



DGZfP-Berichtsband 66 CD
Plakat 31

Zerstörungsfreie Prüfung der inneren Schädigung von Beton durch Frostangriff

R. Auberg, S. Palecki, M.J. Setzer, Essen

Zusammenfassung

Die zuverlässige Prüfung des Frostwiderstands von Beton war lange Zeit ein Problem. Hierbei muß jedoch zwischen zwei Bestandteilen der Prüfung unterschieden werden. Die Schadensenerzeugung und die Schadensaufnahme. Während die zerstörungsfreie Schadensaufnahme z.B. mit dem Ultraschall- und Resonanzfrequenzverfahren reproduzierbar möglich ist, sind bei den meisten Frostprüfverfahren die signifikanten Prüfbedingungen nicht ausreichend präzisiert, wodurch die Streuung der Meßergebnisse ansteigt. Mit dem CIF-Test (Capillary suction, Internal damage and Freeze thaw Test) wurde ein Prüfverfahren aufbauend auf erforschte Grundlagen der Frostschädigungsmechanismen entwickelt, daß die wesentlichen Randbedingungen wie Feuchteaufnahme und Temperaturbelastung präzise vorgibt und vergleichbar der natürlichen Umweltbelastung einen eindimensionalen Schadensangriff und -fortschritt erzeugt. Diese Arbeit beschreibt den dynamische Schädigungsmechanismus. Dazu werden verschiedene zerstörungsfreie Meßmethoden (Ultraschall, Resonanzmessung und Schallemission) zur Bestimmung der inneren Schädigung vergleichend dargestellt.

Ausgangssituation

Die Grundzüge des Frostangriffs können im allgemeinen auf alle porösen Baustoffe übertragen werden. Der Widerstand gegen Frostangriff ist proportional zum Wassergehalt des porösen Baustoffs. In vollständig gesättigtem Zustand bestehen nur wenige Systeme einige Frost-Tau-Wechsel ohne Schädigung. Der Schädigungsgrad hängt zudem von der Gefriererate, der Minimaltemperatur und der Dauer des Gefrierens ab. Bei sehr langsamen Gefrieren zeigen auch frostanfällige Systeme keine oder nur geringe Schädigung, während ein zu hohes Gefriergefälle den Frostangriff selbst für frostunempfindliche Systeme stark erhöht. Theoretisch verstärken hohe Gefriereraten den hydraulischen Druck, langsame Gefriereraten und lange Frostphasen verstärken die Mikroislinsenbildung und mit fallender Minimumtemperatur erhöht sich die Menge an gefrierbarem Wasser [1,2].

In der Praxis ist eine teilweise Sättigung des Betongefüges die Regel. Es muß jedoch erst eine kritische Sättigung erreicht werden, so daß während des Gefrierens eine kritische Spannung aufgebaut wird. Eine Mikrorißbildung führt dann im Betongefüge zum Spannungsabbau. Daraus resultiert eine Volumenänderung, die nach dem Tauen irreversibel bleibt. Ausschlaggebend ist nach Setzer eine Mikroislinsenbildung. Bei teilgesättigten Proben, die in ständigem Wasserkontakt stehen, kommt es während der Gefrier- und Tauphase unterhalb von 0°C zu einer Umverteilung des ungefrorenen Porenwassers in kleinen Poren zu gefrorenem Wasser in großen Poren, wie Makrokapillarporen, Verdichtungsporen und künstliche Luftporen. In der Tauphase oberhalb von 0°C findet dann durch Entspannungseffekte des Mikrogefüges eine erneute Wasseraufnahme statt. Das führt unter zyklischer Beanspruchung zu einer vollständigen Sättigung des Porenraums. Dadurch wird der kapillar inaktive Porenraum gesättigt, der unter isothermen Bedingungen luftgefüllt bliebe. Die aufgenommene Wassermenge übersteigt um ein mehrfaches das unter isothermen Bedingun-

gen kapillare Saugvermögen. Diese zusätzliche Pumpwirkung führt schnell zu einer Sättigung des Betons über das Maß des kapillaren Saugens hinaus [3,4]. Zusätzliche makroskopische Transportmechanismen von Wasser resultieren aus einem Temperaturgradienten und einer unterschiedlichen thermische Ausdehnung [1] und erhöhen den Sättigungsgrad.

Prüfmethode CIF-Test

Die Untersuchungen zur Entwicklung des Frostschadens wurden mit dem CIF-Test (Capillary suction, Internal damage and Freeze thaw Test) durchgeführt [5,6]. Dies ist eine neue Prüfmethode, die eine reproduzierbare Messung der inneren Gefügeschädigung durch eine Anzahl von definierten Frost-Tau-Wechseln in Gegenwart einer definierten Prüfflüssigkeit ermöglicht. Der CIF-Test erlaubt darüber hinaus eine Messung der Oberflächenabwitterung. In der Regel wird als Prüfflüssigkeit bei einer Bestimmung des Frostwiderstands von Beton demineralisiertes Wasser oder bei einer Prüfung des Frost-Taumittel-Widerstands i.d.R. eine 3%ige Natriumchlorid-Lösung (CDF-Test [7]) verwendet.

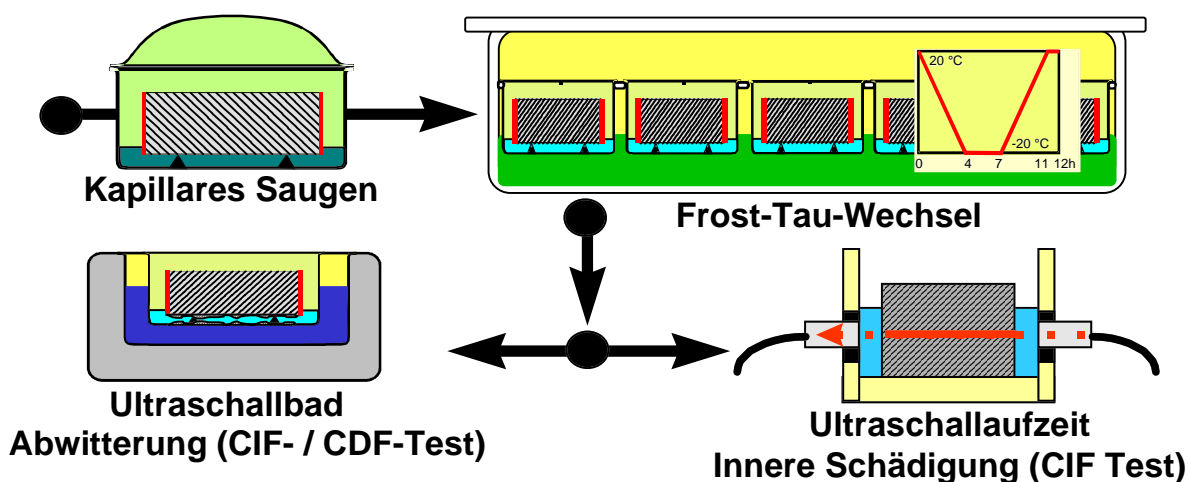


Bild 1: CIF- / CDF-Prüfeinrichtung

Dynamischer Verlauf der Frostschädigung

Frost-Tau-Wechsel und Schädigungsverlauf

Der Sättigungsgrad ist einer der signifikanten Parameter für die Entstehung eines Frostschadens. Die erhöhte Feuchteaufnahme während der Frost-Tau-Wechsel übersteigt das kapillare Feuchteaufnahmevermögen um ein Vielfaches. Dies zeigt an, daß durch die Frost-Tau-Wechsel-Belastung im Betongefüge luftgefüllte Porenräume wassergesättigt werden, die kein oder nur ein geringes kapillares Saugvermögen haben. Das zyklische Gefrieren und Tauen wirkt wie eine „Mikropumpe“ [1] und bewirkt eine beschleunigte künstliche, kritische Sättigung der Probe.

Bei der Längenänderung können vier Prüfabschnitte unterschieden werden. Davon zeigen sich 2 Abschnitte während des 7-tägigen kapillaren Saugens (Quelleffekte). In den ersten Stunden saugt der Meso- und Makrokapillarporenbereich Wasser auf. Der anschließende Knickpunkt in der Wasseraufnahme findet sich entsprechend auch in der Längenänderung bei einer Expansion zwischen 0,25 bis 0,40‰. Die anschließend weitere geringere Feuchteaufnahme über 6 Tage bewirkt nur noch eine zusätzliche Längenänderung der Proben um bis zu 0,05‰.

Während der ersten Frost-Tau-Wechsel kommt es trotz der stark erhöhten Wasseraufnahme zu vergleichbar geringen Längenänderungen (Bild 3). Zu diesem Zeitpunkt findet noch keine irreversible Mikrorißbildung statt, sondern es werden Porenräume gesättigt, die nicht kapillar Saugen können (luftgefüllten Grob-, Verdichtungs- und künstliche Luftporen).

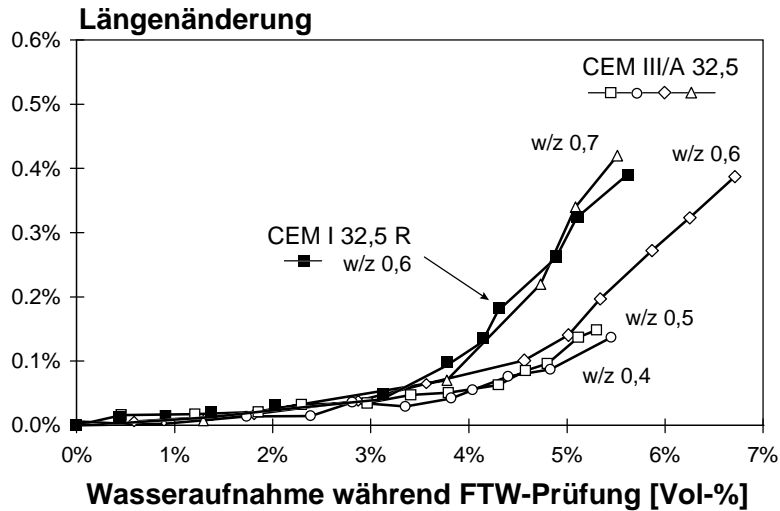


Bild 3: Gegenüberstellung der Längenänderung und der Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung [aus 4]

Nach einer kritischen Sättigung dieses Porenraumes beginnt die Schädigung des Betongefüges. Dieser Zeitpunkt entspricht dem Knickpunkt, an dem eine geringe zusätzliche Wasseraufnahme hohe Längenänderungen zur Folge hat. In diesem zweiten Bereich korrelieren Wasseraufnahme und Mikrorißbildung. Das heißt, es lassen sich zwei entscheidende Abschnitte für die Schadensentstehung während der CIF-Prüfung beschreiben.

Abschnitt 1:

Hohe Wasseraufnahme bei gleichzeitig geringer Längenänderung. (Beginn Frost-Tau-Wechsel bis zum kritischen Punkt)

Abschnitt 2:

Geringe Wasseraufnahme bei gleichzeitig großer Längenänderung. (ab dem kritischen Punkt)

Ein vergleichbarer Verlauf stellt sich ein, wenn die anstatt der Längenänderung die Änderung der Ultraschalllaufzeit oder der Resonanzfrequenz bzw. die daraus ermittelte relative Änderung des dynamischen E-Moduls aufgetragen wird (Bild 4). Der Unterschied liegt nur in der unempfindlicheren Meßmethodik der beiden letztgenannten Verfahren.

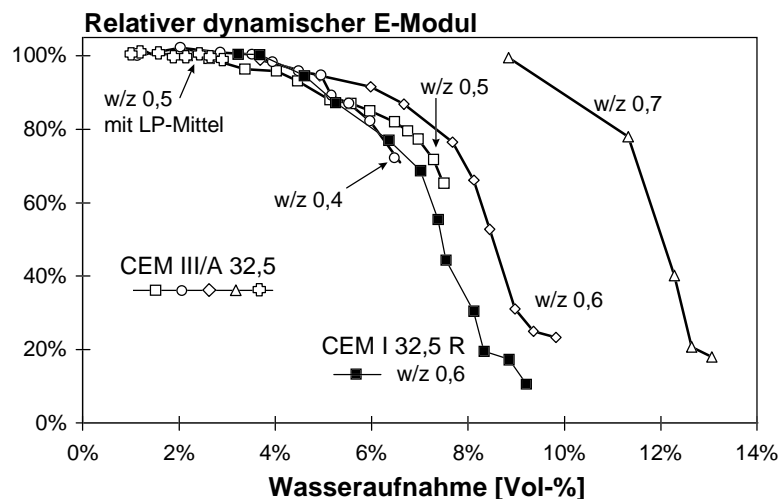


Bild 4: Gegenüberstellung des relativen dynamischen E-Moduls und der Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel-Prüfung [aus 4]

Untersuchung während eines Frost-Tau-Wechsels

Längenänderung

Der Schädigungsfortschritt zeigt sich nicht nur in den oben aufgezeigten Änderungen der Kenngrößen aus den zerstörungsfreien Meßmethoden mit steigender Frost-Tau-Wechsel-Anzahl, sondern auch im Verhalten des Materials während eines Frost-Tau-Wechsels. In Bild 5 wird für einen Beton mit einem w/z-Wert von 0,60 die Veränderung im Verlauf der Längenänderung nach dem 1. Frost-Tau-Wechsel (Abschnitt 1) und 28. Frost-Tau-Wechsel (Abschnitt 2) vergleichend dargestellt. Zu Beginn der CIF-Prüfung ist die Betonprobe durch das 7-tägige kapillare Saugen noch nicht kritisch gesättigt. Während des 1. Frost-Tau-Wechsels wird durchgehend nur eine Kontraktion festgestellt (Bereich I+II). Eine Expansion aufgrund einer makroskopischen Eisbildung kann zu diesem Prüfzeitpunkt noch nicht beobachtet werden, weil die Probe noch nicht ausreichend gesättigt ist. Nachdem eine kritische Sättigung nach 28 Frost-Tau-Wechseln erreicht worden ist, zeigt sich ein anderer Verlauf in der Längenänderung. Von +20°C bis -10°C (Bereich I) kann eine Kontraktion entsprechend der thermischen Längenänderung gemessen werden. Das Porenwasser in den großen Poren gefriert in einem Temperaturbereich zwischen -11°C und -15°C (Bereich II) mit einer ausgeprägten Eisexpansion. Wenn die Prüflösung auftaut, findet eine starke Kontraktion (V) der Probe statt. Nachdem auch die Probe aufgetaut ist (VI), ist eine durchgehende Expansion zu verzeichnen.

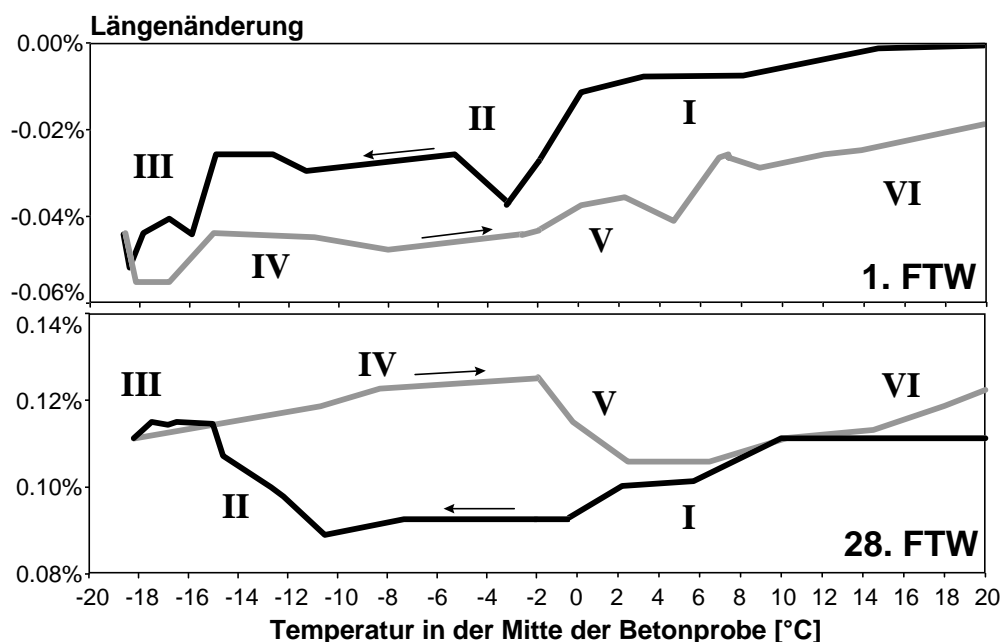


Bild 5: Verlauf der Längenänderung einer ungeschädigten (1. FTW) und geschädigten (28. FTW) Betonprobe (w/z-Wert 0,6) während eines Frost-Tau-Wechsels (Behandlung R) [aus 4]

Die Ergebnisse verdeutlichen, daß eine Haltezeit über eine Dauer von 3 Stunden bei der Minimumtemperatur von -20°C während eines Frost-Tau-Wechsels erforderlich ist. Durch diese Temperaturbelastung wird in der Probe eine Temperatur von ca. -18,5°C über eine Dauer von 2 Stunden erreicht. Die Längenänderungen in teilgesättigten und gesättigten Proben zeigen im Bereich von -10°C bis -20°C und während der Haltephase bei -20°C Veränderungen auf, die entscheidend für die künstliche Sättigung und einer folgenden inneren Schädigung sind. Besonders bei kritisch gesättigten Proben ist es wichtig, daß der Expansionsabschnitt, verursacht durch das Gefrieren des makroskopisch wirksamen Porenwassers, ganz abgeschlossen wird (Bereich II und III). Bei einer Minimumtemperatur im Prüfkörper

oberhalb von -18°C wird dieser Gefriervorgang nicht abgeschlossen. Die Schädigung tritt dann stochastisch verteilt auf und kann nicht reproduzierbar erzeugt und gemessen werden.

Ultraschalllaufzeit und Ultraschallfrequenzanalyse

Die Ultraschallmessung ist mit einem softwaregesteuerten Ultraschallgerät NFUS 2300 der Firma Hillger durchgeführt worden. Das Ultraschallsignal ist entsprechend der CIF-Prüfbeschreibung in horizontaler Ebene im Abstand von 35 mm zur Prüffläche aufgezeichnet worden. Die Ankopplung erfolgte direkt an die Seitenflächen des Probekörpers mit Vaseline und es wurde durch eine Stahlhalterung ein konstanter Anpreßdruck aufgebracht. Die regelmäßige Aufzeichnung der Ultraschalllaufzeit während eines Frost-Tau-Wechsels stellt den Gefrierbeginn des makroskopischen Porenwassers deutlich heraus. Zudem kann die Zunahme der Menge an gefrierbarem Wasser beobachtet werden. In Bild 6 ist die Änderung der Ultraschalllaufzeit während des 1. und 28. Frost-Tau-Wechsels dargestellt. Die Ergebnisse der Prüfzeitpunkte unterscheiden sich vergleichbar der Längenänderungsmessung deutlich.

Mit zunehmender Frost-Tau-Wechsel-Anzahl wächst die Menge an gefrierbarem Wasser im Probekörper an. Bei einsetzender Eisbildung führt diese Zunahme des Eisvolumens zu sprunghaften Veränderungen der Ultraschalllaufzeit und des Frequenzspektrums.

Zu Beginn des 28. Frost-Tau-Wechsels deutet die Zunahme der Ultraschalllaufzeit bereits auf einen inneren Schaden der Probe hin. Die deutlich erhöhte Eismenge im Gegensatz zum 1. Frost-Tau-Wechsel führt zwischen -2 und -5°C zu einer drastischen Abnahme der Laufzeit, bedingt durch die höhere Ultraschallgeschwindigkeit von Eis gegenüber Wasser oder Luft. Der Zeitpunkt des Auftauens erfolgt im Bereich um 0°C , was der Hysterese entspricht.

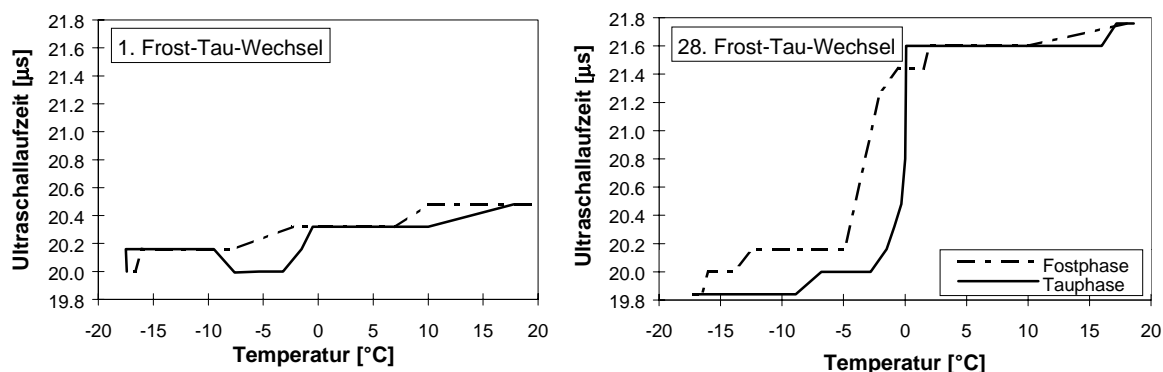


Bild 6: Änderung der Ultraschalllaufzeit während des 1. und 28. Frost-Tau-Wechsels

In Bild 7 ist die Summenhäufigkeit der einzelnen Frequenzen während des 1. und 28. Frost-Tau-Wechsels dargestellt.

Mit zunehmender innerer Schädigung zeigt sich ein deutliches Abflachen der Summenkurven im höheren Frequenzbereich. Zu Beginn der Frostprüfung können alle Frequenzen vom Material übertragen werden. Steigt der Grad der Zerstörung werden höhere Frequenzen gefiltert. Während eines Frost-Tau-Wechsels führt die Eisbildung zu einem Ansteigen der Summenkurven. Höhere Frequenzen werden nun nicht mehr gefiltert. Mit der Zunahme der Eismenge im Probekörper kommt es zu sprunghaften Veränderungen in der Frequenzzusammensetzung. Die entsprechenden Kurven laufen weiter auseinander.

Diese Meßmethodik ermöglicht den Zeitpunkt der Eisbildung und Veränderungen im Betongefüge zu bestimmen.

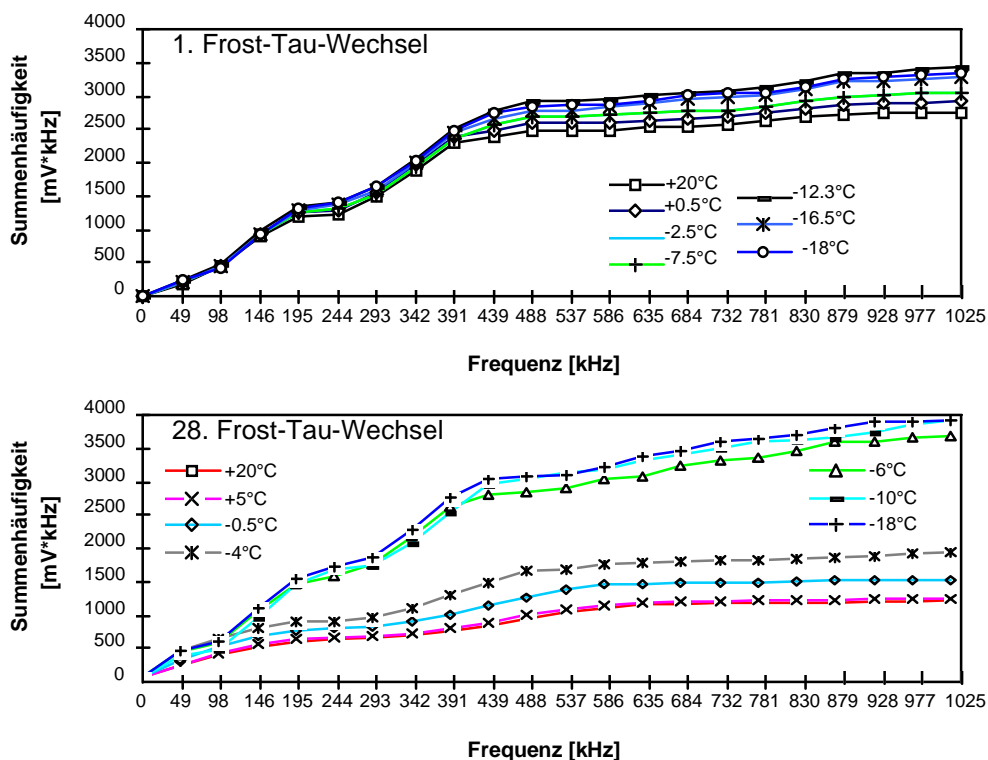


Bild 7: Summenhäufigkeit der Frequenzverteilung aus der Ultraschallfrequenzanalyse

Schallemission

Die Schallemissionsmessung ist mit einem Meßgerät der Fraunhofer Institut für zerstörungsfreie Prüfverfahren (IZFP) durchgeführt worden. Die Meßapparatur besteht aus einer einkanaligen Schallemissionskarte, einem Vorverstärker und einem Sensor und entsprechender Software. Der Messung kann in einem Frequenzbereich zwischen 20 kHz und 1 MHz transiente und kontinuierliche Schallemissionssignale aufzeichnen. Das Bild 8 zeigt im Vergleich die Schallemissionsereignisse und den Temperaturzyklus des Frost-Tau-Wechsels im Stein.

Anhand der obigen Abbildung wird ersichtlich, daß während der Frostphase weitaus mehr Ereignisse emittieren, als während des Tauzyklus. Der Schwerpunkt der Ereignisse liegt bei -13 °C. Während zu Beginn der Prüfung auch Emissionen während der 3 stündigen Haltezeit der Kühltruhe registriert werden, treten nach 28 Frost-Tau-Wechseln kaum noch Emissionen in diesem Temperaturbereich auf. Dieser Sachverhalt könnte darauf zurückgeführt werden, daß im Verlauf der Frostprüfung die Bewegungen im Mikrogefüge abnehmen. Nach 28 Frost-Tau-Wechseln weisen die registrierten Emissionen steigende Energieinhalte während des Gefrierens auf, die zum Ende der gesamten Frostprüfung wieder leicht abnehmen. Mit dieser Prüfmethode ist der zwar Zeitpunkt der Eisbildung bestimmbar, Aussagen über den Grad der inneren Schädigung können aber zum jetzigen Untersuchungszeitpunkt noch nicht getroffen werden.

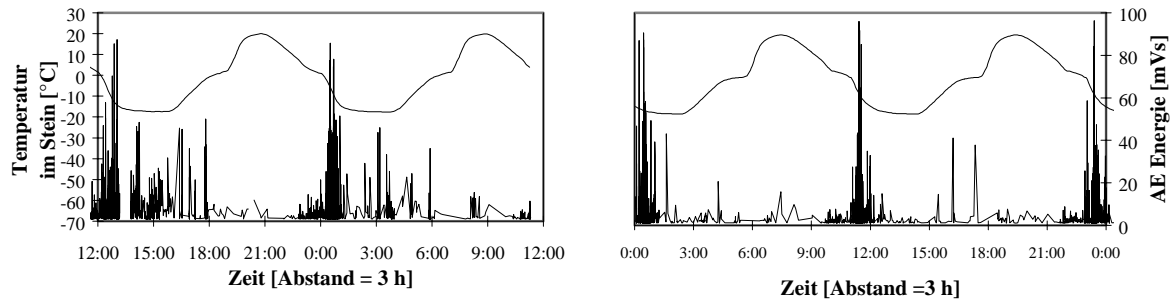


Bild 8: Schallemissionsmessung während des 1. (links) und des 28. Frost-Tau-Wechsels (rechts).

Zusammenfassung

Die zerstörungsfreie Prüfung der inneren Schädigung durch einen Frostangriff lässt sich mit den bekannten Meßmethoden Ultraschalllaufzeit- und Resonanzfrequenzmessung präzise bestimmen. Bei der Beurteilung der Meßgröße müssen die vorliegenden Prüfbedingungen (Feuchte, Temperatur und Probengeometrie) unbedingt berücksichtigt werden. Die Schadensenerzeugung ist mit dem CIF-Test reproduzierbar möglich, so daß bei der Frostprüfung eine höhere Aussagesicherheit erreicht wurde. Zudem wurden neuere zerstörungsfreie Meßmethoden wie die Frequenzanalyse und die Schallemission verwendet, um die Schadensmechanismen während eines Frost-Tau-Wechsels herauszustellen. Mit diesen Meßmethoden kann der Verlauf einer Frostschädigung in der Laborprüfung verdeutlicht werden. Der Schädigungsfortschritt zeigt sich neben der Änderung der Laufzeit und der Resonanzfrequenz durch eine Verschiebung des Frequenzspektrums des Ultraschalls und der Änderung von Schallemissionsereignissen.

Literatur

1. Setzer, M.J. (1998) Micro ice lense formation in concrete. In: Pore solution in hardened cement paste. (eds. F. Wittmann, M.J. Setzer and J. Adolphs), Proceedings of the 3rd Internat. Bolomey Workshop, Essen, Germany.
2. Setzer, M.J. (1997) Basis of testing the freeze-thaw resistance: surface and internal deterioration. In: Frost resistance of concrete (eds. M.J. Setzer and R. Auberg), E & FN Spon, London, pp 157-173.
3. Auberg, R.; Setzer, M.J. (1997) Influence of water uptake during freezing and thawing. In: Frost Resistance of Concrete (eds. M.J. Setzer, R. Auberg), E & FN Spon, London, pp 232-245.
4. Auberg, R. (1998) Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands mit dem CDF- und CIF-Test. Dissertation Universität GH Essen, Shaker Verlag, Aachen.
5. Setzer, M.J.; Auberg, R. (1998) CIF-Test - Method for Testing the Resistance of Concrete against frost. *Concr. Precast. Plant*, 4, 94-106.
6. Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für Schutz und Instandsetzung der Betonbauteile von Wasserbauwerken (Leistungsbereich 219), Ausgabe Mai 1997.
7. RILEM Recommendation for test method for the freeze-thaw resistance of concrete. Tests with sodium chloride solution (CDF). (1996) *Mater. & Struct.*, 29, 523-528.