

# **Prüfvorschrift**

## **CIF-Test - Testmethode zur Bestimmung des Frostwiderstands von Beton**

**(Capillary Suction, Internal damage and Freeze thaw Test)**  
Referenzmethode und Alternative Methoden A und B

Autor: M. J. Setzer\*

Redaktionelle Bearbeitung:

IBPM\*: P. Heine, S. Kasperek, S. Palecki; WISSBAU\*\*: R. Auberg; FIZ<sup>+</sup>: V. Feldrappe, E. Siebel

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

\*\* WISSBAU Beratende Ingenieurgesellschaft mbH, Essen

<sup>+</sup> Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf

### **Bemerkung des Chairman des RILEM TC 176 IDC:**

Das RILEM TC 176 IDC hat auf den Treffen in Bergamo (2000), Paris (2000), Essen (2001) und Helsinki (2002) folgenden Beschluss gefasst:

1. Der CIF-Test soll als RILEM Empfehlung veröffentlicht werden. Er erweitert die bestehende RILEM Recommendation für den CDF-Test<sup>1</sup>, welcher zur Bestimmung des Frost-Taumittel-Widerstands entwickelt wurde.
2. Die Testmethode wird als Basis vorgelegt, um die praktische Erfahrung zu erweitern.
3. Die Beschreibung basiert auf Ausführungen, die dem Komitee zuvor vorgelegt wurden.
4. Der verantwortliche Autor für den CIF-Test ist M.J. Setzer.
5. Für den CIF-Test hat ein Ringversuch mit einem Vergleich von drei Betonmischungen stattgefunden. Die Ergebnisse des Ringversuchs wurden nach ISO 5725 ausgewertet. Das RILEM TC 176 IDC hat sich entschieden, die Ergebnisse für diesen Entwurf zu verwenden.

---

<sup>1</sup> CDF Test - Testmethode zur Bestimmung des Frost-Widerstands von Beton – Prüfung mit einer Natriumchloridlösung (CDF). RILEM Recommendation TC117-FDC: Freeze-thaw and de-icing resistance of concrete. Materials and Structures Vol. 29 (1996) 523-528

RILEM Technical Committee 176 IDC “Internal Damage of Concrete due to frost action/ Endommagement interne du béton dû à l'action du gel”

Mitglieder des Komitees beim Treffen in Bergamo/Paris: Dirch H. BAGER (Dänemark), Gisli GUDMUNDSSON (Island), Stefan JACOBSEN (Norwegen), Donald J. JANSSEN (USA), Heikki KUKKO (Finnland), Takashi MIURA (Japan), Hirozo MIHASHI (Japan), Vesa PENTTALA (Finnland), P.-E. PETERSSON (Schweden), Erland SCHULSON (USA), Max J. SETZER (Deutschland), Jochen STARK (Deutschland), Paolo URSELLA (Italien)

Chairman: Max. J. Setzer; Secretary: Don J. Janssen

## 1 Einleitung

Der ausreichende Widerstand gegen Frost-Tau-Beanspruchung soll mit geeigneten Labortests wie dem CIF-Test untersucht werden. CIF bedeutet “*Capillary suction, Internal damage and Freeze-thaw test*”. Der CIF-Test basiert auf der RILEM Recommendation des CDF-Tests (*Capillary Suction, De-icing agent and Freeze thaw Test*), für welchen Präzisionsdaten für die Abwitterung vorliegen und den CIF-Test ergänzen.

Während der CIF-Prüfung wird ein ansteigender Wassersättigungsgrad eingestellt, der erst durch isothermes kapillares Saugen und dann durch Wiederholung klar definierter Frost-Tau-Wechsel (Frostsaugen) hervorgerufen wird. Der CIF-Test ermöglicht die Messung sowohl der Feuchteaufnahme als auch der inneren Gefügeschädigung durch eine Anzahl von Frost-Tau-Wechseln mit einachsigen Wärme- und Feuchtetransport in Gegenwart einer definierten Prüfflüssigkeit, in der Regel demineralisiertes Wasser. Die Feuchteaufnahme und der damit verbundene Wassersättigungsgrad stellt einen wichtigen Parameter zur Beurteilung des Frostwiderstands dar. Die Prüfung wird mit der Messung der Oberflächenabwitterung kombiniert.

Es wird empfohlen die in dieser Prüfvorschrift beschriebenen Messverfahren zur Bestimmung der Wasseraufnahme und der inneren Schädigung ebenfalls bei der Frost-Tausalz-Prüfung im CDF-Test, entsprechend RILEM Recommendation (mit dreiprozentiger Natriumchloridlösung) anzuwenden (Modifizierter CDF-Test). Hier überwiegt in der Regel die Oberflächenabwitterung.

Das Verfahren kann zur Prüfung aller Arten von Beton (konstruktive Betone, Betonwaren, Betonfertigteile) und der Betonausgangsstoffe sowie von einzelnen

Betonrezepturen eingesetzt werden. Die Interpretation der Messwerte geht von Probekörpern aus, die quasihomogen sind. Mehrschichtige Proben oder stark entmischende Betone bedürfen einer besonders fachkundigen Beurteilung.

## 2 Normen

- /1/ prEN-ISO 2736/2: Testing hardened concrete-test specimens. Part 2: Making and curing of test specimens. (Prüfung von Betonprobekörpern, Teil 2: Herstellung und Nachbehandlung von Probekörpern)
- /2/ E ISO/DIS 8047 (1982-12): Concrete, hardened; determination of ultrasonic pulse velocity, (Festbeton; Bestimmung der Ultraschall-Ausbreitgeschwindigkeit)
- /3/ ISO 5725/1 to 6 - 1990: Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results. (Genauigkeit – Übereinstimmung und Präzision – von Messmethoden und Ergebnissen)
- /4/ VDI/VDE 3522: Zeitverhalten von Berührungsthermometern, (Time performance of contact thermometers), Juni 1987
- /5/ CDF Test - Testmethode zur Bestimmung des Frost-Widerstands von Beton – Prüfung mit einer Natriumchloridlösung (CDF). RILEM Recommendation TC117-FDC: Freeze-thaw and de-icing resistance of concrete. Materials and Structures Vol. 29 (1996) 523-528

## 3 Definitionen

- a) *Frostwiderstand* ist der Widerstand gegenüber Frost-Tau-Wechseln mit demineralisiertem Wasser als Prüfflüssigkeit.
- b) Die *Prüfflüssigkeit* ist die Flüssigkeit, die während der Prüfung vom Probekörper aufgenommen wird (Abschnitt 4 c).
- c) *Abwitterung* ist der Materialverlust der Oberfläche des Betons durch Frost-Tau- oder Frost-Taumittel-Beanspruchung.
- d) *Innere Schädigung* ist die Schädigung des inneren Betongefüges (auch ohne sichtbare äußere Schäden), die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Betons führt (z.B. eine Verminderung des dynamischen Elastizitätsmoduls).
- e) Der *Referenzpunkt* ist der physikalische Messpunkt, an dem der Temperaturzyklus geregelt wird.
- f) Die *Referenztemperatur* ist die gemessene Temperatur am Referenzpunkt.

- g) Die *Prüffläche* ist die Fläche eines Probekörpers, über die der Temperaturwechsel bzw. die Aufnahme der Prüfflüssigkeit während des Prüfvorganges stattfindet.
- h) Die *Durchschallungstrecke* ist die Strecke, über die die Ultraschalllaufzeit gemessen wird.
- i) Die *Laufzeit* ist die Zeit, die ein Ultraschallsignal benötigt, um die Durchschallungstrecke zwischen dem Ultraschallsender und dem Ultraschallempfänger zurückzulegen.
- j) Die *Durchschallungsachse* ist die gedachte direkte Verbindung der Mittelpunkte der Ultraschallprüfkopfflächen von Sender und Empfänger.
- k) Als *Ankopplungsmedium* wird die verwendete Prüfflüssigkeit eingesetzt. Es ermöglicht eine reproduzierbare Signalübertragung zwischen den Ultraschallprüfköpfen und dem Probekörper.

#### 4 Prüfeinrichtung

- a) *Klimaraum*: Mit einer Temperatur von  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  und einer relativen Luftfeuchtigkeit von  $65 \pm 5\%$ .
- b) *Seitliche Abdichtung*: Mit Aluminiumfolie mit Butylklebung (Referenz) oder Epoxidharz (Alternativverfahren). Die Abdichtung muss bei einer Temperatur von  $-20^\circ\text{C}$  dauerhaft sein. Sie darf bei Erreichen der Mindesttemperatur nicht spröde werden. Ein geeigneter Primer ist zu verwenden.
- c) *Prüfflüssigkeit*:  
Reine Frost-Prüfung: Demineralisiertes Wasser  
Erweiterte Frost-Tausalz-Prüfung des CDF-Tests (Modifizierter CDF-Test):  
Standard-Taumittelösung, 97 Gewichtsprozent demineralisiertes Wasser und 3 Gewichtsprozent NaCl
- d) *Prüfbehälter* (Abb.1 und 2): Die Prüfbehälter bestehen aus rostfreiem Stahl. Die Größe des Prüfbehälters ist so zu wählen, dass die Luftschicht zwischen den vertikalen Flächen der Probe und dem Prüfbehälter auf  $30 \pm 20$  mm begrenzt ist<sup>2,3</sup>. Es ist zusätzlich ein Abstandhalter von  $5 \pm 0,1$  mm und ein Deckel erforderlich.

<sup>2</sup> Die Luftschicht zwischen den vertikalen Flächen der Probekörper und dem Prüfbehälter wirkt als Wärmedämmung.

<sup>3</sup> Die Edelstahlbehälter sind in verschiedenen modularen Größen angepasst, so dass die gleichen Randbedingungen für jede Probekörpergröße angetroffen werden.

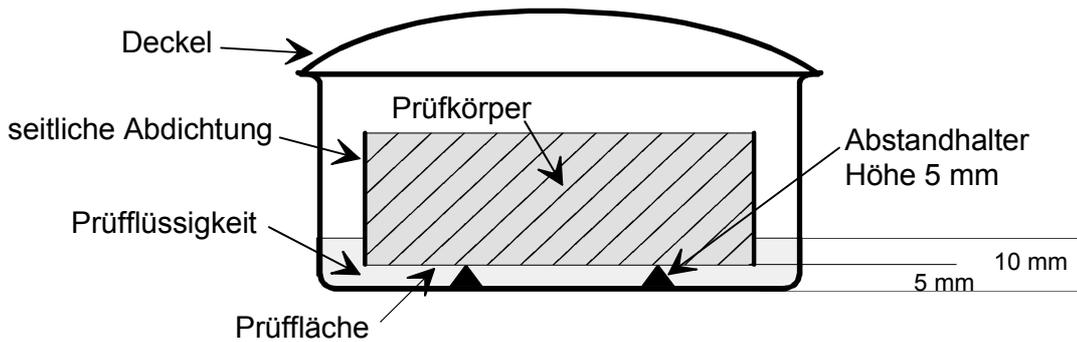


Abbildung 1: Kapillares Saugen

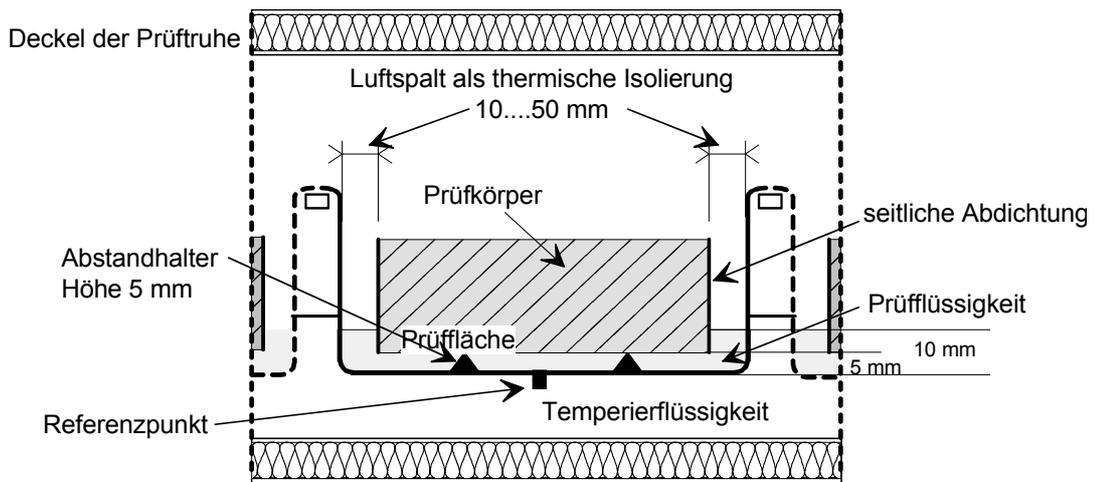


Abbildung 2 : Prüfbehälter mit Probekörper im Flüssigkeitstemperierbad

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

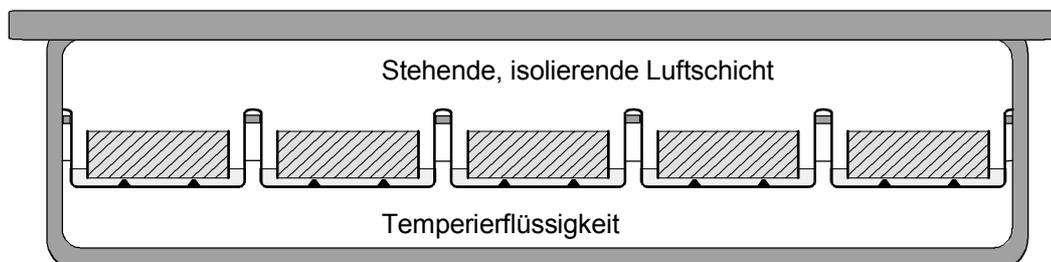


Abbildung 3: Temperaturkontrollierte Truhe

Die Prüfruhe muss mit Halterungen für die Prüfbehälter über dem Temperierbad ausgestattet werden, die eine Eintauchtiefe der Prüfbehälter von  $15 \pm 3$  mm sicherstellen. Das Temperierbad muss bei nicht vollständiger Belegung mit Probekörpern z.B. durch leere Prüfbehälter abgedeckt werden<sup>4</sup>.

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

Für die Messung wird ein Temperaturmesser mit einer Toleranz von maximal  $\pm 0,05$  K bei  $0^\circ\text{C}$  verwendet. Er muss ein quaderförmiges Gehäuse mit den Maßen  $50 \times 6 \times 6$  mm  $\pm 0,2$  mm haben. Er wird mit einer Seitenfläche ( $50 \times 6$  mm) so befestigt, dass die Längsseite des Fühlers in Strömungsrichtung weist. Die Zeitkonstante ( $t_{-90\%}$ ) des Fühlers (ohne Befestigungseinrichtung), bestimmt nach VDI/VDE 3522 im strömenden Wasserbad, muss  $6,3$  s  $\pm 0,8$  s betragen. Zur Kalibrierung wird die Minimaltemperatur bei  $-20^\circ\text{C}$  verwendet. Das Gerät ermöglicht einen Frost-Tau-Wechsel nach dem in Abbildung 4 gezeigten Temperaturzyklus.

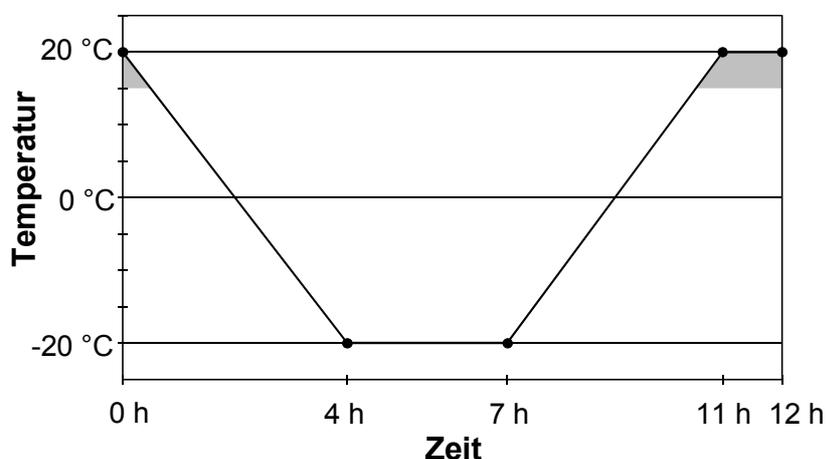


Abbildung 4: Kontrolltemperatur-Zyklus

Ein Frost-Tau-Wechsel dauert 12 Stunden. Die Temperatur wird beginnend bei  $+20^\circ\text{C}$  in 4 Stunden mit einer konstanten Abkühlrate von  $10$  K/h gesenkt. Sie wird dann 3 Stunden lang bei  $-20^\circ\text{C}$  konstant gehalten und in 4 Stunden mit einer Heizrate von  $10$  K/h wieder auf  $+20^\circ\text{C}$  erhöht. Sie wird bei  $+20^\circ\text{C}$  über

<sup>4</sup> Bei der Durchführung des Tests in einem kryogenen Bad ist keine Abdeckung der Prüfbehälter erforderlich, da der Prüfruhendeckel einen genügenden Verdunstungsschutz schafft, während die Wände der Probenbehälter als Kühlfalle dienen.

1 Stunde konstant gehalten. Der Temperaturzyklus wird am Referenzpunkt überwacht. Die Abweichung der Temperatur gemessen am Referenzpunkt darf nicht mehr als  $\pm 0,5$  K zumindest bei der Minimaltemperatur und  $\pm 1$  K bei den übrigen Temperaturen betragen. Eine konstante Zeitverschiebung zwischen den einzelnen Prüfbehältern ist zulässig. Die Schädigungsparameter müssen gemessen werden solange die Temperatur über  $15^{\circ}\text{C}$  ist (schattierte Fläche in Abb. 4)

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

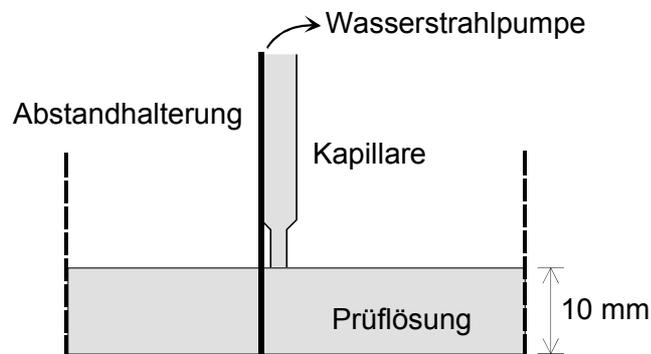


Abbildung 5: Absaugeinrichtung

- g) *Ultraschallbad* (Abb. 6): Die Abmessung des Ultraschallbades muss so groß sein, dass kein mechanischer Kontakt im Bereich des Übertragungsmediums zwischen Prüfbehälter und Ultraschallgerät vorhanden ist. Zusätzlich muss ein Mindestabstand zwischen dem Prüfbehälter und dem Boden des Bades von 15 mm sichergestellt sein. Das Ultraschallbad muss folgende Leistungsdaten haben: ERS Leistung 250 W; HF Höchstleistung 450 W bei doppeltem Halbwellen-Betrieb; Frequenz 35 kHz.

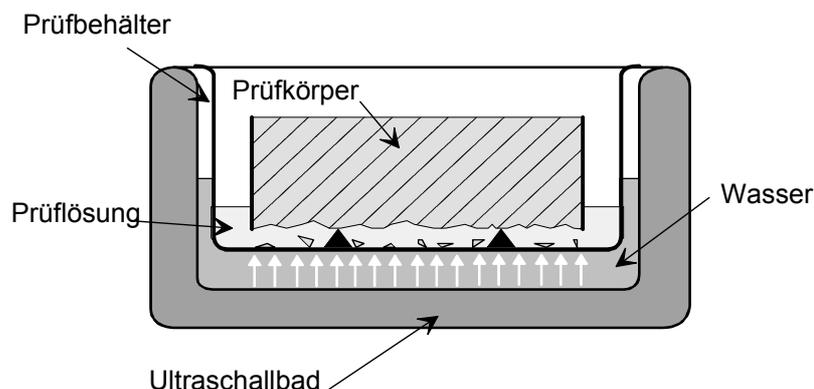


Abbildung 6: Ultraschallbad

- h) *Gerät zur Messung der Ultraschalllaufzeit:* Die Ultraschalllaufzeit wird mit einem handelsüblichen Ultraschallmessgerät gemessen, das zur Bestimmung der Laufzeiten von Longitudinalwellen in porösen Baustoffen gemäß E ISO/DIS 8047 geeignet ist. Der Frequenzbereich der Prüfköpfe muss im Bereich von 50 und 150 kHz liegen.
- i) *Prüfbehälter für Ultraschalllaufzeitmessung:* Zur Messung der Laufzeit wird ein rechteckiger Behälter (z.B. Polymethylmethacrylat) verwendet. In zwei gegenüberliegenden Seitenflächen ist jeweils eine Aussparung zur Aufnahme der Ultraschallprüfköpfe angebracht, so dass die Achse der Durchschallungsstrecke parallel in einem Abstand von 35 mm zur Prüffläche liegt. Die Abmessungen des Behälters müssen so dimensioniert sein, dass eine Kalibrierung nach Abschnitt 7.4.2 möglich ist.
- j) *Kalibrierprobekörper:* Ein Kalibrierprobekörper wird zur Kalibrierung des Ultraschall-Messaufbaus eingesetzt. Der Kalibrierprobekörper hat die Abmessungen 150 x 110 x 70 mm  $\pm$  0,1 mm und ist mit einer definierten mitgelieferten Ultraschalllaufzeit sowie mit Messmarken versehen.
- k) *Stahlplatte:* Eine Stahlplatte (1 mm V2A) mit Tragegriffen hilft der einfachen Handhabung der Probekörper während der Messung der Flüssigkeitsaufnahme und der inneren Schädigung. Die Größe der Stahlplatte muss größer als die Prüffläche sein, so dass der Verlust von Abwitterungspartikeln verhindert wird. Die seitliche Aufkantung muss 10 mm  $\pm$  2 mm betragen.
- l) *Trockenschrank:* Es wird ein Trockenschrank mit einer Temperatur von 110  $\pm$  5°C benutzt.
- m) *Papierfilter:* Zur Aufnahme der Abwitterungen werden Papierfilter benutzt.
- n) *Waage:* Mit einer Genauigkeit von  $\pm$  0,01 g.
- o) *Waage:* Mit einer Genauigkeit von  $\pm$  0,1 g.
- p) *Vernier-Schieblehre:* Mit einer Genauigkeit von  $\pm$  0,1 mm.
- q) *PTFE-Platten:* Standardschalungen 150 x 150 x 150 mm mit zusätzlichen PTFE-Platten 150 x 150 x 2 mm (z.B. Teflon) werden benutzt.

## 5 Probekörper

### 5.1 Anforderungen an Größe und Anzahl der Probekörper

Eine Prüfserie besteht aus mindestens 5 Probekörpern mit einer Gesamtprüffläche von mindestens 0,08 m<sup>2</sup>. Die Anzahl von 5 Probekörpern ermöglicht eine statistische Auswertung und die Ermittlung von Ausreißern. Die Höhe der Probekörper beträgt 70 mm ± 2 mm. Anmerkung: Bei abweichender Probenkörperhöhe siehe Absatz 7.4.5.

#### 5.1.1 Standardprobekörper

##### 5.1.1.1 Abmessungen

Der Standardprobekörper hat die Dimensionen (Länge x Breite x Höhe) 150 x 110 x 70 mm (± 2 mm).

##### 5.1.1.2 Herstellung von Probekörpern zur Prüfung von Betonrezepturen oder von Betonausgangsstoffen in einer Mischung

Zur Prüfung von Betonmischungen oder von Betonausgangsstoffen in einer Mischung werden die Probekörper in 150 mm Würfelformen gemäß prEN ISO 2736/2 gefertigt und auf einem Rütteltisch verdichtet. In der Schalung ist zentrisch eine vertikale PTFE-Scheibe anzuordnen, die die Form in zwei gleiche Hälften teilt. Die PTFE-Scheibe darf nicht mit Trennmitteln behandelt werden. Die Betonoberflächen an der PTFE-Scheibe sind die Prüfflächen. Alternativ oder bei größerem Korndurchmesser kann eine Teflonscheibe je Seite angeordnet werden. Das Größtkorn darf nicht größer als ein Drittel der kleineren Durchschallungstrecke sein.

Nach 24 ± 2 Stunden Nachbehandlung werden die Probekörper entschalt und sechs Tage (bis zum Alter von 7 Tagen) in Leitungswasser bei 20 ± 2°C gelagert. Wenn die Festigkeitsentwicklung der Probekörper langsam ist, kann die Nachbehandlung in der Schalung verlängert werden. Die Lagerung in Leitungswasser wird dann um die gleiche Zeit verkürzt.

Nach der Wasserlagerung werden die Proben auf die Standardmaße zugesägt. Entlang der abgezogenen Oberfläche werden die Probekörper auf eine Breite von 110 mm gesägt. Im Falle der seitlichen PTFE-Scheiben Anordnung ist zusätzlich ein mittiger Schnitt entsprechend Abbildung 7 durchzuführen. Dieser Behandlung folgt die Trockenlagerung.

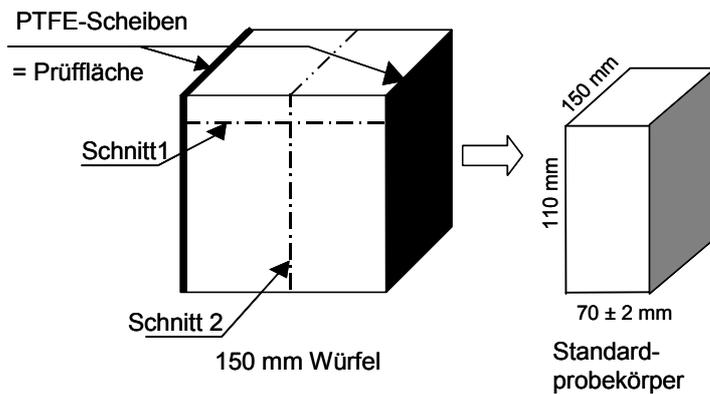


Abbildung 7: Zusägen der Probekörper bei seitlicher PTFE-Scheiben Anordnung

### 5.1.2 Abweichende Probekörper im Vergleich zum Standardprobekörper

Werden abweichend zum Standardprobekörper Betonproben geprüft, so muss dies gesondert im Prüfbericht aufgeführt werden.

Die Prüffläche eines Probekörpers muss so groß sein, dass ein eingeschriebener Kreis von 90 mm Durchmesser völlig von der Prüffläche überdeckt wird. Das Verhältnis Länge/Höhe darf 3 nicht überschreiten. Anmerkung: Bei abweichender Probenhöhe siehe Absatz 7.4.5.

#### 5.1.2.1 Probekörper zur Prüfung von Betonbauteilen

Die Prüffläche muss der Oberfläche des realen Bauteils, welche der Witterung ausgesetzt ist, entsprechen. Die Prüffläche muss eben sein und kann beliebige äußere Gestalt haben.

#### 5.1.2.2 Probekörper zur Prüfung von vorgefertigten Betonelementen

Kleine vorgefertigte Betonelemente, wie Betonpflastersteine und Betonplatten, können, unabhängig von der äußeren Form, direkt geprüft werden. Wenn die Länge 250 mm übersteigt, muss das Element geschnitten werden. Die Prüffläche ist die bewitterte Oberfläche des Produktes. Sie muss eben sein.

## 6 Ablauf des Prüfverfahrens

Das Prüfverfahren beinhaltet drei Schritte: Die Trockenlagerung, die Vorsättigung durch kapillares Saugen und die Frost-Tau-Wechsel. Das Prüfverfahren beginnt unmittelbar nach der Nachbehandlungsperiode. Bei Probekörpern, die gemäß Abschnitt 5.1 hergestellt worden sind, beginnt dies im Alter von 7 Tagen.

## **6.1 Trockenlagerung**

Die Probekörper werden in einem Klimaraum (20°C / 65% r. F.) zur Oberflächentrocknung für 21 Tage gelagert. Die Probekörper sind in einem Abstand von mindestens 50 mm auf eine Seitenfläche zu stellen, so dass die Prüfflächen freistehend sind. Die Gewichtsänderung ist zu messen.

## **6.2 Vorsättigung**

### **6.2.1 Probenvorbereitung und Abdichtung**

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

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

#### a) Abdichtung durch Aluminiumfolie mit Butylklebung (Referenz)

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

#### b) Abdichtung mit Epoxidharz (Alternativ)

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

### **6.2.2 Vorsättigung mit Prüfflüssigkeit durch kapillares Saugen**

Nach der Trockenlagerung werden die Probekörper mit der Prüffläche nach unten auf die 5 mm hohen Abstandhalter in die Prüfbehälter gelegt. Anschließend wird die Prüfflüssigkeit bis auf eine Höhe von  $10 \pm 1$  mm in den Behälter eingefüllt, ohne dass die Proben von oben feucht werden. Während des kapillaren Saugens muss der Prüfbehälter mit einem Deckel verschlossen werden. Während des kapillaren Saugens darf kein Kondensat vom Deckel auf den Probekörper tropfen.

Das kapillare Saugen dauert 7 Tage bei einer Temperatur von  $20 \pm 2^\circ\text{C}$ . Während des kapillaren Saugens muss, abhängig vom Saugvermögen des Materials, der Flüssigkeitsstand kontrolliert und in regelmäßigen Abständen reguliert werden. Die Gewichtszunahme der Probekörper wird regelmäßig alle 2-3 Tage gemessen.

### 6.3 Frost-Tau Belastung

Die Frost-Tau-Prüfung ist eine zyklische Belastung. Dabei werden die Probekörper in einer temperaturkontrollierten Prüfruhe einem Temperaturzyklus nach Abschnitt 4 unterworfen. Vor Beginn der Frost-Tau-Wechsel werden lose anhaftende Teilchen und Schmutz von der Prüffläche der Probekörper mittels Behandlung in einem Ultraschallbad, wie in Abschnitt 7.2 beschrieben, entfernt. Das entfernte Material wird verworfen.

## 7 Messungen

### 7.1 Abfolge der Messungen aus Abwitterung, Flüssigkeitsaufnahme und innerer Schädigung

Messungen werden zu Beginn der Frostprüfung (0 Frost-Tau-Wechsel) und nach jedem 4., maximal jedem 6. Frost-Tau-Wechsel, sowie nach dem vereinbarten Kriterium durchgeführt.

Folgende Messabfolge ist einzuhalten:

1. Oberflächenabwitterung
2. Flüssigkeitsaufnahme
3. Innere Schädigung (Ultraschalllaufzeit als Referenzmethode oder als alternative Methoden transversale Grundschwingung oder Längenänderung)

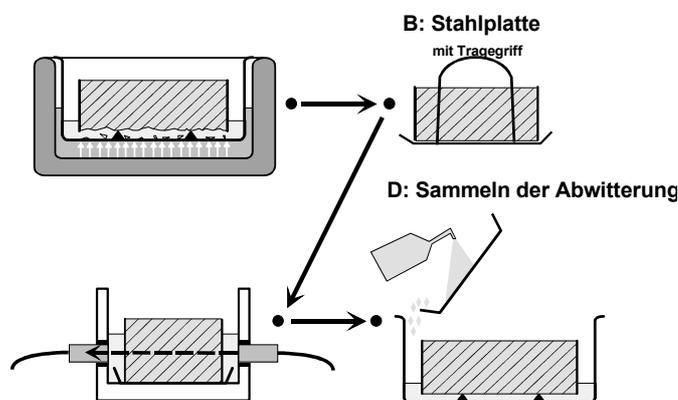


Abbildung 8: Messabfolge mit Referenzmethode

Nach der Abwitterungsbestimmung ist der Probekörper auf die Stahlplatte nach Abschnitt 4 k) anzuordnen, um zusätzlich abwitterndes Material während der weiteren Messabfolge zu sammeln. Die auf der Stahlplatte gesammelte Abwitterung wird in den Prüfbehälter zurückgegeben und bei der nächsten Messung der Abwitterung berücksichtigt. Wenn die Messabfolge unterbrochen wird, muss der Probekörper in den Prüfbehälter mit der Prüflüssigkeit zurückgelegt werden, um Austrocknen zu verhindern.

## 7.2 Bestimmung der Oberflächenabwitterung

### 7.2.1 Messdurchführung

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

Die Prüflüssigkeit, welche die Abwitterung enthält, wird abgefiltert. Der Papierfilter wird danach bei  $110 \pm 5^\circ\text{C}$  für 24 Stunden getrocknet und mind. 1 h bei  $20 \pm 2^\circ\text{C}$  und  $60 \pm 10\%$  r. F. abgekühlt. Die Masse des Filters, mit den getrockneten Abwitterungen  $\mu_b$ , wird mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,01$  g gemessen. Die Masse des leeren Filters  $\mu_f$  ist zuvor mit der gleichen Genauigkeit zu bestimmen.

Die Masse des abgewitterten Materials  $\mu_s$  ist dann:  $\mu_s = \mu_b - \mu_f$ .

### 7.2.2 Auswertung der Abwitterung

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

$$m_n = \frac{\sum \mu_s}{A} \quad (1)$$

$m_n$  ist die Gesamtmenge des abgewitterten Materials bezogen auf die Prüffläche zum jeweiligen Prüftermin in  $\text{g}/\text{m}^2$

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

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

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

### 7.3 Messung der Flüssigkeitsaufnahme

#### 7.3.1 Messdurchführung

Nachdem das abgewitterte Material von der Probefläche entfernt worden ist, werden die Probekörper vertikal auf eine saugende Fläche (Labortuch) gelegt, um Wasser von der Testfläche ablaufen zu lassen. Die Seitenflächen und die obere Seite der Probekörper müssen vorsichtig mit einem Labortuch abgetrocknet werden. Um den Verlust von abgewittertem Material zu vermeiden, wird die Waage mit der aufgelegten Stahlplatte (Abschnitt 7.1) tariert und danach das Gewicht des Probekörpers auf der Stahlplatte mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  g gemessen.

#### 7.3.2 Auswertung der Flüssigkeitsaufnahme

Die Flüssigkeitsaufnahme eines jeden Probekörpers  $\Delta w_n$  nach dem n-ten Zyklus wird berechnet durch:

$$\Delta w_n = \frac{w_n - w_1 + \sum \mu_s}{w_0} * 100 \quad (2)$$

$\Delta w_n$  ist die Flüssigkeitsaufnahme eines jeden Probekörpers zum jeweiligen Prüftermin in M-%

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

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

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

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

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

## 7.4 Innere Schädigung – Referenz Methode - Ultraschalllaufzeit

### 7.4.1 Messaufbau

Zur Messung der Laufzeit wird ein Behälter nach Abschnitt 4 i) verwendet. Das Ankoppelmedium ist die verwendete Prüfflüssigkeit. Die Temperatur des Ankoppelmediums und des Probekörpers muss bei  $20 \pm 5^\circ\text{C}$  liegen.

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

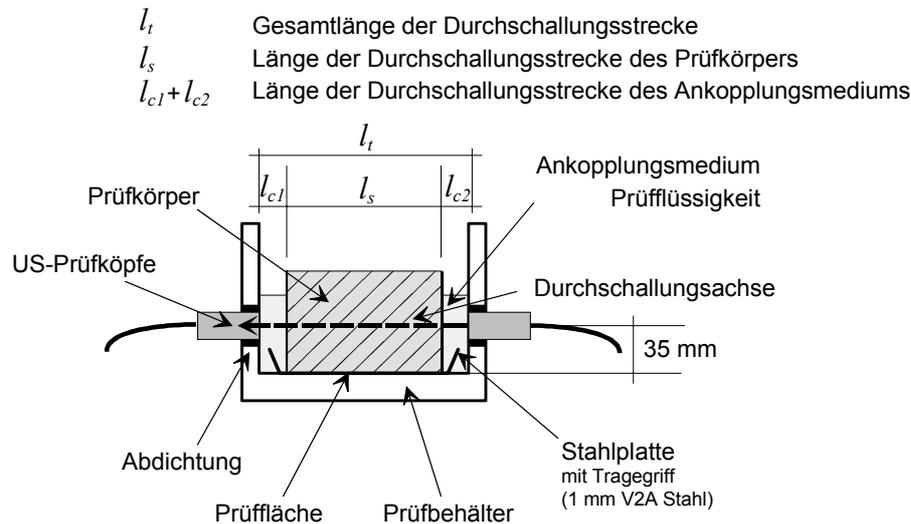


Abbildung 9: Messaufbau zur Bestimmung der Ultraschalllaufzeit

### 7.4.2 Kalibrierung

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

1. Kalibrierung des Ultraschallmessgerätes mit Hilfe des Kalibrierprobekörpers

Das Ultraschallmessgerät wird kalibriert indem die Messköpfe mit einem geeigneten Ankoppelmedium (z.B. Fett) auf die Messmarken direkt an den Kalibrierprobekörper angekoppelt werden. Die Ultraschalllaufzeit wird entsprechend der Angabe auf dem Kalibrierprobekörper eingestellt.

2. Einstellen der Vorlaufzeit

Der Kalibrierprobekörper wird nach Abbildung 9 in dem Behälter angeordnet. Anschließend werden die Prüfköpfe so verschoben, dass die mit dem Kalibrierprobekörper mitgelieferte Laufzeit plus  $10 \mu\text{s}$  erreicht wird. Damit ist ein

Prüfkopfabstand  $l_t$  entsprechend der jeweiligen Seitenlänge des Kalibrierprobekörpers plus 15 mm festgelegt.

### 7.4.3 Messdurchführung

Wie in Abbildung 9 gezeigt, wird der Probekörper auf der Stahlplatte in den Prüfbehälter zur Ultraschalllaufzeitmessung positioniert. Die bei der ersten Messung auf dem Probekörper markierten Durchschallungsachsen müssen bei allen weiteren Untersuchungen eingehalten werden. An jedem Probekörper wird in zwei senkrecht zueinander stehenden Durchschallungsachsen die Laufzeit gemessen. Bei rechteckigen Probekörpern müssen die Ankoppelungsstellen mittig zwischen den beiden Probekörperkanten liegen. Vor Beginn des kapillaren Saugens wird die zu durchschallende Probenlänge ohne die seitliche Abdichtung mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$  mm gemessen. Das Versiegelungsmaterial auf den Seiten der Probekörper wird bei dieser Länge nicht berücksichtigt. Vor Beginn der Frost-Tau-Wechsel wird die Ultraschalllaufzeit mit einer Genauigkeit von  $\pm 0,1$   $\mu$ s bestimmt. Während der Durchführung der Messabfolge muss ein Luftkontakt der Prüffläche so kurz wie möglich sein. Ein Befeuchten der Oberseite der Probekörper muss vermieden werden. Darüber hinaus ist darauf zu achten, dass an den Prüfköpfen und an den Seiten der Probekörper keine Luftblasen anhaften. Die seitliche Abdichtung muss fest an dem Probekörper anhaften.

### 7.4.4 Auswertung der inneren Schädigung

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

$$t_c = \frac{l_c}{v_c} \quad (3)$$

$t_c$  ist die Durchschallungszeit im Ankopplungsmedium in ms.

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

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

Die Änderung der Durchschallungsgeschwindigkeit  $\tau_n$  nach n Frost-Tau-Wechseln wird für jeden Probekörper und jede Durchschallungsachse getrennt berechnet mit: <sup>5</sup>

$$\tau_n = \frac{t_{cs} - t_c}{t_n - t_c} \quad (4)$$

$\tau_n$  ist die relative Durchschallungsgeschwindigkeit.

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

$t_n$  ist die Gesamt-Durchschallungszeit nach n Frost-Tau-Wechseln in ms.

Anstelle der Durchschallungsgeschwindigkeit ist es zweckdienlich die innere Schädigung durch den dynamischen E-Modul  $R_{u,n}$  aus der Ultraschalllaufzeit auszudrücken. Bei der vorliegenden Testmethode wird der E-Modul nach n Frost-Tau Wechseln mit folgender Beziehung berechnet<sup>6</sup>:

$$R_{u,n} = \tau_n^2 \quad (5)$$

Der Mittelwert aus den Werten beider Durchschallungsachsen gibt den relativen dynamischen E-Modul des Probekörpers an. Es besteht die Option den relativen dynamischen E-Modul in Prozent auszudrücken. Der Mittelwert und die Standardabweichung des relativen dynamischen E-Moduls einer Prüfserie müssen bestimmt werden. Das Ergebnis muss auf Ausreißer überprüft werden.

## 7.4.5 Kriterium

### 7.4.5.1 Schädigungskriterium

Der Beton gilt als geschädigt, wenn  $R_{u,n} = 0,8$  bzw. 80% unterschritten wird<sup>7</sup>.

### 7.4.5.2 Beurteilung der inneren Schädigung

Das Kriterium zur Beurteilung der inneren Schädigung ist die Anzahl der Frost-Tau-Zyklen, bis zum Erreichen des Schädigungskriteriums.

Die Zahl der Frost-Tau-Zyklen kann durch lineare Interpolation zwischen zwei benachbarten Messpunkten ermittelt werden.

<sup>5</sup> Die Längenänderung kann dabei vernachlässigt werden.

<sup>6</sup> Für diese Gleichung werden Dichte, Größe und Poissonzahl vernachlässigt. Dies stellt keine gravierende Einschränkung dar, da das Ziel der Prüfung die Erkennung einer Schädigung ist und die Ultraschalllaufzeit die relevante Größe ist. Der dynamische E-Modul ist lediglich eine im Ingenieurwesen allgemein verständlichere Größe.

<sup>7</sup> Ein relativer dynamischer E-Modul von 80% gewährleistet, entsprechend den Präzisionsdaten, eine ausreichende Trennschärfe zum ungeschädigten Beton – E-Modul 100%. Siehe auch Präzisionsdaten Abschnitt 8.2.

### 7.4.5.3 Festlegung eines Abnahmekriteriums

Als Abnahmekriterium ist eine Zyklenanzahl zu vereinbaren, bis zu der das Schädigungskriterium nicht unterschritten werden darf.

Es muss berücksichtigt werden, dass jedwede Abweichung der Probenkörperhöhe im Vergleich zum Standard-Probekörper signifikant das Abnahmekriterium beeinflusst. Entsprechende Ergebnisse sollten daher nur von Experten, die mit der Auswertung von CIF-Ergebnissen vertraut sind, beurteilt werden.

## 7.5 Alternativmethoden

Die Alternativmethoden (Resonanzfrequenz, Längenänderung) zur Bestimmung der inneren Schädigung sind im Anhang aufgeführt.

## 8 Präzision des CIF-Tests für Betonmischungen

### 8.1 Allgemein

Man unterscheidet drei Varianten der Präzision: Wiederholpräzision, Vergleichpräzision und Streuung zwischen den Labors. Die Präzision des CIF Tests wurde in Anlehnung an die ISO 5725 für Betonrezepturen bestimmt, die dem Abschnitt 5.1.1 entsprechen.

### 8.2 Messung der inneren Schädigung – Referenzmethode –Ultraschalllaufzeit

Die Präzisionsdaten für den relativen dynamischen E-Modul sind:

Relativer dynamischer E-Modul	100 %	80 %
	Standardabweichung	
Wiederholpräzision $s_r$	0,7 %	4,8 %
Vergleichspräzision $s_R$	0,9 %	6,2 %

Diese Daten gelten für Laborbeton, der nach Abschnitt 5.1.1 hergestellt wird.

Weitere Präzisionsdaten können wie folgt berechnet werden:

$$s_r = -0,2046 R_{u,n} + 0,2122 \quad (6)$$

$$(R_{u,n} \text{ 0,80 bis 1,0 mit } R^2 = 0,85)$$

$$s_R = -0,2656 R_{u,n} + 0,2750 \quad (7)$$

( $R_{u,n}$  0,80 bis 1,0 mit  $R^2 = 0,73$ )

wobei  $s_r$  und  $s_R$  die Standardabweichung der Wiederholpräzision und der Vergleichspräzision und  $R_{u,n}$  den relativen dynamischen E-Modul, ermittelt aus Gleichung (5), darstellen.

ANMERKUNG: Die Präzisionsdaten und die Gleichungen basieren auf den Ergebnissen des RILEM Round Robin Tests des TC IDC, durchgeführt mit 7 Instituten und drei unterschiedlichen Betonserien.

### 8.3 Flüssigkeitsaufnahme

Die Präzisionsdaten für die Flüssigkeitsaufnahme sind in Tabelle 1 dargestellt. Diese Daten gelten für Laborbeton, der nach Abschnitt 7.3 geprüft wird.

Tabelle 1: Präzisionsdaten nach ISO 5725. Messung der Flüssigkeitsaufnahme.

Flüssigkeitsaufnahme	0 bis 0,5 M-%	0,5 bis 1,5 M-%	> 1,5 M-%
	Standardabweichung		
Wiederholpräzision $s_r$	0,014 M-%	0,027 M-%	0,054 M-%
Vergleichspräzision $s_R$	0,029 M-%	0,058 M-%	0,115 M-%

Die Präzisionsdaten können wie folgt angegeben werden:

$$s_r = 0,0265 \Delta w_n + 0,0005 \quad (8)$$

( $\Delta w_n$  0 bis 2,5 mit  $R^2 = 0,30$ ) oder 0,09 M-% gesamt

$$s_R = 0,0569 \Delta w_n + 0,0008 \quad (9)$$

( $\Delta w_n$  0 bis 2,5 mit  $R^2 = 0,30$ ) oder 0,17 M-% gesamt

wobei  $s_r$  und  $s_R$  die Standardabweichung der Wiederholpräzision und der Vergleichspräzision und  $\Delta w_n$  die Flüssigkeitsaufnahme während der Frostprüfung darstellen.

ANMERKUNG: Die Präzisionsdaten und die Gleichungen basieren auf den Ergebnissen des RILEM Round Robin Tests des TC IDC, durchgeführt mit 9 Instituten und drei unterschiedlichen Betonserien.

## 8.4 Abwitterung

Die Präzisionsdaten gelten für Laborbeton, der nach Abschnitt 7.2 geprüft wird.

Die Präzisionsdaten der Oberflächenabwitterung aus Ringversuchen mit reinem Frostangriff sind derzeit lediglich in dem Bereich von 0 bis 500 g/m<sup>2</sup> verfügbar.

$$s_{r500} = 120 \text{ g/m}^2 \quad (\text{CoV } 24\%)$$

$$s_{R500} = 160 \text{ g/m}^2 \quad (\text{CoV } 32\%)$$

Weitere Präzisionsdaten liegen für den CDF-Test in /5/ vor.

## 8.5 Alternativverfahren

Präzisionsdaten für die Alternativverfahren befinden sich im Anhang.

## 9 Bericht

Der Prüfbericht muss mindestens folgende Angaben enthalten:

1. Einen Verweis auf diese Prüfvorschrift.
2. Bezeichnung, Herkunft, Abmessungen und Gewicht der Probekörper.
3. Im Falle der Prüfung von Betonmischungen oder Betonausgangsstoffen die Zusammensetzung des Betons.
4. Die Dauer der Trockenlagerung.
5. Die Zusammensetzung der Prüfflüssigkeit.
6. Die Angabe der durchgeführten Frost-Tau-Wechsel-Anzahl.
7. Die Änderung des relativen dynamischen E-Moduls aus der Ultraschalllaufzeit für jeden Probekörper, sowie den Mittelwert und die Standardabweichung in %, gerundet auf die nächsten 1 %, mindestens nach Beendigung der Prüfung mit einer Angabe der durchgeführten Frost-Tau-Wechsel-Anzahl.
- 7A. Alternativ: E-Modul, wie unter 7, für den E-Modul aus transversaler Grundschiwingung.
- 7B. Alternativ: Längenänderung für jeden Probekörper, sowie den Mittelwert und die Standardabweichung in % gerundet auf die nächsten 0,1 % mindestens nach Beendigung der Prüfung mit einer Angabe der durchgeführten Frost-Tau-Wechsel-Anzahl.
8. Die Masse des abgewitterten Materials für jeden Probekörper sowie den Mittelwert und die Standardabweichung in g/m<sup>2</sup> gerundet auf die nächsten 1 g/m<sup>2</sup> mindestens nach Beendigung der Prüfung.

9. Die Masse der aufgesaugten Lösung während des kapillaren Saugens und während der Frost-Tau Prüfung (Frostsaugen) für jeden Probekörper sowie den Mittelwert und die Standardabweichung in M-% und auf 0,01 M-% gerundet.
10. Augenscheinliche Beurteilung (Risse, Abwitterung von Gesteinskörnungspartikeln) vor Beginn und wenigstens nach Beendigung der Prüfung.
11. Jegliche Abweichung von dem hier beschriebenen Verfahren.

## Anhang I - Alternative Prüfmethoden A und B

### Alternative Methode A - Messung der transversalen Grundschiwingung

#### a) Allgemeines

Bei Probekörpern, deren Verhältnis von Länge zur größten Querrichtung entweder sehr groß oder sehr klein ist, erweist sich die Anregung einer Grundschiwingung häufig als schwierig. Die besten Ergebnisse werden erzielt, wenn dieses Verhältnis zwischen 3 und 5 liegt.

Die Herstellungsart, der Feuchtegehalt sowie andere Charakteristika der Probekörper können das erhaltene Ergebnis beeinflussen.

Bei der Bestimmung des dynamischen E-Moduls können sich trotz gleicher Betonrezeptur durch unterschiedliche Probekörpergeometrien (Größe und Gestalt) unterschiedliche Resonanzfrequenzen ergeben. Deshalb sind bei abweichender Probekörpergeometrie (im Vergleich zum Standardprobekörper) die Ergebnisse nur eingeschränkt vergleichbar.

Der mittels Resonanzfrequenz bestimmte dynamische E-Modul darf nicht direkt mit dem dynamischen E-Modul korreliert werden, der aus der Ultraschalllaufzeit ermittelt wurde, d.h. mit lokal unterschiedlicher Sättigung oder unterschiedlichem Schädigungsgrad. In beiden Fällen wird für die Berechnung homogenes Material angenommen.

#### b) Vorschriften

ASTM C 215-97-Fundamental Transverse, Longitudinal and Torsional Frequency of Concrete Specimens – (Transversal-, Longitudinal- und Torsionsgrundschiwingung von Betonprobekörpern, in Teilen angewandt und modifiziert)

#### c) Definitionen

Die *transversale Grundschiwingung* ist die erste Frequenz mit der ein Probekörper in Form einer transversalen Biegeschwiwingung reagiert. Bei der transversalen Grundfrequenz gibt es zwei Schwiwingungsknoten, die von den jeweiligen Enden ungefähr 22,4 % bezogen auf die Probekörperlänge entfernt sind.

## d) Geräte

1. *Fourier-Analyse-Gerät*: Zur Auswertung muss ein Gerät benutzt werden, das in der Lage ist, mittels einer Fast-Fourier-Transformation die Eingangsdaten der Schwingung aus der zeitabhängigen Darstellung in ein entsprechendes Frequenzspektrum zu konvertieren. Mit dem Gerät sollte es darüber hinaus möglich sein die Grundfrequenz durch Mittelung mehrere Frequenzmessungen eines Probekörpers zu bestimmen. Das Gerät sollte zumindest zwei Eingangskanäle besitzen, so dass das Signal mit dem einen Kanal aufgezeichnet und mit dem anderen normalisiert werden kann. Dadurch ist es möglich, über mehrere Messaufnahmen zu mitteln, auch wenn die Schwingungsantwort durch verschieden starke Anregungsschläge erzeugt worden ist. Das Gerät muss es zulassen, die obere und die untere Grenze des Frequenzbereichs unabhängig zu wählen, um eine bessere Auflösung in der Nähe der Grundschiwingung zu erlauben. Grundvoraussetzung ist die Auflösung einer Frequenz von mindestens 1 kHz über der zu erwartenden größten Grundeigenfrequenz der Probekörper. Auflösungen von 0,1 bis 1,0 V(AC) für den Anregungskanal (Hammer) und von 0 bis 5 V(AC) für den Schwingungskanal (Beschleunigungsaufnehmer) haben sich als geeignet erwiesen, wenn ein Hammer und Beschleunigungsaufnehmer, wie sie unten beschrieben sind, benutzt werden. Das Gerät muss in der Lage sein, das Frequenz-Spektrum optisch darzustellen. Dies kann entweder direkt über das Gerät oder über einen PC geschehen, der an das Analysegerät angeschlossen ist.
2. *Anregungshammer (Modally tuned impact hammer)*: Die Schwingungsanregung des zu prüfenden Probekörpers erfolgt durch einen aufgebrachtten Impuls. Das Gerät, das den Impuls erzeugt, muss in der Lage sein, über dem gesamten zu untersuchenden Frequenzbereich eine flache Frequenzantwort zu ermöglichen. Es hat sich herausgestellt, dass ein geeigneter Impuls mit einem Hammer der Masse 140 g erzeugt werden kann, der modal auf den Stoß abgestimmt ist und eine Frequenzantwort zwischen 0 und 8 kHz besitzt. Die Spitze des Hammers muss ausreichend hart sein und eine geeignete Form haben, so dass weder der Probekörper den Hammer beschädigt noch der Probekörper selbst geschädigt wird,. Der Hammer muss mit einer elektronischen Lastzelle ausgestattet sein sowie einer geeigneten Stromversorgung, um eine Ausgangsspannung zu erzeugen, die proportional zur Größe des Schlages auf den Probekörper ist. Die Empfindlichkeit der Lastzelle muss zwischen 10 und 15 mV/N sein.

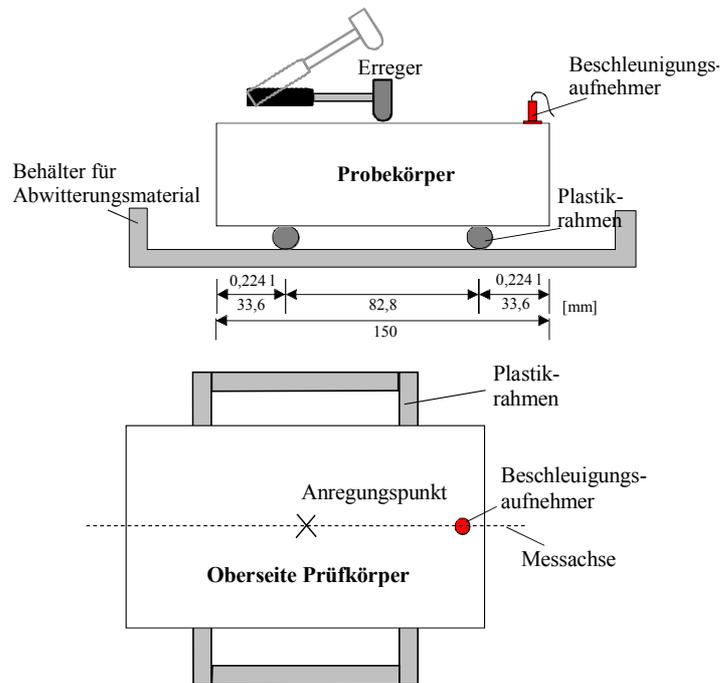


Abbildung 10: Testanordnung zur Bestimmung der fundamentalen transversalen Eigenfrequenz (Referenzprobekörper)

3. *Beschleunigungsaufnehmer und Stromversorgung (Accelerometer and power supply)*: Die erzeugte Schwingung des Probekörpers muss mit einem Beschleunigungsaufnehmer gemessen werden, der eine flache Auflagefläche besitzt. Die Masse des Beschleunigungsaufnehmers darf 3 g nicht überschreiten. Die obere Grenzfrequenz muss mindestens 1 kHz über der größten erwarteten Grundschiwingung liegen. Die Grundschiwingung des Beschleunigungsaufnehmers muss mindestens doppelt so groß sein wie die höchste erwartete Eigenfrequenz aller zu prüfenden Probekörper. Der Beschleunigungsaufnehmer muss mit einer geeigneten Spannungsversorgung ausgerüstet sein. Das Ausgangssignal aus Beschleunigungsaufnehmer und Stromversorgung muss mindestens 50 mV/g betragen. Eine Verstärkung des Ausgangssignals des Beschleunigungsaufnehmers kann erforderlich sein, um ein geeignet hohes Ausgangssignal zu erzeugen.

4. *Probekörperauflage (Specimen support)*: Die Auflage muss eine Schwingung des Probekörpers ohne signifikante Einschränkung erlauben. Dies kann dadurch erzielt werden, dass man den Probekörper auf Schneiden in der Nähe der Schwingungsknoten lagert oder auf einem dicken Schaumgummipolster. Die Auflage muss so dimensioniert sein, dass ihre Grundschiwingung außerhalb des zu untersuchenden Frequenzbereichs liegt.

e) Bestimmung der transversalen Grundschiwingung

1. Der Probekörper wird mit der Prüffläche nach unten auf der Auflage (z.B. Plastikrahmen (plastic frame)) so gelagert, dass er ohne signifikante Behinderung eine freie transversale Schwiwingung durchführen kann.
2. Die Befestigung des Beschleunigungsaufnehmers findet an der Oberseite des Probekörpers in der Nähe des Probenkörperendes und auf halber Höhe zwischen den Ecken statt. Um den Beschleunigungsaufnehmer zu halten wird entweder ein Gummiband oder Klebewachs benutzt.
3. In der Mitte der Oberseite des Probekörpers wird mit dem instrumentierten Hammer der Probekörper leicht zu Schwiwingungen angeregt. Der Schlag muss stark genug sein, um eine Ausgangsspannung zwischen 0,5 und 1 V zu erzeugen. Die saubere Anregung ist anhand der der Frequenzantwortkurve zu kontrollieren. Mögliche Gründe für ein abnormes Aussehen der Frequenzkurve können entweder eine andauernde Schwiwingung des Probekörpers von einem vorhergegangenen Schlag oder die Ausführung eines zweifachen Schlages auf den Probekörper (Prellen) sein. Ein guter Schlag muss klar die Grundschiwingung darstellen mit der jeweils höchsten Amplitude<sup>8</sup>. Wenn die Frequenzantwortkurve kein abnormes Aussehen aufweist wird das Ergebnis gespeichert.

f) Standardprobekörper

Die Herstellung und Größe des Standardprobekörpers erfolgt entsprechend Abschnitt 5.1.1. Abweichungen vom Standardprobekörper werden von dieser Empfehlung nicht erfasst und müssen daher separat beurteilt werden.

g) Auswertung der inneren Schädigung

Bei diesem Verfahren wird der relative dynamische E-Modul aus der Grundschiwingung nach n Frost-Tau Wechseln für jeden einzelnen Probekörper berechnet mit:

---

<sup>8</sup> Bei den transversalen Grundschiwingungen liegen die Schwiwingungsknoten in einem Abstand von 0,224 der Probekörperlänge von jedem Ende des Probekörpers entfernt (ungefähr die Viertelpunkte). Die Schwiwingungen sind am größten an den Enden, ungefähr 3/5 des Maximums in der Mitte und Null an den Schwiwingungsknoten. Deshalb zeigt eine Bewegung des Aufnehmers über die Länge des Probekörpers an, ob die beobachteten Schwiwingungen von einem Probekörper stammen, der mit seiner fundamentalen Grundfrequenz schwiwingt. Für den Referenzprobekörper bedeutet das, dass die Nodalpunkte  $0,224 \cdot 150 \text{ mm} = 33,6 \text{ mm}$  vom Probekörper Ende entfernt sind (Abb. 9).

$$R_{f,n} = \left( \frac{f_n}{f_0} \right)^2 \quad (1)$$

0)

$R_{f,n}$  relativer dynamischer E-Modul aus der Grundschwingung  $f_n$  ist die Grundfrequenz nach  $n$  Frost-Tau Zyklen  
 $f_0$  ist die Grundfrequenz nach Wiedersättigung, vor Beginn der Frost-Tau Wechsel

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

Es besteht die Option den relativen dynamischen E-Modul in Prozent auszudrücken.

h) Schädigungskriterium

Das Schädigungskriterium ist entsprechend Absatz 7.4.5 definiert.

i) Präzisionsdaten

Die Präzisionsdaten für den relativen dynamischen E-Modul sind:

Relativer dynamischer E-Modul	100 %	80 %
	Standardabweichung	
Wiederholpräzision $s_r$	0,09 %	4,4 %
Vergleichspräzision $s_R$	0,17 %	6,6 %

Die Präzisionsdaten für die Resonanzfrequenz können in Form von Gleichungen angegeben werden. Diese Daten gelten für Laborbeton, der nach Anhang, Alternative Methode A, geprüft wird.

Die Präzisionsdaten können wie folgt angegeben werden:

$$s_r = -0,2151 R_{f,n} + 0,2166 \quad (11)$$

( $R_f$  0,80 bis 1,0 mit  $R^2 = 0,86$ )

$$s_R = -0,3199 R_{f,n} + 0,3216 \quad (12)$$

( $R_f$  0,80 bis 1,0 mit  $R^2 = 0,92$ )

wobei  $s_r$  und  $s_R$  die Standardabweichung der Wiederholpräzision und der Vergleichspräzision darstellen.

ANMERKUNG: Die Gleichungen basieren auf den Ergebnissen des RILEM Round Robin Tests des TC IDC, durchgeführt mit 4 Instituten und drei unterschiedlichen Betonserien.

### **Alternative Methode B - Messung der Längenänderung**

Die innere Schädigung durch Frostangriff kann zu erheblicher irreversibler Ausdehnung des Betons führen. Die Messung der Längenänderung kann benutzt werden, um die innere Schädigung durch Frost zu quantifizieren.

#### a) Vorschriften

1. ASTM C 341-89 – Length Change of Drilled or Sawed Specimens of Cement Mortar and Concrete (partly adopted and modified). Längenänderung von gebohrten oder gesägten Probekörpern aus Mörtel oder Beton (teilweise übernommen und modifiziert).
2. ASTM C 490-89 – Apparatus for Use in Measurement of Length Change of Hardened Cement Paste, Mortar and Concrete (partly adopted and modified). Apparat, um die Längenänderung von Zementstein, Mörtel und Beton zu messen (teilweise übernommen und modifiziert).
3. ISO 4762/1997 Hexagon socket head cap screw

#### b) Definition

1. *Längenänderung* ist eine Vergrößerung oder Verkleinerung der linearen Dimensionen eines Probekörpers, die nicht durch eine angelegte Last erzeugt wurde, gemessen über eine Längsachse.
2. *Messlänge* ist der Abstand der Messpunkte, die an den äußeren Enden der Messmarken liegen.

#### c) Geräte

1. *Längenänderungsmesser/ Setzdehnmesser*: Das Gerät mit dem die Längenänderung eines Probekörpers gemessen wird, muss entsprechend auf die Probenkörpergröße angepasst sein. Zur besseren Kontaktierung der eingebrachten Messmarken sowie der bequemeren Handhabung, sollte die Messspitze positiv geformt sein. Entsprechend der Abmessungen des Standardprobekörpers muss die Länge des Längenänderungsmessers bzw. Setzdehnmessers  $\geq 170$  mm betragen.

Der Längenänderungsmesser muss über eine Mikrometermessuhr oder eine entsprechende Messeinrichtung mit einer 0,01 mm-Teilung verfügen. Die Messgenauigkeit des Ableseinstruments muss unter 0,001 mm liegen.

2. **Messmarken:** Die Kontaktflächen müssen konisch ausgebildete, wärmebehandelte Oberflächen haben, wie sie in Abb. 10 dargestellt sind (entsprechend ISO 4762). Die Messmarken müssen aus rostfreiem Stahl oder einem anderen korrosionsfesten Material gleicher Härte bestehen. Die Messmarken müssen so angebracht sein, dass ihre Hauptachsen mit den Hauptachsen des Probekörpers zusammenfallen. Bei dem Standardprobekörper müssen die Messmarken  $10 \pm 2$  mm in den Probekörper hineinragen. Der Abstand zwischen den inneren Enden der Messmarken muss  $13 \pm 0,5$  cm betragen.

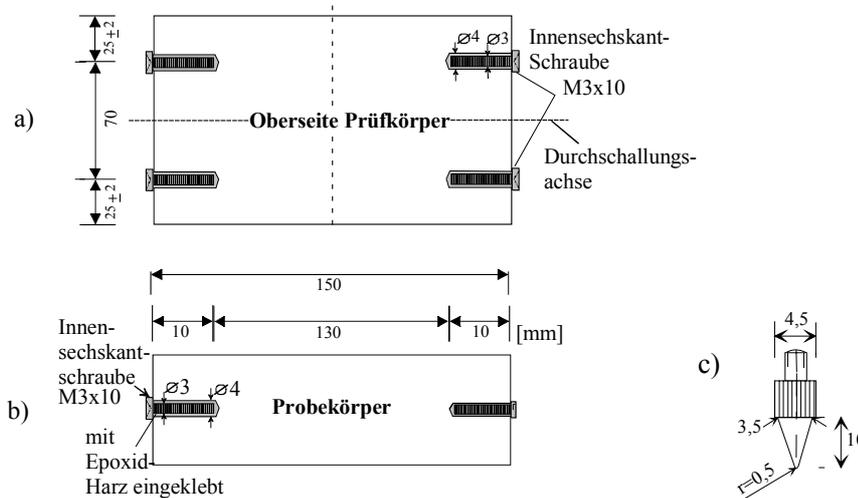


Abbildung 10: Prüfeinrichtung zur Messung der Längenänderung

- a) Darstellung der vorbereiteten Probekörper
- b) Seitenansicht der vorbereiteten Probekörper
- c) Fühler für Messuhr (Vergleichsanordnung)

3. **Kalibrierbalken:** Die Prüfanordnung muss in regelmäßigen Abständen kalibriert werden. Der Länge des Kalibrierbalkens muss in etwa gleich der mittleren Messlänge der geprüften Probekörper sein. Der Kalibrierbalken sollte aus einer Stahllegierung bestehen, deren thermischer Ausdehnungskoeffizient  $\leq 2 \cdot 10^{-6} \text{ K}^{-1}$  beträgt. Die Enden müssen wärmebehandelt, gehärtet, poliert und entsprechend der Messmarken ausgeformt sein. Der Kalibrierbalken ist an einem Seitenende mit einer Positionsmarke zu versehen. Er wird bei jeder Längenänderungsmessung in derselben Position in die Messapparatur eingesetzt. Wenn die Apparatur in einem Raum mit konstanter Temperatur steht, muss die Anzeige der Messapparatur mit Hilfe des Kalibrierbalkens mindestens zu Beginn sowie am Ende der Messungen

durchgeführt werden, die innerhalb eines halben Tages erfolgen. Die Anzeige muss häufiger überprüft werden, wenn die Apparatur in einem Raum steht, dessen Temperatur nicht konstant ist.

d) Anbringen der Messmarken

Die Messmarken können mit Epoxydharz in die gebohrten Löchern eingeklebt werden. Die Bohrungen der Löcher sollten 1 mm größer als die Messmarken sein. Die Anordnung und Tiefe der gebohrten Löcher ist der Abb. 10 zu entnehmen. Die Tiefe der Löcher muss dabei so gewählt werden, dass die Messmarken zwischen 3 und 5 mm über die Enden des Probekörpers hinaus stehen. In jede der zwei gegenüberliegenden Seiten des Probekörpers wird entsprechend ein Lochpaar gebohrt, um Verkrümmungen zu kompensieren und um eine bessere Mittelung der Längenänderung zu ermöglichen. Beide Lochpaare müssen in einer Ebene positioniert sein, die die Längsachse des Probekörpers umfasst. Der Abstand muss mit der Länge des Längenänderungsmessers übereinstimmen. Die Mitte eines jeden Loches muss zumindest ca. 25 mm vom Rand der Probekörper entfernt sein.

e) Bestimmung der Messlänge der Probekörper

Während der Längenmessung muss der Probekörper langsam rotiert werden. Der kleinste angezeigte Messwert muss aufgezeichnet werden, falls die Rotation eine Änderung in der Anzeige bewirkt. Die Probekörper müssen bei jeder Messung mit dem selben Seitenende in die Messapparatur eingesetzt werden.

Falls sich an den Seitenenden der Probekörper keine Messmarken befinden, wird die Messlänge durch direkte Messung zwischen den Referenzpunkten mit einem geeigneten Messinstrument bestimmt. Bei Probekörpern, bei denen Messmarken an den Seitenenden aufgebracht wurden, wird die Messlänge dadurch bestimmt, dass der Abstand zwischen den Messmarken genommen wird. Die Länge des Probekörpers ergibt sich durch Subtraktion der Längen der zwei Messmarken.

f) Standardprobekörper

Die Herstellung und Größe des Standardprobekörpers erfolgt entsprechend Abschnitt 5.1.1. Abweichungen vom Standardprobekörper werden von dieser Empfehlung nicht erfasst und müssen daher separat beurteilt werden.

## g) Bestimmung der Längenänderung

Die Längenänderung wird nach folgender Gleichung bestimmt:

$$\Delta l_n = \frac{l_n - l_0}{l_s} * 100 \quad (13)$$

wobei  $l_n$  ist:  $l_n = l_{cs} - l_1 + l_2$

$\Delta l_n$  Relative Längenänderung nach n Frost-Tau Zyklen in %

$l_0$   $l_0 = l_n$  (0 FTW), Länge des Probekörpers nach Abzug der Messmarken vor dem ersten Frost-Tau Zyklus nach der Flüssigkeitssättigung.

$l_{cs}$  Messlänge des Kalibrierbalkens (Konstante).

$l_1$  Messlänge des Kalibrierbalkens zum Messzeitpunkt nach n Frost-Tau Wechseln.

$l_2$  Länge des Probekörpers nach Abzug der Messmarken nach n Frost-Tau Wechseln.

$l_s$  Gesamtlänge des Probekörpers vor Anbringen der seitlichen Abdichtung (Genauigkeit 0,5 mm).

## h) Schädigungskriterium

Ein Schädigungskriterium muss separat definiert werden.

## i) Präzisionsdaten

Präzisionsdaten für die Längenänderung sind nicht verfügbar.