



Susanne Palecki (Autor)

Beitrag zur 6. CDF/ CIP Fachtagung

Prüfung des Frost- und Frost-Tausalzwerstandes von Beton

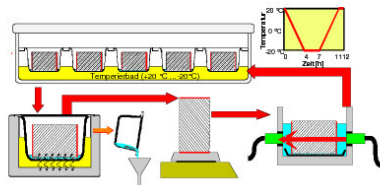
UNIVERSITÄT
DUISBURG
ESSEN

Mitteilungen
aus dem Institut für
Bauphysik und
Materialwissenschaft

Beiträge zur 6. CDF/ CIP Fachtagung

Prüfung des Frost- und
Frost-Tausalzwerstandes von Beton

M.J. Setzer und S. Palecki (Hrsg.)



Heft 10

Herausgeber: Prof. Dr. rer. nat. Dr.-Ing. habil. Max J. Setzer
Universität Duisburg-Essen

Cuvillier Verlag Göttingen

<https://cuvillier.de/de/shop/publications/2283>

Copyright:

Cuvillier Verlag, Inhaberin Annette Jentsch-Cuvillier, Nonnenstieg 8, 37075 Göttingen,
Germany

Telefon: +49 (0)551 54724-0, E-Mail: info@cuvillier.de, Website: <https://cuvillier.de>

CDF/ CIF-Test – Korrekte Simulation eines praxisgerechten Frostangriffes im Rahmen einer Laborprüfung

Max J. Setzer

Universität Duisburg-Essen, Institut für Bauphysik und Materialwissenschaft, Essen

Zusammenfassung

Der Autor konnte hinreichend belegen, dass das Frostsaugen der dominierende Faktor bei einem Frost-Tau-Angriff ist, welches einem Schaden infolge Befrostung vorausgeht. Es ist weitaus effizienter als jeder andere Transportmechanismus wie z.B. das isotherme kapillare Saugen. Es ist direkt mit dem instationären, gekoppelten Wärme- und Feuchtetransport während eines Frost- Tauwechsels verknüpft. Die Randbedingungen sind dabei von entscheidender Bedeutung. Um reale Bedingungen im Labor zu reproduzieren, müssen die Randbedingungen, die in der Praxis bei einem tatsächlichen Angriffs vorherrschen, sorgfältig abgebildet werden. In den RILEM Empfehlungen des CDF/ CIF-Testes ist diese Voraussetzung erstmalig konsequent umgesetzt worden. Aufgrund dessen handelt es sich um überaus präzise und effiziente Prüfverfahren, die nach ISO 5725 bestätigt sind. Die Tests erlauben die gleichzeitige Bestimmung des kapillaren Saugens sowie des Frostsaugens, der inneren Schädigung und der Abwitterung. Beim kombinierten Frost-Tausalzangriff dominiert die Abwitterung während bei einem reinem Frostangriff die innere Schädigung überwiegt. Das Frostsaugen ist darüber hinaus geeignet, den Transport schädlicher Substanzen im Beton zu bestimmen, die in Wasser gelöst sind und wie z.B. Chloride ins Betoninnere mit transportiert werden.

1. Einleitung

Es ist bereits hinlänglich bekannt, dass das Frostsaugen infolge der Mikroislinsenpumpe während eines Frost-Tau Angriffs von größter Bedeutung für das Verständnis ist, warum Beton so viele Frost-Tau-Wechsel in der Praxis aber auch im Labor übersteht (z.B. in der ASTM C 666 sind es 300, im Slab- und CIF-Test 56). Aufgrund des Phänomens des Frostsaugens wird eine schädigende Sättigung erreicht, die zu einem sofort einsetzenden Schädigungsprozess des Betons führt. In diesem Beitrag wird gezeigt, dass die aufgenommene Wassermenge während einer Frost-Tau Prüfung tatsächlich der dominierende Faktor ist, der letztlich zu einer Zerstörung führt.

Andere Veröffentlichungen sowie theoretische Überlegungen zeigen, dass das Frostsaugen aufgrund eines kombinierten und instationären Wärme- und Feuchtetransports während der dynamischen Beanspruchung eintritt [1], [2]. Dabei sind die Randbedingungen wichtig. Dieser Beitrag zeigt, dass sämtliche praktische Gegebenheiten bei nahezu allen herkömmlichen Prüfverfahren zur Bestimmung des Frostwiderstandes verletzt werden. Für die RILEM Empfehlungen des CDF- und CIF-Testes kann dagegen belegt werden, dass die Praxisbedingungen für reale Bauteile adäquat simuliert werden.

2. Mikroeislinnenmodell und Frostpumpe

Das Mikroeislinnenmodell beschreibt das Frostsaugen [1], [2], [15], [16]. Es beruht darauf, dass die Wechselwirkung mit der inneren Oberfläche der Gelporen den Gefrierpunkt des Gelporenwassers mit sinkendem Porenradius immer mehr absenkt. Mit der Oberflächenthermodynamik lässt sich die Radius-Gefrierpunktbeziehung berechnen [16]. In Abbildung 1 ist zu sehen, dass (1.) erst unter 0,1 µm der Effekt nennenswert ist und dass (2.) eine Hysterese zwischen Schmelz- und Gefrierpunktserniedrigung besteht. Mit der gleichzeitigen Existenz von ungefrorenem Wasser, Wasserdampf und Eis ist ein erheblicher Druckunterschied zwischen Wasser und Eis verbunden. Auch er lässt sich berechnen. Er steigt mit sinkender Temperatur schnell auf einige Megapascal.

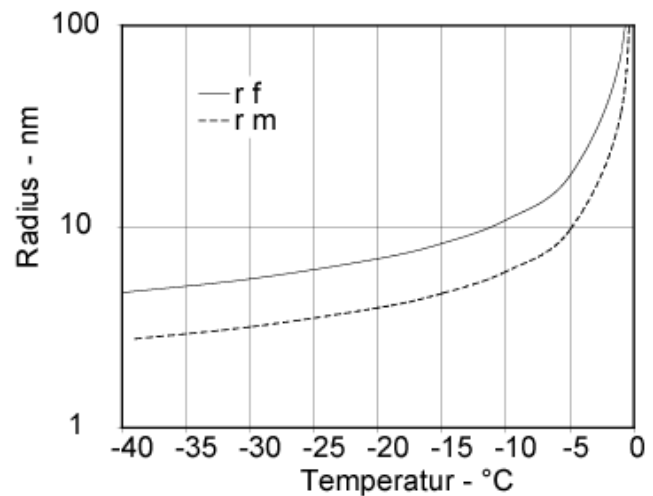
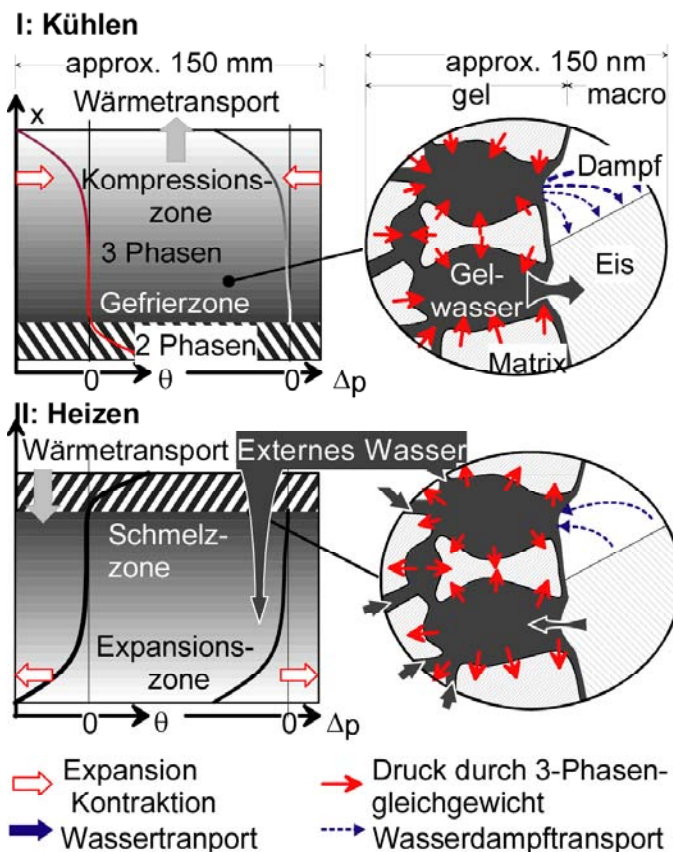


Abbildung 1: Radius Gefrierpunkt (r-f) und Schmelzpunkt (r - m) Beziehung



$$\Delta p_{LS} = 1.225 \cdot \theta + 0.0037 \cdot \theta^2 + 0.000019 \cdot \theta^3; \quad (1)$$

$$\theta = T - T_0;$$

$$[p] = \text{MPa}, [\theta] = \text{C}; [T] = \text{K}$$

Durch den hohen hydraulischen Unterdruck im Wasser wird das Zementgel kontrahiert (Gefrierschwinden) und das Porenwasser herausgedrückt (Abbildung 2.I). Beim Abkühlen wird es zu den bestehenden Eispartikeln transportiert. Wegen der kurzen Transportwege im Mikrometerbereich verläuft der Vorgang sehr schnell [17]. Beim Auftauen (Abbildung 2.II) sinkt das Druckgefälle, das nur von der Temperatur abhängt, und das Gel dehnt sich aus. Das immer noch an das Eis angefrorene Wasser kann nicht in kurzer Zeit zurück transportiert werden. Das Eis als Festkörper steht nicht unter hydraulischem Druck. Wird äußeres Wasser angeboten, dann wird es über das vorhandene, ungefrorene Wasser in die expandierenden

Abbildung 2: Mikroeislinnenmodell – links makroskopisch, rechts nanoskopisch

Gelporen transportiert. Wir beobachten das Frostsaugen [18]. Es befördert das Wasser tiefer und effizienter als andere Mechanismen in den Beton. Es ist direkt an das Temperaturprofil gekoppelt, das im makroskopischen Bereich stets nicht stationär ist. Nachdem der

Transport im nanoporösen Gelporenbereich stattfindet, muss man zwischen der Wasserbewegung und dem Eindringen von darin gelösten Stoffen (Tausalze) unterscheiden. Für das Frostsaugen sind Frosttauwechsel und das externe Wasser erforderlich. Der Wärme- und Wassertransport muss daher praxiskonform in einem Prüfverfahren abgebildet werden.

3. Schadensmechanismen

Ist eine hinreichend hohe Schädigungssättigung („schädigende Sättigung“) erreicht, dann ist zuerst die Gefrierdehnung des Eises der entscheidende Schädigungsmechanismus. Die bei der behinderten Eisbildung entstehenden hydraulischen Drücke werden in Modellen vor allem von Powers [19] und Fagerlund [20] beschrieben. Darüber hinaus gibt es Schädigungsmechanismen durch Umverteilungsdrücke im submikroskopischen Gelbereich [20], die aber erst bei Temperaturen unter -20 °C dominant werden. Eine Übersicht zum derzeitigen Stand findet man in [18]. Es wirken in erster Linie die makroskopischen und semi-makroskopischen Schadensmechanismen. Neben den physikalischen Schadenstheorien ist aber auch der Einfluss chemischer Modelle, wie Phasenumwandlungen innerhalb der Zementsteinmatrix, wie sie von Stark und Ludwig beschrieben worden sind [22], nicht außer Acht zu lassen. Allerdings sind bei der Taumittleinwirkung auch kombinierte oberflächenphysikalische Effekte nicht vernachlässigbar. Es hat sich aber gezeigt, dass sich der Einfluss der Taumittel auf die unmittelbare Oberflächenebene konzentriert.

4. Instationärer Wärme- und Feuchtetransport – Praxis- und Laborbedingungen

4.1 Hintergrund

Gemäß dem Mikroislinsenmodell müssen wir sehr genau das instationäre Wärme- und Feuchteangebot an der äußeren Oberfläche sowie dessen Transport in den Beton hinein berücksichtigen. Nur auf dieser Basis ist es möglich, innerhalb einer Testmethode beides - das dynamische Frostsaugen sowie die Schädigung nach Erreichen einer kritischen Sättigung - zu simulieren.

Hierbei ist es wichtig die Veränderungen des Zementsteingefüges infolge der Hydratation zu beachten, insbesondere die Veränderungen innerhalb der Porenstruktur und der Volumenanteile. Das Volumen des Zementsteins inklusive dem physikalisch gebundenen Wassers verringert sich durch die Hydratation gegenüber den Ausgangsstoffen bei gleichzeitiger Entstehung von leerem Porenraum infolge chemischen Schwindens. Dieses Phänomen reduziert die Menge gefrierbaren Wassers und erhöht den freien Ausweichraum für die Eisexpansion. Eine Darstellung der relevanten Porenverhältnisse enthält Abbildung 3.

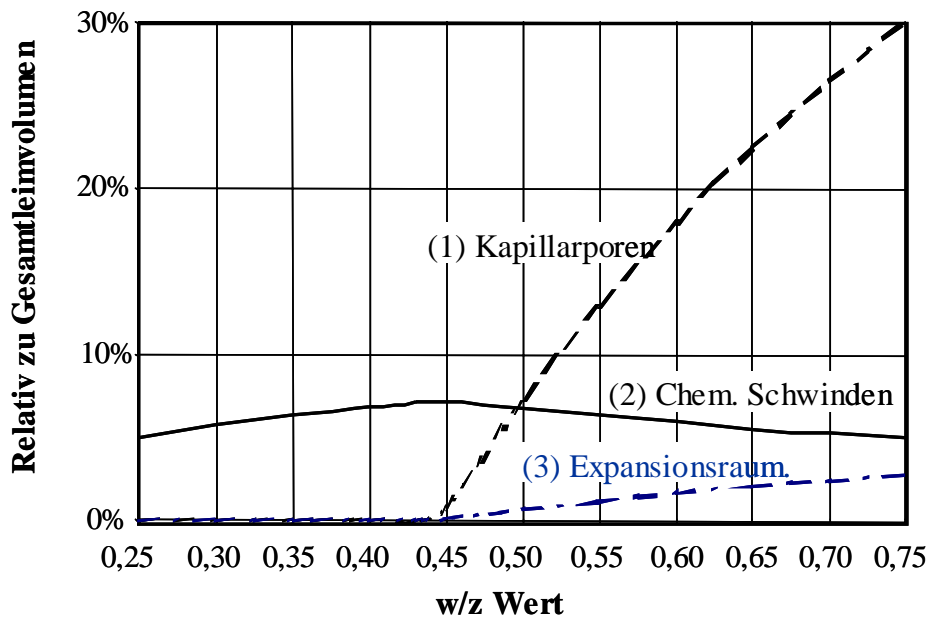


Abbildung 3: Porenanteile der (1) Kapillarporen, entstanden durch ein Überangebot an Wasser, aufgetragen über das Wasser, das chemisch (wz-chem 0,21) und physikalisch (wz-phys 0,23) gebunden wird, der (2) Gelporen, gebildet durch chemisches Schwinden, und des (3) notwendigen Porenvolumens für die Eisexpansion unter der Annahme, dass alle Kapillarporen wassergefüllt und gefroren sind, bezogen auf den gesamten Zementleimgehalt (Hydratationsgrad 0,9) [2].

Für die Prüfung ist es wichtig einzubeziehen, dass die Probekörper zu Beginn der Frostbelastung hauptsächlich durch kapillares Saugen gesättigt sind. Daher beträgt die relative Feuchte zumindest innerhalb des Oberflächenbereichs bei Raumtemperatur 100 %. Unterhalb des Gefrierpunktes verändert sich selbstverständlich die Luftfeuchte über dem ungefrorenen Wasser, da das Eis nun die stabile makroskopische Phase ist, während das Porenwasser durch Drücke und Oberflächenkräfte stabilisiert wird. Für dieses Verhalten gilt die Radius-Schmelzpunkt- oder Radius Gefrierpunkt-Beziehung (s. Abb. 1).

Die Abmessungen eines realen Bauteils sind zumindest innerhalb einer Ebene so groß, dass eine lineare Ausdehnung der Angriffsfläche als unendlich angenommen werden kann. Aufgrund dessen, ist ein einachsiger Wärme- und Feuchtetransport senkrecht zu der belasteten Außenfläche eine gute Näherung. Der Wärmefluss von der Rückseite her ist dagegen nahezu null oder zumindest äußerst gering und gleichgerichtet.

In einer Prüfmethode kann ein Probekörper als Ausschnitt eines unendlich ausgedehnten ebenen Bauteils angesehen werden (s. Abb. 4), welches seitlich in seinen Abmessungen begrenzt ist. Für eine geeignete Prüfmethode ist es daher wichtig, dass der Wärmetransport auf die Prüffläche beschränkt wird, während der Transport über die Seitenflächen und Rückseite – in realen Bauteilen nicht vorkommend – vernachlässigbar gering gehalten werden muss, um die realen Bedingungen abzubilden. Darüber hinaus sollte die Feuchteaufnahme ebenfalls nur über die Prüffläche erfolgen. Erfolgt dagegen die Wärmezufuhr auch über die Seitenflächen und die Rückseite, dann bildet sich ein Extremum im Temperaturverlauf aus. Die Frostpumpe ist nur bis zu diesem Extremum wirksam. In diesem Zusammenhang ist es wichtig, dass in der Prüflösung, die an die Beanspruchungsfläche angrenzt, mit der Eisbildung ein sehr hoher Wärmeverbrauch stattfindet (in einer 5 mm

dicken Schicht $1769,5 \text{ kJ/m}^2$ zwischen 0 und $-10 \text{ }^\circ\text{C}$). In [2] wurde berechnet, welche Prüfkörperdicke einer solchen Flüssigkeitsschicht entspricht. Der w/z -Wert wurde als Parameter gewählt, weil sich mit ihm der Anteil an gefrierbarem Wasser ändert. Kühlt man einen Probekörper sowohl über die Beanspruchungsfläche als auch über die Rückseite, dann ist diese Probekörperdicke der kritische Wert, bei dem das Extremum genau an der Beanspruchungsfläche liegt. Damit ist die Frostpumpe praktisch außer Kraft gesetzt. Bei allseitigem Wärmetransport verschlechtert sich die Situation zusätzlich.

4.2 Vergleich der Randbedingungen innerhalb verschiedener Prüfmethode zur Bestimmung des Frost- und Frost-Tausalz Widerstandes

In der Vergangenheit wurden eine ganze Reihe an Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost- und Frost-Tausalzwiderstandes entwickelt, die sich insbesondere hinsichtlich der Prüfrandbedingungen bzw. Wärme- und Feuchtetransportbedingungen sowie der Grenzwerte unterschieden. Abbildung 5 enthält einige Prinzipanordnungen.

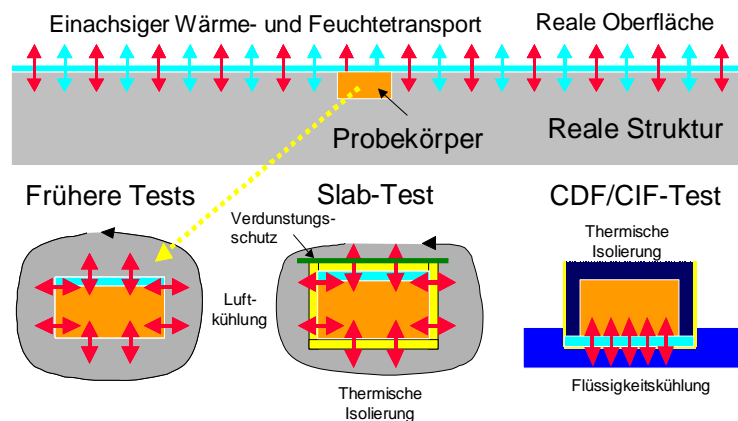


Abbildung 5: Vergleich eines Frostangriffes in der Praxis mit dem in Prüfverfahren. Unterschied zwischen allseitigem (links), mehrachsigen (mitte) und eindimensionalem (rechts) Wärme- und Feuchtetransport

Klassisch wird die Frostprüfung in einem luftgekühlten Klimaschrank durchgeführt. In Luft wird ca. 50% der Wärme durch Konvektion transportiert. Daher ist eine gleichmäßige Luftbewegung mit gleichmäßiger Lufttemperatur wichtig. Weitere ca. 50% der Wärme entfallen auf den Strahlungstransport - auch unter den Bedingungen einer Frostprüfung. Dafür sind die Temperaturen der Oberflächen entscheidend, die den Probekörper umgeben. Die Belegung der Prüftruhe wird hier wichtig. Metallische Flächen verhindern den Strahlungsaustausch. Der Wärmetransport durch Wärmeleitung ist dagegen vernachlässigbar klein. In älteren Verfahren – Abbildung 5 links - ist der Wärmetransport allseitig und nicht genau fassbar. Ein Gefrieren von hinten ist die Regel. Die Methoden geben die Praxis nicht wieder. Im schwedischen Plattenverfahren (Slab-Test) sollte dieser Mangel durch eine seitliche Wärmedämmung aufgefangen werden - Abbildung 5 Mitte und Abbildung 6b. (Standardisierter Taumitteltest für Abwitterung in Schweden [23], durch RILEM Recommendation [24], und EN 12390 [26], für innere Schädigung RILEM Recommendation [5], [6]). Allerdings musste eine Folie über der Prüflösung bzw. Prüffläche als Verdunstungsschutz angebracht werden. Die stehende Luftschicht wirkt als weitere Wärmedämmung. Messungen zeigen, dass der Wärmeeintrag über die Beanspruchungsfläche vergleichbar ist mit dem Eintrag über die Rückseite und die Seitenflächen. Auch hier gefriert ein wesentlicher Teil von hinten.

Im CDF/CIF-Test – Abbildung 5 rechts und Abbildung 6a - dient die ruhende Luft als Dämmschicht und die metallischen Flächen als Strahlungsschutz. Aus physikalischen Gründen ist die Prüffläche unten. Der Wärmetransport erfolgt über ein Bad, das durch die hohe Wärmekapazität für eine genaue Temperaturführung sorgt. Damit ist nachweislich ein einachsiger Wärmetransport gesichert. Das Bad lässt zwei Frosttauwechsel pro Tag zu (12 h Zyklus). Die Dicke der Prüfflüssigkeit und damit der entsprechende Wärmebedarf ist durch eine Aufständigung gesichert. Die Verfahren sind standardisiert - CDF für den Frostausangriff in der RILEM Recommendation [4], der EN 12390 [26] und in Merkblättern zu zusätzlichen technischen Vertragsbedingungen [25], der CIF Test für den Frosttauangriff und die innere Schädigung als RILEM Recommendation [5],[6] und Richtlinie der BAW [14]. Die hohe Präzision der Testmethoden wurde durch mehrere internationale Ringversuche bestätigt [7], [11], welche bisher von keinem anderen Frostprüfverfahren erreicht wurde.

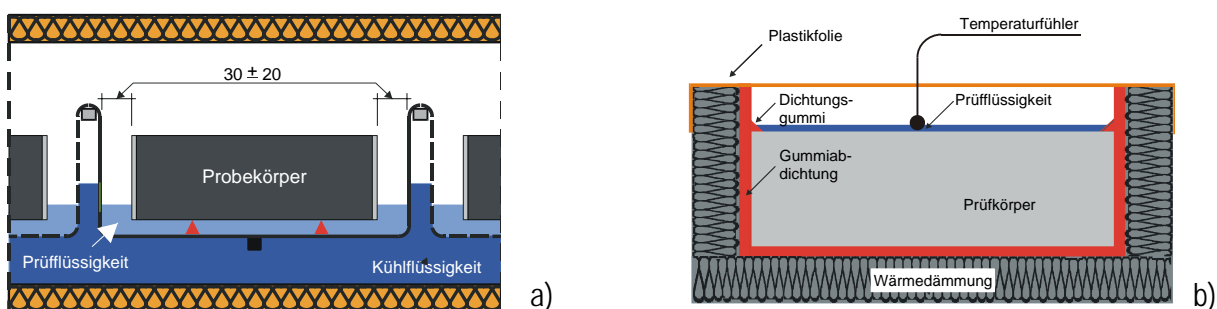


Abbildung 6: Prüfkörperanordnung im Rahmen des CDF/ CIF- (a) und Slab-Tests (b)

4.3 Der CDF/ CIF-test

Der Ablauf der Prüfung kann im Detail im Anhang den entsprechenden Prüfvorschriften entnommen werden. Eine Prinzipskizze enthält Abbildung 7.

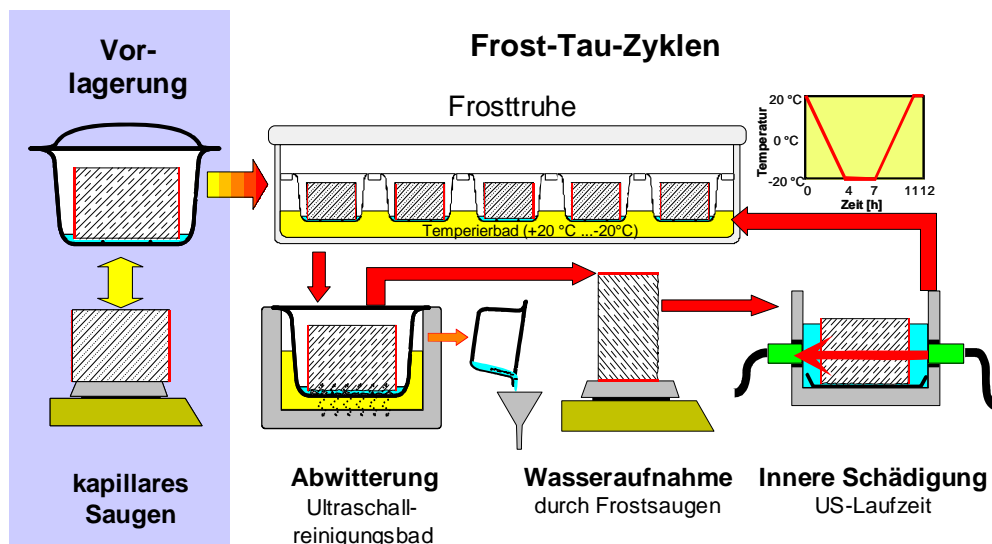


Abbildung 7: Ablauf der Untersuchungen im Rahmen des CIF-Testes, hier dargestellt mit der Referenzmethode der Bestimmung der Ultraschalllaufzeit

Das für den CDF-Test maßgebliche Prüfkriterium stellt die Abwitterung dar, ausgedrückt durch die Summe an abgewitterten Partikeln, bestimmt mittels Ultraschallbad, nach 28 FTW. Zur Bestimmung der inneren Schädigung wird der relative dynamische E-Modul, ermittelt aus der Ultraschalllaufzeit (Referenzverfahren) oder Resonanzfrequenz (Altern-

tivmethode), zur Beurteilung herangezogen. In [6] führte das RILEM TC 176 als Schädigungskriterium einen Abfall des E-Moduls auf 80% ein bzw. 75% nach dem BAW Merkblatt [14] ein. Die Auswertung der Ringversuche gemäß ISO 5725 hat gezeigt, dass bei einem E-Modul von 80% mit ausreichender Sicherheit zwischen einem geschädigten und ungeschädigten Beton (E-Modul=100%) unterschieden werden kann. Die Standardabweichung der Vergleichspräzision (s_R) zwischen den beiden Werten (E-Modul = 80 bzw. 100%) beträgt $3 \cdot s_R$, welche auch die Laborstreuung beinhaltet (siehe Tabelle 1). Unterhalb von 80% nimmt die Streuung signifikant zu bzw. die Präzision ab, was insbesondere die Laborpräzision betrifft. Als Abnahmekriterium kann dementsprechend definiert werden: Der E-Modul darf nicht unter 80% fallen, bevor die vorgegebene Anzahl an Frost-Tau-Wechseln erreicht ist.

Tabelle 1: Präzisionsdaten des CDF- und CIF-Testes, bestimmt für die RILEM Empfehlungen. s_r ist die Standardabweichung der Wiederholpräzision (wiederholte Prüfung in einem Labor), s_R ist die Vergleichspräzision (wiederholte Prüfung, alle Labor innerhalb des Ringversuches berücksichtigend)

Parameter		Standardabweichung	
		s_r	s_R
Abwitterung: 1500 g/m ²	Schädigungskriterium CDF-Test	0,16 kg/m ²	0,26 kg/m ²
E-Modul: 100 %	keine innere Schädigung	0,9 %	0,7 %
E-Modul: 80 %	Schädigungskriterium für die innere Schädigung (CIF-Test)	4,8 %	6,2 %

5. Experimentelle Daten

In Abbildung 8 sind exemplarisch die Ergebnisse dreier Betonserien im Rahmen der CIF-Prüfung dargestellt, bei denen der w/z-Wert variiert wurde. Da der Zementgehalt der konstante Parameter war, wurde der Wassergehalt entsprechend variiert.

Die Aufnahme der Prüflösung – demineralisiertes Wasser – ist als Abszisse aufgetragen, auf die sich sowohl die Änderung des rel. dyn. E-Moduls als auch die Prüfdauer beziehen. Der Vorteil dieser Darstellung besteht darin, dass der wichtigste Parameter für die Analyse einer Betonmischung, die Wasseraufnahme, als Vergleich zwischen verschiedenen Betonserien verwendet werden kann. Verschiedene Testergebnisse haben bereits bewiesen, dass der Grad der Sättigung, ab dem eine Schädigung einsetzt, von dem Bindemitteltyp abhängt. Dieser Wert wird weniger von dem w/z-Wert beeinflusst, als von der Art des Bindemittels. Die Geschwindigkeit, mit der ein bestimmter Sättigungsgrad erzeugt wird, nimmt dagegen mit steigendem w/z-Wert dramatisch zu. Begründet werden kann dieser Sachverhalt damit, dass die Mikrostruktur hauptsächlich vom Bindemittel gesteuert wird, welches sowohl die Menge chemisch und physikalisch gebundenen Wassers inklusive chemischen Schwindens bestimmt als auch die Menge an Überschusswasser beeinflusst, welches die Kapillarporen formt, die später als Transportmedium dienen.

Aus der Abbildung ist ersichtlich, dass nach 2 Tagen bzw. 4 Frost-Tau-Wechseln 0,10 M.-% Prüflösung aufgenommen worden sind. Dies entspricht 0,025 M.-% oder 0,06 Vol.-% pro Zyklus. Die Matrix nimmt 33% des Betonvolumens ein. Bezogen auf die Matrix entspricht dies 0,18 Vol.-% pro Zyklus. Wenn wir annehmen, dass ein maßgebender Temperaturabfall auf -15°C eintritt (der Zyklus geht bis -20°C), dann beträgt gemäß den

Überlegung in [1] (Gleichung (2.8)) der Druck im Porenwasser 18,5 MPa. Die nötige Volumenänderung für diesen Pumpeffekt kann dadurch erklärt werden, wenn wir einen E-Modul von 30 GPa annehmen, was mit den Messdaten exzellent übereinstimmt.

Es lässt sich in jedem Falle festhalten, dass der dominierende Effekt des Frostschwinds die Reduzierung des Gelporenvolumens ist, während die Volumenänderung der Partikel untergeordnet ist. Dies ist für die Modellierung des E-Moduls des Gelsystems relevant.

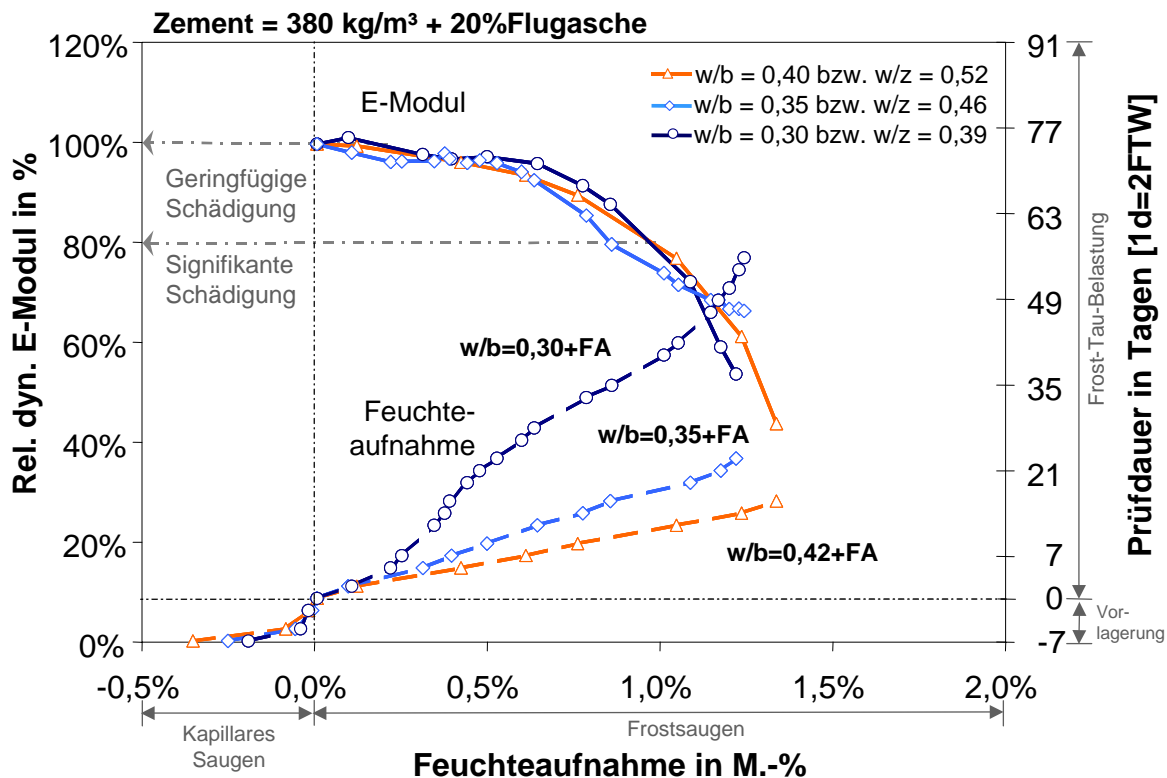


Abbildung 8: Interaktionsdiagramm mit CIF-Ergebnissen – Änderung des E-Moduls und Feuchteaufnahme. In diesem Diagramm ist die Zeitachse (1 Tag = 2 Zyklen) bezogen auf die Feuchteaufnahme und nicht umgekehrt. Der E-Modul ist ebenso bezogen auf die Feuchteaufnahme. Negative Werte der Zeit und der Wasseraufnahme kennzeichnen das isotherme kapillare Saugen. Hierbei wird deutlich, dass der Grad der Schädigung abhängig vom Sättigungsgrad und nahezu unabhängig vom w/z-Wert ist, wobei sich die Sättigungsgeschwindigkeit (zeitabhängig) und damit die Dauerhaftigkeit mit dem w/z-Wert signifikant verändert (wz: 0,39 = 37d (74 FTW); wz: 0,46 = 17d (34FTW); wz: 0,52 = 11d (22FTW)). Ein E-Modul von 80% stellt das Schädigungskriterium dar (Daten Palecki [8]).

Es liegt auf der Hand, dass der Schädigungsmechanismus, der in eine äußere Abwitterung resultiert, von dem, der eine innere Schädigung zur Folge hat, zu unterscheiden ist. Die innere Schädigung erlaubt eine gute Vorhersage bezüglich des praktischen Verhaltens von Beton unter einer reinen Frostbelastung mit äußerem Feuchteangebot, während die Abwitterung einen Schaden infolge Frost-Taumittelangriff charakterisiert. Die Abwitterung nimmt hingegen dramatisch zu, wenn Tausalze anwesend sind, die innere Schädigung allerdings wird nur geringfügig dadurch beeinflusst.

Darüber hinaus kann man einen zusätzlichen Koeffizienten für die thermische Längenänderung infolge der Mikroislinsenbildung ableiten. Mit den vorliegenden Daten liegt dieser bei $2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/K}$, was in direkter Übereinstimmung mit den Werten der thermische Dehnung