

Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton

Freeze-thaw-resistance of concrete without and with de-icing salt

Résistance au gel et à la fonte de béton sans et avec sels de dégel

Eberhard Siebel, Düsseldorf

Übersicht

Für Beton mit hohem Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand wurden bisher Grenzwerte für die Zusammensetzung vorgeschrieben (description concept). Durch den vermehrten Einsatz neuer Ausgangsstoffe, nicht erprobter Zusammensetzungen und geänderter Herstellverfahren wird es notwendig, den Frost- und den Frost-Tausalz-Widerstand des Betons unmittelbar anhand einer Prüfung zu beurteilen (performance concept). In der Praxis sind die Beanspruchungen durch Frost und Tausalze sehr unterschiedlich, so daß sie durch ein Prüfverfahren nur näherungsweise simuliert werden können. Daher sind Prüfverfahren für den Frost- und den Frost-Tausalz-Widerstand des Betons lediglich eine Konvention, mit der man vergleichend feststellen kann, ob ein Beton einen hohen, einen mittleren oder einen niedrigen Widerstand aufweist.

Ein verhältnismäßig einfach zu handhabendes und in einem eingeübten Labor gut reproduzierbares Prüfverfahren ist das Würfelverfahren - Einfrieren und Auftauen von 10cm-Würfeln in Wasser bzw. in 3%iger NaCl-Lösung. Mit ihm kann sowohl das oberflächliche Abwittern als auch eine tieferegehende Gefügestörung beurteilt werden. Untersuchungen haben ergeben, daß die Ergebnisse des Würfelverfahrens mit den Erfahrungen über das Verhalten des Betons bei einem Frost- bzw. Frost-Tausalz-Angriff in der Praxis in relativ gutem Einklang stehen.

Abstract

Limits used to be specified for the composition of concrete with a high freeze-thaw-resistance with and without de-icing salt (description concept). Because of increased use of new basic materials, untried compositions and changed methods of production it has become necessary to make direct assessments of the freeze-thaw-resistance of concrete by testing (performance concept). The stresses caused by freezing and thawing and de-icing salt under practical

conditions are very varied, so they can only be simulated approximately by a test method. Methods for testing the freeze-thaw-resistance are therefore only a convention for establishing in comparative terms whether a concrete has a high, medium or low resistance.

A test method which is relatively simple to carry out and gives good reproducibility in an experienced laboratory is the cube method — freezing and thawing 10 cm cubes in water or 3% NaCl-solution. It can be used to assess scaling as well as any deeper damage to the internal structure.

Investigations have shown that the results of the cube method are relatively consistent with practical experience of the behaviour of concrete when attacked by freezing and thawing with and without de-icing salt.

Abrégé

Des valeurs limites de composition (description concept) ont été prescrites pour les bétons présentant des valeurs de résistance au gel sans et avec sels de dégel. L'utilisation toujours plus fréquente de produits de base nouveaux, des compositions non-évaluées et des méthodes de productions modifiées rendront nécessaire le contrôle direct de la résistance au gel du béton sans et avec sels de dégel sur la base d'un essai (performance concept). Les sollicitations dues au gel et aux sels de dégel sont très différentes dans la pratique, de sorte qu'elles ne peuvent être simulées que de manière approximative par une méthode d'essais. Ceci fait que les méthodologies d'essais de la résistance au gel de béton sans et avec sels de dégel ne représentent qu'une convention permettant de constater comparativement si un béton présente une valeur de résistance élevée, moyenne ou faible.

Il existe une méthode de test relativement simple à réaliser et qui fournit une bonne répétitivité dans un laboratoire expérimenté, la méthode du cube — congélation et fonte de cubes de 10 cm dans l'eau ou dans une solution de NaCl à 3%. Il sert à évaluer tant la décomposition que tout endommagement plus profond de la structure interne.

Des recherches ont montré que les résultats de la méthode du cube se recouvrent relativement bien avec les expériences pratiques portant sur le comportement du béton lors de son attaque par le gel et la fonte, sans et avec sels de dégel.

1 Einleitung

Neben der Tragfähigkeit sind insbesondere die Dauerhaftigkeit der Bauwerke und damit die Baustoffe, die für ihre Herstellung verwendet werden, von großer Bedeutung. Wenn Bauwerke und deren Bauteile Witterungseinflüssen unmittelbar ausgesetzt sind, dann setzt Dauerhaftigkeit einen ausreichenden Frost- und in bestimmten Fällen — vorrangig im Straßenbau — einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand während der gesamten Nutzungsdauer voraus. Hierfür müssen die Anforderungen an Ausgangsstoffe, Betonzu-

sammensetzung und -herstellung eingehalten werden, die in Normen und Vorschriften festgelegt wurden (description concept). Beim Einsatz neuer Ausgangsstoffe, nicht erprobter Zusammensetzungen oder Herstellverfahren muß eine Prüfung der geforderten Eigenschaften wie die eines hohen Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes möglich sein (performance concept). Das gilt auch für die Überprüfung von geliefertem Beton sowie von Betonwaren und -fertigteilen.

Zur Beurteilung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton wurden zahlreiche Prüfverfahren entwickelt. Eine genaue Modellierung der im Einzelfall vorliegenden Bedingungen in der Praxis durch ein einziges Prüfverfahren ist nicht möglich. Ein geeignetes Verfahren sollte jedoch das praktische Verhalten widerspiegeln. Darüber hinaus sollte es zu möglichst geringen Streuungen führen. Im Prinzip ist ein solches Prüfverfahren eine Konvention, mit der man nicht entscheiden kann, ob der Widerstand in einem speziellen Anwendungsfall ausreichend ist, sondern die es ermöglicht, zwischen hohem, mittlerem und niedrigem Widerstand des Betons gegen Frost- und Frost-Tausalz-Beanspruchung eindeutig zu unterscheiden.

Der Frost- und Frost-Tausalz-Angriff kann bei nicht ausreichendem Widerstand des Betons zu zwei völlig unterschiedlichen Schädigungsarten führen, nämlich zu einem oberflächlichen Abwittern und Abplatzen (scaling) und/oder zu einer tiefer hineinreichenden Gefügestörung des Betons. Ein geeignetes Prüfverfahren sollte beide Schädigungsarten erfassen.

2 Hinweise zum Mechanismus des Frostangriffs

Der Zerstörungsmechanismus, der einem Frostangriff bei nicht ausreichendem Widerstand des Betons folgt, wurde von zahlreichen Wissenschaftlern [1 bis 6] untersucht. Mehrere Effekte, die sich im einzelnen nicht quantifizieren lassen, spielen hierbei eine Rolle. Durch die Volumenvergrößerung des Wassers beim Gefrieren entstehen erhebliche Spannungen im Gefüge des Betons. Da mit abnehmendem Porenradius der Gefrierpunkt des Porenwassers im Beton sinkt, hängt die Beanspruchung u.a. auch von der Porengrößenverteilung im Beton ab. Diese Porenverteilung ändert sich im Laufe der Zeit durch den Hydratationsfortschritt und zusätzlich in der äußeren Zone auch durch die Carbonatisierung. Sowohl die Porenverteilung als auch ihre Änderung hängen von Zement- und Zusatzstoffarten, von dem w/z-Wert und in der äußeren Zone auch von der Nachbehandlung ab.

Bis zu -20°C gefriert maximal 30% des physikalisch gebundenen Wassers. Neben dem hydraulischen Druck durch das gefrierende Wasser entstehen Spannungen durch Oberflächenkräfte an den Feststoffgrenzen und durch Wassertransport im Mikrogefüge. Bei diesen Schädigungsmechanismen spielt der Feuchtegehalt eine entscheidende Rolle. Fagerlund [2] definiert hierzu die „kritische Sättigung“ (siehe Bild 1). Diese ist betonspezifisch und wird erreicht, wenn der Feuchtegehalt so groß ist, daß der Beton in einem oder wenigen Frost-Tau-Wechseln im Labor erheblich geschädigt wird. Fagerlund nimmt an, daß erst dann, wenn der tatsächliche Sät-

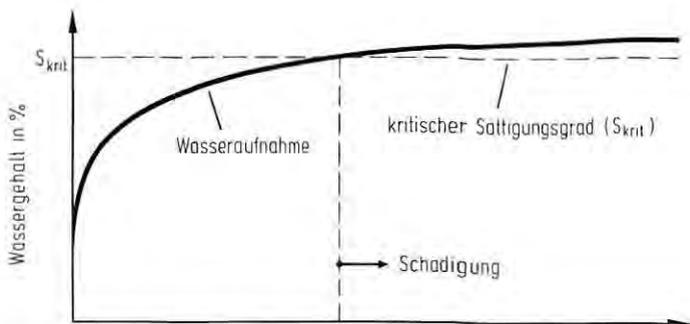


Bild 1 Wasseraufnahme des Betons und kritischer Sättigungsgrad.

Fig. 1 Water absorption by the concrete and critical saturation.

tigungswert eines Betons die kritische Sättigung übersteigt, ein Frostschaden in der Praxis entstehen kann.

Weiterhin können stark unterschiedliche Wärmedehnzahlen von Zementstein und Zuschlag einen Beitrag zur Frostschädigung liefern.

Der zusätzliche Einsatz von Taumitteln bei einem Frostangriff führt zu einer erheblich stärkeren Beanspruchung des Betons. Diese stärkere Beanspruchung kommt u.a. durch osmotischen Druck, durch plötzlichen Wärmeentzug beim Aufstreuen von Salz und durch das zeitlich unterschiedliche Einfrieren verschieden tiefer Schichten des Betons infolge abnehmender Salzkonzentration zustande [1, 7]. Weiterhin stellt sich in Betonen, in die Tausalze eingebracht sind, bei gleicher Umgebungsfeuchte ein höherer Wassergehalt ein. Eine chemische Schädigung durch die normalerweise verwendeten Tausalze kann praktisch ausgeschlossen werden. Bei dem Frost-Tausalz-Angriff handelt es sich in erster Linie um eine Beanspruchung des oberflächennahen Bereiches. Ein über den normalen Frostangriff hinausgehender verstärkter Angriff auf das innere Gefüge des Betons kommt nicht zustande. Deshalb reicht bei der Beurteilung des Frost-Tausalz-Angriffs — anders als beim Frostangriff — im allgemeinen ein Verfahren, das die Oberfläche beansprucht, aus.

Ein Schaden infolge Frostangriff tritt nicht schlagartig auf, sondern nimmt mit zunehmenden Frost-Tau-Wechseln zu. Frost-Tau-Wechsel führen zu lokalen Beanspruchungen, die mit häufig wiederholter Beanspruchung, z.B. aus Verkehr, vergleichbar sind („Dauerschwingbeanspruchung“). Überlagert sich bei dieser wiederholten Beanspruchung durch Frost eine lastbedingte Zugspannung, so tritt eine Schädigung eher ein [8].

Der Verlauf der Schädigung eines Betons, der keinen ausreichenden Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand hat, ist in Bild 2 schematisch dargestellt. Zunächst entsteht eine Phase der Mikroschädigung. In dieser Phase wächst zusätzlich die Beanspruchung an, da durch die Frost-Tau-Wechsel weiteres Wasser in den Beton gepumpt, das Gefüge durch häufige Spannungswechsel beansprucht und bei einem Forst-Tausalz-Angriff zusätzlich in der äußeren Zone



Bild 2 Schädigungsverlauf bei einem Beton mit nicht ausreichendem Widerstand gegen Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand.

Phase 1: Mikroschädigung und Verschärfung der Beanspruchung (Erhöhung des Wassergehaltes, der Lastwechsel und ggf. der Chloridkonzentration).

Phase 2: Makroschädigung: Entstehung von Oberflächen- und/oder Gefügeschäden.

Fig. 2 Progress of damage in a concrete with inadequate freeze-thaw-resistance with and without de-icing salt.

Phase 1: Microdamage and intensification of the stressing (increase in water content, alternating load and, where applicable, chloride concentration).

Phase 2: Macrodamage: Emergence of damage to the surface and/or internal structure.

des Betons Chlorid angereichert wird. Im Verlauf dieser ersten Phase werden die kritische Sättigung und/oder die ertragbaren Lastwechsel erreicht. In der zweiten Phase kommt es dann zu einer Makroschädigung. Sie besteht aus einem oberflächlichen Abwittern und/oder eine Gefügeschädigung. Wird der Beton in gleicher Weise weiterhin stark beansprucht, so können die Gefügeschäden zum endgültigen Zerstören auch tieferliegender Betonbereiche durch Entfestigung führen. Oberflächenschäden schreiten dagegen meist nur allmählich fort; sie können sogar praktisch zum Stillstand kommen, nachdem eine äußere vorgeschädigte Schicht, z.B. durch unzureichende Nachbehandlung, abgewittert ist.

3 Frost- und Frost-Tausalz-Prüfverfahren

3.1 Allgemeines

Die zahlreichen Parameter, die den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand eines Betons beeinflussen, lassen sich nicht alle quantitativ erfassen. Der Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand des Betons kann daher nur aufgrund eines Prüfverfahrens beurteilt werden, das unter Anlehnung an die praktischen Verhältnisse den komplexen

Schädigungsmechanismus integral erfaßt. Ein solches Verfahren stellt somit immer eine Konvention dar. Die mit ihm erzielten Ergebnisse sind keine absoluten Werte, sondern ermöglichen eine relative Bewertung. Das Verfahren muß allerdings so trennscharf sein, daß es eine Unterteilung in niedrigen, mittleren und hohen Widerstand zuläßt. Neben einer einfachen Handhabbarkeit soll es möglichst auch so universell einsetzbar sein, daß mit ihm sowohl das oberflächliche Abwittern als auch eine Gefügestörung erfaßt wird. Weiterhin sollte mit diesem Verfahren sowohl der Frost- als auch der Frost-Tausalz-Widerstand geprüft werden können. Das deutsche Würfelverfahren, das im folgenden genauer beschrieben wird [9], erfüllt diese Anforderungen.

Für eine europäische Normung wurde außer dem Würfelverfahren das schwedische Plattenverfahren [10, 11] vorgeschlagen, das eine Weiterentwicklung der österreichischen Norm [12] darstellt und das in einigen nordischen Ländern häufiger eingesetzt wird. Der Aufwand für dieses Prüfverfahren ist deutlich niedriger als bei anderen Verfahren, was jedoch mit einem größeren Streubereich für die Temperatur erkauft wird. Es muß daher noch geklärt werden, ob die Ergebnisse für ein europäisches Referenzprüfverfahren ausreichend reproduzierbar sind.

Ein weiteres Oberflächenverfahren ist das „Fußbadverfahren“, das von Setzer und Hartmann als CDF-Verfahren zur Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstandes weiterentwickelt wurde [13, 14]. Ähnliche Verfahren wurden von Fagerlund [15], Edelmann [16] und Glatte, Grieger und Schaffner [17] erprobt. Ob sich das CDF-Verfahren, das ursprünglich für den Frost-Tausalz-Widerstand entwickelt wurde, auch für den Frostwiderstand des Betons eignet, und ob damit Gefügestörungen erfaßt werden können, muß noch geklärt werden. Offen ist auch noch, ob die mit diesem Verfahren ermittelten Ergebnisse mit dem Verhalten des Betons in der Praxis hinreichend korrelieren. Die im CDF-Verfahren eingesetzte, relativ aufwendige Kühlung mit einer Kühlflüssigkeit führt zu einer wesentlich genaueren Regelung der Temperaturkurve, was möglicherweise zu einer guten Reproduzierbarkeit beiträgt. Eine solche Art der Kühlung könnte allerdings auch bei anderen Verfahren eingesetzt werden.

3.2 Würfelverfahren

Das Würfelverfahren wird ausführlich in [9] beschrieben. 10cm-Würfel bzw. auch kleinere Würfel oder Bohrkern — die kleinste Abmessung sollte das Vierfache, in Sonderfällen das Dreifache des Größtkorns nicht unterschreiten —, die gesondert hergestellt oder aus Bauteilen und Betonwaren entnommen werden, werden in einem mit Wasser gefüllten Behälter (siehe Bild 3) eingefroren und wieder aufgetaut. Zur Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes wird anstelle des Wassers eine 3%ige NaCl-Lösung verwendet. Nach 10, 25, 50 und gegebenenfalls 100 Frost-Tau-Wechseln wird der Masseverlust durch Wiegen der abgewitterten Bestandteile ermittelt.

Gesondert hergestellte Würfel werden nach der Herstellung wie folgt gelagert: 1 Tag in der Form, 6 Tage unter Wasser (20 ± 2 °C, 20 Tage Klimaraum 20/65 und 1 Tag in der Prüfflüssigkeit (Wasser bzw. 3%ige NaCl-Lösung). Die Prüfung beginnt somit am 28. Tag.

Das Verfahren wurde inzwischen, wie im folgenden dargestellt, so

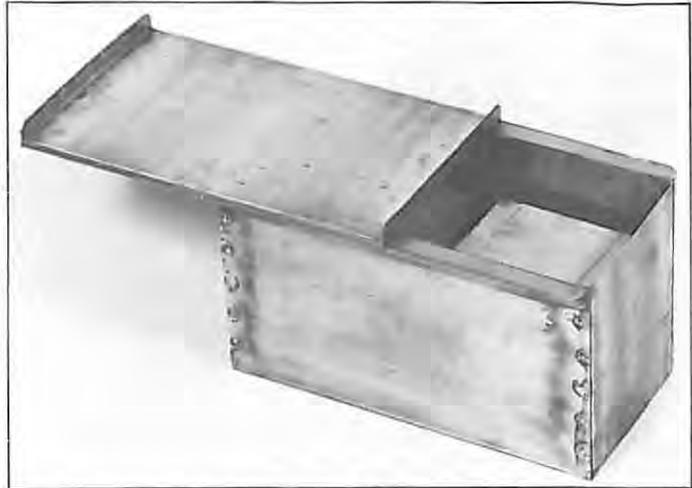


Bild 3 Behälter mit Würfeln für die Frost- bzw. Frost-Tausalz-Prüfung.

Fig. 3 Container with cubes for the freeze-thaw-tests with and without de-icing salt.

weiterentwickelt, daß auch Gefügestörungen ermittelt werden können.*)

Mittels Messen der Schalllaufzeit wird der dynamische E-Modul und seine Änderung durch die Frostbeanspruchung beurteilt.

3.2.1 Geräte

Aufnahmebehälter

Zur Messung der Schalllaufzeit steht der Prüfkörper in einem Behälter, der mit Wasser bzw. 3%iger NaCl-Lösung gefüllt ist (siehe Bilder 4 und 5). Der Behälter mit einer Grundfläche von rd. 130 mm x 150 mm und einer Höhe von rd. 130 mm (jeweils Innenmaße) besteht aus rd. 10 mm dickem Plexiglas. Die Behälterwände sind untereinander verschraubt und die Fugen zusätzlich mit einem wasserbeständigen Klebstoff abgedichtet.

In der Mitte der längeren Seiten befindet sich jeweils eine kreisrunde Öffnung mit einem Durchmesser von 52 mm zur Aufnahme der Meßsonden des Ultraschallmeßgerätes. In die Öffnungen sind zur Abdichtung je zwei Radial-Wellendichtringe eingearbeitet, um eine vollständige Abdichtung gegen das Austreten von Wasser bzw. Lösung nach dem Einführen der Meßsonden zu gewährleisten. Auf dem Behälterboden liegt ein ca. 15 mm hoher Plastikrost.

Ultraschallmeßgerät

Zur Messung wird ein Gerät verwendet, mit dem die Geschwindigkeit von Ultraschall-Longitudinalwellen im Beton gemessen werden

*) An der Ausarbeitung des Verfahrens zur Bestimmung der Gefügestörung und an den zugehörigen Versuchen war Herr Dipl.-Ing. Reschke maßgeblich beteiligt.

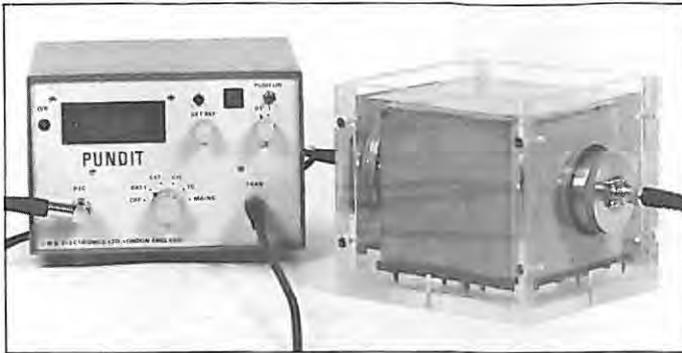


Bild 4 Behälter aus Plexiglas zur Aufnahme eines Würfels und Gerät zur Bestimmung der Schalllaufzeit.

Fig. 4 Container made of Plexiglass for holding a cube, and equipment for measuring the sound transit time.

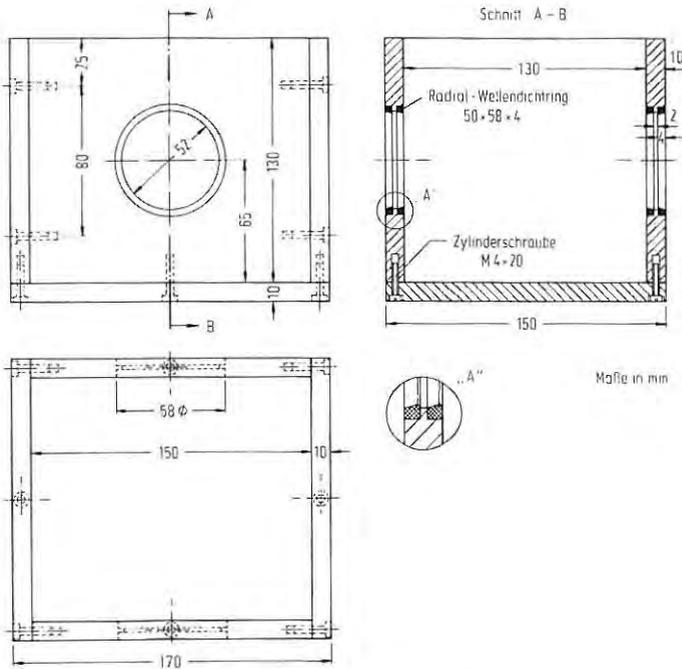


Bild 5 Ausführungszeichnung des Behälters aus Plexiglas zur Bestimmung der Schalllaufzeit an Würfeln.

Fig. 5 Detailed drawing of the Plexiglass container for determining the sound transit time in cubes.

kann (E DIN ISO 8047 in [9]). Der Frequenzbereich des Gerätes soll zwischen 40 und 60 kHz liegen.

3.2.2 Prüfung

Im Alter von 28 Tagen wird zusätzlich zur Massebestimmung die Laufzeit des Ultraschalls durch den Würfel gemessen. Die Würfel werden auf den Bodenrost des Behälters gestellt und die Meßsonden des Ultraschallmeßgerätes in die seitlichen Behälteröffnungen eingeführt. Sind die Öffnungen auf diese Art verschlossen, wird der Behälter bis etwa 1 cm über die Oberfläche des Würfels mit Wasser bzw. 3%iger NaCl-Lösung aufgefüllt. Die Meßsonden werden an den Würfel angedrückt. Als Kopplungsmittel dient somit das Wasser bzw. die 3%ige NaCl-Lösung. Es wird eine Frequenz von rd. 50kHz eingestellt. Zur Prüfung weiterer Proben kann die Flüssigkeit im Prüfbehälter verbleiben, wenn die Prüfsonden nicht ganz herausgezogen werden.

Die Messung der Ultraschalllaufzeit wird nach 10, 25, 50 und ggf. 100 Frost-Tau-Wechseln an den von den losen Abwitterungen befreiten Würfeln wiederholt. Da sich durch Abfroston die Dimensionen der Würfel ändern können, ist zusätzlich die Länge der Durchschallungstrecke mittels einer Schieblehre zu bestimmen.

Der dynamische E-Modul nach 10, 25, 50 und ggf. 100 Frost-Tau-Wechseln wird bezogen auf den am 28. Tag nach der Herstellung (vor Frostbeanspruchung).

$$\text{rel } E_{\text{dyn } n \text{ FTW}} = E_{\text{dyn } n \text{ FTW}} / E_{\text{dyn28}} \cdot 100 \text{ in } \%$$

rel E_{dyn} : relativer dynamischer Elastizitätsmodul (E-Modul)

n : Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (FTW)

E_{dyn28} : dynamischer E-Modul im Alter von 28 Tagen
(vor Beginn der Frostprüfung)

$E_{\text{dyn } n \text{ FTW}}$: dynamischer E-Modul nach n FTW

Für die Berechnung des dynamischen E-Moduls gilt:

$$E_{\text{dyn}} = v^2 \cdot \rho_B (1 + \mu) (1 - 2\mu) / (1 - \mu) \text{ in } \text{N/mm}^2$$

$$v = l/t$$

ρ_B : Rohdichte des Betons in kg/m^3

v : Ultraschallgeschwindigkeit in km/s

l : Durchschallungslänge in mm

t : Laufzeit in μs

Unter Vernachlässigung der Änderung der Rohdichte kann daher vereinfacht werden:

$$\text{rel } E_{\text{dyn } n \text{ FTW}} = (v_{n \text{ FTW}}^2 / v_{28}^2) \cdot 100 \text{ in } \%$$

4 Versuche

Bei Untersuchungen des Forschungsinstituts der Zementindustrie, bei denen u.a. der Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand unterschiedlicher Betone beurteilt werden sollte, wird seit rd. 20 Jahren das

Würfelverfahren eingesetzt (siehe u.a. [18 bis 23]). Für diese Laborversuche wurde als Zuschlag im allgemeinen Rheinkiesand 0 bis 32 mm aus dem Raum Düsseldorf, Quarzmehl 0 bis 0,25 mm und Quarzsand 1 bis 2 mm aus dem Raum Köln verwendet. Die Sieblinien lagen für die Frostversuche i.a. im Bereich zwischen B und C der Sieblinienbilder der DIN 1045 und für die Frost-Tausalz-Versuche zwischen A und B; das Größtkorn betrug 16 oder 32 mm. Zur Erzielung eines hohen Frost-Tausalz-Widerstandes wurde dem Beton ein Luftporenbildner in der Menge zugesetzt, daß die Anforderungen des Merkblattes Luftporenbeton [24] an den Luftgehalt des Frischbetons je nach Größtkorn des Zuschlags und Konsistenz erfüllt wurden. Hiermit wurden die Grenzen für die Luftporenkennwerte des Festbetons: Abstandsfaktor $\leq 0,20\text{mm}$ und Mikro-Luftporengehalt $\geq 1,5\%$ eingehalten. In weiteren Versuchen wurden Fließmittel eingesetzt bzw. geringere Frischbeton-Luftgehalte gewählt, um auch bei Betonen, die den Anforderungen nicht entsprechen, den Frost-Tausalz-Widerstand mit dem Würfelverfahren zu ermitteln.

Die gesondert hergestellten Würfel wurden, wie in Abschnitt 3.2 beschrieben, gelagert. Die Untersuchungen zur Ermittlung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstandes wurden mit dem Würfelverfahren [9] in automatisch gesteuerten Baustoffprüftruhen durchgeführt. Die Truhen sind so ausgerüstet, daß die Temperatur in der Mitte der Würfel an unterschiedlichen Plätzen der Truhen während des Abkühlvorgangs innerhalb des vorgegebenen Bereiches blieb. Die Minimaltemperatur von -15°C wurde stets auf $\pm 1^{\circ}\text{C}$ eingehalten.

5 Ergebnisse

5.1 Frost-Widerstand

Bevor ein Prüfverfahren zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit festgelegt wird, ist zu klären, inwieweit es die Erfahrung der Praxis widerspiegelt. Es ist bekannt, daß der Frostwiderstand des Betons mit steigender Festigkeit zunimmt, wenn sachgerechte Ausgangsstoffe verwendet werden. Dies muß sich daher auch bei der Laborprüfung des Frostwiderstandes widerspiegeln. Hierzu wurden Betone mit Portlandzementen unterschiedlicher Festigkeitsklassen und mit unterschiedlichen w/z-Werten hergestellt. Die somit erzielten unterschiedlichen Festigkeiten lagen zwischen 30 und 63N/mm^2 . Die Ergebnisse sind in Bild 6 dargestellt. Es ergibt sich ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Frostwiderstand, dargestellt als Gewichtsverlust, und der Druckfestigkeit des Betons. Sofern die Druckfestigkeit (10-cm-Würfel) 45N/mm^2 überschritt, wies der Beton stets einen sehr hohen Frostwiderstand auf (Gewichtsverlust $\leq 5\%$ nach 100 FTW).

Einen weiteren Vergleich des im Labor ermittelten Frostwiderstandes mit dem in der Praxis zeigt Bild 7 [19]. Aus fünf Kühltürmen wurden Bohrkerne ($\varnothing 10\text{cm}$, $l = 20\text{cm}$) von der Innenseite der Kühlturmschalen entnommen. Diese Innenseiten, die einer erheblichen Frostbeanspruchung bei starker Durchfeuchtung ausgesetzt sind, wiesen zum Teil keine, zum Teil starke Schäden in Form von kleinen und ebenso von großflächigen Abplatzungen auf. Die visuelle Eingruppierung der Schäden durch den Betreiber ist in Bild 7 auf der rechten Seite enthalten. Während der an den Bohrkernen

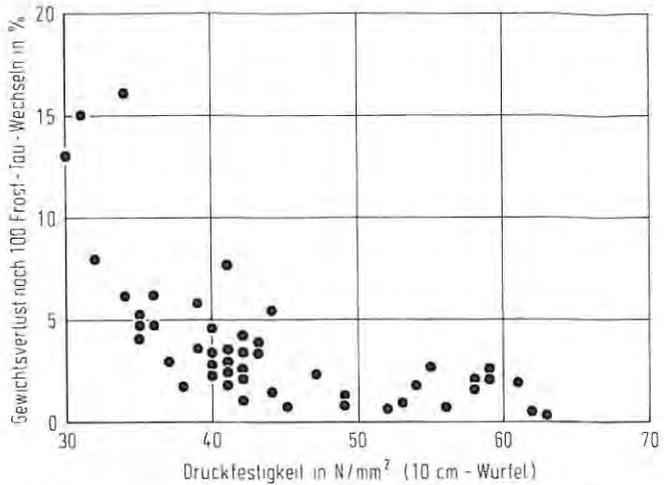


Bild 6 Gewichtsverlust nach 100 Frost-Tau-Wechseln bei der *Frostprüfung* von Betonen mit Portlandzementen unterschiedlicher Festigkeitsklassen und mit unterschiedlichen w/z-Werten in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit der 10-cm-Würfel.

Fig. 6 Weight loss after 100 freeze-thaw cycles during *freeze-thaw-tests (without de-icing salt)* on concretes made with Portland cements of different strength classes and with different water/cement ratios, as a function of the compressive strength of the 10-cm-cube.

durchgeführten Laboruntersuchungen war einer der Kühltürme (Nr. 5) noch nicht in Betrieb. In dem Bild sind die Gewichtsverluste der Würfelprüfung in Wasser von 10 bis 50 Frost-Tau-Wechseln aufgetragen. Der Gewichtsverlust, der bei den ersten 10 Wechseln auftrat, wurde nicht berücksichtigt, da einige Betone an der Oberfläche eine Vorschädigung aufwiesen, die in die Beurteilung nicht eingehen sollte. Die Ergebnisse zeigen, daß zwischen hohem und nicht ausreichendem Frostwiderstand des Betons eindeutig unterschieden werden kann und daß die im Labor erzielten Ergebnisse mit dem Schadensbild der Praxis gut übereinstimmen.

Mit dem Würfelverfahren können nicht nur unterschiedliche Betonzusammensetzungen, sondern auch verschiedene Ausgangsstoffe, wie z.B. noch nicht erprobte Zemente, Zusatzstoffe, Zusatzmittel und Zuschläge, hinsichtlich ihres Einflusses auf den Frostwiderstand des Betons untersucht werden [20, 21, 23]. Aus den Untersuchungen im Forschungsinstitut der Zementindustrie an unterschiedlich zusammengesetzten Betonen, über deren Verhalten in der Praxis Erfahrungen vorliegen, lassen sich Grenzwerte für einen ausreichenden Frost-Widerstand des Betons ableiten. Bei Prüfung mit dem Würfelverfahren sollte aufgrund dieser Erkenntnisse der Gewichtsverlust nach 50 Frost-Tau-Wechseln 5% und nach 100 Frost-Tau-Wechseln 10% nicht überschreiten. Für sehr starken Frostangriff, wie er z.B. in Wasserwechselzonen zu erwarten ist, können diese Höchstwerte auf 3% nach 50 bzw. 5% nach 100 Frost-Tau-Wechseln begrenzt werden.

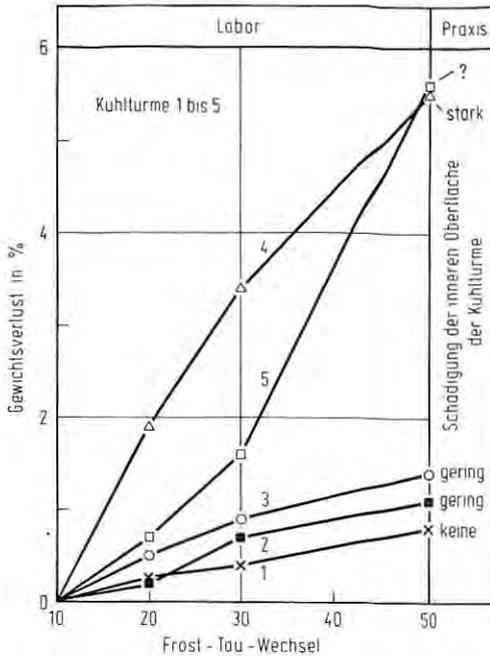


Bild 7 Gewichtsverlust von Bohrkernen aus Kühltürmen bei der *Frostprüfung* und die Schädigung der Kühltürme in der Praxis.

Fig. 7 Weight loss of drill cores from cooling towers during *freeze-thaw-tests (without de-icing salt)* and the damage to the cooling towers under practical conditions.

Durch einen Frostangriff kann nicht nur der oberflächennahe Bereich, sondern auch das Gefüge des darunterliegenden Betons gestört werden. Es gibt einige Fälle, bei denen zunächst eine Gefügestörung eintritt, ohne daß sich ein stärkeres Abwittern bemerkbar macht. Umgekehrt besteht die Möglichkeit, daß ein Abwittern auftritt, ohne daß das darunterliegende Gefüge gestört wird. Zur Klärung dieser Vorgänge wird bei dem Würfelverfahren in letzter Zeit neben dem Gewichtsverlust auch — wie in 3.2.2 beschrieben — der relative dynamische E-Modul ermittelt. Bild 8a zeigt erste Ergebnisse. Zwischen dem relativen dynamischen E-Modul und dem Gewichtsverlust gibt es im allgemeinen einen recht guten Zusammenhang. Wie aus früheren Versuchen bekannt ist [19], ist dieser Zusammenhang jedoch nicht immer gegeben. Eine zusätzliche Prüfung des dyn. E-Moduls sollte deshalb immer durchgeführt werden. Die bisherigen Untersuchungen reichen noch nicht aus, um für einen ausreichenden Frost-Widerstand den Grenzwert für den rel. dyn. E-Modul festzulegen.

5.2 Frost-Tausalz-Widerstand

Auch für die Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstandes eines Betons war eine Anbindung der Laborergebnisse an das praktische

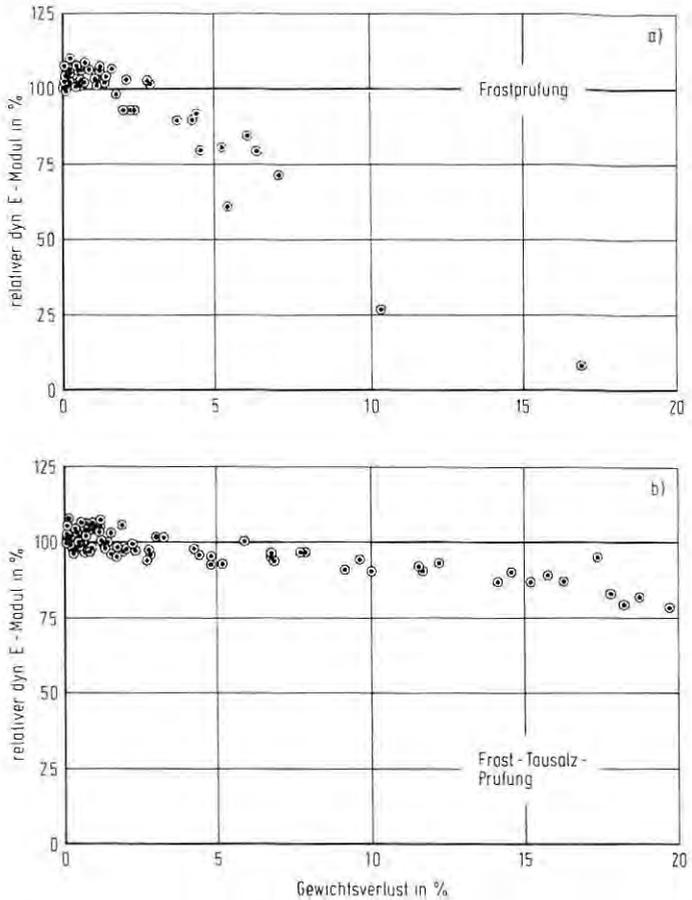


Bild 8 Relativer dynamischer Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von dem Gewichtsverlust unterschiedlich zusammengesetzter Betone bei
 a) der Frostprüfung,
 b) der Frost-Tausalz-Prüfung.

Fig. 8 Relative dynamic modulus of elasticity as a function of the weight loss in concretes of different compositions during
 a) freeze-thaw-tests without de-icing salt
 b) freeze-thaw-tests with de-icing salt.

Verhalten notwendig. In der Praxis ist es unbestritten, daß für einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand ein sachgerecht hergestellter Luftporenbeton erforderlich ist, sofern nicht ein erdfuchter Beton mit einem w/z -Wert $< 0,40$ verwendet wird. Es wurden deshalb mit unterschiedlichen Zementen Luftporenbetone und Betone ohne Luftporen ($w/z > 0,40$) hergestellt und mit dem Würfelverfahren — Einfrieren in 3%iger NaCl-Lösung — geprüft. Bild 9 gibt die Ergebnisse wieder, die mit den praktischen Erfahrungen gut übereinstimmen. Für

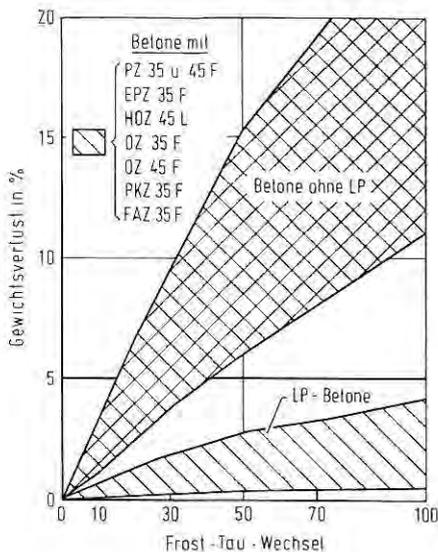


Bild 9 Gewichtsverlust bei der Frost-Tausalz-Prüfung von Betonen mit und ohne ausreichendem Luftporengehalt und mit unterschiedlichen Zementen.

Fig. 9 Weight loss during freeze-thaw-tests with de-icing salt on concretes with and without adequate air-void content and made with different cements.

Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand sollte bei dem Würfelverfahren der Gewichtsverlust nach 50 Frost-Tau-Wechseln 3% und nach 100 Frost-Tau-Wechseln 5% nicht übersteigen. Bei Betonen mit sehr starkem Frost-Tausalz-Angriff, z.B. für Betonfahrbahndecken, sollte der Wert auf 2% nach 50 und 3% nach 100 Frost-Tau-Wechseln begrenzt werden.

Mit dem Frost-Tausalz-Prüfverfahren wurden auch die Grenzen für die Luftporenkennwerte überprüft. Bild 10 enthält stellvertretend hierfür die Abhängigkeit des Gewichtsverlustes vom Mikro-Luftporengehalt L300 [24]. Da nicht nur der Mikro-Luftporengehalt L300, sondern auch die übrige Betonzusammensetzung einen Einfluß auf den Frost-Tausalz-Widerstand hat, gibt es zwischen dem Mikro-Luftporengehalt L300 und dem Gewichtsverlust der Würfel zwar keine strenge Korrelation, die Untersuchungen ergaben jedoch, daß bei einem Mikro-Luftporengehalt von $\geq 1,5\%$ der Gewichtsverlust nach 100 Frost-Tau-Wechseln immer unter 5% blieb.

Das Würfelverfahren ist auch geeignet, Betonwaren aus steifen Betonen mit w/z-Werten von $< 0,40$ hinsichtlich des Frost-Tausalz-Widerstandes zu überprüfen. Im Rahmen eines europäischen Forschungsprogramms und darüber hinausgehender Versuche im Forschungsinstitut ergaben sich die in Bild 11 dargestellten Versuchsergebnisse [22]. Die Ergebnisse belegen, daß die Druckfestigkeit für die Betonwaren häufig für die Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstandes ausreicht, daß es jedoch Pflastersteine geben kann, die trotz hoher Festigkeit keine ausreichende Dauerhaftigkeit haben. Als Schadensursache wurden bei den beiden Betonen, die trotz hoher Festigkeit stark abwitterten, ungeeignete Zuschlagverhältnisse ermittelt, die zwar eine hohe Festigkeit, aber nur geringen Frost-Tausalz-Widerstand bewirkten. Hieraus ist ersichtlich, daß eine Überprüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes im Rahmen der Eigen- und Fremdüberwachung von Betonwaren sinnvoll ist.

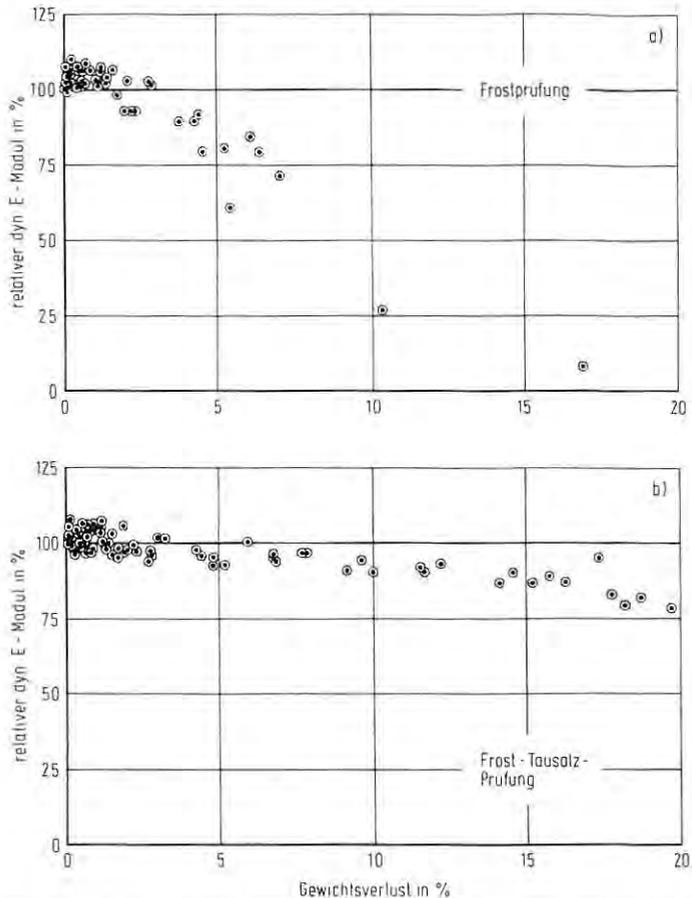


Bild 8 Relativer dynamischer Elastizitätsmodul in Abhängigkeit von dem Gewichtsverlust unterschiedlich zusammengesetzter Betone bei
a) der Frostprüfung,

b) der Frost-Tausalz-Prüfung.

Fig. 8 Relative dynamic modulus of elasticity as a function of the weight loss in concretes of different compositions during

a) freeze-thaw-tests without de-icing salt

b) freeze-thaw-tests with de-icing salt.

Verhalten notwendig. In der Praxis ist es unbestritten, daß für einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand ein sachgerecht hergestellter Luftporenbeton erforderlich ist, sofern nicht ein erdfechter Beton mit einem w/z -Wert $< 0,40$ verwendet wird. Es wurden deshalb mit unterschiedlichen Zementen Luftporenbetone und Betone ohne Luftporen ($w/z > 0,40$) hergestellt und mit dem Würfelverfahren — Einfrieren in 3%iger NaCl-Lösung — geprüft. Bild 9 gibt die Ergebnisse wieder, die mit den praktischen Erfahrungen gut übereinstimmen. Für

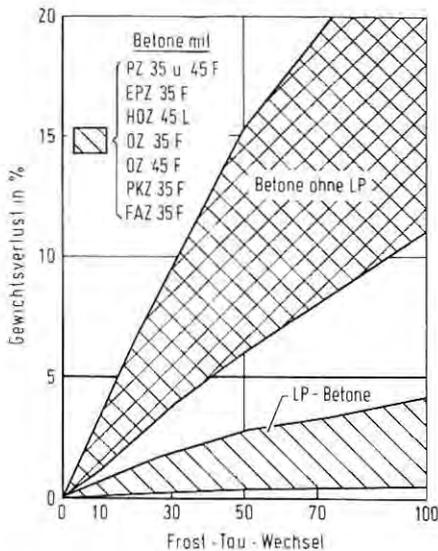


Bild 9 Gewichtsverlust bei der Frost-Tausalz-Prüfung von Betonen mit und ohne ausreichendem Luftporengehalt und mit unterschiedlichen Zementen.

Fig. 9 Weight loss during freeze-thaw-tests with de-icing salt on concretes with and without adequate air-void content and made with different cements.

Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand sollte bei dem Würfelverfahren der Gewichtsverlust nach 50 Frost-Tau-Wechseln 3% und nach 100 Frost-Tau-Wechseln 5% nicht übersteigen. Bei Betonen mit sehr starkem Frost-Tausalz-Angriff, z.B. für Betonfahrbahndecken, sollte der Wert auf 2% nach 50 und 3% nach 100 Frost-Tau-Wechseln begrenzt werden.

Mit dem Frost-Tausalz-Prüfverfahren wurden auch die Grenzen für die Luftporenkennwerte überprüft. Bild 10 enthält stellvertretend hierfür die Abhängigkeit des Gewichtsverlustes vom Mikro-Luftporengehalt L300 [24]. Da nicht nur der Mikro-Luftporengehalt L300, sondern auch die übrige Betonzusammensetzung einen Einfluß auf den Frost-Tausalz-Widerstand hat, gibt es zwischen dem Mikro-Luftporengehalt L300 und dem Gewichtsverlust der Würfel zwar keine strenge Korrelation, die Untersuchungen ergaben jedoch, daß bei einem Mikro-Luftporengehalt von $\geq 1,5\%$ der Gewichtsverlust nach 100 Frost-Tau-Wechseln immer unter 5% blieb.

Das Würfelverfahren ist auch geeignet, Betonwaren aus steifen Betonen mit w/z-Werten von $< 0,40$ hinsichtlich des Frost-Tausalz-Widerstandes zu überprüfen. Im Rahmen eines europäischen Forschungsprogramms und darüber hinausgehender Versuche im Forschungsinstitut ergaben sich die in Bild 11 dargestellten Versuchsergebnisse [22]. Die Ergebnisse belegen, daß die Druckfestigkeit für die Betonwaren häufig für die Beurteilung des Frost-Tausalz-Widerstandes ausreicht, daß es jedoch Pflastersteine geben kann, die trotz hoher Festigkeit keine ausreichende Dauerhaftigkeit haben. Als Schadensursache wurden bei den beiden Betonen, die trotz hoher Festigkeit stark abwitterten, ungeeignete Zuschlagverhältnisse ermittelt, die zwar eine hohe Festigkeit, aber nur geringen Frost-Tausalz-Widerstand bewirkten. Hieraus ist ersichtlich, daß eine Überprüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes im Rahmen der Eigen- und Fremdüberwachung von Betonwaren sinnvoll ist.

Auch bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes wurde bei einigen Versuchen der relative dynamische E-Modul ermittelt. In Bild 8b sind sowohl weiche Betone mit und ohne Luftporen als auch einige Proben von Pflastersteinen enthalten. Es ergibt sich wiederum ein verhältnismäßig guter Zusammenhang zwischen dynamischem E-Modul und Gewichtsverlust. Der Abfall des E-Moduls bei stärkerer Abwitterung ist jedoch wesentlich geringer als bei der Prüfung des Frostwiderstandes (siehe Bild 8a). Dies deutet darauf hin, daß eine Frost-Tausalz-Belastung in erster Linie den oberflächennahen Bereich angreift, bei dem das Gefüge im Inneren im allgemeinen nicht geschädigt wird, während durch den reinen Frost-Tau-Angriff im allgemeinen bei Beton mit nicht ausreichendem Widerstand auch tiefere Bereiche erfaßt werden.

5.3 Versuchsstreuung des Würfelfahrens

In einem deutschen und in einem europäischen Ringversuch wurde das Würfelfahren eingesetzt. Es ergab sich, daß die beteiligten Institute eindeutig zwischen Beton mit hohem und niedrigem Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand unterscheiden konnten. Die Absolutwerte für den Gewichtsverlust, die in den einzelnen Instituten ermittelt wurden, wichen jedoch stärker voneinander ab. Danach eignet sich das Verfahren auf jeden Fall in jedem Labor für vergleichende Untersuchungen, die dann an einem Beton mit erfahrungsgemäß hohem Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand kalibriert werden können. Zur endgültigen Festlegung eines absoluten Grenzwertes muß die Vergleichsstreuung zwischen verschiedenen Prüfanstalten noch verbessert werden.

In eingeübten Laboratorien ist die Prüfstreuung des Würfelfahrens sehr gering, wie aus den entsprechenden Untersuchungen im Forschungsinstitut der Zementindustrie hervorgeht, bei denen mehrere Prüfkörper aus derselben Betonmischung einbezogen wurden. Dazu wurden von vier unterschiedlich zusammengesetzten Betonen je sechs 10-cm-Würfel in 3%iger NaCl-Lösung mit dem Würfelfahren geprüft. Wie vorgeschrieben, wurden immer zwei Würfel in einem Behälter eingefroren und der Gewichtsverlust der beiden Würfel zusammen ermittelt. Tafel 1 enthält die aufgeschlüsselten Versuchsergebnisse, aus denen hervorgeht, daß bei allen Betonen zu allen Prüfterminen die Unterschiede zwischen Einzel- und Mittelwert äußerst gering sind.

6 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Will man den Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand von Beton als kennzeichnende Materialeigenschaft (performance concept) erfassen, so setzt dies ein geeignetes Prüfverfahren voraus, durch das man eine Unterteilung in hohen, mittleren und niedrigen Widerstand zuverlässig vornehmen kann. Ein solches Verfahren, das einfach zu handhaben und universell einsetzbar sein sollte, kann seinem Wesen nach nur eine Konvention darstellen.

6.1 Mit dem beschriebenen Würfelfahren, das einfach zu handhaben ist, kann sowohl der Frost- als auch der Frost-Tausalz-Widerstand geprüft werden. Anhand der abgewitterten Bestandteile kön-

Tafel 1 Einzel- und Mittelwerte für den Gewichtsverlust unterschiedlicher Betone bei Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes

Table 1 Freeze-thaw-tests with de-icing salt of different concretes — single and mean of the weight loss.

Beton	Probe	Gewichtsverlust in % nach ... Frost-Tau-Wechseln			
		7	14	28	56
1	1	0,0	0,1	0,1	0,1
	2	0,1	0,1	0,1	0,2
	3	0,0	0,0	0,1	0,1
	Mittel	0,0	0,1	0,1	0,1
2	1	0,7	1,5	2,4	3,5
	2	0,8	1,6	2,5	3,5
	3	0,4	0,9	1,6	2,4
	Mittel	0,6	1,3	2,1	3,1
3	1	0,7	1,4	2,7	5,0
	2	0,8	1,5	2,5	4,3
	3	0,8	1,6	2,9	5,1
	Mittel	0,8	1,5	2,7	4,8
4	1	1,9	5,3	10,1	15,6
	2	1,5	4,9	9,6	15,7
	3	1,8	5,3	10,2	15,7
	Mittel	1,7	5,2	10,0	15,7

nen unterschiedliche Betone in eine hohe, eine mittlere und eine geringe Widerstandsklasse eingeteilt werden.

6.2 Während das Würfelverfahren in gut eingeübten Laboratorien nur geringe Prüfstreuungen aufweist, die bereits jetzt eine vergleichende Beurteilung ermöglichen, muß die Vergleichsstreuung zwischen verschiedenen Laboratorien noch verbessert werden, wenn man absolute Grenzwerte für die Widerstandsklassen festlegen will.

6.3 Die Ergebnisse des Würfelverfahrens, das die in der Praxis vorkommenden Schädigungsmechanismen vergleichsweise gut erfaßt, stehen mit dem Verhalten des Betons in der Praxis in einer guten Relation.

6.4 Neuere Untersuchungen, die noch fortgeführt werden, haben gezeigt, daß auch innere Gefügestörungen während des Frostangriffs mittels des dynamischen E-Moduls erkannt werden können.

6 Summary and conclusions

If the freeze-thaw-resistance of concrete with and without de-icing salt is to be measured as a characteristic material property (performance concept) then this requires a suitable test method for making reliable classifications into high, medium and low resistance. By its

nature such a method, which should be simple to carry out and universally applicable, can only represent a convention.

6.1 The cube test method described is simple to perform and can be used to test the freeze-thaw-resistance with and without de-icing salt. Different concretes can be divided into high, medium and low resistance classes with the aid of the scaled material.

6.2 In highly experienced laboratories the curve test gives only a small dispersion of the test results, making comparative assessment a possibility even at this stage; but the reproducibility between different laboratories needs further improvement if absolute limiting values are to be specified for the resistance classes.

6.3 The results of the cube method agrees well with the behaviour of the concrete under practical conditions.

6.4 More recent investigations which are still in progress have shown that it is also possible to detect damage to the internal structure during freeze-thaw-attack by using the dynamic modulus of elasticity.

SCHRIFTTUM / LITERATURE

- [1] Internationales Kolloquium: Frostbeständigkeit von Beton. Mitteilungen aus dem Forschungsinstitut des Vereins der Österreichischen Zementfabrikanten, Heft 33, Wien 1980.
- [2] Fagerlund, G.: The critical degree of saturation method assessing the freeze-thaw resistance of concrete. *Materials and Structure* 10 (1977), Nr. 58, S. 217/229.
- [3] Setzer, M.J.: Einfluß des Wassergehaltes auf die Eigenschaften des erhärteten Betons. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Heft 280, Beuth-Verlag Berlin 1977.
- [4] Gräf, H.: Über die Porosität und die Durchlässigkeit von Zementstein, Mörtel und Beton und ihren Einfluß auf Gebrauchseigenschaften von Beton. Dissertation Universität Essen, 1988.
- [5] Litvan, G.G.: The Mechanism of Frost Action in Concrete — Theory and Practical Implications. Proceedings of Workshop on Low Temperature Effects on Concrete September 5-9, 1988 Sapporo, Japan.
- [6] Setzer, M.J.: Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. 36. Ulmer Beton- und Fertigteiltage 1992, S. 55/65.
- [7] Springenschmid, R.: Grundlagen und Praxis der Herstellung und Überwachung von Luftporenbeton. *Zement und Beton* 47 (1969) H. 1, S. 19/25.
- [8] Weigler, H.: Beton bei häufig wiederholter Beanspruchung. *beton* 31 (1981) H. 5, S. 189/194.
- [9] Prüfung von Beton. Empfehlungen und Hinweise als Ergänzungen zu DIN 1048. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton. Heft 422, Beuth-Verlag Berlin 1991.
- [10] Swedish Standard SS 137244. Concrete testing - Hardened concrete - Frost resistance.
- [11] Petersson, P.-E.: The use of air-entraining and plasticizing admixtures for producing concrete with good salt-frost resistance. Swedish National Testing Institute. Report 1989:37.
- [12] ÖNORM B 3306: Prüfung der Frost-Tausalz-Beständigkeit von vorgefertigten Betonerzeugnissen. Österreichisches Normungsinstitut Wien.

- [13] Setzer, M.J., und V. Hartmann: Verbesserung der Frost-Tausalz-Widerstands-Prüfung. Betonwerk und Fertigteil-Technik 57 (1991) H. 9, S. 73/82.
- [14] Setzer, M.J., und V. Hartmann: CDF-Test Prüfvorschrift. Betonwerk und Fertigteil-Technik 57 (1991), S. 83/86.
- [15] Fagerlund, G.: The influence of slag cement on the frost resistance of the hardened concrete. CBI forskning research fo 1.82. Stockholm 1982.
- [16] Edelmann, A.: Pflastersteine aus Beton. Mangelhafte Frostbeständigkeit und mangelhafter Verbund des Versalzbetons mit dem Kernbeton. Deutsches Architektenblatt (1992) H. 1.
- [17] Glatte, R., Grieger, C., und G. Schaffner: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Zementbetondeckschichten mit einem neuen automatisch arbeitenden Gerät. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Verkehrswesen, Dresden 26 (1979) H. 2, S. 311/317.
- [18] Bonzel, J., und E. Siebel: Neuere Untersuchungen über den Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. beton 27 (1977), H. 4, S. 153/158, H. 5, S. 205/211 u. H. 6, S. 237/244.
- [19] Siebel, E.: Laboratory investigations of the frost resistance of concrete and their correlation with field performance. In RILEM seminar on the durability of concrete structures under normal outdoor exposure. Hannover (March 1994).
- [20] Wischers, G., und J. Krell: Einfluß der Feinstoffe im Beton auf Konsistenz, Festigkeit und Dauerhaftigkeit. beton 38 (1988) H. 9, S. 356/359 und H. 10, S. 401/404.
- [21] Wischers, G.: „Leistungsfähigkeit“ als Kriterium für die Normung von Zement und Beton. Betonwerk und Fertigteil-Technik BFT 56 (1990) H. 3, S. 51/60.
- [22] Siebel, E., und U. Neck: Dauerhaftigkeit von Pflastersteinen und Gehwegplatten. Betonwerk und Fertigteil-Technik BFT 56 (1990), H. 8, S. 34/38.
- [23] Siebel, E., und S. Sprung: Einfluß des Kalksteins im Portlandkalksteinzement auf die Dauerhaftigkeit von Beton. Beton 41 (1991) H. 3, S. 113/117 u. H. 4, S. 185/188.
- [24] Merkblatt für die Herstellung und Verarbeitung von Luftporenbeton mit Anhang: Anleitung für die Herstellung und Verarbeitung von Transportbeton mit Luftporen. Ausgabe 1991. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen. Arbeitsgruppe Betonstraßen Köln 1991.