

BAWMerkblatt

Frostprüfung von Beton (MFB)

Ausgabe 2025

EU-Notifizierung Nr. 2025/0403/DE

Hinweis:

Notifiziert gemäß der Richtlinie (EU) 2015/1535 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 9. September 2015 über ein Informationsverfahren auf dem Gebiet der technischen Vorschriften und der Vorschriften für die Dienste der Informationsgesellschaft (ABl. L 241 vom 17.9.2015, S. 1)

BAW-Merkblätter, -Empfehlungen und -Richtlinien Herausgeber

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW)
Kußmaulstraße 17, 76187 Karlsruhe
Telefon: +49 721 9726-0
E-Mail: info@baw.de
www.baw.de



creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/

Soweit nicht anders gekennzeichnet, stehen die Inhalte der Beiträge unter der Creative Commons Lizenz BY-ND 4.0 (Namensnennung – Keine Bearbeitungen 4.0 International). Bei anderweitiger Kennzeichnung unterliegen die entsprechenden Inhalte dem urheberrechtlichen Schutz und dürfen nicht weiterverwendet werden.

	Inhaltsverzeichnis	Seite
1	Einleitung	2
2	Literatur und normative Verweisungen	2
3	Definitionen	3
4	Prüfeinrichtung	4
5	Probekörper	8
5.1	Grundsätzliche Anforderungen	8
5.2	Herstellung der Standardprobekörper	8
5.2.1	Probekörper zur Prüfung von Beton	8
5.2.2	Probekörper zur Prüfung von Spritzmörtel/Spritzbeton	10
5.3	Abweichende Probekörper zum Standardprobekörper	10
6	Ablauf der Prüfung	11
6.1	Allgemeines	11
6.2	Trockenlagerung	11
6.3	Vorsättigung	12
6.3.1	Probenvorbereitung und Abdichtung	12
6.3.2	Vorsättigung mit Prüfflüssigkeit durch kapillares Saugen	12
6.4	Frost-Tau-Belastung	12
7	Messungen	13
7.1	Abfolge der Messungen aus Oberflächenabwitterung, Flüssigkeitsaufnahme und Ultraschalllaufzeit	13
7.2	Bestimmung der Oberflächenabwitterung	14
7.2.1	Messdurchführung	14
7.2.2	Auswertung der Oberflächenabwitterung	14
7.3	Messung der Flüssigkeitsaufnahme	14
7.3.1	Messdurchführung	14
7.3.2	Auswertung der Flüssigkeitsaufnahme	15
7.4	Messung der Ultraschalllaufzeit (innere Schädigung)	15
7.4.1	Messaufbau	15
7.4.2	Kalibrierung	16
7.4.3	Messdurchführung	16
7.4.4	Auswertung der inneren Schädigung	16
8	Bewertung Frostwiderstand nach dem CIF-Test	18
8.1	Abnahmekriterium Oberflächenabwitterung	18
8.2	Abnahmekriterium innere Schädigung	18
9	Bewertung Frost-Tausalz-Widerstand nach dem CDF-Test	19
9.1	Abnahmekriterium Oberflächenabwitterung	19
9.2	Abnahmekriterium innere Schädigung	19
10	Bericht	20

11	Anforderungen an das Labor und Rückstellproben	21
12	Präzisionsdaten	21
12.1	Allgemein	21
12.2	Präzision des CIF-Tests für Betonmischungen	21
12.2.1	Messung der inneren Schädigung - Ultraschalllaufzeit	21
12.2.2	Flüssigkeitsaufnahme	22
12.2.3	Oberflächenabwitterung	22
12.3	Präzision des CDF-Tests für Betonmischungen	23
12.3.1	Oberflächenabwitterung	23

Abbildungsverzeichnis	Seite
Abbildung 1: Kapillares Saugen	4
Abbildung 2: Prüfbehälter mit Probekörper im Flüssigkeitstemperierbad	5
Abbildung 3: Temperaturkontrollierte Prüftruhe	5
Abbildung 4: Kontrolltemperatur-Zyklus. Im gekennzeichneten Temperaturbereich > 15 °C (schraffierte Fläche) dürfen die Messungen nach Abschnitt 7 durchgeführt werden.	6
Abbildung 5: Absaugeeinrichtung	6
Abbildung 6: Ultraschallbad	7
Abbildung 7: Zusägen des Probekörpers und der Rückstellprobe bei seitlicher PTFE-Scheiben-Anordnung	9
Abbildung 8: Messabfolge mit Prüfschritten bzw. Prüfeinrichtungen A bis D	13
Abbildung 9: Messaufbau zur Bestimmung der Ultraschalllaufzeit	15

Tabellenverzeichnis	Seite
Tabelle 6.1: Lagerungsdauern vor Frostbeginn	11
Tabelle 8.1: Abnahmekriterien Oberflächenabwitterung CIF-Test	18
Tabelle 8.2: Abnahmekriterien innere Schädigung CIF-Test	18
Tabelle 9.1: Abnahmekriterien Oberflächenabwitterung CDF-Test	19
Tabelle 9.2: Abnahmekriterien innere Schädigung CDF-Test	19
Tabelle 12.1: Präzisionsdaten für die Messung der inneren Schädigung - Ultraschalllaufzeit im CIF-Test	21
Tabelle 12.2: Präzisionsdaten für die Messung der Flüssigkeitsaufnahme	22
Tabelle 12.3: Präzisionsdaten für die Messung der Oberflächenabwitterung im CIF-Test	22
Tabelle 12.4: Präzisionsdaten für die Messung der Oberflächenabwitterung im CDF-Test	23
Tabelle 12.5: Parameter v_0 und d für die Abwitterung im CDF-Test gemäß /1/	23

Anlagenverzeichnis

Anlage 1: Statistische Kennwerte

Änderungen

Gegenüber dem BAW-Merkblatt Frostprüfung von Beton (MFB), Ausgabe 2012, wurden die Normenbezüge aktualisiert. Des Weiteren wurden in den Abschnitten 8 und 9 die Bezeichnungen der Unterabschnitte zu den Abnahmekriterien angepasst und vereinheitlicht. Die früher in der Bezeichnung enthaltenen Begriffe „maßgebend“ und „zusätzlich“ wurden gestrichen, da stets beide Abnahmekriterien einzuhalten sind und diese gleichwertig gelten.

Darüber hinaus wurde das Merkblatt um eine Anlage 1 ergänzt, um eine einheitliche Berechnung der statistischen Kennwerte im Rahmen der Versuchsauswertung sicherzustellen.

Frühere Ausgaben

BAW-Merkblatt Frostprüfung von Beton (MFB), Ausgabe 2012.

Vorbemerkungen

Das BAW-Merkblatt Frostprüfung von Beton (MFB) beschreibt die Prüfung des Frostwiderstands und des Frost-Tausalz-Widerstands von Beton und Spritzmörtel/Spritzbeton. Für die Durchführung dieser Prüfungen liegt derzeit keine Prüfnorm vor, welche die für Wasserbauwerke relevanten Bewertungskriterien vollständig beinhaltet. Die Prüfung nach DIN CEN/TS 12390-9 ermöglicht lediglich die Bestimmung der Abwitterungen der Betonoberfläche.

Nach diesem Merkblatt ist für die Prüfung des Frostwiderstands der CIF-Test /1/, für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands der CDF-Test /2/ anzuwenden. Beide Prüfverfahren sind als RILEM-Empfehlung veröffentlicht. Die nachfolgende Prüfbeschreibung entspricht im Grundsatz der RILEM-Empfehlung des CIF-Tests /1/ und wurde in einigen Punkten an die Anforderungen des Wasserbaus angepasst. Diese Modifikationen betreffen die Probenherstellung, die Probengeometrie, die Probenlagerung, das Prüfalter und die Abnahmekriterien. Die Weiterentwicklungen in der Prüfmethodik des CIF-Tests und die o. g. Modifikationen wurden gleichzeitig auf den CDF-Test übertragen, so dass auch für den CDF-Test ergänzend zur Oberflächenabwitterung die durch Messung der Ultraschalllaufzeit ermittelte innere Schädigung als Bewertungskriterium herangezogen wird. Bis auf die unterschiedliche Prüflösung ergibt sich daraus eine einheitliche Vorgehensweise bei der Prüfung des Frostwiderstands und des Frost-Tausalz-Widerstands.

Die für die Bewertung des Frostwiderstands und des Frost-Tausalz-Widerstands festgelegten Abnahmekriterien wurden auf der Basis von Prüfungen an wasserbautypischen¹ Betonen und Spritzbetonen aufgestellt und gelten für die Bewertung gesondert hergestellter Probekörper im Rahmen der Eignungs- und Güteprüfung. Die Abnahmekriterien gelten nicht für die Bewertung bestehender Bauwerke im Rahmen von Bauwerksuntersuchungen.

¹ Als wasserbautypisch gelten i. d. R. solche Betone und Spritzbetone, die den Anforderungen der Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W), Leistungsbereiche 215 und 219, entsprechen. Insbesondere für leimreiche Betone und Betone ohne Luftporenbildner mit untypisch niedrigen Luftporengehalten, welche im Wasserbau üblicherweise nicht eingesetzt werden, kann die Festlegung gesonderter Abnahmekriterien erforderlich sein.

1 Einleitung

Mit dem CIF-Test wird der Widerstand gegenüber einer Frost-Tau-Beanspruchung mit reinem Wasser als Prüflösung untersucht. CIF bedeutet „Capillary suction, Internal damage and Freeze-thaw test“. Während der Prüfung wird ein ansteigender Wassersättigungsgrad zunächst durch isothermes, kapillares Saugen und anschließend bei definierten Frost-Tau-Wechseln (Frostsaugen) entsprechend einer einaxialen Belastung in der Praxis eingestellt. Der CIF-Test ermöglicht die gleichzeitige Messung der Feuchteaufnahme, der inneren Gefügeschädigung und der Oberflächenabwitterung durch eine Anzahl von Frost-Tau-Wechseln mit einaxialem Wärme- und Feuchtetransport in Gegenwart von Wasser. Die vom Wassersättigungsgrad bestimmte innere Gefügeschädigung hat einen entscheidenden Einfluss auf den Frostwiderstand.

Mit dem CDF-Test wird der Widerstand gegenüber einer Frost-Tau-Beanspruchung bei gleichzeitiger Taumittelbelastung geprüft. CDF bedeutet „Capillary suction of De-icing chemicals and Freeze-thaw test“. Der CDF-Test ermöglicht die gleichzeitige Messung der Feuchteaufnahme, der inneren Gefügeschädigung und der Oberflächenabwitterung durch eine Anzahl von Frost-Tau-Wechseln mit einaxialem Wärme- und Feuchtetransport in Gegenwart einer definierten Prüfflüssigkeit. In der Regel wird eine definierte Tausalzlösung (3 %-ige NaCl-Lösung) verwendet. Bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands ist die Oberflächenabwitterung dominant.

2 Literatur und normative Verweisungen

- /1/ CIF-Test - Testmethode zur Bestimmung des Frostwiderstands von Beton (CIF). Final Recommendation of RILEM TC 176-IDC ,Internal Damage of Concrete due to frost action: Test methods of frost resistance of concrete. Materials and Structures, Vol. 37 - No 274 (12.2004) p. 742-75.
- /2/ CDF-Test - Testmethode zur Bestimmung des Frost-Tausalz-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.

CEN/TR 15177	DIN-Fachbericht CEN/TR 15177:2006-06. Prüfung des Frost-Tauwiderstandes von Beton - Innere Gefügestörung; Deutsche Fassung CEN/TR 15177:2006.
DIN CEN/TS 12390-9	Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung; Deutsche Fassung CEN/TS 12390-9:2016
DIN 1045-2	Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregel zu DIN EN 206-1
DIN EN 12350-5	Prüfung von Frischbeton, Teil 5: Ausbreitmaß
DIN EN 12350-6	Prüfung von Frischbeton, Teil 6: Frischbetonrohdichte
DIN EN 12350-7	Prüfung von Frischbeton, Teil 7: Luftgehalt - Druckverfahren
DIN EN 12390-1	Prüfung von Festbeton, Teil 1: Form, Maße und andere Anforderungen für Probekörper und Formen
DIN EN 12390-2	Prüfung von Festbeton, Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfungen

DIN EN 12504-4	Prüfung von Beton in Bauwerken – Teil 4: Bestimmung der Ultraschall-Impulsge- schwindigkeit
DIN EN 14488-1	Prüfung von Spritzbeton – Teil 1: Probenahme von Frisch- und Festbeton
DIN ISO 5725	Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen
VDI/VDE 3522	Zeitverhalten von Berührungsthermometern, (Time performance of contact ther- mometers), Juni 1987.

3 Definitionen

- a) Frostwiderstand ist der Widerstand gegenüber Frost-Tau-Wechseln mit demineralisiertem Wasser als Prüfflüssigkeit.
- b) Frost-Tausalz-Widerstand ist der Widerstand gegenüber Frost-Tau-Wechseln mit einer Tausalzlösung als Prüfflüssigkeit.
- c) Die Prüfflüssigkeit ist die Flüssigkeit, die während der Prüfung vom Probekörper aufgenommen wird (Abschnitt 4 c).
- d) Abwitterung bzw. Oberflächenabwitterung ist der durch Frost-Tau- oder Frost-Taumittel-Beanspru- chung verursachte Materialverlust der Oberfläche des Betons.
- e) Innere Schädigung ist die Schädigung des inneren Betongefüges (auch ohne sichtbare äußere Schä- den), die zu einer Veränderung der Betoneigenschaften führt (z. B. eine Verminderung des dynami- schen Elastizitätsmoduls, der Biegezugfestigkeit und der Dichtigkeit der Betonrandzone gegenüber Schadstoffen).
- f) Der Referenzpunkt ist der physikalische Messpunkt, an dem der Temperaturzyklus geregelt wird.
- g) Die Referenztemperatur ist die gemessene Temperatur am Referenzpunkt.
- h) Die Prüffläche ist die Fläche eines Probekörpers, über die der Temperaturwechsel bzw. die Aufnahme der Prüfflüssigkeit während des Prüfvorganges stattfindet.
- i) Die Durchschallungsachse ist die gedachte direkte Verbindung der Mittelpunkte der Ultraschallprüf- kopfflächen von Sender und Empfänger.
- j) Die Durchschallungsstrecke ist die kürzeste Strecke auf der Durchschallungsachse zwischen dem Ult- raschallsender und dem Ultraschallempfänger über die die Ultraschalllaufzeit gemessen wird.
- k) Die Ultraschalllaufzeit ist die Zeit, die ein Ultraschallsignal benötigt, um die Durchschallungstrecke zwischen dem Ultraschallsender und dem Ultraschallempfänger zurückzulegen.
- l) Als Ankopplungsmedium wird die verwendete Prüfflüssigkeit eingesetzt. Es ermöglicht eine reprodu- zierbare Signalübertragung zwischen den Ultraschallprüfköpfen und dem Probekörper.

4 Prüfeinrichtung

- a) *Klimaraum:* Temperatur von $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und relative Luftfeuchtigkeit von $65 \pm 5\%$. Im Klimaraum muss die Verdunstung einer nach oben offenen Wasserfläche $45 \pm 15 \text{ g}/(\text{m}^2 \text{ h})$ betragen. Normalerweise wird dies mit einer Windgeschwindigkeit von $\leq 0,1 \text{ m/s}$ erreicht. Zur Messung der Verdunstung ist eine Schale mit einer Tiefe von ungefähr 40 mm und einer Querschnittsfläche von $225 \pm 25 \text{ cm}^2$ zu verwenden. Die Schale ist bis $10 \pm 1 \text{ mm}$ unter den Rand zu füllen. Der CO₂-Gehalt im Klimaraum muss entsprechend CEN/TS 12390-9 auf einem täglichen Mittelwert im Bereich von 300 ppmv bis 1.000 ppmv gehalten werden.
- b) *Seitliche Abdichtung:* Aluminiumfolie mit Butylklebung (Referenzverfahren) oder Epoxidharz (Alternativverfahren). Die Abdichtung muss bei einer Temperatur von -20°C dauerhaft sein. Sie darf bei Erreichen der Mindesttemperatur nicht spröde werden und sich nicht vom Probekörper lösen. Ein geeigneter Primer ist zu verwenden.
- c) *Prüfflüssigkeit:*
 - Prüfung des Frostwiderstands (CIF-Test): demineralisiertes Wasser
 - Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands (CDF-Test): Standard-Tausalzlösung (97 M.-% demineralisiertes Wasser und 3 M.-% NaCl).
- d) *Prüfbehälter (Abbildung 1 und Abbildung 2):* Die Prüfbehälter bestehen aus rostfreiem Stahl. Die Größe eines Prüfbehälters ist so zu wählen, dass die Luftsicht zwischen den vertikalen Flächen des Probekörpers und dem Prüfbehälter auf $30 \pm 20 \text{ mm}$ begrenzt ist^{2,3}. Es ist zusätzlich ein Abstandhalter von $5 \pm 0,1 \text{ mm}$ und ein Deckel erforderlich.

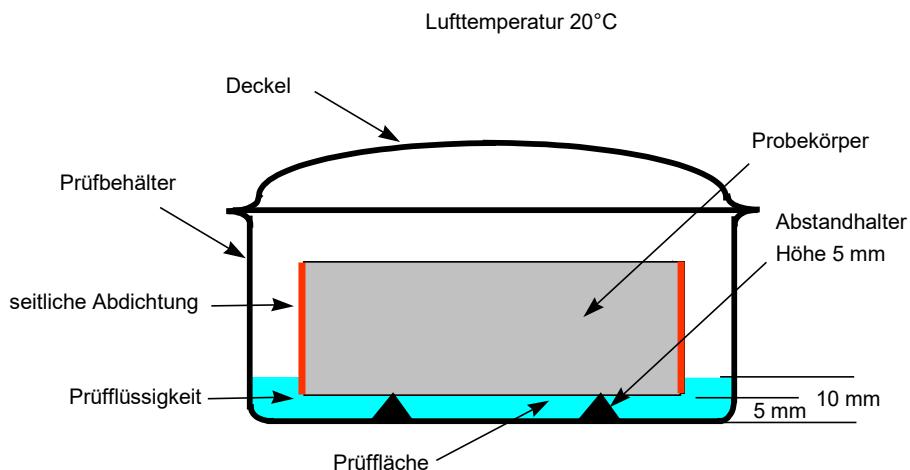


Abbildung 1: Kapillares Saugen

² Die Luftsicht zwischen den vertikalen Flächen der Prüfkörper und dem Prüfbehälter wirkt als Wärmedämmung.

³ Die Edelstahlbehälter sind in verschiedenen modularen Größen angepasst, so dass die gleichen Randbedingungen für jede Prüfkörpergröße angetroffen werden.

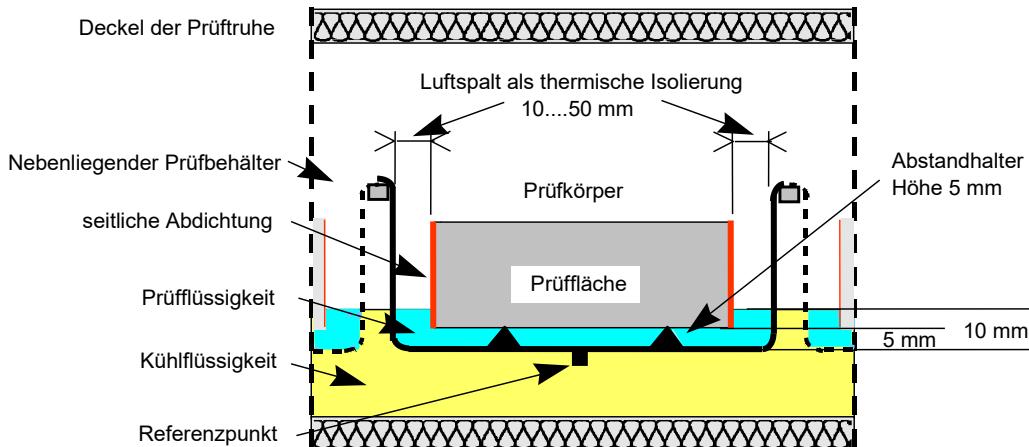


Abbildung 2: Prüfbehälter mit Probekörper im Flüssigkeitstemperierbad

- e) Temperaturkontrollierte Prüftruhe (Abbildung 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 müssen in der Lage sein, das Temperatursystem am Referenzpunkt, entsprechend dem Temperaturzyklus (Abbildung 4), zu regulieren.

Die Prüftruhe muss mit Halterungen für die Prüfbehälter über dem Temperierbad ausgestattet sein, die eine Eintauchtiefe der Prüfbehälter von 15 ± 3 mm sicherstellen. Das Temperierbad muss bei nicht vollständiger Belegung mit Probekörpern vollflächig, z. B. durch leere Prüfbehälter, abgedeckt werden.⁴

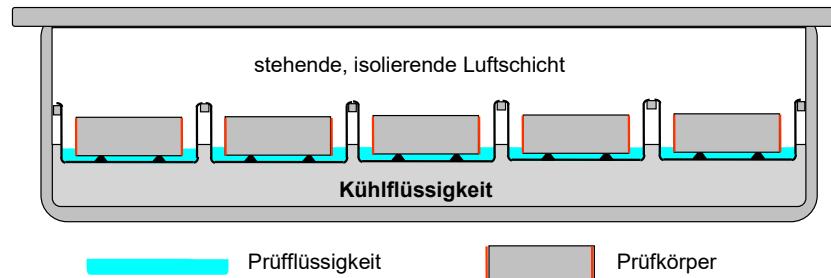


Abbildung 3: Temperaturkontrollierte Prüftruhe

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 thermischem Kontakt in der Mitte des Behälterbodens angeordnet.

Für die Messung wird ein Temperaturmesser mit einer Toleranz von maximal $\pm 0,05$ K bei 0°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 (50×6 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 $6,3 \text{ s} \pm 0,8 \text{ s}$ betragen. Zur Kalibrierung wird die Minimaltemperatur bei -20°C verwendet.

⁴ Bei der Durchführung des Tests in einem kryogenen Bad ist keine Abdeckung der Prüfbehälter erforderlich, da der Prüftruhendeckel einen genügenden Verdunstungsschutz schafft, während die Wände der Probenbehälter als Kühlzelle dienen.

Das Gerät muss einen Frost-Tau-Wechsel nach dem in Abbildung 4 gezeigten Temperaturzyklus sicherstellen.

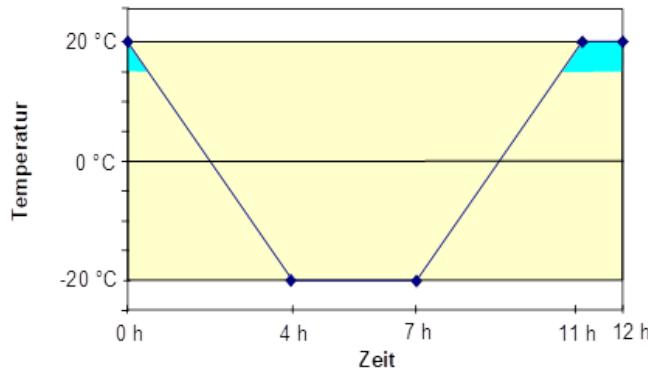


Abbildung 4: Kontrolltemperatur-Zyklus. Im gekennzeichneten Temperaturbereich $> 15^{\circ}\text{C}$ (schraffierte Fläche) dürfen die Messungen nach Abschnitt 7 durchgeführt werden.

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 1 Stunde konstant gehalten. Der Temperaturzyklus wird am Referenzpunkt überwacht. Die Abweichung der Temperatur gemessen am Referenzpunkt darf nicht mehr als $\pm 0,5 \text{ K}$ zumindest bei der Minimaltemperatur und $\pm 1 \text{ K}$ bei den übrigen Temperaturen betragen. Eine konstante Zeitverschiebung zwischen den einzelnen Prüfbehältern ist zulässig.

Die Temperaturtoleranz darf unmittelbar nach der ersten Eisbildung für ein Intervall von maximal 10 Minuten überschritten werden.

- f) Vorrichtung zur Einstellung der Flüssigkeitshöhe: z. B. durch ein Sauggerät (Abbildung 5). Das Sauggerät kann aus einer Kapillare mit einer Abstandhalterung von $10 \pm 1 \text{ mm}$ bestehen, die mit einer Wasserstrahlpumpe verbunden ist, wodurch die überschüssige Flüssigkeit aus den Prüfbehältern abgesaugt wird.

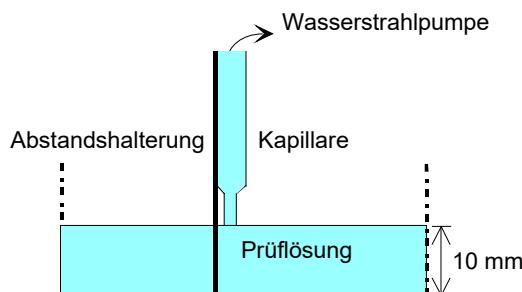


Abbildung 5: Absaugeinrichtung

- g) Ultraschallbad (Abbildung 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 mindestens 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.

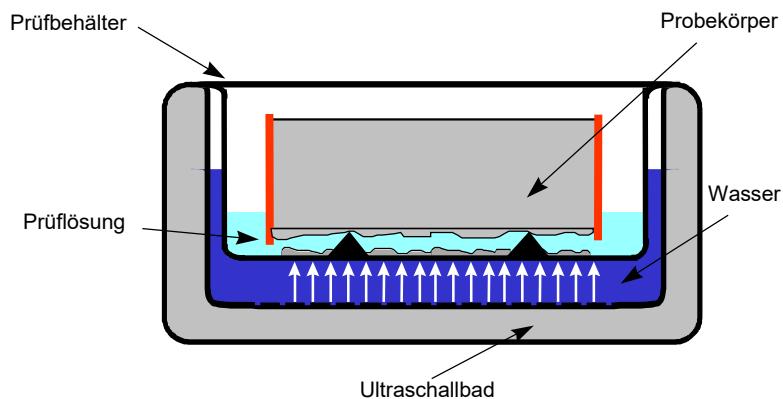


Abbildung 6: Ultraschallbad

- h) *Gerät zur Messung der Ultraschalllaufzeit:* Die Ultraschalllaufzeit kann mit einem handelsüblichen Ultraschallmessgerät gemessen werden, das zur Bestimmung der Laufzeiten von Longitudinalwellen bei direkter Durchschallung von Beton gemäß DIN EN 12504-4 geeignet ist. Um den Messwert auf Plausibilität prüfen zu können, empfiehlt sich ein Gerät mit Anzeige des Signalbilds (Empfangsamplitude). Der Frequenzbereich der Prüfköpfe muss im Bereich von 50 und 150 kHz liegen. Die Prüfköpfe sollten einen Durchmesser von 30 ± 10 mm besitzen.
- i) *Prüfbehälter für Ultraschalllaufzeitmessung:* Zur Messung der Laufzeit wird ein Behälter aus elektrisch nicht leitendem Material (z. B. Polymethylmethacrylat) verwendet. Die Ultraschallprüfköpfe müssen so angebracht werden, dass die Achse der Durchschallungsstrecke parallel in einem Abstand von 35 mm zur Prüffläche liegt (z. B. Aufnahme in einer Aussparung zweier gegenüberliegender Seitenflächen, Abbildung 9). Die Abmessungen müssen so dimensioniert sein, dass eine Kalibrierung nach Abschnitt 7.4.2 möglich ist.
- j) *Kalibrierprüfkörper:* Ein Kalibrierprüfkörper wird zur Kalibrierung des Ultraschall-Messaufbaus eingesetzt. Der Kalibrierprüfkörper hat die Abmessungen $150 \times 110 \times 70$ mm ($\pm 0,1$ mm) und ist mit einer definierten mitgelieferten Ultraschalllaufzeit sowie mit Messmarken versehen.
- k) *Probentragblech:* Ein Trageblech (vorzugsweise 1 mm V2A-Stahl) mit Tragegriffen hilft der einfachen Handhabung der Probekörper während der Messung der Flüssigkeitsaufnahme und der inneren Schädigung. Die Größe des Trageblechs muss größer als die Prüffläche sein, so dass der Verlust von Abwitterungspartikeln verhindert wird. Die seitliche Aufkantung muss $10 \text{ mm} \pm 2 \text{ mm}$ betragen.
- l) *Trockenschrank:* Der Trockenschrank muss eine Temperatur von 110 ± 5 °C gewährleisten.
- m) *Papierfilter:* Zur Aufnahme der Abwitterungen werden Papierfilter benutzt.
- n) *Waage:* Masse der Abwitterung; Genauigkeit von $\pm 0,01$ g.
- o) *Waage:* Masse des Probekörpers; Genauigkeit von $\pm 0,1$ g.
- p) *Schieblehre:* Mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm.
- q) *PTFE-Platten:* PTFE-Platte oder anderes Material mit einer gleichwertigen wasserabweisenden Oberfläche als Form für die Prüffläche. Die Geometrie der Platte ist der Form für den 150 mm-Würfel angepasst und die Dicke beträgt $2 \text{ mm} < d \leq 5 \text{ mm}$ (siehe DIN CEN/TS 12390-9, 7.2.2).

5 Probekörper

5.1 Grundsätzliche Anforderungen

Eine Prüfserie besteht grundsätzlich aus mindestens 5 Probekörpern mit einer Gesamtprüffläche von mindestens $0,08 \text{ m}^2$. Die Anzahl von 5 Probekörpern ermöglicht eine statistische Auswertung und die Ermittlung von Ausreißern. Die Höhe der Probekörper beträgt 70 mm ($\pm 2 \text{ mm}$).

5.2 Herstellung der Standardprobekörper

5.2.1 Probekörper zur Prüfung von Beton

5.2.1.1 Abmessungen

Der Standardprobekörper hat die Dimensionen (Länge x Breite x Höhe) $150 \times 150 \times 70 \text{ mm}$ ($\pm 2 \text{ mm}$). Der Probekörper darf in der Breite auf minimal 110 mm verkleinert werden.

5.2.1.2 Herstellung der Probekörper für die Eignungs- und Güteprüfung

Betonherstellung

Zur Prüfung von Betonmischungen für die Eignungs- und Güteprüfung werden die Probekörper in 150 mm Würfelformen gemäß DIN EN 12390-1 gefertigt. Beim Mischen des Betons sind die Anforderungen der DIN 1045-2, Abschnitt 9.8, einzuhalten. Die Herstellung und Verdichtung der Probekörper erfolgen gemäß DIN EN 12390-2, wobei für die Verdichtung ein Rütteltisch zu verwenden ist. Die Zeit bis zur vollständigen Verdichtung ist entsprechend der Konsistenz des Betons ausreichend lang zu wählen. Der Frostwiderstand von Beton hängt wesentlich von der Porenstruktur, insbesondere dem nicht kapillaraktiven Luftgehalt und der Dichtigkeit ab. Hieraus resultiert, dass unterschiedlich stark verdichtete Betone sich auch im Frostwiderstand unterscheiden können. Aus diesem Grund ist bei der Eignungs- und Güteprüfung eine vollständige Verdichtung des Betons für die Bewertung des Frostwiderstands besonders wichtig. Die Verdichtung muss so lange erfolgen, bis merklich keine weitere Luft aus dem Frischbeton entweicht. Der Beton darf sich nicht entmischen oder Wasser absondern.

Bei Verwendung von Zusatzmitteln sind die bei der Bauwerkserstellung zu erwartenden Zugabemengen zu verwenden. Die Frischbetonrohdichte ist gemäß DIN EN 12350-6, der Luftgehalt im Frischbeton gemäß DIN EN 12350-7 und die Konsistenz gemäß DIN EN 12350-5 zu prüfen und zu dokumentieren.

In der Würfelschalung ist an zwei gegenüberliegenden Seitenflächen jeweils eine vertikale PTFE-Scheibe fest anzutragen. Die PTFE-Scheiben dürfen nicht mit Trennmitteln behandelt werden. Die Betonoberfläche an der PTFE-Scheibe ist die Prüffläche. Das Großkorn der Gesteinskörnung des Betons darf nicht größer als ein Drittel der kleineren Durchschallungsstrecke (Länge und Breite gemäß 5.2.1.1) sein.

Nachbehandlung

Die Probekörper werden für 24 ± 2 Stunden in der Schalung belassen, wobei die freie Oberseite vor Austrocknung geschützt wird. Danach werden die Probekörper ausgeschalt. Wenn die Festigkeitsentwicklung des Betons langsam ist, kann die Ausschalfzeit auf 48 ± 2 Stunden verlängert werden.

Nach dem Ausschalen werden die Probekörper in Leitungswasser bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ gelagert. Die Dauer der Wasserlagerung nach dem Ausschalen hängt vom Zeitpunkt des Beginns der Vorsättigung der Proben

(kapillares Saugen) ab (siehe Abschnitt 6). Sofern nicht anders vereinbart, beginnt die Vorsättigung zum Zeitpunkt des Nachweises der Druckfestigkeitsklasse. Daraus ergeben sich folgende Fristen:

- Bei Betonen gemäß DIN 1045-2 beträgt die Dauer der Wasserlagerung grundsätzlich 6 Tage (bis zum 7. Tag), die Vorsättigung beginnt am 28. Tag.
- Bei Betonen, bei denen der Nachweis der Druckfestigkeitsklasse nach 56 Tagen zulässig ist, kann die Dauer der Wasserlagerung 13 Tage⁵ (bis zum 14. Tag) betragen, sofern auch die Vorsättigung erst am 56. Tag beginnt.

Gewinnung der Probekörper

Unmittelbar nach der Wasserlagerung werden die Proben auf die Standardhöhe gesägt. Nach dem Sägeschnitt erhält man je einen Standardprobekörper und eine Rückstellprobe (Abbildung 7). Falls eine Reduzierung der Breite des Probekörpers vereinbart wurde, kann entlang der abgezogenen Oberfläche eine Seite bis auf eine minimal zulässige Breite von 110 mm zugesägt werden (variabler Schnitt). Dieser Behandlung folgt die Trockenlagerung.

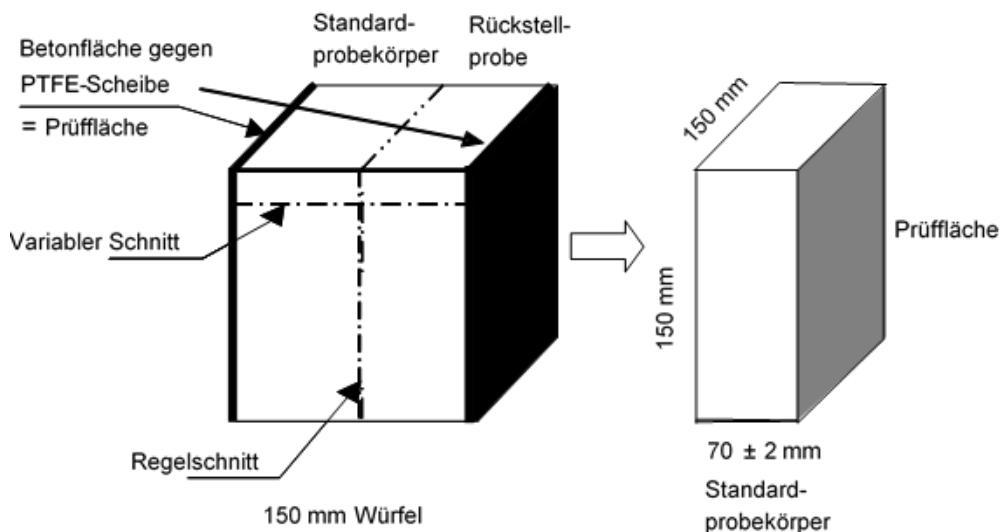


Abbildung 7: Zusägen des Probekörpers und der Rückstellprobe bei seitlicher PTFE-Scheiben-Anordnung

Alternativ darf gemäß DIN CEN/TS 12390-9, Abschnitt 7.3, eine PTFE-Platte in der Mitte der Form angeordnet werden, um diese in zwei Hälften zu unterteilen. Der Sägeschnitt entfällt dann. Die vertikal angeordnete PTFE-Platte dient als Formwand, daher ist bei dieser Platte auf eine ausreichende Steifigkeit zur Gewährleistung einer ebenen Oberfläche zu achten sowie die Einhaltung der Höhe der Standardprobekörper sicherzustellen. Die mittig angeordnete Platte kann durch zwei weitere Platten fixiert werden, die ebenfalls vertikal angeordnet werden. Als Prüffläche dient die Betonoberfläche, welche die mittig angeordnete PTFE-Platte berührt (Abmessung Prüffläche etwa 140 x 150 mm). Je Würfel werden so ein Standardprobekörper und eine Rückstellprobe erhalten.

⁵ Bei 48 Stunden Schalzeit entsprechend 1 Tag weniger Wasserlagerungsdauer.

5.2.2 Probekörper zur Prüfung von Spritzmörtel/Spritzbeton

5.2.2.1 Abmessungen

Es dürfen sowohl Zylinder als auch Proben mit rechteckigem Querschnitt verwendet werden. Der Standardprobekörper hat einen Durchmesser bzw. eine Kantenlänge von 150 mm und eine Höhe von 70 mm (± 2 mm).

5.2.2.2 Herstellung der Probekörper für die Eignungs- und Güteprüfung

Herstellung und Nachbehandlung von Grundplatten

Zur Prüfung von Spritzmörtel/Spritzbeton für die Eignungs- und Güteprüfung sind 5 gesonderte Platten gemäß DIN EN 14488-1 herzustellen. Die Oberfläche der Platten ist spritzrau zu belassen. Die Platten sind nach der Herstellung in einem geschlossenen Raum bei einer Lufttemperatur von 15 bis 22 °C für 24 ± 2 Stunden in der Form zu belassen, die freie Oberfläche ist durch Abdecken mit feuchten Tüchern vor Feuchteverlust zu schützen. Anschließend sind die Platten zu entformen. Wenn die Festigkeitsentwicklung der Platten ein Entformen nach 24 Stunden nicht zulässt, kann die Lagerungsdauer in den Spritzformen auf 48 ± 2 Stunden verlängert werden.

Nach dem Entformen sind die Platten in Leitungswasser bei (20 ± 2) °C zu lagern. Sofern nicht anders ver einbart, beträgt die Dauer der Wasserlagerung nach dem Ausschalen grundsätzlich 6 Tage⁶ (bis zum 7. Tag).

Gewinnung der Probekörper

Unmittelbar nach der Wasserlagerung ist aus jeder Platte im Nassschnitverfahren durch Sägeschnitte oder Bohrungen senkrecht zur spritzrau belassenen Oberfläche jeweils 1 Probekörper und eine Rückstellprobe herauszusägen oder herauszubohren. Von diesen Probekörpern ist durch Sägeschnitt parallel zur spritzrau belassenen Oberfläche gerade so viel abzutrennen, dass eine glatte, geschlossene Oberfläche entsteht. Die so entstandene Oberfläche ist die Prüffläche. Anschließend sind die Probekörper durch einen weiteren, zur Prüffläche parallelen Sägeschnitt auf eine Höhe von 70 ± 2 mm abzulängen. Dieser Behandlung folgt die Trockenlagerung.

5.3 Abweichende Probekörper zum Standardprobekörper

Werden abweichend zu den Standardprobekörpern Betonproben (z. B. aus Bauteilen) geprüft, so muss dies gesondert im Prüfbericht aufgeführt werden.

Bei der Untersuchung von Bohrkernen aus fertiggestellten Bauteilen aus Spritzmörtel/Spritzbeton (z. B. im Rahmen der Güteüberwachung der Ausführung) hängt der Mindestdurchmesser vom Größtkorndurchmesser ab: Bis zu einem Größtkorndurchmesser von 16 mm beträgt der Mindestdurchmesser der Proben 100 mm, bei größerem Größtkorndurchmesser 150 mm.

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. Die Höhe von 70 mm (± 2 mm) ist einzuhalten.

⁶ Bei 48 Stunden Schalzeit entsprechend 1 Tag weniger Wasserlagerungsdauer.

6 Ablauf der Prüfung

6.1 Allgemeines

Das Prüfverfahren beinhaltet drei Schritte: Die Trockenlagerung, die Vorsättigung durch kapillares Saugen und die Frost-Tau-Wechsel. Die Prüfung beginnt nach der Nachbehandlungsperiode unmittelbar nach Gewinnung der Probekörper. Maßgebend für den Frostbeginn ist der Beginn der Vorsättigung durch kapillares Saugen. Bei Betonen gemäß DIN 1045-2 beginnt die Vorsättigung grundsätzlich zum Zeitpunkt des Nachweises der Druckfestigkeitsklasse im Alter von 28 Tagen. Sofern der Nachweis der Druckfestigkeitsklasse im Alter von 56 Tagen erfolgt, kann auch die Vorsättigung im Alter von 56 Tagen beginnen.⁷

Bei Probekörpern, die gemäß Abschnitt 5.2.1 oder 0 hergestellt wurden, sind die in der nachfolgenden Tabelle festgelegten Zeiträume einzuhalten:

Tabelle 6.1: Lagerungsdauern vor Frostbeginn

Lagerung nach Herstellung	Nachbehandlung ⁸ (Schalung und Wasserlagerung) nach Abschnitt 5.2	Trockenlagerung im Klimaraum nach Abschnitt 6.2	Vorsättigung durch kapillares Saugen nach Abschnitt 6.3
Beginn der Vorsättigung durch kapillares Saugen	Lagerungsdauer		
28. Tag	7 Tage	21 ± 1 Tage	7 Tage
56. Tag	14 Tage	42 ± 1 Tage	7 Tage

6.2 Trockenlagerung

Die Probekörper werden in einem Klimaraum gemäß Abschnitt 4 a) bei (20 °C / 65 % r. F.) zur Oberflächentrocknung gelagert. Die Lagerungsdauer beträgt nach Tabelle 6.1 bei einem Prüfalter des Betons von 28 Tagen 21 ± 1 Tage, bei einem Prüfalter des Betons von 56 Tagen 42 ± 1 Tage. Die Probekörper sind in einem Abstand von mindestens 50 mm auf eine Seitenfläche zu stellen, so dass die Prüfflächen freistehend sind. Die Masseänderung ist zu messen.

⁷ Langsam erhärtende Betone weisen erst in einem höheren Alter eine vergleichbare Leistungsfähigkeit wie schnell erhärtende Betone auf. Dies gilt auch im Hinblick auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand. Dem entsprechend kann für solche Betone, bei denen gemäß ZTV-W LB 215 oder ZTV-W LB 219 ein Nachweis der Druckfestigkeitsklasse im Alter von 56 Tagen erfolgt, die Feucht- bzw. Wasserlagerungsdauer auf 14 Tage und die Lagerungsdauer im Klimaraum auf 6 Wochen verlängert werden. Bei Zementen mit hohen Hüttensandanteilen (Verwendung gemäß DIN 1045-2 für Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand eingeschränkt) wirkt sich der positive Einfluss der verlängerten Nachbehandlung ggf. weniger aus, da bei der verlängerten Klimaraumlagerung ein verstärkter Carbonatisierungsfortschritt mit nachteiligem Einfluss auf die Oberflächenabwitterung nicht ausgeschlossen werden kann.

⁸ Eine gegenüber den Vorgaben der Tabelle 6.1 verlängerte Feucht- bzw. Wasserlagerung (ggf. bis zum Beginn der Prüfung) kann sich infolge eines zum Frostbeginn erhöhten Wassersättigungsgrades der Poren ungünstig auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand auswirken.

Während der Klimaraumlagerung ist die Einhaltung der zulässigen Verdunstungsrate und der zulässigen CO₂-Konzentration gemäß Abschnitt 4 a) regelmäßig zu überprüfen.

6.3 Vorsättigung

6.3.1 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:

- 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.
- 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.

6.3.2 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 ± 1 mm in den Behälter eingefüllt, ohne dass die Proben von oben feucht werden. Als Prüfflüssigkeit wird verwendet:

- für die Prüfung des Frostwiderstands (CIF): demineralisiertes Wasser
- für die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands (CDF): 3 %-ige NaCl-Lösung.

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 ± 2) °C. Während des kapillaren Saugens muss, abhängig vom Saugvermögen des Materials, der Flüssigkeitsstand kontrolliert und in regelmäßigen Abständen reguliert werden. Die Massezunahme der Probekörper wird regelmäßig alle 2 - 3 Tage gemessen.

6.4 Frost-Tau-Belastung

Die Frost-Tau-Wechsel-Prüfung ist eine zyklische Belastung. Dabei werden die Probekörper in einer temperaturkontrollierten Prüftruhe einem Temperaturzyklus nach Abschnitt 4 (Abbildung 4) unterworfen. Für die Prüfung des Frost- und des Frost-Tausalz-Widerstands sind in der Regel 28 Frost-Tau-Wechsel erforderlich.

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.

Wenn während der Frost-Tau-Wechselprüfung eine Unterbrechung der zyklischen Belastung auftritt (Anlagenausfall etc.) müssen die Probekörper in der Prüflösung verbleiben und vor einem Austrocknen geschützt werden. Eine Unterbrechung kann sich insbesondere bei längerer Dauer auf das Prüfergebnis auswirken und muss im Prüfbericht benannt und bei der Auswertung berücksichtigt werden.

7 Messungen

7.1 Abfolge der Messungen aus Oberflächenabwitterung, Flüssigkeitsaufnahme und Ultraschalllaufzeit

Messungen werden zu Beginn der Frostprüfung (0 Frost-Tau-Wechsel) und nach jedem 4. bis maximal jedem 6. Frost-Tau-Wechsel sowie nach dem vereinbarten Kriterium 24 Frost-Tau-Wechsel (Güteprüfung) oder 28 Frost-Tau-Wechsel (Eignungsprüfung) durchgeführt.

Die Messgrößen müssen bei Temperaturen über 15 °C gemessen werden (schattierte Fläche in Abbildung 4).

Folgende Messabfolge ist einzuhalten:

1. Bestimmung der Oberflächenabwitterung
2. Messung der Flüssigkeitsaufnahme
3. Messung der Ultraschalllaufzeit (Innere Schädigung)

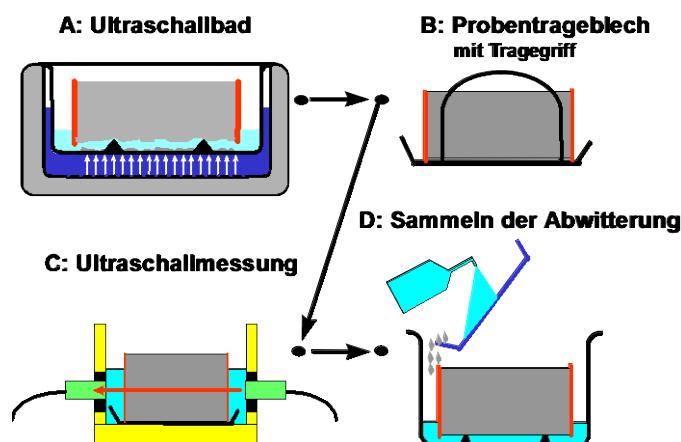


Abbildung 8: Messabfolge mit Prüfschritten bzw. Prüfeinrichtungen A bis D

Nach der Abwitterungsbestimmung ist der Probekörper auf dem Probentragblech nach Abschnitt 4 k) anzuzuordnen, um zusätzlich abwitterndes Material während der weiteren Messabfolge zu sammeln. Die auf dem Trageblech 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 ein 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 Prüfflüssigkeit, welche die Abwitterung enthält, wird abgefiltert. Der Papierfilter wird danach bei $(110 \pm 5)^\circ\text{C}$ für 24 Stunden getrocknet und mind. 1 Stunde bei $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ und $(60 \pm 10)\%$ r. F. abgekühlt. Die Masse des Filters, mit den getrockneten Abwitterungen μ_b , wird mit einer Genauigkeit von $\pm 0,01\text{ g}$ gemessen.

Vor der Verwendung ist der leere Papierfilter ebenfalls gemäß vorgenannter Beschreibung zu trocknen, und die Masse des leeren Filters μ_f mit der gleichen Genauigkeit zu bestimmen.

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

7.2.2 Auswertung der Oberflächenabwitterung

Zu jedem Messzeitpunkt und für jeden Probekörper ist die Gesamtmasse 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 Gesamtmasse des abgewitterten Materials bezogen auf die Prüffläche zum jeweiligen Prüftermin in g/m^2 .

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

A ist die Größe der Prüffläche in mm^2 . Sie wird auf der Basis der linearen Abmessungen berechnet. Diese werden durch den Mittelwert von mindestens zwei Messungen auf 0,5 mm bestimmt.

Der Mittelwert und die Standardabweichung müssen bestimmt werden. Das Ergebnis muss auf Ausreißer überprüft werden, dafür ist ein für kleine Grundgesamtheiten geeigneter Test (z. B. T-Test) anzuwenden.

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 die Prüfflüssigkeit von der Prüffläche 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 dem aufgelegten Probentragblech (Abschnitt 7.1) tariert und danach die Masse des Probekörpers w_n auf dem Tragblech mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1\text{ g}$ gemessen.

7.3.2 Auswertung der Flüssigkeitsaufnahme

Die Flüssigkeitsaufnahme eines jeden Probekörpers Δw_n nach dem n-ten Zyklus wird berechnet durch:

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

- Δw_n ist die Flüssigkeitsaufnahme eines jeden Probekörpers zum jeweiligen Prüftermin in M.-%.
- μ_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 Vorsättigung 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 Messung der Ultraschalllaufzeit (innere Schädigung)

7.4.1 Messaufbau

Zur Messung der Ultraschalllaufzeit wird ein Behälter nach Abschnitt 4 i) verwendet. Das Ankoppelungsmedium ist die verwendete Prüfflüssigkeit. Die Temperatur des Ankoppelungsmediums 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 angeordnet, dass die Achse der Durchschallungsstrecke in einem Abstand von 35 mm parallel zur Prüffläche liegt. Der Behälter wird mit dem Ankoppelungsmedium bis 10 mm oberhalb der Ultraschallprüfköpfe, jedoch nicht oberhalb der Oberkante des Probekörpers, gefüllt. Die Oberseite der Probekörper muss trocken gehalten werden!

I_t Gesamtlänge der Durchschallungsstrecke
 I_s Länge der Durchschallungsstrecke des Probekörpers
 $I_{c1} + I_{c2}$ Länge der Durchschallungsstrecke des Ankoppelungsmediums

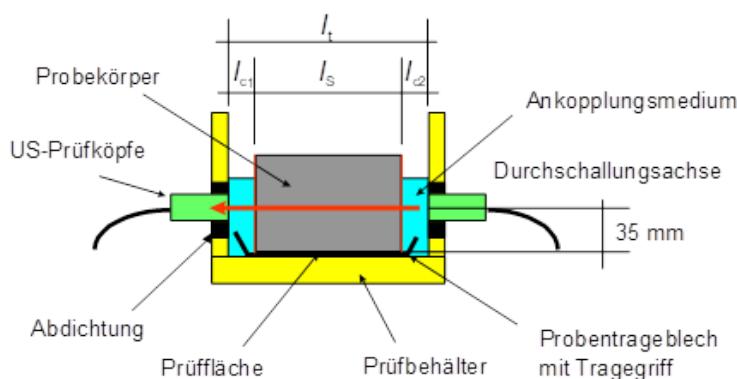


Abbildung 9: Messaufbau zur Bestimmung der Ultraschalllaufzeit

Um Störeinflüsse auf die Messung zu vermeiden, darf das Ultraschallbad gemäß Abschnitt 4 g) zur Bestimmung der Oberflächenabwitterung nicht zeitgleich zur Durchschallungsmessung oder nur räumlich getrennt vom Ultraschallmessgerät betrieben werden.

7.4.2 Kalibrierung

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

Referenzmessung mit Hilfe des Kalibrierprüförpers

Das Ultraschallmessgerät wird überprüft, indem die Messköpfe mit einem geeigneten Ankopplungsmedium (z. B. Fett) auf die Messmarken direkt an den Kalibrierprüfkörper angekoppelt werden. Die so gemessene Ultraschalllaufzeit muss mit der Angabe auf dem Kalibrierprüfkörper übereinstimmen. Bei Abweichungen ist eine Kalibrierung der Ultraschalllaufzeit (Einstellung entsprechend der Angabe auf dem Kalibrierprüfkörper) vorzunehmen.

Überprüfung der Vorlaufzeit

Der Kalibrierprüfkörper wird nach Abbildung 9 in dem Behälter angeordnet. Anschließend werden die Prüfköpfe so verschoben, dass die Vorlaufstrecke im Ankopplungsmedium beidseitig jeweils 5 mm (± 1 mm) beträgt (Festlegung definierter Prüfkopfabstand l_t). Die Vorlaufzeit ergibt sich aus der Differenz der bei dieser Anordnung gemessenen Laufzeit und der am Kalibrierkörper ermittelten Laufzeit.

Alternativ kann ein definierter Prüfkopfabstand l_t festgelegt werden, indem die Prüfköpfe so verschoben werden, dass die aktuell gemessene Laufzeit der Laufzeit des Kalibrierprüförpers + 10 μs ($\pm 0,1 \mu\text{s}$) entspricht.

7.4.3 Messdurchführung

Wie in Abbildung 9 gezeigt, wird der Probekörper auf dem Probentragblech 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. Die zu durchschallende Probenlänge ist vor Beginn des kapillaren Saugens ohne die seitliche Abdichtung mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1$ mm zu messen. Das seitliche Abdichtungsmaterial der Probekörper wird bei dieser Länge nicht berücksichtigt.

Nach der Vorlagerung und jeweils nach einer definierten Anzahl an Frost-Tau-Wechseln wird die kürzeste Ultraschalllaufzeit mit einer Genauigkeit von $\pm 0,1 \mu\text{s}$ bestimmt. Bei der Messung ist der Probekörper geringfügig zu verschieben, wobei die kürzeste Laufzeit aufgezeichnet wird. Es ist darauf zu achten, dass an den Prüfköpfen und an den Seiten der Probekörper keine Luftblasen anhaften sowie die seitliche Abdichtung fest am Probekörper anliegt. Während der Durchführung der Messabfolge ist ein Befeuchten der Oberseite der Probekörper zu vermeiden. Die Messung ist so kurz wie möglich zu halten.

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 μs .
- l_c ist die Durchschallungsstrecke aus $l_{c1} + l_{c2}$ im Ankopplungsmedium in mm.
- v_c ist die Geschwindigkeit des Ultraschallsignals im Ankopplungsmedium. Sie kann bei $(20 \pm 5)^\circ\text{C}$ zu 1490 m/s angenommen werden.

Die Änderung der Durchschallungsgeschwindigkeit τ_n nach n Frost-Tau-Wechseln wird für jeden Probekörper und jede Durchschallungsachse getrennt berechnet mit⁹ :

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

- τ_n ist die relative Durchschallungsgeschwindigkeit.
- t_{cs} ist die Gesamt-Durchschallungszeit nach kapillarem Saugen (cs) in μs , vor dem ersten Frost-Tau-Wechsel.
- t_n ist die Gesamt-Durchschallungszeit nach n Frost-Tau-Wechseln in μs .

Anstelle der Durchschallungsgeschwindigkeit ist es zweckdienlich, die innere Schädigung durch den relativen dynamischen E-Modul $R_{u,n}$ aus der Ultraschalllaufzeit zu beschreiben. Bei der vorliegenden Prüfmethode wird der relative dynamische E-Modul nach n Frost-Tau-Wechseln mit folgender Beziehung berechnet:¹⁰

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

Der Mittelwert aus den Werten beider Durchschallungsachsen gibt den relativen dynamischen E-Modul des Probekörpers (RDM) an. Es besteht die Option, den relativen dynamischen E-Modul in Prozent auszudrücken.

Der Mittelwert $R_{u,m}$ und die Standardabweichung des relativen dynamischen E-Moduls einer Prüfserie müssen bestimmt werden. Das Ergebnis muss auf Ausreißer überprüft werden, dafür ist ein für kleine Grundgesamtheiten geeigneter Test (z. B. T-Test) anzuwenden.

⁹ Die Längenänderung kann dabei vernachlässigt werden.

¹⁰ 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.

8 Bewertung Frostwiderstand nach dem CIF-Test

8.1 Abnahmekriterium Oberflächenabwitterung

Wenn keine andere schriftliche Vereinbarung getroffen wurde, gelten folgende Abnahmekriterien:

Tabelle 8.1: Abnahmekriterien Oberflächenabwitterung CIF-Test

	Eignungs-, Güte- und Bauteilprüfung
Mittelwert der Prüfserie	$\leq 1000 \text{ g/m}^2$ nach 28 Frost-Tau-Wechseln
95 %-Quantile der Prüfserie	$\leq 1750 \text{ g/m}^2$ nach 28 Frost-Tau-Wechseln

8.2 Abnahmekriterium innere Schädigung

Der Beton gilt als geschädigt, wenn für den Mittelwert der Prüfserie ein relativer dynamischer E-Modul $R_{u,m} = 0,75$ bzw. 75 % unterschritten wird¹¹. Das maßgebende Kriterium zur Beurteilung der inneren Schädigung ist die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel bis zum Erreichen dieses Schädigungskriteriums.

Die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel (Zyklenanzahl) kann durch lineare Interpolation zwischen zwei benachbarten Messpunkten ermittelt werden, wobei die Differenz der Frost-Tau-Wechsel-Anzahl der beiden Messpunkte kleiner gleich 6 sein muss.

Als Abnahmekriterium ist eine Zyklenanzahl zu vereinbaren, bis zu der das Schädigungskriterium nicht unterschritten werden darf. Wenn keine andere schriftliche Vereinbarung getroffen wurde, gelten folgende Abnahmekriterien:

Tabelle 8.2: Abnahmekriterien innere Schädigung CIF-Test

	Eignungsprüfung	Güte- und Bauteilprüfung
Mittelwert der Prüfserie	≥ 28 Frost-Tau-Wechsel	≥ 24 Frost-Tau-Wechsel

¹¹ Ein relativer dynamischer E-Modul (RDM) von 75 % gewährleistet, entsprechend den Präzisionsdaten, eine ausreichende Trennschärfe zum ungeschädigten Beton-E-Modul (100 %). Siehe auch Präzisionsdaten Abschnitt 12.2.1.

9 Bewertung Frost-Tausalz-Widerstand nach dem CDF-Test

9.1 Abnahmekriterium Oberflächenabwitterung

Wenn keine andere schriftliche Vereinbarung getroffen wurde, gelten folgende Abnahmekriterien:

Tabelle 9.1: Abnahmekriterien Oberflächenabwitterung CDF-Test

	Eignungs-, Güte- und Bauteilprüfung
Mittelwert der Prüfserie	$\leq 1500 \text{ g/m}^2$ nach 28 Frost-Tau-Wechseln
95 %-Quantile der Prüfserie	$\leq 1800 \text{ g/m}^2$ nach 28 Frost-Tau-Wechseln

9.2 Abnahmekriterium innere Schädigung

Der Beton gilt als geschädigt, wenn für den Mittelwert der Prüfserie ein relativer dynamischer E-Modul $R_{u,m} = 0,75$ bzw. 75 % unterschritten wird. Als Abnahmekriterium ist eine Zyklanzahl zu vereinbaren, bis zu der das Schädigungskriterium nicht unterschritten werden darf. Wenn keine andere schriftliche Vereinbarung getroffen wurde, gelten folgende Abnahmekriterien:

Tabelle 9.2: Abnahmekriterien innere Schädigung CDF-Test

	Eignungsprüfung	Güte- und Bauteilprüfung
Mittelwert der Prüfserie	≥ 28 Frost-Tau-Wechsel	≥ 24 Frost-Tau-Wechsel

10 Bericht

Der Prüfbericht muss mindestens folgende Angaben enthalten:

1. Einen Verweis auf diese Prüfvorschrift.
2. Bezeichnung, Herkunft, Abmessungen und Masse der Probekörper bei Probeneingang/nach Herstellung und nach Abschluss der Trocknung.
3. Auftraggeber und verantwortliche Stelle der Probekörperherstellung.
4. Hinweis auf Art der Prüfung, z. B. Eignungs- oder Güteprüfung.
5. Angaben zur Betonzusammensetzung und Ausgangsstoffe mit Produktbezeichnung.
6. Frischbetonkennwerte: Rohdichte, Verdichtungszeit und -maß, Luftgehalt.
7. Die Dauer der Wasser- und Trockenlagerung.
8. Die Zusammensetzung der Prüfflüssigkeit.
9. Die Angabe der durchgeföhrten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln.
10. Die Änderung des relativen dynamischen E-Moduls aus der Ultraschalllaufzeit für jeden Probekörper, sowie den Mittelwert und die Standardabweichung in %, arithmetisch gerundet auf die nächsten 1 % in Abhängigkeit der durchgeföhrten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln der Zwischenmessungen und der Endmessung.
11. Die Masse des abgewitterten Materials für jeden Probekörper sowie den Mittelwert und die Standardabweichung in g/m² arithmetisch gerundet auf die nächsten 1 g/m² in Abhängigkeit der durchgeföhrten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln der Zwischenmessungen und der Endmessung.
12. 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.-% arithmetisch gerundet in Abhängigkeit der durchgeföhrten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln der Zwischenmessungen und der Endmessung.
13. Augenscheinliche Beurteilung (Risse, Abwitterung von Gesteinskörnungspartikeln) vor Beginn und wenigstens nach Beendigung der Prüfung. In den Prüfbericht ist exemplarisch zumindest für einen repräsentativen Probekörper ein Foto der Prüffläche vor und nach Beendigung der Prüfung aufzunehmen.
14. Jegliche Abweichung von dem hier beschriebenen Verfahren.
15. Beurteilung des Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstands gemäß den Abnahmekriterien.

11 Anforderungen an das Labor und Rückstellproben

Das Prüflabor, in welchem Eignungs- und Güteprüfung durchgeführt werden, muss über eine ausreichende Erfahrung im Umgang mit der Prüfmethode verfügen. In dem Prüflabor müssen mindestens folgende Unterlagen archiviert werden:

1. Prüfprotokoll und Prüfbericht
2. Temperaturkurven zum Ist-Temperaturverlauf während des Prüfzeitraums

Zudem sind die Rückstellproben nach Vereinbarung zu lagern bzw. an den Auftraggeber zu übergeben.

12 Präzisionsdaten

12.1 Allgemein

Man unterscheidet zwei Kenngrößen der Präzision: Wiederholpräzision und Vergleichspräzision. Die Präzision des CIF- und CDF-Tests wurden in Anlehnung an die ISO 5725 für Betone bestimmt, die dem Abschnitt 5.2.1 entsprechen.

12.2 Präzision des CIF-Tests für Betonmischungen

12.2.1 Messung der inneren Schädigung - Ultraschalllaufzeit

Die Präzisionsdaten für den relativen dynamischen E-Modul (RDM) sind in Tabelle 12.1 dargestellt. Diese Daten gelten für Laborbeton, der nach Abschnitt 7.4 geprüft wird, wobei s_r und s_R die Standardabweichung der Wiederholpräzision und der Vergleichspräzision sind und aus dem funktionalen Zusammenhang zum relativen dynamischen E-Modul $R_{u,m}$ aus den Gleichungen der Tabelle 12.1 berechnet werden können.

Tabelle 12.1: Präzisionsdaten für die Messung der inneren Schädigung - Ultraschalllaufzeit im CIF-Test

rel. dyn. E-Modul (RDM)	Wiederholpräzision s_r	Vergleichspräzision s_R
	Standardabweichung	
bei RDM = 100 %	0,7 %	0,9 %
bei RDM = 75 %	5,9 %	7,6 %
Gleichung *	$s_r = -0,2046 R_{u,m} + 0,2122$	$s_R = -0,2656 R_{u,m} + 0,2750$

* Nachgewiesener Anwendungsbereich $R_{u,m} = 0,70$ bis $1,0$ mit $R^2 = 0,85$ für s_r und $R^2 = 0,73$ für s_R . Diese Daten gelten für Laborbeton, der nach Abschnitt 5.2.1 hergestellt wird.

ANMERKUNG: Die Präzisionsdaten und die Gleichungen der Tabelle 12.1 basieren auf den Ergebnissen des RILEM Round Robin Tests des TC IDC, durchgeführt mit 9 Instituten und drei unterschiedlichen Betonserien.

12.2.2 Flüssigkeitsaufnahme

Die Präzisionsdaten für die Flüssigkeitsaufnahme sind in Tabelle 12.2 dargestellt. Diese Daten gelten für Laborbeton, der nach Abschnitt 7.3 geprüft wird, wobei s_r und s_R die Standardabweichung der Wiederholpräzision und der Vergleichspräzision sind und aus dem funktionalen Zusammenhang der Flüssigkeitsaufnahme Δw_n während der Frostprüfung aus den Gleichungen der Tabelle 12.2 berechnet werden können.

Tabelle 12.2: Präzisionsdaten für die Messung der Flüssigkeitsaufnahme

Flüssigkeitsaufnahme	Wiederholpräzision s_r	Vergleichspräzision s_R
	Standardabweichung	
bis 0,5 M.-%	0,014 M.-%	0,029 M.-%
0,5 bis 1,5 M.-%	0,027 M.-%	0,058 M.-%
> 1,5 M.-%	0,054 M.-%	0,115 M.-%
Gleichung*	$s_r = 0,0265 \Delta w_n + 0,0005$	$s_R = 0,0569 \Delta w_n + 0,0008$

* Für den nachgewiesenen Anwendungsbereich Δw_n 0 bis 2,5 mit $R^2 = 0,30$ für s_r und $R^2 = 0,30$ für s_R . Diese Daten gelten für Laborbeton, der nach Abschnitt 5.2.1 hergestellt wird.

ANMERKUNG: Die Präzisionsdaten und die Gleichungen der Tabelle 12.2 basieren auf den Ergebnissen des RILEM Round Robin Tests des TC IDC, durchgeführt mit 7 Instituten und drei unterschiedlichen Betonserien.

12.2.3 Oberflächenabwitterung

Die Präzisionsdaten für die Oberflächenabwitterung sind in Tabelle 12.3 dargestellt. Die Präzisionsdaten gelten für Laborbeton, der nach Abschnitt 7.2 geprüft wird. Die Präzisionsdaten der Oberflächenabwitterung aus Ringversuchen mit reinem Frostangriff sind momentan lediglich in dem Bereich von 0 bis 500 g/m² verfügbar.

Tabelle 12.3: Präzisionsdaten für die Messung der Oberflächenabwitterung im CIF-Test

Oberflächen- abwitterung	Wiederholpräzision s_r	Vergleichspräzision s_R
	Standardabweichung	
0 bis 500 g/m ²	120 g/m ² (v = 24 %)	160 g/m ² (v = 32 %)

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.

12.3 Präzision des CDF-Tests für Betonmischungen

12.3.1 Oberflächenabwitterung

Die Präzisionsdaten für die Oberflächenabwitterung sind in Tabelle 12.4 dargestellt. Die Präzisionsdaten gelten für Laborbeton, der nach Abschnitt 7.2 geprüft wird. Die Präzisionsdaten können, bezogen auf das Abnahmekriterium $m_0 = 1500 \text{ g/m}^2$, mit der Gleichung (6) und den Parametern aus Tabelle 12.5 berechnet werden.

Tabelle 12.4: Präzisionsdaten für die Messung der Oberflächenabwitterung im CDF-Test

Oberflächen-abwitterung	Wiederholpräzision s_r	Vergleichspräzision s_R
	Standardabweichung	
1500 g/m ²	156 g/m ² ($v = 10,4\%$)	262 g/m ² ($v = 17,5\%$)

Der Variationskoeffizient v hängt ab von der mittleren Abwitterung m bezogen auf das Abnahmekriterium $m_0 = 1500 \text{ g/m}^2$.

$$v = v_0 \cdot \left(\frac{m}{m_0} \right)^d \quad (6)$$

v Variationskoeffizient

m mittlere Abwitterung

m_0 Abnahmekriterium (Widerstandsgrenze)

Die Parameter v_0 und d für die Wiederholpräzision und die Vergleichspräzision als Exponentialfunktion der mittleren Abwitterung m sind in Tabelle 12.5 dargestellt.

Tabelle 12.5: Parameter v_0 und d für die Abwitterung im CDF-Test gemäß /1/

	Wiederholpräzision	Vergleichspräzision
d	- 0,33	- 0,29
v_0	10,4 % (v_r)	17,5 % (v_R)

Anlage 1: Statistische Kennwerte

A1. Mittelwert und Standardabweichung einer Prüfserie

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (\text{A1})$$

$$s = \sqrt{s^2} \quad (\text{A2})$$

$$s^2 = \frac{1}{n-1} \cdot \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (\text{A3})$$

x_i Einzelwerte

n Anzahl Proben der Prüfserie

\bar{x} Mittelwert der Prüfserie

s Standardabweichung der Prüfserie

A2. 95 %-Quantile einer Prüfserie

$$\text{Quantilwert}(p) = \bar{x} + t \cdot s \quad (\text{A4})$$

p statistische Sicherheit (Signifikanzniveau 95 %)

\bar{x} Mittelwert der Prüfserie

t Parameter der Student-Verteilung für einseitigen Vertrauensbereich, $n-1$ Freiheitsgrade

s Standardabweichung der Prüfserie