlauf, die durchzuführenden Messverfahren und die Bewertungs- und Abnahmekriterien der einzelnen Prüfverfahren.

Im Zuge der Arbeit wurden die Verfahren CIF-, CDF- und Plattenprüfung im Hochschullabor mit vier verschiedenen Betonmischungen durchgeführt. Bei der anschließenden Bewertung anhand der erzielten Ergebnisse schnitten die CIF-Prüfung – aufgrund der Unsicherheiten bei der Bestimmung der inneren Gefügestörung – und die Plattenprüfung – aufgrund des verhältnismäßig großen Zeit- und Arbeitsaufwandes – schlechter ab, als die CDF-Prüfung, die sowohl zuverlässige als auch genaue Beurteilungen lieferte.

Abstract

In this bachelor thesis different test methods for the freeze-thaw respectively freeze-thaw and deicing salt resistance of concrete are compared with each other. The comparison comprises the methods CIF-, CDF-, slab-, cube- and beam-test, which are defined both in DIN CEN/TS 12390-9 respectively DIN-Fachbericht CEN/TR-15177 and other national and foreign regulations.

After describing the theoretic basics of freeze-thaw attack with or without deicing salts and introducing the chosen test methods, a first theoretic comparison is drawn. At first the differences between the regulations of each test method are addressed and afterwards the five test methods are compared comprehensively. The differences and similarities between the test methods concern the preparation and storage conditions of specimen, the applied temperature profile, the methods of measurement and the evaluation and acceptance criteria.

As part of this thesis the CIF-, CDF- and slab-test have been carried out in the laboratory of the university with four different concrete mixes. The adjoining evaluation on basis of the achieved results showed that the CIF-test – because of the uncertainties of measuring the internal damage – and the slab-test – because of the relatively high expenditure of time and labour - performed not as good as the CDF-test, which produced reliable and precise results.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Theoretische Grundlagen zum Frost- bzw. Frost-Tausalz-Angriff	2
2.1	Schadensbilder.....	2
2.2	Schadensursachen.....	2
2.2.1	Makroskopische Schadensmechanismen.....	4
2.2.1.1	Schichtenweises Gefrieren	4
2.2.1.2	Ungleiche Temperatúrausdehnungskoeffizienten.....	5
2.2.1.3	Temperatursturz/Schockfrieren.....	6
2.2.1.4	Unterkühlung.....	6
2.2.2	Mikroskopische Schadensmechanismen	6
2.2.2.1	Kapillarer Effekt.....	6
2.2.2.2	Hydraulischer Druck.....	7
2.2.2.3	Osmotischer Druck	7
2.2.2.4	Kristallisationsdruck	8
2.2.2.5	Mikroeislinnenbildung.....	8
2.2.2.6	Thermodynamisches Modell	9
3	Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes	9
3.1	Übersicht	9
3.2	Kurzbeschreibungen	10
3.2.1	Kurzbeschreibung CIF-Prüfung.....	11
3.2.2	Kurzbeschreibung CDF-Prüfung	16
3.2.3	Kurzbeschreibung Plattenprüfung.....	18
3.2.4	Kurzbeschreibung Würfelprüfung.....	22
3.2.5	Kurzbeschreibung Balkenprüfung	26
3.3	Theoretischer Vergleich	30
3.3.1	Vergleich der Regelwerke zu den jeweiligen Prüfungen.....	30
3.3.1.1	Vergleich der Regelwerke zur CIF-Prüfung	30
3.3.1.2	Vergleich der Regelwerke zur CDF-Prüfung.....	32
3.3.1.3	Vergleich der Regelwerke zur Plattenprüfung	34
3.3.1.4	Vergleich der Regelwerke zur Würfelprüfung	35
3.3.1.5	Vergleich der Regelwerke zur Balkenprüfung.....	35
3.3.2	Vergleich zwischen den Prüfverfahren.....	36
3.3.2.1	Probekörperform	36
3.3.2.2	Prüfgutmenge und Anzahl der Probekörper	37
3.3.2.3	Lagerungsbedingungen	37
3.3.2.4	Probekörpervorbereitung	37
3.3.2.5	Prüffläche.....	38
3.3.2.6	Erneute Sättigung der Probekörper	38
3.3.2.7	Prüfflüssigkeit während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung.....	39
3.3.2.8	Temperaturverlauf der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung	40
3.3.2.9	Ort der Temperaturmessung.....	41
3.3.2.10	Dauer eines Frost-Tau-Wechsel-Zyklus.....	41
3.3.2.11	Toleranzen des Temperaturverlaufs	42
3.3.2.12	Abkühlgeschwindigkeiten.....	42
3.3.2.13	Minimaltemperatur	43

3.3.2.14	Auftaugeschwindigkeit	44
3.3.2.15	Richtung des Wärmeflusses	45
3.3.2.16	Auslastung der Frosttruhe bzw. Frostkammer	45
3.3.2.17	Durchzuführende Messungen	46
3.3.2.18	Gesamtdauer der Prüfung	47
3.3.2.19	Expositionsklasse	48
3.3.2.20	Bewertungs- und Abnahmekriterium.....	48
4	Im Hochschullabor durchgeführte Prüfverfahren	50
4.1	Vorarbeiten.....	50
4.2	Untersuchte Betonserien.....	51
4.2.1	Zusammensetzung der untersuchten Betonserien	51
4.2.1.1	Serie 1: Nullbeton	52
4.2.1.2	Serie 2: LP-Beton.....	52
4.2.1.3	Serie 3: Beton mit Mikrohohlkugeln	53
4.2.1.4	Serie 4: Beton mit Faserpartikeln.....	53
4.2.2	Einschätzung der untersuchten Betonserien	54
4.3	Ergebnisse und Auswertung	56
4.3.1	Ergebnisse und Auswertung der CIF-Prüfung	56
4.3.1.1	Wasseraufnahme.....	57
4.3.1.2	Innere Gefügestörung	59
4.3.1.3	Flächenbezogene Abwitterung	60
4.3.1.4	Augenscheinprüfung	62
4.3.2	Ergebnisse und Auswertung der CDF-Prüfung.....	63
4.3.2.1	Wasseraufnahme.....	64
4.3.2.2	Flächenbezogene Abwitterung	66
4.3.2.3	Innere Gefügestörung	67
4.3.2.4	Augenscheinprüfung	69
4.3.3	Ergebnisse und Auswertung der Plattenprüfung.....	70
4.3.3.1	Flächenbezogene Abwitterung	71
4.3.3.2	Augenscheinprüfung	74
4.4	Praktischer Vergleich	75
4.4.1	Vor- und Nachteile der durchgeführten Prüfverfahren	76
4.4.1.1	bei der Herstellung der Probekörper.....	76
4.4.1.2	bei der erneuten Sättigung.....	76
4.4.1.3	beim Temperaturverlauf in der Prüftruhe	77
4.4.1.4	bei den regelmäßige Messungen.....	78
4.4.1.5	bei der Versuchsauswertung	79
4.4.2	Erkenntnisse aus der Beurteilung der untersuchten Betonserien	79
4.4.2.1	Beurteilung der untersuchten Betonserien.....	80
4.4.2.2	Zuverlässigkeit der verschiedenen Verfahren.....	81
4.4.3	Wertung der durchgeführten Prüfverfahren	82
4.4.3.1	Zeit und Arbeitsaufwand	83
4.4.3.2	Reproduzierbarkeit der Ergebnisse	83
4.4.3.3	Zuverlässigkeit der Beurteilung.....	84
5	Zusammenfassung und Schlusswort.....	84
6	Literaturverzeichnis	87
7	Anhangsverzeichnis.....	90

1 Einleitung

Ausreichender Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand spielt für die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen in vielen Anwendungsbereichen eine entscheidende Bedeutung. Der Frost-Tau-Angriff tritt bei Bauteilen auf, die frei der Witterung ausgesetzt sind, z. B. Fassadenelementen und Balkonbrüstungen, oder in der Wasser-Wechselzone von Süßwasser liegen, z. B. Ufermauern und Schleusen. Der wesentlich strengere Frost-Tausalz-Angriff betrifft vor allem Bauteile im Straßen- und Brückenbau, z. B. Betonfahrbahnen, Brückenkappen, Stützwände im Spritzwasserbereich, oder Bauteile im Meerwasserbereich, z. B. Kaimauern.

Der bei den unterschiedlichen Beanspruchungen verwendete Beton muss für die gewünschte Lebensdauer einen ausreichenden Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand aufweisen. Die für den Baustoff Beton in Deutschland maßgebende Norm DIN 1045-2 beschreibt Anforderungen an die Zusammensetzung, die Herstellung und den Einbau des Frischbetons, die ausreichenden Widerstand bei der jeweiligen Expositionsklasse gewährleisten. Dazu zählen die Einhaltung eines Mindestzementgehaltes, eines maximalen w/z-Wertes, einer Mindestdruckfestigkeitsklasse, eines Mindestluftporengehaltes und eines maximalen Mehlkorngeltes, sowie die Verwendung frost- bzw. frosttausalzbeständiger Zuschläge. Die ZTV-ING schreibt für den Festbeton zusätzlich die Einhaltung der beiden Luftporenkennwerte Mikroluftporengehalt und Abstandsfaktor vor. „Diese Festlegungen basieren auf umfangreichen und langjährigen Versuchs- und praktischen Erfahrungen des In- und des Auslandes“ [10; S.55].

Für Betone, deren Verhalten unter Frosteinwirkung unbekannt ist, d. h. Betone mit neuen Ausgangsstoffen oder Zusammensetzungen, sind Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes unumgänglich. Derartige Prüfverfahren wurden sowohl in Deutschland als auch in anderen Ländern in großer Zahl entwickelt, sodass es mittlerweile schwierig ist, den Überblick zu behalten.

Ziel dieser Arbeit ist es, verschiedene Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton zu vergleichen. Die Arbeit beschränkt sich dabei auf die fünf Prüfverfahren, die im DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 [11] und in der DIN CEN/TS 12390-9 [12] definiert sind. Dies sind die CIF- CDF-, Platten-, Würfel- und Balkenprüfung.

Zum besseren Verständnis der Prüfverfahren und deren Auswertung ist es zu Beginn erforderlich, sich mit den theoretischen Grundlagen des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Angriffs von Beton und den verschiedenen Schadensmechanismen auseinanderzusetzen.

Nach Vorstellung der fünf Prüfverfahren und Beschreibung der einzelnen Verfahrensschritte werden erste theoretische Vergleiche gezogen. Bei diesen werden zuerst für jedes Prüfverfahren die Unterschiede zwischen den dafür bestehenden Regelwerken herausgearbeitet und danach die fünf Prüfverfahren umfassend miteinander verglichen.

Im Zuge dieser Arbeit wurden drei der fünf zu vergleichenden Prüfverfahren im Hochschullabor durchgeführt. So wurde mittels CIF-, CDF- und Plattenprüfung der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand von vier unterschiedlichen Betonserien bestimmt.

Auf Grundlage der erzielten Ergebnisse und gesammelten Erfahrungen werden diese drei Prüfverfahren miteinander verglichen und bewertet. Für die Würfel- und Balkenprüfung wird aufgrund unserer fehlenden praktischen Erfahrungen keine Wertung abgegeben.

2 Theoretische Grundlagen zum Frost- bzw. Frost-Tausalz-Angriff

Zum besseren Verständnis der später beschriebenen Prüfverfahren sind zunächst die Schadensbilder und Schadensursachen, die während einer Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung im Beton auftreten, genauer zu erläutern.

2.1 Schadensbilder

Beim Frost- bzw. Frost-Tausalz-Angriff unterscheidet man die beiden Schadensbilder oberflächliche Abwitterung und tiefergehende innere Gefügestörung.

Als oberflächliche Abwitterung wird das Herauslösen oder Absprennen von kleinen Partikeln oder dünnen Schichten des Betons während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung bezeichnet. Zudem können lokale Abplatzungen über nicht beständigen oberflächennahen Zuschlagskörnern, sogenannte „Pop-Outs“, auftreten [5; S.370].

Die innere Gefügeschädigung ist von außen nicht sichtbar und kann lediglich durch Messungen nachgewiesen werden. Laut Wesche zeigt sich die innere Schädigung durch irreversible Dehnung, Abfall des Elastizitätsmoduls und Festigkeitsverlust [1; S.175]. Im Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen zum modifizierten CDF-Verfahren wird zusätzlich die Verminderung der Dichtigkeit der Betonrandzone gegen Schadstoffe als Folge der inneren Schädigung angeführt [8; S.17]. Die innere Gefügestörung beginnt mit Mikrorissen, die sich im weiteren Schadensverlauf ausbreiten. Erst im stark fortgeschrittenen Zustand sind „die Gefügeschädigungen durch Risse im Beton bzw. durch größere, schollige Abplatzungen der Betonrandzone sichtbar“ [5; S.371].

Grundsätzlich können beide Schadensbilder gleichzeitig auftreten [4; S.8], wobei beim Frost-Tausalz-Angriff die Abwitterung und beim reinen Frost-Angriff die innere Gefügestörung als Hauptschadensmerkmal in Erscheinung tritt.

2.2 Schadensursachen

Die wesentliche Ursache für Frostschäden ist die beim Gefrieren stattfindende neunprozentige Volumenvergrößerung des Wassers in den Poren eines Baustoffs. Gleichzeitig zieht sich der Baustoff infolge thermischer Dehnung zusammen. Es entsteht Druck in den

Poren, der die Porenwänden auf Zug beansprucht. Wird die Zugfestigkeit des Materials überschritten, kommt es zur Rissbildung.

Von entscheidender Bedeutung für den Frostangriff eines Betons ist dessen Sättigungsgrad, der folgendermaßen definiert ist [9; S.217]:

$$S = \frac{V_W}{V_P}$$

V_W verdunstbares Wasservolumen
 V_P offenes Porenvolumen

Das offene Porenvolumen V_P beinhaltet neben den Kapillarporen des Zementsteins auch noch eventuell vorhandene künstlich eingebrachte Luftporen, die Verdichtungsporen und die Eigenporen der Zuschläge. Bei einem Sättigungsgrad von 1 ist das gesamte Porenvolumen des Betons wassergefüllt.

Fagerlund hat herausgefunden, dass es einen kritischen Wassersättigungsgrad S_{krit} gibt, ab dem ein Beton bereits nach wenigen Frost-Tau-Wechseln geschädigt wird. Solange der tatsächliche Sättigungsgrad eines Betons unterhalb des kritischen Sättigungsgrades liegt, tritt auch durch wiederholte Frost-Tau-Wechsel kein wesentlicher Schaden auf. Der kritische Sättigungsgrad ist vom Porenvolumen und der Porengrößenverteilung abhängig und ist damit betonspezifisch.

Deshalb kann in der Praxis und im Versuch nur dann eine Schädigung auftreten, wenn der kritische Sättigungsgehalt des Betons überschritten wird. Dazu muss genügend Wasser von außen zur Verfügung stehen. Zur kapillaren Wasseraufnahme kommt bei der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung noch der Effekt des sogenannten Frostsaugens (siehe Kapitel 2.2.2.5) hinzu, der den Sättigungsgrad zusätzlich und meist über den kritischen Sättigungsgrad ansteigen lässt.

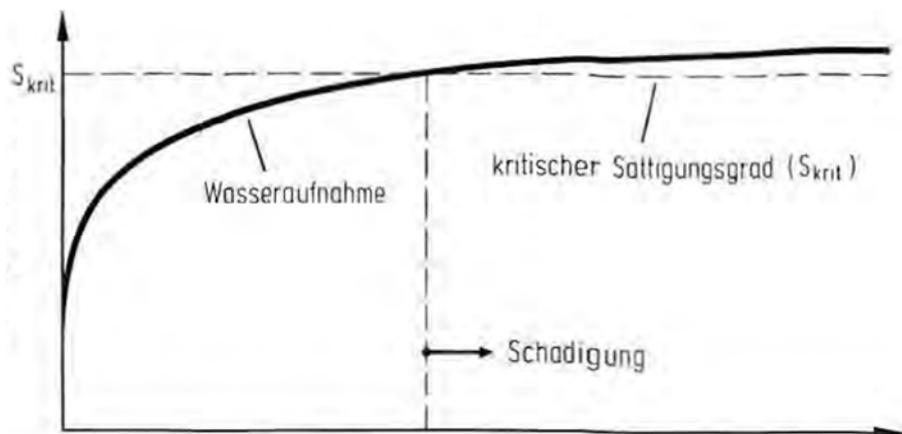


Bild 1: Wasseraufnahme des Betons und kritischer Sättigungsgrad [22; S.36]

Laut Wesche ist die Ausdehnung des Wassers in den Poren zwar die *wesentliche* Ursache; über die tatsächlich im Inneren des Betons ablaufenden Vorgänge besteht jedoch derzeit in der Forschung noch keine einheitliche Auffassung [4; S.12], zumal die verschiedenen Vorgänge parallel nebeneinander stattfinden können.

Grundsätzlich unterscheidet man zwischen makroskopischen und mikroskopischen Schadensmechanismen, die im nachfolgenden Diagramm dargestellt sind. Die mikroskopischen Effekte bewirken eine Veränderung innerhalb der Mikrostruktur des Betons und führen zu einem stärkeren Schadensbild als die makroskopischen Effekte, die Spannungen in den oberflächennahen Schichten erzeugen:

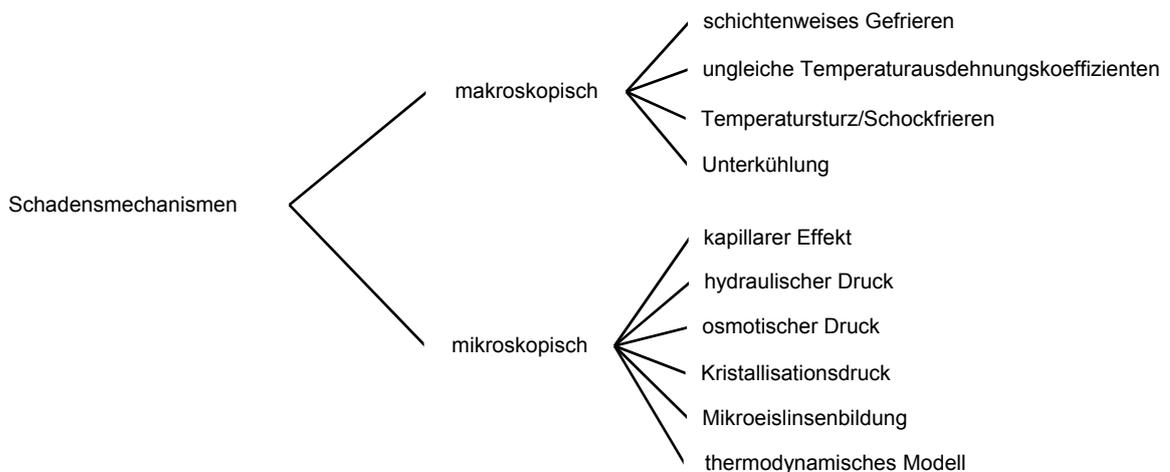


Diagramm 1: Übersicht makroskopische und mikroskopische Schadensmechanismen [7; S.13]

Im Folgenden werden die einzelnen, in Diagramm 1 aufgegliederten Schadensmechanismen genauer erläutert.

2.2.1 Makroskopische Schadensmechanismen

2.2.1.1 Schichtenweises Gefrieren

Das Phänomen des schichtenweisen Gefrierens tritt nur bei Bauteilen auf, die bei einem Frost-Tau-Angriff zusätzlich Streu- oder Meersalz ausgesetzt sind. Als Tausalz wird in Deutschland in erster Linie NaCl verwendet, in geringerem Umfang auch MgCl₂ oder CaCl₂ [4; S.16].

Die nachfolgend beschriebenen Zusammenhänge werden in Bild 2 veranschaulicht. Auf der linken Seite sind jeweils Querschnitte durch ein Betonbauteil dargestellt, auf der rechten Seite die dazugehörigen Verläufe der Gefrier- und der Betontemperatur in Abhängigkeit von der Tiefe. Durch den sogenannten Huckepacktransport stellt sich im Beton im Laufe der Zeit eine von außen nach innen abnehmende Salzkonzentration ein. Da die Frosteinwirkung auf ein Betonbauteil in der Regel von einer Seite her stattfindet, ergibt sich ein von innen nach

außen abfallender Temperaturverlauf (gestrichelte Kurve). Der Gefrierpunkt der Porenlösung nimmt von innen nach außen entsprechend der Konzentration an Taumitteln ab (durchgehende Linie). Im rechten oberen Diagramm erkennt man eine Überschneidung der Gefrierpunktkurve mit der tatsächlichen Temperaturkurve. Dies hat zur Folge, dass zu einem bestimmten Zeitpunkt des Gefriervorgangs das Wasser an der Oberfläche und in einer tieferen Schicht gefroren ist, während in einer Zwischenschicht die Porenlösung noch flüssig ist. Bei weiterer Abkühlung friert auch diese Zwischenschicht. Die Volumenvergrößerung der gefrierenden Porenlösung und der nicht mehr mögliche Druckabbau in benachbarte Poren führen zu inneren makroskopischen Spannungen und zum Absprengen der oberen Betonschicht.

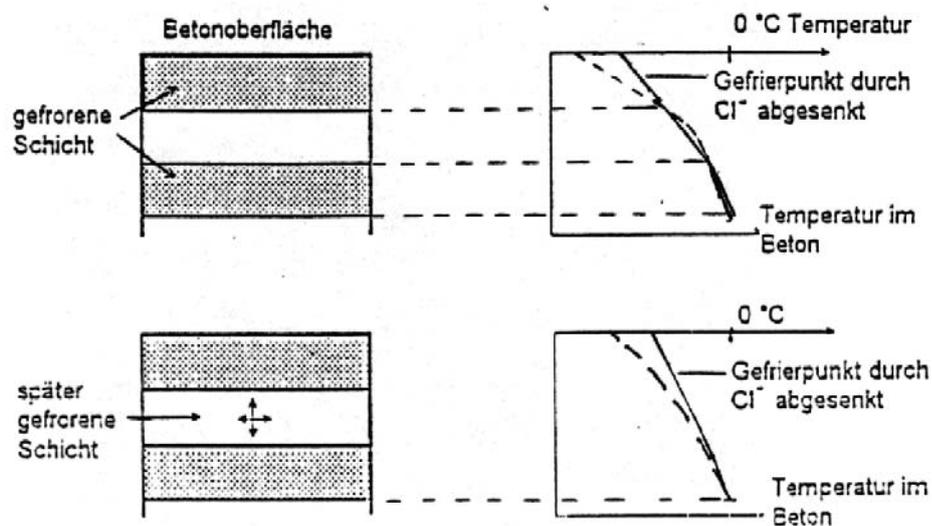


Bild 2: Ablauf des Gefrierens von Beton bei Taumittelnwirkung [6; S.85-98]

2.2.1.2 Ungleiche Temperatúrausdehnungskoeffizienten

„Während aus heutiger Sicht die Initiierung eines Frost-Tausalz-Schadens durch unterschiedliche Temperatúrausdehnungskoeffizienten der Betonkomponenten Zementstein und Zuschlag im Normalbeton nahezu ausgeschlossen werden kann, muss dagegen den unterschiedlichen α_T -Werten von Zementstein und Eis Beachtung geschenkt werden“ [4; S.12]. Das in größeren Poren gebildete Eis zieht sich bei weiterem Abkühlen stärker zusammen, als der umgebende Zementstein. Noch nicht gefrorenes Wasser kleinerer Poren (siehe Kapitel 2.2.2.1) diffundiert in die entstehenden Hohlräume und gefriert dort. Beim Erwärmen weist das Eis wiederum eine größere Expansion auf als der Zementstein, sodass Drücke auf die Porenwandungen entstehen [5; S.370]. Der Wärmeausdehnungskoeffizient des noch nicht geschmolzenen Eises ist laut Wesche [1; S.176] ca. 4 bis 10-mal so groß wie derjenige poröser Baustoffe. „Bereits bei Temperaturdifferenzen von 15 K können Zugbeanspruchungen auf die Porenwandungen auftreten, die im Bereich der Betonzugfestigkeit liegen“ [4; S.12].

2.2.1.3 Temperatursturz/Schockfrieren

Dieser Schädigungsmechanismus ist nur beim Frostangriff unter Einwirkung von Taumitteln von Bedeutung, da durch dessen Einsatz die zum Auftauen benötigte Schmelzwärme in erster Linie dem Beton entzogen wird. Infolge des schnellen Wärmeentzugs treten im Beton Zugspannungen auf, die bei Überschreitung der Betonzugfestigkeit zu Abplatzungen führen können. Bei einer Betonstraße beispielsweise kann dieser Mechanismus theoretisch dann auftreten, wenn Taumittel auf eine bereits vorhandene Eis- oder Schneeschicht gestreut wird oder Schnee auf eine bereits mit Taumittel behandelte Betonoberfläche bzw. tausalzhaltigen Beton fällt. Durch alleinige Abkühlung von tausalzhaltigem Schneematsch oder Wasser auf der Straße tritt kein Temperaturschock mehr auf.

Da sich das Taumittel bei den in Kapitel 3 beschriebenen Prüfverfahren mit tausalzhaltiger Prüflösung bereits in der Prüfflüssigkeit befindet und nicht erst während der Frostphase aufgestreut wird, kann das Schockfrieren dort nicht als Schadensursache angeführt werden. Dies wäre beim Salzaufstreuverfahren des Vereins deutscher Zementwerke [10; S.81] der Fall, das in dieser Arbeit jedoch nicht näher behandelt wird.

2.2.1.4 Unterkühlung

Von Unterkühlung spricht man, wenn eine Flüssigkeit unter ihren Gefrierpunkt abgekühlt wird, ohne dass ein Phasenübergang von flüssig zu fest stattfindet. Die Flüssigkeit befindet sich dann in einem metastabilen Zustand. Dieser Effekt kann auch beim Porenwasser im Beton auftreten. „Der Phasenübergang Eis - Wasser wird verursacht durch kleine Eiskeime, die sich infolge statistischer Gesetzmäßigkeiten im unterkühlten Wasser bilden und auflösen [...]. Obwohl die Verhinderung des Gefrierens von Porenwasser schon bei 0 °C zunächst eine positive Auswirkung der Unterkühlung auf den Frostwiderstand des Betons impliziert, ist als unmittelbare Folge großer Unterkühlungseffekte die Gefahr der so genannten spontanen Eisbildung gegeben. Durch rasches Ableiten der Kristallationswärme des Eises vom sehr kalten Beton gefriert das unterkühlte Porenwasser in kürzester Zeit [...]. Dieses Phänomen bewirkt eine Verhinderung der Wasserumverteilung in den Poren und führt zu einer Verstärkung der beim Frost-Tausalz-Angriff unter stetiger Eisbildung auftretenden Schädigungsmechanismen“ [4; S.12].

2.2.2 Mikroskopische Schadensmechanismen

2.2.2.1 Kapillarer Effekt

Der Gefrierpunkt des Wassers im Inneren des Betons sinkt mit abnehmendem Porenradius. Die Porenlösung verhält sich nicht mehr wie freies Wasser mit einem Gefrierpunkt von 0 °C, sondern gehorcht oberflächenphysikalischen und oberflächenchemischen Gesetzen.

Setzer konnte beispielsweise für Kapillarporen der Größe 1 μm bis 1 mm einen Gefrierpunkt von bis zu $-20\text{ }^\circ\text{C}$ feststellen, für Gelporen $< 1\text{ nm}$ sogar $-90\text{ }^\circ\text{C}$ [4; S.9].

Die Wassermoleküle erfahren in einer Pore Oberflächenkräfte, durch die sich die Moleküle nicht mehr frei bewegen können. Da für die Bildung von Eis eine Bewegung der Moleküle in eine geordnete Gitterstruktur nötig ist, diese Bewegung jedoch durch die Oberflächenkräfte behindert wird, bleibt das Porenwasser bei Abkühlung zunächst flüssig und friert erst, wenn der entsprechend dem Porenradius erniedrigte Gefrierpunkt unterschritten wird. Somit bildet sich beim Gefrieren in den größeren Poren schon Eis, während sich in den kleineren Poren noch Wasser befindet. Dieses Wasser ist ungefroren und aufgrund von Unterdrücken – erzeugt durch die Dampfdruckdifferenz zwischen Wasser und Eis – dazu bestrebt, zu den größeren Poren zu wandern. „Auf welche Weise dieser mikroskopische Vorgang zur Gefügeschädigung führt, wird in der Literatur kontrovers diskutiert“ [4; S.13]. Powers vertritt die Theorie, dass das Wasser zu den größeren Poren transportiert wird, dort gefriert und zunehmenden Druck auf die umgebenden Porenwände verursacht. Litvan hingegen geht davon aus, dass der Transportvorgang des Gelporenwassers durch lange Wege behindert oder unterdrückt wird, wodurch Eigenspannungen entstehen und somit das Gefüge geschädigt wird [4; S.13].

2.2.2.2 Hydraulischer Druck

Die „Hydraulic Pressure Theorie“ wurde bereits 1945 von Powers aufgestellt: Wenn das Eis an der Oberfläche gefriert, dichtet es diese nach außen hin ab. Das noch ungefrorene Wasser wird durch die kapillare Saugwirkung nach innen in noch wasserfreie Poren gedrückt. Dies führt zu hydraulischen Druckspannungen auf die Porenwandungen, die bei Überschreitung der Zugfestigkeit aufreißen [2; S.95]. „Je länger der Weg des Wassers bis zu einer, die Spannungen abbauenden Luftpore ist, desto größer wird der hydraulische Druck“ [7; S.14].

2.2.2.3 Osmotischer Druck

Das Porenwasser im Beton enthält stets gelöste Stoffe, in besonderem Maße bei Bauteilen, die mit Taumitteln behandelt werden. Zunächst gefriert das Wasser in den größeren Poren in reinem Zustand, was zu einer Anreicherung an gelösten Stoffen im verbleibenden Wasser dieser Poren führt. In den kleineren, ungefrorenen Poren hat die Lösung jedoch noch die gleiche Konzentration, sodass in benachbarten Poren Ungleichgewicht besteht [1; S.176]. Durch dieses Ungleichgewicht ist das Porenwasser der kleineren Poren bestrebt zu den größeren Poren zu wandern, in denen sich neben dem bereits gebildeten Eis noch die Restlösung mit höherer Konzentration an gelösten Stoffen befindet. Der Zementstein setzt dabei als „semipermeable Scheidewand“ [4; S.13] der Bewegung des Porenwassers einen Widerstand entgegen. Dadurch entstehen osmotische Drücke, die zwar als primäre

Schadensursache ausgeschlossen werden, jedoch einen unterstützenden Beitrag zur Wasserumverteilung beim in Kapitel 2.2.2.1 erklärten, kapillaren Effekt leisten [4; S.13].

2.2.2.4 Kristallisationsdruck

Kristallisieren die gelösten Stoffe aus einer Porenlösung, so entstehen Druckspannungen auf die angrenzenden Porenwandungen. Zu einer Kristallisation kommt es allerdings nur bei einer übersättigten Lösung mit einer hohen Konzentration gelöster Stoffe. „Da jedoch sowohl in der Praxis als auch im Labor nur Tausalze geringer Konzentrationen eingesetzt werden, wird diese Möglichkeit in der Literatur als Ursache für Gefügeschäden ausgeschlossen“ [4; S.13].

2.2.2.5 Mikroeislinnenbildung

Das Modell der Mikroeislinnenbildung bzw. der Mikroeislinnenpumpe wurde von Setzer [4; S.14] entwickelt und erklärt ein weiteres, bei Frost-Tau-Wechseln auftretendes Phänomen, das zu Schäden des Betons führen kann.

Die Effekte ungefrorenes Gelporenwasser, Frostschrindungen und Frostsaugen sind hoch komplex und finden im submikroskopischen Bereich statt. Sie beruhen auf der Annahme, dass in der nanoporösen Gelstruktur des Zementsteins flüssiges Wasser, Wasserdampf und Eis gleichzeitig als stabile Phasen existieren. Dieses Phänomen wird als „Drei-Phasen-Gleichgewicht“ bezeichnet.

Beim Gefrieren kühlt der Beton von außen nach innen ab und bildet Eis. Aufgrund des in Kapitel 2.2.2.1 beschriebenen Effektes der Gefrierpunktserniedrigung bleibt das Gelwasser zuerst noch ungefroren. Damit auch bei weiterem Abkühlen das Gelwasser ungefroren und das Drei-Phasen-Gleichgewicht erhalten bleibt, entstehen im Porenwasser mit fallender Temperatur zunehmend Unterdrücke. Diese führen zu einem Zusammenziehen der umgebenden Zementsteinmatrix, einem Effekt, der als Gefrierkontraktion bezeichnet wird. Das Gelporenwasser wird herausgepresst und gefriert an den Eislinnen größerer Poren.

Beim Auftauen des Betons kommt es zu einer Ausdehnung der Zementsteinmatrix. Durch diese Expansion wird Porenvolumen frei, das danach strebt, rasch mit Wasser aufgefüllt zu werden. Da das ursprüngliche Gelporenwasser nach der Gefrierkontraktion noch am Eis größerer Poren angefroren ist, kann dieses nicht sofort zurücktransportiert werden. Das benötigte Wasser muss somit von äußeren Quellen stammen. „Das Drei-Phasen-System wirkt somit als Frostpumpe, durch die der Sättigungsgrad im Beton kontinuierlich ansteigt. Wird eine schädigende Sättigung erreicht, kommt es aufgrund der neunprozentigen Volumenausdehnung des Eises zur einer Zerstörung der Betonmatrix“ [4; S.15].

2.2.2.6 Thermodynamisches Modell

Beim Thermodynamischen Modell gefriert, außer einer absorbierten Wasserschicht auf der Partikeloberfläche, auch das Gelporenwasser. Dadurch entstehen zusätzliche, mit kleiner werdendem Porenradius zunehmende Oberflächenspannungen. „Die daraus resultierenden Druckunterschiede zwischen eisgefüllten Poren unterschiedlicher Größe können erhebliche Spannungen im Mikrogefüge des Zementsteines erzeugen“ [7; S.16].

Zusammenfassend ist festzustellen, dass es eine Vielzahl unterschiedlicher Parameter gibt, die beim Frost- bzw. Frost-Tausalz-Angriff zusammenwirken und zu oberflächlicher Abwitterung bzw. innerer Gefügestörung führen können.

Allgemein gilt, dass durch den Einsatz von Taumitteln der Frostangriff wesentlich verstärkt wird. Neben den bereits in den vorangegangenen Kapiteln beschriebenen Effekten kommt es aufgrund der hygroskopischen Wirkung von Taumitteln zusätzlich zu einer Erhöhung des Sättigungsgrades im Beton [2; S.380] und damit zu ungünstigeren Bedingungen bei der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung.

Um Betone auf ihre Frost- und Frost-Tausalz-Beständigkeit überprüfen zu können, müssen die in der Praxis stattfindenden Schadensmechanismen in geeignete Laborversuche übertragen werden. Im folgenden Kapitel werden unterschiedliche Prüfverfahren vorgestellt und miteinander verglichen.

3 Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes

Wie bereits in der Einleitung erwähnt, beschränkt sich diese Arbeit auf die fünf Prüfverfahren, die im DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 [11] und in der DIN CEN/TS 12390-9 [12] definiert sind. Dies sind die CIF- CDF-, Platten-, Würfel- und Balkenprüfung.

In diesem Kapitel wird zuerst eine Übersicht über die Regelwerke gegeben, die dieser Arbeit zu Grunde liegen. Im Anschluss daran werden die fünf ausgewählten Prüfverfahren genauer dargestellt. Ein theoretischer Vergleich schließt dieses Kapitel ab. Der häufig vorkommende Begriff Frost-Tau-Wechsel wird im weiteren Verlauf der Arbeit vereinfachend mit FTW abgekürzt.

3.1 Übersicht

Die fünf Prüfverfahren der DIN CEN/TS 12390-9 und des DIN-Fachberichts CEN/TR 15177 sind in der nachfolgenden Darstellung in die drei Kategorien Eintauch-, Überschichtungs- [7; S.20] und Untertauchverfahren eingeteilt. Diese geben an, wie die Probekörper im Versuch mit der Prüflösung beaufschlagt werden.

Die fünf ausgewählten Prüfverfahren sind jedoch nicht nur in der DIN CEN/TS 12390-9 und dem DIN-Fachbericht CEN/TR 15177, sondern auch in weiteren Regelwerken, zum Teil mit Abweichungen, beschrieben. Diese sind das Merkblatt Frostprüfung von Beton der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW-Merkblatt „Frostprüfung“) [13], die Empfehlung für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren der Bundesanstalt für Straßenwesen (modifiziertes CDF-Verfahren) [8], die Regel des österreichischen Normeninstituts ONR 23303 [14] und die schwedische Norm SS 13 72 44 [15].

Im rechten Teil der nachfolgenden Übersicht sind die, den Prüfverfahren zugrunde liegenden Regelwerke angegeben.

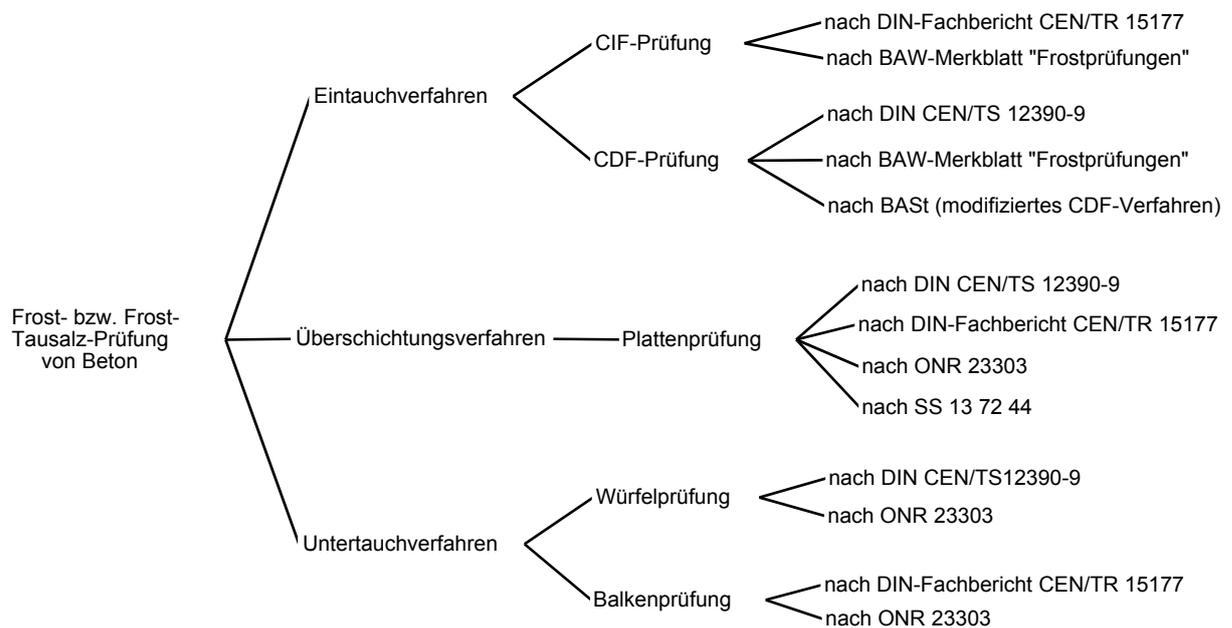


Diagramm 2: Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton

3.2 Kurzbeschreibungen

In diesem Kapitel werden die Prüfverfahren der DIN CEN/TS 12390-9 und des DIN-Fachberichts CEN/TR 15177 in Wort und Bild beschrieben. Nach einer groben Zusammenfassung des jeweiligen Versuchsablaufs, werden die relevanten Verfahrensschritte genauer erläutert.

Es sei darauf hingewiesen, dass der Normentext teilweise wörtlich übernommen und durch eigene Anmerkungen ergänzt wurde. Auf die Wiedergabe sämtlicher Festlegungen, Toleranzen und Alternativverfahren der Regelwerke wird verzichtet. Beim jeweils letzten Schritt des Versuchsablaufs – der Versuchsauswertung – sind nur die maßgeblichen Berechnungsformeln angegeben, die für die Beurteilung der Beständigkeit eines geprüften Betons verwendet werden. Entsprechende Grenzwerte für die Beurteilung sind in Kapitel 3.3.2.19 angegeben.

3.2.1 Kurzbeschreibung CIF-Prüfung

Mithilfe der CIF-Prüfung wird die innere Gefügestörung eines Betons durch wiederholte Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung ermittelt. Die Abkürzung CIF steht für „Capillary suction, Internal damage and Freeze thaw test“ [16, S.2], zu Deutsch: „Frost-Tau-Wechsel-Prüfung nach kapillarem Saugen mit Bestimmung der inneren Schädigung“.

Das maßgebend von M. J. Setzer und V. Hartmann an der Universität Duisburg-Essen entwickelte und 1989 patentierte Verfahren [17] wurde 2004 vom RILEM TC 176-IDC als RILEM-Empfehlung veröffentlicht und 2006 in den DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 aufgenommen. Der CIF-Test nach dem von der Bundesanstalt für Wasserbau zuletzt 2012 herausgegebenen BAW-Merkblatts „Frostprüfung“ „ist im Wesentlichen eine Übersetzung der RILEM-Empfehlung des CIF-Tests [...] und wurde in einigen Punkten an die Anforderungen des Wasserbaus angepasst“ [13; S.1].

Die CIF-Prüfung nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 [11] gliedert sich in folgende Schritte:

- Schritt 1: Betonieren von Würfelhälften des zu prüfenden Betons
- Schritt 2: Nasslagerung der Probekörper
- Schritt 3: Trockenlagerung der Probekörper
- Schritt 4: Abdichten der Seitenflächen der Probekörper
- Schritt 5: Kapillares Saugen von Prüfflüssigkeit (entionisiertes Wasser)
- Schritt 6: Bestimmung des Ausgangswertes der inneren Gefügestörung
- Schritt 7: Start der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung in der Frosttruhe
- Schritt 8: Messverfahren nach bestimmten Anzahlen an FTW:
 - Bestimmung der Abwitterung
 - Bestimmung der inneren Gefügestörung
 - Wiegen der Probekörper (Wasseraufnahme durch Frostsaugen)
- Schritt 9: Versuchsauswertung nach 56 FTW

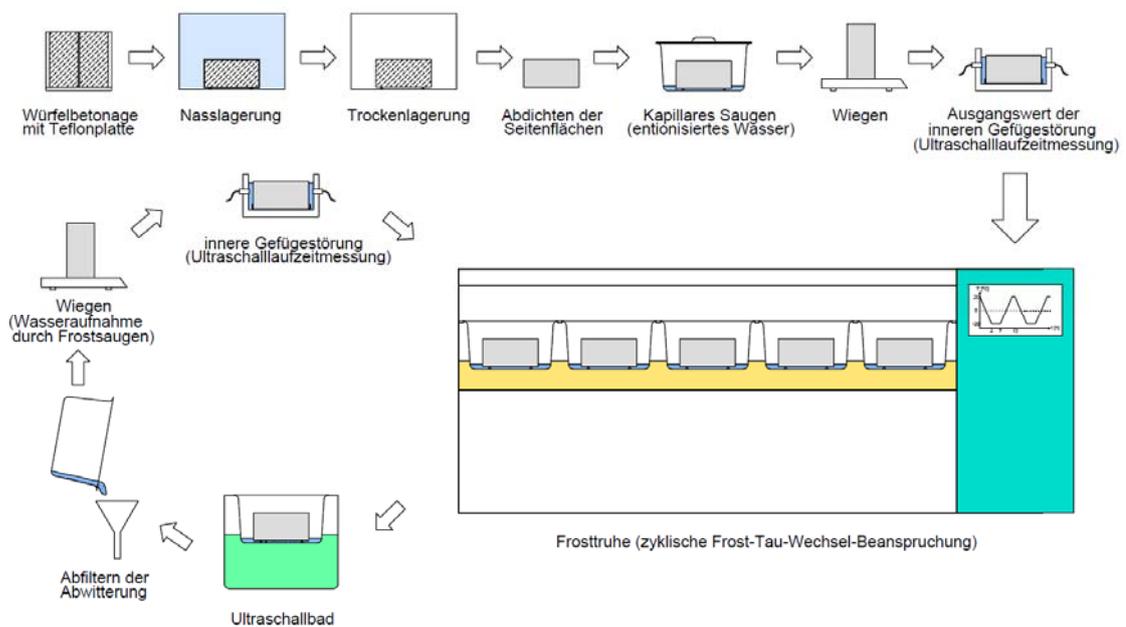


Bild 3: Schematischer Ablauf der CIF-Prüfung nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15177

Schritt 1: Betonieren von Würfelhälften des zu prüfenden Betons

Die Herstellung der Probekörper erfolgt in Würfelformen mit 150 mm Kantenlänge. Die Formen werden nur leicht mit Trennmittel behandelt, vor dem Befüllen mit einem saugfähigen Handtuch abgewischt und durch eine mittig angeordnete PTFE-Platte in zwei Hälften geteilt. Die PTFE-Platte darf nicht mit Trennmittel behandelt werden, weil die daran erzeugte Betonoberfläche später als Prüffläche dient.

Anmerkung: Ein unterschiedlich starker Auftrag von Trennmittel je nach prüfender Person würde zu unterschiedlichem Saugverhalten und damit zu unterschiedlichem Frost-Tau-Widerstand führen.

Da für die Prüfung mindestens fünf Würfelhälften als Probekörper zu verwenden sind, müssen drei geteilte Würfel betoniert werden.

Der Beton wird auf einem Vibrationstisch verdichtet. Die erhärtenden Betonwürfelhälften werden einen Tag bei 20 °C und 95 % relativer Luftfeuchte gelagert und dann ausgeschalt.

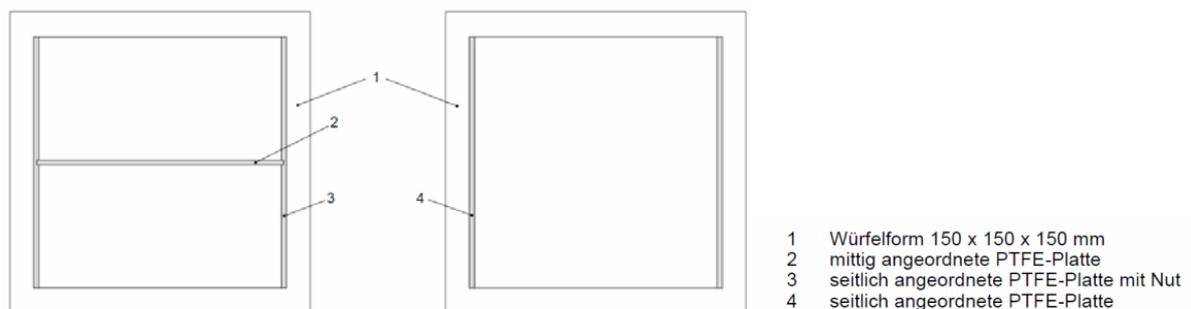


Bild 4: Mögliche Anordnungen der PTFE-Platten bei der Probekörperherstellung (Draufsicht)

Schritt 2: Nasslagerung der Probekörper

Die als Probekörper verwendeten Hälften werden 6 Tage unter Wasser gelagert.

Anmerkung: Es besteht die Möglichkeit beim Betonieren der Würfel zwei PTFE-Platten an den gegenüberliegenden Innenseiten der Würfelform anzubringen. Die so erhaltenen Betonwürfel werden am 7. Tag nach der Herstellung aus dem Wasserbad genommen und mit Hilfe einer Diamantsäge mittig durchgesägt, sodass zwei Würfelhälften entstehen mit jeweils einer an der PTFE-Platte geschalteten Fläche.

Schritt 3: Trockenlagerung der Probekörper

Im Alter von 7 Tagen bzw. nach dem Zersägen der Würfel beginnt die Trockenlagerung der Probekörper in einer Klimakammer bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit.

Schritt 4: Abdichten der Seitenflächen der Probekörper

Zwischen dem 21. und 26. Tag nach der Herstellung werden die Seitenflächen der Probekörper umlaufend mit Aluminiumbutylfolie beklebt oder mit Epoxidharz versiegelt. Anschließend werden die Probekörper in die Trockenlagerung zurückgelegt.

Schritt 5: Kapillares Saugen von Prüfflüssigkeit

Nach 28 Tagen werden die Probekörper aus der Klimakammer entnommen und in Edelstahlbehältern mit der Prüffläche nach unten zeigend auf 5 mm hohe Abstandshalter gestellt. In die Behälter wird 10 mm hoch entionisiertes Wasser als Prüfflüssigkeit eingefüllt, wobei die Oberseite der Probekörper dabei möglichst nicht befeuchtet werden soll. Während der 7-tägigen Wasseraufnahme wird der Füllstand regelmäßig kontrolliert und bei Bedarf Prüfflüssigkeit nachgefüllt. Die Probekörper werden regelmäßig gewogen, sodass Informationen zur Gewichtszunahme während des kapillaren Saugens gewonnen werden können.

Schritt 6: Bestimmung des Ausgangswertes der inneren Gefügestörung

Nach dem 7-tägigen Saugen bzw. vor der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung wird für jeden Probekörper der Ausgangswert der inneren Gefügestörung bestimmt. Referenzverfahren ist die Bestimmung der Ultraschalllaufzeit.

Anmerkung: Weitere Erklärungen zur Ultraschalllaufzeit und zum relativen dynamischen Elastizitätsmodul als Maß für die innere Gefügestörung siehe Anhang 2.

Dazu werden die Probekörper in ein mit Prüfflüssigkeit gefülltes Messbad gestellt und mittels eines kalibrierten Ultraschallmessgerätes die Ultraschalllaufzeit durch die beiden Mittelachsen des Probekörpers bestimmt. Die dabei erhaltenen Messwerte dienen als Ausgangswerte für die Bestimmung des relativen dynamischen Elastizitätsmoduls.

Danach kommen die Probekörper zurück in die Edelstahlbehälter, in die wieder 10 ± 1 mm entionisiertes Wasser als Prüfflüssigkeit eingefüllt wird.

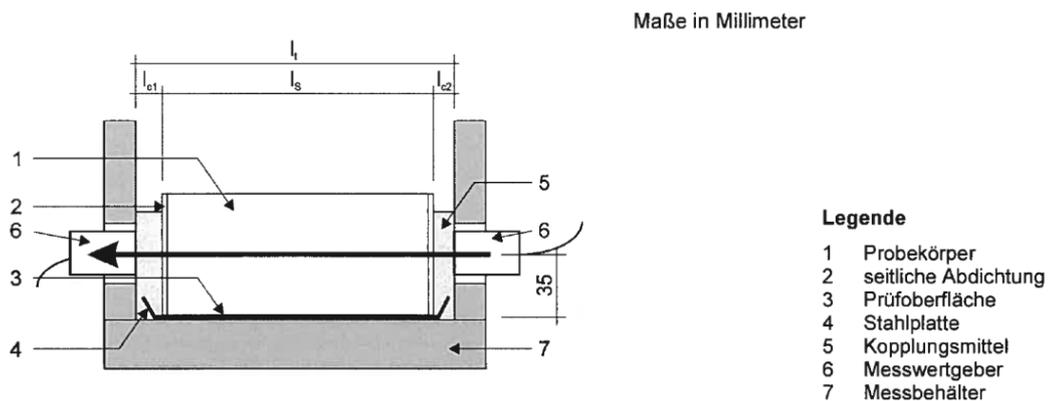


Bild 5: Prüfanordnung zur Messung der Ultraschalllaufzeit durch den Betonprobekörper [11]

Schritt 7: Start der Frost-Tau-Wechsel-Bbeanspruchung in der Frosttruhe

Die Edelstahlbehälter mit den in Prüfflüssigkeit eintauchenden Probekörpern werden in die Frosttruhe eingelagert und wiederholten Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt. Ein Frost-Tau-Wechsel dauert 12 h und wird von der Frosttruhe automatisch durchgeführt. Insgesamt werden 56 Frost-Tau-Wechsel durchgeführt. Der Temperaturverlauf sieht folgendermaßen aus, wobei die Referenztemperatur in der Kühlflüssigkeit unter dem Boden des Prüfbehälters in der Mitte der Frosttruhe gemessen wird (siehe Bild 7 Nr. 7):

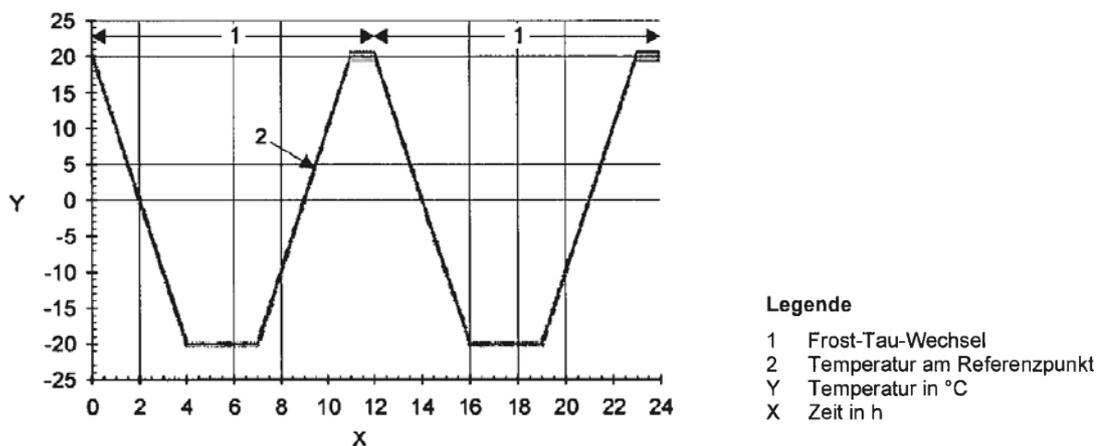


Bild 6: Temperaturverlauf in der Kühlflüssigkeit am Referenzpunkt in Abhängigkeit von der Zeit [11]

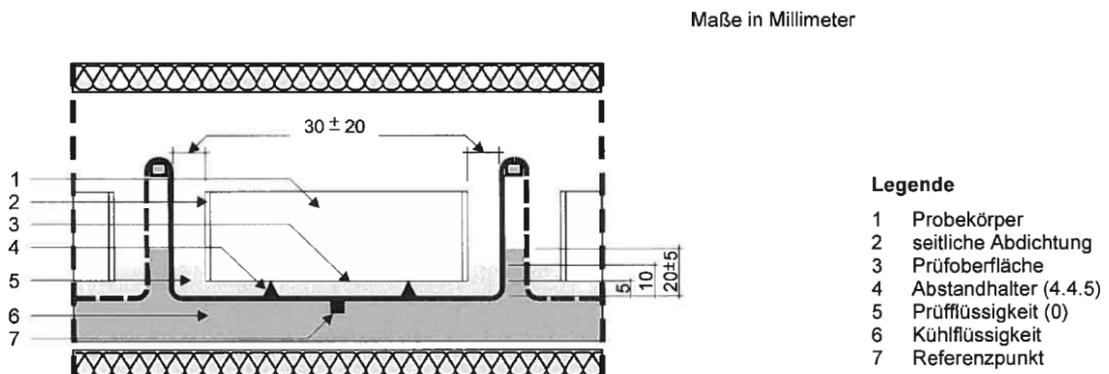


Bild 7: Prüfanordnung in der Mitte der Frosttruhe während der Frost-Tau-Wechsel [11]

Schritt 8: Messverfahren nach bestimmten Anzahlen an FTW

Nach 7 ± 1 , 14 ± 1 , 28 ± 1 , 42 ± 1 und 56 Frost-Tau-Wechseln wird, sobald die Temperatur der Frosttruhe über 15 °C liegt, sowohl die Menge der Abwitterung von der Prüffläche als auch der Messwert für die innere Gefügestörung bestimmt. Die Frosttruhe läuft dabei weiter, sodass für die Messungen ein Zeitfenster von ca. 2 h zur Verfügung steht.

Anmerkung: Die Menge der Abwitterung wird bei der CIF-Prüfung mitbestimmt. Diese wird jedoch nicht wie bei der CDF-Prüfung als maßgebendes Bewertungskriterium verwendet, sondern zur Bestimmung der Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung (siehe Schritt 9).

Die Edelstahlbehälter werden einzeln aus der Frosttruhe entnommen und für 3 min in ein Ultraschallbad gestellt. Dadurch wird das noch an der Prüffläche befindliche Abwitterungsmaterial abgelöst. Die Prüfflüssigkeit mit dem abgewitterten Material wird durch geeignete Papierfilter gefiltert, die anschließend in einem Trockenofen getrocknet werden. Die leeren Filter sind vorher zu wiegen.

Die Probekörper selbst werden nach dem Ultraschallbad allseitig mit einem saugfähigen Laborhandtuch abgetrocknet und gewogen. Dies dient zur Bestimmung der Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel.

Daraufhin wird die Ultraschalllaufzeit als Messwert für die innere Gefügestörung bestimmt.

Die Probekörper werden anschließend in die Edelstahlbehälter zurückgelegt, neue Prüfflüssigkeit wird eingefüllt und die Behälter in die Frosttruhe zurückgestellt.

Schritt 9: Versuchsauswertung nach 56 Frost-Tau-Wechseln

Der Wert der inneren Gefügestörung $RDM_{UPPT,n}$ nach n Frost-Tau-Wechseln wird für jede Messung und jeden Probekörper als prozentualer Anteil nach folgender Gleichung berechnet:

$$RDM_{UPPT,n} = \left(\frac{t_{t,n}}{t_{t,0}} \cdot \frac{t_{t,0} \cdot l_{t,0} - t_{cm,0} \cdot l_{t,0} + t_{cm,0} \cdot l_s}{t_{t,n} \cdot l_{t,n} - t_{cm,n} \cdot l_{t,n} + t_{cm,n} \cdot l_s} \right)^2 \cdot 100 [\%]$$

RDM_{UPPT}	relativer dynamischer Elastizitätsmodul [%]
t_t	Gesamtübertragungszeit (durch Probekörper und Kopplungsmittel) [μ s]
t_{cm}	Übertragungszeit im Behälter durch das Kopplungsmittel ohne Probekörper [μ s]
l_t	Abstand der Messwertgeber untereinander [mm]
l_s	Länge des Probekörpers vor dem Versiegeln der seitlichen Flächen [mm]
Index n	Ergebnis nach n Frost-Tau-Wechseln
Index 0	Ausgangswert nach der kapillaren Wasseraufnahme

Die Masse des abgewitterten Materials μ_s nach n Frost-Tau-Wechseln wird für jede Messung und jeden Probekörper nach folgender Gleichung berechnet:

$$\mu_s = \mu_b - \mu_f \text{ [g]}$$

μ_s	Masse des getrockneten abgewitterten Materials [g]
μ_b	Masse des Filters mit dem getrockneten abgewitterten Material [g]
μ_f	Masse des leeren, getrockneten Filters [g]

Für die Beurteilung der inneren Gefügestörung sind Daten über die Wasseraufnahme nützlich. Diese wird als Änderung der Masse w_n nach n Frost-Tau-Wechseln in Prozent nach folgender Gleichung berechnet:

$$w_n = \frac{m_{s,n} - m_{s,1} + \mu_{s,n}}{m_{s,0}} \cdot 100 \text{ [M.-\%]}$$

w_n	Wasseraufnahme nach n Frost-Tau-Wechseln [%]
$m_{s,n}$	Masse des Probekörpers nach n Frost-Tau-Wechseln [g]
$m_{s,1}$	Masse des Probekörpers und des Abdichtungsmaterials vor der erneuten Sättigung [g]
$\mu_{s,n}$	Gesamtmasse des abgewitterten Materials nach n Frost-Tau-Wechseln [g]
$m_{s,0}$	Masse des Probekörpers ohne das Abdichtungsmaterial vor der erneuten Sättigung [g]

3.2.2 Kurzbeschreibung CDF-Prüfung

Mithilfe der CDF-Prüfung wird die oberflächliche Abwitterung eines Betons durch wiederholte Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung ermittelt. Die Abkürzung CDF steht für „Capillary suction of Deicing solution and Freeze thaw test“ (Kapillares Saugen von Taumittellösung und Frost-Tau-Test)“ [16; S.2].

Wie das oben bereits genannte CIF-Verfahren, ist auch diese Prüfung maßgeblich von M. J. Setzer, Professor an der Universität Duisburg-Essen, entwickelt und 1989 patentiert worden [17]. Im Jahr 1996 wurde der CDF-Test vom RILEM TC 117-FDC als RILEM-Empfehlung veröffentlicht und 2006 in die Vornorm DIN CEN/TS 12390-9 aufgenommen. Der CDF-Test liegt wie auch der CIF-Test im BAW-Merkblatt „Frostprüfung“ in leicht modifizierter Form vor [13; S.1].

Die CDF-Prüfung nach DIN CEN/TS 12390-9 [12] gliedert sich in folgende Schritte:

- Schritt 1: Betonieren von Würfelhälften des zu prüfenden Betons
- Schritt 2: Nasslagerung der Probekörper
- Schritt 3: Trockenlagerung der Probekörper
- Schritt 4: Abdichten der Seitenflächen der Probekörper
- Schritt 5: Kapillares Saugen von Prüfflüssigkeit (3 %ige NaCl-Lösung)
- Schritt 6: Start der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung in der Frosttruhe
- Schritt 7: Bestimmung der Abwitterung nach bestimmten Anzahlen an FTW
- Schritt 9: Versuchsauswertung nach 28 FTW

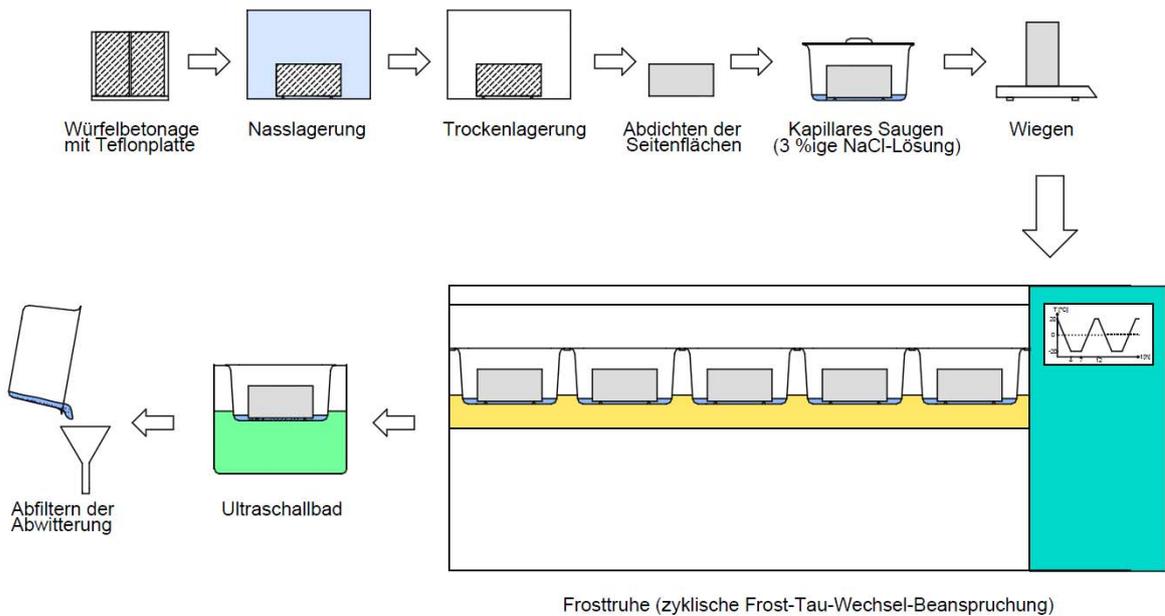


Bild 8: Schematischer Ablauf der CDF-Prüfung nach DIN CEN/TS 12390-9

Schritte 1 bis 4: Probekörperherstellung

Die Herstellung der Probekörper verläuft analog zur obengenannten CIF-Prüfung.

Schritt 5: Kapillares Saugen von Prüfflüssigkeit

Auch dieser Schritt verläuft analog zur CIF-Prüfung. Einziger Unterschied ist die Prüfflüssigkeit. Für den CDF-Test wird Taumittellösung, bestehend aus 97 % Leitungswasser und 3 % NaCl, verwendet.

Schritt 6: Start der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung in der Frosttruhe

Vor Beginn der Frost-Tau-Wechsel werden lose anhaftende Partikel sowie Schmutz von den Oberflächen der Probekörper durch eine Behandlung im Ultraschallbad entfernt. Daraufhin werden die Edelstahlbehälter mit den Probekörpern ohne Deckel in die Frosttruhe eingelagert und wiederholt Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt. Insgesamt werden 28 Frost-Tauwechsel durchgeführt. Der Temperaturverlauf in der Frosttruhe entspricht dem der CIF-Prüfung (siehe S.14).

Schritt 7: Bestimmung der Abwitterung nach bestimmten Anzahlen an FTW

Nach 4 ± 1 , 6 ± 1 , 14 ± 1 , 28 Frost-Tau-Wechseln wird, sobald die Temperatur der Frosttruhe über 15 °C liegt, für jeden Probekörper die Menge der Abwitterung von der Prüffläche bestimmt. Die Prüfflüssigkeit mit dem abgewitterten Material wird durch geeignete Papierfilter gefiltert, die anschließend in einem Trockenofen getrocknet werden.

Schritt 8: Versuchsauswertung nach 28 Frost-Tau-Wechseln

Die flächenbezogene Gesamtmenge an abgewittertem Material S_n nach n Frost-Tau-Wechseln wird für jede Messung und jeden Probekörper nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$m_{s,n} = m_{s,before} + (m_{s+f} - m_f) \text{ [g]}$$

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \cdot 10^3 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$$

$m_{s,n}$ Gesamtmasse des getrockneten abgewitterten Materials nach n Frost-Tau-Wechseln [g]

$m_{s,before}$ Gesamtmasse des getrockneten abgewitterten Materials bei der vorherigen Messung [g]

m_{s+f} Masse des getrockneten Filters mit dem abgewitterten Material [g]

m_f Masse des getrockneten Filters [g]

A Prüfoberfläche [mm²]

Anmerkung: Es ist zu beachten, dass in der CIF-Prüfung (siehe Kapitel 3.2.1) $m_{s,n}$ nicht für die Masse des getrockneten abgewitterten Materials steht, sondern für die Masse des Probekörpers nach n Frost-Tau-Wechseln. Die Masse des getrockneten abgewitterten Materials wird bei der CIF-Prüfung mit μ_s abgekürzt.

3.2.3 Kurzbeschreibung Plattenprüfung

Mithilfe der Plattenprüfung wird die Abwitterung eines Betons durch wiederholte Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung ermittelt. Die Plattenprüfung stammt ursprünglich aus Schweden und wurde in die DIN CEN/TS 12390-9 mit geringen Änderungen aufgenommen. Die schwedische Norm SS 13 72 44 hat wiederum mit der Ausgabe 4 vom Februar 2005 Änderungen der prEN 12390-9 übernommen.

Des Weiteren ist in der ONR 23303 das Plattenprüfverfahren zur Prüfung der Expositionsklassen XF2 und XF4 enthalten.

Auch im DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 ist die Plattenprüfung enthalten. Hier wird jedoch nicht die Abwitterung, sondern die innere Gefügestörung eines Betons durch wiederholte Frost-Tau-Wechsel ermittelt. Im Folgenden wird nur die Plattenprüfung nach DIN CEN/TS 12390-9 beschrieben.

Die Plattenprüfung nach DIN CEN/TS 12390-9 gliedert sich in folgende Schritte:

- Schritt 1: Betonieren von Würfeln des zu prüfenden Betons
- Schritt 2: Nasslagerung der Betonwürfel
- Schritt 3: Trockenlagerung der Betonwürfel
- Schritt 4: Sägen von Probekörpern aus den Würfeln
- Schritt 5: Versiegeln der Probekörper
- Schritt 6: Kapillares Saugen (entionisiertes Wasser)
- Schritt 7: Dämmen der Probekörper

Schritt 8: Start der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung in der Frosttruhe mit Prüfflüssigkeit: entionisiertes Wasser oder 3 %ige NaCl-Lösung

Schritt 9: Bestimmung der Abwitterung nach bestimmten Anzahlen an FTW

Schritt 10: Versuchsauswertung nach 56 FTW

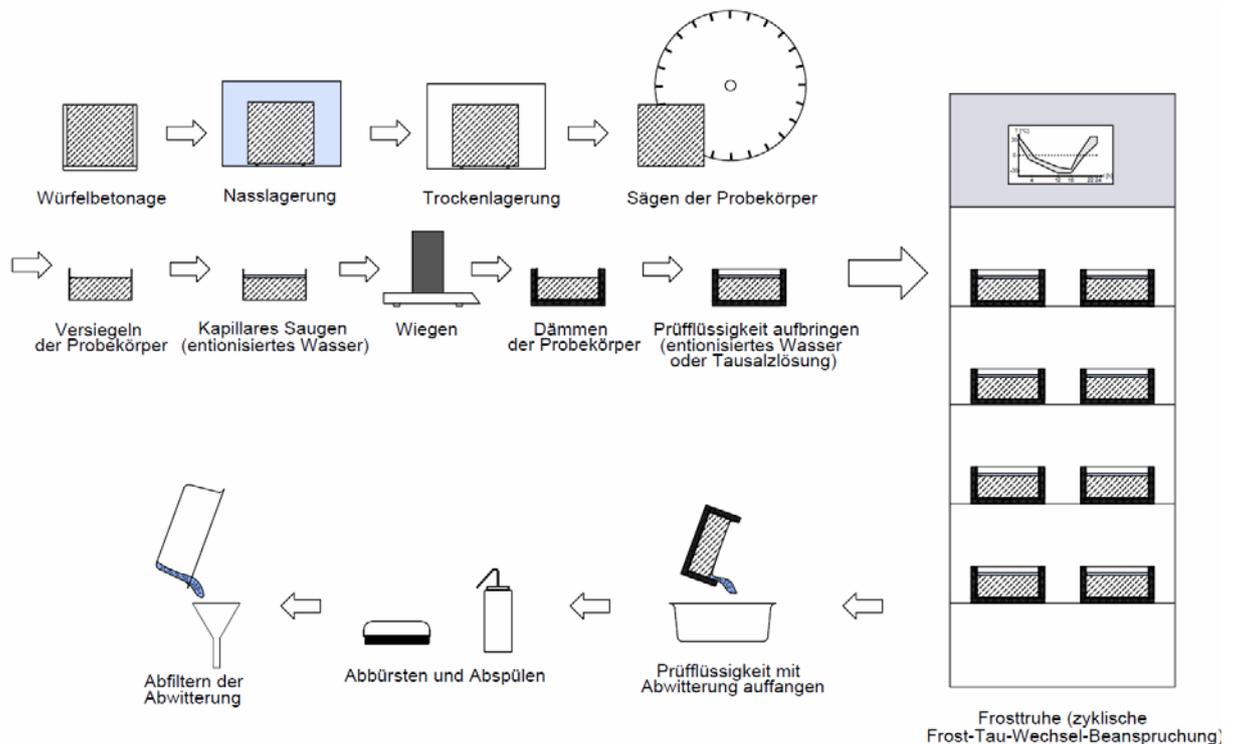


Bild 9: Schematischer Ablauf der Plattenprüfung nach DIN CEN/TS 12390-9

Schritt 1: Betonieren von Würfeln des zu prüfenden Betons

Die Herstellung der für die Probekörper erforderlichen Betonwürfel erfolgt in Formen mit 150 mm Kantenlänge, wobei für die Prüfung mindestens vier Würfel erforderlich sind. Der Beton ist auf einem Vibrationstisch zu verdichten. Die erhärtenden Betonwürfel werden vor Verdunstung geschützt und nach einem Tag ausgeschalt.

Schritt 2: Nasslagerung der Betonwürfel

Die Betonwürfel werden 6 Tage unter Wasser gelagert.

Schritt 3: Trockenlagerung der Betonwürfel

Im Alter von 7 Tagen werden die Betonwürfel dem Wasserbad entnommen und in die Klimakammer bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit gestellt.

Schritt 4: Sägen von Probekörpern aus den Würfeln

Nach 21 Tagen ist aus jedem Würfel ein 50 mm dicker Probekörper mittels Diamantsäge rechtwinklig zur Herstellungsoberfläche so herauszuschneiden, dass eine der Sägeflächen durch die Mitte des Würfels verläuft. Die erhaltenen Probekörper werden zur weiteren Trockenlagerung in die Klimakammer gestellt.

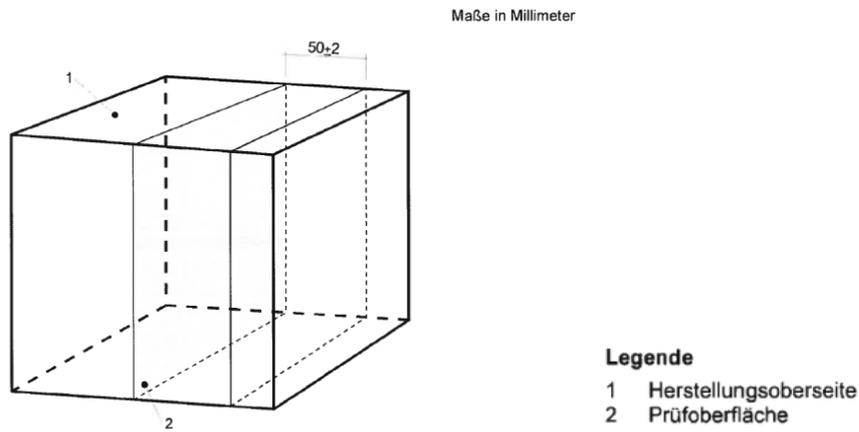


Bild 10: Lage des Probekörpers und der Prüffläche im gesägten Würfel [12]

Schritt 5: Versiegeln der Probekörper

Nach 25 Tagen werden die Probekörper erneut aus der Klimakammer entnommen und alle Oberflächen außer der Prüffläche mit einer Gummischicht beklebt. Die Gummischicht der Seitenflächen muss ca. 20 mm über die Prüffläche hinausragen. Die Kehle zwischen Beton und Gummischicht wird mit einem Klebstoffstreifen oder mit Silikon verfügt.

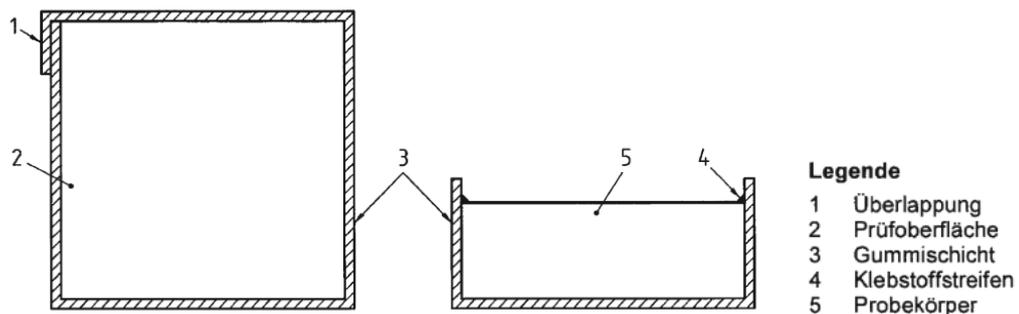


Bild 11: Versiegeln des Probekörpers mit Gummiband und Klebstoff-/Silikonstreifen [12]

Schritt 6: Kapillares Saugen (entionisiertes Wasser)

Nach 28 Tagen wird zur erneuten Sättigung der Probekörper eine 3 mm tiefe Schicht entionisiertes Wasser auf die Prüffläche gegeben, unabhängig davon, ob die spätere Prüfflüssigkeit entionisiertes Wasser oder dreiprozentige TausalzLösung ist. Die Schichtdicke muss 72 Stunden konstant gehalten werden.

Anmerkung: Da der Flüssigkeitsstand von 3 mm wegen der Oberflächenspannung des Wassers nur schwer nachgemessen werden kann, werden für eine Prüffläche von 150 x 150 mm vereinfacht 67 ml Flüssigkeit eingefüllt ($15 \times 15 \times 0,3 \text{ cm}^3 \approx 67 \text{ cm}^3$).

Schritt 7: Dämmen der Probekörper

Vor der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung werden alle Gummiflächen mit Polystyrol-Schaumstoff beklebt.

Schritt 8: Start der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung in der Frosttruhe

Es wird eine 3 mm tiefe Schicht Prüfflüssigkeit bestehend aus entionisiertem Wasser oder dreiprozentiger Tausalzlösung auf die Prüffläche gegeben. Die Prüfflüssigkeit wird durch eine Polyethylenfolie vor Verdunstung geschützt.

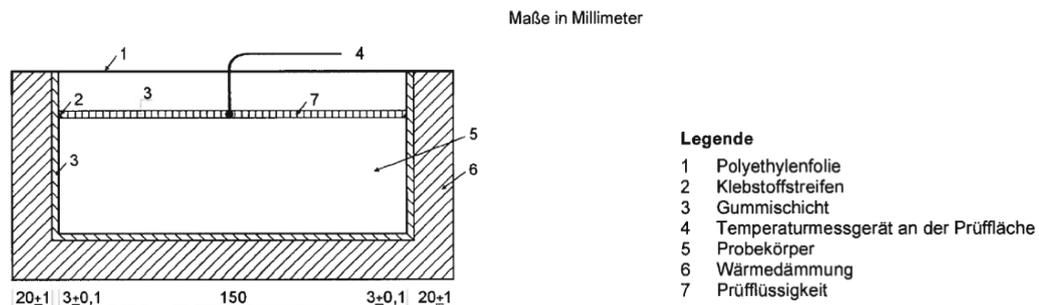


Bild 12: Prüfanordnung der Probekörper während der Beanspruchung in der Frosttruhe [12]

Anschließend werden die Probekörper in die Frosttruhe eingelagert und wiederholt Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt. Insgesamt werden 56 Frost-Tau-Wechsel mit nachfolgend dargestelltem Temperaturverlauf durchgeführt. Die Temperatur wird in der Mitte der Prüfoberfläche in der Prüfflüssigkeit bei mindestens einem Probekörper kontinuierlich gemessen.

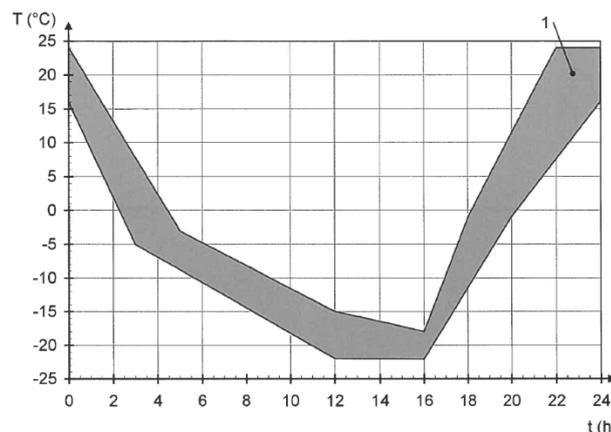


Bild 13: Temperaturverlauf am Mittelpunkt der Prüfoberfläche in Abhängigkeit von der Zeit [12]

Schritt 9: Bestimmung der Abwitterung nach bestimmten Anzahlen an FTW

Nach 7 ± 1 , 14 ± 1 , 28 ± 1 , 42 ± 1 und 56 Frost-Tau-Wechseln wird während der Phase, in der die Prüfflüssigkeit aufgetaut ist, für jeden Probekörper die Menge der Abwitterung von der Prüffläche bestimmt. Dazu wird das abgewitterte Material je Probekörper abgebürstet, mit einer Sprühflasche abgespült und in einem Behälter aufgefangen. Im Anschluss wird die Flüssigkeit im Behälter durch Papierfilter abgesehen und die Behälter mit den zugehörigen Filtern in einem Trockenschrank bis zur Massenkonstanz getrocknet.

Anmerkung: Die Filter sind bereits vor dem Abfiltrieren im getrockneten Zustand zu wiegen, sodass die Masse der Abwitterung nicht durch die Ausgleichsfeuchte des Filters verfälscht wird.

Schritt 10: Versuchsauswertung nach 56 Frost-Tau-Wechseln

Die flächenbezogene Gesamtmenge an abgewittertem Material S_n nach n Frost-Tau-Wechseln wird für jede Messung und jeden Probekörper nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$m_{s,n} = m_{s,before} + (m_{v+s(+f)} - m_{v(+f)}) \text{ [g]}$$

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \cdot 10^3 \left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$$

$m_{s,n}$ Gesamtmasse des getrockneten abgewitterten Materials nach n Frost-Tau-Wechseln [g]

$m_{s,before}$ Gesamtmasse des getrockneten abgewitterten Materials bei der vorherigen Messung [g]

$m_{v+s(+f)}$ Masse des Behälters mit dem getrockneten abgewitterten Material (und des Filters) [g]

$m_{v(+f)}$ Masse des getrockneten Filters [g]

S_n Masse des getrockneten abgewitterten Materials bezogen auf die Prüffläche nach dem n -ten Frost-Tau-Wechsel $\left[\frac{\text{kg}}{\text{m}^2} \right]$

A Prüfoberfläche vor dem Auftragen des Klebstoffstreifens [mm²]

3.2.4 Kurzbeschreibung Würfelprüfung

Mithilfe der Würfelprüfung wird die oberflächliche Abwitterung eines Betons durch wiederholte Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung ermittelt. Die Würfelprüfung wurde ursprünglich von E. Siebel und J. Bonzel beim Verein Deutscher Zementwerke e.V. (VDZ) entwickelt und in betontechnischen Berichten des VDZ veröffentlicht [10; S.153-158]. In der Literatur findet man deshalb häufig die Bezeichnung VDZ-Verfahren oder VDZ-Würfelverfahren [7; S.20]. Die Würfelprüfung findet sich in weiterentwickelter Form im Heft 422 des DAfStb [3] und nach aktuellem Normenstand in der DIN CEN/TS 12390-9.

Ferner wird in der ONR 23303 das Würfelprüfverfahren zur Prüfung der Expositionsklasse XF1 verwendet.

Die Würfelprüfung nach DIN CEN/TS 12390-9 [12] gliedert sich in folgende Schritte:

Schritt 1: Betonieren von Würfeln des zu prüfenden Betons

Schritt 2: Nasslagerung der Betonwürfel

Schritt 3: Trockenlagerung der Betonwürfel

Schritt 4: Kapillares Saugen (entionisiertes Wasser oder 3 %ige NaCl-Lösung)

Schritt 5: Start der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung in der Frosttruhe
mit Prüfflüssigkeit: entionisiertes Wasser oder 3 %ige NaCl-Lösung

Schritt 6: Bestimmung der Abwitterung nach bestimmten Anzahlen an FTW

Schritt 7: Versuchsauswertung nach 56 FTW

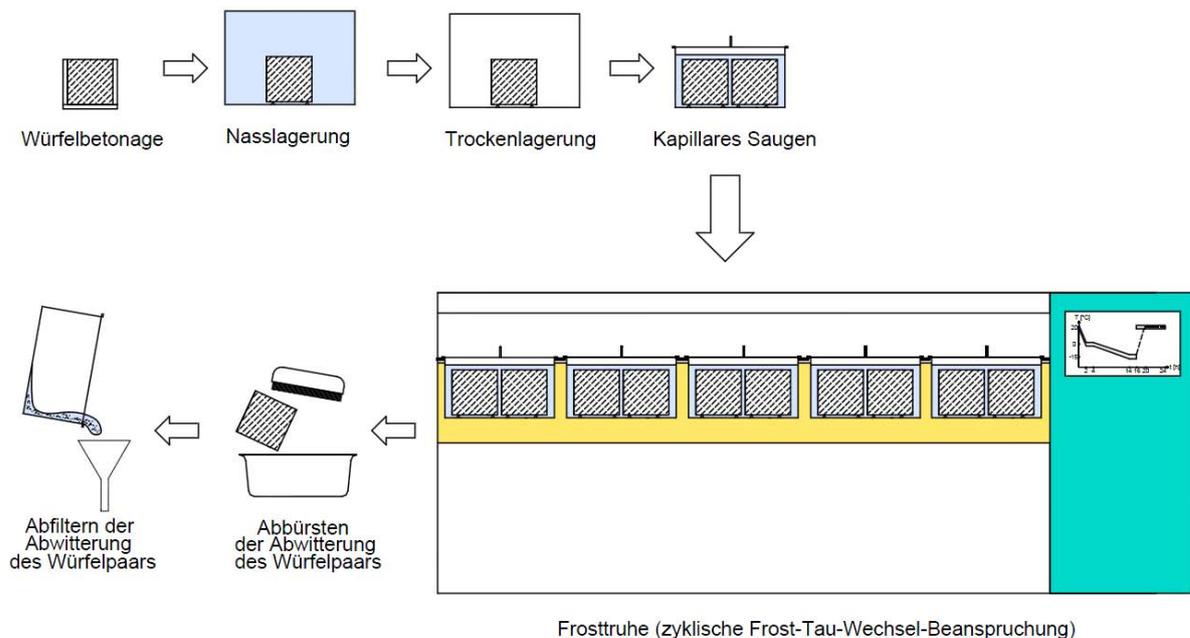


Bild 14: Schematischer Ablauf der Würfelprüfung nach DIN CEN/TS 12390-9

Schritt 1: Betonieren von Würfeln des zu prüfenden Betons

Die Herstellung der Betonwürfel erfolgt in Formen mit 100 mm Kantenlänge, wobei für die Prüfung mindestens vier Würfel erforderlich sind. Die Formen werden nur leicht mit Trennmittel behandelt und vor dem Befüllen mit einem trockenen Tuch abgewischt. Der Beton ist auf einem Vibrationstisch zu verdichten. Die erhärtenden Betonwürfel werden vor Verdunstung geschützt und nach einem Tag ausgeschalt.

Schritt 2: Nasslagerung der Betonwürfel

Die Betonwürfel werden 6 Tage unter Wasser gelagert.

Schritt 3: Trockenlagerung der Betonwürfel

Nach der 6-tägigen Nasslagerung werden die Betonwürfel aus dem Wasserbad entnommen und in die Klimakammer bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchtigkeit gestellt.

Schritt 4: Kapillares Saugen (entionisiertes Wasser oder 3 %ige NaCl-Lösung)

Im Alter von 27 Tagen werden jeweils zwei Würfel in die dafür vorgesehenen Prüfbehälter (siehe Bild 15) gestellt, die anschließend mit Prüfflüssigkeit befüllt werden. Als Prüfflüssigkeit wird entionisiertes Wasser oder dreiprozentige Tausalzlösung verwendet. Die Betonwürfel lagern einen Tag lang vollständig in die Prüfflüssigkeit eingetaucht. Die Masse der Betonwürfel vor und nach dem kapillaren Saugen ist zu ermitteln.

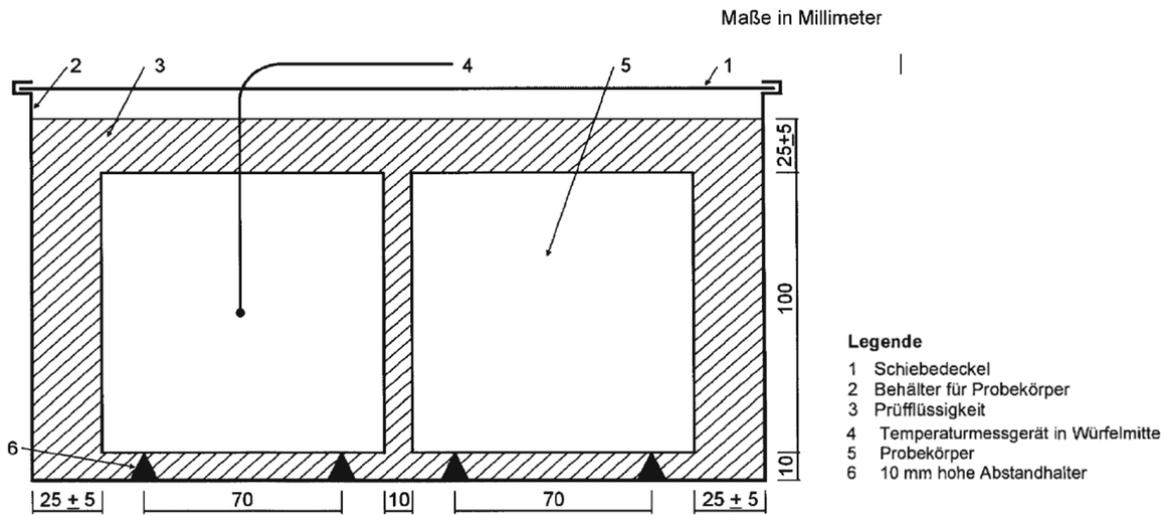
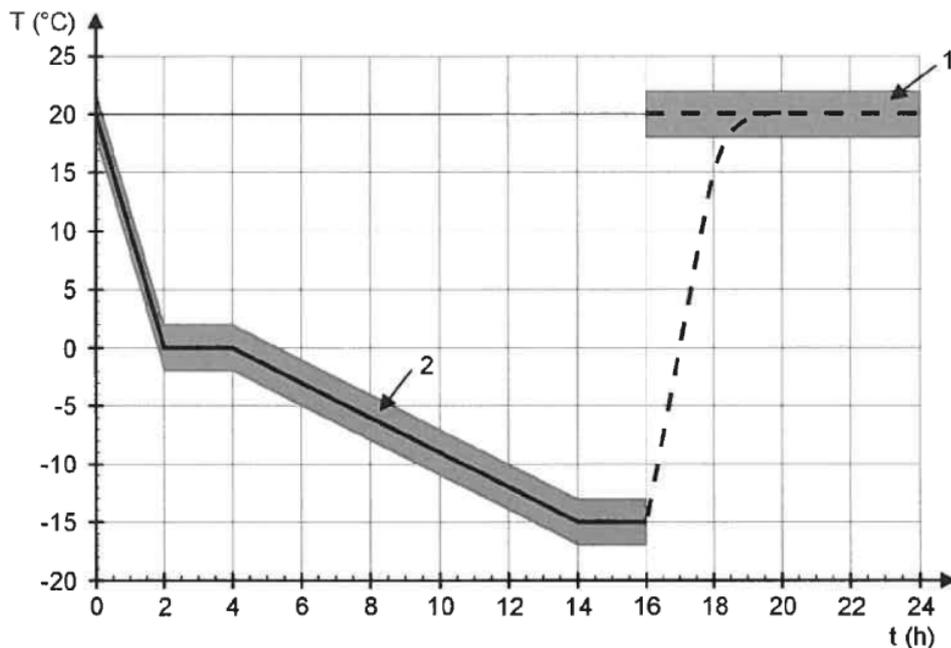


Bild 15: Anordnung von jeweils zwei Würfeln in Prüfbehältern mit Schiebedeckeln [12]

Schritt 5: Start der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung in der Frosttruhe

28 Tage nach der Herstellung werden die mit Deckeln verschlossenen Behälter mit den in der Prüfflüssigkeit liegenden Würfeln in die Frosttruhe eingelagert und wiederholt Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt. Die Anzahl der Probekörper in der Frosttruhe sollte stets gleich sein; evtl. sind Blindprobekörper zu verwenden. Insgesamt werden 56 Frost-Tau-Wechsel mit nachfolgend dargestelltem Temperaturverlauf durchgeführt, wobei die Temperatur in der Mitte eines Betonwürfels gemessen wird.



Legende

- 1 Temperatur des Wasserbades
- 2 Temperatur in der Mitte eines Würfels mit einer Kantenlänge von 100 mm

Bild 16: Temperaturverlauf in der Mitte eines Würfels in Abhängigkeit von der Zeit [12]

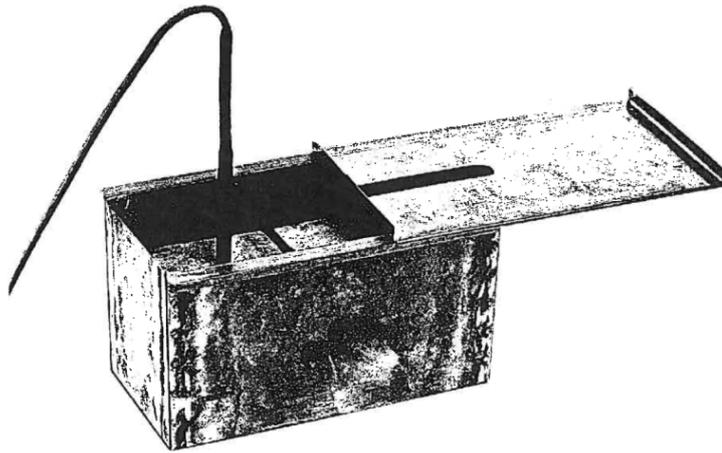


Bild 17: Behälter mit Würfeln und Temperaturfühler [12]

Anmerkung: Die DIN CEN/TS 12390-9 gibt keinen Aufschluss darüber, wie die Temperaturmesseinrichtung in Würfelmitte angebracht werden soll.

Es ist jedoch üblich, den Temperaturfühler in den Referenzprobekörper mit einzubetonieren. Mit diesem Referenzwürfel ist die Temperatursteuerung der Frosttruhe in regelmäßigen Abständen auf die Probenmittentemperatur einzustellen [23; S.492].

Der vorgegebene Temperaturverlauf kann auf drei verschiedenen Wegen erreicht werden:

- a) Verwendung einer Frosttruhe mit Sekundärkühlkreis, bei der das Einfrieren und Auftauen der Probekörper durch eine Kühlflüssigkeit erfolgt.
- b) Verwendung einer Frosttruhe mit Luftkühlung und automatischer Flutungseinrichtung, bei der nach 16 h die Truhe mit 20 °C warmem Wasser geflutet wird, sodass das Wasser bis knapp unter den Prüfbehälterrand reicht.
- c) Verwendung einer luftgekühlten Frosttruhe ohne Flutungseinrichtung, wobei nach 16 h die Behälter manuell in ein 20°C warmes Wasserbad gestellt werden.

Schritt 6: Bestimmung der Abwitterung nach bestimmten Anzahlen an FTW

Nach 7 ± 1 , 14 ± 1 , 28 ± 1 , 42 ± 1 und 56 Frost-Tau-Wechseln wird im aufgetauten Zustand für jedes Würfelpaar die gemeinsame Menge der Abwitterung von den Oberflächen bestimmt. Dazu wird das abgewitterte Material unter leichtem Druck abgebürstet und die Prüfliquidität aus den Behältern vorsichtig durch geeignete Filter abgossen. Alle abgefrosteten Bestandteile werden im Trockenofen bis zur Massenkonstanz getrocknet und gewogen.

Schritt 7: Versuchsauswertung nach 56 FTW

Die Flüssigkeitsaufnahme L während des eintägigen kapillaren Saugens vor der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung wird für jeden Würfel nach folgender Gleichung berechnet:

$$L = \frac{m_{28d} - m_{27d}}{m_{27d}} \cdot 100 \text{ [M.-\%]}$$

m_{28d} Masse des luftgetrockneten Würfels im Alter von 27 Tagen [g]

m_{27d} Masse des gesättigten Würfel im Alter von 28 Tagen [g]

Für jeden Messzeitpunkt ist für jedes Würfelpaar der prozentuale Masseverlust P nach folgenden Gleichungen zu berechnen:

$$m_{S_n} = m_{S,\text{before}} + m_{c+f+b}$$

$$P = \frac{m_{S_n}}{m_0} \cdot 100 \text{ [M.-\%]}$$

m_{S_n} Gesamtmasse des getrockneten abgewitterten Material nach n Frost-Tau-Wechseln [g]

$m_{S,\text{before}}$ Gesamtmasse des getrockneten abgewitterten Materials bei der vorherigen Messung [g]

m_{c+f+b} Masse des getrockneten abgewitterten Materials im Behälter, das durch Abbürsten gewonnen wird, und des Filters [g]

m_0 Masse von zwei luftgetrockneten Würfeln (in einem Behälter) im Alter von 27 Tagen [g]

3.2.5 Kurzbeschreibung Balkenprüfung

Die Balkenprüfung wird im DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 als Verfahren zur Bestimmung der inneren Gefügestörung eines Betons durch wiederholte Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung beschrieben. Das Balkenprüfverfahren der ONR 23303 zur Prüfung der Expositionsklasse XF3 basiert auf dieser Norm.

Die Balkenprüfung nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 [11] gliedert sich in folgende Schritte:

Schritt 1: Betonieren von Balken des zu prüfenden Betons

Schritt 2: Folienlagerung der Betonbalken

Schritt 3: Nasslagerung der Betonbalken

Schritt 4: Bestimmung des Ausgangswertes der inneren Gefügestörung

- Methode 1: Grundfrequenz in Querrichtung

- Methode 2: Ultraschalllaufzeit

Schritt 5: Start der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung in der Frosttruhe

Schritt 6: Bestimmung der inneren Gefügestörung nach bestimmten Anzahlen an FTW

Schritt 7: Versuchsauswertung nach 56 FTW

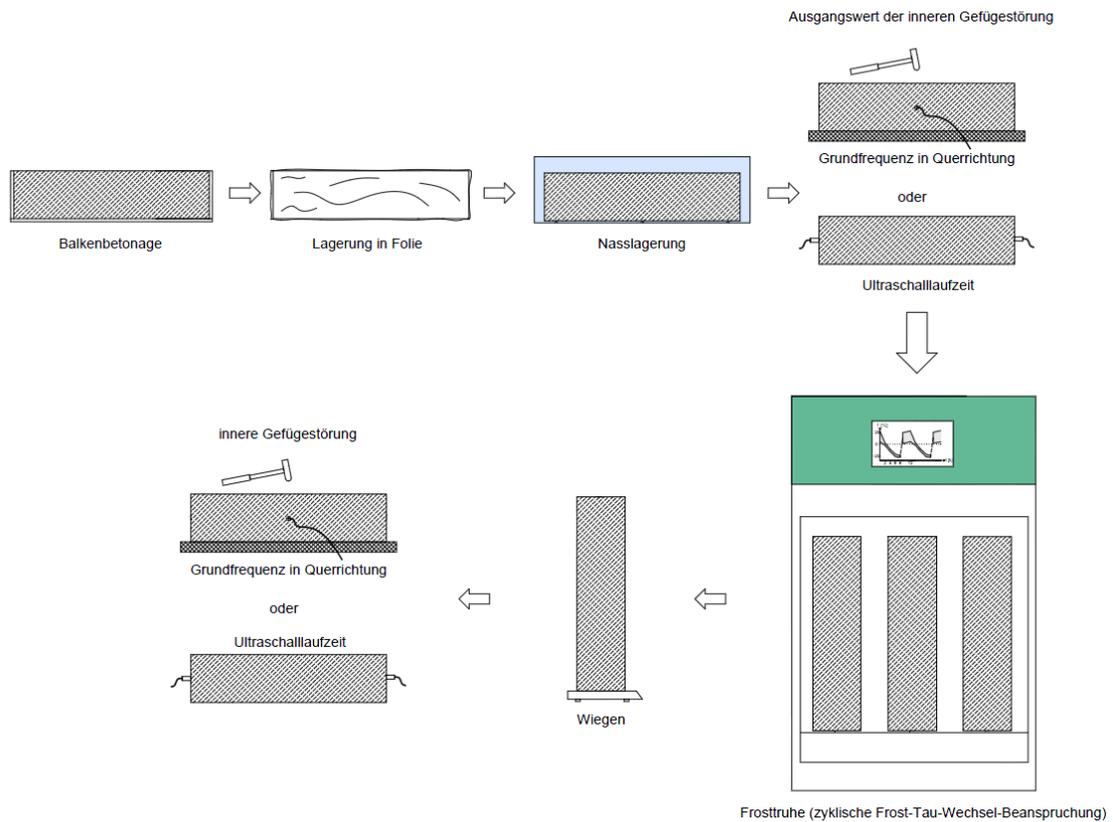


Bild 18: Temperaturverlauf in der Mitte des Betonprobekörpers in Abhängigkeit von der Zeit

Schritt 1: Betonieren von Balken des zu prüfenden Betons

Die Herstellung der Betonbalken erfolgt in Formen mit den Maßen 100 x 100 x 400 mm, wobei für die Prüfung mindestens drei Balken erforderlich sind. Die Formen werden nur leicht mit Trennmittel behandelt und vor dem Befüllen mit einem saugfähigen Handtuch abgewischt. Der Beton wird auf einem Vibrationstisch verdichtet. Die erhärtenden Betonbalken werden einen Tag bei 20 °C und 95 % r. L. gelagert und dann ausgeschalt.

Schritt 2: Folienlagerung der Betonbalken

Nach dem Ausschalen werden die Balken gewogen und in Kunststoffolie eingewickelt, damit kein Wasser verdunsten kann. In diesem Zustand werden sie sechs Tage lang an der Luft bei 20 °C gelagert.

Schritt 3: Nasslagerung der Betonbalken

Am 7. Tag werden die Balken ausgewickelt, gewogen und 21 Tage unter Wasser gelagert.

Schritt 4: Bestimmung des Ausgangswertes der inneren Gefügestörung

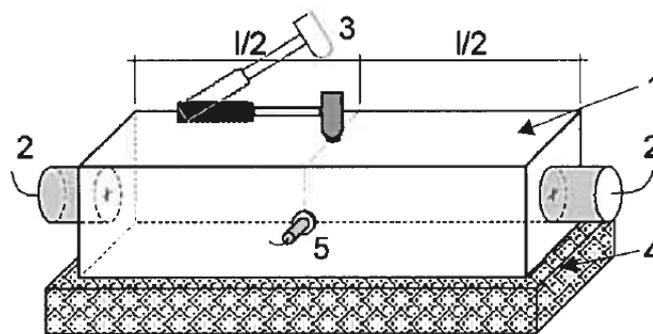
Nach der Wasserlagerung werden die Probekörper erneut gewogen, um Daten über die bisherige Wasseraufnahme zu gewinnen. Anschließend wird der Ausgangswert der inneren Gefügestörung bestimmt. Hierfür stehen zwei verschiedene Methoden zur Verfügung:

Methode 1: Grundfrequenz in Querrichtung

Das Gerät zur Messung der Grundfrequenz in Querrichtung besteht aus einem Beschleunigungsmesser und einem Gerät zur Durchführung einer Fourier-Analyse. Der Betonbalken wird auf ein dickes Auflager, z. B. aus Schaumstoff, gelegt und der Beschleunigungsmesser an die dafür vorgesehene Stelle des Balkens gehalten. Mit einem geeigneten Werkzeug, z. B. einem modal gestimmten Hammer, wird auf die Mitte der Balkenoberseite geklopft und die Grundfrequenz in Querrichtung aufgezeichnet. Die Messung wird für jeden Probekörper mindestens dreimal wiederholt.

Methode 2: Ultraschalllaufzeit

Mithilfe eines kalibrierten Ultraschallmessgerätes wird die Ultraschalllaufzeit durch die Längsachse des Balkens bestimmt. Die Messwertgeber werden mit Ultraschallgel versehen und stets mit dem gleichen Druck an die gegenüberliegenden Betonflächen angedrückt.



Legende

- 1 Probekörper
- 2 Messwertgeber für die Ultraschallimpulse
- 3 modal gestimmter Schlaghammer
- 4 Auflager für den Probekörper (4.2.3 b))
- 5 Beschleunigungsmesser

Bild 19: Messanordnung zur Bestimmung der inneren Gefügestörung (beide Methoden dargestellt) [11]

Schritt 5: Start der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung in der Frosttruhe

Unmittelbar nach der Bestimmung des Ausgangswertes der inneren Gefügestörung werden die Balken senkrecht in die Frosttruhe gelegt und wiederholt Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt. Ein Frost-Tau-Wechsel dauert 12 h. Die Anzahl der Probekörper in der Frosttruhe sollte stets gleich sein; evtl. sind Blindprobekörper zu verwenden. Insgesamt werden 56 Frost-Tau-Wechsel durchgeführt. Der Temperaturverlauf sieht folgendermaßen aus, wobei die Temperatur in der geometrischen Mitte eines Referenzbalkens gemessen wird.

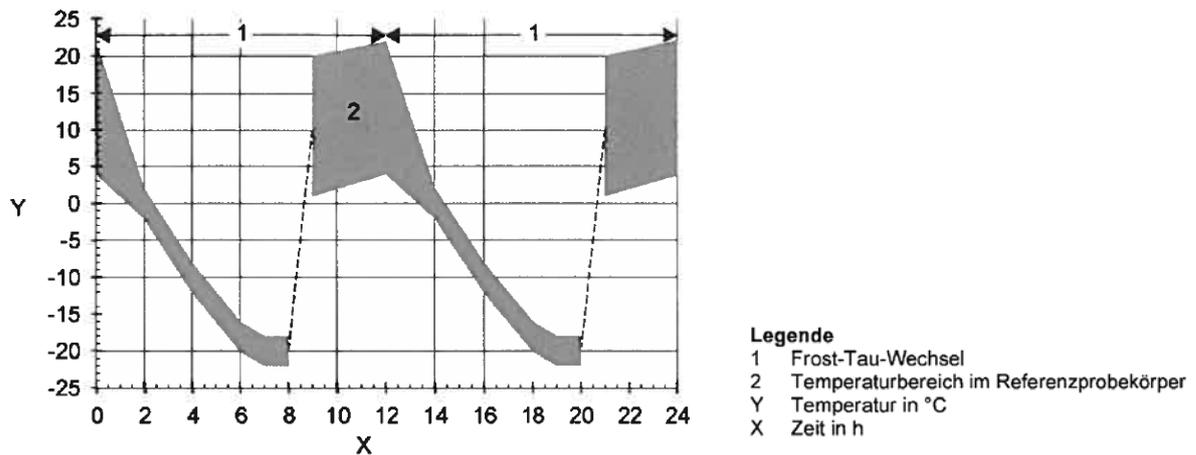


Bild 20: Temperaturverlauf in der Mitte des Betonprobekörpers in Abhängigkeit von der Zeit [11]

Anmerkung: Der DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 gibt keinen Aufschluss darüber, wie die Temperaturmesseinrichtung in Balkenmitte angebracht werden soll und ob bei jeder Prüfung ein Referenzbalken zu verwenden ist.

Der vorgegebene Temperaturverlauf kann auf zwei verschiedenen Wegen erreicht werden:

- a) Verwendung einer Frosttruhe mit Luftkühlung und automatischer Flutungseinrichtung, bei der nach 8 h die Truhe mit Wasser geflutet wird, sodass das Wasser die Balken überdeckt. Die Temperatur des Wasserbads ist stets zwischen 5 und 21 °C zu halten.
- b) Verwendung einer luftgekühlten Frosttruhe ohne Flutungseinrichtung, wobei nach 8 h die Behälter manuell in ein 5 bis 21 °C warmes Wasserbad gestellt werden.

Schritt 6: Bestimmung der inneren Gefügestörung nach bestimmten Anzahlen an FTW

Nach 7±1, 14±1, 28±1, 42±1 und 56 Frost-Tau-Wechseln wird für jeden Probekörper, entweder durch Messung der Grundfrequenz in Querrichtung oder der Ultraschalllaufzeit, der Messwert der inneren Gefügestörung bestimmt.

Schritt 7: Versuchsauswertung nach 56 FTW

Für die Beurteilung der inneren Gefügestörung sind Daten über die Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung nützlich. Die Änderung der Masse Δm_n nach n Frost-Tau-Wechseln wird nach folgender Gleichung berechnet:

$$\Delta m_n = \frac{m_n - m_{28d}}{m_{28d}} \cdot 100 \text{ [M.-\%]}$$

m_n Masse des Probekörpers nach n Frost-Tau-Wechseln [g]

m_{28d} Masse des Probekörpers im Alter von 28 Tagen nach der Lagerung unter Wasser [g]

Der relative dynamische Elastizitätsmodul wird entsprechend dem gewählten Messverfahren entweder als $RDM_{FF,n}$ oder $RDM_{UPPT,n}$ nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$RDM_{FF,n} = \left(\frac{f_n}{f_0} \right)^2 \cdot 100 [\%]$$

f_n Grundfrequenz nach n Frost-Tau-Wechseln [Hz]

f_0 anfängliche Grundfrequenz [Hz]

$$RDM_{UPPT,n} = \left(\frac{t_{s,0}}{t_{s,n}} \right)^2 \cdot 100 [\%]$$

$t_{s,0}$ anfängliche Ultraschallgeschwindigkeit im Probekörper [μ s]

$t_{s,n}$ Ultraschallgeschwindigkeit im Probekörper nach n Frost-Tau-Wechseln [μ s]

3.3 Theoretischer Vergleich

Die vorher dargestellten Prüfverfahren werden im folgenden Kapitel auf der Grundlage der Regelwerke und Normen theoretisch miteinander verglichen. Der praktische Vergleich der drei durchgeführten Prüfverfahren CIF-, CDF- und Plattenprüfung wird in Kapitel 4.4 näher erläutert.

Den einzelnen Prüfverfahren liegen jeweils mehrere Regelwerke und Normen zu Grunde. Da diese teilweise Unterschiede bezüglich des Versuchsablaufes aufweisen, werden vorab die Regelwerke eines jeden Prüfverfahren miteinander verglichen. Im Anschluss daran werden die Prüfverfahren gegenüber gestellt und deren Unterschiede bzw. Gemeinsamkeiten herausgearbeitet.

Zur Übersicht ist in Anhang 1 eine tabellarische Gegenüberstellung der fünf Prüfverfahren auf Grundlage der in Kapitel 3.1 genannten Regelwerke, hinterlegt.

3.3.1 Vergleich der Regelwerke zu den jeweiligen Prüfungen

Wie im Diagramm auf Seite 14 dargestellt, basieren die fünf ausgewählten Prüfverfahren CIF-, CDF-, Platten-, Würfel- und Balkenprüfung auf unterschiedlichen Regelwerken und Normen, die nachfolgend, je Prüfverfahren, miteinander verglichen werden.

3.3.1.1 Vergleich der Regelwerke zur CIF-Prüfung

Regelungen zum CIF-Verfahren finden sich im DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 [11] und im BAW-Merkblatt "Frostprüfung"[13]. Nachfolgend werden die Unterschiede zwischen diesen beiden Regelwerken dargestellt.

Sowohl bei der CIF-Prüfung nach DIN-Fachbericht als auch nach BAW-Merkblatt werden fünf Probekörper benötigt. Das BAW-Merkblatt schreibt vor, dass dazu fünf Betonwürfel herzustellen sind, von denen jeweils eine Würfelhälfte als Probekörper verwendet wird. Der

DIN-Fachbericht hingegen gibt nur vor, dass fünf Probekörper erforderlich sind, was bedeutet, dass es genügt, drei halbierte Würfelformen zu betonieren und von den sechs entstandenen Hälften fünf für die Prüfung zu verwenden [23; S.498].

Das BAW-Merkblatt schreibt für die Würfelbetonage die Verwendung zweier seitlich angeordneter PTFE-Platten vor. Im DIN-Fachbericht ist dies als Alternative angegeben. Regulär wird mit einer mittig angeordneten PTFE-Platte gearbeitet. Somit ist beim Verfahren nach BAW-Merkblatt auf jeden Fall ein späteres Zersägen der Würfel erforderlich, also mehr Zeit-, Arbeits- und Geräteaufwand.

Anders als im DIN-Fachbericht verlangt das BAW-Merkblatt zusätzlich zur Bestimmung der inneren Gefügestörung auch die Bestimmung der Abwitterung. Erfahrungsgemäß sind die Abwitterungsmengen bei entionisiertem Wasser als Prüflüssigkeit zwar sehr gering, dennoch können die Messwerte als zusätzliches Bewertungskriterium herangezogen werden. Beim DIN-Fachbericht wird zwar auch die Abwitterung gemessen, jedoch nicht zur Beurteilung der Beständigkeit verwendet, sondern nur zur genauen Berechnung der Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung.

Des Weiteren variieren die Zeitpunkte, an denen an den Probekörpern Messungen zur inneren Gefügestörung bzw. Abwitterung durchgeführt werden. DIN-Fachbericht legt diese auf ± 1 FTW genau fest. So müssen nach 0, 7 ± 1 , 14 ± 1 , 28 ± 1 , 42 ± 1 und 56 FTW die Messungen erfolgen. Im BAW-Merkblatt sind hingegen die Messungen nach jedem vierten bis sechsten Frost-Tau-Wechsel durchzuführen, wobei die letzte Messung nach 28 FTW erfolgt. In dieser Hinsicht lässt das BAW-Merkblatt mehr zeitlichen Spielraum zu, was für ein Prüflabor einen Vorteil hinsichtlich der Terminplanung bedeutet. Messungen an Sonn- und Feiertage können somit vermieden werden.

Beim CIF-Verfahren nach BAW-Merkblatt „Frostprüfung“ findet im Gegensatz zum DIN-Fachbericht die Beurteilung der Frostbeständigkeit nicht nach 56, sondern bereits nach 28 Frost-Tau-Wechseln statt, was eine Verkürzung der Prüfdauer um 14 Tage entspricht.

Beide Regelwerke legen fest, dass für die Bewertung der Frostbeständigkeit der Abfall des relativen dynamischen Elastizitätsmoduls herangezogen werden muss. Jedoch definiert nur das BAW-Merkblatt ein konkretes Abnahmekriterium. So darf der relative dynamische Elastizitätsmodul nach Ende der Frostprüfung auf nicht weniger als 75% des Ausgangswertes abgefallen sein.

Grundsätzlich enthält das BAW-Merkblatt genauere Festsetzungen bzw. Hinweise für die Durchführung des Prüfverfahrens als der DIN-Fachbericht. Beispielsweise ist im BAW-Merkblatt die Länge der Überlappung der Aluminiumbutylfolie an der Probekörperkante als konkreter Wert mit 20 mm angegeben, während eine genaue Angabe im DIN-Fachbericht

fehlt. Des Weiteren soll das Wiegen der sich beim kapillaren Saugen befindlichen Probekörper laut BAW-Merkblatt alle 2 bis 3 Tage und nicht nur, wie im DIN-Fachbericht angegeben, „regelmäßig“ stattfinden.

Ein weiterer Unterschied besteht in der Angabe der erforderlichen Messgenauigkeit. Die Gewichtsangabe der Abwitterung in den getrockneten Filtern beispielsweise muss laut BAW-Merkblatt mit einer Genauigkeit von 0,01 g gewogen werden, wohingegen der DIN-Fachbericht eine Messtoleranz von 0,1 g vorgibt.

3.3.1.2 Vergleich der Regelwerke zur CDF-Prüfung

Die CDF-Prüfung ist sowohl in der DIN CEN/TS 12390-9 [12], im BAW-Merkblatt "Frostprüfung"[13], als auch in der Empfehlung für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren der Bundesanstalt für Straßenwesen [8] beschrieben. Diese drei Regelwerke werden nachfolgend miteinander verglichen.

Wie bereits beim Vergleich der Regelwerke zur CIF-Prüfung beschrieben, so fallen auch beim Vergleich zwischen der CDF-Prüfung nach DIN CEN/TS 12390-9 und nach BAW-Merkblatt zwei Unterschiede zur Probekörperherstellung auf:

- Das BAW-Merkblatt fordert die Betonage von fünf Betonwürfeln, aus denen jeweils ein Probekörper herzustellen ist. Hingegen genügt es bei der CDF-Prüfung nach DIN CEN/TS 12390-9 drei halbierte Würfelformen zu betonieren und von den sechs entstandenen Hälften fünf für die Prüfung zu verwenden [23; S.498].
- Das BAW-Merkblatt schreibt für die Würfelbetonage die Verwendung zweier einzelner PTFE-Platten vor, was in der DIN CEN/TS 12390-9 als Alternative angegeben. Regulär wird dort mit einer mittig angeordneten PTFE-Platte gearbeitet. Das CDF-Verfahren nach BAW-Merkblatt erfordert also auf jeden Fall ein späteres Zersägen der Würfel und damit mehr Zeit-, Arbeits- und Geräteaufwand.

Im Gegensatz zur DIN CEN/TS 12390-9 ist nach BAW-Merkblatt "Frostprüfung" zusätzlich zur Abwitterung der Abfall des relativen dynamischen E-Moduls zu bestimmen.

Beim CDF-Test nach BAW-Merkblatt ist die als Prüfflüssigkeit dienende dreiprozentige Tausalzlösung mit demineralisiertem Wasser herzustellen und nicht mit Leitungswasser, wie dies bei der CDF-Prüfung nach DIN CEN/TS 12390-9 bzw. beim modifizierte CDF-Test der BAST der Fall ist.

Beim modifizierten CDF-Verfahren sind die zeitlichen Abstände zwischen den durchzuführenden Messungen identisch mit den Regelungen des BAW-Merkblattes. Analog zum

CIF-Verfahren resultiert daraus, im Vergleich zu der DIN CEN/TS 12390-9, ein größerer Spielraum für die Messzeitpunkte.

Die DIN CEN/TS 12390-9 und das BAW-Merkblatt "Frostprüfung" lassen für die CDF-Prüfung nur eine Beurteilung von Betonrezepturen im Bereich XF4 zu und prüfen damit für den Bereich XF2 „zu scharf“ [8; S.10]. Die Empfehlung der Bundesanstalt für Straßenwesen beschreibt ein modifiziertes CDF-Verfahren, mit der der Widerstand von Betonen in der Expositionsklasse XF2 nachgewiesen werden kann. Hierbei wird ein abgeschwächter Frost-Tausalz-Angriff gemäß XF2-Exposition simuliert.

So beträgt die Minimaltemperatur in der Frostruhe nicht mehr -20 °C , sondern -10 °C . Die Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstands wird bereits nach 14, nicht nach 28 Frost-Tau-Wechseln durchgeführt. Durch die verringerte Minimaltemperatur und die kürzere Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung ist die Wasseraufnahme durch Frostsaugen beim modifizierten CDF-Verfahren geringer. Dadurch wird die in der Expositionsklasse XF2 beschriebene, mäßige Wassersättigung erreicht. Das Abnahmekriterium beträgt für den modifizierten CDF-Test nicht 1500 sondern 1000 g/m^2 flächenbezogene Abwitterung. Die Abkühl- und Auftaugeschwindigkeit von 10 K/h und die Dauer eines Frost-Tau-Wechsels von 12 h sind bei allen drei Regelwerken identisch.

Die Unterschiede der Temperaturverläufe zwischen dem herkömmlichen und dem modifizierten CDF-Verfahren sind im nachfolgenden Bild ersichtlich:

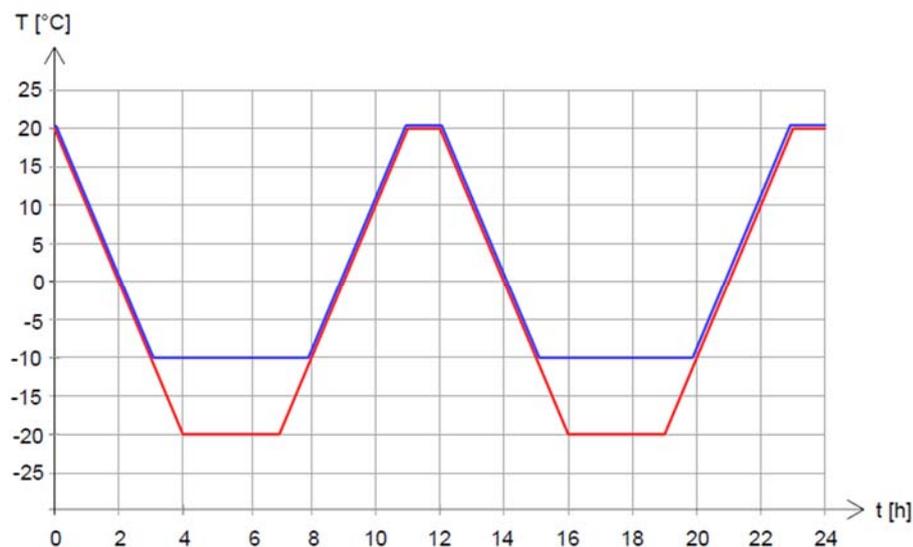


Bild 21: Temperaturverläufe beim herkömmlichen CDF-Test (rot) und beim modifizierten CDF-Test (blau)

Nur beim modifizierten CDF-Test ist die Verwendung von Stahlschalungen vorgeschrieben. Dies bedeutet zwar grundsätzlich eine Einschränkung, weil z. B. keine Kunststoffformen verwendet werden können. Andererseits fällt das Ausschalen bei Stahlformen am leichtesten. Insbesondere da beim CDF-Test die Formen mit nur wenig Trennmittel behandelt werden dürfen.

3.3.1.3 Vergleich der Regelwerke zur Plattenprüfung

Regelungen zur Durchführung der Plattenprüfung finden sich in der DIN CEN/TS 12390-9 [12], dem DIN-Fachbericht CEN/TR 15177[11], der österreichischen ONR 23303[14] und der schwedischen Norm SS 13 72 44 [15].

Die ONR 23303 schlägt für die Dämmung der Probekörper extrudiertes Polystyrol (XPS) vor, die anderen drei Regelwerke expandiertes Polystyrol (EPS). Der Vorteil, der sich für XPS als Dämmmaterial bei der Plattenprüfung ergibt, sind seine hohe Formstabilität und geringe Wasseraufnahme.

Die Plattenprüfungen nach DIN CEN/TS 12390-9 und nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 unterscheiden sich im Messverfahren, das nach einer bestimmten Anzahl an Frost-Tau-Wechseln durchzuführen ist. Bei der Plattenprüfung nach DIN CEN/TS 12390-9 wird die Abwitterung bestimmt, bei der Plattenprüfung nach DIN-Fachbericht die innere Gefügestörung durch Messung der Ultraschalllaufzeit.

Die Messzeitpunkte nach bestimmten Anzahlen an Frost-Tau-Wechseln sind im Verfahren nach ONR 23303 genau festgelegt. Die drei anderen Normen lassen einen Spielraum von ± 1 Frost-Tau-Wechsel zu.

Bei der Plattenprüfung nach ONR 23303 findet die Bewertung der Beständigkeit des zu untersuchenden Betons durch Vergleich mit einem Null- bzw. Vergleichsbeton statt. Dieser Vergleichsbeton ist nach einem Rezept entsprechend den Vorgaben der Expositionsklasse XF2 bzw. XF4 herzustellen, muss bestimmte Luftporenkennwerte einhalten und weist folglich einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand für die jeweilige Expositionsklasse auf. Der Nullbeton wird zusammen mit dem unbekanntem Beton in der Plattenprüfung getestet. Die Abwitterungswerte des zu untersuchenden Betons werden anschließend mit den Werten des Nullbetons verglichen und dürfen nur in begrenztem Maße davon abweichen. Die anderen drei Regelwerke arbeiten ohne einen solchen Vergleichsbeton. Bei ihnen findet die Bewertung mit einem allgemein gültigen Abnahmekriterium statt. Beispielsweise darf bei der Plattenprüfung nach der schwedischen Norm SS 13 72 44 die Abwitterung nach 56 FTW $1,0 \text{ kg/m}^2$ nicht überschreiten. Das Vergleichsverfahren nach ONR ist zwar aufwendiger, da in regelmäßigen Abständen zusätzliche Probekörper hergestellt und getestet werden müssen, jedoch werden dadurch Unterschiede in den Prüfbedingungen, die sich aus der Auslastung und Art der Prüfruhe ergeben können, weitestgehend eliminiert.

Die SS 13 72 44 gibt mehrere unterschiedliche Prüfvarianten an. Bei Variante I wird eine gesägte Mittelfläche als Prüffläche verwendet, bei Variante II die abgezogene Oberfläche. Als Prüfflüssigkeit kann entionisiertes Wasser (Variante A) oder dreiprozentige Tausalz-lösung (Variante B) verwendet werden. Folglich ergeben sich vier Prüfvarianten: I A, II A,

I B, II B. Diese Variationsmöglichkeit findet sich jedoch indirekt auch in den alternativen Anwendungen der DIN CEN/TS 12390-9, und stellt damit keine Besonderheit der schwedischen Norm dar.

3.3.1.4 Vergleich der Regelwerke zur Würfelprüfung

In diesem Abschnitt wird die Würfelprüfung nach der deutschen Norm DIN CEN/TS 12390-9 [12] mit den Ausführungen der österreichischen ONR 23303 [14] verglichen.

Die Würfelprüfung nach DIN CEN/TS 12390-9 kann sowohl mit entionisiertem Wasser, als auch mit dreiprozentiger Tausalzlösung durchgeführt werden. Nach ONR 23303 darf nur entionisiertes Wasser als Prüfflüssigkeit verwendet werden, weil es sich um ein Verfahren zur Beurteilung einer gleichwertigen Beständigkeit für die Expositionsklasse XF1 handelt.

Im Verfahren nach ONR 23303 sind die Messzeitpunkte nach bestimmten Anzahlen an Frost-Tau-Wechseln genau festgelegt. Die DIN CEN/TS 12390-9 lässt einen Spielraum von ± 1 Frost-Tau-Wechsel zu.

Bei der Würfelprüfung nach ONR 23303 findet die Bewertung der Beständigkeit des zu untersuchenden Betons durch Vergleich mit einem Nullbeton statt. Die DIN CEN/TS 12390-9 hingegen gibt kein Abnahmekriterium für die Bewertung der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beständigkeit an.

3.3.1.5 Vergleich der Regelwerke zur Balkenprüfung

Abschließend werden die Unterschiede zwischen den Regelwerken DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 [11] und ONR 23303 [14] im Hinblick auf die Balkenprüfung dargestellt.

Die Messzeitpunkte für die innere Gefügestörung nach einer bestimmten Anzahl an Frost-Tau-Wechseln sind im Verfahren nach ONR 23303 genau festgelegt. Die DIN CEN/TS 12390-9 lässt hingegen einen Spielraum von ± 1 Frost-Tau-Wechsel zu.

Zudem ist in der ONR 23303 der Messzeitpunkt nach 7 Frost-Tau-Wechseln nicht festgeschrieben. Dadurch ist eine Messung weniger notwendig.

Die Temperaturverläufe der beiden Regelwerke sehen unterschiedlich aus. Der DIN-Fachbericht legt für den ganzen Frost-Tau-Zyklus den Temperaturbereich im Referenzprobekörper fest, wohingegen sich der Temperaturverlauf bei der ONR 23303 nur beim Abkühlvorgang auf die Probekörpertemperatur und beim Auftauvorgang auf die Temperatur des Wasserbades bezieht. Die Wassertemperatur muss nach DIN-Fachbericht während des gesamten Auftauvorgangs 13 ± 8 °C betragen. Nach ONR 23303 hingegen muss sie während der ersten 15 min 21 ± 2 °C betragen und dann 20 ± 2 °C. Der Auftauvorgang verläuft deshalb beim Verfahren nach ONR 23303 vermutlich heftiger als beim Verfahren nach DIN-Fachbericht.

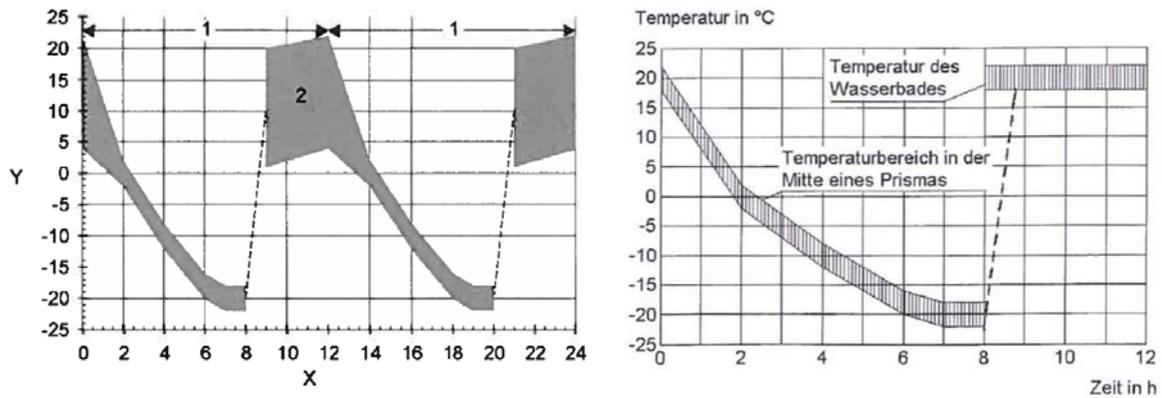


Bild 22: Temperaturverlauf d. Balkenprüfung nach DIN-Fachbericht (links) [11] und nach ONR 2330 (rechts) [14]

3.3.2 Vergleich zwischen den Prüfverfahren

Nun werden die fünf Prüfverfahren miteinander verglichen und Gemeinsamkeiten sowie Unterschiede herausgearbeitet. Vergleichsgrundlage ist dabei bei der CDF-, Platten- und Würfelprüfung stets der DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 [11] und für die CIF- und Balkenprüfung die DIN CEN/TS 12390-9 [12].

3.3.2.1 Probekörperform

Auffällig ist die unterschiedliche Form der Probekörper für die einzelnen Prüfverfahren. Die CIF- und CDF-Prüfung verwendet Betonwürfelhälften, die in Würfelformen mit 15 cm Kantenlänge hergestellt werden. Bei den anderen Verfahren gibt deren Name bereits einen Hinweis auf die Probekörperform:

- Platten (15 x 15 x 5 cm)
- Würfel (10 cm Kantenlänge)
- Balken (10 x 10 x 40 cm)

Die 40 cm langen Balken der Balkenprüfung sind durch ihr relativ hohes Gewicht unpraktisch in der Handhabung, die anderen Probekörper sind diesbezüglich unproblematisch.

Speziell für die CIF- bzw. CDF-Prüfung hat Siebel festgestellt, dass sich bei der festgelegten Probenhöhe von 70 mm ein Temperaturprofil und ein Wärmefluss im Probekörper einstellen, die gut mit realen Verhältnissen übereinstimmen [4; S.30].

Des Weiteren ist hervorzuheben, dass bei der Herstellung für die CIF-, CDF- und Plattenprüfung herkömmliche Würfelformen mit 15 cm Kantenlänge zum Einsatz kommen. Da dieselben Formen auch für die Druckfestigkeitsprüfung von Beton erforderlich sind und standardmäßig in Betonlaboren vorhanden sind, entfallen im Vergleich zur Würfel- und Balkenprüfung zusätzliche Anschaffungskosten.

3.3.2.2 Prüfgutmenge und Anzahl der Probekörper

Für die Herstellung der zur Prüfung einer Betonserie erforderlichen Probekörper benötigt man bei den verschiedenen Verfahren folgende Betonmengen:

- CIF-/CDF-Prüfung $3 \times (1,5 \text{ dm})^3 = 10,2 \text{ dm}^3$
- Plattenprüfung $4 \times (1,5 \text{ dm})^3 = 13,5 \text{ dm}^3$
- Würfelprüfung $4 \times (1,0 \text{ dm})^3 = 4,0 \text{ dm}^3$
- Balkenprüfung $3 \times (1,0 \times 1,0 \times 4,0) \text{ dm}^3 = 12,0 \text{ dm}^3$

Die Plattenprüfung erfordert mit 13,5 l die höchste Prüfgutmenge für eine zu prüfende Betonserie, die Würfelprüfung mit nur 4 l Beton die geringste. Kleinere Prüfgutmengen bedeuten in Bezug auf diese Prüfverfahren einen geringeren Arbeitsaufwand sowie niedrigere Auslastung der im Labor benötigten Mischer.

Die Genauigkeit der statistischen Auswertung erhöht sich mit steigender Anzahl an Probekörpern. Hierbei müssen zwei Punkte erwähnt werden:

- Bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung werden zwar je Betonserie drei geteilte Würfel betoniert, daraus ergeben sich jedoch sechs Würfelhälften, von denen wiederum fünf als Probekörper verwendet werden.
- Bei der Würfelprüfung werden vier Probekörper hergestellt, jeweils zwei Probekörper in einem Behälter den Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt und je Würfelpaar die gemeinsame Abwitterung bestimmt. Somit liegen bei der Würfelprüfung am Ende nur zwei Messwerte zur Beurteilung der Beständigkeit vor.

3.3.2.3 Lagerungsbedingungen

Die Lagerungsbedingungen sind bei allen Verfahren, außer der Balkenprüfung, in etwa gleich. Nach einem Tag Erhärtung in der Form folgen sechs Tage Wasserlagerung und 20 bzw. 21 Tage Trockenlagerung, bevor die Probekörper mit der erneuten Sättigung beginnen. Diese Trockenlagerung ist insbesondere bei der CIF- und CDF-Prüfung von Bedeutung, weil hier der Verlauf der Wasseraufnahme während dem anschließenden 7-tägigen kapillaren Saugen bestimmt wird und die gewonnenen Daten zur Beurteilung der Beständigkeit mit verwendet werden. Bei der Balkenprüfung bleibt der Probekörper nach dem Ausschalen sechs Tage lang in Folie eingewickelt, wird daraufhin 21 Tage in Wasser gelagert und anschließend, ohne erneute Sättigung, den Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt.

3.3.2.4 Probekörpervorbereitung

Die Würfel- und Balkenprüfung verlangt keine weitere Vorbereitung der Probekörper. Bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung ist, falls bei der Betonwürfelherstellung die PTFE-Platten seitlich angeordnet wurden, ein mittiges Durchsägen der Würfel mittels Diamantsäge erforderlich.

Des Weiteren sind die Probekörper an den Seitenflächen mit Aluminiumbutylfolie oder Epoxidharz zu versiegeln. Bei der Plattenprüfung müssen die Probekörper auf jeden Fall aus dem Betonwürfel herausgesägt werden. Da ein mittlerer und ein um 50 mm versetzter Schnitt erforderlich sind, ist der Sägeaufwand größer als bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung. Die Platten sind später mit Gummimaterial abzudichten und mit einer Schicht Polystyrol zu dämmen. Insgesamt ergibt sich hinsichtlich der Probekörpervorbereitung für die Plattenprüfung der größte Material-, Zeit- und Geräteaufwand.

3.3.2.5 Prüffläche

Als Prüffläche wird in den Prüfverfahren der DIN CEN/TS 12390-9 und des DIN-Fachberichts CEN/TR 15177 die Fläche bezeichnet, die mit Prüfflüssigkeit beaufschlagt wird und über die während der Frost-Tau-Wechsel die Wärmezufuhr bzw. der Wärmeabtransport stattfindet. Entsprechend kommt es an dieser zum Abwittern von Partikeln. Als Prüfflächen dienen bei den verschiedenen Verfahren *standardmäßig* folgende Flächen:

- CIF-/CDF-Prüfung an PTFE-Platte geschalte Fläche
- Plattenprüfung mittlere gesägte Fläche
- Würfelprüfung sämtliche Außenflächen
- Balkenprüfung sämtliche Außenflächen

Bei der CDF-Prüfung, der Plattenprüfung und der Würfelprüfung wird die Abwitterung von der Prüffläche nach einer bestimmten Anzahl an Frost-Tau-Wechseln zur Bewertung der Beständigkeit verwendet. Das Abwitterungsverhalten hängt dabei stark von der Art der gewählten Prüffläche ab. Die Prüffläche besteht bei der CDF- und der Würfelprüfung zu Beginn aus einer dünnen Schicht Zementstein, bei der Plattenprüfung sowohl aus Zementstein als auch aus durchsägten Gesteinskörnungen.

Die geschalte Prüffläche bei der CDF- und Würfelprüfung ist realitätsnäher als die gesägte Prüffläche der Plattenprüfung, da an Bauwerken nur freie Oberflächen und geschalte Flächen der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Belastung ausgesetzt werden.

Bei der Würfelprüfung sind alle Außenflächen als Prüffläche anzusehen. An den Ecken kommt es durch die dreiseitige Frostbeanspruchung zu einer ausgeprägteren Abwitterung.

3.3.2.6 Erneute Sättigung der Probekörper

Bei allen Prüfverfahren mit Ausnahme der Plattenprüfung werden die Probekörper nach 20 bzw. 21 Tagen Trockenlagerung mit Prüfflüssigkeit in Kontakt gebracht; je nach Prüfverfahren durch:

- 7 Tage Eintauchen in Prüfflüssigkeit (CIF-/CDF-Prüfung)
- 3 Tage Überschichten mit Prüfflüssigkeit (Plattenprüfung)
- 1 Tag vollständiges Untertauchen in Prüfflüssigkeit (Würfelprüfung)

Es ist anzunehmen, dass die kapillare Wasseraufnahme bei der CIF- und CDF-Prüfung bis zum siebten Tag bereits größtenteils abgeschlossen ist, bei der Platten- und Würfelprüfung hingegen nicht [4; S.27]. Die Probekörper der Balkenprüfung können während der gesamten Vorlagerung Wasser aufnehmen und sind damit bis zum Beginn der Prüfung kapillar wassergesättigt.

Die Beaufschlagung der Probekörper erfolgt bei der CIF- bzw. CDF- und der Plattenprüfung nur über eine Fläche, bei der Würfel- und Balkenprüfung über sämtliche Außenflächen. Die einseitige Beanspruchung stimmt für die meisten Anwendungsfälle von Beton mit der Wirklichkeit überein.

Bei der Plattenprüfung ergibt sich z. B. bei nicht wasserdichten Betonen das Problem, dass die auf den Probekörper aufgegossene Prüfflüssigkeit einsickert und damit zu nicht reproduzierbaren Ergebnissen führt [20; S.2].

Vergleichsmessungen ergaben, dass der Wassergehalt, der sich bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung während der 7-tägigen erneuten Sättigung im Probekörper einstellt, gut mit dem Feuchtegehalt realer Bauteile mit hoher Wassersättigung übereinstimmt [19; S.566].

Als Prüfflüssigkeit zur kapillaren Wasseraufnahme während der erneuten Sättigung dient bei der jeweiligen Prüfung:

- CIF-Prüfung entionisiertes Wasser
- CDF-Prüfung Tausalzlösung
- Plattenprüfung entionisiertes Wasser
- Würfelprüfung entionisiertes Wasser oder Tausalzlösung
- Balkenprüfung entionisiertes Wasser

3.3.2.7 Prüfflüssigkeit während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung

Die Prüfflüssigkeit für die kapillare Wasseraufnahme stimmt bei allen Verfahren mit derjenigen während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung überein. Einzige Ausnahme bildet die Plattenprüfung. Bei ihr wird für die 3-tägige erneute Sättigung stets entionisiertes Wasser verwendet. Während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung jedoch kann entweder entionisiertes Wasser oder dreiprozentige Tausalzlösung als Prüfflüssigkeit dienen. Im Falle von tausalzhaltiger Prüfflüssigkeit ergibt sich damit ein entscheidender Unterschied zwischen Plattenprüfung und CDF- bzw. Würfelprüfung. Bei der Plattenprüfung muss das Tausalz während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung in den bereits unter entionisiertem Wasser vorgesättigten Beton nachdiffundieren, bei der CDF- bzw. der Würfelprüfung wird das Tausalz bereits während der erneuten Sättigung zusammen mit dem Wasser im sogenannten „Huckepackverfahren“ in den Beton transportiert [17]. Da die Diffusionsprozesse der Plattenprüfung eher unkontrolliert stattfinden, liegt die Lösungskonzentration im

Porenwasser während der Beanspruchung in der Frostruhe nicht definiert vor [20; S.47]. Eine Analyse von Ergebnissen der Ringversuche von Plähn und Golz zeigte, „dass die Prüfstreuung erhöht wird, wenn die Proben vor der Frostprüfung unter Wasser und nicht unter NaCl-Lösung gelagert worden sind“ [17].

Bei der Würfelprüfung ist aufgrund des allseitigen Kontakts mit Prüfflüssigkeit während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung ein Frostsaugen nur bedingt möglich [4; S.29].

Bei den Verfahren zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 und DIN CEN/TS 12390-0 wird stets dreiprozentige NaCl-Lösung als Prüflösung verwendet, weil „Untersuchungen von Hartmann [...] ergaben, dass sich im Bereich von ein bis drei Prozent ein Maximum der Schädigung einstellt“ [8; S.10].

3.3.2.8 Temperaturverlauf der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung

Die signifikantesten Unterschiede finden sich in den Temperaturverläufen der einzelnen Prüfverfahren. In nachfolgendem Diagramm sind die Profile der fünf zu vergleichenden Verfahren zusammen dargestellt und werden in den nachfolgenden Unterkapiteln genauer erläutert.

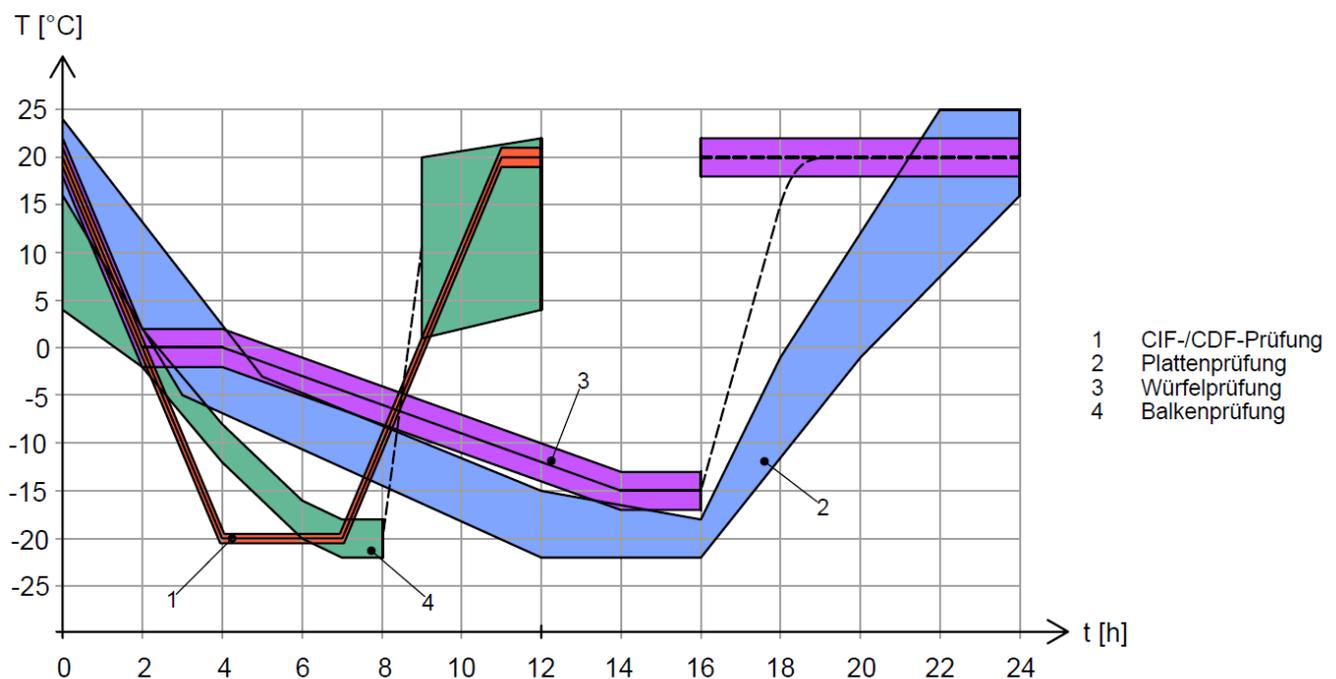


Bild 23: Gegenüberstellung der Temperaturverläufe der zu vergleichenden Prüfverfahren

3.3.2.9 Ort der Temperaturmessung

Die Temperaturmessung findet bei den Verfahren an unterschiedlichen Stellen statt:

- CIF-/CDF-Prüfung in der Prüfflüssigkeit unter dem Boden des Prüfbehälters in der Mitte der Frosttruhe
- Plattenprüfung in der Prüfflüssigkeit in der Mitte der Prüfoberfläche bei mindestens einem Probekörper
- Würfelprüfung in der Mitte eines Betonwürfels
- Balkenprüfung in der Mitte eines Referenzbalkens

Bei der CIF-, CDF- und der Plattenprüfung spiegelt die gemessene Temperatur relativ gut die Temperatur der durch Frost-Tau-Wechsel belasteten Prüffläche wider.

Bei der Würfel- und Balkenprüfung reagiert die Temperatur in der Mitte des Probekörpers zeitlich verzögert auf eine Änderung der Oberflächentemperatur. Da die Abkühlung bei der Balkenprüfung regulär und bei der Würfelprüfung teilweise durch eine luftgekühlte Frostkammer erfolgt, muss die Lufttemperatur viel weiter abgesenkt werden als die Temperatur in Probekörpermitte. Somit erreichen die Oberflächen und die oberflächennahen Schichten Temperaturen unterhalb der angestrebten Minimaltemperatur im Inneren.

Bei der Würfelprüfung, bei der die Abwitterung von den Prüfflächen als Bewertungskriterium für den Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand dient, bedeutet dies, dass je nach Wärmekapazität und -leitfähigkeit der zu prüfenden Betonserie unterschiedliche Minimaltemperaturen an den Prüfflächen vorliegen und damit auch unterschiedlich harte Prüfbedingungen. Bei der Balkenprüfung ist die Temperaturmessung in Probekörpermitte hingegen von Vorteil, weil hier die innere Gefügestörung als Bewertungskriterium dient und damit die innere Temperatur entscheidend ist.

3.3.2.10 Dauer eines Frost-Tau-Wechsel-Zykluses

Ein Frost-Tau-Wechsel-Zyklus dauert bei der Platten- und der Würfelprüfung 24 h, bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung und der Balkenprüfung nur 12 h. Bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung ist die „Zykluszeit [...] mit 12 h so bemessen, dass einerseits eine kurze Prüfdauer möglich ist und dass andererseits die Wärmequellen so in den Probekörper eindringen, dass sich bei gegebener Höhe ein Temperaturprofil und ein Wärmefluss einstellen, die adäquat zur Realität sind“ [4; S.29]. Der 24-stündige Zyklus der Plattenprüfung verlängert zwar die Gesamtprüfdauer, bietet jedoch den Vorteil, dass für die Durchführung der regelmäßigen Messungen an den Probekörpern mehr Spielraum besteht als bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung. Mit der Festlegung des Messzeitpunktes auf ± 1 FTW, d. h. auf ± 1 Tag genau, können bei der Plattenprüfung beispielsweise Arbeitszeiten an Sonn- und Feiertagen besser vermieden werden als bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung.

3.3.2.11 Toleranzen des Temperaturverlaufs

Die Toleranz des Temperaturverlaufs ist bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung mit nur $\pm 0,5$ °C für die Minimaltemperatur und mit ± 1 °C für die restlichen Temperaturen sehr gering. Die anderen Verfahren geben Temperaturspannen von ca. 4 bis teilweise 15 °C an, wobei die Minimaltemperatur bei der Balkenprüfung um ± 3 °C und bei der Platten- und der Würfelprüfung um ± 2 °C vom angestrebten Wert abweichen darf.

Diese unterschiedlichen Genauigkeiten liegen an der Art der Wärmezufuhr- und -abfuhr. Bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung und teilweise auch der Würfelprüfung wird eine Frostkammer mit Kühlflüssigkeit in einem Sekundärkühlkreis verwendet, mit der es möglich ist die Temperatur der Probekörper genauer einzustellen als durch eine luftgekühlte Frosttruhe, die bei den anderen Verfahren standardmäßig zum Einsatz kommt [17].

„In den Normen ist beim Plattenprüf- und beim Würfelverfahren eine Toleranz von ± 2 Kelvin bei der Tiefsttemperatur möglich. Diese hat nach Untersuchungen von Hartmann [...] einen signifikanten Einfluss auf die entstehenden Abwitterungen“ [8; S.10]. „Eine Erniedrigung der Temperatur [bei der Plattenprüfung] von -16 °C auf -20 °C kann die mittlere Abwitterung verdoppeln“ [20; S.51]. Dadurch erhöht sich die Streuung der Ergebnisse.

3.3.2.12 Abkühlgeschwindigkeiten

Die Starttemperatur bzw. die Temperatur am Ende der Auftauphase liegt bei allen Prüfverfahren bei Raumtemperatur, da nach bestimmten Anzahlen an Frost-Tau-Wechseln die Probekörper der Frosttruhe entnommen werden müssen und daran Messungen durchgeführt werden.

Grundsätzlich gilt folgendes: „Je größer die Abkühlgeschwindigkeit ist, umso weniger hat das gefrierende Wasser Zeit, sich in benachbarte freie Poren hin auszudehnen, umso größer ist dadurch die Beanspruchung“ [2; S.379]. Die Zeit für Druckumverteilungen im Beton ist also geringer. Die Abkühlgeschwindigkeit beträgt bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung 10 K/h. Bei den anderen Verfahren kann keine genaue Abkühlgeschwindigkeit angegeben werden. Tendenziell verläuft jedoch das Einfrieren der Proben mit ca. 8 K/h bei der Plattenprüfung und bei der Balkenprüfung mit ca. 4 K/h langsamer als bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung. Bei der Würfelprüfung findet die Abkühlung in etwa gleich schnell wie beim CIF- bzw. CDF-Verfahren statt, allerdings stagniert der Temperaturabfall in der zweiten bis vierten Stunde des Frost-Tau-Zyklus bei einer Temperatur von -2 bis $+2$ °C, sodass die Proben nach der starken ersten Abkühlung nicht zwangsläufig schon gefroren sein müssen. Die CIF- bzw. CDF-Prüfung stellt folglich hinsichtlich Abkühlgeschwindigkeit die stärkste Beanspruchung für einen Probekörper dar.

3.3.2.13 Minimaltemperatur

Die Minimaltemperatur liegt bei allen Verfahren bei ungefähr -20 °C . Einzige Ausnahme ist die Würfelprüfung mit nur -15 °C als angestrebte Minimaltemperatur. Da das Porenwasser im Beton nicht automatisch bei 0 °C gefriert, sondern der Gefrierpunkt maßgeblich von der Porengröße abhängt, kann, unter der Annahme, dass im Beton gleiche Sättigungsverhältnisse vorliegen, bei der Würfelprüfung weniger Wasser gefrieren als bei der CDF- oder der Plattenprüfung.

Die Zeitdauer der Minimaltemperatur scheint bei der Würfel- bzw. Balkenprüfung keinen wesentlichen Einfluss auf die Stärke der Frostbeanspruchung zu haben. So ist bei der Balkenprüfung nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 folgendes angegeben:

„Wenn in Ausnahmefällen während der Nacht und/oder an Wochenenden eine Unterbrechung der Prüfung notwendig ist (z. B. bei Verwendung von Prüfeinrichtungen ohne Regelungsautomatik), werden die Probekörper über den betreffenden Zeitraum im eingefrorenen Zustand bei $(-20\pm 2)\text{ °C}$ gelagert“ [11; S.13].

Eine ähnliche Formulierung findet sich bei der Würfelprüfung nach DIN CEN/TS 12390-9. Bei den anderen behandelten Prüfverfahren fehlt eine solche Angabe.

Grund dafür könnte die unterschiedliche Anordnung der Temperaturmeseinrichtung während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung sein. Bei der Würfel- und Balkenprüfung wird die Temperatur im Inneren der Probekörper gemessen. Ist die Minimaltemperatur im Probekörperinneren erreicht, so wird diese 2 h konstant gehalten, bevor der Auftauprozess beginnt. In dieser Zeit stellt sich sowohl die Prüfflüssigkeit als auch der Probekörper auf die Minimaltemperatur ein. Im gefrorenen Zustand sind die inneren Vorgänge im Beton zum Erliegen gekommen, sodass ein längeres Anhalten der Minimaltemperatur keine Verstärkung einer etwaigen Schädigung zur Folge hat.

Bei den anderen Verfahren hingegen findet die Temperaturmessung nicht im Probekörperinneren statt, sondern bei der Plattenprüfung in der Prüfflüssigkeit auf dem Probekörper und bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung in der Temperierflüssigkeit unter dem mittleren Probenbehälter. Dies bedeutet, dass die Probekörper bei Erreichen der Minimaltemperatur nicht vollständig gefroren sind und hier die Dauer der Minimaltemperatur Einfluss darauf haben kann, wie weit der Gefriervorgang in die Probe hinein fortschreitet. Es ist jedoch anzunehmen, dass sich nach der 3- bzw. 4-stündigen Verweildauer bei Minimaltemperatur bereits der ganze Probekörper auf diese Temperatur eingestellt hat und somit auch bei längerer Minimaltemperatur keine weitere Schädigung eintreten sollte.

3.3.2.14 Auftaugeschwindigkeit

Die Auftaugeschwindigkeit beträgt bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung 10 K/h und bei der Plattenprüfung ca. 6 K/h.

Im Verbundforschungsvorhaben des DAfStb wurde festgestellt, dass sowohl die Abkühl- als auch die Auftaugeschwindigkeit der CIF- bzw. CDF-Prüfung von ± 10 K/h in der Praxis beispielsweise an Wasserbauwerken überschritten werden kann. "Beobachtet wurden hier Abkühlraten bis zu 12 K/h und Auftauraten bis zu 15 K/h. Zu beachten ist jedoch, dass diese Extremwerte sehr selten (< 1 %) auftreten und die häufigsten Raten etwa eine Größenordnung niedriger liegen" [19; S.566].

Bei der Würfel- und der Balkenprüfung unterscheidet sich der Abkühlvorgang vom Auftauvorgang durch die Art des Wärmetransports, da die Wärmezufuhr nicht mehr über die Lüfter der Frosttruhe sondern durch Flutung der Truhe bzw. durch ein Wasserbad erreicht wird. Bei der Balkenprüfung muss nach einer Stunde Flutzeit die Probentemperatur bereits zwischen $+1$ und $+20$ °C liegen, was eine Auftaugeschwindigkeit von ca. 20 bis 40 K/h bedeutet. Bei der Würfelprüfung bezieht sich der angegebene Temperaturverlauf beim Auftauvorgang auf die Temperatur des Wasserbades. Für die Probentemperatur werden keine Vorgaben gemacht.

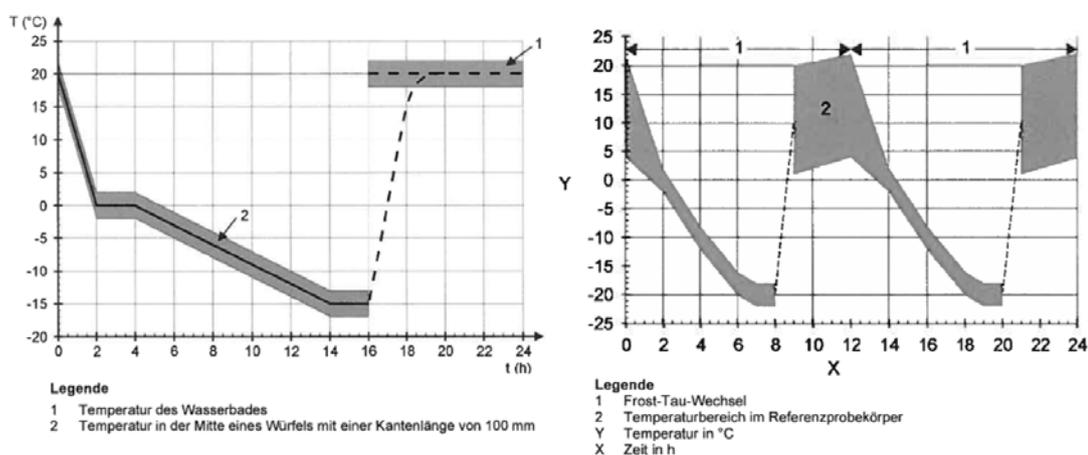


Bild 24: Temperaturverlauf bei der Würfelprüfung (links) [12] und bei der Balkenprüfung (rechts) [11]

Die Auftaugeschwindigkeit kann bei diesen beiden Verfahren folglich stark schwanken, was sich vermutlich auch in einer verstärkten Streuung der Ergebnisse äußert. Je höher die Auftaugeschwindigkeit ist, umso schneller müssen die Transport- und Druckumverteilungsprozesse, die beim Auftauen im Beton stattfinden, ablaufen. Im Vergleich zu den anderen Verfahren ist die Auftaugeschwindigkeit der Würfel- und Balkenprüfung sehr hoch. Daraus folgt, dass beim Würfelverfahren prinzipiell härtere Bedingungen für die Abwitterung vorherrschen, als bei der CDF- und der Plattenprüfung. Bei der Balkenprüfung sind dementsprechend härtere Bedingungen für die innere Gefügestörung vorhanden, als bei der CIF-Prüfung.

3.3.2.15 Richtung des Wärmeflusses

Die Wärmezufuhr bzw. der Wärmeabtransport während der Frost-Tau-Wechselbeanspruchung soll bei allen Verfahren über die Prüffläche stattfinden. Bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung wird der praxisnahe, einseitige Wärmetransport durch die besondere Anordnung der Probekörper in der Frosttruhe erreicht. In der Prüfanlage befinden sich Edelstahlbehälter, die von einer Temperierflüssigkeit umspült werden. In den Behältern lagern die einzelnen Probekörper auf Abstandshaltern eingetaucht in Prüfflüssigkeit. Die Behälter trennen das Temperierbad von der Luftschicht oberhalb der Behälter. Der Wärmetransport findet durch Wärmeleitung über die Behälter und die Prüfflüssigkeit an der Unterseite der Probekörper statt.

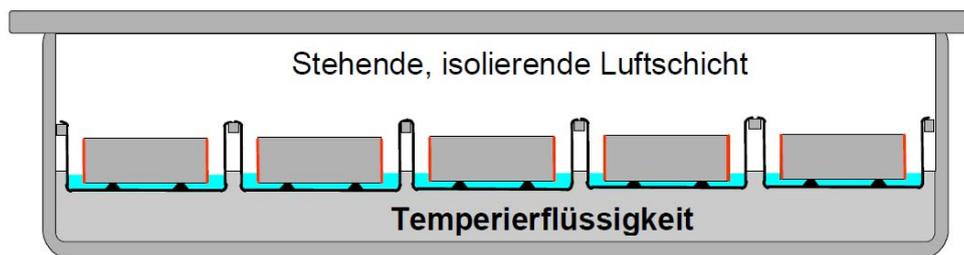


Bild 25: Anordnung der Probekörper in der Frosttruhe bei der CIF-/CDF-Prüfung [13]

Bei der Plattenprüfung kommt in der Regel eine Frostkammer mit Luftkühlung zum Einsatz. Da hier die Probekörper allseitig über die Luft temperiert werden und dennoch ein einseitiger Wärmetransport erzielt werden soll, sind die Probekörper vor dem Einlagern in die Frostkammer an Grund- und Seitenflächen mit Polystyrol zu dämmen.

Durch die Luftzirkulation in der Frostkammer würde die Prüfflüssigkeit auf den Probekörpern schnell verdunsten. Deshalb sind nach DIN CEN/TS 12390-9 die Probekörper während der Frost-Tau-Wechselbeanspruchung mit Polyethylenfolie abzudecken. Ältere Fassungen der Plattenprüfung zum Beispiel nach ÖNORM B 3303 enthielten diese Vorgabe noch nicht [21]. Während der Prüfung musste deshalb mehrmals Prüfflüssigkeit nachgefüllt werden. Der nun vorgeschriebene Verdunstungsschutz erzeugt eine Luftschicht zwischen Folie und Prüffläche, die wie eine Wärmedämmung wirkt. „Es besteht die Gefahr, dass die Probe von der Rückseite her gefriert, d. h. dass sich die Richtung des Wärmetransports umkehrt“ [20; S.47]. Dieser Effekt wird dadurch verstärkt, dass „beim Gefrieren und Tauen die größte Wärmemenge vom gefrierenden Wasser und damit von der Prüflösung verbraucht wird“ [20; S.47].

3.3.2.16 Auslastung der Frosttruhe bzw. Frostkammer

Für die Balken- und die Würfelprüfung findet sich in den Regelwerken die Angabe, dass die Anzahl der Behälter bzw. Probekörper in der Frosttruhe bzw. -kammer stets gleich sein sollte und im Bedarfsfall Blindprobekörper mit einzulagern sind. Für die anderen Prüfverfahren fehlt

eine solche Angabe. Bei der Plattenprüfung wird in der DIN CEN/TS 12390-9 eine Frosttruhe gefordert, die unabhängig von der Anordnung der Probekörper die vorgegebene Temperatur-Zeit-Kurve nachfahren kann. In Untersuchungen von Setzer und Auberg konnte für die Plattenprüfung festgestellt werden, dass sich je nach Beladung der Frosttruhe die Minimaltemperatur im Versuch verändert. „Sie schwankt auch in einer Prüfung zwischen den verschiedenen Probekörpern“ [20; S.50]. Inwieweit nun das Temperaturprofil eingehalten werden kann, hängt maßgeblich von der Frosttruhe ab.

3.3.2.17 Durchzuführende Messungen

Nach bestimmten Anzahlen an Frost-Tau-Wechseln sind an den Probekörpern je nach Prüfverfahren verschiedene Messungen durchzuführen:

- CIF-Prüfung Ultraschalllaufzeit
- CDF-Prüfung Abwitterung
- Plattenprüfung Abwitterung
- Würfelprüfung Abwitterung
- Balkenprüfung Ultraschalllaufzeit oder Grundfrequenz in Querrichtung

Die Bestimmung der Abwitterung ist bei der CDF-Prüfung am wenigsten von der prüfenden Person abhängig, weil dort das abgewitterte Material durch ein 3-minütiges Ultraschallbad von der Prüffläche gelöst wird und nicht durch Abbürsten und Abspülen, wie dies bei der Platten- und Würfelprüfung der Fall ist. Je nach verwendeter Bürste und nach Dauer und Stärke des Abbürstens werden mehr oder weniger Partikel abgelöst, sodass die Ergebnisse stark schwanken können.

Bei den drei Verfahren CDF-, Platten- und Würfelprüfung sind die verwendeten Papierfilter vor dem Abfiltrieren der Prüflösung im getrockneten Zustand zu wiegen, damit die Masse der Abwitterung nicht durch die Ausgleichsfeuchte des Filters verfälscht wird.

Zur Bestimmung der inneren Gefügestörung wird bei der CIF-Prüfung die Ultraschalllaufzeit gemessen. Bei der Balkenprüfung kann sowohl die Ultraschalllaufzeit als auch die Grundfrequenz in Querrichtung gemessen werden, wobei nicht bekannt ist, welches Verfahren genauere Ergebnisse liefert.

Bei der CDF-Prüfung sind vier, bei den anderen Verfahren jeweils fünf Messzeitpunkte vorgegeben. Die CDF-Prüfung dauert jedoch nur 28 Frost-Tau-Wechsel, sodass mit den vier Werten ein ausreichend genauer zeitlicher Verlauf der Schädigung angegeben werden kann. In allen fünf Verfahren nach DIN CEN/TS 12390-9 und DIN-Fachberichts CEN/TR 15177 sind die Messzeitpunkte auf ± 1 FTW genau festgelegt, weshalb ein gewisser Spielraum für die Messungen vorhanden ist.

Neben den Messungen der Schädigung während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung werden je nach Verfahren mehr oder weniger zusätzliche Informationen gesammelt. Bei der CIF-Prüfung wird sowohl die Wasseraufnahme während der erneuten Sättigung als auch während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung gemessen. Bei den anderen vier Verfahren wird die Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung nicht gemessen.

Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Wasseraufnahmedaten zwar Hinweise über das Saugverhalten der untersuchten Betonserie geben, jedoch i.d.R. keine Aussage über die Frostbeständigkeit zulassen. Aussagen zur Frostbeständigkeit könnte nur der Sättigungsgrad des Betons liefern, der jedoch in keinem der fünf Prüfverfahren bestimmt wird. Eine Zunahme des Wassergehalts bedeutet zwar grundsätzlich eine Erhöhung des Sättigungsgrades, jedoch entspricht ein hoher Wassergehalt nicht gleichzeitig einem hohen Sättigungsgrad des Betons. Ein porenreicher Beton kann beispielsweise viel Wasser aufnehmen, damit einen hohen Wassergehalt erreichen und trotzdem noch genügend luftgefüllte Poren als Ausweichraum für gefrierendes Eis besitzen.

3.3.2.18 Gesamtdauer der Prüfung

Der zeitliche Aufwand für die Prüfung ohne Auswertung der Ergebnisse ist je nach Prüfverfahren unterschiedlich und setzt sich aus der Herstellungs- und Lagerungszeit, der Dauer der erneuten Sättigung und der Dauer der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung wie folgt zusammen:

- CIF-Prüfung $28 + 7 + 28 = 63$ Tage
- CDF-Prüfung $28 + 7 + 14 = 49$ Tage
- Plattenprüfung $28 + 3 + 56 = 87$ Tage
- Würfelprüfung $27 + 1 + 56 = 84$ Tage
- Balkenprüfung $28 + 0 + 56 = 84$ Tage

Die CDF-Prüfung ist demnach mit 49 Tagen Prüfdauer die kürzeste Prüfung. Sie ist zwei Wochen kürzer als die CIF-Prüfung, weil nur 28 und nicht 56 Frost-Tau-Wechsel durchgeführt werden. Mit fast drei Monaten Prüfdauer ist die Plattenprüfung, die insgesamt 56-mal ihren 24-stündigen Frost-Tau-Wechsel-Zyklus durchläuft, das zeitaufwendigste Prüfverfahren.

Allgemein stellen die Prüfverfahren eine im Vergleich zur Praxis beschleunigte Beanspruchung für den zu prüfenden Beton dar. Dies wird auch als „Zeitraffereffekt“ bezeichnet [19; S.564]. Beispielsweise entsprechen die 28 Frost-Tauwechsel in der CDF-Prüfung in etwa einer Schädigung, die sich bei mitteleuropäischem Klima in 50 Wintern ergibt [19; S.569].

3.3.2.19 Expositionsklasse

Die verschiedenen Prüfverfahren spiegeln unterschiedliche Beanspruchungen bzw. Expositionsklassen wider. Die CIF-Prüfung mit entionisiertem Wasser als Prüflüssigkeit repräsentiert eine Beanspruchung entsprechend XF3, die CDF-Prüfung mit dreiprozentiger NaCl-Lösung XF4 [8; S.15]. Für die Expositionsklasse XF2 wurde von der Bundesanstalt für Straßenwesen das modifizierte CDF-Verfahren – mit angehobener Minimaltemperatur und verkürzter Prüfdauer – veröffentlicht. Die ONR 23303 verwendet das Würfelverfahren zur Überprüfung von Betonen der Expositionsklasse XF1, die Balkenprüfung für XF3 und die Plattenprüfung für XF2 oder XF4. Die Bewertung des untersuchten Betons erfolgt hierbei durch Vergleich mit einem mitgeprüften Nullbeton, der eine für die jeweilige Expositionsklasse geforderte Zusammensetzung aufweist.

3.3.2.20 Bewertungs- und Abnahmekriterium

Die Beurteilung eines Betons hinsichtlich Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand erfolgt durch Vergleich mit einzuhaltenden Grenzwerten. Die verschiedenen Prüfvorschriften unterscheiden hierbei meist zwischen den Begriffen Bewertungskriterium und Abnahmekriterium: Das Bewertungskriterium gibt an, ab wann ein Beton im Versuch als geschädigt gilt. So gilt zum Beispiel nach BAW-Merkblatt ein Beton dann als geschädigt, wenn ein relativer dynamischer E-Modul von 75% unterschritten wird. Der Beton ist für einen bestimmten Einsatzbereich geeignet, wenn er das Abnahmekriterium erfüllt, z. B. wenn nach BAW-Merkblatt die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel bis zum Erreichen des Schädigungskriteriums > 28 beträgt [13; S.15].

„Die Festlegung von Kriterien zur Beurteilung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes erfolgte in der Vergangenheit durch Gutachtergruppen aus der Bauindustrie und anhand einer Vielzahl von Prüfungen an Betonmischungen“ [4; S.8]. Das Abnahmekriterium sollte so gewählt sein, dass damit „geeignete Betonzusammensetzungen zuverlässig von ungeeigneten unterschieden werden können“ [8; S.3]. „Ist es zu hart, dann wird die Produktion unnötig verteuert. Ist es zu weich, dann entstehen Prüfkosten, ohne daß Schäden mit ausreichender Sicherheit vermieden werden“ [20; S.45].

DIN CEN/TS 12390-9 und der DIN-Fachberichts CEN/TR 15177 geben zwar Bewertungskriterien für die verschiedenen Verfahren an, die dazugehörigen Abnahmekriterien fehlen jedoch. Deshalb werden im Folgenden die üblichen Bewertungs- und Abnahmekriterien anderer Regelwerke dargestellt. Es sei jedoch darauf hingewiesen, dass diese je nach Quelle stark schwanken können und die Auflistung nicht abschließend ist:

Prüfung	Prüflösung	Quelle	Bewertungskriterium	Abnahmekriterium
CIF-Prüfung	ohne Tausalz	[13]	relativer, dynamischer E-Modul < 75 % (maßgebend) flächenbezogene Abwitterung nach 28 FTW (zusätzlich)	> 28 FTW < 1000 g/m ²
		[25]	Abnahme des relativen dynamische E-Moduls nach 56 FTW	< 40 %
		[33]	relativer, dynamischer E-Moduls < 80 %	Anzahl der FTW bis zum Erreichen des Grenzwertes ist in Abh. der Beanspruchung festzulegen
CDF-Prüfung	mit Tausalz	[13]	flächenbezogene Abwitterung nach 28 FTW (maßgebend) relativer, dynamischer E-Modul < 75 % (zusätzlich)	< 1500 g/m ² > 28 FTW
		[26] [27] [35]	flächenbezogene Abwitterung nach 28 FTW	< 1500 g/m ²
Plattenprüfung	ohne Tausalz	[26] [15]	flächenbezogene Abwitterung nach 56 FTW	< 1,0 kg/m ²
	ohne Tausalz	[34]	relative Längenänderung > 0,1 %	Anzahl der FTW bis zum Erreichen des Grenzwertes ist in Abh. der Beanspruchung festzulegen
	mit Tausalz	[26] [15]	flächenbezogene Abwitterung nach 56 FTW	< 1,0 kg/m ²
	mit Tausalz	[14]	Vergleich mit Nullbeton (Vergleichsbeton nach XF2 oder XF4) Zu untersuchender Beton hat gleichwertige Beständigkeit wie Nullbeton, wenn: - Abwitterung des zu untersuchenden Betons nach 56 FTW max. 100 g/m ² größer als bei entsprechendem Nullbeton bzw. - entsprechender Nullbeton Abwitterung von bis zu 300 g/m ² Abwitterung aufweist und Abwitterung des zu untersuchenden Betons nach 56 FTW max. 200 g/m ² größer als bei entsprechendem Nullbeton	
Würfelprüfung	ohne Tausalz	[28]	flächenbezogene Abwitterung nach 100 FTW (XF1)	< 10 %
		[3]	flächenbezogene Abwitterung nach 50 FTW (XF3)	< 5 %
		[28]	flächenbezogene Abwitterung nach 50 FTW und nach 100 FTW (XF1)	< 5 % < 10 %
		[28]	flächenbezogene Abwitterung nach 50 FTW und nach 100 FTW (XF3)	< 3 % < 5 %
	mit Tausalz	[26] [28] [29]	flächenbezogene Abwitterung nach 56 FTW (XF4)	< 3 %
	mit Tausalz	[14]	Vergleich mit Nullbeton (Vergleichsbeton nach XF1): Zu untersuchender Beton hat gleichwertige Beständigkeit wie Nullbeton, wenn Masseverlust nach 56 FTW max. 2 %-Punkte größer als bei Nullbeton	
Balkenprüfung	ohne Tausalz	[30]	Abnahme des rel. dynamischen E-Moduls nach 56 FTW	< 12 %
	ohne Tausalz	[14]	Vergleich mit Nullbeton (Vergleichsbeton nach XF3) Zu untersuchender Beton hat gleichwertige Beständigkeit wie Nullbeton, wenn: - Änderung der Schalllaufzeit nach 56 FTW max. 5 %-Punkte größer ist als jene des Nullbetons bzw. - Abnahme der Resonanzfrequenz nach 56 FTW max. 5 %-Punkte größer ist als jene des Nullbetons	

Tabelle 1: Übersicht der Bewertungs- und Abnahmekriterien zu den verschiedenen Prüfverfahren

In den Untersuchungen des Verbundforschungsvorhabens des DAfStb konnte das Abnahmekriterium für die CDF-Prüfung von 1500 g/m² Abwitterung nach 28 Frost-Tauzyklen als richtig bestätigt werden [19; S.569]. Der Grenzwert von 1500 g/m² gilt für Ingenieurbauwerke nach ZTV-ING Teil 3 und Wasserbauwerke nach ZTV-W LB215.

„Für die Bewertung von Bauwerken und Bauteilen in der Expositionsklasse XF3 [mithilfe der CIF-Prüfung] außerhalb des Regelungsbereichs der ZTV-W 215 [...] fehlen zurzeit Festlegungen zur Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, die bis zur Schädigungsgrenze [...] in der Laborprüfung zu erreichen sind“ [19; S.569].

Während das Abnahmekriterium der Plattenprüfung nach SS 13 72 44 bei 1000 g/m² für eine akzeptable Frostbeständigkeit [15; S.9] liegt, ist für das CDF-Verfahren ein Grenzwert von 1500 g/m² vorgegeben. Daraus kann jedoch nicht der Schluss gezogen werden, dass die Plattenprüfung strenger als die CDF-Prüfung ist, weil sich die beiden Verfahren hinsichtlich Vorsättigung, Art der Prüffläche und Temperaturprofil zu stark unterscheiden.

4 Im Hochschullabor durchgeführte Prüfverfahren

Die im Kapitel 3 in der Theorie vorgestellten Prüfverfahren konnten, aufgrund des zeitlichen Aufwandes, nicht alle im Zuge unserer Bachelorarbeit auch in der Praxis durchgeführt werden. Vorab legten wir uns auf vier unterschiedliche Betonserien fest, deren Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beständigkeit anschließend mit den Prüfverfahren CIF-, CDF- und Plattenprüfung untersucht wurde.

Im Folgenden werden alle für die Durchführung im Hochschullabor benötigten Vorarbeiten beschrieben, die untersuchten Betonserien näher vorgestellt und die Ergebnisse und Auswertungen der Prüfungen erläutert. Ein Vergleich der drei ausgewählten Prüfverfahren und eine Wertung auf Grundlage unserer praktischen Arbeiten im Hochschullabor schließen dieses Kapitel ab.

4.1 Vorarbeiten

Da die Frosttruhen im Labor der Hochschule Regensburg bis zu Beginn dieser Bachelorarbeit noch ungenutzt gewesen waren und somit noch keine praktischen Erfahrungen im Umgang mit den Anlagen und den verschiedenen Prüfverfahren vorlagen, war eine gründliche Einarbeitung unabdingbar.

Zunächst wurden für die einzelnen Prüfverfahren aus den zugrundeliegenden Regelwerken stichwortartige Kurzanleitungen erstellt (siehe Anhang 3), mit deren Hilfe anschließend ein Terminplan aufgestellt werden konnte (siehe Anhang 4), der alle notwendigen Labor-tätigkeiten beinhaltete und dabei Wochenenden, Feiertage und Auslastung der Truhen berücksichtigte.

Nach Festlegung der zu überprüfenden Betonserien und anhand einer Richtrezeptur wurden alle notwendigen Betonbestandteile, wie z. B. Zement, Gesteinskörnungen, Zusatzstoffe und -mittel organisiert. Fehlende, für die Prüfungen erforderliche Hilfsmittel, beispielsweise PTFE-Platten für die CIF- bzw. CDF-Prüfung oder Isoliermaterial für die Plattenprüfung, wurden besorgt und der Umgang mit den während der Prüfungen einzusetzenden Geräten, wie Ultraschallbad und Ultraschallmessgerät, eingeübt.

Die für die Prüfung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes verwendeten Truhen wurden für den Betrieb einsatzfähig gemacht. Der Frostschutz der Temperierflüssigkeit wurde mittels Refraktometer überprüft, die Einstellungen der Prüfruhen kontrolliert und Testläufe gefahren. Von den verwendeten Korngruppen wurden Siebanalysen durchgeführt und die einzelnen Anteile für eine grob- bis mittelkörnige Sieblinie AB16 errechnet (siehe Anhang 5).

4.2 Untersuchte Betonserien

Die drei zu vergleichenden Prüfverfahren CIF-, CDF- und Plattenprüfung wurden im Hochschullabor an vier verschiedenen Betonserien durchgeführt, um die Bewertung der Prüfergebnisse nicht vom Verhalten einer einzelnen Betonserie abhängig zu machen und mögliche Unterschiede zwischen den drei Prüfverfahren in der Bewertung eines Betons zu erkennen.

4.2.1 Zusammensetzung der untersuchten Betonserien

Die Zusammensetzungen der vier im Hochschullabor geprüften Betonserien Nullbeton, LP-Beton, Beton mit Mikrohohlkugeln und Beton mit Faserpartikeln sind nachfolgend tabellarisch dargestellt und werden im Anschluss näher erläutert.

Betonserie	Prüfverfahren	Zement	z [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]	w/z [-]	Gesteinskörnungen	Fließmittelzugabe [M.-% v. z]	Menge Sonderbestandteil	LP-Gehalt [Vol.-%]	AM [cm]	$\rho_{b,h}$ [$\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$]	f_c [$\frac{\text{N}}{\text{mm}^2}$]
Nullbeton	CIF-Prüfung	CEM II/A-S 42,5 R	360	0,45	35 % KG 0/4 25 % KG 4/8 40 % KG 8/16	0,48	-	0,9	48	2447	58,86
	CDF-Prüfung					0,52		3,0	48	2369	
	Plattenprüfung					0,52		1,0	49	2431	
LP-Beton	CIF-Prüfung					0,35	0,25 M.-% v. z	4,8	49	2336	32,92
	CDF-Prüfung					0,44	0,32 M.-% v. z	6,5	51	2256	
	Plattenprüfung					0,26	0,41 M.-% v. z	7,6	45	2233	
Beton mit Mikrohohlkugeln	CIF-Prüfung					0,39	3,5 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	2,8	46	2380	52,89
	CDF-Prüfung					0,39		n.b.	47	2390	
	Plattenprüfung					0,57		2,6	49	2380	
Beton mit Faserpartikeln	CIF-Prüfung					0,54	3,5 $\frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	2,0	42	2426	63,78
	CDF-Prüfung					0,54		n.b.	51	2355	
	Plattenprüfung					0,49		1,3	43	2437	

Bild 26: Übersicht über die im Hochschullabor geprüften Betonserien

Alle Betonserien wurden mit einem Portlandhüttenzement CEM II/A-S 42,5 R mit einem Zementgehalt von 360 kg/m³ hergestellt. Der Wasser-Zement-Wert wurde auf 0,45 festgelegt. Als Gesteinskörnung kamen Kiese und Sande aus lokalen Vorkommen mit einer Kornzusammensetzung im Bereich der Sieblinie AB16 und der Kategorie MS₁₈ zum Einsatz.

Bei der Herstellung der Probekörper für die drei Prüfverfahren wurden am Frischbeton jeweils das Ausbreitmaß, die Rohdichte und der Luftporengehalt bestimmt. Der Luftporengehalt der Serie 3 und 4 für die CDF-Prüfung konnte aufgrund eines Defektes am Luftporentopf nicht bestimmt werden. Die Konsistenz der Betone wurde mit einem handelsüblichen Fließmittel eingestellt. Die angestrebte Ausbreitmaßklasse F3 konnte bei allen Betonserien eingehalten werden. Zudem wurde am Festbeton die Druckfestigkeit ermittelt. Dazu wurde pro Betonserie ein zusätzlicher Betonwürfel der Kantenlänge 15 cm hergestellt, nach einem Tag ausgeschalt, 28 Tage unter Wasser gelagert und anschließend die Druckfestigkeitsprüfung durchgeführt (siehe Anhang 6). Hier sei angemerkt, dass die Druckfestigkeit je Betonserie nur an einem einzigen Würfel geprüft wurde, um damit einen groben Anhaltswert für die Betone zu erhalten. Eine genaue Bewertung der Betonserien hinsichtlich der Druckfestigkeit ist mit diesen Einzelwerten nicht möglich. Zudem besteht nach Setzer und Auberg [20; S.56] kein Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und dem Frost-Tausalz-Widerstand.

4.2.1.1 Serie 1: Nullbeton

Die Serie Nullbeton wurde mit den Ausgangsstoffen Wasser, Zement, Gesteinskörnungen und Fließmittel hergestellt und beinhaltete keine weiteren Sonderbestandteile. Diese Mischung war die Basis für die restlichen Betonserien, bei denen jeweils ein anderer Sonderbestandteil zugegeben wurde.

4.2.1.2 Serie 2: LP-Beton

Bei der Serie LP-Beton wurde durch Verwendung eines Luftporenbildners der Luftporengehalt im Beton erhöht. Künstlich eingebrachte Luftporen verbessern den Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand von Beton, weil sie die im Zementstein eines Betons enthaltenen Kapillarporen unterbrechen und damit sowohl die kapillare Wasseraufnahme verringern als auch Ausweichräume für das gefrierende Wasser schaffen. Der flüssige Luftporenbildner wurde der Mischung als letztes beigegeben. Nach einer Mischzeit von mindestens 60 Sekunden wurde der Luftporengehalt des Frischbetons mit Hilfe eines Luftporentopfes gemessen und auf die Einhaltung des in der DIN 1045 für die Expositionsklasse XF4 vorgeschriebenen Mindestluftporengehaltes von 4,5 Vol.-% [31; S.99] kontrolliert. Bei Nichteinhaltung wurde so lange Luftporenbildner nachdosiert und anschließend vermischt, bis der Mindestwert erreicht wurde. Daraus resultieren schwankende Zugabemengen zwischen 0,25 und 0,41 M.-% bezogen auf den Zementgehalt. Die Fließmittelzugabe war bei dieser Betonserie am geringsten, da bereits durch die künstlichen Luftporen die Konsistenz des Betons weicher war. Der LP-Beton wies von allen untersuchten Betonserien die geringste Rohdichte auf.

4.2.1.3 Serie 3: Beton mit Mikrohohlkugeln

Die dritte Betonserie enthielt sogenannte Mikrohohlkugeln, die anstelle eines herkömmlichen Luftporenbildners zur Herstellung eines Betons mit hoher Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beständigkeit verwendet werden. Der Vorteil dieses Zusatzmittels ist, dass der geforderte Luftporengehalt einfach und zielsicher erreicht werden kann und nicht, wie bei anderen Luftporenbildnern, von zahlreichen Faktoren während der Betonherstellung abhängt. Im Hochschullabor wurden der zu prüfenden Betonserie $3,5 \text{ kg/m}^3$ Mikrohohlkugeln beigegeben. Dies entspricht laut Zulassung der maximalen Dosierung für Beton nach DIN 1045. Die Zugabe erfolgte, wie im Produktdatenblatt angegeben, zusammen mit der Gesteinskörnung vor Zugabe des Fließmittels.

Die nachfolgenden Bilder wurden mit einem Stereomikroskop aufgenommen und zeigen die ca. $40 \pm 5 \mu\text{m}$ großen vorgefertigten Luftporen bestehend aus elastischen Kunststoffhüllen.

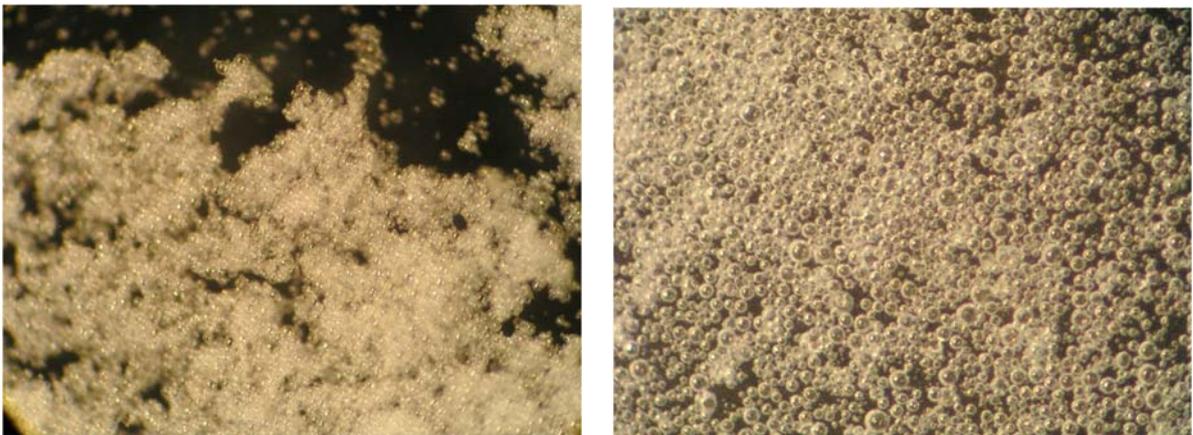


Bild 27 und 28: Mikrohohlkugeln unter dem Mikroskop betrachtet (links: trocken, rechts: unter Wasser)

Der bei der Serie Beton mit Mikrohohlkugeln gemessene Luftporengehalt von ca. 2 Vol.-% spiegelt nur den Gehalt der echten Luftporen im Frischbeton wider. Die eingebrachten Mikrohohlkugeln werden dabei nicht berücksichtigt. Der Gehalt an Mikrohohlkugeln kann in der Praxis mithilfe eines Auswaschversuchs kontrolliert werden, was jedoch hier nicht notwendig war, weil die zugegebene Menge an Mikrohohlkugeln bekannt war.

4.2.1.4 Serie 4: Beton mit Faserpartikeln

Als vierte zu prüfende Betonserie wurde ein Beton mit Faserpartikeln hergestellt. Es handelt sich dabei um Cellulosestaub. Die Partikel sind fest und in Wasser nicht löslich und weisen eine Rohdichte von $1,5 \text{ kg/m}^3$ auf. Die nachfolgenden Bilder zeigen die ca. $50 \mu\text{m}$ großen Faserpartikel unter dem Mikroskop:

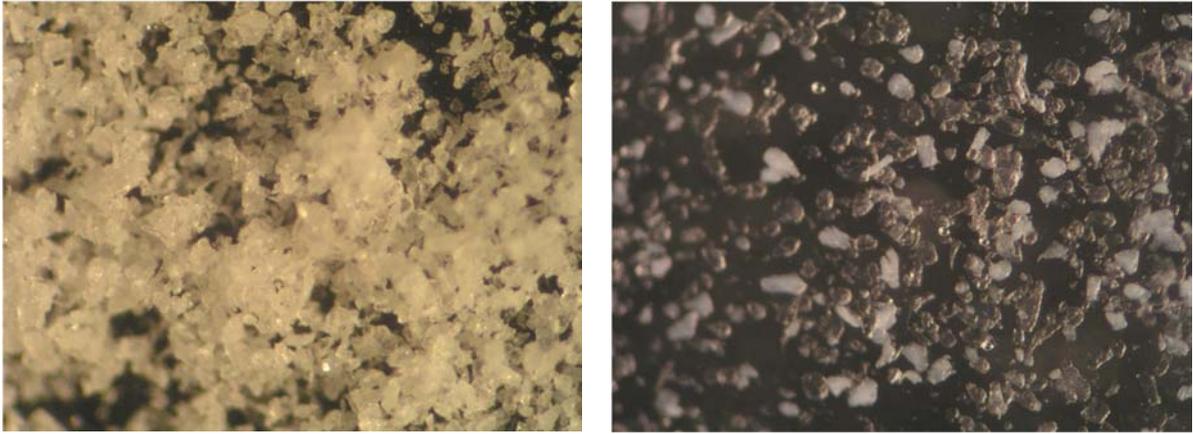


Bild 29 und 30: Cellulose-Faserpartikel unter dem Mikroskop betrachtet (links: trocken, rechts: unter Wasser)

Durch die eingebrachten Fasern soll die Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beständigkeit verbessert werden. Das in den Kapillarporen gefrierende und sich ausdehnende Wasser kann angrenzende Cellulosefasern komprimieren und dadurch die durch das Ausdehnen erzeugten Spannungen abbauen. Eventuell tritt ein weiterer positiver Effekt auf. Dieser basiert auf der Annahme, dass die bei der Herstellung der Probekörper im gequollenen Zustand vorliegenden Cellulosefasern nach Erhärtung des Betons schwinden, zusätzlichen Porenraum für die Expansion von gefrierendem Wasser schaffen und somit die Frostbeständigkeit erhöhen. Dies sind jedoch nur Vermutungen.

Eine Auffälligkeit dieser Betonserie zeigte sich bei der Herstellung der für die Prüfverfahren erforderlichen Betonwürfel. Nach dem Verdichten des Betons in den Würfelformen war die Herstellung einer glatten Oberfläche durch Abziehen des Betons nur schwer möglich. In der Zeit, in der der Luftgehalt mit dem Luftporentopf bestimmt wurde, ist die Konsistenz des Betons im Zwangsmischer steifer geworden, sodass eine weitere Menge an Fließmittel zugegeben werden musste. Die Faserpartikel scheinen bei der Betonage das Wasser aus dem Zementleim aufzusaugen und damit die Fließfähigkeit des Betons herabzusetzen.

4.2.2 Einschätzung der untersuchten Betonserien

Wie in Kapitel 3.3.19 ersichtlich, dienen die drei im Hochschullabor durchgeführten Prüfverfahren zum Nachweis der Beständigkeit für verschiedene Expositionsklassen. Durch die CIF-Prüfung wird die Frostbeständigkeit eines Betons für die Expositionsklasse XF3 getestet. Die CDF- Prüfung und die Plattenprüfung mit tausalzhaltiger Prüflösung dienen zum Nachweis der Frost-Tausalz-Beständigkeit in der Expositionsklasse XF4.

Die DIN 1045 gibt folgende Mindestanforderungen an die Zusammensetzung und die Eigenschaften für Beton der Expositionsklassen XF1 bis XF4 vor:

Expositionsklassen	Betonkorrosion durch Frostangriff mit und ohne Taumittel					
	XF1	XF2		XF3		XF4
max. w/z	0,60	0,55 ⁶⁾	0,50 ⁶⁾	0,55	0,50	0,50 ⁶⁾
Mindestdruckfestigkeitsklasse ²⁾	C25/30	C25/30	C35/45 ⁵⁾	C25/30	C35/45 ⁵⁾	C30/37
Mindestzementgehalt ³⁾ [kg/m ³]	280	300	320	300	320	320
Mindestzementgehalt bei Anrechnung von Zusatzstoffen ³⁾ [kg/m ³]	270	270 ⁶⁾	270 ⁶⁾	270	270	270 ⁶⁾
Mindestluftgehalt [%]	-	7)	-	7)	-	7) 8)
andere Anforderungen	Gesteinskörnungen für die Expositionsklassen XF1 bis XF4 (siehe Tabellen 2.2.1.d und 2.2.1.e)					
	F ₄	MS ₂₅		F ₂		MS ₁₈

⁷⁾ Der mittlere Luftgehalt im Frischbeton unmittelbar vor dem Einbau muss bei einem Größtkorn der Gesteinskörnung von 8 mm $\geq 5,5$ Vol.-%, 16 mm $\geq 4,5$ Vol.-%, 32 mm $\geq 4,0$ Vol.-% und 63 mm $\geq 3,5$ Vol.-% betragen. Einzelwerte dürfen diese Anforderungen um höchstens 0,5 Vol.-% unterschreiten.
Für Fließbeton (Konsistenzklasse $\geq F_4$) ist der Mindestluftgehalt um 1 Vol.-% zu erhöhen. Als oberer Grenzwert des Luftgehaltes gilt der festgelegte Mindestluftgehalt plus 4 Vol.-% absolut. In diesem Fall ist das Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton⁴⁾ der FGSV zu beachten.

⁸⁾ Erdfeuchter Beton mit $w/z \leq 0,40$ darf ohne Luftporen hergestellt werden.

Bild 31: Mindestanforderungen für die Expositionsklasse XF1 bis XF4 nach DIN 1045 [31; S.98f.]

Vergleicht man die Mindestanforderungen der DIN 1045 für frost- bzw. frosttausalzbeständigen Beton, so kann die Beständigkeit der vier geprüften Betonserien wie folgt eingeschätzt werden:

- Der Nullbeton hält die Anforderungen an die Zusammensetzung für die Expositionsklasse XF3 ein. Der w/z-Wert liegt mit 0,45 unter dem Grenzwert von 0,50. Da der Luftporengehalt nur zwischen 0,9 und 3,0, also unter 4,5 Vol.-% liegt, werden die Mindestanforderungen der Expositionsklasse XF4 nicht erfüllt. Folglich müsste die Serie Nullbeton die CIF-Prüfung bestehen, die CDF-Prüfung allerdings nicht.
- Der Luftporenbeton hält die Anforderungen an die Zusammensetzung für die Expositionsklasse XF4 ein. Der Luftgehalt liegt zwischen 4,8 und 7,6 Vol.-% und somit stets oberhalb der geforderten 4,5 Vol.-%. Die 7,6 Vol.-% liegen dabei noch unterhalb des oberen Grenzwertes von $4,5 + 4$ Vol.-%. Folglich müsste diese Serie sowohl die CIF-, CDF-, als auch die Plattenprüfung bestehen.
- Die Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beständigkeit des Betons mit Mikrohohlkugeln kann nicht allein durch die Einhaltung der Mindestanforderungen nach DIN 1045 abgeschätzt werden, sondern muss laut Produktzulassung im Rahmen der Erstprüfung mit dem CIF- bzw. CDF-Verfahren nach BAW-Merkblatt „Frostprüfung“

nachgewiesen werden. Da jedoch die Anforderungen an die Zusammensetzung der Expositionsklasse XF3 eingehalten sind und anzunehmen ist, dass durch die Mikrohohlkugeln keine Verschlechterung der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beständigkeit eintritt, müsste diese Betonserie die CIF-Prüfung auf jeden Fall bestehen. Zudem ist zu vermuten, dass dieser Beton auch in der CDF- und Plattenprüfung gut abschneiden wird, da die Mikrohohlkugeln mit $3,5 \text{ kg/m}^3$ maximal dosiert wurden und das eindeutige Ziel haben, die Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beständigkeit zu erhöhen.

- Mit den Faserpartikeln der vierten Betonserie wurden noch keinerlei Erfahrungen im Hinblick auf Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand gemacht. Unter der Annahme, dass die Faserpartikel keine Verschlechterung der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beständigkeit zur Folge haben und da die Anforderungen an die Zusammensetzung für die Expositionsklasse XF3 eingehalten sind, müsste diese Betonserie zumindest die CIF-Prüfung bestehen. Ob der Beton mit Faserpartikeln auch die CDF- und die Plattenprüfung besteht, kann vorab nicht abgeschätzt werden.

4.3 Ergebnisse und Auswertung

Nachfolgend werden die Ergebnisse der drei, im Hochschullabor durchgeführten, Prüfverfahren an den vier verwendeten Betonserien dargestellt und verglichen. Abschließend kommt es zu einem praktischen Vergleich und einer Bewertung der drei Prüfverfahren auf Grundlage der Laborergebnisse und der gesammelten Erfahrungen.

Zwar ist das eigentliche Ziel dieser Arbeit nicht ein Vergleich der getesteten Betonserien, sondern der durchgeführten Prüfverfahren, dennoch ist es unumgänglich auch die Wirkungsweisen und Schadensverläufe der einzelnen Betone zu erläutern.

Die in diesem Kapitel dargestellten Diagramme basieren auf den in Kapitel 3.2 angegebenen Formeln zur Versuchsauswertung. Sämtliche dazugehörige Messwerte und Rechenergebnisse sind im Anhang 7 hinterlegt.

4.3.1 Ergebnisse und Auswertung der CIF-Prüfung

Die CIF-Prüfung wurde nach den im DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 und in Kapitel 3.2.1 beschriebenen Schritten durchgeführt. In Anlehnung an die Regelungen des BAW-Merkblattes „Frostprüfung“ wurde bei der CIF-Prüfung im Hochschullabor zusätzlich zur inneren Gefügestörung die Abwitterung gemessen. Dadurch konnten zum einen mehr Daten zur Auswertung gewonnen und zum anderen ein Vergleich mit der CDF- und der Plattenprüfung ermöglicht werden. Die insgesamt vier Betonserien mussten in zwei Prüfläufen getestet werden, da die vorhandene Prüfanlage nur Platz für zwei Serien bietet. So wurden zuerst der Nullbeton und der LP-Beton und im Anschluss der Beton mit Mikrohohlkugeln und der Beton mit Faserpartikeln gemeinsam geprüft.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der vier Betonserien bezüglich der Wasseraufnahme, der inneren Gefügestörung, der Abwitterung und der Augenscheinprüfung dargestellt und erläutert.

4.3.1.1 Wasseraufnahme

Im folgenden Diagramm sind die Wasseraufnahme während der 7-tägigen erneuten Sättigung und der Frost-Tauwechsel-Beanspruchung gemeinsam dargestellt. Die Frost-Tauwechsel-Beanspruchung endet nach 28 Tagen und damit nach 56 12-stündigen Frost-Tau-Wechseln. Als Prüfliquidität diente jeweils entionisiertes Wasser.

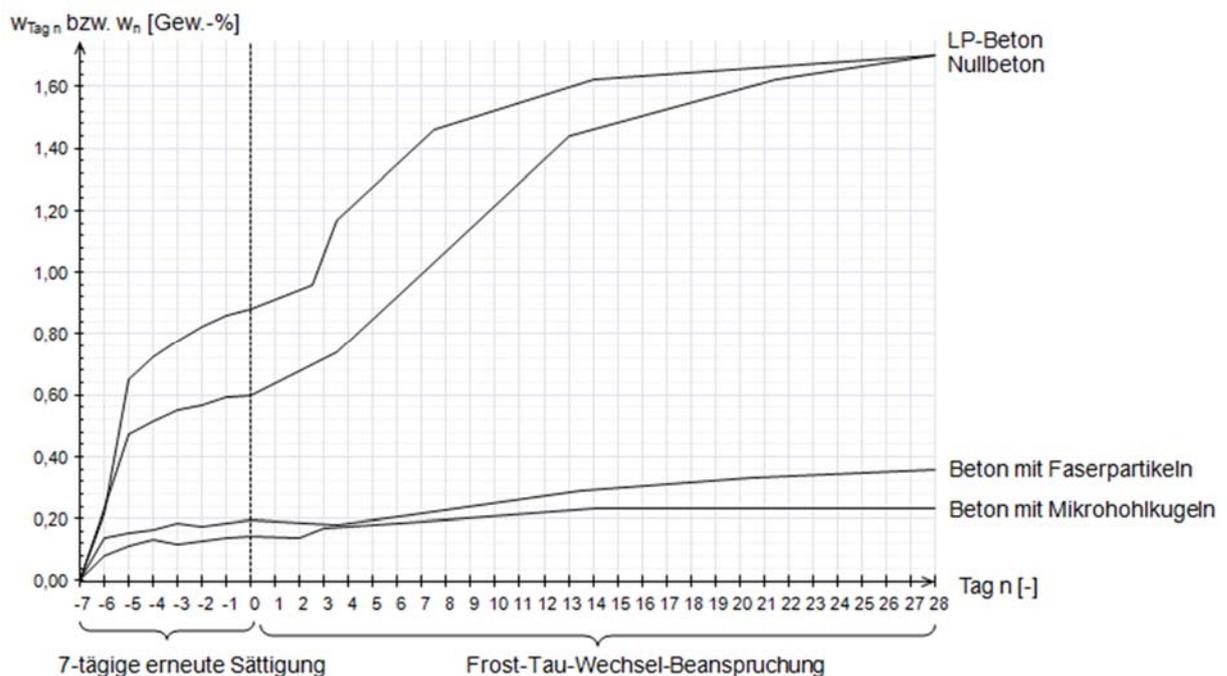


Diagramm 3: Verlauf der Wasseraufnahme während der 7-tägigen erneuten Sättigung und der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung bei der CIF-Prüfung (Mittelwerte)

Vorab sei jedoch darauf hingewiesen, dass die Lagerungsbedingungen vor der erneuten Sättigung der einzelnen Serien unterschiedlich waren. Die Betone Nullbeton und LP-Beton wurden ab dem Alter von 7 Tagen standardmäßig bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte gelagert. Die beiden anderen Betonserien wurden irrtümlicherweise in abgedeckten Behältern auf Abstandshaltern über einer Wasserschicht gelagert. Es ist davon auszugehen, dass die Probekörper der Serien Beton mit Mikrohohlkugeln und Beton mit Faserpartikeln bei Beginn der erneuten Sättigung einen bereits erhöhten Wassergehalt aufwiesen. Bei der CIF-Prüfung kann deshalb kein Vergleich der Wasseraufnahme der einzelnen Betonserien anhand der absoluten Werte gezogen werden, sondern nur anhand des prinzipiellen Verlaufs.

Die Wasseraufnahme während der erneuten Sättigung verläuft grundsätzlich wurzelförmig und flacht bei allen vier Betonserien bis zum Tag 0 ab. Dies bedeutet, dass die Probekörper

nach dem 7-tägigen Saugen nahezu vollständig kapillar gesättigt sind und auch bei längerer Lagerung in der Prüfflüssigkeit kein weiteres Wasser aufnehmen würden.

Die Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung ist bei fast allen Betonserien anfangs stärker und flacht zum Ende der CIF-Prüfung hin ab. Die Stärke des Saugverhaltens während der erneuten Sättigung setzt sich bei allen Betonserien auch während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung fort.

Die Theorie der Mikroeislinsepumpe bzw. des Frostsaugens konnte in der CIF-Prüfung bestätigt werden. Bei allen Betonserien findet während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung eine weitere Wasseraufnahme statt. So verdreifacht sich in etwa der Wassergehalt der Serie Nullbeton während der 56 FTW. Bei den beiden Serien LP-Beton und Beton mit Faserpartikeln verdoppelt er sich und beim Beton mit Mikrohohlkugeln erhöht er sich um ca. 50% des Ausgangswerts nach dem kapillaren Saugen.

Für die jeweils gleichzeitig geprüften Betonserien können folgende Aussagen zur Wasseraufnahme gemacht werden:

- Der Wassergehalt am Ende der erneuten Sättigung ist beim LP-Beton um ca. 40 % höher als beim Nullbeton. Durch die eingebrachten Luftporen sollte zwar beim LP-Beton die kapillare Steighöhe im Zementstein geringer sein als beim Nullbeton, jedoch kann sich bei dieser Betonserie in der unteren Schicht der Probekörper viel Wasser in den künstlichen Luftporen ansammeln, was insgesamt zu einem erhöhten Wassergehalt führt.
- Der Beton mit Faserpartikeln saugt mehr Wasser, als der Beton mit Mikrohohlkugeln, da anzunehmen ist, dass die Cellulosefasern wie kleine Kapillaren wirken und dadurch Wasser aufnehmen und transportieren können. Das Saugvermögen der Fasern konnte bereits bei der Herstellung der Probekörper beobachtet werden.
- Die Mikrohohlkugeln der Serie 3 unterbrechen die im Zementstein vorhandenen Kapillarporen. Da die Mikrohohlkugeln vor der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung noch als geschlossene Kunststoffhüllen vorliegen, können sie nicht wie beim herkömmlichen LP-Beton mit Wasser angefüllt werden.

Die leicht Verstärkung der Wasseraufnahme nach wenigen Frost-Tau-Wechseln hängt möglicherweise mit dem Zerstören der Mikrohohlkugeln durch den Eisdruck [32; S.4] zusammen. Der Beton mit Mikrohohlkugeln weist insgesamt die geringste Wasseraufnahme auf.

4.3.1.2 Innere Gefügestörung

Im folgenden Diagramm ist der prozentuale Abfall des relativen dynamischen Elastizitätsmoduls (RDM) für die vier geprüften Betonserien dargestellt. Der RDM basiert auf den im Labor gemessenen Ultraschalllaufzeiten und spiegelt die Steifigkeit des Betons wider.

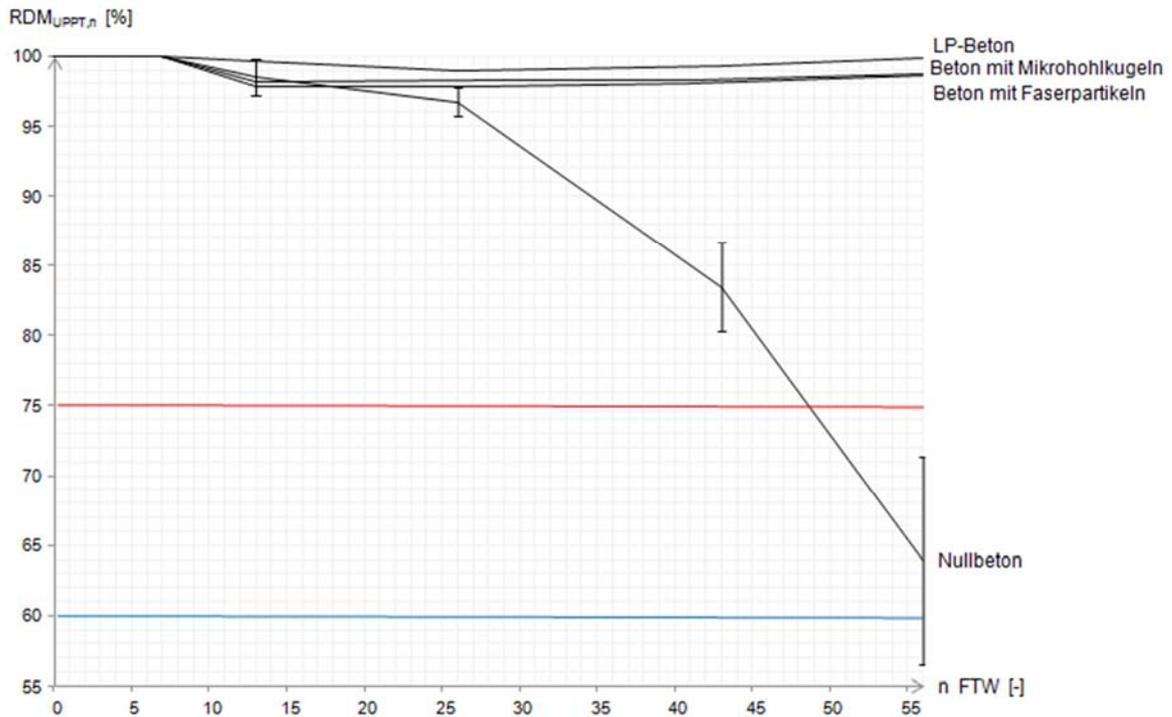


Diagramm 4: Verlauf des relativen dynamischen E-Moduls $RDM_{UPPT,n}$ auf Grundlage der Ultraschalllaufzeit in Abhängigkeit von der Anzahl n an Frost-Tau-Wechseln bei der CIF-Prüfung (Mittelwerte, Standardabweichungen nur für Nullbeton dargestellt)

Bis zum fünften FTW ist bei allen vier Betonserien noch kein Abfall des relativen dynamischen Elastizitätsmoduls zu beobachten. Anschließend fällt der RDM bei den Serien LP-Beton, Beton mit Mikrohohlkugeln und Beton mit Faserpartikeln um wenige Prozentpunkte ab bevor er dann bis zum Ende der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung wieder leicht ansteigt. Beim Nullbeton zeigt sich ein mit Anzahl der Frost-Tau-Wechsel zunehmender Abfall des RDM, der bis zum Ende der Frostprüfung anhält. Nach 56 FTW beträgt der Mittelwert des RDM der Serie Nullbeton nur noch 65 % des Ausgangswertes.

Der Anstieg des RDM bei den Serien LP-Beton, Beton mit Mikrohohlkugeln und Beton mit Faserpartikeln kann mit der Zunahme des Wassergehaltes durch Frostsaugen in Zusammenhang gebracht werden. Mit jedem Frost-Tau-Wechsel vergrößert sich die innere Gefügestörung, was im Versuch durch eine Zunahme der Ultraschalllaufzeit gemessen wird. Gleichzeitig steigt der Wassergehalt des Betons durch Frostsaugen, sodass immer mehr Poren mit Wasser gefüllt sind, was die Durchschallungszeit der Ultraschallwellen verringert. Die Auswirkungen der tatsächlichen Steifigkeitsabnahme des Betons und des zunehmenden Wassergehalts auf die gemessene Ultraschalllaufzeit überlagern sich. Bei Betonen mit einer

geringen inneren Gefügestörung kann dies zu einem vermeintlichen Anstieg des RDM führen.

Das Einbringen von künstlichen Luftporen, Mikrohohlkugeln und Cellulosefasern scheint eine innere Gefügestörung zu verhindern. Trotz Zunahme des Wassergehalts durch Frostsaugen besitzen die Serien mit diesen Sonderbestandteilen noch genügend Ausweichraum für gefrierendes Wasser, um eine Schädigung zu vermeiden.

Im Gegensatz dazu findet beim Nullbeton eine innere Gefügestörung statt. Diese ist so groß, dass die vermeintliche Zunahme des RDM durch das Frostsaugen nicht relevant wird.

Für die Beurteilung der Beständigkeit der Betonserien gibt es, wie in Kapitel 3.3.2.20 beschrieben, unterschiedliche Bewertungs- und Abnahmekriterien:

- Zum einen gilt nach BAW-Merkblatt ein Beton bei der CIF-Prüfung dann als nicht frostbeständig, wenn der relative dynamische Elastizitätsmodul innerhalb der ersten 28 FTW auf unter 75% vom Ausgangswert abfällt. Alle vier getesteten Betonserien weisen nach 28 FTW einen RDM $> 75\%$ auf und sind nach BAW-Merkblatt als frostbeständig einzustufen.
- Nach Setzer und Auberg [25] hingegen darf der Abfall des RDM bis zum 56. FTW nicht größer als 40% sein. Da nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 neben dem Mittelwert auch die Einzelwerte bei der Beurteilung mit einbezogen werden müssen, kann die getestete Serie Nullbeton nach diesem Abnahmekriterium nicht als frostbeständig eingestuft werden, da einzelne Werte des RDM beim Nullbeton nach 56 FTW um mehr als 40% gefallen sind. Die anderen drei Betonserien gelten auch nach diesem Abnahmekriterium als frostbeständig.

Somit besteht eine Diskrepanz zwischen den Ergebnissen nach den Bewertungskriterien des BAW-Merkblattes und den Ergebnissen nach dem Bewertungskriterium von Setzer und Auberg. Da der Nullbeton die Anforderungen an die Betonzusammensetzung der DIN 1045-2 für die Expositionsklasse XF3 einhält und damit die CIF-Prüfung bestehen müsste, ist das Abnahmekriterium nach Setzer und Auberg zu hinterfragen.

Um solche Unsicherheiten bei der Bewertung auszuschließen, sollte vor Beginn der CIF-Prüfung ein verbindliches Abnahmekriterium vereinbart werden.

4.3.1.3 Flächenbezogene Abwitterung

Wie einleitend beschrieben, wurde bei der CIF-Prüfung neben der inneren Gefügestörung auch die Abwitterung der Probekörper der vier Betonserien während der 56 FTW bestimmt. Die Ergebnisse sind im nachfolgenden Diagramm dargestellt:

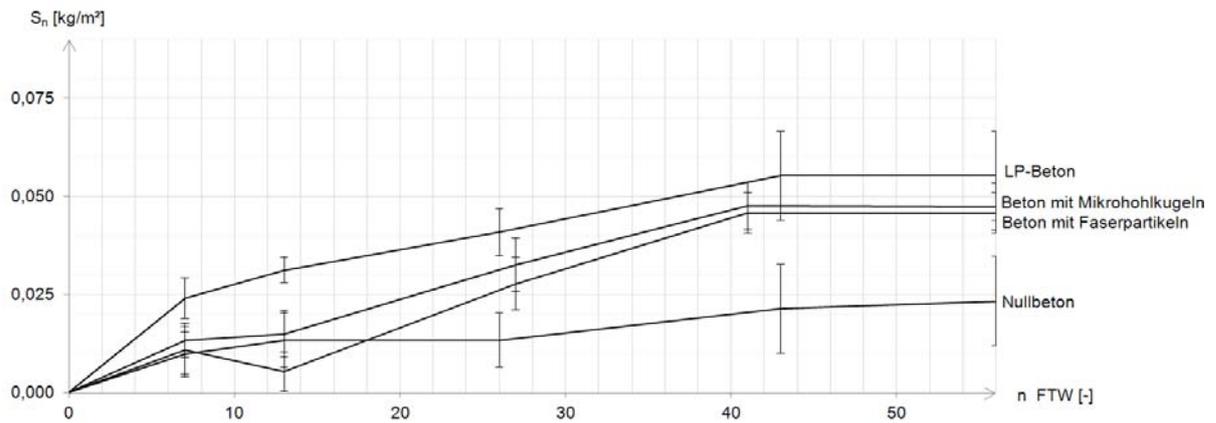


Diagramm 5: Verlauf der flächenbezogenen Abwitterung S_n in Abhängigkeit von der Anzahl n an Frost-Tau Wechsels bei der CIF-Prüfung (Mittelwerte und Standardabweichungen)



Bild 32: Zusammenstellung der bei der CIF-Prüfung in den Papierfiltern aufgefangenen Abwitterungsmengen jeweils eines Probekörpers der vier Betonserien (1 bis 4) in Abhängigkeit von der Anzahl an Frost-Tau-Wechsels (7, 14, 28, 42 und 56)

Prinzipiell haben die ersten Frost-Tau-Wechsels noch die stärkste Abwitterung zur Folge, bei weiterer Beanspruchung nehmen die Abwitterungsmengen je Frost-Tau-Wechsel ab.

Verblüffend ist, dass der Nullbeton weniger als halb so viel Gesamtabwitterung aufweist als der LP-Beton. Das Gegenteil müsste der Fall sein. Bei entionisiertem Wasser als Prüflösung ist die oberflächliche Abwitterung sowohl erfahrungsgemäß also auch bei der hier durchgeführten CIF-Prüfung nur sehr gering. Da nur die oberste Zementsteinschicht von der Abwitterung betroffen ist, haben möglicherweise bereits leichte Unterschiede bei der Probekörperherstellung starken Einfluss auf die ermittelte Abwitterungsmenge.

Das BAW-Merkblatt „Frostprüfung“ gibt für die Beurteilung eines Betons mittels CIF-Prüfung neben dem maßgebenden Abnahmekriterium für die innere Gefügestörung ein zusätzliches Abnahmekriterium für die flächenbezogene Abwitterung an. Ein Beton gilt demnach als frostbeständig, wenn nach 28 FTW die flächenbezogene Abwitterung nicht mehr als 1000 g/m² beträgt. Nach BAW-Merkblatt halten alle vier getesteten Betonserien neben dem maßgebenden auch das zusätzliche Abnahmekriterium ein und können als frostbeständig eingestuft werden. Sämtliche Abwitterungsmengen liegen mit maximal 60 g/m² weit unterhalb des festgelegten Grenzwertes von 1000 g/m². Dieses Ergebnis stimmt mit der ursprünglichen Einschätzung der untersuchten Betonserien nach Kapitel 4.2.2 überein.

Eine genaue Festlegung ob eine der vier getesteten Betonserien besser frostbeständig ist, kann nach dem Kriterium für die oberflächliche Abwitterung aufgrund der sehr geringen Gesamtabwitterungsmenge aller Betone nicht getroffen werden.

4.3.1.4 Augenscheinprüfung

Nachfolgend ist für jede Betonserie, die mit der CIF-Prüfung getestet wurde für jeweils einen Probekörper die Prüffläche vor und nach der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung dargestellt:

	Prüffläche vorher	Prüffläche nach 56 FTW
Nullbeton		
LP-Beton		



Grundsätzlich kann für alle Betonserien festgestellt werden, dass während der 56 FTW nur eine geringe oberflächliche Abwitterung der Zementsteinschicht stattgefunden hat, was mit der gemessenen flächenbezogenen Abwitterung übereinstimmt. Tiefere Abwitterungen kamen nur an Stellen vor, an denen bereits vorher Lunker im Beton sichtbar waren. Vereinzelt kam es zudem zur Zermürbung frostunbeständiger Gesteinskörner.

Die augenscheinliche Begutachtung lässt bei der CIF-Prüfung jedoch keine Rückschlüsse über die Frostbeständigkeit eines Betons zu, da bei diesem Prüfverfahren die innere Gefügestörung maßgebend ist, welche jedoch von außen nicht betrachtet werden kann.

4.3.2 Ergebnisse und Auswertung der CDF-Prüfung

Die CDF-Prüfung wurde nach den in der DIN CEN/TS 12390-9 und in Kapitel 3.2.2 beschriebenen Schritten durchgeführt. Analog zur CIF-Prüfung wurde neben der Abwitterung die innere Gefügestörung der Probekörper der vier zu testenden Betonserien bestimmt. Bei der CDF-Prüfung wurden, wie bereits bei der CIF-Prüfung, zwei Prüfläufe mit je zwei Betonserien benötigt.

Nachfolgend werden die Ergebnisse der vier Betonserien bei der Wasseraufnahme, der Abwitterung, der inneren Gefügestörung und der Augenscheinprüfung dargestellt und erläutert.

4.3.2.1 Wasseraufnahme

Im folgenden Diagramm sind die Wasseraufnahme während der 7-tägigen erneuten Sättigung und der 14-tägigen Frost-Tauwechsel-Beanspruchung gemeinsam dargestellt. Die Frost-Tausalz-Beanspruchung endet nach 14 Tagen und damit nach 28 12-stündigen Frost-Tau-Wechseln. Sowohl bei der erneuten Sättigung als auch während der Beanspruchung in der Prüfruhe wurde dreiprozentige NaCl-Lösung als Prüfflüssigkeit verwendet.

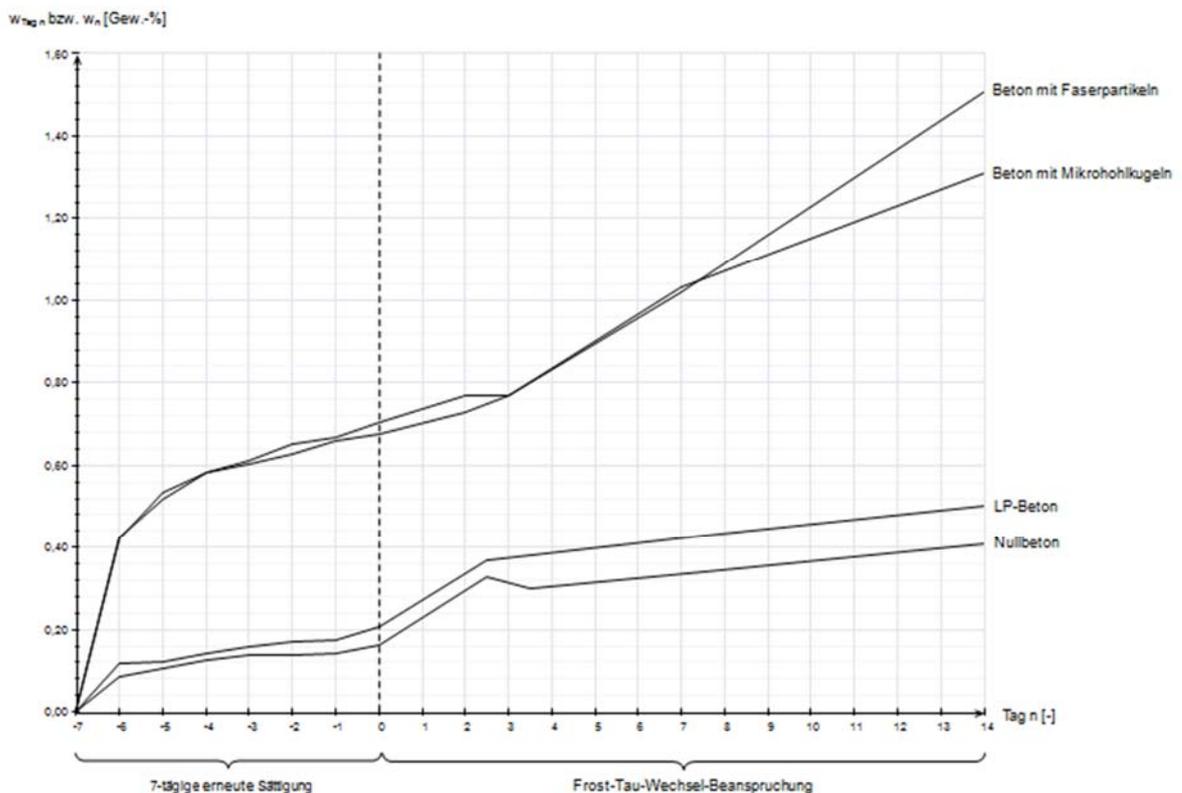


Diagramm 6: Verlauf der Wasseraufnahme während der 7-tägigen erneuten Sättigung und der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung bei der CDF-Prüfung (Mittelwerte)

Analog zur CIF- waren auch bei der CDF-Prüfung die Lagerungsbedingungen der Serien vor der erneuten Sättigung unterschiedlich. Bei den Serien Nullbeton und LP- Beton war aufgrund irrümlicher Lagerung die Luftfeuchtigkeit zu hoch. Es ist davon auszugehen, dass die Probekörper dieser Serien bei Beginn der erneuten Sättigung bereits einen erhöhten Wassergehalt aufwiesen. Die Probekörper des Betons mit Mikrohohlkugeln und des Betons mit Faserpartikeln wurden standardmäßig bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte gelagert.

Bei der CDF-Prüfung kann deshalb auch kein Vergleich der Wasseraufnahme der einzelnen Betonserien anhand der absoluten Werte gezogen werden, sondern nur anhand des prinzipiellen Verlaufs der Wasseraufnahme.

Die Wasseraufnahme während der erneuten Sättigung verläuft grundsätzlich wurzelförmig und flacht bei allen vier Betonserien bis zum Tag 0 hin ab. Dies bedeutet, dass die Probekörper nach dem 7-tägigen Saugen nahezu vollständig kapillar gesättigt sind.

„Alle Betone nehmen unter Frost-Tausalz-Belastung noch einmal die Menge an Prüflösung auf, die sie bereits unter isothermen Bedingungen aufgesaugt haben“ [4; S.27]. Die Theorie der Mikroislinsenpumpe konnte somit bei der durchgeführten CDF-Prüfung bestätigt werden.

Für die jeweils gleichzeitig geprüften Betonserien können folgende Aussagen zur Wasseraufnahme gemacht werden:

- Der Wassergehalt am Ende der erneuten Sättigung ist beim Luftporenbeton um ca. 20% höher als beim Nullbeton. Es gilt dieselbe Begründung wie bei der CIF-Prüfung in Kapitel 4.3.1.1: Durch die eingebrachten Luftporen sollte zwar beim LP-Beton die kapillare Steighöhe im Zementstein geringer sein als beim Nullbeton, jedoch kann sich bei dieser Betonserie in der unteren Schicht des Probekörpers viel Wasser in den künstlichen Luftporen ansammeln, was insgesamt zu einem erhöhten Wassergehalt führt.
- Sowohl der Nullbeton als auch der LP-Beton weisen in den ersten 5 FTW eine hohe Wasseraufnahme durch Frostsaugen auf. Anschließend flacht der Verlauf des Wassergehaltes dieser Serien deutlich ab.
- Der Verlauf der Wasseraufnahme durch kapillares Saugen beim Beton mit Mikrohohlkugeln ist nahezu identisch mit demjenigen des Betons mit Faserpartikeln.
- Beim Beton mit Mikrohohlkugeln und beim Beton mit Faserpartikeln nimmt der Wassergehalt während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung kontinuierlich zu. Ein Abflachen am Ende der Prüfung ist nicht erkennbar, d. h., dass bei weiteren Frost-Tau-Wechseln noch mehr Wasser aufgenommen würde. Der Beton mit Faserpartikeln weist am Ende der CDF-Prüfung den höchsten Wassergehalt auf.

4.3.2.2 Flächenbezogene Abwitterung

Die Masse der oberflächlichen Abwitterung während der Frost-Tausalz-Belastung stellt bei der CDF-Prüfung das maßgebende Kriterium zur Beurteilung dar. Die im Hochschullabor erzielten Ergebnisse der getesteten Betonserien sind im folgenden Diagramm abgebildet:

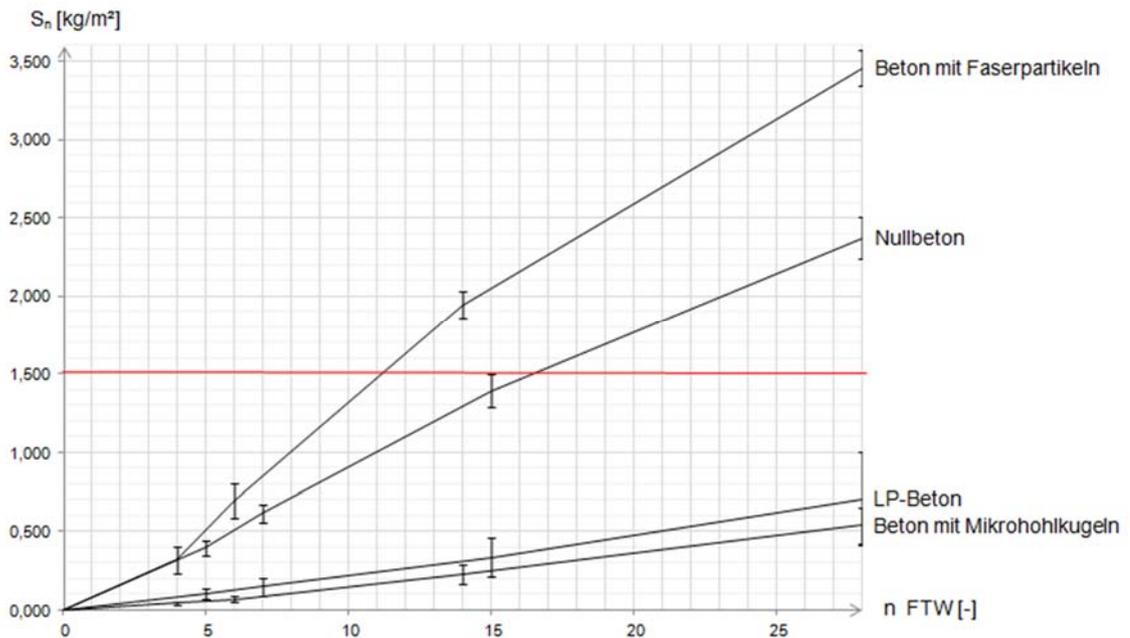


Diagramm 7: Verlauf der flächenbezogenen Abwitterung S_n in Abhängigkeit von der Anzahl n an Frost-Tau-Wechseln bei der CDF-Prüfung (Mittelwerte und Standardabweichungen)



Bild 33: Zusammenstellung der bei der CDF-Prüfung in den Papierfiltern aufgefangenen Abwitterungsmengen jeweils eines Probekörpers der vier Betonserien (1 bis 4) in Abhängigkeit von der Anzahl an Frost-Tau-Wechseln (4, 7, 14 und 28)

Die Abwitterung steigt bei allen vier Betonserien ungefähr linear zur Anzahl der Frost-Tau-Wechsel an. Obwohl der Verlauf der Wasseraufnahme während der 7-tägigen Sättigung und ungefähr bis zum 14. Frost-Tau-Wechsel beim Beton mit Mikrohohlkugeln und beim Beton mit Faserpartikeln nahezu identisch ist, zeigen diese beiden Serien ein komplett unterschiedliches Abwitterungsverhalten. Diese Beobachtung unterstreicht die in Kapitel 4.3.1.1 gemachte Aussage, wonach der Betrag der Wasseraufnahme keine Beurteilung der Frostbeständigkeit eines Betons zulässt.

Nach CEN TC 51 [26] und RILEM-Empfehlung [27] gilt beim CDF-Test ein Beton als frosttausalzbeständig, wenn nach Ende der Prüfung die Summe an oberflächlicher Abwitterung nicht mehr als $1,500 \text{ kg/m}^2$ beträgt.

Sowohl der LP-Beton als auch der Beton mit Mikrohohlkugeln halten dieses Abnahmekriterium ein und sind somit als frosttausalzbeständig einzustufen. Trotz Verdopplung der Wasseraufnahme durch den Effekt der Mikroeislinsepumpe stellen die Betone mit künstlich eingebrachten Luftporen und Mikrohohlkugeln noch genügend Ausweichräume zur Verfügung, um die durch Frost-Tausalz-Belastung erzeugten Spannungen abzubauen.

Der Beton mit Faserpartikeln erreicht nach 11 und der Nullbeton nach ungefähr 16 FTW die Grenze von $1,500 \text{ kg/m}^2$ flächenbezogener Abwitterung. Diese Serien können somit nicht als frosttausalzbeständig eingestuft werden. Beim Nullbeton war dieses Ergebnis aufgrund der Vorüberlegungen in Kapitel 4.2.2 zu erwarten.

Dahingegen überrascht, dass die oberflächliche Abwitterung beim Beton mit Faserpartikeln höher ist als beim Nullbeton. Die eingebrachten Fasern hätten demnach einen negativen Einfluss auf den Frost-Tausalz-Widerstand des Betons. Dies widerspricht den Überlegungen zur Wirkungsweise der Cellulosefasern in Kapitel 4.2.1.4. Jedoch muss beachtet werden, dass bei der Herstellung des Nullbetons für die CDF-Prüfung ein relativ hoher Luftgehalt von 3,0 Vol.-% bestimmt wurde. Der Luftgehalt beim Beton mit Faserpartikeln konnte aufgrund eines Defektes am Luftporentopf leider nicht gemessen werden und ist möglicherweise viel geringer als beim geprüften Nullbeton. Dies könnte der Grund für das schlechte Abschneiden des Betons mit Faserpartikeln sein.

4.3.2.3 Innere Gefügestörung

Wie einleitend beschrieben, wurde bei der CDF-Prüfung neben der Abwitterung auch die innere Gefügestörung der Probekörper der vier Betonserien während der 28 FTW bestimmt.

Der Verlauf des relativen dynamischen E-Moduls auf Grundlage der Ultraschalllaufzeit in Abhängigkeit von der Anzahl an Frost-Tau-Wechseln bei der CIF-Prüfung ist im nachfolgenden Diagramm dargestellt:

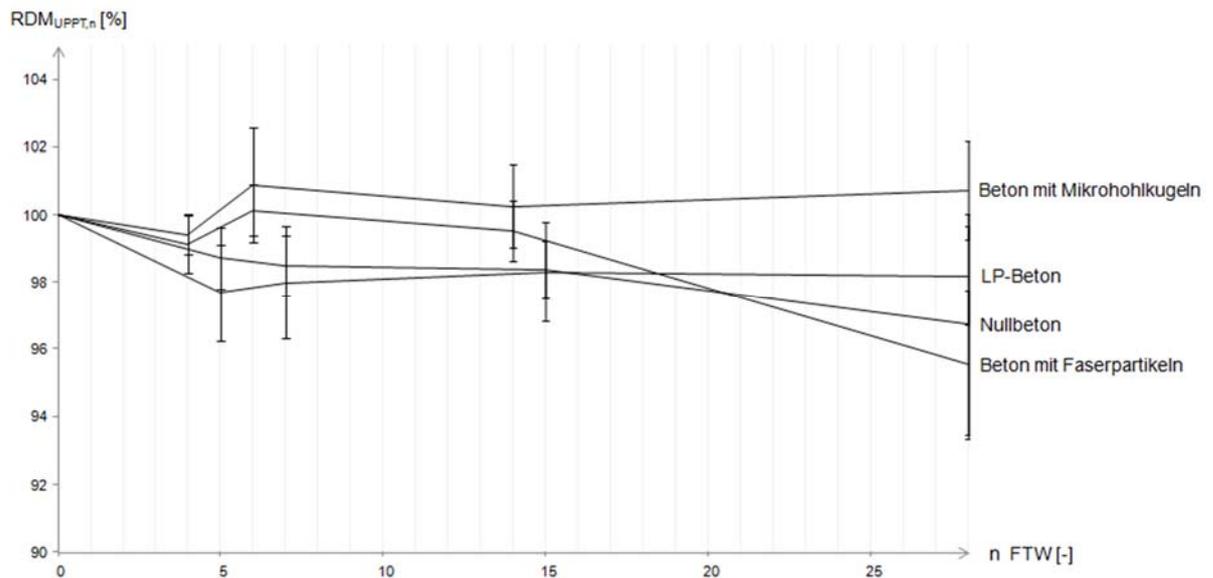


Diagramm 8: Verlauf des relativen dynamischen E-Moduls $RDM_{UPPT,n}$ auf Grundlage der Ultraschalllaufzeit in Abhängigkeit von der Anzahl n an Frost-Tau-Wechseln bei der CIF-Prüfung (Mittelwerte und Standardabweichungen)

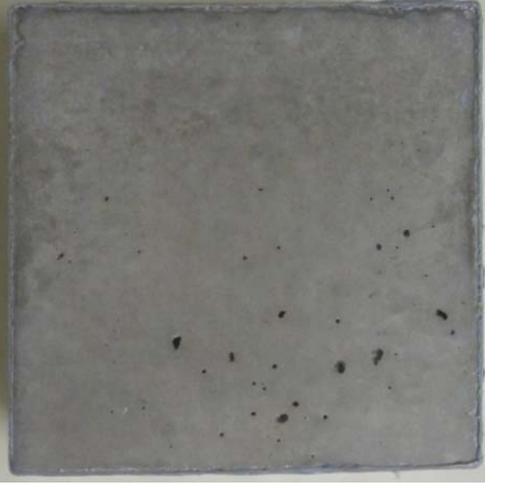
Der relative dynamische Elastizitätsmodul schwankt während der 28 FTW bei allen vier Betonserien. Nur bei der Serie Nullbeton ist ein fortschreitender Abfall des RDM zu erkennen. Bei den anderen Serien findet sich ein kurzzeitiger oder bleibender Anstieg des RDM, der einer mit der Anzahl an FTW zunehmenden Schädigung widerspricht. Dieser Widerspruch wurde bereits bei der CIF-Prüfung in Kapitel 4.3.1.2 erklärt. Der Beton mit Faserpartikeln zeigt am Ende den stärksten Abfall des RDM an. Der Unterschied zu den anderen getesteten Betonserien beträgt jedoch nur wenige Prozentwerte und lässt somit nicht die Aussage zu, dass der Beton mit Faserpartikeln unter den geprüften Serien der schlechteste ist.

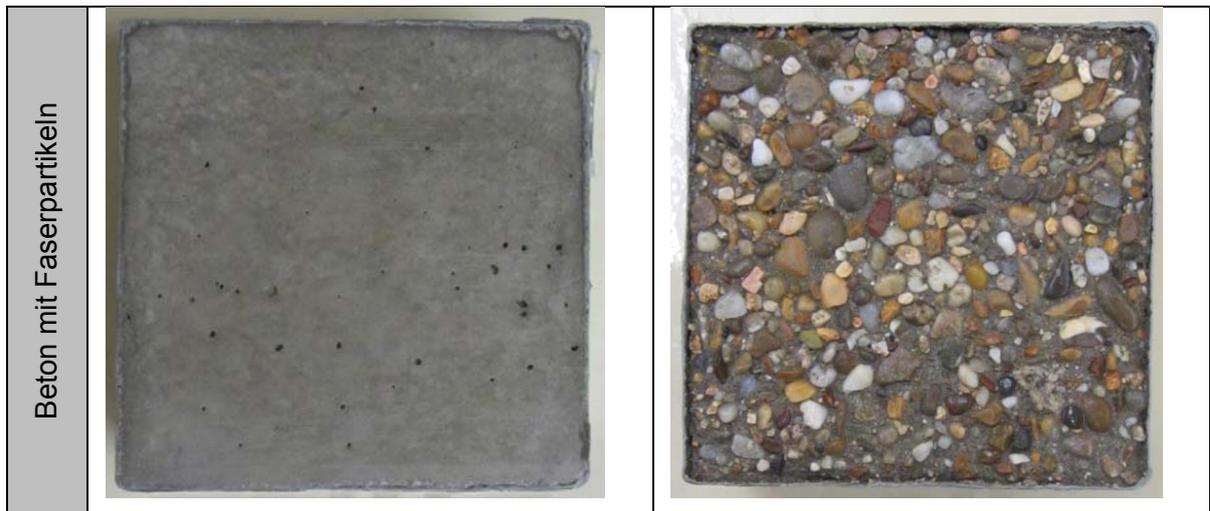
Das BAW-Merkblatt „Frostprüfung“ gibt für die Beurteilung eines Betons mittels CDF-Prüfung neben dem maßgebenden Abnahmekriterium für die Abwitterung ein zusätzliches Abnahmekriterium für die innere Gefügestörung an. Demnach ist ein Beton dann als nicht frosttausalzbeständig einzustufen, wenn während der 14-tägigen Frost-Tau-Wechsel-Belastung der relative dynamische Elastizitätsmodul auf unter 75% des Ausgangswertes abfällt.

Bei der im Hochschullabor durchgeführten CDF-Prüfung halten alle vier Betonserien dieses Abnahmekriterium ein und sind somit auf Grundlage der inneren Gefügestörung als frosttausalzbeständig zu bewerten. Dies stellt einen Widerspruch zur Bewertung anhand der Abwitterung dar, wonach sowohl der Nullbeton als auch der Beton mit Faserpartikeln als nicht frosttausalzbeständig einzustufen war.

4.3.2.4 Augenscheinprüfung

Zusätzlich zur Bestimmung der flächenbezogenen Abwitterung bzw. der inneren Gefügestörung wurden bei der CDF-Prüfung die Probekörper vor Beginn und nach Ende der Frost-Tausalz-Belastung visuell begutachtet. Die Tabelle zeigt exemplarisch für jede Betonserie die Prüffläche eines Probekörper vor und nach der CDF-Prüfung:

	Prüffläche vorher	Prüffläche nach 28 FTW
Nullbeton	 A smooth, uniform grey concrete surface before the test.	 The concrete surface after 28 FTW, showing significant surface erosion and exposed aggregate (sand and gravel).
LP-Beton	 A smooth, uniform grey concrete surface before the test.	 The concrete surface after 28 FTW, showing moderate surface erosion and some exposed aggregate.
Beton mit Mikrohohlkugeln	 A smooth, uniform grey concrete surface before the test.	 The concrete surface after 28 FTW, showing moderate surface erosion and some exposed aggregate.



Grundsätzlich stimmt die sichtbare Abwitterung bei allen Betonserien mit der gemessenen flächenbezogenen Abwitterung überein.

Beim Nullbeton und beim Beton mit Faserpartikeln kam es während der 28 FTW zu einer vollständigen Abwitterung des oberflächlichen Zementsteins und teilweise auch zum Herauslösen einzelner Gesteinskörner. Bei diesen beiden Betonserien kam es stellenweise auf Höhe der Prüflüssigkeit an den Seiten des Probekörpers zum Ablösen des Aluminiumbutylbandes.

Beim LP-Beton und Beton mit Mikrohohlkugeln wurde nur ein Teil des oberflächlichen Zementsteines abgewittert. Tiefere Abwitterungen kamen nur an Stellen vor, an denen bereits vorher Lunker im Beton sichtbar waren. Vereinzelt kam es zur Zermürbung frostunbeständiger Gesteinskörner.

4.3.3 Ergebnisse und Auswertung der Plattenprüfung

Die Plattenprüfung wurde nach den in der DIN CEN/TS 12390-9 und in Kapitel 3.2.3 beschriebenen Schritten durchgeführt. Während der 3-tägigen erneuten Sättigung wurde entionisiertes Wasser verwendet und bei der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung dreiprozentige Tausalzlösung. Mit der Prüfruhe im Hochschullabor konnten alle vier Betonserien zusammen in einem Prüfdurchgang getestet werden. Folglich waren auch die Lagerungsbedingungen bei allen Betonserien identisch. Die Ergebnisse der Abwitterung und der Augenscheinprüfung werden nachfolgend dargestellt. Im Gegensatz zur CIF- und CDF-Prüfung werden bei der Plattenprüfung keine Daten zur Wasseraufnahme gefordert.

4.3.3.1 Flächenbezogene Abwitterung

Bei der durchgeführten Plattenprüfung wurde die flächenbezogene Abwitterung der vier Betonserien bestimmt. Die Ergebnisse sind im nachstehenden Diagramm abgebildet:

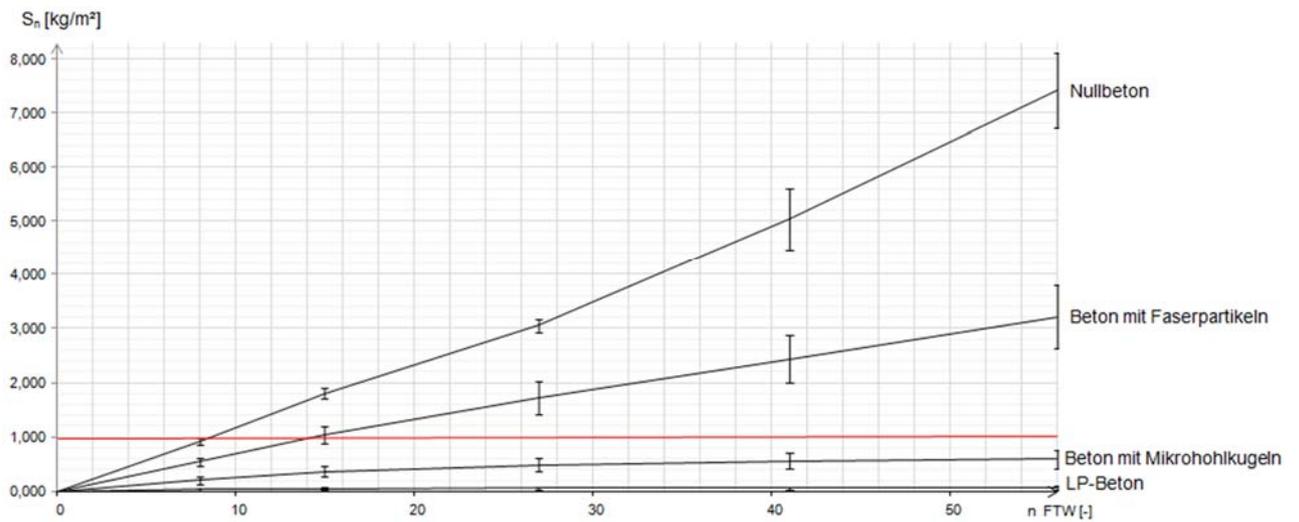


Diagramm 9: Verlauf der flächenbezogenen Abwitterung S_n in Abhängigkeit von der Anzahl n an Frost-Tau-Wechseln bei der Plattenprüfung (Mittelwerte und Standardabweichungen)



Bild 34: Zusammenstellung der bei der Plattenprüfung in den Papierfiltern aufgefangenen Abwitterungsmengen jeweils eines Probekörpers der vier Betonserien (1 bis 4) in Abhängigkeit von der Anzahl an Frost-Tau-Wechseln (7, 14, 28, 42 und 56)

Die Abwitterung von der Prüffläche verläuft bei allen geprüften Betonserien in etwa linear. Das bedeutet, dass bei jedem Frost-Tau-Wechsel ungefähr die gleiche Menge an abgewittertem Material anfällt. Die Serie Nullbeton zeigt insgesamt die größte Abwitterung mit 7,4 kg/m² nach 56 FTW. Der Beton mit Faserpartikeln wittert nur halb so stark ab wie die Serie Nullbeton. Die im Diagramm eingezeichnete Grenze von 1,0 kg/m² flächenbezogener Abwitterung für „akzeptable“ Frost-Tausalz-Beständigkeit wird beim Nullbeton bereits nach ca. 8 FTW, beim Beton mit Faserpartikel nach ca. 15 FTW überschritten. Weit weniger Abwitterung weisen der LP-Beton und der Beton mit Mikrohohlkugeln auf.

Die schwedische Norm SS 13 72 44 bewertet die Frost-Tausalz-Beständigkeit eines untersuchten Betons je nach Abwitterungsverhalten, wie in nachfolgender Tabelle dargestellt, mit den Prädikaten „sehr gut“, „gut“, „akzeptabel“ und „nicht akzeptabel“. Der Wert m_n steht dabei für die flächenbezogene Abwitterung nach n Frost-Tausalz-Wechseln:

Frostbeständigkeit	Kriterium
sehr gut	$m_{56} < 0,10 \text{ kg/m}^2$
gut	$m_{56} < 0,20 \text{ kg/m}^2$ oder $m_{56} < 0,50 \text{ kg/m}^2$ <u>und</u> $m_{56}/m_{28} < 2$ oder $m_{112} < 0,50 \text{ kg/m}^2$
akzeptabel	$m_{56} < 1,0 \text{ kg/m}^2$ <u>und</u> $m_{56}/m_{28} < 2$ oder $m_{112} < 1,0 \text{ kg/m}^2$
nicht akzeptabel	falls Kriterien für „akzeptabel“ überschritten werden

Tabelle 2: Abnahmekriterien der SS 13 72 44

Demnach wird der LP-Beton mit einer mittleren Abwitterung von 0,062 kg/m² nach 56 FTW als „sehr gut“ eingestuft, der Beton mit Mikrohohlkugeln mit 0,594 kg/m² als „akzeptabel“ und die beiden verbleibenden Serien Nullbeton und Beton mit Faserpartikeln als „nicht akzeptabel“.

Die Bewertung der Betonserien anhand der Abnahmekriterien der schwedischen Norm stimmt für den Nullbeton, den LP-Beton und den Beton mit Mikrohohlkugeln mit der Voreinschätzung in Kapitel 4.2.2 überein. Für den Beton mit Faserpartikeln kann in der Plattenprüfung zwar keine ausreichende Beständigkeit festgestellt werden, jedoch zeigt sich durch Vergleich mit dem Nullbeton, dass der Einsatz der Cellulosefasern scheinbar eine Verbesserung der Frost-Tausalz-Beständigkeit zur Folge hat.

Wie in Kapitel 3.3.1.3 ersichtlich, ist die Plattenprüfung auch in der österreichischen Norm ONR 23303 enthalten. Dort findet die Bewertung der Beständigkeit des zu untersuchenden Betons durch Vergleich mit einem Nullbeton statt, der nach einem für die Expositionsklasse

vorgegebenen Rezept hergestellt wurde. Zufälligerweise weist die im Hochschullabor geprüfte Betonserie LP-Beton in etwa die Zusammensetzung des Vergleichsbetons für die Expositionsklasse XF4 aus der ONR 23303 auf.

Anforderung an ...	Nullbeton (Vergleichsbeton) für XF4 nach ONR 23303	Im Hochschullabor geprüfte Betonserie LP-Beton
Zement	CEM II/A	CEM II/A-S 42,5 R
Gesteinskörnung	GK22, F1	AB 16
w/z-Wert	0,45	0,45
Ausbreitmaß	(38 ± 2) cm	45 cm
Luftgehalt (Frischbeton)	4,0 % bis 8,0 % (nach Möglichkeit 4,0 % bis 6,0 %)	7,6 %
L300	≥ 1,8 %	nicht ermittelt
AF	≤ 0,18 mm	nicht ermittelt

Tabelle 3: Vergleich des Nullbetons nach ONR 23303 mit der im Hochschullabor geprüften Serie LP-Beton

Die tabellarische Gegenüberstellung zeigt die Übereinstimmungen und Abweichungen an die Zusammensetzung und Eigenschaften des in der ONR 23303 geforderten Vergleichsbetons und des im Hochschullabor geprüften Betonserie LP-Beton: Der w/z-Wert, die Zementart und der Luftgehalt stimmen überein, die Gesteinskörnung und das Ausbreitmaß zeigen Unterschiede. Mikroluftporengehalt und Abstandsfaktor der Serie LP-Beton sind nicht bekannt.

Trotz geringfügiger Abweichungen soll nun versucht werden, die untersuchten Betone mithilfe der Abnahmekriterien der ONR 23303 zu bewerten. Demnach hat ein zu untersuchender Beton für die Expositionsklasse XF4 eine gleichwertige Beständigkeit wie der Vergleichsbeton, wenn:

- die gesamte Abwitterung des zu untersuchenden Betons nach 56 Frost-Tau-Wechseln um maximal 100 g/m² größer ist als diejenige des Vergleichsbetons bzw.
- der Vergleichsbeton Abwitterungen bis zu 300 g/m² aufweist und die gesamte Abwitterung des zu untersuchenden Betons nach 56 Frost-Tau-Wechseln um maximal 200 g/m² größer ist als diejenige des Vergleichsbetons

Die Abwitterung nach 56 FTW der als Vergleichsbeton verwendeten Serie LP-Beton beträgt 62 g/m². Die Serien Nullbeton und Beton mit Faserpartikeln übersteigen mit ca. 7400 g/m² bzw. ca. 3200 g/m² bei weitem die geforderten Abnahmekriterien. Selbst der Beton mit Mikrohohlkugeln kann mit 594 g/m² kein Abnahmekriterium erfüllen. Wenn das im Hochschullabor gemessene Abwitterungsverhalten des verwendeten Vergleichsbetons tatsächlich als realistisch einzustufen ist, so würde dies bedeuten, dass die Bewertungskriterien der ONR 23303 strenger sind als diejenigen der SS 13 72 44.

4.3.3.2 Augenscheinprüfung

Zusätzlich zur Bestimmung der flächenbezogenen Abwitterung wurden bei der Plattenprüfung die Probekörper vor Beginn und nach Ende der Frost-Tausalz-Belastung einer Augenscheinprüfung unterzogen. Für jede Betonserie ist nachfolgend die Prüffläche eines Probekörpers vor und nach der CDF-Prüfung dargestellt:

	Prüffläche vorher	Prüffläche nach 56 FTW
Nullbeton		
LP-Beton		
Beton mit Mikrohohikugeln		



Die sichtbare Abwitterung stimmt bei allen vier Betonserien grundsätzlich mit der gemessenen flächenbezogenen Abwitterung überein.

Beim Nullbeton und beim Beton mit Faserpartikeln kam es während der 56 FTW zu einer vollständigen Abwitterung des oberflächlichen Zementsteins und zum Herauslösen von abgesägten und ganzen Gesteinskörnern. Die Abwitterung war bei diesen beiden Betonserien so stark, dass die umlaufende Gummiabdichtung stellenweise abgelöst wurde und neben der Prüffläche auch umlaufend ein Teil der Außenflächen der Prüfflüssigkeit und damit der Frost-Tausalz-Belastung ausgesetzt war. Diese Vergrößerung der Prüffläche führte im weiteren Verlauf der FTW zu einer zusätzlichen Erhöhung der flächenbezogenen Abwitterung, da die Zusatzflächen in der Berechnungsformel nicht berücksichtigt werden.

Beim LP-Beton und Beton mit Mikrohohlkugeln ist nach 56 FTW nahezu die komplette ursprüngliche Prüffläche vorhanden. Nur vereinzelt kam es zu Abplatzungen von Zementstein oder zum Herauslösen einzelner angesägter Zuschlagskörner.

4.4 Praktischer Vergleich

Die im Hochschullabor durchgeführten Prüfverfahren CIF-, CDF- und Plattenprüfung werden im folgenden Kapitel auf der Grundlage der erzielten Ergebnisse und Erfahrungen miteinander verglichen.

Dazu werden zunächst die Vor- und Nachteile der Verfahren, die aus den im Labor durchgeführten Arbeiten resultieren, aufgelistet und anschließend die Erkenntnisse aus der Beurteilung der untersuchten Betonserien mit den drei Prüfverfahren diskutiert. Zuletzt wird eine Wertung zu den drei Verfahren abgegeben.

4.4.1 Vor- und Nachteile der durchgeführten Prüfverfahren

Bei der Durchführung der drei Prüfverfahren im Hochschullabor und der anschließenden Auswertung der Ergebnisse sind zahlreiche Vor- und Nachteile der Verfahren aufgefallen. Dabei konnten zum einen Ansätze aus dem theoretischen Vergleich in Kapitel 3.3.2 bestätigt und zum anderen weitere Erkenntnisse zu den Verfahren anhand der eigenen Durchführung gemacht werden.

4.4.1.1 bei der Herstellung der Probekörper

Sowohl bei der CIF-, CDF- als auch bei der Plattenprüfung werden die für die Probekörper erforderlichen Betonwürfel in Formen hergestellt, die nur leicht mit Trennmittel behandelt werden dürfen. Grundsätzlich fällt damit das Ausschalen der Betonwürfel bei aufklappbaren Stahlformen wesentlich leichter als bei einteiligen Kunststoffformen. Bei der CIF- und CDF-Prüfung erweisen sich Kunststoffformen aufgrund der eingestellten PTFE-Platten beim Ausschalen als besonders nachteilig.

Bei der CIF- bzw. CDF- Prüfung kommt es bei Verwendung zweier seitlich angeordneter PTFE-Platten während der Würfelbetonage häufig vor, dass Zementleim zwischen Würfel-Form und PTFE-Platte läuft und dadurch die spätere Prüffläche nicht mehr rechtwinklig zu den anderen Kanten des Probekörpers ist.

Bei der Plattenprüfung gibt es Nachteile bei der weiteren Bearbeitung der Probekörper. Der Zeitaufwand für das Abdichten eines Probekörpers ist bei der Plattenprüfung ca. 5-mal höher als bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung. Das Anbringen der Gummiabdichtung an Grund- und Seitenflächen, das Abdichten der Fuge zwischen Beton und Gummischicht und das Dämmen des Probekörpers bei der Plattenprüfung erfordern mehr Zeit und Geschick als das Umkleben der Seitenflächen des Probekörpers mit Aluminiumbutylband bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung. Darüber hinaus ist bei der Plattenprüfung die Breite des Silikon- bzw. Klebstoffstreifens, der die Kehle zwischen Prüffläche und Gummiaufkantung verschließt, nicht klar definiert. Die Abwitterung findet i.d.R. nur an der von Silikon- bzw. Klebstoff freien Prüffläche statt. In die Berechnungsformel der flächenbezogenen Abwitterung geht jedoch die ursprüngliche Prüffläche vor dem Versiegeln ein. Für die flächenbezogene Abwitterung ergeben sich also je nach Ausführung der Fuge unterschiedliche Ergebnisse.

4.4.1.2 bei der erneuten Sättigung

Die Probekörper bei der Plattenprüfung haben den Vorteil, dass zur erneuten Sättigung keine speziellen Behälter benötigt werden. Durch den Überstand der Gummiabdichtung an den Seitenflächen der Probekörper kann die Prüfflüssigkeit direkt auf die Prüffläche gegeben werden. Bei der CIF- und CDF-Prüfung werden passende Behälter mit Deckel benötigt, in denen die Probekörper auf Abstandshaltern in die Prüfflüssigkeit eingetaucht lagern. Falls

die Prüfruhe in der Zeit der erneuten Sättigung noch in Betrieb ist, können die Probekörper nicht in den Edelstahlbehältern der Truhe gelagert werden. Dies hat zur Folge, dass neben zusätzlichen Behältern auch mehr Lagerplatz erforderlich ist.

Des Weiteren kann es bei der CIF- und CDF-Prüfung beim Befüllen der Edelstahlbehälter mit Prüfliquidität passieren, dass an der nach unten zeigenden Prüffläche der Probekörper Luftblasen zurückbleiben, die die für das kapillare Saugen wirksame Fläche verkleinern. Nur durch kurzes Schwanken der Edelstahlbehälter können solche Lufteinschlüsse entfernt werden. Dieser Schritt ist jedoch in keinem Regelwerk festgehalten. Bei der Plattenprüfung kann dieser Fehler nicht vorkommen, da die Prüfliquidität direkt auf die Prüffläche gegeben wird.

4.4.1.3 beim Temperaturverlauf in der Prüfruhe

Für die Plattenprüfung wurde im Hochschullabor eine luftgekühlte Prüfruhe verwendet, für die CIF- und CDF-Prüfung eine Prüfruhe mit Sekundärkühlkreis bzw. Temperierliquidität. Die folgenden Ausschnitte aus der Temperaturaufzeichnung der verwendeten Prüfruhen verdeutlichen die Unterschiede in den Genauigkeiten der Temperaturführung, die bereits im theoretischen Vergleich in Kapitel 3.3.2.8 ausführlich beschrieben wurden:

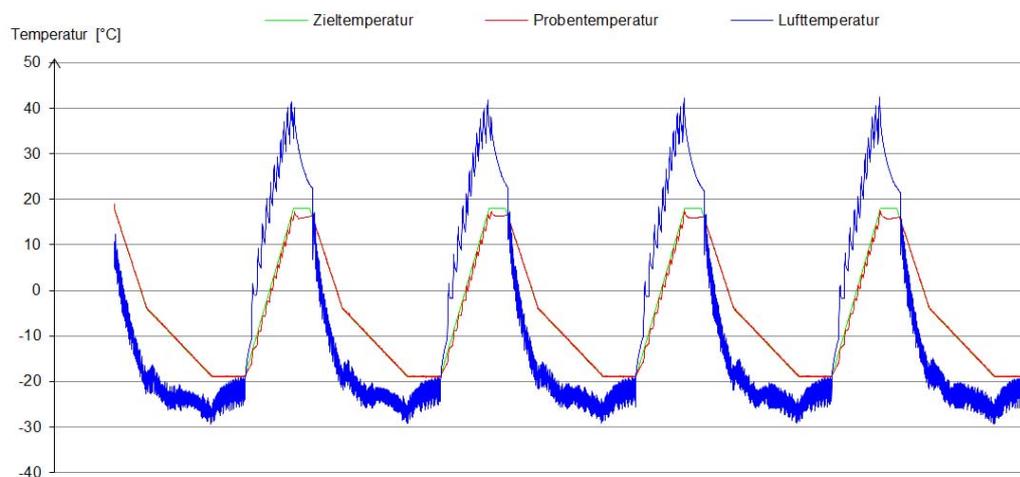


Diagramm 10: Verlauf der Ziel-, Proben- und Lufttemperatur während der Plattenprüfung

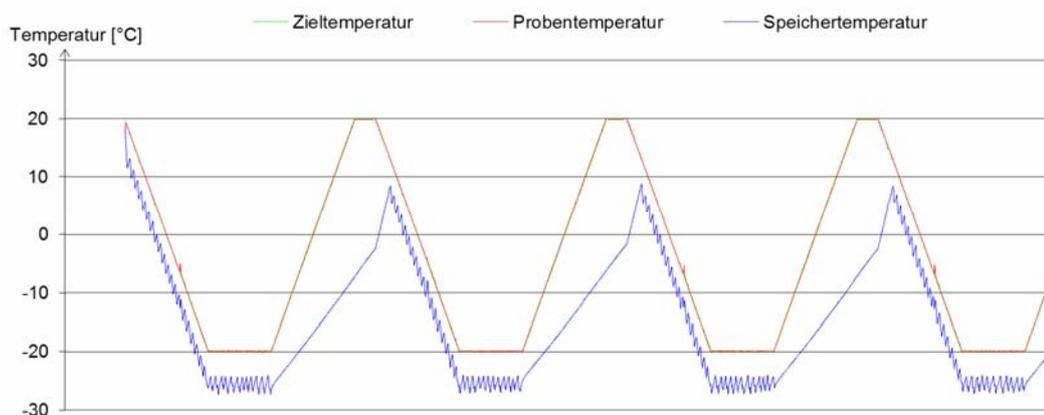


Diagramm 11: Verlauf der Ziel-, Proben- und Speichertemperatur während der CIF- bzw. CDF-Prüfung

Ein Nachteil bei der Plattenprüfung besteht in der Anordnung der Messeinrichtung für die Probertemperatur. Bei der CIF- und CDF-Prüfung ist diese unterhalb des Edelstahlbehälters in der Mitte der Prüftruhe fest installiert und liefert damit bei jedem Prüfdurchgang unter denselben Bedingungen die Referenztemperatur für die Steuerung der Prüftruhe. Bei der Plattenprüfung muss die Messsonde hingegen vom Laborant auf der Prüffläche eines Probekörpers in der Prüfflüssigkeit liegend befestigt werden. Je nach Anbringung des Messgerätes schwankt somit die tatsächliche Temperaturbeanspruchung der Prüffläche. Damit gibt es bei der Plattenprüfung nicht nur Schwankungen zwischen einzelnen Labors, sondern zusätzlich innerhalb eines Labors je nach prüfendem Laboranten.

4.4.1.4 bei den regelmäßige Messungen

Das Abbürsten des abgewitterten Materials bei der Plattenprüfung ist viel umständlicher als das Lösen der Abwitterung mittels Ultraschallbad bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung. Die Messung der Abwitterung von der Prüffläche der Probekörper ist bei der Plattenprüfung von einer Person allein kaum zu bewerkstelligen. Leicht passiert es, dass beim Abbürsten Material wegspringt und nicht bei der Abwitterungsmenge berücksichtigt wird. Bei der Arbeit im Hochschullabor wurde zudem festgestellt, dass die Menge des sich von der Prüffläche lösenden Materials neben der Art der Bürste und der Stärke des Abbürstens auch von der Stärke des Abspülens mit der Sprühflasche abhängt.

Bei der CDF-Prüfung im Hochschullabor ist aufgefallen, dass die Aluminiumschicht des Aluminiumbutylbandes nicht salzbeständig ist und sich im Laufe der Prüfung bis auf Höhe des Prüfflüssigkeitsstandes ablöst. Das Abdichtungsvermögen der Butylschicht wird dadurch jedoch nicht verschlechtert. Auch die Abwitterungsmenge wird durch die abgelösten Aluminiumpartikel nicht nennenswert verfälscht.

Bei der CIF-Prüfung wird die Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechselbeanspruchung gemessen. Auch wenn die Daten zur Wasseraufnahme, wie bereits in Kapitel 3.3.2.17 beschrieben, keinen direkten Hinweis auf die Beständigkeit eines Betons geben, so liefern sie doch Informationen über das Saugverhalten des untersuchten Betons. Die zusätzlichen Messungen erzeugen bei der Prüfung keinen großen Mehraufwand und haben zudem Kontrollfunktion bei der Laborarbeit, weil beispielsweise beim Notieren der Messwerte ein Vertauschen von Probekörpern schnell auffallen würde.

Sowohl bei der CDF- als auch bei der Plattenprüfung müssen die Filter mit dem aufgefangenen abgewitterten Material in einem Trockenofen getrocknet werden. Da die Massenkonstanz der Papierfilter bei den Arbeiten im Hochschullabor erfahrungsgemäß nach wenigen Stunden erreicht war, erscheint die Festlegung der Trockendauer bei der CDF-Prüfung mit 24 h als übertrieben.

Das Aufbringen der Prüfflüssigkeitsschicht auf die Prüffläche der Probekörper bei der Plattenprüfung erweist sich bei fortgeschrittenem Abwitterungszustand als Problem. Bei abgewitterter und damit unebener Prüffläche ist nicht mehr definiert, wann die geforderte Schichthöhe von 3 mm erreicht ist. Bei der CIF- bzw. CDF-Prüfung ist der Flüssigkeitsstand in den Edelstahlbehältern stets mit 10 mm Höhe einzufüllen.

4.4.1.5 bei der Versuchsauswertung

Ein Vorteil der CDF- und Plattenprüfung ist es, dass das Bewertungskriterium Abwitterung auch von außen sichtbar ist und damit meist qualitativ kontrolliert werden kann. Das Abnahmekriterium der CIF-Prüfung – die innere Gefügestörung – ist äußerlich nicht erkennbar. Die Beurteilung eines Betons beruht daher allein auf der Messung der Ultraschalllaufzeit und dem errechneten Abfall des relativen dynamischen Elastizitätsmoduls. Bei der Plattenprüfung platzen während der Frost-Tausalz-Beanspruchung meist einzelne angesägte Körner ab. Dies kann im Anfangsstadium der Abwitterung oder bei Betonen mit allgemein geringen Abwitterungsmengen, z. B. LP-Betonen, zu Ausreißen bei den Messwerten der Abwitterung führen.

4.4.2 Erkenntnisse aus der Beurteilung der untersuchten Betonserien

Die Ergebnisse der Laboruntersuchungen sind in der nachfolgenden Tabelle zusammengefasst. Sie gibt einerseits für jedes Prüfverfahren an, ob die jeweilige Betonserie als beständig oder nicht beständig beurteilt wurde und andererseits, ob die Beurteilung der Beständigkeit mit der in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Erwartung bzw. Vermutung übereinstimmt.

		Nullbeton	LP-Beton	Beton mit Mikrohohlkugeln	Beton mit Faserpartikeln
CIF-Prüfung	beständig? (maßgebendes Bewertungskriterium)	ja/nein	ja	ja	ja
	beständig? (zusätzliches Bewertungskriterium)	ja	ja	ja	ja
	Übereinstimmung der Beurteilung mit der Erwartung aus Kapitel 4.2.2	ja/nein	ja	ja	ja
CDF-Prüfung	beständig? (maßgebendes Bewertungskriterium)	nein	ja	ja	nein
	beständig? (zusätzliches Bewertungskriterium)	ja	ja	ja	ja
	Übereinstimmung der Beurteilung mit der Erwartung aus Kapitel 4.2.2	ja	ja	ja	unbekannt
Plattenprüfung	Beständigkeit?	nicht akzeptabel	sehr gut	akzeptabel	nicht akzeptabel
	Übereinstimmung der Beurteilung mit der Erwartung aus Kapitel 4.2.2	ja	ja	ja	unbekannt

Tabelle 4: Übersicht über die Beurteilungen der untersuchten Betonserien mit den durchgeführten Verfahren

4.4.2.1 Beurteilung der untersuchten Betonserien

Anhand der obenstehenden Tabelle wird zunächst für jede Betonserie die Beurteilung mit den verschiedenen Verfahren erläutert:

- Die Serie **Nullbeton** konnte in der CIF-Prüfung bei der Beurteilung nach BAW-Merkblatt als frostbeständig eingestuft werden, weil sowohl der maßgebende Grenzwert für die innere Gefügestörung als auch der zusätzliche für die Abwitterung nach 28 FTW eingehalten waren. Wird hingegen das alleinige Abnahmekriterium für die Abwitterung nach 56 FTW von Setzer und Auberg [2] zur Bewertung herangezogen, so ist der Nullbeton gerade nicht mehr als frostbeständig einzustufen. Dementsprechend spricht je nach verwendetem Abnahmekriterium die Beurteilung aus der Laborprüfung mit der vorherigen Einschätzung überein oder nicht. Bei der CDF-Prüfung hält der Nullbeton zwar das zusätzliche Bewertungskriterium ein, jedoch nicht das maßgebende, sodass er als nicht beständig einzustufen wäre. Dies würde auch genau mit der Erwartung übereinstimmen, weil der Nullbeton mit einer Zusammensetzung nach DIN 1045 für die Expositionsklasse XF3 nicht die XF4-Beanspruchung der CDF-Prüfung bestehen muss. Dieselbe Übereinstimmung findet sich auch bei der Plattenprüfung, bei der der Nullbeton wie erwartet als nicht frosttausalzbeständig abschneidet.
- Bei der Serie **LP-Beton** liefern alle Prüfverfahren eine Beurteilung, welche auch mit den Erwartungen übereinstimmen.
- Der **Beton mit Mikrohohlkugeln** schneidet bei der CIF- und der CDF-Prüfung jeweils eindeutig als frost- bzw. frosttausalzbeständig ab. Bei der Plattenprüfung wird die Beständigkeit dieser Serie mit „ausreichend“ bewertet. Entsprechend stimmen alle Versuchsergebnisse mit den vorherigen Einschätzungen bzw. Vermutungen der Beständigkeit überein.
- Der **Beton mit Faserpartikeln** konnte in der CIF-Prüfung bei der Beurteilung nach BAW-Merkblatt als frostbeständig eingestuft werden, unabhängig vom verwendeten Abnahmekriterium. Dies stimmt mit der Einschätzung in Kapitel 4.2.2 überein. Bei der CDF-Prüfung hält der Beton mit Mikrohohlkugeln zwar das zusätzliche Bewertungskriterium ein, jedoch nicht das maßgebende, sodass er als nicht beständig einzustufen wäre. Bei der Plattenprüfung wird die Beständigkeit dieser Serie mit „nicht ausreichend“ bewertet. Für die CDF- und Plattenprüfung lagen keine vorherigen Einschätzungen vor.

4.4.2.2 Zuverlässigkeit der verschiedenen Verfahren

Die Zuverlässigkeit der drei Prüfverfahren kann anhand der Übereinstimmung zwischen der im Versuch ermittelten Beständigkeit und der erwarteten bzw. vermuteten Beständigkeit je Prüfverfahren wie folgt abgeschätzt werden:

- Die **CIF-Prüfung** liefert für die Serie LP-Beton eine eindeutige und mit den praktischen Erfahrungen übereinstimmende Beurteilung. Bei der Serie Nullbeton ergibt sich aus der CIF-Prüfung zumindest unter Beurteilung nach BAW-Merkblatt ebenfalls ein realitätsnahes Ergebnis. Dasselbe gilt für den Beton mit Mikrohohlkugeln, wobei hier irrelevant ist, nach welchem Abnahmekriterium bewertet wird. Da für den Beton mit Faserpartikeln keine Praxiserfahrungen existieren und deshalb dessen Frostbeständigkeit nicht bekannt ist, kann diese Betonserie nicht für die Bestätigung der Zuverlässigkeit der CIF-Prüfung herangezogen werden. Zusammenfassend liefert die CIF-Prüfung – unter Beurteilung nach BAW-Merkblatt – für Betone, die nach DIN 1045 frostbeständig sein sollten, zuverlässige Ergebnisse. Bei der CIF-Prüfung nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 mit 56 FTW und dem Abnahmekriterium nach Setzer und Auberg wird der nach DIN 1045 beständige Nullbeton falsch bewertet. Dieses Ergebnis unterstützt die in der Forschung noch immer bestehende Ungewissheit „inwieweit die in der Laborprüfung gemessene Abnahme des dynamischen E-Moduls als Maßstab für die in der Praxis zu erwartende Schädigung in der Expositionsklasse XF3 herangezogen werden kann.“ [19; S.569]
- Die **CDF-Prüfung** beurteilt die Beständigkeit der Serie LP-Beton eindeutig und zuverlässig. Bei der Serie Nullbeton ergibt sich allerdings ein Widerspruch zwischen maßgeblichem und zusätzlichem Bewertungskriterium. Die maßgebliche Grenze für die Abwitterung wird – wie erwartet – überschritten. Die innere Gefügestörung hingegen deutet nicht auf unzureichende Beständigkeit hin. Da es sich jedoch nur um das zusätzliche Abnahmekriterium handelt, hat dieses Ergebnis keine Fehleinschätzung des Nullbetons zur Folge. Das in der CDF-Prüfung nach DIN CEN/TS 12390-9 allein verwendete Abnahmekriterium der Abwitterung führt zur richtigen Beurteilung dieser Betonserie. Derselbe Widerspruch zwischen maßgeblichem und zusätzlichem Bewertungskriterium tritt auch beim Beton mit Faserpartikeln auf. Da keine Voreinschätzung der Beständigkeit dieser Serie vorliegt, gibt sie keine Auskunft über die Zuverlässigkeit der CDF-Prüfung. Beim Beton mit Mikrohohlkugeln liefern beide Abnahmekriterien dasselbe Ergebnis, welches auch mit der Vorüberlegung übereinstimmt. Da in der Vorüberlegung jedoch nur vermutet wurde, dass der Beton mit Mikrohohlkugeln ausreichende Frost-Tausalz-Beständigkeit aufweist, kann dies die Richtigkeit der CDF-Prüfung nur geringfügig

bestätigen. Zusammenfassend lässt sich sagen, dass mit der CDF-Prüfung Betone zuverlässig beurteilt werden können, die eindeutig beständig bzw. eindeutig nicht beständig sind. Bei der CDF-Prüfung unter Beurteilung nach BAW-Merkblatt liefert das zusätzliche Abnahmekriterium der inneren Gefügestörung teilweise Ergebnisse, die dem maßgeblichen Abnahmekriterium der Abwitterung widersprechen.

- Die **Plattenprüfung** ergibt bei den Serien Nullbeton und LP-Beton eindeutige und mit den Erwartungen übereinstimmende Beurteilungen. Der Beton mit Mikrohohlkugeln kann, wie bereits bei der CDF-Prüfung erläutert, auch bei der Plattenprüfung die Richtigkeit des Verfahrens nur geringfügig bestätigen. Der Beton mit Faserpartikeln lässt keine Beurteilung der Zuverlässigkeit des Prüfverfahrens zu. Zusammenfassend ergibt sich für die Plattenprüfung, dass erwartungsgemäß beständige bzw. nicht beständige Betone mit diesem Prüfverfahren zuverlässig beurteilt werden können.

Die CDF- und Plattenprüfung, bei denen jeweils die flächenbezogene Abwitterung bestimmt und als Bewertungskriterium verwendet wird, liefern für die vier geprüften Betonserien zwar dieselbe Beurteilung, jedoch unterscheiden sich die Rangfolgen der Abwitterungswerte der verschiedenen Serien. Dies bedeutet beispielsweise, dass der Beton mit Faserpartikeln in der Plattenprüfung weit besser abschneidet als der Nullbeton, in der CDF-Prüfung hingegen schlechter.

Die Aussage von Reinhardt, „dass Beton, der sich in der Praxis als zuverlässig erweist, bei der Prüfung im Labor mitunter versagt“ [4; S.5], konnte nur für die CIF-Prüfung bei der Serie Nullbeton bestätigt werden.

Widersprüchliche Ergebnisse in der Beurteilung mit verschiedenen Verfahren ergeben sich häufig für grenzwertige Betone [11; S.4], d. h. Betone, die nicht eindeutig frostbeständig bzw. frostunbeständig sind. Die im Hochschullabor untersuchten Betonserien sind mit einem niedrigen w/z-Wert von 0,45 nicht als grenzwertig anzusehen, deshalb finden sich bei ihnen nur wenige Widersprüche bei der Beurteilung.

4.4.3 Wertung der durchgeführten Prüfverfahren

Die Bewertung der drei im Hochschullabor durchgeführten Prüfverfahren wird bezüglich folgender Aspekte abgegeben:

- Zeit- und Arbeitsaufwand
- Reproduzierbarkeit der Ergebnisse
- Zuverlässigkeit der Beurteilungen

4.4.3.1 Zeit und Arbeitsaufwand

Aufgrund der Dauer eines einzelnen Frost-Tau-Wechsels von 24 h und der Gesamtprüfdauer von 87 d schneidet die Plattenprüfung hinsichtlich des zeitlichen Aufwandes am schlechtesten ab. Die CDF-Prüfung ist mit nur 49 d Gesamtprüfdauer die kürzeste Prüfung. Wegen den langen und komplizierten Vorbereitungsarbeiten weist die Plattenprüfung zudem den höchsten Arbeitsaufwand auf. Bei der CIF-Prüfung mit der Messung der inneren Gefügestörung und bei der CDF-Prüfung mit der Bestimmung der Abwitterung ist dieser ungefähr gleich groß.

4.4.3.2 Reproduzierbarkeit der Ergebnisse

Die Prüfverfahren weisen verschiedene Ungenauigkeiten bei der Durchführung auf, die Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse haben:

- Die CIF-Prüfung erfordert, aufgrund des als Prüflösung verwendeten entionisierten Wassers, das sauberste Arbeiten im Labor. Zudem gibt es bei der CIF-Prüfung keine visuelle Kontrolle der gemessenen Ultraschalllaufzeiten und des berechneten Abfalls des relativen dynamischen Elastizitätsmoduls. Bei [4; S.28] wird „von Untersuchungsergebnissen unter Laborbedingungen berichtet, bei denen der Frostwiderstand, gemessen mit dem CIF-Verfahren, trotz gleicher Betonzusammensetzung bei unterschiedlichen Herstellchargen variierte“. Des Weiteren ergaben sich bei der CIF-Prüfung im Hochschullabor verhältnismäßig hohe Standardabweichungen der inneren Gefügestörung und daraus ein großer Bewertungsspielraum. Aus diesen Gründen ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei der CIF-Prüfung kritisch anzusehen.
- Auch bei der Plattenprüfung können einige Ungenauigkeiten bei der Durchführung auftreten. Das Abbürsten des abgewitterten Materials von der Prüffläche kann große Schwankungen erzeugen. Zudem beinhaltet der Temperaturverlauf der Plattenprüfung große Unsicherheiten. So schwankt die Temperaturbelastung der Probekörper je nach verwendeter Prüftruhe, Ausführung der Dämmung, Auslastung der Prüftruhe, Lage des Probekörpers in der Prüftruhe und der Anordnung der Temperaturmesseinrichtung. Des Weiteren weist der nach der Norm vorgegebene Temperaturverlauf bereits große Toleranzen auf. Deshalb ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei der Plattenprüfung am schlechtesten.
- Die CDF-Prüfung besitzt wie auch die CIF-Prüfung ein viel genauer festgelegtes Temperaturprofil, das von der Prüftruhe auch eingehalten werden kann. Im Gegensatz zur CIF-Prüfung treten bei der Durchführung der CDF-Prüfung keine nennenswerten Ungenauigkeiten auf. Folglich ist die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse bei der CDF-Prüfung am besten.

4.4.3.3 Zuverlässigkeit der Beurteilung

Mit der entscheidendste Aspekt zur Bewertung eines Prüfverfahrens ist dessen Zuverlässigkeit bei der Beurteilung eines untersuchten Betons. Wie zuverlässig die Beurteilung eines Betons mithilfe eines Prüfverfahrens ist, kann letztlich nur durch den Vergleich von Laborergebnissen mit Erfahrungswerten aus der Praxis überprüft werden.

Jedoch konnte aus den im Hochschullabor durchgeführten Arbeiten nicht direkt auf die Übertragbarkeit der drei Prüfverfahren auf Praxisverhältnisse geschlossen werden. Dazu wären mehr Laborversuche und ein Auslagern der Probekörper notwendig gewesen. Deshalb wurde in Kapitel 4.4.2.2 die Zuverlässigkeit der drei Prüfverfahren anhand der Übereinstimmung zwischen Beurteilung und Erwartung bewertet: CDF- und Plattenprüfung lieferten im Hochschullabor zuverlässige Beurteilungen. Die CIF-Prüfung ergab aufgrund des Messverfahrens der inneren Gefügestörung die größten Unsicherheiten. Zudem führte das nicht klar definierte Abnahmekriterium teilweise zu Widersprüchen in der Beurteilung. Die Beurteilung der CIF-Prüfung ist damit am unzuverlässigsten.

5 Zusammenfassung und Schlusswort

Ziel dieser Arbeit war es, verschiedene Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton miteinander zu vergleichen.

Die Vorstellung der grundlegenden Schadensmechanismen zum Frost- bzw. Frost-Tausalz-Angriff zu Beginn dieser Arbeit ist vielleicht ausführlicher, als dies der spätere Vergleich der Verfahren erfordert. Jedoch sind damit bei weiten noch nicht alle Einzelheiten und Modellvorstellungen abgedeckt, die in der Fachwelt thematisiert werden. Dies hätte zum einen tiefergehende physikalische und chemische Kenntnisse erfordert und zum andern den Rahmen der Arbeit gesprengt.

Nach Vorstellung der Verfahrensschritte der im DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 bzw. in der DIN CEN/TS 12390-9 definierten CIF-, CDF-, Platten-, Würfel- und Balkenprüfung wurde ein theoretischer Vergleich gezogen. Im Zuge dieser Arbeit zeigte sich, dass es eine große Zahl weiterer Prüfvorschriften und Regelwerke gibt, die ebenfalls Beschreibungen für diese Prüfverfahren beinhalten. Die umfassende Auseinandersetzung verdeutlichte, dass in Forschung und Industrie noch keine Einigkeit über ein zuverlässiges Frostprüfverfahren herrscht. Zudem bot es sich an, auch diese Regelungen in unsere Arbeit mit einzubeziehen und miteinander zu vergleichen.

In Deutschland hat sich mittlerweile in den meisten Bundesländern, vor allem bei öffentlichen Auftraggebern im Ingenieurbau, die CDF-Prüfung als übliches Verfahren durchgesetzt [31; S.176]. Viele Autobahndirektionen und die Bundesanstalt für Wasserbau schreiben den

CDF- Test zwingend vor. Die CIF-Prüfung wird häufig mitgemacht, wenn eine CDF-Prüfung gefordert wird. Die Bundesländer Sachsen und Sachsen-Anhalt haben im Straßen- und Ingenieurbau noch ihre eigenen Prüfvorschriften. Die Würfelprüfung wird in Deutschland v. a. vom Verein Deutscher Zementwerke e.V. angewendet. In Schweden wird vermutlich auch noch in Zukunft die Plattenprüfung als standardmäßiges Verfahren erhalten bleiben. Die in Deutschland eher unbekannteste Balkenprüfung ist in anderen europäischen Ländern z. B. Österreich, Italien und Frankreich [36; S.85] beheimatet.

Im Rahmen der Arbeit wurden die CIF-, CDF- und Plattenprüfung im Hochschullabor an vier verschiedenen Betonserien selbst durchgeführt. Anhand dieser empirischen Basis konnte der sonst nur theoretisch geführte Vergleich auch mit praktischen Erfahrungen ergänzt werden.

Eine abschließende Wertung zu den Prüfverfahren war schwierig, da zum einen die praktischen Erfahrungen mit den Prüfruhen fehlten und zum anderen nicht bei allen getesteten Betonserien das Verhalten unter Praxisbedingungen bekannt war. Zudem ist die Aussagekraft der eigenen Laborversuche kritisch zu betrachten, da nur vier Betone geprüft wurden. Aufgrund der Auslastung der Truhen war eine gleichzeitige Herstellung und Prüfung aller Betonserien nicht möglich, sodass leichte Unterschiede innerhalb der Betonserien je nach Prüfverfahren nicht vermieden werden konnten. Die Vielzahl unterschiedlicher Bewertungs- und Abnahmekriterien einzelner Prüfverfahren erschwerte zusätzlich die Beurteilung.

Aber nicht nur die Vielzahl unterschiedlicher Prüfverfahren mit oft abweichenden Bewertungs- und Abnahmekriterien muss kritisch hinterfragt werden, sondern auch die Übertragbarkeit der einzelnen Prüfverfahren auf Praxisverhältnisse.

So wird zwar bei allen Prüfverfahren zur Bestimmung der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beständigkeit von Beton versucht, die Schadensmechanismen einer realen Beanspruchung im Labor nachzustellen, leider ist es dabei nie möglich, alle Randbedingungen einer tatsächlichen Beanspruchung einzuhalten. Die Unterschiede zwischen Wirklichkeit und Prüfverfahren „betreffen neben dem Feuchtezustand der Betone auch die Abkühl- und die Auftaurate, die Maximal- und Minimaltemperatur, sowie den Beanspruchungszeitpunkt“ [19; S.565]. Unterschiedlichen Erhärtungscharakteristiken und fortschreitende Einflüsse aus Karbonatisierung und Hydratation werden aufgrund des festgelegten Prüfalters nicht berücksichtigt [19; S.569].

Diese Ungenauigkeiten bei der Übertragbarkeit der Laborversuche auf Praxisverhältnisse ist vielleicht auch ein Grund, warum die Betonnormen EN 206 und DIN 1045 bisher keine Prüfung vorschreiben.

Die Beurteilung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes der verwendeten Betone ist jedoch ein maßgebendes Kriterium für die Dauerhaftigkeit der Bauwerke. So sind Prüfverfahren, auch wenn sie nicht eindeutig die Praxisverhältnisse widerspiegeln, zwingend notwendig und müssen angewendet werden. Vielleicht werden in Zukunft die Regelungen des DIN-Fachberichts CEN/TR 15177 bzw. der DIN CEN/TS 12390-9 in die Betonnorm mit aufgenommen und eindeutige Bewertungs- und Abnahmekriterien je Prüfverfahren festgelegt. Nur so kann flächendeckend ein gleicher Qualitätsstandard erreicht werden.

Solange es keine einheitlichen und sicheren Regelungen zur Bestimmung der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Beständigkeit gibt, müssen die in dieser Arbeit vorgestellten und miteinander verglichenen Prüfverfahren passend ausgewählt und durchgeführt werden. Zwar ist eine deutliche Unterscheidung zwischen schlechtem und gutem Verhalten der getesteten Betone mit diesen Prüfverfahren grundsätzlich möglich [12; S.6], bei Grenzfällen muss jedoch immer die langjährige Erfahrung der Prüflabore Sicherheit geben.

6 Literaturverzeichnis

- [1] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Grundlagen. Band 1. 3. völlig Neubearb. und erw. Aufl. Bauverlag GmbH, Wiesbaden, 1996.
- [2] Wesche, K.: Baustoffe für tragende Bauteile. Beton und Mauerwerk. Band 2. 3. völlig Neubearb. und erw. Aufl. Bauverlag GmbH, Wiesbaden, 1993.
- [3] Bunke, N.: Prüfung von Beton - Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. DAFStb-Heft Nr. 422, 1991.
- [4] Siebel, E.: Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse. Sachstandbericht. DAFStb-Heft Nr. 560, 2005.
- [5] Verein Deutscher Zementwerke e. V. (Hrsg.): Zement Taschenbuch 2002. 50. Ausgabe. Verlag Bau+Technik, Düsseldorf, 2002.
- [6] Blümel, O.W./ Springenschmid, R.: Grundlagen und Praxis der Herstellung und Überwachung von Luftporenbeton. In: Straßen- und Tiefbau 24 (1970), Nr. 2.
- [7] Dombrowski, K.: Einfluss von Gesteinskörnungen auf die Dauerhaftigkeit von Beton. Dissertation. Bauhaus Universität Weimar. August 2003.
- [8] Gehlen, C. et al.: Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen. Brücken- und Ingenieurbau. Heft B84. Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2). Verlag für neue Wissenschaft GmbH, Bremerhaven, 2011.
- [9] Fagerlund, G.: The critical degree of saturation method of assessing the freeze/thaw resistance of concrete. Tentative recommendation on behalf of RILEM Committee 4 CDC. Matériaux et Constructions, Vol 10 – No 58.
- [10] Bonzel, J; Siebel, E.: Neuere Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. Heft 4-6. 1977. Internetquelle: http://www.vdz-online.de/fileadmin/gruppen/vdz/3LiteraturRecherche/Fachaufsaetze/1971_1980/Betontechnische_Berichte_77_Neuere_Untersuchungen_ueber_den_Frost_Tausalz_Widerstand_von_Beton.pdf (Stand: 13.03.2014).
- [11] DIN-Fachbericht CEN/TR 15177:2006-06 Prüfung des Frost-Tauwiderstandes von Beton – Innere Gefügestörung.
- [12] Vornorm DIN CEN/TS 12390-9: 2006-08 Prüfung von Festbeton – Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung.
- [13] Merkblatt Frostprüfung von Beton (BAW-Merkblatt „Frostprüfung“). Bundesanstalt für Wasserbau, Dezember 2004.
- [14] ONR 23303: 2010-09 Prüfverfahren Beton (PVB) Nationale Anwendung der Prüfnormen für Beton und seiner Ausgangsstoffe. Austrian Standards, Wien.
- [15] Svensk Standard SS 13 72 44:2005-02 Betongproving – Hardnad betong – Avflagnig vid frysning (Concrete testing – Hardened concrete – Scaling at freezing). Swedish Standards Institute.
- [16] Setzer, M. J.: Prüfvorschrift CIF-Test – Testmethode zur Bestimmung des Frostwiderstands von Beton. Universität Duisburg-Essen. Dezember 2004.

- [17] Setzer, M. J.: Patent. Verfahren und Anordnung zur Prüfung des Frost-Tau-Widerstands und/oder des Frost-Tausalz-Widerstands eines Festkörpers. Internetquelle:<http://www.patent-de.com/19980108/DE3928130C2.html> (Stand: 13.03.2014).
- [18] DIN EN 12504-4 Prüfung von Beton in Bauwerken – Teil 4: Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit. Dezember 2004.
- [19] Müller, H.S.; Guse, U.: Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse. Zusammenfassung des DAfStb-Verbundforschungsvorhabens. Karlsruhe. 2009. In: Beton – Die Fachzeitschrift für Bau + Technik. Verlag Bau + Technik, Erkrath, Dezember 2009.
- [20] Setzer, M. J.; Auberg, R.: Frost-Tausalz-Widerstand von Betonpflastersteinen. Forschungsbericht aus dem Fachbereich Bauwesen, Nr.56. Essen. August 1994.
- [21] ÖNORM B 3303: 1983-03 Betonprüfung. Österreichisches Normungsinstitut, Wien.
- [22] Siebel, E.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton: Beurteilung mittels Würfelverfahren. In: Beton 42 (1992) 9 , S.496-501.
- [23] Iken, H. W. et al.: Handbuch der Betonprüfung. Prüfanleitungen und Beispiele. 6. Auflage. Verlag Bau + Technik. Düsseldorf. 2012.
- [24] Müller, H. S. et al.(Hrsg.): Dauerhafter Beton – Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung. 6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Karlsruhe. 2009.
- [25] Setzer, M. J.; Auberg, R.: CIF-Test – Prüfverfahren des Frostwiderstands von Beton – Capillary suction – Internal damage and freeze thaw test. In: Concrete Precasting Plant and Technology 64 (1998), No. 4, S. 94-105. Zitiert nach: Siebel, E.; Breit, W.: Ergebnisse eines europäischen Ringversuches – Frost- und Frost-Tausalz-Prüfverfahren. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 65 (1999) 11, S. 44-51.
- [26] CEN TC 51, Document CEN TC 51/WG 12/TG 4 : 04/99. Test methods for the freeze-thaw resistance of concrete – Test with water or with sodium chloride solution. Part 1: Scaling. Zitiert nach: Siebel, E.; Breit, W.: Ergebnisse eines europäischen Ringversuches – Frost- und Frost-Tausalz-Prüfverfahren. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 65 (1999) 11, S. 44-51.
- [27] Setzer, M. J.; Fagerlund, G.; Janssen, D. J.: RILEM Recommendation for test method for the freeze-thaw resistance of concrete – Tests with sodium chloride solution (CDF). In: Concrete Precasting Plant and Technology 63 (1997), No. 4, S. 100-106. Zitiert nach: Siebel, E.; Breit, W.: Ergebnisse eines europäischen Ringversuches – Frost- und Frost-Tausalz-Prüfverfahren. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 65 (1999) 11, S. 44-51.
- [28] Siebel, E.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton – Beurteilung mittels Würfelverfahren. – Freeze-thaw resistance of concrete with and without de-icing salt – Assessment by the cube method. In: Beton 42 (1992), No. 9, S. 496-501. Zitiert nach: Siebel, E.; Breit, W.: Ergebnisse eines europäischen Ringversuches – Frost- und Frost-Tausalz-Prüfverfahren. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 65 (1999) 11, S. 44-51.

- [29] Siebel, E; Breit, W: Standard Methods for Testing the Resistance of Concrete to Freezing and Thawing – Final Report., European research Projekt MAT1-CT94-0055, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Report No. B 1498-4, Düsseldorf, Oktober 1998. zitiert nach: Siebel, E.: Übertragbarkeit von Frost-Laborprüfungen auf Praxisverhältnisse. Sachstandbericht. DAFStb-Heft Nr. 560, 2005.
- [30] ÖNORM B 3306: 1982-03 Prüfung der Frost-Tausalz-Beständigkeit von vorgefertigten Betonerzeugnissen. Austrian Standard, Wien, Österreich. zitiert nach: Siebel, E.; Breit, W.: Ergebnisse eines europäischen Ringversuches – Frost- und Frost-Tausalz-Prüfverfahren. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 65 (1999) 11, S. 44 – 51.
- [31] HeidelbergCement AG. Betontechnische Daten 2011. Leimen.
- [32] Verband Deutscher Betoningenieure e.V. (Hrsg.): VDB Information 105/09. Beckum, Dezember 2009.
- [33] Setzer, M.J. et al. (2004) Test methods of frost resistance of concrete: CIF-Test: Capillary suction, internal damage and freeze thaw test – Reference method and alternative methods A and B. Materials and Structures, Vol. 37 - No.274, S. 743-753. zitiert nach: Müller, H. S. et al. (Hrsg.): Dauerhafter Beton – Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung. 6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Karlsruhe. 2009.
- [34] Tang, L.; Petersson, P.-E. (2004) Slab test: Freeze/thaw resistance of concrete – Internal deterioration. Materials and Structures, Vol. 37 - No 274, S. 754-759. zitiert nach: Müller, H. S. et al. (Hrsg.): Dauerhafter Beton – Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung. 6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Karlsruhe. 2009.
- [35] Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Ingenieurbauten (ZTV-ING). Teil 3 Massivbau. Abschnitt 1 Beton. Bundesanstalt für Straßenwesen, Dezember 2012.
- [36] Siebel, E.; Breit, W.: Ergebnisse eines europäischen Ringversuches – Frost- und Frost-Tausalz-Prüfverfahren. In: Betonwerk + Fertigteil-Technik 65 (1999) 11.

7 Anhangsverzeichnis

- Anhang 1: Tabellarische Gegenüberstellung der CIF-, CDF-, Platten-, Würfel- und Balkenprüfung
- Anhang 2: Erklärungen zur Ultraschalllaufzeit und zum relativen dynamischen Elastizitätsmodul als Maß für die innere Gefügestörung
- Anhang 3: Kurzanleitungen zur: CIF-Prüfung nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15177
CDF-Prüfung nach DIN CEN/TS 12390-9
Plattenprüfung nach DIN CEN/TS 12390-9
- Anhang 4: Terminplan für die im Hochschullabor durchgeführten Prüfverfahren
- Anhang 5: Siebanalyse für die Gesteinskörnung der zu prüfenden Betonserien
- Anhang 6: Druckfestigkeitsprüfung der vier untersuchten Betonserien
- Anhang 7: Messwerte und Rechenergebnisse der durchgeführten Prüfungen

Anhang 2: Erklärungen zur Ultraschalllaufzeit und zum relativen dynamischen Elastizitätsmodul als Maß für die innere Gefügestörung

Der Elastizitätsmodul als Kennwert für die Steifigkeit eines Materials wird normalerweise in einem statischen Versuch z. B. während der Druck- oder Zugfestigkeitsprüfung ermittelt und als Spannungswert in N/mm^2 angegeben. Der *dynamische* Elastizitätsmodul hingegen wird in einem dynamischen Prüfverfahren z. B. durch Messung der Ultraschalllaufzeit ermittelt. „Bei statischen Prüfverfahren ist die Belastungsrichtung konstant, bei dynamischen wechselnd [...] Bei der dynamischen Beanspruchung wird der Baustoff im Regelfall durch Schallwellen belastet, die den Festkörper als Dichtewellen im Mikrobereich abwechselnd auf Zug oder Druck beanspruchen“ [1; S.192].

Der dynamische E-Modul ergibt sich als: $\text{dyn E} = \rho \cdot v^2 [\text{N/mm}^2]$

Der in der CIF-Prüfung als Maß für die innere Gefügestörung bestimmte, relative dynamische Elastizitätsmodul $\text{RDM}_{u,n}$ ist im BAW-Merkblatt „Frostprüfung“ folgendermaßen definiert:

$$\text{R}_{u,n} = \left(\frac{t_{cs} - t_c}{t_n - t_c} \right)^2$$

- t_{cs} Gesamtdurchschallungszeit vor der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung durch den Beton und das Ankopplungsmedium [μs]
- t_c Durchschallungszeit im Ankopplungsmedium [μs]
- t_n Gesamtdurchschallungszeit nach n Frost-Tau-Wechseln durch den Beton und das Ankopplungsmedium [μs]

Anmerkung: Die hier verwendete Formel für $\text{R}_{u,n}$ nach BAW-Merkblatt und die im DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 angegebene Formel für RDM_{UPPT} sind ineinander überführbar.

$\text{R}_{u,n}$ stellt einen *relativen* Wert dar, weil der dynamische Elastizitätsmodul *nach* einer bestimmten Anzahl an Frost-Tau-Wechseln auf den ursprünglichen Wert *vor* der Beanspruchung bezogen wird. Verwunderlich ist hierbei, dass in der genannten Formel gar keine E-Module auftauchen, sondern nur Ultraschall-Laufzeiten. Es ist jedoch möglich, die Formel aus dem Verhältnis der dynamischen E-Module nach und vor der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung herzuleiten. Hierbei wird angenommen, dass sich die Rohdichte ρ_R und die durchschallte Betonstrecke durch die Frost-Tau-Wechsel nicht verändern:

$$R_{u,n} = \left(\frac{\text{dyn } E_n}{\text{dyn } E_0} \right) = \left(\frac{\rho_R \cdot v_n^2}{\rho_R \cdot v_0^2} \right) = \left(\frac{\rho_R \cdot \left(\frac{l_s}{t_{s,n}} \right)^2}{\rho_R \cdot \left(\frac{l_s}{t_{s,0}} \right)^2} \right) = \left(\frac{t_{s,0}}{t_{s,n}} \right)^2 = \left(\frac{t_{cs} - t_c}{t_n - t_c} \right)^2$$

$R_{u,n}$	relativer dynamischer Elastizitätsmodul [%]
dyn E	dynamischer Elastizitätsmodul [N/mm ²]
ρ	Rohdichte des durchschallten Betons [kg/m ³]
v	Durchschallungsgeschwindigkeit der Ultraschallwelle im Beton [m/s ²]
l_s	Durchschallungsstrecke durch den Beton [mm]
t_s	Laufzeit der Ultraschallwelle durch den Beton [μ s]
Index n	Ergebnis <i>nach</i> n Frost-Tau-Wechseln
Index 0	Ausgangswert <i>vor</i> der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung

Als Maß für die innere Gefügestörung wird in der CIF-Prüfung der Elastizitätsmodul und nicht etwa die Festigkeit verwendet, weil „sich Schäden im Gefüge, die durch Frostbeanspruchung auftreten, bereits frühzeitig durch eine Verminderung des E-Moduls bemerkbar machen“ [1; S.178]. Durch die Messung der Ultraschalllaufzeit kann der dynamische E-Modul im Versuch jederzeit, also nach jeder beliebigen Anzahl an Frost-Tau-Wechseln, durchgeführt werden. Das Verfahren ist zerstörungsfrei, sodass nicht immer neue Probekörper erforderlich sind. Für die Bestimmung der Ultraschalllaufzeit als Maß für die innere Gefügestörung gilt in der CIF-Prüfung nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 sinngemäß die DIN EN 12504-4 (Prüfung von Beton – Bestimmung der Ultraschallgeschwindigkeit). Das dort beschriebene Verfahren dient eigentlich als zerstörungsfreie Prüfung der Druckfestigkeit von Beton. Da jedoch auch ein Zusammenhang zwischen Schallgeschwindigkeit und Elastizitätsmodul besteht, macht man sich dieses Verfahren bei den Frostprüfungen zunutze.

“Wenn Ultraschallimpulse bei ihrer Ausbreitung im Beton auf eine Grenzfläche zwischen Beton und Luft treffen, ergibt sich eine verringerte Energieübertragung über diese Grenzfläche hinweg. Deshalb behindern alle luftgefüllten Risse oder Hohlstellen, die sich unmittelbar zwischen zwei Signalwandlern befinden, den direkten Ultraschalldurchgang, wenn die projizierte Länge der Hohlstelle größer ist als die Breite der Signalwandler und größer als die Schallwellenlänge. Ist dies der Fall, so wird der erste am Empfänger ankommende Impuls an dieser Oberfläche der Hohlstelle gebeugt und seine Laufzeit ist länger als bei vergleichbarem Beton ohne schadhafte Stelle“ [18; S.10].

Anhang 3: Kurzanleitung zur CIF-Prüfung nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15177

Wichtig: Die Angaben beziehen sich auf die Herstellung *einer* Betonserie. Üblicherweise werden zur vollen Auslastung der CDF/CIF-Prüfanlage zwei Betonserien hergestellt und gemeinsam geprüft. Entsprechende Mengenangaben in dieser Kurzanleitung sind folglich zu verdoppeln.

Tag	Tätigkeit	Erforderliche Utensilien
1	<p>Probekörper in Würfelformen mit einer mittig angeordneter PTFE-Platte oder alternativ zwei beidseitig angeordneten PTFE-Platten betonieren.</p> <p>Würfelformen nur leicht mit Trennmittel behandeln und vor dem Befüllen mit Handtuch abwischen.</p> <p>Achtung: PTFE-Platten nicht mit Trennmittel behandeln!</p> <p>Beton in den Würfelformen auf dem Vibrationstisch verdichten.</p> <p>Achtung bei beidseitiger Anordnung der PTFE-Platten: Zwischen PTFE-Platten und Schalung soll beim Verdichten kein Zementleim gelangen!</p> <p>Erhärtende Betonwürfelhälften mit Polyethylenfolie abdecken und für 24±2 h bei 20±2 °C und 95±5 % r.F. lagern.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 3 x Würfelform mit 150 mm Kantenlänge (aufklappbare Stahlformen empfehlenswert) - 3 x H-förmiger PTFE-Plattensatz (für mittige Anordnung in der Würfelform) alternativ: 6 x PTFE-Platten 150 x 150 x max. 5 mm (für beidseitige Anordnung in der Würfelform) - Waage (mind. 20 kg Höchstlast, Fehlergrenze ±1 g) - Dosierschaufel und mehrere Eimer - Trennmittel und Pinsel - saugfähiges Laborhandtuch oder Lappen - Zwangsmischer (für Betonmischung von mind. 15 l) - Kelle - Vibrationstisch - Wasserschlauch - Folie (z. B. Frischhaltefolie) - Geräte zur Frischbetonprüfung: Thermometer, LP-Topf, Ausbreittisch und -kegel, Stampfer, Metermaß, Abziehlleineal, Schwamm
2	<p>24±2 h nach Herstellung Betonwürfelhälften entformen, eindeutig beschriften und in ein Wasserbad aus Leitungswasser mit 20±2 °C stellen.</p> <p>Bei beidseitiger Anordnung der PTFE-Platten: 24±2 h nach Herstellung Betonwürfel entformen, eindeutig beschriften und Prüfflächen markieren und in Wasserbad mit 20±2 °C stellen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Hammer oder Druckluft zum Ausschalen - wasserfester Stift zum Beschriften der Probekörper (z. B. harter Bleistift) - Klimakiste oder Behälter für Wasserbad mit Leitungswasser bei 20±2 °C
7	<p>Im Alter von 7 Tagen Betonwürfel(hälften) dem Wasserbad entnehmen.</p> <p>Bei beidseitiger Anordnung der PTFE-Platten: Mittiges Zersägen der Betonwürfel mittels Diamantsäge, sodass zwei Würfelhälften mit jeweils einer an der PTFE-Platte geschalteten Fläche entstehen. Beim Sägen auf persönliche Schutzausrüstung achten. Würfelhälften eindeutig beschriften.</p> <p>Betonwürfelhälften in Klimakammer legen. Da nur 5 Probekörper für die CIF-Prüfung erforderlich sind, eine Hälfte als Rückstellprobe aufheben und unter Laborbedingungen lagern.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Klimakammer mit 20±2 °C, 65±5 % r.F. und 45±15 g/(m² h) Verdunstung - Bei beidseitiger Anordnung der PTFE-Platten: Diamantsäge zum Halbieren der Betonwürfel, persönliche Schutzausrüstung (Schutzbrille, Gehörschutz, Schürze)
21-26	<p>Zwischen dem 21. und 26. Tag nach der Herstellung Probekörper vermessen (±0,1mm) und wiegen (±0,1g).</p> <p>Anschließend alle Seitenflächen der Probekörper mit Primer bestreichen und mit leicht erwärmtem Aluminiumbutylklebeband bekleben (Überlappung am Eck ca. 20 mm).</p> <p>Alternativ die Seitenflächen mit Epoxidharz versiegeln.</p> <p>Achtung: Beim arbeiten mit Primer/Epoxidharz für gute Durchlüftung sorgen, Einweghandschuhe tragen</p> <p>Danach abgedichtete Probekörper wiegen (±0,1g) und wieder in Klimakammer zurückstellen</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Messschieber mit einer Fehlergrenze von ±0,1 mm - Waage (mind. 5 kg Höchstlast, Fehlergrenze ±0,05 g) - Klötze zum Auflegen der Probekörper während dem Bestreichen mit Primer/Epoxidharz - Pinsel - Primer für Aluminiumbutylband und Aluminiumbutylband, Schere, Metermaß alternativ: - lösungsmittelfreies Epoxidharz
28	<p>Nach 28 Tagen Probekörper aus der Klimakammer entnehmen und wiegen.</p> <p>Probekörper in Edelstahlbehälter (oder andere Behälter) mit der Prüffläche nach unten zeigend auf Abstandshalter stellen.</p> <p>In die Behälter 10±1 mm Prüfflüssigkeit (entionisiertes Wasser) einfüllen. Oberseiten der Probekörper dabei möglichst nicht befeuchten.</p> <p>Durch kurzes Kippen der Behälter etwaige Luftblasen unter den Probekörpern entfernen.</p> <p>Edelstahlbehälter während des kapillaren Saugens mit ihren Deckeln abgedeckt lassen. Die Flüssigkeitsaufnahme dauert 7 Tage bei 20±2 °C.</p> <p>Täglich Füllstand kontrollieren, evtl. nachfüllen und Probekörper wiegen (10 sek. abtropfen lassen, Seitenflächen abtrocknen).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Waage (mind. 5 kg Höchstlast, Fehlergrenze ±0,05 g) - Gastronormbehälter von CDF/CIF-Prüfanlage mit dazugehörigen Deckeln oder: andere Behälter mit einer Grundfläche von mind. 150 x 150 mm und dazugehörigen Deckeln - Abstandshalter (5±0,1 mm hoch) - entionisiertes Wasser - Becherglas - Wasserstrahlpumpe oder Messstab zum Einstellen der Prüfflüssigkeitshöhe - sauberes Handtuch oder Lappen

35	<p>CDF/CIF-Prüfanlage 1 h vor Prüfbeginn einschalten. Mit Schüsselschalter Display aktivieren. Vor jedem Start einer Prüfreihe im Menüpunkt Zykluseingabe die Zeit auf 0 h, 0 min und den Zyklus auf 1 setzen. Profileinstellungen kontrollieren, ausreichenden Füllstand und Frostschutz der Temperierflüssigkeit mit Refraktometer überprüfen, evtl. Kühlfüssigkeit nachfüllen</p> <p>Ultraschallmessgerät einrichten: Dazu lichten Abstand zwischen den am Messbad angeschlossenen Messwertgebern bestimmen ($\pm 0,5$ mm) und im Ultraschallmessgerät eingeben. Einmalig zum Zwecke der späteren Auswertung Ultraschalllaufzeit durch die Prüfflüssigkeit ohne Probekörper bestimmen.</p> <p>Vor Beginn der Frost-Tau-Wechsel für jeden Probekörper Ultraschalllaufzeit als Ausgangswert der inneren Gefügestörung wie folgt bestimmen: Probekörper auf dem Probentrageblech in das Messbad stellen und Prüfflüssigkeit (entionisiertes Wasser) bis 10 mm über die Messwertgeber einfüllen. Oberseiten der Probekörper dabei nicht befeuchten, Luftblasen an den Messwertgebern entfernen. Ultraschalllaufzeit ($\pm 0,1$ μs) durch die beiden Mittelachsen des Probekörpers bestimmen. Messwertgeber dabei nicht verstellen.</p> <p>Augenscheinprüfung (Risse, Abwitterung von Partikeln der Gesteinskörnung, ...) vor den Frost-Tau-Wechseln durchführen. Prüfflächen der Probekörper für den Bericht fotografieren (VORHER).</p> <p>Danach Probekörper zurück in Edelstahlbehälter in Prüfruhe stellen (ohne Deckel) und wieder 10 ± 1 mm Prüfflüssigkeit (entionisiertes Wasser) einfüllen. Start der Frost-Tau-Wechsel. Ein Frost-Tau-Wechsel-Zyklus dauert 12 h und wird automatisch durchfahren.</p> <p>Bei Bedarf x-y-Schreiber aktivieren zum Notieren der Temperaturverläufe. Dazu Stand von Diagrammrolle kontrollieren und zweimal auf S-Taste drücken.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - CDF/CIF-Prüfanlage mit Schüsselschalter und x-y-Schreiber - Gastronormbehälter von CDF/CIF-Prüfanlage - Refraktometer - evtl. Frostschutzmittel - evtl. Diagrammrolle - Ultraschallmessgerät (z. B. Pundit lab von Proceq) mit Stromanschluss- und Messwertgeberkabel - Messbad für Ultraschallmessungen - Probentrageblech - entionisiertes Wasser - Becherglas - Wasserstrahlpumpe oder Messstab zum Einstellen der Prüfflüssigkeitshöhe - Fotoapparat - sauberes Handtuch oder Lappen
38-39	<p>Nach 7 ± 1 Frost-Tau-Wechseln, sobald die Temperatur in der Prüfruhe über 15 °C liegt, für jeden Probekörper wie folgt verfahren:</p> <p>Vorher schon Papierfilter beschriften und im Trockenschrank bei 110 ± 10 °C trocknen und wiegen (Ausgleichsfeuchte).</p> <p>Edelstahlbehälter aus Prüfruhe nehmen und in Aufsetzrahmen des Ultraschallbades stellen. Ultraschallbad auf 3 min einstellen. Achtung: Beim Herausheben der Edelstahlbehälter keine Temperierflüssigkeit in die anderen Behälter in der Prüfruhe tropfen, evtl. mit Deckel abdecken.</p> <p>Probekörper aus Prüfflüssigkeit nehmen, alle Probekörperflächen mit Handtuch vorsichtig abtrocknen und Probekörper wiegen.</p> <p>Augenscheinprüfung (Risse, Abwitterung von Partikeln der Gesteinskörnung,...) durchführen.</p> <p>Lösung mit abgewittertem Material durch Papierfilter in den Trichtern auf dem Abtropfbehälter filtern. Mit Spritzflasche mit Leitungswasser nachspülen.</p> <p>Bestimmung der Ultraschalllaufzeit nach den bereits genannten Schritten.</p> <p>Edelstahlbehälter bis zu einer Höhe von 10 ± 1 mm mit neuer Prüfflüssigkeit (entionisiertes Wasser) füllen und zurück in Prüfruhe stellen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Trockenschrank für 110 ± 10 °C - hitzebeständige Schüssel zum Trocknen der Filter - geeignete Papierfilter (Kaffeefilter ungeeignet) - Bleistift zum Beschriften der Papierfilter - Ultraschallbad mit tensidhaltiger Kontakflüssigkeit (z.B. Seifenwasser) - sauberes Laborhandtuch - Waage (mind. 5 kg Höchstlast, Fehlergrenze $\pm 0,05$ g) - Abtropfbehälter - 10 x Trichter - Spritzflasche mit Leitungswasser - entionisiertes Wasser - Ultraschallmessgerät (z. B. Pundit lab von Proceq) mit Stromanschluss- und Messwertgeberkabel - Messbad für Ultraschallmessungen - Probentrageblech - Becherglas - Wasserstrahlpumpe oder Messstab zum Einstellen der Prüfflüssigkeitshöhe - Fotoapparat - sauberes Handtuch oder Lappen
39-40	Filter 24 h lang bei 110 ± 10 °C trocknen und 60 ± 5 min bei 20 ± 2 °C und 65 ± 5 % r.F. abkühlen lassen. Filter mit abgewittertem Material wiegen ($\pm 0,1$ g).	- Waage (Fehlergrenze $\pm 0,05$ g)
41-43	Nach 14 ± 1 Frost-Tau-Wechseln wie nach 7 ± 1 Frost-Tau-Wechseln verfahren.	- siehe Tag 38-39
42-44	Filter 24 h lang bei 110 ± 10 °C trocknen und 60 ± 5 min bei 20 ± 2 °C und 65 ± 5 % r.F. abkühlen lassen. Filter mit abgewittertem Material wiegen ($\pm 0,1$ g).	- siehe Tag 39-40
48-50	Nach 28 ± 1 Frost-Tau-Wechseln nach den bekannten Schritten verfahren.	- siehe Tag 38-39
49-51	Filter 24 h lang bei 110 ± 10 °C trocknen und 60 ± 5 min bei 20 ± 2 °C und 65 ± 5 % r.F. abkühlen lassen. Filter mit abgewittertem Material wiegen ($\pm 0,1$ g).	- siehe Tag 39-40
55-57	Nach 42 ± 1 Frost-Tau-Wechseln nach den bekannten Schritten verfahren.	- siehe Tag 38-39
56-58	Filter 24 h lang bei 110 ± 10 °C trocknen und 60 ± 5 min bei 20 ± 2 °C und 65 ± 5 % r.F. abkühlen lassen. Filter mit abgewittertem Material wiegen ($\pm 0,1$ g).	- siehe Tag 39-40
62-64	Nach 56 Frost-Tau-Wechseln nach den bekannten Schritten verfahren. Prüfflächen der Probekörper für den Bericht wieder fotografieren (NACHHER).	- siehe Tag 38-39 - Fotoapparat
63-65	Filter 24 h lang bei 110 ± 10 °C trocknen und 60 ± 5 min bei 20 ± 2 °C und 65 ± 5 % r.F. abkühlen lassen. Filter mit abgewittertem Material wiegen ($\pm 0,1$ g)	- siehe Tag 39-40

Kurzanleitung zur CDF-Prüfung nach DIN CEN/TS 12390-9

Wichtig: Die Angaben beziehen sich auf die Herstellung *einer* Betonserie. Üblicherweise werden zur vollen Auslastung der CDF/CIF-Prüfanlage zwei Betonserien hergestellt und gemeinsam geprüft. Entsprechende Mengenangaben in dieser Kurzanleitung sind folglich zu verdoppeln.

Tag	Tätigkeit	Erforderliche Utensilien
1	<p>Probekörper in Würfelformen mit einer mittig angeordneter PTFE-Platte oder alternativ zwei beidseitig angeordneten PTFE-Platten betonieren.</p> <p>Würfelformen nur leicht mit Trennmittel behandeln und vor dem Befüllen mit Handtuch abwischen.</p> <p>Achtung: PTFE-Platten nicht mit Trennmittel behandeln!</p> <p>Beton in den Würfelformen auf dem Vibrationstisch verdichten.</p> <p>Achtung bei beidseitiger Anordnung der PTFE-Platten: Zwischen PTFE-Platten und Schalung soll beim Verdichten kein Zementleim gelangen!</p> <p>Erhärtende Betonwürfelhälften mit Polyethylenfolie abdecken und für 24±2 h bei 20±2 °C lagern.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 3 x Würfelform mit 150 mm Kantenlänge (aufklappbare Stahlformen empfehlenswert) - 3 x H-förmiger PTFE-Plattensatz (für mittige Anordnung in der Würfelform) alternativ: 6 x PTFE-Platten 150 x 150 x max. 5 mm (für beidseitige Anordnung in der Würfelform) - Waage (mind. 20 kg Höchstlast, Fehlergrenze ±1 g) - Dosierschaufel und mehrere Eimer - Trennmittel und Pinsel - saugfähiges Laborhandtuch oder Lappen - Zwangsmischer (für Betonmischung von mind. 15 l) - Kelle - Vibrationstisch - Wasserschlauch - Folie (z. B. Frischhaltefolie) - Geräte zur Frischbetonprüfung: Thermometer, LP-Topf, Ausbreittisch und -kegel, Stampfer, Metermaß, Abziehlinal, Schwamm
2	<p>24±2 h nach Herstellung Betonwürfelhälften entformen, eindeutig beschriften und in ein Wasserbad aus Leitungswasser mit 20±2 °C stellen.</p> <p>Bei beidseitiger Anordnung der PTFE-Platten: 24±2 h nach Herstellung Betonwürfel entformen, eindeutig beschriften und Prüfflächen markieren und in Wasserbad mit 20±2 °C stellen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Hammer oder Druckluft zum Ausschalen - wasserfester Stift zum Beschriften der Probekörper (z. B. harter Bleistift) - Klimakiste oder Behälter für Wasserbad mit Leitungswasser bei 20±2 °C
7	<p>Im Alter von 7 Tagen Betonwürfel(hälften) dem Wasserbad entnehmen.</p> <p>Bei beidseitiger Anordnung der PTFE-Platten: Mittiges Zersägen der Betonwürfel mittels Diamantsäge, sodass zwei Würfelhälften mit jeweils einer an der PTFE-Platte geschalteten Fläche entstehen. Beim Sägen auf persönliche Schutzausrüstung achten. Würfelhälften eindeutig beschriften.</p> <p>Betonwürfelhälften in Klimakammer legen. Da nur 5 Probekörper für die CIF-Prüfung erforderlich sind, eine Hälfte als Rückstellprobe aufheben und unter Laborbedingungen lagern.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Klimakammer mit 20±2 °C, 65±5 % r.F. und 45±15 g/(m² h) Verdunstung - Bei beidseitiger Anordnung der PTFE-Platten: Diamantsäge zum Halbieren der Betonwürfel, persönliche Schutzausrüstung (Schutzbrille, Gehörschutz, Schürze)
21-26	<p>Zwischen dem 21. und 26. Tag nach der Herstellung Probekörper vermessen (±0,1mm) und wiegen (±0,1g).</p> <p>Anschließend alle Seitenflächen der Probekörper mit Primer bestreichen und mit leicht erwärmtem Aluminiumbutylklebeband bekleben (Überlappung am Eck ca. 20 mm).</p> <p>Alternativ die Seitenflächen mit Epoxidharz versiegeln.</p> <p>Achtung: Beim arbeiten mit Primer/Epoxidharz für gute Durchlüftung sorgen, Einweghandschuhe tragen</p> <p>Danach abgedichtete Probekörper wiegen (±0,1g) und wieder in Klimakammer zurückstellen</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Messschieber mit einer Fehlergrenze von ±0,1 mm - Waage (mind. 5 kg Höchstlast, Fehlergrenze ±0,05 g) - Klötze zum Auflegen der Probekörper während dem Bestreichen mit Primer/Epoxidharz - Pinsel - Primer für Aluminiumbutylband - Aluminiumbutylband, - Schere, Metermaß alternativ: - Lösungsmittelfreies Epoxidharz
28	<p>Nach 28 Tagen Probekörper aus der Klimakammer entnehmen und wiegen.</p> <p>Probekörper in Edelstahlbehälter (oder andere Behälter) mit der Prüffläche nach unten zeigend auf Abstandshalter stellen.</p> <p>Prüfflüssigkeit 3%ige NaCl-Lösung herstellen. Bei Herstellung der Prüfflüssigkeit auf %-Wert achten: $\frac{100-3}{100-3} \% = 3,093 \%$ z. B. für 5 l Prüflösung 5000 g Leitungswasser und 154,6 g Salz mischen</p> <p>In die Behälter 10±1 mm Prüfflüssigkeit (97 % Leitungswasser + 3 % NaCl) einfüllen. Oberseiten der Probekörper dabei möglichst nicht befeuchten.</p> <p>Durch kurzes Kippen der Behälter etwaige Luftblasen unter den Probekörpern entfernen.</p> <p>Edelstahlbehälter während des kapillaren Saugens mit ihren Deckeln abgedeckt lassen. Die Flüssigkeitsaufnahme dauert 7 Tage bei 20±2 °C.</p> <p>Täglich Füllstand kontrollieren, evtl. nachfüllen und Probekörper wiegen (10 sek. abtropfen lassen, Seitenflächen abtrocknen).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Waage (mind. 5 kg Höchstlast, Fehlergrenze ±0,05 g) - Gastronormbehälter von CDF/CIF-Prüfanlage mit dazugehörigen Deckeln oder: andere Behälter mit einer Grundfläche von mind. 150 x 150 mm und dazugehörigen Deckeln - Abstandshalter (5±0,1 mm hoch) - Tausalz (z. B. Tafelsalz) - Becherglas - Wasserstrahlpumpe oder Messstab zum Einstellen der Prüfflüssigkeitshöhe - sauberes Handtuch oder Lappen

35	<p>CDF/CIF-Prüfanlage 1 h vor Prüfbeginn einschalten. Mit Schlüsselschalter Display aktivieren. Vor jedem Start einer Prüfreihe im Menüpunkt Zykluseingabe die Zeit auf 0 h, 0 min und den Zyklus auf 1 setzen. Profileinstellungen kontrollieren, ausreichenden Füllstand und Frostschutz der Temperierflüssigkeit mit Refraktometer überprüfen, evtl. Kühlflüssigkeit nachfüllen</p> <p>Vor Beginn der Frost-Tau-Wechsel Edelstahlbehälter in Ultraschallbad stellen. Ultraschallbad auf 3 min einstellen. Dabei entferntes Material verwerfen.</p> <p>Augenscheinprüfung (Risse, Abwitterung von Partikeln der Gesteinskörnung, ...) vor den Frost-Tau-Wechseln durchführen. Prüfflächen der Probekörper für den Bericht fotografieren (VORHER).</p> <p>Danach Probekörper zurück in Edelstahlbehälter in Prüftruhe stellen (ohne Deckel) und wieder 10±1 mm Prüfflüssigkeit (97 % Leitungswasser + 3 % NaCl) einfüllen. Start der Frost-Tau-Wechsel. Ein Frost-Tau-Wechsel-Zyklus dauert 12 h und wird automatisch durchfahren.</p> <p>Bei Bedarf x-y-Schreiber aktivieren zum Notieren der Temperaturverläufe. Dazu Stand von Diagrammrolle kontrollieren und zweimal auf S-Taste drücken.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - CDF/CIF-Prüfanlage mit Schlüsselschalter und x-y-Schreiber - Gastronormbehälter von CDF/CIF-Prüfanlage - Refraktometer - evtl. Frostschutzmittel - evtl. Diagrammrolle - Ultraschallbad mit tensidhaltiger Kontakflüssigkeit (z.B. Seifenwasser) - Tausalz (z. B. Tafelsalz) - Becherglas - Wasserstrahlpumpe oder Messstab zum Einstellen der Prüfflüssigkeitshöhe - sauberes Handtuch oder Lappen - Fotoapparat
36-38	<p>Nach 4±1 Frost-Tau-Wechseln, sobald die Temperatur in der Prüftruhe über 15 °C liegt, für jeden Probekörper wie folgt verfahren:</p> <p>Vorher schon Papierfilter beschriften und im Trockenschrank bei 110±10 °C trocknen und wiegen (Ausgleichsfeuchte).</p> <p>Edelstahlbehälter aus Prüftruhe nehmen und in Aufsetzrahmen des Ultraschallbades stellen. Ultraschallbad auf 3 min einstellen. Achtung: Beim Herausheben der Edelstahlbehälter keine Temperierflüssigkeit in die anderen Behälter in der Prüftruhe tropfen, evtl. mit Deckel abdecken.</p> <p>Augenscheinprüfung (Risse, Abwitterung von Partikeln der Gesteinskörnung,...) durchführen.</p> <p>Lösung mit abgewittertem Material durch Papierfilter in den Trichtern auf dem Abtropfbehälter filtern. Mit Spritzflasche mit Leitungswasser nachspülen.</p> <p>Edelstahlbehälter bis zu einer Höhe von 10±1 mm mit neuer Prüfflüssigkeit (97 % Leitungswasser + 3 % NaCl) füllen und zurück in Prüftruhe stellen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Trockenschrank für 110±10 °C - hitzebeständige Schüssel zum Trocknen der Filter - geeignete Papierfilter (Kaffeefilter ungeeignet) - Bleistift zum Beschriften der Papierfilter - Ultraschallbad mit tensidhaltiger Kontakflüssigkeit (z.B. Seifenwasser) - sauberes Laborhandtuch - Waage (Fehlergrenze ±0,05 g) - Abtropfbehälter - 5 x Trichter - Spritzflasche mit Leitungswasser - Tausalz (z. B. Tafelsalz) - Becherglas - Wasserstrahlpumpe oder Messstab zum Einstellen der Prüfflüssigkeitshöhe - sauberes Handtuch oder Lappen
37-39	Filter 24 h lang bei 110±10 °C trocknen und 60±5 min bei 20±2 °C und 65±5 % r.F. abkühlen lassen. Filter mit abgewittertem Material wiegen (±0,1 g)	- Waage (Fehlergrenze ±0,05 g)
37-39	Nach 6±1 Frost-Tau-Wechseln verfahren wie nach 4±1 Frost-Tau-Wechseln.	- siehe Tag 36-38
38-40	Filter 24 h lang bei 110±10 °C trocknen und 60±5 min bei 20±2 °C und 65±5 % r.F. abkühlen lassen. Filter mit abgewittertem Material wiegen (±0,1 g)	- siehe Tag 37-39
41-43	Nach 14±1 Frost-Tau-Wechseln nach den bekannten Schritten verfahren.	- siehe Tag 36-38
42-44	Filter 24 h lang bei 110±10 °C trocknen und 60±5 min bei 20±2 °C und 65±5 % r.F. abkühlen lassen. Filter mit abgewittertem Material wiegen (±0,1 g)	- siehe Tag 37-39
48-50	Nach 28 Frost-Tau-Wechseln nach den bekannten Schritten verfahren. Prüfflächen der Probekörper für den Bericht wieder fotografieren (NACHER).	- siehe Tag 36-38 - Fotoapparat
49-51	Filter 24 h lang bei 110±10 °C trocknen und 60±5 min bei 20±2 °C und 65±5 % r.F. abkühlen lassen. Filter mit abgewittertem Material wiegen (±0,1 g)	- siehe Tag 37-39

Kurzanleitung zur Plattenprüfung nach DIN CEN/TS 12390-9

Wichtig: Die Angaben beziehen sich auf die Herstellung *einer* Betonserie. Üblicherweise werden zur vollen Auslastung des Slabtesters vier Betonserien hergestellt und gemeinsam geprüft. Entsprechende Mengenangaben in dieser Kurzanleitung sind folglich zu vervierfachen.

Tag	Tätigkeit	Erforderliche Utensilien
1	<p>Betonwürfel in Formen mit 150 mm Kantenlänge betonieren.</p> <p>Würfelformen nur leicht mit Trennmittel behandeln und vor dem Befüllen mit Handtuch abwischen.</p> <p>Beton in den Würfelformen auf dem Vibrationstisch verdichten.</p> <p>Erhärtende Betonwürfel mit Polyethylenfolie abgedeckt für 24±2 h bei 20±2 °C lagern.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - 4 x Würfelform mit 150 mm Kantenlänge (aufklappbare Stahlformen empfehlenswert) - Waage (mind. 20 kg Höchstlast, Fehlergrenze ±1 g) - Dosierschaufel und mehrere Eimer - Trennmittel und Pinsel - saugfähiges Laborhandtuch oder Lappen - Zwangsmischer (für Betonmischung von mind. 15 l) - Kelle - Vibrationstisch - Wasserschlauch - PE-Folie (z. B. Frischhaltefolie) - Geräte zur Frischbetonprüfung: Thermometer, LP-Topf, Ausbreittisch und -kegel, Stampfer, Metermaß, Abziehlineal, Schwamm
2	<p>24±2 h nach Herstellung Betonwürfel entformen, eindeutig beschriften und in ein Wasserbad aus Leitungswasser mit 20±2 °C stellen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Hammer oder Druckluft zum Ausschalen - wasserfester Stift zum Beschriften der Probekörper (z. B. harter Bleistift) - Klimakiste oder Behälter für Wasserbad mit Leitungswasser bei 20±2 °C
7	<p>Im Alter von 7 Tagen Betonwürfel dem Wasserbad entnehmen und in Klimakammer stellen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Klimakammer mit 20±2 °C, 65±5 % r.F. und 45±15 g/(m² h) Verdunstung
21	<p>Nach 21 Tagen aus jedem Würfel einen 50±2 mm dicken Probekörper mittels Diamantsäge rechtwinklig zur Herstellungsoberfläche so herausschneiden, dass eine der Sägeflächen durch die Mitte des Würfels verläuft.</p> <p>Probekörper mit Leitungswasser abwaschen, mit einem feuchten Schwamm abtupfen, eindeutig beschriften und alle Maße mit einem Messschieber (±0,5 mm) bestimmen.</p> <p>Danach Probekörper wieder in Klimakammer stellen, sodass die Prüfflächen vertikal angeordnet sind und 50 mm Abstand zwischen den Probekörpern bleibt.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Diamantsäge zum Sägen der Probekörper, Metermaß, persönliche Schutzausrüstung (Schutzbrille, Gehörschutz, Schürze) - Schwamm - Messschieber mit einer Fehlergrenze von ±0,1 mm - wasserfester Stift zum Beschriften der Probekörper (z. B. harter Bleistift)
24-26	<p>Nach 25±1 Tagen Probekörper erneut aus Klimakammer entnehmen und versiegeln.</p> <p>Dazu mit geeignetem Klebstoff eine Gummischicht auf alle Oberflächen außer der Prüffläche kleben, sodass an der Prüffläche ein Überstand von 20±1mm entsteht und die Gummischicht an der Ecke überlappt.</p> <p>Kehle zwischen Beton und Gummischicht bei der Aufkantung an der Prüffläche mit Klebstoffstreifen oder mit Silikon verfugen.</p> <p>Danach die Probekörper wieder in die Klimakammer stellen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Klebstoff zum Kleben von Gummi auf Beton (Kontaktkleber empfehlenswert) - Gummischicht (3±0,5 mm dick, salzbeständig, bei -27 °C noch ausreichend elastisch) - Schere - Metermaß - Klebstoffstreifen oder Silikon, Silikonspritze
28	<p>Nach 28 Tagen zur erneuten Sättigung der Probekörper eine 3 mm tiefe Schicht entionisiertes Wasser auf die Prüffläche geben.</p> <p>Für eine Prüffläche von 150 x 150 mm werden 67 ml Flüssigkeit benötigt.</p> <p>Schichtdicke für 72±2 h bei 20±2 °C konstant halten.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - entionisiertes Wasser - Standzylinder mit ml-Skala
31	<p>Vor der Prüfung alle Gummiflächen mit Polystyrol-Schaumstoff bekleben.</p> <p>Augenscheinprüfung (Risse, Abwitterung von Partikeln der Gesteinskörnung, Verlust von Wasser oder Prüfflüssigkeit...) vor den FTW durchführen.</p> <p>Prüfflächen der Probekörper für den Bericht fotografieren (VORHER).</p> <p>Danach 3 mm tiefe Schicht Prüfflüssigkeit (entionisiertes Wasser oder 97 % Leitungswasser + 3 % NaCl) auf Prüffläche geben.</p> <p>Falls Tausalzlösung als Prüfflüssigkeit verwendet wird: Bei Herstellung der Prüfflüssigkeit auf %-Wert achten: $\frac{100-3}{100-3} \% = 3,093 \%$ z. B. für 5 l Prüflösung 5000 g Leitungswasser und 154,6 g Salz mischen</p> <p>Die Prüfflüssigkeit durch mit geeignetem Gummiband umspannte Polyethylenfolie vor Verdunstung schützen.</p> <p>Jetzt die Probekörper in die Prüfruhe einlagern (Probekörper gleichmäßig auf die Roste des Slabtesters verteilen, Luftumwälzung ermöglichen, roten Temperaturfühler beim mittig in der Truhe platzierten Probekörper durch kleines Loch in der PE-Folie auf die Prüffläche in die Prüfflüssigkeit legen, weißen Temperaturfühler möglichst in der Mitte der Prüfruhe in die Luft zeigend platzieren)</p> <p>Start der Frost-Tau-Wechsel. Ein Frost-Tau-Wechsel-Zyklus dauert 24 h und wird automatisch durchführen.</p>	<ul style="list-style-type: none"> - expandiertes Polystyrol (20±1 mm dick, 18±2 kg/m³, $\lambda < 0,036 \text{ W/(m K)}$) - Heißdrahtschneidgerät - Metermaß - Klebstoff zum Kleben von Styropor auf Gummi - Fotoapparat - Standzylinder mit ml-Skala - Tausalz (z. B. Tafelsalz) oder entionisiertes Wasser - geeignete Gummibänder - PE-Folie (0,1 - 0,2 mm dick) z. B. Frischhaltefolie - luftgekühlte Prüfruhe Slabtester mit Schlüssel zum Verschließen und Auflagerrosten

37-39	<p>Nach 7±1 Frost-Tau-Wechseln, während der Phase, in der die Prüflüssigkeit aufgetaut ist (20 h bis 24 h), für jeden Probekörper wie folgt verfahren:</p> <p>Vorher schon Behälter und beschriftete Papierfilter im Trockenschrank bis zur Massenkonstanz bei 110±10 °C trocknen und wiegen (Ausgleichsfeuchte).</p> <p>Abgewittertes Material mit Bürste abbürsten, mit Sprühflasche mit Leitungswasser abspülen und im Behälter auffangen.</p> <p>Flüssigkeit im Behälter vorsichtig durch Papierfilter abgießen.</p> <p>Augenscheinprüfung (Risse, Abwitterung von Partikeln der Gesteinskörnung, Verlust von Wasser oder Prüflüssigkeit, ...) durchführen.</p> <p>Neue Prüflüssigkeit (entionisiertes Wasser oder 97 % Leitungswasser + 3 % NaCl) auf die Prüflfläche aufbringen.</p> <p>Zum Zeitpunkt 0±30 min des Temperaturwechsels die Probekörper wieder in Prüfruhe stellen.</p> <p>Filter und Behälter 110±10 °C bis zur Massenkonstanz trocknen und wiegen (±0,1 g).</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Trockenschrank für 110±10 °C - Behälter für das abgewitterte Material (hitze- und salzbeständig) - geeignete Papierfilter (Kaffeefilter ungeeignet) - Bleistift zum Beschriften der Papierfilter - Waage (Fehlergrenze ±0,05 g) - Bürste mit kurzen (ca. 20 mm langen), steifen Borsten - sauberes Laborhandtuch - Abtropfbehälter - 4 x Trichter - Sprühflasche mit Leitungswasser - Tausalz (z. B. Tafelsalz) oder entionisiertes Wasser - Standzylinder mit ml-Skala
44-46	Nach 14±1 Frost-Tau-Wechseln wie nach 7±1 Frost-Tau-Wechseln verfahren.	- siehe Tag 37-39
58-60	Nach 28±1 Frost-Tau-Wechseln nach den bekannten Schritten verfahren.	- siehe Tag 37-39
72-74	Nach 42±1 Frost-Tau-Wechseln nach den bekannten Schritten verfahren.	- siehe Tag 37-39
86-88	Nach 56 Frost-Tau-Wechseln nach den bekannten Schritten verfahren. Prüflflächen der Probekörper für den Bericht wieder fotografieren (NACHHER).	<ul style="list-style-type: none"> - siehe Tag 37-39 - Fotoapparat

Anhang 4: Terminplan für die im Hochschullabor durchgeführten Prüfverfahren

KW	Datum	Labor belegt	Tätigkeit CDF Serie 1 und 2	Tätigkeit CDF Serie 3 und 4	Tätigkeit CIF Serie 1 und 2	Tätigkeit CIF Serie 3 und 4	Tätigkeit Plattenprüfung
38	Mo 16.09.13						
	Di 17.09.13						
	Mi 18.09.13						
	Do 19.09.13						
	Fr 20.09.13			CDF Betonieren			
	Sa 21.09.13			CDF Entformen			
So 22.09.13							
39	Mo 23.09.13						
	Di 24.09.13						
	Mi 25.09.13						
	Do 26.09.13						
	Fr 27.09.13						
	Sa 28.09.13			CDF Sägen			
So 29.09.13							
40	Mo 30.09.13						
	Di 01.10.13						
	Mi 02.10.13						
	Do 03.10.13						
	Fr 04.10.13					CIF Betonieren	
Sa 05.10.13					CIF Entformen		
So 06.10.13							
41	Mo 07.10.13						
	Di 08.10.13						
	Mi 09.10.13						
	Do 10.10.13						
	Fr 11.10.13					CIF Sägen	
Sa 12.10.13							
So 13.10.13							
42	Mo 14.10.13		CDF Bekleben				
	Di 15.10.13						
	Mi 16.10.13						
	Do 17.10.13						
	Fr 18.10.13			CDF Beginn Saugen			
Sa 19.10.13			CDF Probekörper wiegen				
So 20.10.13			CDF Probekörper wiegen				
43	Mo 21.10.13		CDF Probekörper wiegen				
	Di 22.10.13		CDF Probekörper wiegen				
	Mi 23.10.13		CDF Probekörper wiegen				
	Do 24.10.13		CDF Probekörper wiegen				Platten Betonieren
	Fr 25.10.13			CDF Start FTW		CIF Bekleben	PlattenEntformen
	Sa 26.10.13						
So 27.10.13			CDF Abwitterung 4 FTW				
44	Mo 28.10.13		CDF Abwitterung 6 FTW				
	Di 29.10.13		CDF Filter wiegen				
	Mi 30.10.13						
	Do 31.10.13						Platten Klimakammer
	Fr 01.11.13			CDF Abwitterung 14 FTW		CIF Saugen	
Sa 02.11.13			CDF Filter wiegen		CIF Probekörper wiegen		
So 03.11.13					CIF Probekörper wiegen		
45	Mo 04.11.13				CIF Probekörper wiegen		
	Di 05.11.13				CIF Probekörper wiegen		
	Mi 06.11.13				CIF Probekörper wiegen		
	Do 07.11.13				CIF Probekörper wiegen		
	Fr 08.11.13			CDF Abwitterung 28 FTW		CIF Start FTW	CIF Betonieren
Sa 09.11.13			CDF Filter wiegen			CIF Entformen	
So 10.11.13							
46	Mo 11.11.13				CIF Ultraschall 7 FTW		
	Di 12.11.13				CIF Filter wiegen		
	Mi 13.11.13						
	Do 14.11.13						Platten Sägen
	Fr 15.11.13					CIF Ultraschall 14 FTW	CIF Sägen
	Sa 16.11.13					CIF Filter wiegen	
So 17.11.13							
47	Mo 18.11.13						Platten Bekleben
	Di 19.11.13						
	Mi 20.11.13						
	Do 21.11.13						Platten Sättigung
	Fr 22.11.13					CIF Ultraschall 28 FTW	Kontrolle Sättigung
Sa 23.11.13					CIF Filter wiegen	Kontrolle Sättigung	
So 24.11.13						Platten Start FTW	
48	Mo 25.11.13						
	Di 26.11.13						
	Mi 27.11.13						
	Do 28.11.13						
	Fr 29.11.13					CIF Ultraschall 42 FTW	CIF Bekleben
Sa 30.11.13					CIF Filter wiegen		
So 01.12.13						Platten Prüfung 7 FTW	
49	Mo 02.12.13						Platten Filter wiegen
	Di 03.12.13						
	Mi 04.12.13						
	Do 05.12.13						
	Fr 06.12.13					CIF Ultraschall 56 FTW	CIF Saugen
	Sa 07.12.13					CIF Filter wiegen	CIF Probekörper wiegen
So 08.12.13						CIF Probekörper wiegen	
							Platten Prüfung 14 FTW

50	Mo	09.12.13				CIF Probekörper wiegen	Platten Filter wiegen
	Di	10.12.13				CIF Probekörper wiegen	
	Mi	11.12.13				CIF Probekörper wiegen	
	Do	12.12.13			CDF Betonieren	CIF Probekörper wiegen	
	Fr	13.12.13			CDF Entformen	CIF Start FTW	
	Sa	14.12.13					
So	15.12.13						
51	Mo	16.12.13				CIF Ultraschall 7 FTW	
	Di	17.12.13				CIF Filter wiegen	
	Mi	18.12.13					
	Do	19.12.13			CDF Sägen		
	Fr	20.12.13				CIF Ultraschall 14 FTW	
	Sa	21.12.13				CIF Filter wiegen	
So	22.12.13					Platten Prüfung 28 FTW	
52	Mo	23.12.13					Platten Filter wiegen
	Di	24.12.13					
	Mi	25.12.13					
	Do	26.12.13					
	Fr	27.12.13				CIF Ultraschall 28 FTW	
	Sa	28.12.13				CIF Filter wiegen	
So	29.12.13						
1	Mo	30.12.13					
	Di	31.12.13					
	Mi	01.01.14					
	Do	02.01.14					
	Fr	03.01.14				CIF Ultraschall 42 FTW	
	Sa	04.01.14				CIF Filter wiegen	
So	05.01.14					Platten Prüfung 42 FTW	
2	Mo	06.01.14					Platten Filter wiegen
	Di	07.01.14			CDF Bekleben		
	Mi	08.01.14					
	Do	09.01.14			CDF Beginn Saugen		
	Fr	10.01.14			CDF Probekörper wiegen	CIF Ultraschall 56 FTW	
	Sa	11.01.14			CDF Probekörper wiegen	CIF Filter wiegen	
So	12.01.14			CDF Probekörper wiegen			
3	Mo	13.01.14			CDF Probekörper wiegen		
	Di	14.01.14			CDF Probekörper wiegen		
	Mi	15.01.14			CDF Probekörper wiegen		
	Do	16.01.14			CDF Probekörper wiegen		
	Fr	17.01.14			CDF Start FTW		
	Sa	18.01.14			CDF Abwitterung 4 FTW		
So	19.01.14			CDF Abwitterung 6 FTW		Platten Prüfung 56 FTW	
4	Mo	20.01.14			CDF Filter wiegen		Platten Filter wiegen
	Di	21.01.14					
	Mi	22.01.14					
	Do	23.01.14			CDF Abwitterung 14 FTW		
	Fr	24.01.14			CDF Filter wiegen		
	Sa	25.01.14					
So	26.01.14						
5	Mo	27.01.14					
	Di	28.01.14					
	Mi	29.01.14					
	Do	30.01.14			CDF Abwitterung 28 FTW		
	Fr	31.01.14			CDF Filter wiegen		
	Sa	01.02.14					
So	02.02.14						
6	Mo	03.02.14					
	Di	04.02.14					
	Mi	05.02.14					
	Do	06.02.14					
	Fr	07.02.14					
	Sa	08.02.14					
So	09.02.14						

Anhang 5: Siebanalyse für die Gesteinskörnung der zu prüfenden Betonserien

Berechnung der Anteile der einzelnen Korngruppen für ein Korngemisch AB16

Siebanalyse: KG 0/4
Probenmenge: 2000 g

Sieb [mm]	0	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
ΣR [g]	2000	1954	1741	1209	732	381	22	0	0
ΣR [%]	100,0	97,7	87,1	60,5	36,6	19,1	1,1	0,0	0,0
ΣD [%]	0,0	2,3	13,0	39,6	63,4	81,0	98,9	100,0	100,0

Siebanalyse: KG 4/8
Probenmenge: 2000 g

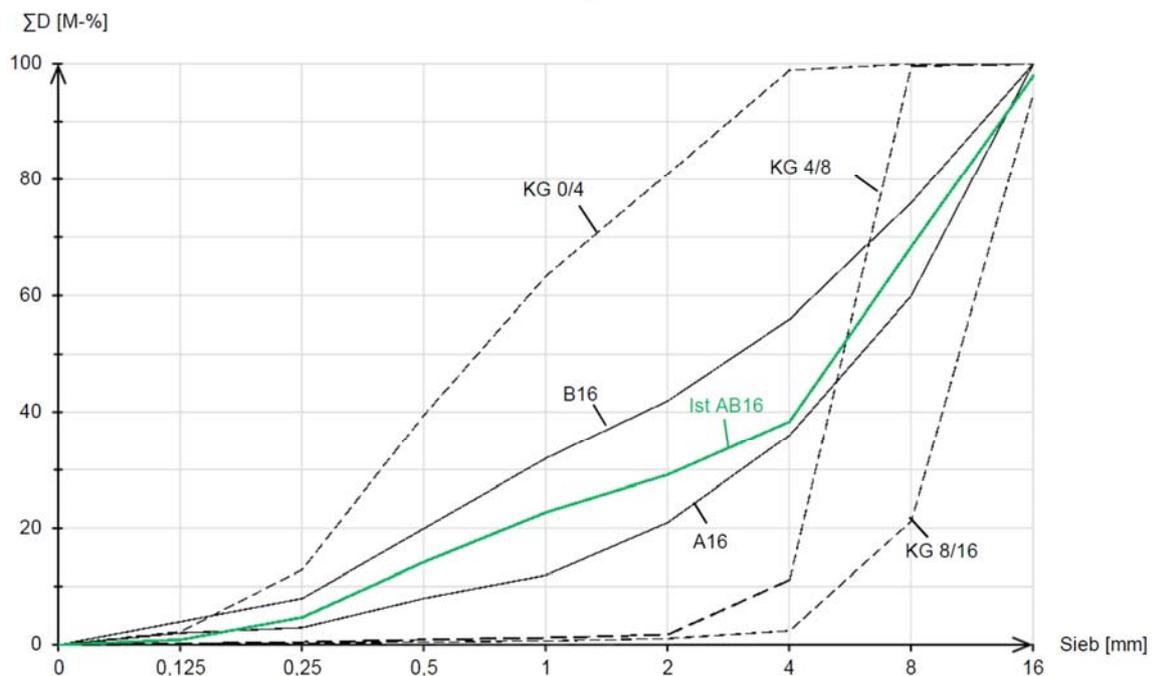
Sieb [mm]	0	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
ΣR [g]	2000	1996	1991	1983	1976	1965	1777	6	0
ΣR [%]	100,0	99,8	99,6	99,2	98,8	98,3	88,9	0,3	0,0
ΣD [%]	0,0	0,2	0,4	0,8	1,2	1,8	11,2	99,7	100,0

Siebanalyse: KG 8/16
Probenmenge: 2500 g

Sieb [mm]	0	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
ΣR [g]	2500	2497	2493	2488	2483	2473	2439	1970	131
ΣR [%]	100,0	99,9	99,7	99,5	99,3	98,9	97,6	78,8	5,2
ΣD [%]	0,0	0,1	0,3	0,5	0,7	1,1	2,4	21,2	94,8

	[M.-%]	0	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16
KG 0/4	35	0,0	0,8	4,5	13,8	22,2	28,3	34,6	35,0	35,0
KG 4/8	25	0,0	0,1	0,1	0,2	0,3	0,4	2,8	24,9	25,0
KG 8/16	40	0,0	0,0	0,1	0,2	0,3	0,4	1,0	8,5	37,9
A16	100	0,0	2,0	3,0	8,0	12,0	21,0	36,0	60,0	100,0
B16	100	0,0	4,0	8,0	20,0	32,0	42,0	56,0	76,0	100,0
Ist AB16	100	0,0	0,9	4,8	14,2	22,8	29,2	38,4	68,4	97,9
Soll AB16	100	0,0	3,0	5,5	14,0	22,0	31,5	46,0	68,0	100,0

Sieblinien der Korngruppen 0/4, 4/8, 8/16, Regelsieblinien A16 und B16 und Sieblinie des Korngemisches Ist AB16



Anhang 6: Druckfestigkeitsprüfung der vier untersuchten Betonserien

FAKULTÄT BAUINGENIEURWESEN

Labor für Baustoffe und Beton

Prof. Dr. techn. Wolfgang Kusterle

Prüfeneringer Str. 58

93049 Regensburg

Tel.: 09 41/9 43-1349

Fax: 09 41/9 43-1429

wolfgang.kusterle@bau.fh-regensburg.de

FACHHOCHSCHULE REGENSBURG
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

HOCHSCHULE FÜR
TECHNIK
WIRTSCHAFT
SOZIALWESEN



Parametertabelle:

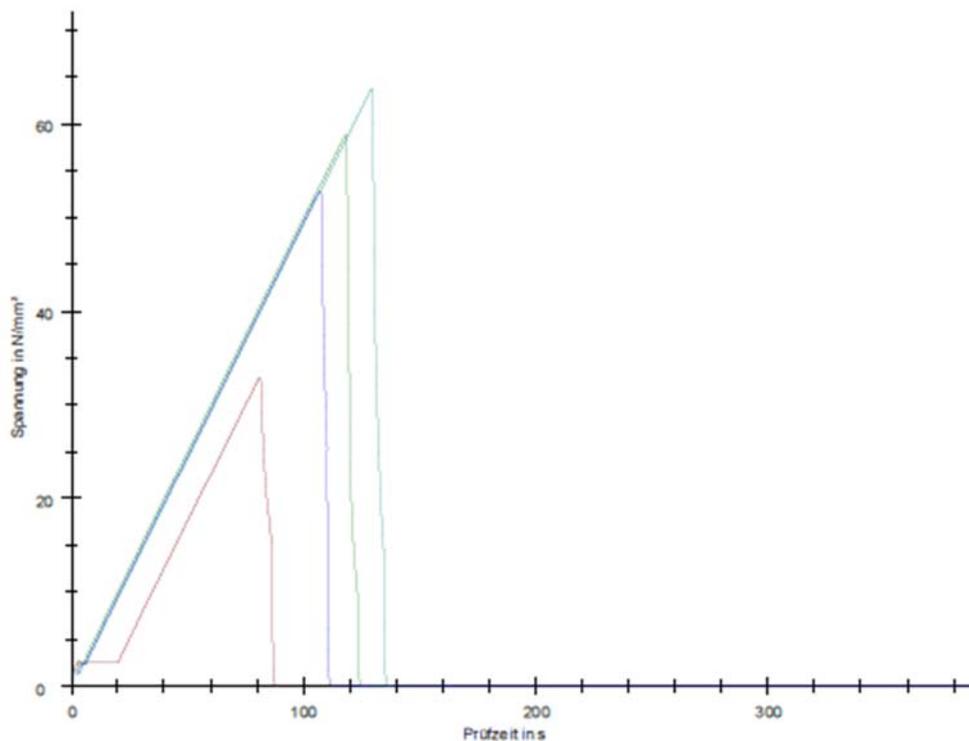
02.11.13

Prüfbericht :
Prüfer :
Kunde :
Prüfnorm :
Festigkeitsklasse :
Herstelltag :
Prüfalter : 0 T
Sonstiges :

Ergebnisse:

Nr	Datum	ID	a mm	b mm	A mm ²	h mm	Gewicht kg	ρ g/cm ³	F _m kN	σ_m N/mm ²
1	18.10.2013	18.10.2013 Serie 2	149,5	150,0	22425,0	149,7	7,454	2,22	738,30	32,92
2	18.10.2013	18.10.2013 Serie 1	149,7	150,2	22484,9	149,8	7,868	2,34	1323,38	58,86
3	02.11.2013	02.11.2013 Serie 3	150,5	152,7	22981,3	150,0	8,075	2,34	1215,59	52,89
4	02.11.2013	02.11.2013 Serie 4	149,7	151,7	22709,5	149,5	7,976	2,35	1448,50	63,78

Seriengrafik:



Anhang 7: Messwerte und Rechenergebnisse

Anhang 7.1: Messwerte und Rechenergebnisse der CIF-Prüfung

a) CIF-Prüfung: Messwerte der kapillaren Wasseraufnahme während der 7-tägigen erneuten Sättigung

$$w_{\text{Tag } n} = \frac{m_{\text{Tag } n} - m_{\text{Tag } 0}}{m_{\text{Tag } 0}} \cdot 100 \text{ [Gew.-%]}$$

$w_{\text{Tag } n}$ kapillare Wasseraufnahme am Tag n des erneuten Sättigung [Gew.-%]

$m_{\text{Tag } n}$ Masse des Probekörpers am Tag n der erneuten Sättigung [kg]

$m_{\text{Tag } 0}$ Masse des Probekörpers vor der erneuten Sättigung [kg]

Betonserie	Nr.	$m_{\text{Tag } 0}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 1}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 2}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 3}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 4}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 5}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 6}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 7}$ [kg]
Nullbeton	1	3,816	3,826	3,836	3,838	3,840	3,839	3,842	3,842
	2	3,752	3,762	3,771	3,773	3,773	3,774	3,775	3,775
	3	4,007	4,015	4,026	4,027	4,030	4,030	4,030	4,030
	4	3,871	3,879	3,885	3,887	3,889	3,890	3,890	3,890
	5	3,652	3,660	3,670	3,671	3,671	3,673	3,674	3,675
Mittelwert		3,820	3,828	3,838	3,839	3,841	3,841	3,842	3,842
Standardabweichung		0,133	0,132	0,133	0,133	0,134	0,133	0,133	0,132

Betonserie	Nr.	$m_{\text{Tag } 0}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 1}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 2}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 3}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 4}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 5}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 6}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 7}$ [kg]
LP-Beton	1	3,540	3,550	3,562	3,566	3,568	3,569	3,570	3,572
	2	3,496	3,505	3,519	3,521	3,522	3,524	3,526	3,527
	3	3,555	3,560	3,579	3,581	3,583	3,585	3,586	3,586
	4	3,612	3,620	3,637	3,639	3,641	3,643	3,645	3,645
	5	3,673	3,680	3,695	3,698	3,701	3,702	3,703	3,703
Mittelwert		3,575	3,583	3,598	3,601	3,603	3,605	3,606	3,607
Standardabweichung		0,069	0,068	0,069	0,069	0,069	0,069	0,069	0,068

Betonserie	Nr.	$m_{\text{Tag } 0}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 1}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 2}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 3}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 4}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 5}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 6}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 7}$ [kg]
Beton mit Mikrohohlkugeln	1	3,816	3,820	3,821	3,822	3,820	3,821	3,822	3,822
	2	3,741	3,742	3,743	3,744	3,743	3,744	3,744	3,744
	3	3,753	3,757	3,759	3,760	3,759	3,759	3,759	3,759
	4	3,753	3,756	3,756	3,756	3,757	3,757	3,757	3,758
	5	3,716	3,719	3,721	3,722	3,722	3,722	3,723	3,723
Mittelwert		3,756	3,759	3,760	3,761	3,760	3,761	3,761	3,761
Standardabweichung		0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037	0,037

Betonserie	Nr.	$m_{\text{Tag } 0}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 1}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 2}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 3}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 4}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 5}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 6}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 7}$ [kg]
Beton mit Faserpartikeln	1	3,935	3,940	3,940	3,940	3,941	3,942	3,942	3,943
	2	3,855	3,860	3,862	3,864	3,863	3,863	3,863	3,863
	3	3,779	3,787	3,786	3,786	3,786	3,784	3,786	3,787
	4	3,756	3,759	3,760	3,760	3,762	3,761	3,761	3,761
	5	3,868	3,874	3,875	3,875	3,877	3,877	3,877	3,877
Mittelwert		3,839	3,844	3,845	3,845	3,846	3,845	3,846	3,846
Standardabweichung		0,072	0,072	0,072	0,072	0,072	0,073	0,073	0,073

b) CIF-Prüfung: Berechnung der kapillaren Wasseraufnahme während der 7-tägigen erneuten Sättigung

Betonserie	Nr.	$w_{\text{Tag } 0}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 1}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 2}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 3}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 4}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 5}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 6}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 7}$ [Gew.-%]
Nullbeton	1	0,00	0,26	0,52	0,58	0,63	0,60	0,68	0,68
	2	0,00	0,27	0,51	0,56	0,56	0,59	0,61	0,61
	3	0,00	0,20	0,47	0,50	0,57	0,57	0,57	0,57
	4	0,00	0,21	0,36	0,41	0,46	0,49	0,49	0,49
	5	0,00	0,22	0,49	0,52	0,52	0,58	0,60	0,63
Mittelwert		0,00	0,23	0,47	0,51	0,55	0,57	0,59	0,60
Standardabweichung		0,00	0,03	0,06	0,06	0,06	0,04	0,07	0,07

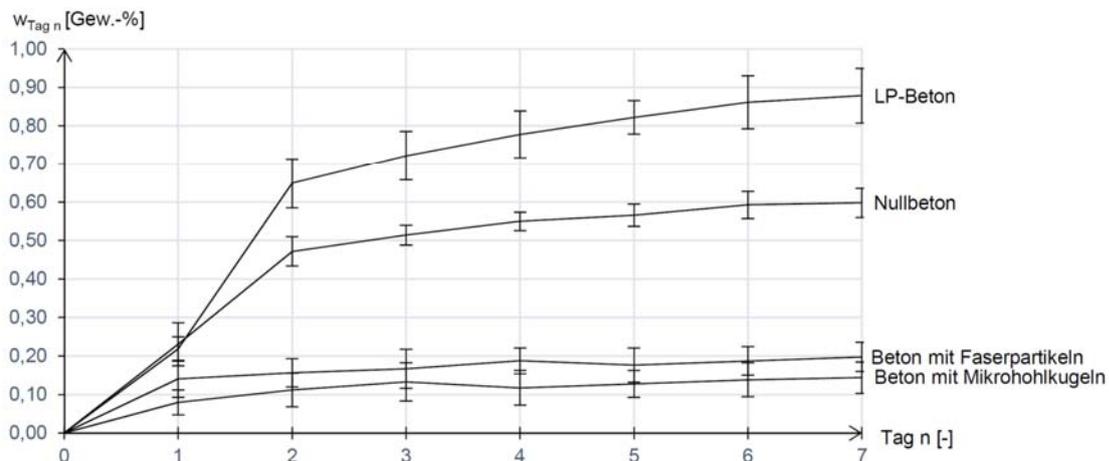
Betonserie	Nr.	$w_{\text{Tag } 0}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 1}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 2}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 3}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 4}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 5}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 6}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 7}$ [Gew.-%]
LP-Beton	1	0,00	0,28	0,62	0,73	0,79	0,82	0,85	0,90
	2	0,00	0,26	0,66	0,72	0,74	0,80	0,86	0,89
	3	0,00	0,14	0,68	0,73	0,79	0,84	0,87	0,87
	4	0,00	0,22	0,69	0,75	0,80	0,86	0,91	0,91
	5	0,00	0,19	0,60	0,68	0,76	0,79	0,82	0,82
Mittelwert		0,00	0,22	0,65	0,72	0,78	0,82	0,86	0,88
Standardabweichung		0,00	0,06	0,04	0,03	0,02	0,03	0,04	0,04

Betonserie	Nr.	$w_{\text{Tag } 0}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 1}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 2}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 3}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 4}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 5}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 6}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 7}$ [Gew.-%]
Beton mit Mikrohohlkugeln	1	0,00	0,10	0,13	0,16	0,10	0,13	0,16	0,16
	2	0,00	0,03	0,05	0,08	0,05	0,08	0,08	0,08
	3	0,00	0,11	0,16	0,19	0,16	0,16	0,16	0,16
	4	0,00	0,08	0,08	0,08	0,11	0,11	0,11	0,13
	5	0,00	0,08	0,13	0,16	0,16	0,16	0,19	0,19
Mittelwert		0,00	0,08	0,11	0,13	0,12	0,13	0,14	0,14
Standardabweichung		0,00	0,03	0,04	0,05	0,05	0,03	0,04	0,04

Betonserie	Nr.	$w_{\text{Tag } 0}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 1}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 2}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 3}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 4}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 5}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 6}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 7}$ [Gew.-%]
Beton mit Faserpartikeln	1	0,00	0,13	0,13	0,13	0,15	0,18	0,18	0,20
	2	0,00	0,13	0,18	0,23	0,21	0,21	0,21	0,21
	3	0,00	0,21	0,19	0,19	0,19	0,13	0,19	0,21
	4	0,00	0,08	0,11	0,11	0,16	0,13	0,13	0,13
	5	0,00	0,16	0,18	0,18	0,23	0,23	0,23	0,23
Mittelwert		0,00	0,14	0,16	0,17	0,19	0,18	0,19	0,20
Standardabweichung		0,00	0,05	0,04	0,05	0,03	0,04	0,04	0,04

CIF-Prüfung

Mittelwerte und Standardabweichungen der Wasseraufnahme $w_{\text{Tag } n}$ während der 7-tägigen erneuten Sättigung



c) CIF-Prüfung: Messwerte der Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung

Hinweis: Als Startwerte für den Wassergehalt bei 0 FTW wurde der Wassergehalt $w_{Tag n}$ nach der 7-tägigen erneuten Sättigung verwendet.

Zugrundeliegende Formeln:

$$\mu_S = \mu_b - \mu_f \text{ [g]}$$

$\mu_{S,n}$ Masse des getrockneten abgewitterten Materials [g]

$\mu_{b,n}$ Masse des Filters mit dem getrockneten abgewitterten Material [g]

$\mu_{f,n}$ Masse des leeren, getrockneten Filters [g]

$$w_n = \frac{m_{S,n} - m_{S,1} + \mu_{S,n}}{m_{S,0}} \cdot 100 \text{ [Gew.-%]}$$

w_n Wasseraufnahme nach n Frost-Tau-Wechseln [Gew.-%]

$m_{S,n}$ Masse des Probekörpers nach n Frost-Tau-Wechseln [g]

$m_{S,1}$ Masse des Probekörpers und des Abdichtungsmaterials vor der erneuten Sättigung [g]

$m_{S,0}$ Masse des Probekörpers ohne das Abdichtungsmaterials vor der erneuten Sättigung [g]

$\mu_{S,n}$ Gesamtmasse des getrockneten abgewitterten Materials nach n Frost-Tau-Wechseln [g]

		nach 7±1 FTW						
Betonserie	Nr.	$m_{S,0}$ [kg]	$m_{S,1}$ [kg]	$m_{S,n}$ [kg]	μ_f [g]	μ_b [g]	μ_S [g]	w_n [Gew.-%]
Nullbeton	1	3,747	3,820	3,850	3,6	3,9	0,3	0,81
	2	3,684	3,756	3,784	3,9	4,1	0,2	0,77
	3	3,940	4,012	4,040	3,7	4,1	0,4	0,72
	4	3,805	3,874	3,898	3,9	4,0	0,1	0,63
	5	3,585	3,657	3,684	3,9	4,0	0,1	0,76
LP-Beton	1	3,479	3,548	3,578	3,8	4,4	0,6	0,88
	2	3,432	3,500	3,535	3,6	4,1	0,5	1,03
	3	3,491	3,559	3,595	3,9	4,4	0,5	1,05
	4	3,546	3,619	3,653	3,6	4,3	0,7	0,98
	5	3,609	3,680	3,711	3,9	4,3	0,4	0,87
Beton mit Mikrohohlkugeln	1	3,750	3,821	3,827	3,7	3,9	0,2	0,17
	2	3,674	3,742	3,749	3,6	4,0	0,4	0,20
	3	3,685	3,757	3,763	3,6	4,0	0,4	0,17
	4	3,688	3,758	3,761	3,6	3,8	0,2	0,09
	5	3,655	3,723	3,726	3,7	4,0	0,3	0,09
Beton mit Faserpartikeln	1	3,874	3,941	3,947	4,0	4,4	0,4	0,17
	2	3,792	3,859	3,867	4,1	4,2	0,1	0,21
	3	3,718	3,786	3,791	4,0	4,3	0,3	0,14
	4	3,690	3,757	3,764	4,0	4,3	0,3	0,20
	5	3,803	3,873	3,880	4,1	4,2	0,1	0,19

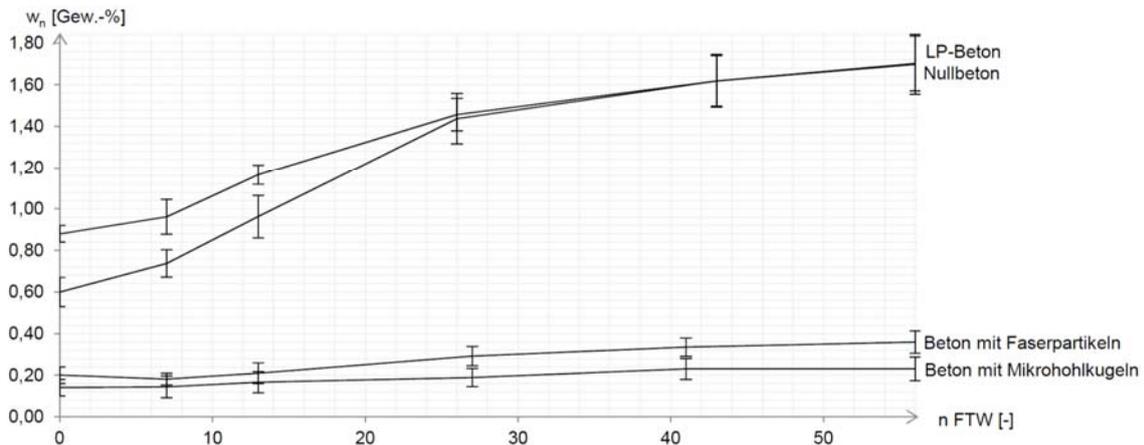
nach 14±1 FTW							nach 28±1 FTW					
$m_{S,n}$ [kg]	μ_f [g]	μ_b [g]	μ_S [g]	$\mu_{S,n}$ [g]	w_n [Gew.-%]	$m_{S,n}$ [kg]	μ_f [g]	μ_b [g]	μ_S [g]	$\mu_{S,n}$ [g]	w_n [Gew.-%]	
3,86	3,9	3,9	0,0	0,3	1,08	3,876	3,9	3,9	0,0	0,3	1,50	
3,794	3,6	3,8	0,2	0,4	1,04	3,815	3,8	3,8	0,0	0,4	1,61	
4,049	3,8	3,9	0,1	0,5	0,95	4,067	3,9	3,9	0,0	0,5	1,41	
3,905	3,6	3,6	0,0	0,1	0,82	3,924	3,9	3,9	0,0	0,1	1,32	
3,690	3,9	4,0	0,1	0,2	0,93	3,705	3,8	3,8	0,0	0,2	1,34	
3,587	3,5	3,6	0,1	0,7	1,14	3,598	3,9	4,0	0,1	0,8	1,46	
3,541	3,8	3,9	0,1	0,6	1,21	3,550	3,5	3,7	0,2	0,8	1,48	
3,602	3,8	4,0	0,2	0,7	1,25	3,613	3,9	4,1	0,2	0,9	1,57	
3,660	3,6	3,7	0,1	0,8	1,18	3,667	3,7	4,0	0,3	1,1	1,38	
3,717	3,9	4,2	0,3	0,7	1,04	3,729	3,6	3,9	0,3	1,0	1,39	
3,827	3,6	3,6	0,0	0,2	0,17	3,828	3,7	4,1	0,4	0,6	0,20	
3,750	3,6	3,7	0,1	0,5	0,23	3,749	3,6	4,0	0,4	0,9	0,22	
3,764	3,8	3,8	0,0	0,4	0,20	3,765	3,7	4,0	0,3	0,7	0,24	
3,762	3,7	3,7	0,0	0,2	0,11	3,763	3,8	4,2	0,4	0,6	0,15	
3,727	3,7	3,8	0,1	0,4	0,12	3,727	4,0	4,5	0,5	0,9	0,13	
3,948	3,8	3,7	-0,1	0,3	0,19	3,949	3,9	4,4	0,5	0,8	0,23	
3,868	4,0	4,0	0,0	0,1	0,24	3,869	3,6	4,1	0,5	0,6	0,28	
3,791	4,1	3,9	-0,2	0,1	0,14	3,797	3,6	4,2	0,6	0,7	0,31	
3,765	3,9	3,7	-0,2	0,1	0,22	3,767	3,6	4,1	0,5	0,6	0,29	
3,883	3,9	3,8	-0,1	0,0	0,26	3,886	3,7	4,1	0,4	0,4	0,35	

d) CIF-Prüfung: Berechnung der Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung

nach 42±1 FTW						nach 56 FTW					
$m_{s,n}$ [kg]	μ_r [g]	μ_s [g]	μ_z [g]	$\mu_{s,n}$ [g]	w_n [Gew.-%]	$m_{s,n}$ [kg]	μ_r [g]	μ_s [g]	μ_z [g]	$\mu_{s,n}$ [g]	w_n [Gew.-%]
3,883	3,9	4,0	0,1	0,4	1,69	3,887	3,7	4,0	0,3	0,7	1,81
3,821	3,8	4,2	0,4	0,8	1,79	3,824	3,7	3,9	0,2	1,0	1,87
4,073	3,9	4,1	0,2	0,7	1,57	4,076	3,8	3,9	0,1	0,8	1,64
3,930	3,9	4,0	0,1	0,2	1,48	3,933	3,6	3,7	0,1	0,3	1,56
3,713	3,8	3,9	0,1	0,3	1,57	3,715	4,0	4,1	0,1	0,4	1,63
3,601	3,7	4,0	0,3	1,1	1,56	3,605	3,6	3,7	0,1	1,2	1,67
3,554	3,5	3,7	0,2	1,0	1,60	3,558	3,6	3,7	0,1	1,1	1,72
3,622	3,8	4,0	0,2	1,1	1,84	3,625	3,9	4,1	0,2	1,3	1,93
3,671	3,8	4,3	0,5	1,6	1,51	3,672	3,8	4,1	0,3	1,9	1,55
3,736	3,8	4,2	0,4	1,4	1,59	3,737	3,8	3,9	0,1	1,5	1,62
3,829	3,7	4,1	0,4	1,0	0,24	3,829	3,6	4,1	0,5	1,5	0,25
3,751	3,5	3,9	0,4	1,3	0,28	3,750	3,7	4,2	0,5	1,8	0,27
3,766	3,7	4,0	0,3	1,0	0,27	3,766	3,6	4,1	0,5	1,5	0,28
3,764	3,5	3,9	0,4	1,0	0,19	3,764	3,7	4,1	0,4	1,4	0,20
3,728	3,6	3,8	0,2	1,1	0,17	3,727	3,8	4,0	0,2	1,3	0,15
3,950	3,6	4,0	0,4	1,2	0,26	3,951	3,6	4,2	0,6	1,8	0,30
3,872	3,8	4,2	0,4	1,0	0,37	3,871	3,5	4,0	0,5	1,5	0,36
3,797	3,8	4,1	0,3	1,0	0,32	3,796	3,9	4,3	0,4	1,4	0,31
3,769	3,7	4,1	0,4	1,0	0,35	3,771	3,9	4,4	0,5	1,5	0,42
3,886	3,6	4,1	0,5	0,9	0,37	3,887	4,0	4,5	0,5	1,4	0,40

Betonserie	w_n [Gew.-%] nach ...	7 d Saugen	7±1 FTW	14±1 FTW	28±1 FTW	42±1 FTW	56 FTW
Nullbeton	tatsächliche Anzahl FTW	0	7	13	26	43	56
	Mittelwert	0,60	0,74	0,96	1,44	1,62	1,70
	Standardabweichung	0,07	0,07	0,10	0,12	0,12	0,13
LP-Beton	tatsächliche Anzahl FTW	0	7	13	26	43	56
	Mittelwert	0,88	0,96	1,17	1,46	1,62	1,70
	Standardabweichung	0,04	0,08	0,05	0,08	0,13	0,14
Beton mit Mikrohohlkugeln	tatsächliche Anzahl FTW	0	7	13	27	41	56
	Mittelwert	0,14	0,14	0,17	0,19	0,23	0,23
	Standardabweichung	0,04	0,05	0,05	0,04	0,05	0,06
Beton mit Faserpartikeln	tatsächliche Anzahl FTW	0	7	13	27	41	56
	Mittelwert	0,20	0,18	0,21	0,29	0,33	0,36
	Standardabweichung	0,04	0,03	0,05	0,05	0,04	0,05

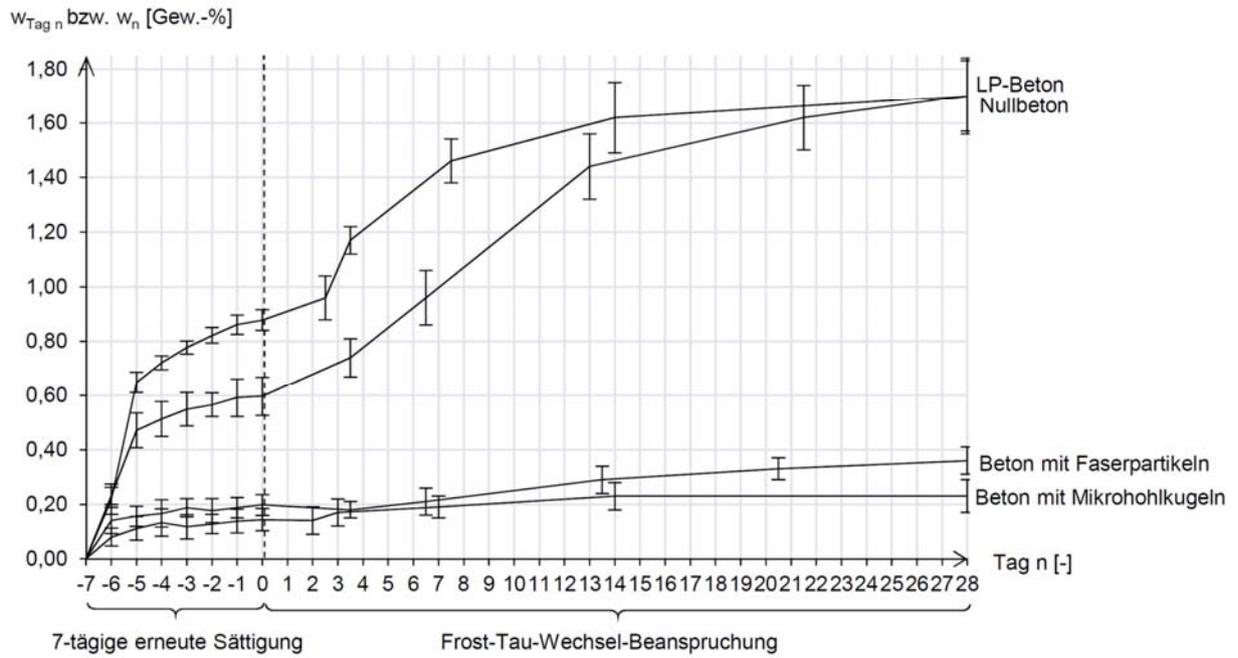
CIF-Prüfung
Mittelwerte und Standardabweichungen der Wasseraufnahme w_n während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung



e) CIF-Prüfung: Zusammenfassung der Wasseraufnahme während der 7-tägigen erneuten Sättigung und während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung

CIF-Prüfung

Mittelwerte der Wasseraufnahme $w_{\text{Tag } n}$ während der 7-tägigen erneuten Sättigung und der Wasseraufnahme w_n während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung



f) CIF-Prüfung: Berechnung des relativen dynamischen Elastizitätsmoduls nach n Frost-Tau-Wechseln

Zugrundeliegende Formel:

$$RDM_{UPPT,n} = \frac{t_{t,n}}{t_{t,0}} \cdot \left(\frac{t_{t,0} \cdot l_{t,0} - t_{cm,0} \cdot l_{t,0} + t_{cm,0} \cdot l_s}{t_{t,n} \cdot l_{t,n} - t_{cm,n} \cdot l_{t,n} + t_{cm,n} \cdot l_s} \right)^2 \cdot 100 [\%]$$

RDM_{UPPT} relativer dynamischer Elastizitätsmodul [%]

t_t Gesamtübertragungszeit (durch Probekörper und Kopplungsmittel) [µs]

t_{cm} Übertragungszeit im Behälter durch das Kopplungsmittel ohne Probekörper [µs]

l_t Abstand der Messwertgeber untereinander [mm]

l_s Länge des Probekörpers vor dem Versiegeln der seitlichen Flächen [mm]

Index n Ergebnis nach n Frost-Tau-Wechseln

Index 0 Ausgangswert nach der kapillaren Wasseraufnahme

Unabhängig vom Probekörper gilt:

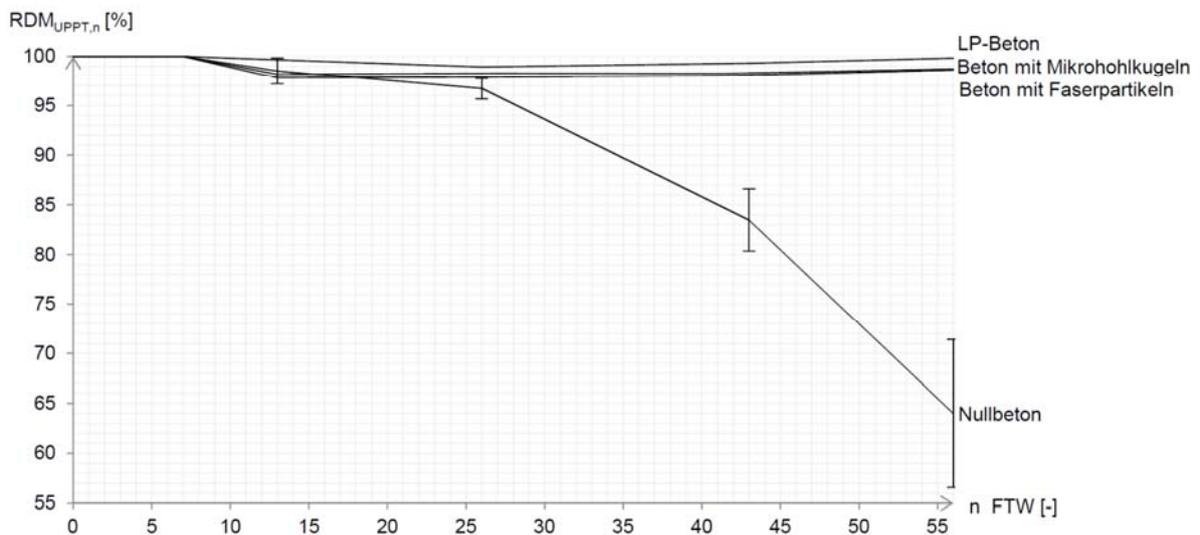
l _{t,n} [mm]	l _{t,0} [mm]	t _{cm,0} [µs]	t _{cm,n} [µs]
162	162	104,5	104,5

				0 FTW	7±1 FTW	14±1 FTW	28±1 FTW	42±1 FTW	56 FTW	7±1 FTW	14±1 FTW	28±1 FTW	42±1 FTW	56 FTW
Betonserie	Nr.	Richtung	l _s [mm]	t _{t,0} [µs]	t _{t,n} [µs]	RDM _{UPPT,0} [%]	RDM _{UPPT,n} [%]	RDM _{UPPT,n} [%]	RDM _{UPPT,n} [%]	RDM _{UPPT,n} [%]				
Nullbeton	1	längs	150,0	36,7	36,7	37,0	39,9	44,2	45,6	100	100	98	81	63
		quer	151,5	36,7	37,1	37,4	40,1	49,6	53,9	100	97	95	81	49
	2	längs	150,5	36,5	36,4	36,8	38,8	42,9	44,6	100	101	98	86	67
		quer	150,0	37,2	37,3	37,5	40,5	45,4	55,5	100	99	98	81	61
	3	längs	150,5	36,2	36,4	36,7	39,5	43,4	50,3	100	99	97	80	64
		quer	150,0	36,7	36,8	37,3	40,1	46,8	53,1	100	99	96	80	55
	4	längs	150,5	36,2	36,7	36,8	38,5	42,1	43,3	100	97	96	86	69
		quer	149,0	38,3	38,7	38,8	40,5	44,6	51,1	100	97	97	87	68
	5	längs	150,0	36,0	36,3	36,7	38,4	41,4	43,3	100	98	95	85	70
		quer	145,0	39,0	39,3	39,4	40,8	43,8	45,0	100	98	97	88	73
LP-Beton	1	längs	150,0	38,8	38,7	38,9	38,9	38,9	38,7	100	101	99	99	99
		quer	150,5	38,7	38,7	38,6	38,9	38,7	38,7	100	100	101	99	100
	2	längs	149,8	38,1	38,3	38,3	38,0	38,1	38,1	100	99	99	101	100
		quer	150,3	38,7	38,9	38,8	38,7	38,7	38,5	100	99	99	100	100
	3	längs	150,0	38,1	37,7	38,6	38,6	38,3	38,1	100	103	97	97	99
		quer	149,5	39,4	39,7	39,6	39,4	39,2	39,1	100	98	99	100	101
	4	längs	150,0	38,7	38,7	38,6	38,5	38,5	38,1	100	100	101	101	101
		quer	148,5	39,2	39,2	39,3	39,3	39,2	38,8	100	100	99	99	100
	5	längs	150,0	38,7	38,6	38,9	38,7	38,7	38,2	100	101	99	100	100
		quer	150,3	39,2	39,7	39,7	39,7	39,6	39,0	100	97	97	97	98
Beton mit Mikrohohlkugeln	1	längs	150,8	37,3	37,7	37,7	37,7	37,7	37,3	100	97	97	97	97
		quer	150,4	37,1	37,3	37,3	37,4	37,2	37,1	100	99	99	98	99
	2	längs	150,5	37,2	37,5	37,7	37,4	37,4	37,6	100	98	97	99	99
		quer	149,7	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	37,7	100	100	100	100	100
	3	längs	152,7	36,7	36,7	36,8	36,8	36,8	36,7	100	100	99	99	99
		quer	150,5	36,3	36,7	36,7	36,6	36,4	36,2	100	97	97	98	99
	4	längs	151,0	36,3	36,7	36,7	36,7	36,6	36,6	100	97	97	97	98
		quer	149,8	36,7	36,9	36,7	36,8	36,7	36,6	100	99	100	99	100
	5	längs	151,1	36,7	37,2	37,1	37,2	37,1	36,7	100	97	97	97	97
		quer	149,8	37,5	37,8	37,7	37,8	37,8	37,7	100	98	99	98	98
Beton mit Faserpartikeln	1	längs	149,0	37,2	37,7	37,7	37,6	37,5	37,4	100	97	97	97	98
		quer	149,0	36,7	36,8	36,9	36,9	36,7	36,7	100	99	99	99	100
	2	längs	149,0	36,7	37,1	37,2	37,2	36,8	36,7	100	97	97	97	99
		quer	149,0	35,9	36,2	36,1	36,2	36,2	36,2	100	98	99	98	98
	3	längs	150,0	37,0	37,3	37,3	37,2	37,2	37,2	100	98	98	99	99
		quer	149,0	38,0	38,3	38,3	38,3	38,2	38,2	100	98	98	98	99
	4	längs	149,0	36,3	36,7	36,7	36,8	36,7	36,5	100	97	97	97	97
		quer	150,0	36,0	36,1	36,2	36,2	36,1	36,1	100	99	99	99	99
	5	längs	149,0	37,2	37,7	37,7	37,4	37,5	37,4	100	97	97	99	98
		quer	152,0	35,9	36,2	35,9	36,0	36,0	36,0	100	98	100	99	99

g) CIF-Prüfung: Mittelwerte und Standardabweichung des RDM in Abhängigkeit der Anzahl an Frost-Tauwechseln

Betonserie	RDM _{UPPT,n} [%] nach ...	7±1 FTW	14±1 FTW	28±1 FTW	42±1 FTW	56 FTW
Nullbeton	tatsächliche Anzahl FTW	7	13	26	43	56
	Mittelwert	100	99	97	83	64
	Standardabweichung	0	1	1	3	7
	95%-Quantil	100	96	94	77	48
LP-Beton	tatsächliche Anzahl FTW	7	13	26	43	56
	Mittelwert	100	100	99	99	100
	Standardabweichung	0	2	1	1	1
	95%-Quantil	100	96	96	96	97
Beton mit Mikrohohlkugeln	tatsächliche Anzahl FTW	7	13	27	41	56
	Mittelwert	100	98	98	98	99
	Standardabweichung	0	1	1	1	1
	95%-Quantil	100	96	96	96	97
Beton mit Faserpartikeln	tatsächliche Anzahl FTW	7	13	27	41	56
	Mittelwert	100	98	98	98	99
	Standardabweichung	0	1	1	1	1
	95%-Quantil	100	96	95	96	97

CIF-Prüfung
Mittelwerte und Standardabweichungen von RDM_{UPPT}
in Abhängigkeit der Anzahl an Frost-Tauwechseln



h) CIF-Prüfung: Messwerte der flächenbezogenen Gesamtmenge S_n an abgewittertem Material nach n Frost-Tau-Wechseln

Hinweis: Die flächenbezogene Abwitterung wird bei der CIF-Prüfung nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 eigentlich nicht bestimmt. Die zugehörigen Formeln wurden von der CDF-Prüfung nach DIN CEN/TS 12390-0 übernommen.

Zugrundeliegende Formeln:

$$m_{s,n} = m_{s,before} + (m_{s+f} - m_f) \text{ [g]}$$

- $m_{s,n}$ Gesamtmasse des getr. abgewitterten Materials nach n Frost-Tauwechseln [g]
- $m_{s,before}$ Gesamtmasse des getr. abgewitterten Materials bei der vorherigen Messung [g]
- m_{s+f} Masse des getrocknetes Filters mit dem abgewitterten Material [g]
- m_f Masse des trockenen Filters [g]

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \cdot 10^3 \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

- S_n Masse des getrockneten abgewitterten Materials bezogen auf die Prüffläche nach dem n-ten Frost-Tau-Wechsel [kg/m²]
- $m_{s,n}$ Gesamtmasse des getr. abgewitterten Materials nach n Frost-Tauwechseln [g]
- A Prüffläche [mm²]

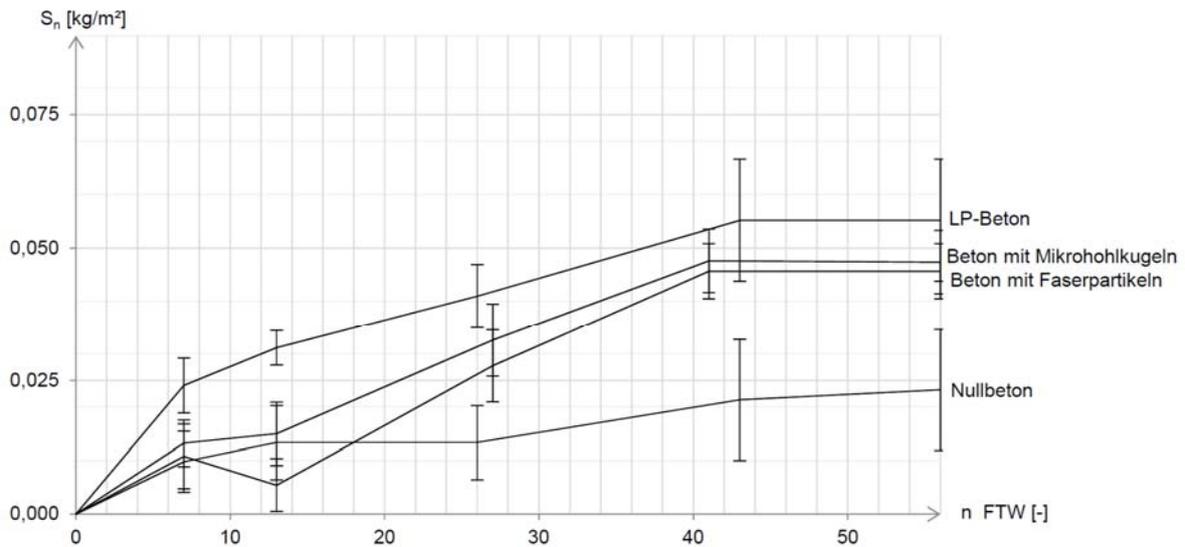
Betonserie	Nr.	l [mm]	b [mm]	A [mm ²]	nach 7±1 FTW					nach 14±1 FTW				
					$m_{s,before}$ [g]	m_{s+f} [g]	m_f [g]	$m_{s,n}$ [g]	S_n [kg/m ²]	$m_{s,before}$ [g]	m_{s+f} [g]	m_f [g]	$m_{s,n}$ [g]	S_n [kg/m ²]
Nullbeton	1	150,0	151,5	22725,0	0,0	3,9	3,6	0,3	0,013	0,3	3,9	3,9	0,3	0,013
	2	150,5	150,0	22575,0	0,0	4,1	3,9	0,2	0,009	0,2	3,8	3,6	0,4	0,018
	3	150,5	150,0	22575,0	0,0	4,1	3,7	0,4	0,018	0,4	3,9	3,8	0,5	0,022
	4	150,5	149,0	22424,5	0,0	4,0	3,9	0,1	0,004	0,1	3,6	3,6	0,1	0,004
	5	150,0	145,0	21750,0	0,0	4,0	3,9	0,1	0,005	0,1	4,0	3,9	0,2	0,009
LP-Beton	1	150,0	150,5	22575,0	0,0	4,4	3,8	0,6	0,027	0,6	3,6	3,5	0,7	0,031
	2	149,8	150,3	22514,9	0,0	4,1	3,6	0,5	0,022	0,5	3,9	3,8	0,6	0,027
	3	150,0	149,5	22425,0	0,0	4,4	3,9	0,5	0,022	0,5	4,0	3,8	0,7	0,031
	4	150,0	148,5	22275,0	0,0	4,3	3,6	0,7	0,031	0,7	3,7	3,6	0,8	0,036
	5	150,0	150,3	22545,0	0,0	4,3	3,9	0,4	0,018	0,4	4,2	3,9	0,7	0,031
Beton mit Mikrohohlkugeln	1	150,8	150,4	22680,3	0,0	3,9	3,7	0,2	0,009	0,2	3,6	3,6	0,2	0,009
	2	150,5	149,7	22529,9	0,0	4,0	3,6	0,4	0,018	0,4	3,7	3,6	0,5	0,022
	3	152,7	150,5	22981,4	0,0	4,0	3,6	0,4	0,017	0,4	3,8	3,8	0,4	0,017
	4	151,0	149,8	22619,8	0,0	3,8	3,6	0,2	0,009	0,2	3,7	3,7	0,2	0,009
	5	151,1	149,8	22634,8	0,0	4,0	3,7	0,3	0,013	0,3	3,8	3,7	0,4	0,018
Beton mit Faserpartikeln	1	149,0	149,0	22201,0	0,0	4,4	4,0	0,4	0,018	0,4	3,7	3,8	0,3	0,014
	2	149,0	149,0	22201,0	0,0	4,2	4,1	0,1	0,005	0,1	4,0	4,0	0,1	0,005
	3	150,0	149,0	22350,0	0,0	4,3	4,0	0,3	0,013	0,3	3,9	4,1	0,1	0,004
	4	149,0	150,0	22350,0	0,0	4,3	4,0	0,3	0,013	0,3	3,7	3,9	0,1	0,004
	5	149,0	152,0	22648,0	0,0	4,2	4,1	0,1	0,004	0,1	3,8	3,9	0,0	0,000

nach 28±1 FTW					nach 42±1 FTW					nach 56 FTW				
$m_{s,before}$ [g]	m_{s+f} [g]	m_f [g]	$m_{s,n}$ [g]	S_n [kg/m ²]	$m_{s,before}$ [g]	m_{s+f} [g]	m_f [g]	$m_{s,n}$ [g]	S_n [kg/m ²]	$m_{s,before}$ [g]	m_{s+f} [g]	m_f [g]	$m_{s,n}$ [g]	S_n [kg/m ²]
0,3	3,9	3,9	0,3	0,013	0,3	4,0	3,9	0,4	0,018	0,4	4,0	3,7	0,4	0,018
0,4	3,8	3,8	0,4	0,018	0,4	4,2	3,8	0,8	0,035	0,8	3,9	3,7	0,8	0,035
0,5	3,9	3,9	0,5	0,022	0,5	4,1	3,9	0,7	0,031	0,7	3,9	3,8	0,7	0,031
0,1	3,9	3,9	0,1	0,004	0,1	4,0	3,9	0,2	0,009	0,2	3,7	3,6	0,2	0,009
0,2	3,8	3,8	0,2	0,009	0,2	3,9	3,8	0,3	0,014	0,3	4,1	4,0	0,3	0,014
0,7	4,0	3,9	0,8	0,035	0,8	4,0	3,7	1,1	0,049	0,8	3,7	3,6	1,1	0,049
0,6	3,7	3,5	0,8	0,036	0,8	3,7	3,5	1,0	0,044	0,8	3,7	3,6	1,0	0,044
0,7	4,1	3,9	0,9	0,040	0,9	4,0	3,8	1,1	0,049	0,9	4,1	3,9	1,1	0,049
0,8	4,0	3,7	1,1	0,049	1,1	4,3	3,8	1,6	0,072	1,1	4,1	3,8	1,6	0,072
0,7	3,9	3,6	1,0	0,044	1,0	4,2	3,8	1,4	0,062	1,0	3,9	3,8	1,4	0,062
0,2	4,1	3,7	0,6	0,026	0,6	4,1	3,7	1,0	0,044	0,6	4,1	3,6	1,0	0,044
0,5	4,0	3,6	0,9	0,040	0,9	3,9	3,5	1,3	0,058	0,9	4,2	3,7	1,3	0,058
0,4	4,0	3,7	0,7	0,030	0,7	4,0	3,7	1,0	0,044	0,7	4,1	3,6	1,0	0,044
0,2	4,2	3,8	0,6	0,027	0,6	3,9	3,5	1,0	0,044	0,6	4,1	3,7	1,0	0,044
0,4	4,5	4,0	0,9	0,040	0,9	3,8	3,6	1,1	0,049	0,9	4,0	3,8	1,1	0,049
0,3	4,4	3,9	0,8	0,036	0,8	4,0	3,6	1,2	0,054	0,8	4,2	3,6	1,2	0,054
0,1	4,1	3,6	0,6	0,027	0,6	4,2	3,8	1,0	0,045	0,6	4,0	3,5	1,0	0,045
0,1	4,2	3,6	0,7	0,031	0,7	4,1	3,8	1,0	0,045	0,7	4,3	3,9	1,0	0,045
0,1	4,1	3,6	0,6	0,027	0,6	4,1	3,7	1,0	0,045	0,6	4,4	3,9	1,0	0,045
0,0	4,1	3,7	0,4	0,018	0,4	4,1	3,6	0,9	0,040	0,4	4,5	4,0	0,9	0,040

i) CIF-Prüfung: Berechnung der flächenbezogenen Gesamtmenge S_n an abgewittertem Material nach n Frost-Tau-Wechseln

Betonserie	S_n [kg/m ²] nach ...	7±1 FTW	14±1 FTW	28±1 FTW	42±1 FTW	56 FTW
Nullbeton	tatsächliche Anzahl FTW	7	13	26	43	56
	Mittelwert	0,010	0,013	0,013	0,021	0,023
	Standardabweichung	0,006	0,007	0,007	0,011	0,011
	95%-Quantil	0,022	0,028	0,028	0,046	0,047
LP-Beton	tatsächliche Anzahl FTW	7	13	26	43	56
	Mittelwert	0,024	0,031	0,041	0,055	0,055
	Standardabweichung	0,005	0,003	0,006	0,011	0,011
	95%-Quantil	0,035	0,038	0,054	0,080	0,080
Beton mit Mikrohohlkugeln	tatsächliche Anzahl FTW	7	13	27	41	56
	Mittelwert	0,013	0,015	0,033	0,048	0,047
	Standardabweichung	0,004	0,006	0,007	0,006	0,006
	95%-Quantil	0,023	0,028	0,047	0,060	0,060
Beton mit Faserpartikeln	tatsächliche Anzahl FTW	7	13	27	41	56
	Mittelwert	0,011	0,005	0,028	0,046	0,046
	Standardabweichung	0,006	0,005	0,007	0,005	0,005
	95%-Quantil	0,024	0,016	0,042	0,057	0,057

CIF-Prüfung
Mittelwerte und Standardabweichungen der flächenbezogenen Gesamtmenge S_n an abgewittertem Material nach n Frost-Tau-Wechseln



Anhang 7.2: Messwerte und Rechenergebnisse der CDF-Prüfung

a) CDF-Prüfung: Messwerte der kapillaren Wasseraufnahme während der 7-tägigen erneuten Sättigung

$$w_{\text{Tag } n} = \frac{m_{\text{Tag } n} - m_{\text{Tag } 0}}{m_{\text{Tag } 0}} \cdot 100 \text{ [Gew.-%]}$$

$w_{\text{Tag } n}$ kapillare Wasseraufnahme am Tag n des erneuten Sättigung [Gew.-%]

$m_{\text{Tag } n}$ Masse des Probekörpers am Tag n der erneuten Sättigung [kg]

$m_{\text{Tag } 0}$ Masse des Probekörpers vor der erneuten Sättigung [kg]

Betonserie	Nr.	$m_{\text{Tag } 0}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 1}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 2}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 3}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 4}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 5}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 6}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 7}$ [kg]
Nullbeton	1	3,810	3,812	3,813	3,814	3,814	3,814	3,812	3,814
	2	3,883	3,885	3,887	3,888	3,888	3,888	3,890	3,889
	3	3,860	3,865	3,865	3,866	3,867	3,867	3,868	3,868
	4	3,736	3,739	3,740	3,740	3,740	3,741	3,741	3,742
	5	3,794	3,798	3,798	3,799	3,800	3,799	3,799	3,801
Mittelwert		3,817	3,820	3,821	3,821	3,822	3,822	3,822	3,823
Standardabweichung		0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,058	0,059	0,058

Betonserie	Nr.	$m_{\text{Tag } 0}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 1}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 2}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 3}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 4}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 5}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 6}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 7}$ [kg]
LP-Beton	1	3,535	3,539	3,539	3,539	3,540	3,540	3,539	3,541
	2	3,636	3,640	3,640	3,641	3,640	3,641	3,642	3,643
	3	3,559	3,566	3,566	3,567	3,568	3,568	3,568	3,569
	4	3,527	3,530	3,531	3,531	3,532	3,532	3,533	3,534
	5	3,520	3,523	3,523	3,524	3,525	3,526	3,526	3,527
Mittelwert		3,555	3,560	3,560	3,560	3,561	3,561	3,562	3,563
Standardabweichung		0,047	0,048	0,048	0,048	0,047	0,047	0,048	0,048

Betonserie	Nr.	$m_{\text{Tag } 0}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 1}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 2}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 3}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 4}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 5}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 6}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 7}$ [kg]
Beton mit Mikrohohlkugeln	1	3,882	3,898	3,901	3,903	3,904	3,905	3,907	3,907
	2	3,673	3,690	3,693	3,695	3,696	3,697	3,698	3,699
	3	3,804	3,821	3,824	3,827	3,828	3,829	3,830	3,831
	4	3,878	3,891	3,898	3,901	3,901	3,901	3,902	3,903
	5	3,698	3,715	3,717	3,719	3,720	3,722	3,723	3,723
Mittelwert		3,787	3,803	3,807	3,809	3,810	3,811	3,812	3,813
Standardabweichung		0,098	0,097	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098	0,098

Betonserie	Nr.	$m_{\text{Tag } 0}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 1}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 2}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 3}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 4}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 5}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 6}$ [kg]	$m_{\text{Tag } 7}$ [kg]
Beton mit Faserpartikeln	1	3,858	3,876	3,879	3,881	3,882	3,883	3,883	3,885
	2	3,942	3,961	3,965	3,966	3,967	3,969	3,970	3,972
	3	3,968	3,985	3,987	3,989	3,990	3,992	3,993	3,994
	4	3,834	3,844	3,854	3,856	3,857	3,859	3,859	3,860
	5	3,849	3,867	3,870	3,872	3,874	3,875	3,876	3,877
Mittelwert		3,890	3,907	3,911	3,913	3,914	3,916	3,916	3,918
Standardabweichung		0,060	0,062	0,061	0,060	0,060	0,060	0,061	0,061

b) CDF-Prüfung: Berechnung der kapillaren Wasseraufnahme während der 7-tägigen erneuten Sättigung

Betonserie	Nr.	$w_{\text{Tag } 0}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 1}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 2}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 3}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 4}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 5}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 6}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 7}$ [Gew.-%]
Nullbeton	1	0,00	0,05	0,08	0,10	0,10	0,10	0,05	0,10
	2	0,00	0,05	0,10	0,13	0,13	0,13	0,18	0,15
	3	0,00	0,13	0,13	0,16	0,18	0,18	0,21	0,21
	4	0,00	0,08	0,11	0,11	0,11	0,13	0,13	0,16
	5	0,00	0,11	0,11	0,13	0,16	0,13	0,13	0,18
Mittelwert		0,00	0,08	0,10	0,13	0,14	0,14	0,14	0,16
Standardabweichung		0,00	0,03	0,02	0,02	0,03	0,03	0,06	0,04

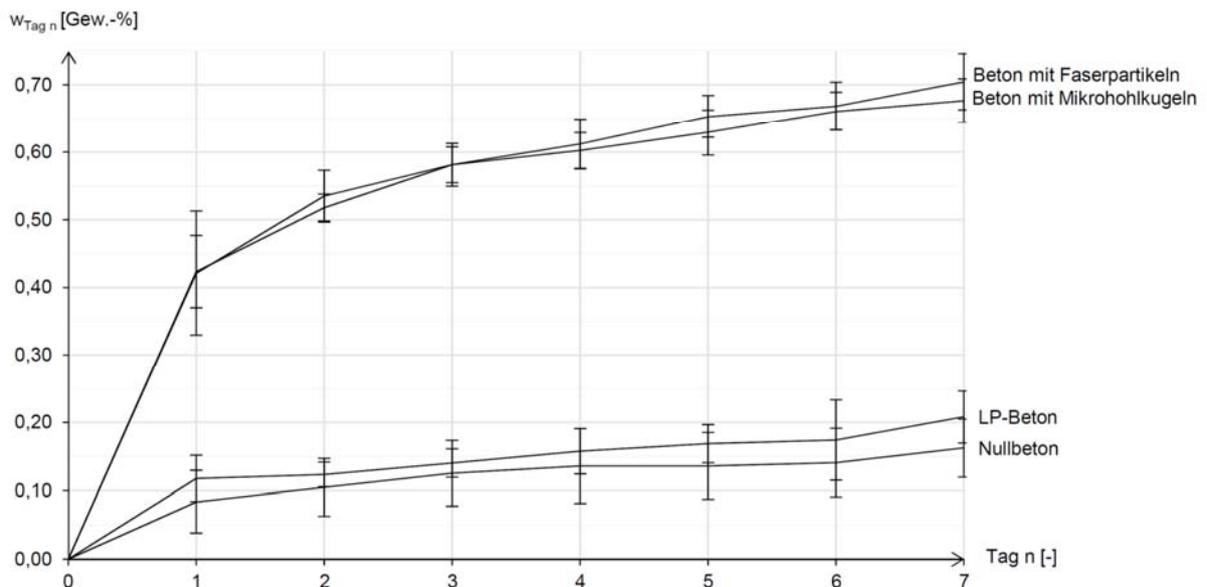
Betonserie	Nr.	$w_{\text{Tag } 0}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 1}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 2}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 3}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 4}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 5}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 6}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 7}$ [Gew.-%]
LP-Beton	1	0,00	0,11	0,11	0,11	0,14	0,14	0,11	0,17
	2	0,00	0,11	0,11	0,14	0,11	0,14	0,17	0,19
	3	0,00	0,20	0,20	0,22	0,25	0,25	0,25	0,28
	4	0,00	0,09	0,11	0,11	0,14	0,14	0,17	0,20
	5	0,00	0,09	0,09	0,11	0,14	0,17	0,17	0,20
Mittelwert		0,00	0,12	0,12	0,14	0,16	0,17	0,17	0,21
Standardabweichung		0,00	0,05	0,04	0,05	0,05	0,05	0,05	0,04

Betonserie	Nr.	$w_{\text{Tag } 0}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 1}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 2}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 3}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 4}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 5}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 6}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 7}$ [Gew.-%]
Beton mit Mikrohohlkugeln	1	0,00	0,41	0,49	0,54	0,57	0,59	0,64	0,64
	2	0,00	0,46	0,54	0,60	0,63	0,65	0,68	0,71
	3	0,00	0,45	0,53	0,60	0,63	0,66	0,68	0,71
	4	0,00	0,34	0,52	0,59	0,59	0,59	0,62	0,64
	5	0,00	0,46	0,51	0,57	0,57	0,59	0,65	0,68
Mittelwert		0,00	0,42	0,52	0,58	0,60	0,63	0,66	0,68
Standardabweichung		0,00	0,05	0,02	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

Betonserie	Nr.	$w_{\text{Tag } 0}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 1}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 2}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 3}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 4}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 5}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 6}$ [Gew.-%]	$w_{\text{Tag } 7}$ [Gew.-%]
Beton mit Faserpartikeln	1	0,00	0,47	0,54	0,60	0,62	0,65	0,65	0,70
	2	0,00	0,48	0,58	0,61	0,63	0,68	0,71	0,76
	3	0,00	0,43	0,48	0,53	0,55	0,60	0,63	0,66
	4	0,00	0,26	0,52	0,57	0,60	0,65	0,65	0,68
	5	0,00	0,47	0,55	0,60	0,65	0,68	0,70	0,73
Mittelwert		0,00	0,42	0,53	0,58	0,61	0,65	0,67	0,70
Standardabweichung		0,00	0,09	0,04	0,03	0,04	0,03	0,04	0,04

CDF-Prüfung

Mittelwerte und Standardabweichungen der Wasseraufnahme $w_{\text{Tag } n}$ während der 7-tägigen erneuten Sättigung



c) CDF-Prüfung: Messwerte der Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung

Hinweis: Die Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung wird bei der CDF-Prüfung nach DIN CEN/TS 12390-9 eigentlich nicht bestimmt. Die zugehörigen Formeln wurden von der CIF-Prüfung nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 übernommen. Als Startwerte für die Wasseraufnahme bei 0 FTW wurde die Wasseraufnahme $w_{Tag\ n}$ nach der 7-tägigen erneuten Sättigung verwendet.

Zugrundeliegende Formeln:

$$\mu_S = \mu_b - \mu_f \text{ [g]}$$

μ_S Masse des getrockneten abgewitterten Materials [g]

μ_b Masse des Filters mit dem getrockneten abgewitterten Material [g]

μ_f Masse des leeren, getrockneten Filters [g]

$$w_n = \frac{m_{S,n} - m_{S,1} + \mu_{S,n}}{m_{S,0}} \cdot 100 \text{ [Gew.-%]}$$

w_n Wasseraufnahme nach n Frost-Tau-Wechseln [Gew.-%]

$m_{S,n}$ Masse des Probekörpers nach n Frost-Tau-Wechseln [g]

$m_{S,1}$ Masse des Probekörpers und des Abdichtungsmaterials vor der erneuten Sättigung [g]

$m_{S,0}$ Masse des Probekörpers ohne das Abdichtungsmaterials vor der erneuten Sättigung [g]

$\mu_{S,n}$ Gesamtmasse des getrockneten abgewitterten Materials nach n Frost-Tau-Wechseln [g]

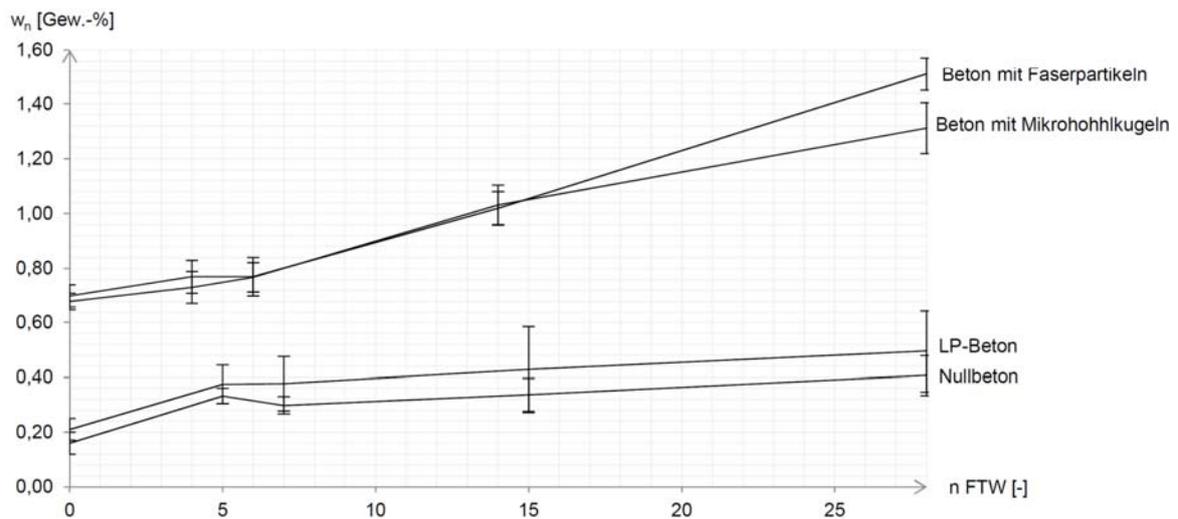
Betonserie	Nr.	nach 4±1 FTW							nach 7±1 FTW						
		$m_{S,0}$ [kg]	$m_{S,1}$ [kg]	$m_{S,n}$ [kg]	μ_f [g]	μ_b [g]	μ_S [g]	w_n [Gew.-%]	$m_{S,n}$ [kg]	μ_f [g]	μ_b [g]	μ_S [g]	$\mu_{S,n}$ [g]	w_n [Gew.-%]	
Nullbeton	1	3,742	3,807	3,809	3,9	13,5	9,6	0,31	3,803	3,9	9,1	5,2	14,8	0,29	
	2	3,812	3,880	3,885	3,9	12,8	8,9	0,36	3,878	4,0	9,2	5,2	14,1	0,32	
	3	3,790	3,859	3,865	3,9	11,1	7,2	0,35	3,860	3,9	8,5	4,6	11,8	0,34	
	4	3,666	3,733	3,735	3,9	12,8	8,9	0,30	3,729	4,0	8,4	4,4	13,3	0,25	
	5	3,724	3,793	3,796	3,9	13,6	9,7	0,34	3,789	3,8	9,0	5,2	14,9	0,29	
LP-Beton	1	3,467	3,536	3,545	3,9	6,6	2,7	0,34	3,543	3,9	5,4	1,5	4,2	0,32	
	2	3,567	3,637	3,645	3,9	7,1	3,2	0,31	3,642	4,0	5,7	1,7	4,9	0,28	
	3	3,492	3,558	3,574	4,0	5,2	1,2	0,49	3,574	3,9	4,3	0,4	1,6	0,50	
	4	3,455	3,525	3,536	4,0	6,0	2,0	0,38	3,536	3,9	4,7	0,8	2,8	0,40	
	5	3,451	3,519	3,529	3,9	6,1	2,2	0,35	3,529	4,0	4,9	0,9	3,1	0,38	
Beton mit Mikrohohlkugeln	1	3,819	3,883	3,910	1,6	2,8	1,2	0,74	3,911	1,6	2,5	0,9	2,1	0,79	
	2	3,610	3,676	3,703	1,7	2,3	0,6	0,76	3,703	1,7	2,1	0,4	1,0	0,78	
	3	3,742	3,811	3,835	1,6	2,5	0,9	0,67	3,836	1,7	2,2	0,5	1,4	0,71	
	4	3,821	3,881	3,906	1,7	2,7	1,0	0,68	3,907	1,6	2,4	0,8	1,8	0,73	
	5	3,636	3,699	3,727	1,6	2,9	1,3	0,81	3,728	1,7	2,0	0,3	1,6	0,84	
Beton mit Faserpartikeln	1	3,799	3,861	3,882	1,6	7,3	5,7	0,70	3,874	1,6	9,3	7,7	13,4	0,69	
	2	3,881	3,944	3,965	1,6	10,2	8,6	0,76	3,956	1,6	10,1	8,5	17,1	0,75	
	3	3,902	3,969	3,989	1,7	9,8	8,1	0,72	3,98	1,6	10,4	8,8	16,9	0,72	
	4	3,772	3,834	3,861	1,6	6,4	4,8	0,84	3,853	1,7	9,9	8,2	13,0	0,85	
	5	3,788	3,851	3,872	1,6	10,8	9,2	0,80	3,864	1,6	10,9	9,3	18,5	0,83	

nach 14±1 FTW							nach 28 FTW						
$m_{S,n}$ [kg]	μ_f [g]	μ_b [g]	μ_S [g]	$\mu_{S,n}$ [g]	w_n [Gew.-%]	$m_{S,n}$ [kg]	μ_f [g]	μ_b [g]	μ_S [g]	$\mu_{S,n}$ [g]	w_n [Gew.-%]		
3,783	3,9	22,1	18,2	33,0	0,24	3,764	3,6	26,6	23,0	56,0	0,35		
3,860	3,9	23,2	19,3	33,4	0,35	3,838	3,7	25,8	22,1	55,5	0,35		
3,844	3,9	21,4	17,5	29,3	0,38	3,827	3,6	25,8	22,2	51,5	0,51		
3,719	3,9	19,0	15,1	28,4	0,39	3,700	3,8	24,8	21,0	49,4	0,45		
3,773	3,9	20,9	17,0	31,9	0,32	3,753	3,7	25,5	21,8	53,7	0,37		
3,539	3,9	9,3	5,4	9,6	0,36	3,530	3,6	14,6	11,0	20,6	0,42		
3,636	3,9	7,4	3,5	8,4	0,21	3,627	3,7	16,1	12,4	20,8	0,30		
3,576	3,9	5,1	1,2	2,8	0,60	3,577	3,6	5,8	2,2	5,0	0,69		
3,535	3,9	10,4	6,5	9,3	0,56	3,528	3,7	11,9	8,2	17,5	0,59		
3,526	3,9	8,1	4,2	7,3	0,41	3,520	3,8	11,8	8,0	15,3	0,47		
3,915	3,8	8,2	4,4	6,5	1,01	3,921	3,8	11,6	7,8	14,3	1,37		
3,711	3,9	6,6	2,7	3,7	1,07	3,715	3,9	9,8	5,9	9,6	1,35		
3,844	3,9	6,4	2,5	3,9	0,99	3,849	4,1	9,8	5,7	9,6	1,27		
3,912	3,8	7,4	3,6	5,4	0,95	3,913	3,9	11,2	7,3	12,7	1,17		
3,734	3,9	8,6	4,7	6,3	1,14	3,735	3,9	12,5	8,6	14,9	1,40		
3,855	3,9	33,0	29,1	42,5	0,96	3,839	4,1	39,1	35,0	77,5	1,46		
3,939	3,9	31,2	27,3	44,4	1,02	3,921	3,7	39,0	35,3	79,7	1,46		
3,964	3,8	30,8	27,0	43,9	1,00	3,951	3,9	36,5	32,6	76,5	1,50		
3,834	4,0	33,3	29,3	42,3	1,12	3,818	4,0	38,2	34,2	76,5	1,60		
3,843	4,0	32,4	28,4	46,9	1,03	3,827	4,1	38,4	34,3	81,2	1,51		

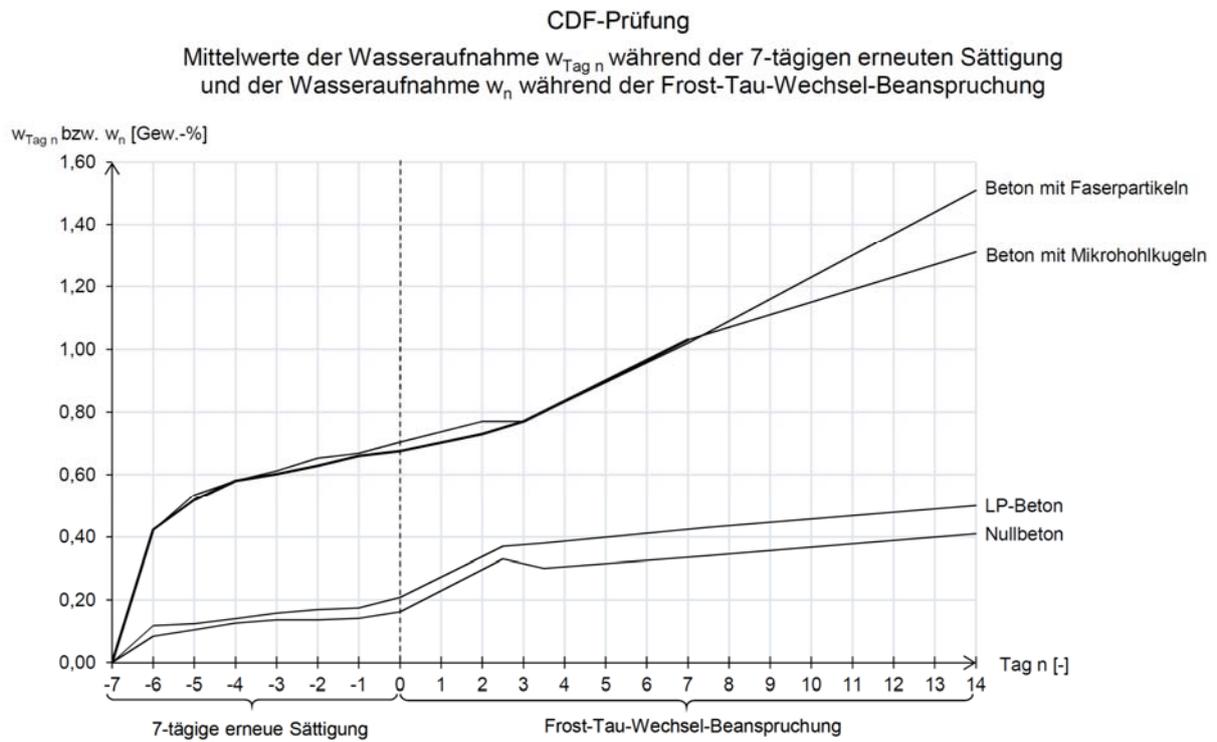
d) CDF-Prüfung: Berechnung der Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung

Betonserie	w_n [Gew.-%] nach ...	7 d Saugen	4±1 FTW	7±1 FTW	14±1 FTW	28 FTW
Nullbeton	tatsächliche Anzahl FTW	0	5	7	15	28
	Mittelwert	0,16	0,33	0,30	0,34	0,41
	Standardabweichung	0,04	0,03	0,03	0,06	0,07
LP-Beton	tatsächliche Anzahl FTW	0	5	7	15	28
	Mittelwert	0,21	0,37	0,38	0,43	0,50
	Standardabweichung	0,04	0,07	0,10	0,16	0,15
Beton mit Mikrohohlkugeln	tatsächliche Anzahl FTW	0	4	6	14	28
	Mittelwert	0,68	0,73	0,77	1,03	1,31
	Standardabweichung	0,03	0,06	0,05	0,07	0,09
Beton mit Faserpartikeln	tatsächliche Anzahl FTW	0	4	6	14	28
	Mittelwert	0,70	0,77	0,77	1,02	1,51
	Standardabweichung	0,04	0,06	0,07	0,06	0,06

CDF-Prüfung
Mittelwerte und Standardabweichungen der Wasseraufnahme w_n während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung



e) CDF-Prüfung: Zusammenfassung der Wasseraufnahme während der 7-tägigen erneuten Sättigung und während der Frost-Tau-Wechsel-Beanspruchung



f) CDF-Prüfung: Messwerte der flächenbezogenen Gesamtmenge S_n an abgewittertem Material nach n Frost-Tau-Wechseln

Zugrundeliegende Formeln:

$$m_{s,n} = m_{s,before} + (m_{s+f} - m_f) \text{ [g]}$$

- $m_{s,n}$ Gesamtmasse des getr. abgewitterten Materials nach n Frost-Tauwechseln [g]
 $m_{s,before}$ Gesamtmasse des getr. abgewitterten Materials bei der vorherigen Messung [g]
 m_{s+f} Masse des getrocknetes Filters mit dem abgewitterten Material [g]
 m_f Masse des trockenen Filters [g]

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \cdot 10^3 \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

- S_n Masse des getrockneten abgewitterten Materials bezogen auf die Prüffläche nach dem n-ten Frost-Tau-Wechsel [kg/m²]
 $m_{s,n}$ Gesamtmasse des getrockneten abgewitterten Materials nach n Frost-Tauwechseln [g]
A Prüffläche [mm²]

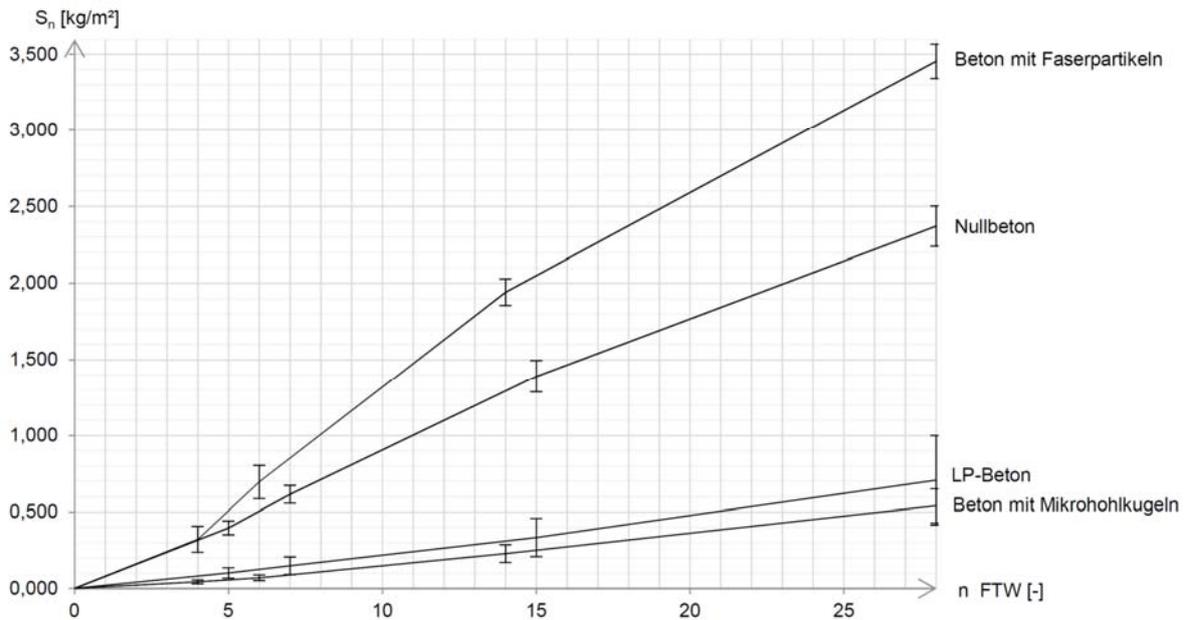
Betonserie	Nr.	l [mm]	b [mm]	A [mm ²]	nach 4±1 FTW					nach 7±1 FTW				
					$m_{s,before}$ [g]	m_{s+f} [g]	m_f [g]	$m_{s,n}$ [g]	S_n [kg/m ²]	$m_{s,before}$ [g]	m_{s+f} [g]	m_f [g]	$m_{s,n}$ [g]	S_n [kg/m ²]
Nullbeton	1	150,0	149,0	22350,0	0,0	13,5	3,9	9,6	0,430	9,6	9,1	3,9	14,8	0,662
	2	150,0	149,0	22350,0	0,0	12,8	3,9	8,9	0,398	8,9	9,2	4,0	14,1	0,631
	3	150,0	150,0	22500,0	0,0	11,1	3,9	7,2	0,320	7,2	8,5	3,9	11,8	0,524
	4	150,0	150,0	22500,0	0,0	12,8	3,9	8,9	0,396	8,9	8,4	4,0	13,3	0,591
	5	150,0	150,0	22500,0	0,0	13,6	3,9	9,7	0,431	9,7	9,0	3,8	14,9	0,662
LP-Beton	1	150,0	149,0	22350,0	0,0	6,6	3,9	2,7	0,121	2,7	5,4	3,9	4,2	0,188
	2	150,0	148,0	22200,0	0,0	7,1	3,9	3,2	0,144	3,2	5,7	4,0	4,9	0,221
	3	150,0	150,0	22500,0	0,0	5,2	4,0	1,2	0,053	1,2	4,3	3,9	1,6	0,071
	4	150,0	150,0	22500,0	0,0	6,0	4,0	2,0	0,089	2,0	4,7	3,9	2,8	0,124
	5	150,0	150,0	22500,0	0,0	6,1	3,9	2,2	0,098	2,2	4,9	4,0	3,1	0,138
Beton mit Mikrohohlkugeln	1	150,6	150,5	22665,3	0,0	2,8	1,6	1,2	0,053	1,2	2,5	1,6	2,1	0,093
	2	151,5	150,3	22770,5	0,0	2,3	1,7	0,6	0,026	0,6	2,1	1,7	1,0	0,044
	3	150,0	150,4	22560,0	0,0	2,5	1,6	0,9	0,040	0,9	2,2	1,7	1,4	0,062
	4	151,4	150,4	22770,6	0,0	2,7	1,7	1,0	0,044	1,0	2,4	1,6	1,8	0,079
	5	150,5	150,3	22620,2	0,0	2,9	1,6	1,3	0,057	1,3	2,0	1,7	1,6	0,071
Beton mit Faserpartikeln	1	150,6	149,7	22544,8	0,0	7,3	1,6	5,7	0,253	5,7	9,3	1,6	13,4	0,594
	2	149,8	149,7	22425,1	0,0	10,2	1,6	8,6	0,383	8,6	10,1	1,6	17,1	0,763
	3	152,3	150,4	22905,9	0,0	9,8	1,7	8,1	0,354	8,1	10,4	1,6	16,9	0,738
	4	151,5	150,5	22800,8	0,0	6,4	1,6	4,8	0,211	4,8	9,9	1,7	13,0	0,570
	5	150,6	150,3	22635,2	0,0	10,8	1,6	9,2	0,406	9,2	10,9	1,6	18,5	0,817

Betonserie	Nr.	nach 14±1 FTW					nach 28 FTW				
		$m_{s,before}$ [g]	m_{s+f} [g]	m_f [g]	$m_{s,n}$ [g]	S_n [kg/m ²]	$m_{s,before}$ [g]	m_{s+f} [g]	m_f [g]	$m_{s,n}$ [g]	S_n [kg/m ²]
Nullbeton	1	14,8	22,1	3,9	33,0	1,477	33,0	26,6	3,6	56,0	2,506
	2	14,1	23,2	3,9	33,4	1,494	33,4	25,8	3,7	55,5	2,483
	3	11,8	21,4	3,9	29,3	1,302	29,3	25,8	3,6	51,5	2,289
	4	13,3	19,0	3,9	28,4	1,262	28,4	24,8	3,8	49,4	2,196
	5	14,9	20,9	3,9	31,9	1,418	31,9	25,5	3,7	53,7	2,387
LP-Beton	1	4,2	9,3	3,9	9,6	0,430	9,6	14,6	3,6	20,6	0,922
	2	4,9	7,4	3,9	8,4	0,378	8,4	16,1	3,7	20,8	0,937
	3	1,6	5,1	3,9	2,8	0,124	2,8	5,8	3,6	5,0	0,222
	4	2,8	10,4	3,9	9,3	0,413	9,3	11,9	3,7	17,5	0,778
	5	3,1	8,1	3,9	7,3	0,324	7,3	11,8	3,8	15,3	0,680
Beton mit Mikrohohlkugeln	1	2,1	8,2	3,8	6,5	0,287	6,5	11,6	3,8	14,3	0,631
	2	1,0	6,6	3,9	3,7	0,162	3,7	9,8	3,9	9,6	0,422
	3	1,4	6,4	3,9	3,9	0,173	3,9	9,8	4,1	9,6	0,426
	4	1,8	7,4	3,8	5,4	0,237	5,4	11,2	3,9	12,7	0,558
	5	1,6	8,6	3,9	6,3	0,279	6,3	12,5	3,9	14,9	0,659
Beton mit Faserpartikeln	1	13,4	33,0	3,9	42,5	1,885	42,5	39,1	4,1	77,5	3,438
	2	17,1	31,2	3,9	44,4	1,980	44,4	39,0	3,7	79,7	3,554
	3	16,9	30,8	3,8	43,9	1,917	43,9	36,5	3,9	76,5	3,340
	4	13,0	33,3	4,0	42,3	1,855	42,3	38,2	4,0	76,5	3,355
	5	18,5	32,4	4,0	46,9	2,072	46,9	38,4	4,1	81,2	3,587

g) CDF-Prüfung: Berechnung der flächenbezogenen Gesamtmenge S_n an abgewittertem Material nach n Frost-Tau-Wechseln

Betonserie	S_n [kg/m ²] nach ...	4±1 FTW	7±1 FTW	14±1 FTW	28 FTW
Nullbeton	tatsächliche Anzahl FTW	5	7	15	28
	Mittelwert	0,395	0,614	1,391	2,372
	Standardabweichung	0,045	0,058	0,104	0,131
	95%-Quantil	0,491	0,738	1,612	2,651
LP-Beton	tatsächliche Anzahl FTW	5	7	15	28
	Mittelwert	0,101	0,148	0,334	0,708
	Standardabweichung	0,034	0,058	0,124	0,291
	95%-Quantil	0,174	0,272	0,598	1,329
Beton mit Mikrohohlkugeln	tatsächliche Anzahl FTW	4	6	14	28
	Mittelwert	0,044	0,070	0,228	0,539
	Standardabweichung	0,012	0,018	0,058	0,112
	95%-Quantil	0,070	0,109	0,351	0,777
Beton mit Faserpartikeln	tatsächliche Anzahl FTW	4	6	14	28
	Mittelwert	0,321	0,696	1,942	3,455
	Standardabweichung	0,085	0,108	0,086	0,113
	95%-Quantil	0,503	0,928	2,126	3,695

CDF-Prüfung
Mittelwerte und Standardabweichungen der flächenbezogenen Gesamtmenge S_n an abgewittertem Material nach n Frost-Tau-Wechseln



h) CDF-Prüfung: Berechnung des relativen dynamischen Elastizitätsmoduls nach n Frost-Tau-Wechseln

Hinweis: Der relativen dynamischen E-Modul wird in der CDF-Prüfung nach DIN CEN/TS 12390-9 eigentlich nicht bestimmt. Die zugehörigen Formeln wurden von der CIF-Prüfung nach DIN-Fachbericht CEN/TR 15177 übernommen.

Zugrundeliegende Formel:

$$RDM_{UPPT-n} = \frac{l_{t,n}}{l_{t,0}} \cdot \left(\frac{t_{t,0} \cdot l_{t,0} - t_{cm,0} \cdot l_{t,0} + t_{cm,0} \cdot l_s}{t_{t,n} \cdot l_{t,n} - t_{cm,n} \cdot l_{t,n} + t_{cm,n} \cdot l_s} \right)^2 \cdot 100 [\%]$$

RDM_{UPPT} relativer dynamischer Elastizitätsmodul [%]

t_t Gesamtübertragungszeit (durch Probekörper und Kopplungsmittel) [μ s]

t_{cm} Übertragungszeit im Behälter durch das Kopplungsmittel ohne Probekörper [μ s]

l_t Abstand der Messwertgeber untereinander [mm]

l_s Länge des Probekörpers vor dem Versiegeln der seitlichen Flächen [mm]

Index n Ergebnis nach n Frost-Tau-Wechseln

Index 0 Ausgangswert nach der kapillaren Wasseraufnahme

Unabhängig vom Probekörper gilt:

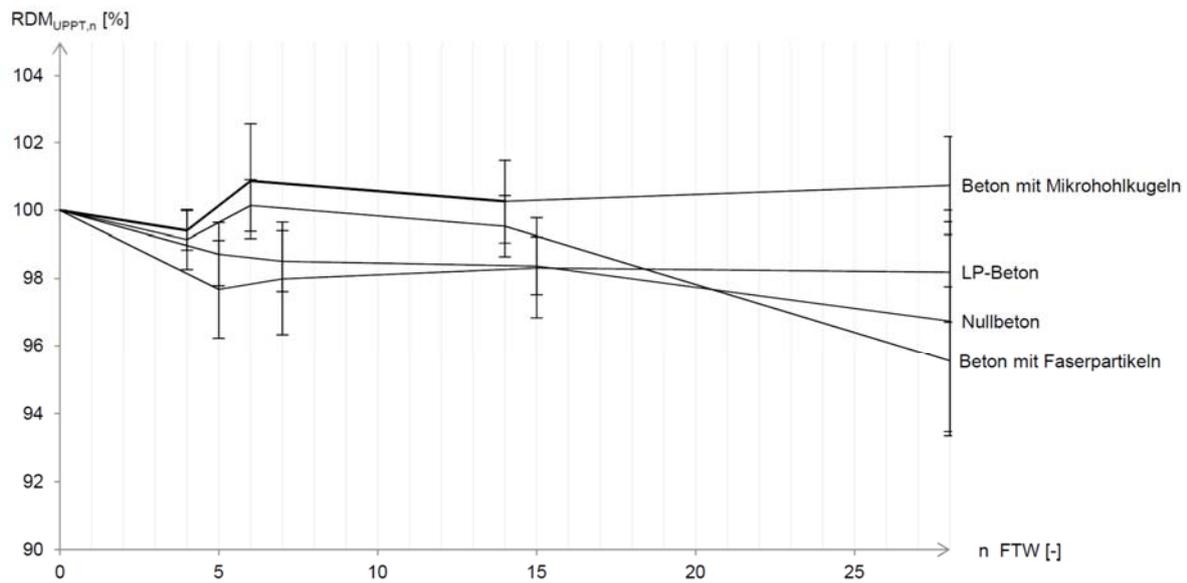
l_s [mm]	l_t [mm]	$t_{cm,0}$ [μ s]	$t_{cm,n}$ [μ s]
162	162	104,5	104,5

Betonserie	Nr.	Richtung	l_s [mm]	0 FTW		4±1 FTW		7±1 FTW		14±1 FTW		28 FTW		4±1 FTW		7±1 FTW		14±1 FTW		28 FTW			
				$t_{t,0}$ [μ s]	$t_{t,n}$ [μ s]	$t_{t,0}$ [μ s]	$t_{t,n}$ [μ s]	$t_{t,0}$ [μ s]	$t_{t,n}$ [μ s]	$t_{t,0}$ [μ s]	$t_{t,n}$ [μ s]	$t_{t,0}$ [μ s]	$t_{t,n}$ [μ s]	$t_{t,0}$ [μ s]	$t_{t,n}$ [μ s]	$t_{t,0}$ [μ s]	$t_{t,n}$ [μ s]	$t_{t,0}$ [μ s]	$t_{t,n}$ [μ s]	$t_{t,0}$ [μ s]	$t_{t,n}$ [μ s]	$t_{t,0}$ [μ s]	$t_{t,n}$ [μ s]
Nullbeton	1	längs	149,0	37,7	37,7	37,7	38,1	38,1	100	100	97	97											
		quer	150,0	36,4	36,7	36,7	36,7	36,8	98	98	98	97											
	2	längs	149,0	36,9	37,2	37,3	37,2	37,2	98	97	98	98											
		quer	150,0	36,9	37,2	37,2	37,2	37,2	98	98	98	98											
	3	längs	150,0	37,2	37,3	37,3	37,3	39,2	99	99	99	88											
		quer	150,0	36,5	36,6	36,7	36,6	36,7	99	99	99	99											
	4	längs	150,0	37,1	37,3	37,3	37,2	37,2	99	99	99	99											
		quer	150,0	36,8	37,2	37,2	37,2	37,3	97	97	97	97											
	5	längs	150,0	37,0	37,2	37,2	37,1	37,4	99	99	99	97											
		quer	150,0	36,2	36,2	36,3	36,5	36,6	100	99	98	97											
	LP-Beton	1	längs	149,0	39,2	40,0	40,0	39,9	39,7	95	95	96	97										
			quer	150,0	38,9	39,3	39,3	39,1	39,0	97	97	99	99										
2		längs	148,0	39,6	40,2	40,0	39,8	39,7	96	97	99	99											
		quer	150,0	38,7	39,0	38,8	38,6	38,6	98	99	101	101											
3		längs	150,0	38,6	38,7	38,6	38,8	38,8	99	100	99	99											
		quer	150,0	38,7	39,1	39,1	39,0	39,2	97	97	98	97											
4		längs	150,0	39,1	39,2	39,2	39,2	39,2	99	99	99	99											
		quer	150,0	39,2	39,7	39,8	39,7	39,7	97	96	97	97											
5		längs	150,0	39,5	39,6	39,5	39,6	40,1	99	100	99	96											
		quer	150,0	39,2	39,6	39,6	39,7	39,6	98	98	97	98											
Beton mit Mikrohohlkugeln		1	längs	150,6	38,5	38,5	38,0	38,1	38,1	100	103	103	103										
			quer	150,5	36,8	36,8	37,2	37,0	37,0	100	97	99	99										
	2	länge	151,5	37,8	37,9	37,6	37,6	37,4	99	101	101	103											
		quer	150,3	37,2	37,2	37,4	37,4	37,2	100	99	99	100											
	3	längs	150,0	38,1	38,3	37,9	38,1	38,2	99	101	100	99											
		quer	150,4	37,4	37,5	37,2	37,2	37,3	99	101	101	101											
	4	längs	151,4	37,2	37,2	36,9	37,2	37,1	100	102	100	101											
		quer	150,4	37,7	37,9	37,5	37,7	37,3	99	101	100	103											
	5	längs	150,5	37,2	37,4	37,1	37,2	37,2	99	101	100	100											
		quer	150,3	37,7	37,8	37,5	37,7	37,7	99	101	100	100											
	Beton mit Faserpartikeln	1	längs	150,6	37,5	37,5	37,3	37,5	37,9	100	101	100	97										
			quer	149,7	36,7	36,7	36,7	36,8	38,0	100	100	99	92										
2		längs	149,8	37,4	37,6	37,6	37,7	38,1	99	99	98	95											
		quer	149,7	37,0	37,0	37,0	37,2	37,6	100	100	99	96											
3		längs	152,3	37,5	37,7	37,5	37,6	38,0	99	100	99	97											
		quer	150,4	37,2	37,2	37,1	37,2	37,7	100	101	100	97											
4		längs	151,5	37,2	37,3	37,1	37,3	38,5	99	101	99	92											
		quer	150,5	36,7	36,9	36,7	36,8	37,2	99	100	99	97											
5		längs	150,6	37,7	37,9	37,8	37,5	38,0	99	99	101	98											
		quer	150,3	37,2	37,6	37,1	37,2	38,0	97	101	100	95											

i) CDF-Prüfung: Mittelwerte und Standardabweichung des RDM in Abhängigkeit der Anzahl an Frost-Tauwechseln

Betonserie	RDM _{UPPT,n} [%] nach ...	4±1 FTW	7±1 FTW	14±1 FTW	28 FTW
Nullbeton	tatsächliche Anzahl FTW	5	7	15	28
	Mittelwert	99	99	98	97
	Standardabweichung	1	1	1	3
	95%-Quantil	97	97	97	90
LP-Beton	tatsächliche Anzahl FTW	5	7	15	28
	Mittelwert	98	98	98	98
	Standardabweichung	1	2	1	1
	95%-Quantil	95	94	95	95
Beton mit Mikrohohlkugeln	tatsächliche Anzahl FTW	4	6	14	28
	Mittelwert	99	101	100	101
	Standardabweichung	1	2	1	1
	95%-Quantil	98	97	98	98
Beton mit Faserpartikeln	tatsächliche Anzahl FTW	4	6	14	28
	Mittelwert	99	100	100	96
	Standardabweichung	1	1	1	2
	95%-Quantil	97	99	98	91

CDF-Prüfung
Mittelwerte und Standardabweichungen von RDM_{UPPT}
in Abhängigkeit der Anzahl an Frost-Tauwechseln



Anhang 7.3: Messwerte und Rechenergebnisse der Plattenprüfung

a) Plattenprüfung: Messwerte der flächenbezogenen Gesamtmenge S_n an abgewittertem Material nach n Frost-Tau-Wechseln

Zugrundeliegende Formeln:

$$m_{s,n} = m_{s,before} + (m_{v+s(+f)} - m_{v(+f)}) \text{ [g]}$$

- $m_{s,n}$ Gesamtmasse des getr. abgewitterten Materials nach n Frost-Tauwechseln [g]
- $m_{s,before}$ Gesamtmasse des getr. abgewitterten Materials bei der vorherigen Messung [g]
- $m_{v(+f)}$ Masse des getrockneten Filters [g]
- $m_{v+s(+f)}$ Masse des Behälters mit dem getrockneten abgewitterten Material (und des Filters) [g]

$$S_n = \frac{m_{s,n}}{A} \cdot 10^3 \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

- S_n Masse des getrockneten abgewitterten Materials bezogen auf die Prüffläche nach dem n-ten Frost-Tau-Wechsel [kg/m²]
- A Prüfoberfläche, aus Längenmessung vor dem Auftragen des Klebstoffstreifens ermittelt [mm²]

Betonserie	Nr.	l [mm]	b [mm]	A [mm ²]	nach 7±1 FTW					nach 14±1 FTW				
					$m_{s,before}$ [g]	$m_{v+s(+f)}$ [g]	$m_{v(+f)}$ [g]	$m_{s,n}$ [g]	S_n [kg/m ²]	$m_{s,before}$ [g]	$m_{v+s(+f)}$ [g]	$m_{v(+f)}$ [g]	$m_{s,n}$ [g]	S_n [kg/m ²]
Nullbeton	1	150,3	151,4	22755,4	0,0	24,0	3,9	20,1	0,883	20,1	22,5	3,6	39,0	1,714
	2	150,3	150,1	22560,0	0,0	23,5	4,0	19,5	0,864	19,5	24,9	3,6	40,8	1,809
	3	150,3	150,4	22605,1	0,0	24,6	4,0	20,6	0,911	20,6	22,6	3,7	39,5	1,747
	4	150,1	151,4	22725,1	0,0	27,2	4,0	23,2	1,021	23,2	24,2	3,6	43,8	1,927
LP-Beton	1	150,3	150,3	22590,1	0,0	4,2	3,6	0,6	0,027	0,6	3,7	3,6	0,7	0,031
	2	150,0	150,0	22500,0	0,0	5,5	3,9	1,6	0,071	1,6	4,0	3,6	2,0	0,089
	3	150,7	150,1	22620,1	0,0	4,6	4,0	0,6	0,027	0,6	3,9	3,6	0,9	0,040
	4	150,4	150,2	22590,1	0,0	4,5	3,9	0,6	0,027	0,6	3,8	3,6	0,8	0,035
Beton mit Mikroholzkugeln	1	149,9	150,8	22604,9	0,0	6,6	3,6	3,0	0,133	3,0	6,9	3,7	6,2	0,274
	2	149,6	150,7	22544,7	0,0	7,4	3,6	3,8	0,169	3,8	6,4	3,7	6,5	0,288
	3	149,6	151,1	22604,6	0,0	10,4	3,8	6,6	0,292	6,6	7,9	3,6	10,9	0,482
	4	149,6	150,2	22469,9	0,0	8,4	3,7	4,7	0,209	4,7	7,8	3,6	8,9	0,396
Beton mit Faserpartikeln	1	150,0	151,3	22695,0	0,0	17,8	3,9	13,9	0,612	13,9	17,7	3,7	27,9	1,229
	2	149,4	151,8	22678,9	0,0	17,1	3,7	13,4	0,591	13,4	14,6	3,6	24,4	1,076
	3	149,7	151,2	22634,6	0,0	14,6	3,5	11,1	0,490	11,1	12,7	3,6	20,2	0,892
	4	150,2	152,5	22905,5	0,0	14,9	4,0	10,9	0,476	10,9	14,5	3,6	21,8	0,952

nach 28±1 FTW					nach 42±1 FTW					nach 56 FTW				
$m_{s,before}$ [g]	$m_{v+s(+f)}$ [g]	$m_{v(+f)}$ [g]	$m_{s,n}$ [g]	S_n [kg/m ²]	$m_{s,before}$ [g]	$m_{v+s(+f)}$ [g]	$m_{v(+f)}$ [g]	$m_{s,n}$ [g]	S_n [kg/m ²]	$m_{s,before}$ [g]	$m_{v+s(+f)}$ [g]	$m_{v(+f)}$ [g]	$m_{s,n}$ [g]	S_n [kg/m ²]
39,0	33,8	4,0	68,8	3,023	68,8	54,5	3,9	119,4	5,247	119,4	66,6	1,7	184,3	8,099
40,8	33,3	3,6	70,5	3,125	70,5	42,4	3,8	109,1	4,836	109,1	68,9	1,7	176,3	7,815
39,5	29,9	3,9	65,5	2,898	65,5	36,8	3,6	98,7	4,366	98,7	50,7	1,6	147,8	6,538
43,8	32,1	3,9	72,0	3,168	72,0	61,1	3,6	129,5	5,699	129,5	35,3	1,6	163,2	7,181
0,7	3,8	3,6	0,9	0,040	0,9	3,6	3,5	1,0	0,044	1,0	1,7	1,7	1,0	0,044
2,0	4,0	3,8	2,2	0,098	2,2	3,5	3,5	2,2	0,098	2,2	1,9	1,7	2,4	0,107
0,9	3,7	3,6	1,0	0,044	1,0	3,9	3,8	1,1	0,049	1,1	1,7	1,6	1,2	0,053
0,8	4,1	3,9	1,0	0,044	1,0	3,7	3,7	1,0	0,044	1,0	1,6	1,6	1,0	0,044
6,2	6,5	3,8	8,9	0,394	8,9	5,0	3,9	10,0	0,442	10,0	2,0	1,6	10,4	0,460
6,5	6,0	3,6	8,9	0,395	8,9	4,3	3,5	9,7	0,430	9,7	2,1	1,6	10,2	0,452
10,9	6,6	3,5	14,0	0,619	14,0	6,3	3,6	16,7	0,739	16,7	2,7	1,7	17,7	0,783
8,9	7,4	3,8	12,5	0,556	12,5	5,7	3,9	14,3	0,636	14,3	2,6	1,6	15,3	0,681
27,9	23,2	3,9	47,2	2,080	47,2	23,8	3,7	67,3	2,965	67,3	21,3	1,6	87,0	3,833
24,4	21,3	3,9	41,8	1,843	41,8	21,4	3,9	59,3	2,615	59,3	23,7	1,7	81,3	3,585
20,2	16,2	3,9	32,5	1,436	32,5	18,8	3,8	47,5	2,099	47,5	17,3	1,8	63,0	2,783
21,8	16,9	3,7	35,0	1,528	35,0	15,4	3,6	46,8	2,043	46,8	15,5	1,7	60,6	2,646

b) Plattenprüfung: Berechnung der flächenbezogenen Gesamtmenge S_n an abgewittertem Material nach n Frost-Tau-Wechseln

Betonserie	S_n [kg/m ²] nach ...	7±1 FTW	14±1 FTW	28±1 FTW	42±1 FTW	56 FTW
Nullbeton	tatsächliche Anzahl FTW	8	15	27	41	56
	Mittelwert	0,920	1,799	3,054	5,037	7,408
	Standardabweichung	0,070	0,094	0,120	0,569	0,695
	95%-Quantil	1,069	2,000	3,310	6,251	8,891
LP-Beton	tatsächliche Anzahl FTW	8	15	27	41	56
	Mittelwert	0,038	0,049	0,057	0,059	0,062
	Standardabweichung	0,022	0,027	0,028	0,026	0,030
	95%-Quantil	0,085	0,106	0,115	0,114	0,126
Beton mit Mikrohohlkugeln	tatsächliche Anzahl FTW	8	15	27	41	56
	Mittelwert	0,201	0,360	0,491	0,562	0,594
	Standardabweichung	0,068	0,098	0,115	0,151	0,165
	95%-Quantil	0,347	0,569	0,736	0,884	0,945
Beton mit Faserpartikeln	tatsächliche Anzahl FTW	8	15	27	41	56
	Mittelwert	0,542	1,037	1,722	2,430	3,212
	Standardabweichung	0,069	0,149	0,296	0,440	0,586
	95%-Quantil	0,690	1,355	2,352	3,368	4,461

Plattenprüfung

Mittelwerte und Standardabweichungen der flächenbezogenen Gesamtmenge S_n an abgewittertem Material nach n Frost-Tau-Wechseln

