

**Beiträge
zum 41. Forschungskolloquium
des DAfStb
am 11. und 12. Juli 2002
im
Forschungsinstitut der Zementindustrie
in Düsseldorf**

FROSTWIDERSTAND HOCHFESTER BETONE

Volkert Feldrappe

Zusammenfassung

Die Dauerhaftigkeit von Außenbauteilen hängt ganz wesentlich von dem Widerstand gegenüber Frost ab. Bisherige Laboruntersuchungen zum Frostwiderstand dichter hochfester Betone ohne künstlich eingeführte Luftporen lieferten z. T. widersprüchliche Ergebnisse. Dabei konnten die Ursachen für das beobachtete Materialverhalten nicht abschließend geklärt werden. Mit den Untersuchungen des Forschungsinstitutes der Zementindustrie soll der Erkenntnisstand erweitert werden, um den Frostwiderstand solcher Betone besser bewerten zu können. Systematisch wird die Bedeutung der Änderung des dynamischen Elastizitätsmoduls als Indikator für eine innere Gefügeschädigung solcher Betone geklärt. Mechanische Kenngrößen wie die Biegezugfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit und der statische Elastizitätsmoduls wurden bestimmt und in Beziehung zum dynamischen E-Modul gebracht. Dabei zeigte sich, dass infolge der Frostbeanspruchung die Festigkeit abnahm, dieses Materialverhalten aber nicht mit dem dynamischen E-Modul festzustellen war. Die Untersuchungen zeigen, dass bei der Prüfung im Labor silicastaubhaltige hochfeste Betone mit einem äquivalenten Wasserzementwert $\approx 0,35$ keinen ausreichenden Frostwiderstand aufweisen. In wie weit die Laborergebnisse auf das praktische Verhalten von Beton übertragen werden können, soll in einem Schwerpunktprogramm des DAfStb geklärt werden.

1 Einleitung

Betonbauwerke müssen während ihrer gesamten Lebensdauer einen ausreichenden Widerstand gegenüber Umwelteinflüssen aufweisen. Hierzu gehört der Widerstand gegenüber Frost- und Frost-Tausalz-Angriffen. Die derzeit gültigen Regelwerke enthalten für solche Betone, die diesen Angriffen ausgesetzt sind, Anforderungen an die Ausgangsstoffe Zement und Gesteinskörnung sowie an die Zusammensetzung (z. B. Wasserzementwert und Luftgehalt des Frischbetons). Diese betontechnischen Vorgaben beruhen auf langjährigen Erfahrungen mit normalfesten Betonen. Sie lassen bei sachgerechter Verarbeitung und Nachbehandlung einen hohen Frost- bzw. Frost-Tausalz-Widerstand dieser Betone erwarten.

Mit hochfesten Konstruktionsbetonen, die wiederholten Frost-Tauwechseln ohne oder mit Tausalzbeaufschlagung ausgesetzt sind, liegen dagegen deutlich weniger praktische Erfahrungen vor. Aufgrund ihrer Zusammensetzung wird jedoch ein den normalfesten Betonen mindestens vergleichbares, auf keinen Fall schlechteres Verhalten unterstellt. Laboruntersuchungen hochfester Betone ohne künstlich eingeführte Luftporen lieferten jedoch bei reiner Frostbeanspruchung widersprüchliche Ergebnisse. Da der bisherige Erkenntnisstand zum Verhalten dichter, hochfester Betone noch nicht ausreichend ist, wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm mit dem Ziel initiiert, den Frostwiderstand solcher Betone besser bewerten zu können.

2 Stand der Erkenntnisse

2.1 Frostwiderstand von Beton

In einer Reihe von nationalen und internationalen Veröffentlichungen werden die grundlegenden Vorgänge im Gefüge zementgebundener Baustoffe bei Temperaturen $< 0\text{ }^{\circ}\text{C}$ behandelt. Zahlreiche Autoren haben aus ihren Beobachtungen Modelle zur Beschreibung dieser Phäno-

ment entwickelt und Randbedingungen abgeleitet, unter denen ein Frostangriff ohne oder mit Taumittel eine schädigende Wirkung auf Beton haben kann.

Eis nimmt im Vergleich zu Wasser ein um 9 % größeres Volumen ein. Daher können bei Temperaturen $< 0\text{ °C}$ Spannungen im Gefüge poröser Stoffe auftreten, wenn sich Wasser in den Poren befindet, dieses gefrierbar ist und kein ausreichender Expansionsraum für die Volumenvergrößerung zur Verfügung steht bzw. die Strecke vom Ort der Eisbildung zum Ausweichraum zu lang ist [1]. Der von Fagerlund [2] eingeführte Begriff der "kritischen Sättigung" beschreibt einen Feuchtegehalt, bei dessen Überschreitung der Beton in einem oder wenigen Frost-Tauwechseln stark geschädigt werden kann. Dabei kann sich der Feuchtegehalt durch eine wiederholte Frost-Tauwechsel-Beanspruchung gegenüber dem Ausgangszustand zu Beginn der Beanspruchung deutlich erhöhen [3]. Grund hierfür ist ein "Pumpeffekt" als Folge von Druckunterschieden beim Abkühlen und Aufwärmen des Betons, der in Laborversuchen anhand der Wasseraufnahme der Probekörper während des Frostversuchs nachvollzogen werden kann.

Bei Schäden infolge eines Frostangriffs wird zwischen äußerer und innerer Schädigung unterschieden. Äußere Schäden zeigen sich in Form von Oberflächenabwitterungen. Innere Gefügeschädigungen, d. h. die fortschreitende Zerstörung des tieferliegenden Betongefüges, sind zunächst optisch von außen nicht erkennbar, können jedoch z. B. mit Hilfe des dynamischen E-Moduls festgestellt werden. Im fortgeschrittenen Schadensverlauf können diese Gefügeschädigungen durch Risse im Beton auch von außen sichtbar werden.

2.2 Frostwiderstand von hochfestem Beton

Während die mechanischen Eigenschaften hochfester Betone intensiv erforscht und Stoffgesetze daraus entwickelt wurden (z. B. in [4]), liegen nur wenige Erfahrungen im Hinblick auf den Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand vor. Entsprechend den Zielsetzungen des Forschungsvorhabens wird im Weiteren nur auf den Frostwiderstand hochfester Betone Bezug genommen.

Hochfeste Betone weisen eine geringe Kapillarporosität auf, da sie i. d. R. mit äquivalenten Wasserzementwerten $(w/z)_{\text{eq}} < 0,35$ hergestellt werden. Häufig werden puzzolanische Zusatzstoffe (z.B. Silicastaub) eingesetzt, durch deren Reaktion das Gefüge der Mörtelmatrix weiter verdichtet wird. Außerdem können unhydratisierte Zementbestandteile und unreaktierte Zusatzstoffpartikel als Füller wirken, was ebenfalls zu einer dichteren Zementsteinmatrix führt [5]. Darüber hinaus wird die Porosität der Verbundzone zwischen Zementsteinmatrix und Gesteinskorn gegenüber Normalbeton durch den Einsatz von Silicastaub verringert (u. a. [6], [7]).

Hochfeste Betone sollten daher aufgrund ihrer Zusammensetzung (dichtes Gefüge, niedriger Kapillarporenanteil, geringer Gehalt an gefrierbarem Wasser) auch ohne ein künstlich eingeführtes Luftporensystem grundsätzlich einen hohen Frostwiderstand aufweisen können.

Eine Auswertung vorliegender Untersuchungen enthält z.B. [8] und [9]. Dort wird u.a. von Laboruntersuchungen hochfester Betone ohne künstlich eingeführte Luftporen berichtet, die bei reiner Frostbeanspruchung widersprüchliche Ergebnisse bei äquivalenten Wasserzementwerten $0,25 < (w/z)_{\text{eq}} \leq 0,35$ lieferten. In einigen Untersuchungen wurde für solche Betone aufgrund von Laboruntersuchungen ein zumindest ausreichender Frostwiderstand ermittelt, während andere Forscher aus ihren Untersuchungen für ähnlich zusammengesetzte Betone künstlich eingeführte Luftporen fordern, um einen ausreichenden Frostwiderstand zu gewährleisten. Die Ursachen für das beobachtete Materialverhalten konnten nicht abschließend geklärt werden. Aus den aus der Literatur bekannten Versuchsergebnissen kann abgeleitet werden, dass mit einem äquivalenten Wasserzementwert $(w/z)_{\text{eq}}$ ab 0,25 ein ausreichender Frostwiderstand ohne zusätzlich eingeführte Luftporen erreichbar ist. Dagegen scheint bei $(w/z)_{\text{eq}}$ größer 0,35 ein

künstliches Luftporensystem notwendig. Für den Zwischenbereich ergibt sich bisher kein einheitliches Bild und es sind weitere Untersuchungen erforderlich.

3 Ziel der Untersuchungen

Die Auswertung der vorliegenden Forschungsergebnisse zeigt, dass der Kenntnisstand über die Dauerhaftigkeit von Hochleistungsbetonen mit äquivalenten Wasserzementwerten $(w/z)_{eq} \leq 0,40$ hinsichtlich eines Frostangriffs nicht ausreichend ist, um die Auswirkungen und Zusammenhänge einer Frostschädigung differenziert und zielsicher beschreiben zu können. Mit den nachfolgend beschriebenen Untersuchungen sollen neue Erkenntnisse zum Frostwiderstand dichter, hochfester Betone während sowohl der Sättigungs- als auch der Schädigungsphase gewonnen werden. Dabei werden insbesondere Korrelationen zwischen der in Frostversuchen gewonnenen Änderung des dynamischen E-Moduls und anderen Betoneigenschaften wie der Biegezug- oder Spaltzugfestigkeit und des statischen Elastizitätsmoduls sowie der Rissbildung ermittelt und Gefügeuntersuchungen durchgeführt.

4 Untersuchungen zum Frostwiderstand

4.1 Ausgangsstoffe

Die Betone wurden mit einem handelsüblichen Portlandzement CEM I 42,5 R hergestellt. Als Zusatzstoff fand eine Silicastaubsuspension mit einem Feststoffgehalt von ca. 50 M.-% Verwendung. Die wichtigsten chemisch-mineralogischen und physikalischen Kennwerte sind in Tabelle 1 zusammengestellt. Als Zusatzmittel wurde ein handelsübliches Fließmittel auf Natrium-Naphthalinsulfonatbasis ausgewählt.

Tabelle 1: Charakteristische Kenngrößen der Ausgangsstoffe

| | CEM I 42,5 R | Silicastaub |
|--------------------------------|-------------------------|------------------------|
| Spez. Oberfläche | 3980 cm ² /g | |
| Wasseranspruch | 29,0 % | |
| Druckfestigkeit | 2 d | 33,5 N/mm ² |
| | 7 d | 48,7 N/mm ² |
| | 28 d | 58,0 N/mm ² |
| SO ₃ | 3,05 M.-% | 0,07 M.-% |
| SiO ₂ | 18,12 M.-% | 93,35 M.-% |
| Al ₂ O ₃ | 5,80 M.-% | 0,86 M.-% |
| Fe ₂ O ₃ | 4,04 M.-% | 0,70 M.-% |
| CaO | 63,18 M.-% | 0,63 M.-% |
| K ₂ O | 0,87 M.-% | 0,80 M.-% |
| Na ₂ O | 0,05 M.-% | 0,27 M.-% |
| Na ₂ O-Äquivalent | 0,62 | 0,79 |
| C ₃ A | 8,82 M.-% | - |

Sämtliche Betone enthielten Rheinkies und Rheinsand mit einer Rohdichte von 2,60 kg/m³. Die Gesteinskörnung wies einen hohen Widerstand gegenüber Frost- und Taumittel (eFT) gemäß DIN 4226-1: 1983-04 auf. Die Betone wurden mit Düsseldorfer Leitungswasser hergestellt.

4.2 Zusammensetzung und Herstellung

Für alle Betone wurde ein konstanter Gehalt an Zement und Silicastaub von 500 kg/m^3 Beton als praxisnaher Wert ausgewählt. Der Feststoffgehalt an Silicastaub wurde zu 0, 4, und 8 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, festgelegt. Der äquivalente Wasserzementwert variierte zwischen 0,25 und 0,45, wobei der Wassergehalt der Silicastaubsuspension auf den äquivalente Wasserzementwert angerechnet wurde. Die Wahl eines Silicastaubgehaltes von 8 M.-%, bezogen auf den Zementgehalt, erlaubt einen Vergleich mit bereits im Forschungsinstitut der Zementindustrie vorliegenden Untersuchungen an hochfesten Betonen. Die Sieblinie lag im Bereich A/B 16. Die Konsistenz der Betone sollte im Bereich KR liegen. Auf der Grundlage von in Vorversuchen gewonnenen Erfahrungen wurde Fließmittel zudosiert.

Die Betone wurden in einem 250 l fassenden Tellermischer hergestellt. Mit 1 l des Zugabewassers wurde die Gesteinskörnung leicht angefeuchtet und mit dem Zement kurz gemischt. Die Mischung wurde mit dem restlichen Zugabewasser und dem Fließmittel 2 Minuten durchgemischt. Anschließend wurde Silicastaub zugegeben, ggf. Fließmittel nachdosiert und nochmals 1 Minute gemischt. Dieses Vorgehen wurde aufgrund von früheren Untersuchungen im Forschungsinstitut gewählt, um eine gute Dispergierung des Silicastaubs zu gewährleisten.

4.3 Prüfverfahren

4.3.1 Frischbeton

Die Rohdichte, das Ausbreitmaß bzw. das Verdichtungsmaß und der Luftgehalt des Frischbetons wurde entsprechend DIN 1048-1: 1991-06 jeweils 10 Minuten nach dem Mischende bestimmt.

4.3.2 Festbeton

Die Druck-, Biegezug- und Spaltzugfestigkeit wurden gemäß DIN 1048-5 ermittelt.

Der statische E-Modul wurde an Balken $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ als Sehnenmodul bestimmt. Die obere Prüfspannung wurde auf ein Drittel der zuvor bestimmten Biegezugfestigkeit festgelegt. Das Belastungs-Zeit-Diagramm entsprach DIN 1048-5. Die elastische Verformung wurde mit Hilfe eines Dehnungsmessstreifen aufgezeichnet, der auf der Unterseite des Balkens mit Epoxydharz aufgeklebt wurde.

4.3.3 Frost-Tauwechselversuche

Die Untersuchungen wurden sowohl mit dem CF/CIF-Verfahren als auch mit dem Balkenverfahren durchgeführt. Das CF/CIF-Verfahren ist in [10], das Balkenverfahren in [11] ausführlich beschrieben. Unterschiede der beiden Verfahren sind in Tabelle 2 gegenübergestellt. Infolge der unterschiedlichen Vorlagerung weisen die Probekörper, die mit dem CF/CIF-Verfahren untersucht werden eine höhere Wassersättigung auf.

Tabelle 2: Gegenüberstellung von CF/CIF-Verfahren und Balkenverfahren

| | CF/CIF-Verfahren [10] | Balkenverfahren [11] |
|---------------|---|---|
| Vorlagerung | 1 d in Form | 1 d in Form |
| | 6 d unter Wasser | 6 d in Folie bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| | 21 d im Klima $20 \text{ }^\circ\text{C} / 65 \text{ } \%$ rel. F. | 21 d unter Wasser bei $20 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| Vorbehandlung | Seitenflächen versiegelt | - |
| | 7 d kapillares Saugen; in demineralisiertem Wasser, 5 mm tief eingetaucht | |

| | | |
|------------|--|-----------|
| Einfrieren | in demineralisiertem Wasser, 5 mm tief | an Luft |
| Auftauen | eingetaucht (Fußbad) | in Wasser |

Während beim CF/CIF-Verfahren die Berechnung des relativen dynamischen E-Moduls mit Hilfe der Ultraschalllaufzeit erfolgte, wurde der relative dynamische E-Modul beim Balkenverfahren mit Hilfe der Resonanzfrequenzmethode (Grindosonic) bestimmt.

4.4 Frischbetoneigenschaften

Die Frischbetoneigenschaften sind in Tabelle 3 enthalten. Die Frischbetonrohddichte lag im Mittel bei 2,37 g/cm³. Trotz hoher Fließmittelkonzentrationen waren die Betone mit einem (w/z)_{eq} von 0,25 so steif, dass die Konsistenz sachgerechterweise mit dem Verdichtungsmaß bestimmt wurde. Um eine Entmischung zu vermeiden, wurde auf eine weitere Fließmittelzugabe verzichtet und die Betone mit steifer Konsistenz verarbeitet.

Tabelle 3: Frischbetonkennwerte

| Mischung | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|--------------------|--------------------|--|
| (w/z) _{eq} | 0,45 | | 0,40 | | 0,35 | | 0,30 | | | 0,25 | | |
| Silicastaubgehalt M.-% | 0 | 8 | 0 | 8 | 0 | 8 | 0 | 4 | 8 | 0 | 8 | |
| Frischbeton | | | | | | | | | | | | |
| Rohddichte in g/cm ³ | 2,34 | 2,30 | 2,36 | 2,33 | 2,35 | 2,36 | 2,43 | 2,40 | 2,39 | 2,43 | 2,43 | |
| Luftgehalt in Vol.-% | 1,1 | 1,8 | 2,3 | 2,4 | 2,8 | 2,2 | 2,3 | 2,6 | 1,8 | 2,2 | 2,6 | |
| Ausbreitmaß in mm | 530 | 450 | 430 | 410 | 430 | 420 | 430 | 370 | 400 | 1,60 ^{*)} | 1,37 ^{*)} | |

^{*)} Verdichtungsmaß

4.5 Festigkeits- und Verformungseigenschaften

In Tabelle 4 findet sich eine Zusammenstellung der Festigkeits- und Verformungseigenschaften. Exemplarisch ist in Bild 1 die Festigkeitsentwicklung der Betone ohne Silicastaub denen mit 8 M.-% Silicastaub gegenübergestellt. Während nach 2 Tagen kein signifikanter Unterschied in den Druckfestigkeiten bei den Betonen mit und ohne Silicastaub zu erkennen ist, ergibt sich durch den Einsatz von Silicastaub bei einem (w/z)_{eq}-Wert ≤ 0,40 eine deutliche Festigkeitssteigerung nach 28 Tagen. Die Druckfestigkeit erhöht sich um rd. 5 bis 20 % bei gleichen äquivalenten Wasserzementwerten.

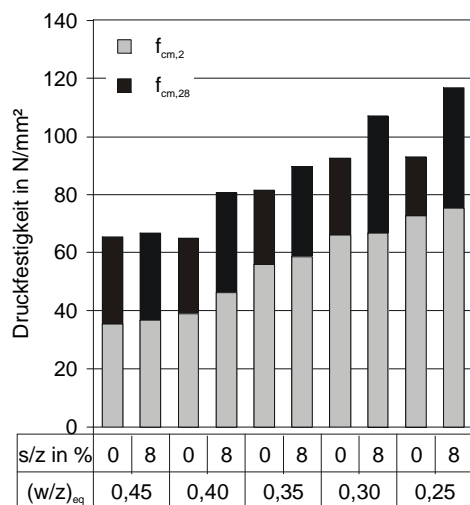


Bild 1: Betondruckfestigkeit nach 2 und 28 Tage

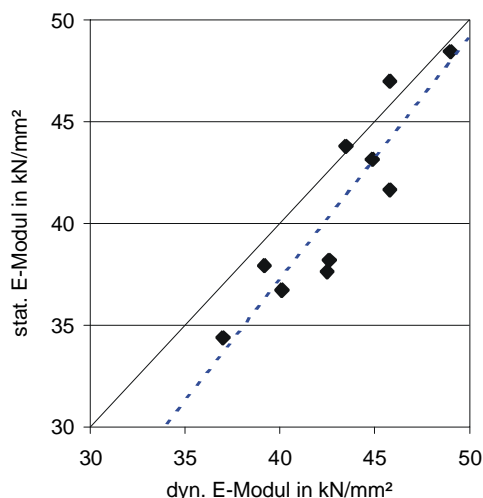


Bild 2: Vergleich des statischen und dynamischen E-Moduls nach 28 Tagen

Bei den Betonen ohne Silicastaub wird ab einem w/z-Wert < 0,30 keine Steigerung der Druckfestigkeit erreicht. Die Ergebnisse bestätigen Untersuchungen von [12]. Wird diesen Betonen Silicastaub zugegeben, ist dennoch eine deutliche Steigerung der Druckfestigkeit feststellbar. Im Vergleich zu den entsprechenden Betonen ohne Silicastaub ist die Mörtelmatrix verbessert sowie die Kontaktzone zwischen Mörtelmatrix und Gesteinskörnung weiter verdichtet. Deshalb treten die von Lusche beschriebenen Mikrorisse unmittelbar oberhalb und unterhalb der Gesteinskörner vermutlich erst bei einem höheren Belastungsgrad auf [13].

Tabelle 4: Untersuchungsergebnisse der Betone

| Mischung | | | | | | | | | | | | | |
|---------------------------|--------------------|------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----|
| (w/z) _{eq} | | 0,45 | | 0,40 | | 0,35 | | 0,30 | | | 0,25 | | |
| Silicastaubgehalt | M.-% | 0 | 8 | 0 | 8 | 0 | 8 | 0 | 4 | 8 | 0 | 8 | |
| Festbeton | | | | | | | | | | | | | |
| $f_{cm,2}$ | N/mm ² | 35 | 37 | 39 | 46 | 52 | 59 | 67 | 66 | 67 | 73 | 75 | |
| $f_{cm,28}$ | N/mm ² | 65 | 66 | 65 | 81 | 86 | 90 | 96 | 100 | 107 | 93 | 117 | |
| E_{stat} | kN/mm ² | **) | 34,4 | 37,9 | 36,8 | 37,7 | 38,2 | 47,0 | 42,2 | 43,2 | 42,1 | 48,5 | |
| E_{dyn} | kN/mm ² | **) | 37,0 | 39,2 | 40,1 | 42,5 | 42,6 | 45,8 | 45,8 | 43,5 | 46,1 | 49,0 | |
| Frost-Tauwechsel-Versuche | | | | | | | | | | | | | |
| CIF | 56 FTW | rel. E_{dyn} % | 91 | 17 | 97 | 19 | 98 | 44 | 99 | 99 | 99 | 99 | 100 |
| | | rel. β_s % | 52 | 6 | 62 | 12 | 78 | *) | **) | 109 | 94 | 98 | 107 |
| | 100 FTW | rel. E_{dyn} % | 83 | *) | 92 | *) | 99 | *) | 100 | 98 | 99 | **) | 99 |
| | | rel. β_s % | 40 | *) | 52 | *) | 74 | *) | **) | 83 | 90 | **) | 118 |
| | 80 % rel E_{dyn} | rel. β_s % | *) | *) | *) | *) | *) | 49 | *) | *) | *) | *) | *) |
| | 60 % rel E_{dyn} | rel. β_s % | *) | *) | *) | *) | *) | 37 | *) | *) | *) | *) | *) |
| 40 % rel E_{dyn} | rel. β_s % | *) | *) | *) | *) | *) | 25 | *) | *) | *) | *) | *) | |
| Balkenverfahren | 56 FTW | rel. E_{dyn} % | **) | 85 | 99 | 90 | 98 | 99 | 99 | 99 | 99 | 100 | 99 |
| | | rel. β_s % | **) | 64 | 114 | 95 | 96 | 107 | **) | 100 | 95 | 90 | 109 |
| | | rel. β_B % | **) | 27 | 93 | 46 | 91 | 77 | **) | 85 | 83 | 85 | 83 |
| | 100 FTW | rel. E_{dyn} % | **) | *) | 100 | 36 | 100 | 99 | 100 | 99 | 99 | 100 | 99 |
| | | rel. β_s % | **) | *) | 115 | *) | 87 | 107 | **) | 100 | 106 | 98 | 85 |
| | | rel. β_B % | **) | *) | 89 | *) | 100 | 83 | **) | 88 | 94 | 91 | 84 |
| 80 % rel E_{dyn} | rel. E_{dyn} % | *) | *) | *) | *) | *) | 46 | *) | *) | *) | *) | *) | |
| 60 % rel E_{dyn} | rel. β_s % | *) | *) | *) | *) | *) | **) | *) | *) | *) | *) | *) | |
| 40 % rel E_{dyn} | rel. β_B % | *) | *) | *) | *) | *) | **) | *) | *) | *) | *) | *) | |

*) nicht bestimmbar

**) Untersuchung noch nicht abgeschlossen

Der E-Modul der Betone wird von der Mörtelmatrix und von der Gesteinskörnung beeinflusst. Mit fallendem (w/z)_{eq} steigt der E-Modul der Betone an. In Bild 2 ist der Zusammenhang zwischen dem statischen und dem dynamischen E-Modul dargestellt. Der dynamische E-Modul der Betone ist im allgemeinen größer als der statische. Dies ist auf die Definition des dynamischen E-Moduls als Tangentenmodul bzw. des statischen E-Moduls als Sehnenmodul zurückzuführen. Die Differenz zwischen den beiden Werten wird bei größeren E-Moduln geringer, da das Verhalten des Betons sich dem linear elastischen annähert.

4.6 Frost-Tauwechsel-Versuche

4.6.1 CF/CIF-Verfahren und Balkenverfahren

Alle hochfesten Betone weisen nach 56 und 100 Frost-Tauwechseln nur sehr geringe Abwitterungen auf. Bei der Auswertung des relativen dynamischen E-Moduls muss zwischen den Betonen ohne (Bild 3) und mit Silicastaub (Bild 4) unterschieden werden.

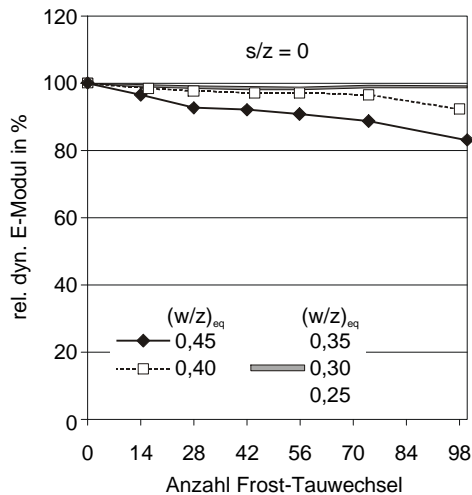


Bild 3: Relativer dynamischer E-Modul der Betone ohne Silicastaub (CIF-Verfahren)

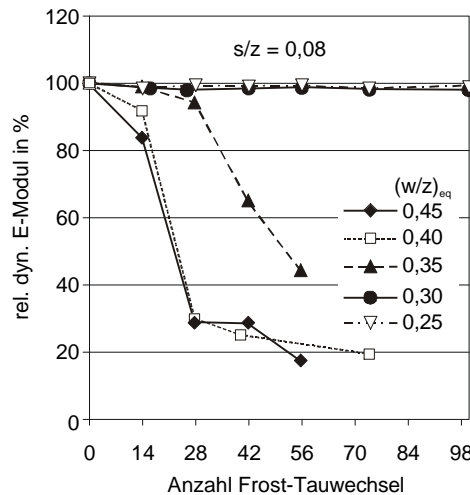


Bild 4: Relativer dynamischer E-Modul der Betone mit Silicastaub (CIF-Verfahren)

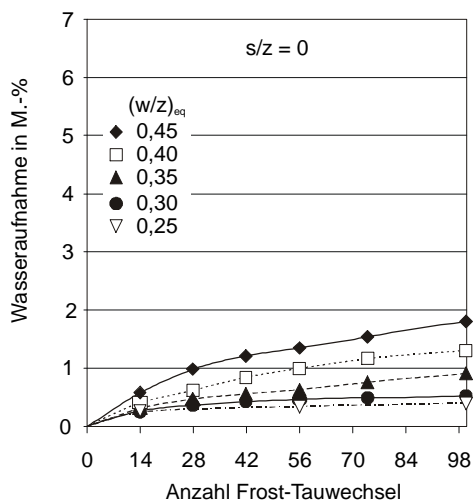


Bild 5: Wasseraufnahme während der Frost-Tauwechsel der Betone ohne Silicastaub (CIF-Verfahren)

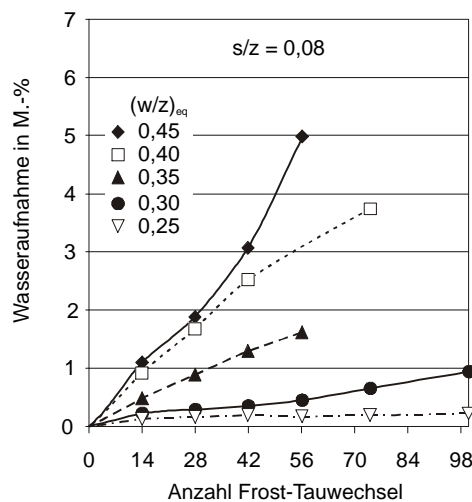


Bild 6: Wasseraufnahme während der Frost-Tauwechsel der Betone mit Silicastaub (CIF-Verfahren)

Die Betone ohne Silicastaub zeigen auch nach 100 Frost-Tauwechseln bei einem w/z-Wert von 0,45 nur eine geringe (83 %) und bei einem w/z-Wert von $\leq 0,40$ praktisch keine Änderung des relativen dynamischen E-Moduls. Die Wasseraufnahme während des kapillaren Saugens und der Frost-Tauwechsel ist bei allen Betonen gering. Erwartungsgemäß sinkt mit fallendem w/z-Wert die Wasseraufnahme infolge des dichteren Gefüges (Bild 5).

Bei den silicastaubhaltigen Probekörpern ist bei einem $(w/z)_{eq} \leq 0,30$ auch nach 100 Frost-Tauwechseln keine wesentliche Änderung des relativen dynamischen E-Moduls feststellbar. Dagegen nimmt der relative dynamische E-Modul der Probekörper mit einem $(w/z)_{eq} \geq 0,35$

innerhalb weniger Frost-Tauwechsel deutlich ab. Teilweise waren die Probekörper schon nach 56 Frost-Tauwechsel zerstört. (vgl. Bilder 4 und 7).



Bild 7: CIF-Platte $(w/z)_{eq}$ 0,45 mit 8 M.-% Silicastaub nach 56 Frost-Tauwechseln

Die Schädigung dieser Betone geht mit einer hohen Wasseraufnahme während der Frost-Tauwechsel einher (Bild 6). Diese beim CIF-Verfahren versuchstechnisch mögliche Wasseraufnahme weist auf eingangs bereits vorhandene, während der Prüfung zunehmende Gefügestörungen im Beton mit Silicastaubzugabe hin. Die Wasseraufnahme der ungeschädigten Betone ist wie die der Betone ohne Silicastaub gering.

Während des kapillaren Saugens nehmen die Betone mit fallendem $(w/z)_{eq}$ infolge des dichteren Gefüges weniger Wasser auf. Die Betone mit Silicastaub saugen weniger Wasser kapillar auf als die Betone ohne Silicastaub mit gleichem $(w/z)_{eq}$.

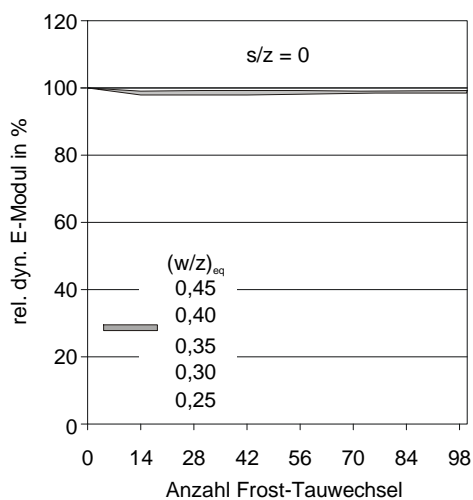


Bild 8: Relative dynamische E-Modul der Betone ohne Silicastaub (Balkenverfahren)

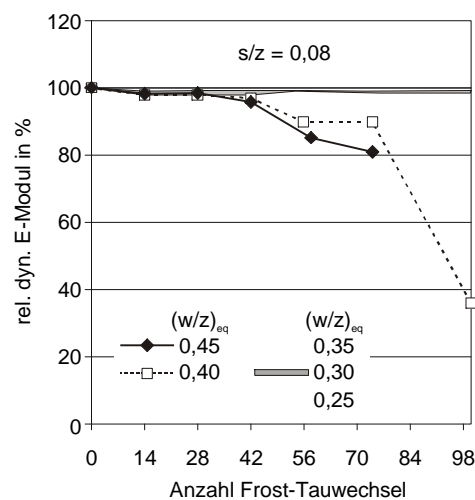


Bild 9: Relative dynamische E-Modul der Betone mit Silicastaub (Balkenverfahren)

Mit dem Balkenverfahren werden an den Betonen ohne Silicastaub ähnliche Ergebnisse wie mit dem CF/CIF-Verfahren ermittelt. Auch nach 100 Frost-Tauwechseln ändert sich der relative dynamische E-Modul praktisch nicht (Bild 8). Im Gegensatz zum CF/CIF-Verfahren tritt nach 56 Frost-Tauwechseln nur an den Betonen mit Silicastaub, die mit einem $(w/z)_{eq}$ von 0,45 bzw. 0,40 hergestellt wurden, ein geringer Abfall des relativen dynamischen E-Moduls auf (Bild 9).

Nach 100 Frost-Tauwechseln sind diese Balken deutlich geschädigt. Kein Abfall des relativen dynamischen E-Moduls ist an den Betonen mit Silicastaub bei einem $(w/z)_{eq} \leq 0,35$ feststellbar.

Die Wasseraufnahme der geschädigten Probekörper ist mit Werten bis 0,5 M.-% sehr gering. Dies ist wegen der beim Balkenverfahren anderen Lagerungsbedingungen während des Einfrierens und des Auftauens auch prüftechnisch bedingt und erlaubt somit keine direkten Rückschlüsse auf mögliche Gefügestörungen. An den ungeschädigten Probekörpern konnte so gut wie keine Gewichtsänderung der Probekörper festgestellt werden.

Das in der Literatur beschriebene Verhalten, dass ab einem $(w/z)_{eq}$ von 0,25 der Frostwiderstand hochfester Betone gegeben ist, wurde mit den Untersuchungen bestätigt. Einige Festbetoneigenschaften von Beton mit Silicastaub, die mit niedrigen $(w/z)_{eq}$ -Werten hergestellt werden, werden maßgeblich negativ beeinflusst. Als Ursache dafür kann eine frühe Mikrorissbildung vermutet werden, die entsteht, während die Probekörper infolge chemischen Schwindens austrocknen [14 15]. Es liegen jedoch bislang keine Ergebnisse darüber vor, inwieweit der Frostwiderstand von Betonen mit niedrigen äquivalenten Wasserzementwerten durch diese Mikrorissbildung tatsächlich beeinflusst wird. Mit weiteren Untersuchungen zur Porosität und zum Gefüge wird dieser Vermutung nachgegangen.

Beide Prüfverfahren liefern bei den Betonen ohne Silicastaub vergleichbare Ergebnisse. Bei den silicahaltigen Betonen werden in dem in der Literatur beschriebenen kritischen $(w/z)_{eq}$ -Bereich um 0,35 mit den beiden Frostprüfverfahren unterschiedliche dynamische E-Moduländerungen bestimmt. Ursache hierfür scheint ebenfalls die verfahrensbedingt unterschiedlich starke Wasseraufnahme der Probekörper während der Prüfung zu sein. Eine Übertragung der Laborergebnisse auf die Praxis wird dadurch erschwert, dass noch keine zuverlässigen Ergebnisse darüber vorliegen, wie groß die für das Verhalten unter Frosteinwirkung maßgebliche Wasseraufnahme unter baupraktischen Lagerungsbedingungen ist. Entsprechende Ergebnisse werden z. Z. in einem vom DAfStb koordinierten Forschungsprogramm erarbeitet.

4.6.2 Festigkeit und E-Modul

Um der Frage nach der Bedeutung der Änderung des relativen dynamischen E-Moduls im Hinblick auf die Änderung anderer wichtiger Betoneigenschaften als Folge der Frosteinwirkung bei der Laborprüfung nachzugehen, wurden die Biegezugfestigkeit, die Spaltzugfestigkeit und der statische E-Modul der Betone nach dem Frostangriff parallel zur Messung des relativen dynamischen E-Moduls bestimmt. Die Untersuchungen wurden nach 56 und 100 Frost-Tauwechseln durchgeführt. Zusätzlich wurden bei einigen Serien die Festigkeiten und der statische E-Modul nach einem Abfall des relativen dynamischen E-Moduls um rd. 20 %, 40 % und 60 % bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 4 zusammengefasst.

Aufgrund der Probekörpergeometrie (Platten 150 mm x 110 mm x 70 mm) wurde an den Probekörpern, die mit dem CF/CIF-Verfahren untersucht wurden, nur die Spaltzugfestigkeit geprüft. In Bild 10 ist die relative Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit des relativen dynamischen E-Moduls sowie des äquivalentem Wasserzementwertes $(w/z)_{eq}$, des Silicastaubgehaltes und der Anzahl der Frost-Tauwechsel dargestellt. Es sind zwei Bereiche zu erkennen. Der erste Bereich umfasst die Ergebnisse, bei denen trotz einer z. T. deutlichen Änderung der relativen Spaltzugfestigkeit keine Änderung des relativen dynamischen E-Moduls festgestellt wurde. Bis zu einer Abnahme der Spaltzugfestigkeit auf ca. 60 % ihres Anfangswertes kann dieses Materialverhalten nicht anhand des relativen dynamischen E-Moduls festgestellt werden. In diesem Bereich ist eine Abhängigkeit vom äquivalentem Wasserzementwert $(w/z)_{eq}$ zu erkennen. Mit sinkendem $(w/z)_{eq}$ steigt die relative Spaltzugfestigkeit.

Im zweiten Bereich – etwa ab einer relativen Spaltzugfestigkeit von 60 % - nimmt dagegen der relative dynamische E-Modul mit weiter sinkender relativer Spaltzugfestigkeit annähernd line-

ar ab. Ein ähnlicher linearer Zusammenhang besteht nach Auberg zwischen dem relativen dynamischen E-Modul und der Biegezugfestigkeit [16].

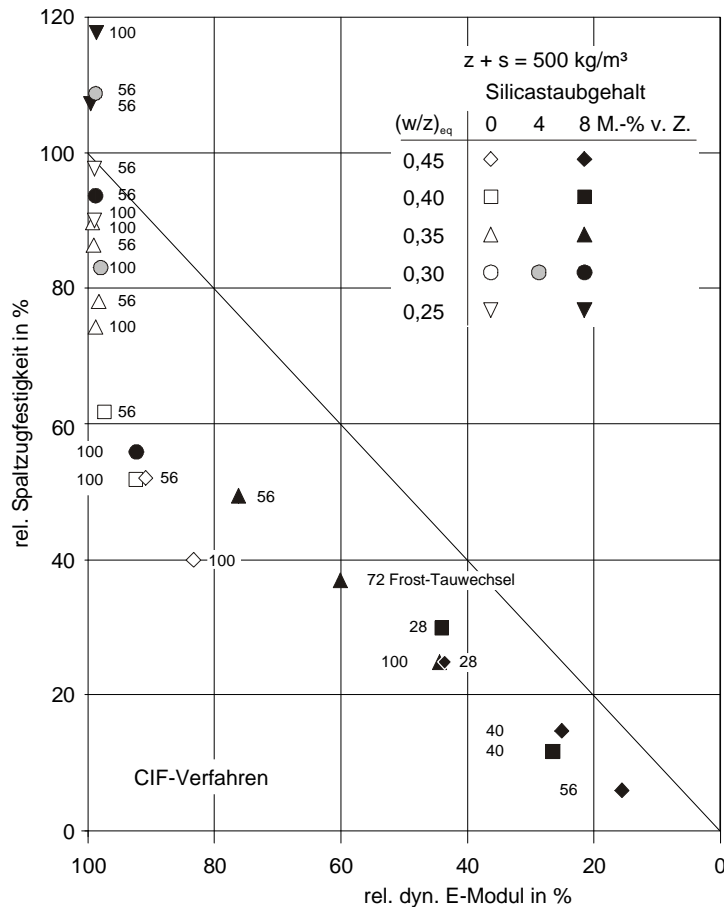


Bild 10: Relative Spaltzugfestigkeit in Abhängigkeit des relativen dynamischen E-Moduls

An den mit dem Balkenverfahren untersuchten Probekörpern wurden die Biegezug- und Spaltzugfestigkeit sowie der statische E-Modul als Biegezugmodul gemessen. Im Vergleich zur Spaltzugprüfung wird bei der Biegezugprüfung ein wesentlich größerer Bereich mit einer gleichmäßig hohen Spannung beansprucht, wodurch lokale Schädigungen infolge des Frostangriffs besser erfasst werden. Aus diesem Grund ist in Bild 12 der Zusammenhang zwischen der relativen Biegezugfestigkeit und dem relativen dynamischen E-Modul in Abhängigkeit des äquivalentem Wasserzementwertes $(w/z)_{eq}$, des Silicastaubgehaltes und der Anzahl der Frost-Tauwechsel dargestellt. Dort können drei Bereiche unterschieden werden.

Entsprechend den Untersuchungen mittels CF/CIF-Verfahren, ist ein erster Bereich zu erkennen, bei dem an den Probekörpern keine Änderung des relativen dynamischen E-Moduls feststellbar ist, die Biegezugfestigkeit aber deutlich abfällt. Dieses Materialverhalten konnte bis zu 77 % relativer Biegezugfestigkeit nicht mit Hilfe des dynamischen E-Moduls bestätigt werden. Ein ähnliches Verhalten wurde auch für die Spaltzugfestigkeit und den statischen E-Modul festgestellt.

An dem Bereich anschließend wurden Ergebnisse an den Probekörpern ermittelt, bei denen mit weiter sinkender Biegezugfestigkeit auch der dynamische E-Modul abnimmt. Ob in diesem Bereich ein linearer Zusammenhang zwischen relativer Biegezugfestigkeit und relativen dynamischen E-Modul besteht, wird mit weiteren gezielten Versuchen untersucht.

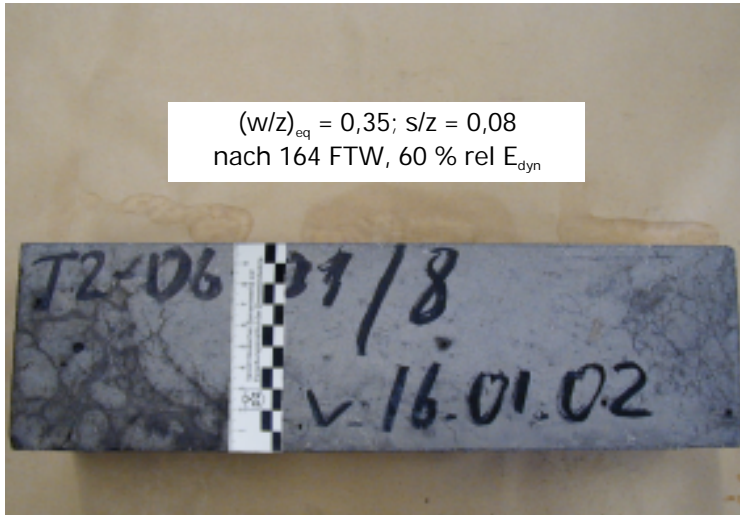


Bild 11: Balken nach 164 Frost-Tauwechselln

Im dritten Bereich konnte ab einem relativen dynamischen E-Modul von ca. 65 % an den Probekörpern (nur Betone mit Silicastaub) keine Biegezugfestigkeit gemessen werden. Ursache war ein lokales Rissnetz mit zum Teil großen Einzelrissen entweder in der Mitte oder an den Enden der Probekörper (vgl. Bild 11). Das visuelle Erscheinungsbild der Probekörper hätte einen noch deutlicheren Abfall des relativen dynamischen E-Moduls erwarten lassen. Eine Erklärung, warum diese so nicht eintrat, konnte bisher nicht gefunden werden.

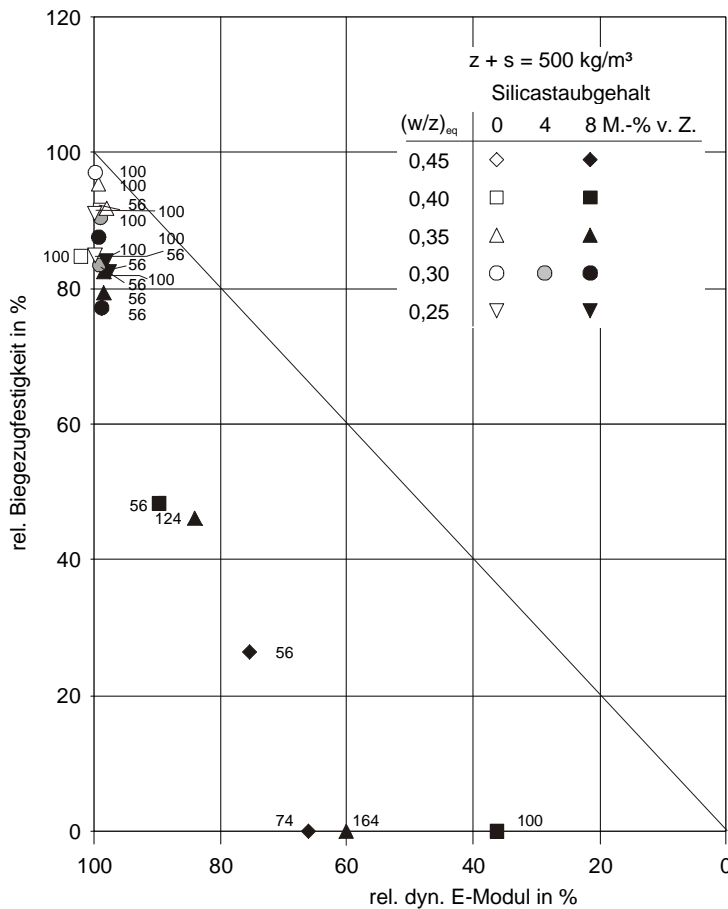


Bild 12: Relative Biegezugfestigkeit in Abhängigkeit des relativen dynamischen E-Moduls

Bei beiden Verfahren ergab sich ein Bereich, in dem ohne Änderung des relativen dynamischen E-Moduls eine deutliche Änderung der Festigkeit feststellbar war. Ursache für dieses Verhalten ist möglicherweise eine Gefügeänderung in der Kontaktzone zwischen Mörtelmatrix und Gesteinskorn, die sich mit dem Ultraschallverfahren bzw. Resonanzfrequenzverfahren nicht detektieren lässt, aber sehr sensibel auf Zugbeanspruchung reagiert. Der Frage wird mit weiteren Untersuchungen insbesondere mit der Beurteilung des Gefüges an Hand von Dünnschliffen nachgegangen.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

- Betontechnologie

Insbesondere silicastaubhaltige Betone mit $(w/z)_{eq} \geq 0,35$ zeigen eine z. T. deutliche Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls sowohl mit dem CF/CIF-Verfahren als auch mit dem Balkenverfahren. Beim CF/CIF-Verfahren waren die Probekörper teilweise schon vor dem 56. Frost-Tauwechsel stark geschädigt. Diese Schädigung war dabei mit einer hohen Wasseraufnahme der Probekörper verbunden. Beim Balkenverfahren erfolgte die Schädigung später. Dabei war die Wasseraufnahme deutlich geringer als beim CF/CIF-Verfahren.

Um die verbleibende mechanische Widerstandsfähigkeit der Betone nach einer Frostbeanspruchung zu ermitteln, wurden an den CF/CIF-Probekörpern die Spaltzugfestigkeit und an den Balken die Spaltzug- und Biegezugfestigkeit sowie der statische E-Modul bestimmt. Die Probekörper wiesen nach den Frost-Tauwechseln z. T. eine deutliche Änderung ihrer mechanischen Kenngrößen auf. Diese Schädigung führten erst ab einem bestimmten Schädigungsgrad zu einem Abfall des dynamischen E-Moduls.

Hinsichtlich des Frostwiderstands dichter hochfester Betone bestätigen die bisher im Forschungsinstitut gewonnenen Ergebnisse die in der Literatur beschriebenen Erkenntnisse.

Gefügeuntersuchungen an den Probekörpern folgen. Sie sollen weitere Aussagen zur Rissentstehung und der Rissausbreitung in der Betonmatrix liefern.

- Prüfverfahren

Die beiden Frostprüfverfahren liefern tendenziell ähnliche Ergebnisse. Allerdings erwies sich das CF/CIF-Verfahren gegenüber dem Balkenverfahren als das schärfere Prüfverfahren. Weiterhin offen ist die Frage, inwieweit die mit den Prüfverfahren gewonnenen Erkenntnisse in die Praxis übertragbar und in welchem Maße die in der Prüfung erreichte Wasseraufnahme praxisrelevant ist.

Zur Klärung der Übertragbarkeit der im Labor gewonnenen Erkenntnisse auf das Verhalten unterschiedlicher Betone in der Praxis wird zur Zeit vom DAfStb ein Schwerpunktprogramm unter Beteiligung mehrerer Institute durchgeführt.

Das Forschungsvorhaben (Nr. 12961N) wird aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF) gefördert.

6 Literatur

- [1] Powers, T.C.: A working hypothesis for further studies of frost resistance of concrete. ACI Kournal Vol. 41/1945, S. 245-272
- [2] Fagerlund, G.: Internal frost attack – state of the art. In: Frost resistance of concrete, M.J. Setzer und R. Auberg (eds.), E&FN Spon, 1997, pp 321-338

- [3] Setzer, M. J.: Basis of testing the freeze-thaw resistance: surface and internal deterioration. In: Frost resistance of concrete, M.J. Setzer und R. Auberg (eds.), E&FN Spon, London, 1997, S. 157-173
- [4] Held, M.; König, G.: Hochfester Beton bis B125 – Ein geeigneter Baustoff für hochbelastete Druckglieder. Beton- und Stahlbetonbau, 2/1992
- [5] Feldmann, R. F.: Dependence of the durability of mortars on sand/cement ratio and micro-silica (Silica Fume) addition. Durability of Building Materials, 4/1986, S. 137-149
- [6] Goldmann, A; Bentur, A.: Effects of Pozzolanic and Non-reactive Microfillers on the Transition Zone in High Strength Concretes. In: Interfaces in Cementitious Composites, E&FN Spon, London, 1992
- [7] Malhotra, V.M.: Condensed Silica Fume in Concrete. CRC Press, 1987
- [8] Pigeon, M.; Pleau, R. (eds.): Durability of concrete in cold climates. E&FN Spon, London, 1995
- [9] Setzer, M.J.; Auberg, R.; Keck, H.-J.: Frost Resistance of Concrete. Proceedings of the International RILEM Workshop Essen/Germany 2002, RILRM Publications Sarl, Cachan, 2002
- [10] Setzer, M. J.; Auberg, R.: CIF-Test – Prüfverfahren des Frostwiderstands von Beton. Betonwerk + Fertigteil-Technik 64, 4/1998, S. 94-105
- [11] Siebel, E.; Breit, W.: Standard Methods for Testing the Resistance of Concrete to Freezing and Thawing – Final Report., European Research Projekt MAT1-CT94-0055, Forschungsinstitut der Zementindustrie, Report No. B1498-4, Düsseldorf, Oktober 1998
- [12] Thielen, G.; Alonso Junghans, M. T.: Festigkeitsentwicklung und Schwinden von hochfesten Beton. In: Massivbau 2002 – Forschung, Entwicklung und Anwendung, 6. Münchener Massivbau-Seminar 2002, K. Zilch, Springer-VDI-Verlag, Düsseldorf, 2002, S. 159-183
- [13] Lusche, M.: Beitrag zum Bruchmechanismus von auf Druck beanspruchtem Normal- und Leichtbeton mit geschlossenem Gefüge. Schriftenreihe der Zementindustrie, Heft 39, Beton-Verlag, Düsseldorf, 1972
- [14] Guse, U.; Hilsdorf, H. K.: Zum Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand hochfester Betone. In: Wissenschaftliche Zeitschrift Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar, Universität 40 (1994), Nr. 5/6/7, S. 159-164. – 12. Internationale Baustofftagung – ibausil -, 22.-24.09.1994 in Weimar
- [15] Wiens, U.; Schröder, P.; Meng, B.; Schießl, P.: Mikrorissbildung in Hochleistungsbeton - Vom Modell zu den Auswirkungen auf Betoneigenschaften. In: DAfStB-Forschungskolloquium 36 / DAfStB. Aachen : RWTH, 1998, S.234-247
- [16] Auberg, R.: Application of CIF Test in Practise for Reliaible Evaluation of Frost Resistance of Concrete. In: [9], S. 255 - 267