

## **FORSCHUNGSBERICHT**

### **Kurzbericht**

**Nr.: 20-F-0044**

- Thema:** Vergleichbarkeit von zwei Laborprüfverfahren zur  
Untersuchung des Frostwiderstands von Beton  
Az.: ZP 52-5-7.266-1229/06
- Auftraggeber:** Deutsches Institut für Bautechnik
- Projektleitung:** Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. P. Schießl
- Sachbearbeiter:** Dr.-Ing. A. Spengler

## 1 Problemstellung und Zielsetzung

In Deutschland sind hauptsächlich zwei Verfahren zum Nachweis des Frostwiderstands üblich. Eine äußere Schädigung kann über das Würfelverfahren simuliert werden, die Erfassung der äußeren und der inneren Schädigung ist mit dem CIF-Verfahren möglich.

Das Würfelverfahren ist in Heft 422 des Deutschen Ausschuss [1] aufgeführt und mit nur kleinen Modifikationen in der DIN CEN/TS 12390-9:2006-08 [2] übernommen worden. Das CIF-Verfahren ist derzeit in keiner Norm aufgeführt. Das versuchstechnisch ähnliche Verfahren des CDF-Tests, bei dem über die Ermittlung der flächigen Abwitterung an identischen Proben der Frost-Tausalz-Widerstand ermittelt wird, ist jedoch in DIN CEN/TS 12390-9:2006-08 [2] enthalten. Im Merkblatt „Frostprüfung“ der Bundesanstalt für Wasserbau [3] ist das CIF-Verfahren mit einigen Modifikationen, die die Präzision und die Dokumentation der Prüfung erhöhen sollen, aufgenommen worden.

Beim Nachweis des Frostwiderstands im Rahmen von Zulassungsverfahren für Bindemittel wird die zu prüfende Betonrezeptur durch das DIBt vorgegeben, der w/z-Wert liegt bei 0,60 und der Zementgehalt bei 300 kg/m<sup>3</sup>. Der Frostwiderstand wird hier i.d.R. über das Würfelverfahren nachgewiesen.

Im Rahmen der Überarbeitung der DIN 1045 wurden für einen frostsicheren Beton ohne Mikroluftporen (Expositionsklasse XF 3) ein maximaler w/z-Wert von 0,50 und ein Mindestzementgehalt von 320 kg/m<sup>3</sup> eingeführt (vgl. DIN 1045-2:2001-07 [4]). Bei Zulassungsverfahren von Bindemitteln (w/z= 0,60 und Zementgehalt = 300 kg/m<sup>3</sup>) wird also verglichen zur späteren Anwendung „schärfer“ geprüft. Inwieweit die Ergebnisse des Würfelverfahrens mit denen des CIF-Verfahrens korrelieren wurde noch nicht systematisch untersucht.

Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, Korrelationen zwischen der Schädigung von Betonen im Würfelverfahren und Schädigungen von Betonen im CIF-Verfahren zu finden, um anschließend die Regelungen zur Frost-Prüfung im Rahmen von Zulassungen zu überarbeiten und zu vereinheitlichen. Anhand einer Korrelation des bisher üblichen Würfelverfahrens mit dem CIF-Verfahren könnte die umfangreiche Datenbasis aus vorangegangenen Zulassungsversuchen weiter für die Bewertung des Frostwiderstands genutzt werden.

## 2 Überblick der Untersuchungen und der möglichen Korrelationen

Es wurden vier Betone mit unterschiedlichen Zementen sowie ein Beton mit Steinkohlenflugasche gemäß den entsprechenden Prüfplänen hergestellt (w/z-Wert: 0,60). Die Betone hatten demnach einen Zementgehalt von 300 kg/m<sup>3</sup> bzw. der Beton, der zusätzlich

Steinkohlenflugasche enthält, einen Zementgehalt von  $270 \text{ kg/m}^3$  und einen SFA-Gehalt von  $60 \text{ kg/m}^3$ . Folgende Zemente wurden im Untersuchungsprogramm aufgenommen:

- CEM I 32,5 R
- CEM II/A-LL 32,5 R
- CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R
- CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA

In Bezug auf den Frostwiderstand stellt der Wasserzementwert eine entscheidende Kenngröße der Mischungszusammensetzung dar. Deswegen und aufgrund der aktuellen Normvorgaben wurden Betone mit den oben aufgelisteten Zementen, aber mit einem w/z-Wert von 0,50 hergestellt. Der Zementgehalt wurde entsprechend DIN 1045-2:2001-07 mit  $320 \text{ kg/m}^3$  gewählt.

Bei Betonen mit SFA kann nach der Norm der Mindestzementgehalt bei  $270 \text{ kg/m}^3$  und der Steinkohlenflugaschegehalt bei max.  $89,1 \text{ kg/m}^3$  liegen (entspr. 33 M.-% des Zementgehaltes). Es wurde deshalb ein flugaschehaltiger Beton hergestellt, dessen SFA-Gehalt sich nach diesem oberen Grenzwert der DIN 1045-2:2001-07 richtet.

Beim Nachweis des Frostwiderstands von Sonderbetonen ist der Wasserzementwert durch den Antragsteller vorgegeben. Eine Änderung oder eine Berücksichtigung eines gewissen Vorhaltemaßes durch eine Erhöhung des Wassergehaltes ist in der Regel durch die gleichzeitige Beeinflussung der übrigen Eigenschaften des Betons nicht möglich. Um den Zusammenhang zwischen der herkömmlichen Frostprüfung mit dem Würfelverfahren und dem CIF-Verfahren bei Sonderbetonen zu untersuchen, wurden zwei selbstverdichtende Betone (ein SVB mit SFA und ein SVB mit KSM), ein Massenbeton und ein Vergussmörtel hergestellt.

Für die Bezeichnung der Betone wurde folgendes Schema gewählt:

Zementgehalt und –art / Gehalt an SFA /  $w/z_{\text{eq}}$ /BV (falls zugegeben)

Von allen Betonen wurden die Frischbetonkenndaten, die Druckfestigkeiten nach 7, 28, 56 und 90 Tagen sowie der Frostwiderstand nach dem Würfel- bzw. CIF-Verfahren bestimmt.

Eine Systemskizze der Versuchsmatrix und der möglichen Korrelationen ist in Bild 1 dargestellt. Die wichtigste zu untersuchende Korrelation ist die diagonal, fett gedruckte.

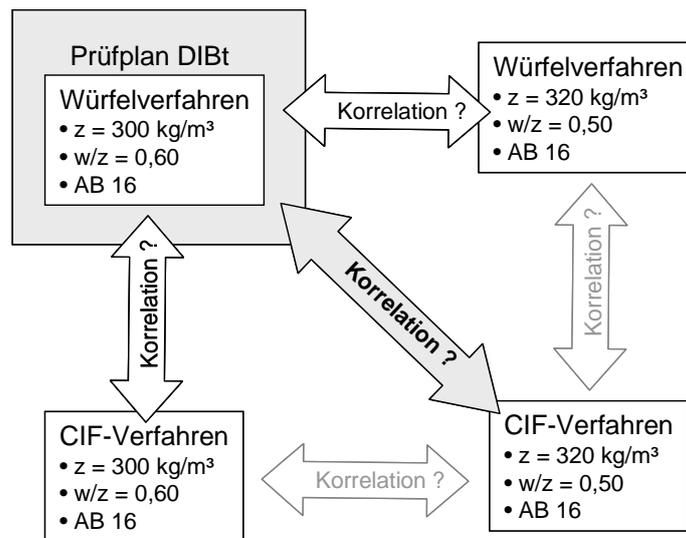


Bild 1: Systemskizze der Versuchsmatrix (Standardbetone nach Prüfplänen)

### 3 Ergebnisse

#### 3.1 Frischbetonkenndaten

Alle Standardbetone waren gut verarbeitbar und lagen im Konsistenzbereich zwischen F2 und F3. Die Luftporengehalte lagen zwischen 1,0 und 2,9 Vol.-%. Um sie zu senken, wurden einige Standardbetone nochmals mit Betonverflüssiger hergestellt, so dass sie dann im Bereich zwischen  $1,5 \pm 0,3$  Vol.-% lagen. Die Sonderbetone waren ihren Anforderungen entsprechend verarbeitbar.

#### 3.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeiten der Standardbetone mit  $300 \text{ kg/m}^3$  Zement und  $w/z = 0,60$  lagen zwischen 33 und  $43 \text{ N/mm}^2$ , die der Betone mit  $320 \text{ kg/m}^3$  Zement und  $w/z = 0,50$  lagen zwischen 43 und  $53 \text{ N/mm}^2$ . Die Druckfestigkeiten der SVB lagen nach 28 Tagen bei 53 bzw.  $51 \text{ N/mm}^2$ , die des Massenbetons lag nach 56 FTW bei  $45 \text{ N/mm}^2$ . Der Vergussmörtel wies mit  $96 \text{ N/mm}^2$  die größte Druckfestigkeit nach 28 Tagen auf (vgl. Bild 2).

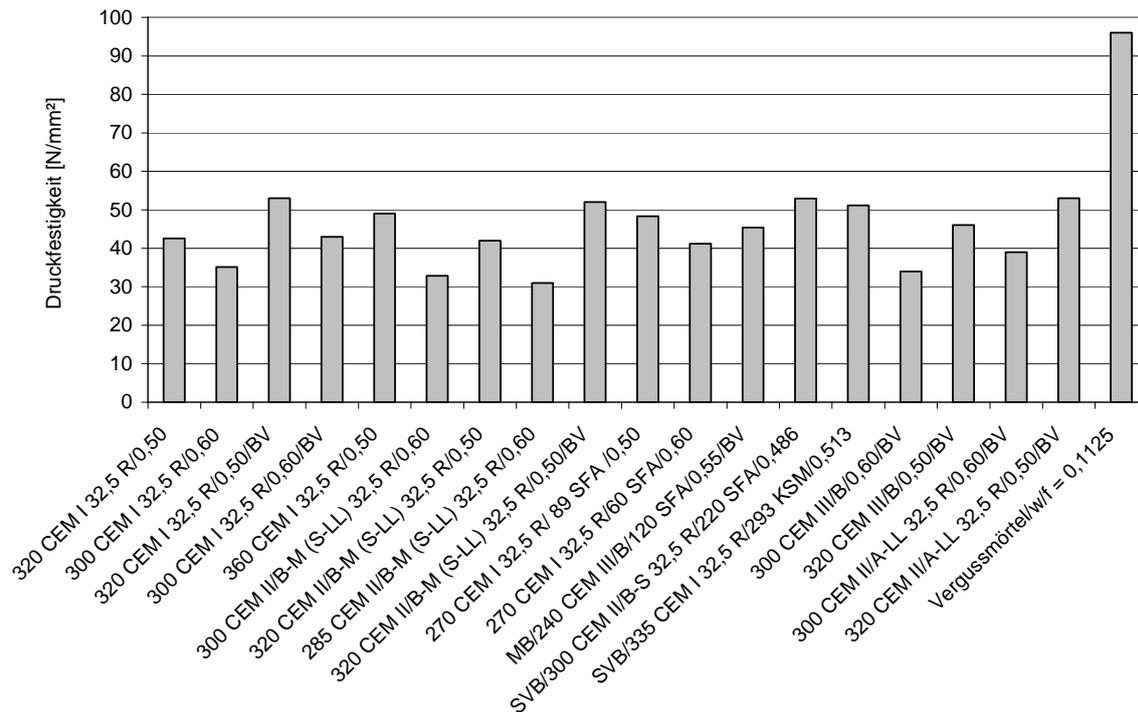


Bild 2: Druckfestigkeiten aller Betone nach 28 Tagen

### 3.3 Frostwiderstand

#### Frostwiderstand nach dem Würfel-Verfahren

Die Abwitterungen in M.-% nach 50 bzw. 100 FTW sind in Bild 3 zusammengefasst. Die größten Abwitterungen nach 100 FTW wiesen die Betone „300 CEM I 32,5 R/0,60/BV“ und „300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV“ auf (4,1 bzw. 4 M.-% nach 100 FTW), gefolgt von den Betonen „300 CEM II/A-LL 32,5 R/0,60/BV“ und „270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60“ (2,95 bzw. 2,81 M.-% nach 100 FTW). Die geringsten Abwitterungen wiesen die Sonderbetone auf.

#### Frostwiderstand nach dem CIF-Verfahren

Die Abwitterungen in g/m<sup>2</sup> sowie die absoluten Änderungen der dyn. E-Moduln in % nach 28 bzw. 56 FTW der Standard- und Sonderbetone sind in Bild 4 und Bild 5 zusammengefasst.

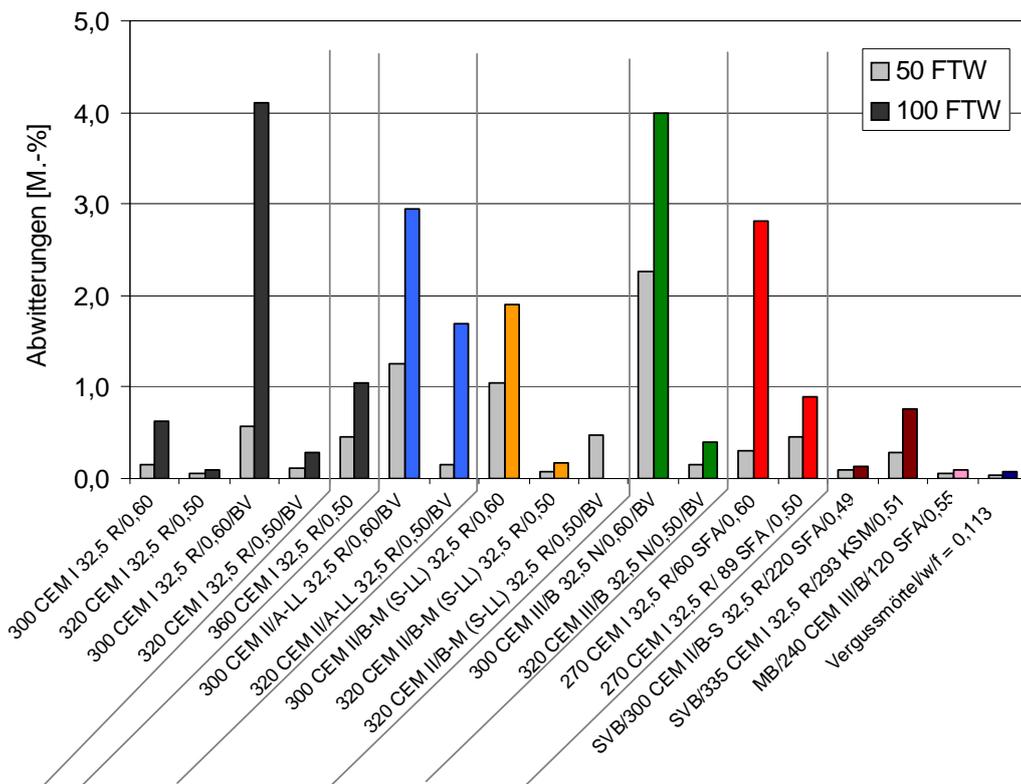


Bild 3: Abwitterungen der einzelnen Betone nach 50 bzw. 100 FTW geprüft nach dem Würfel-Verfahren

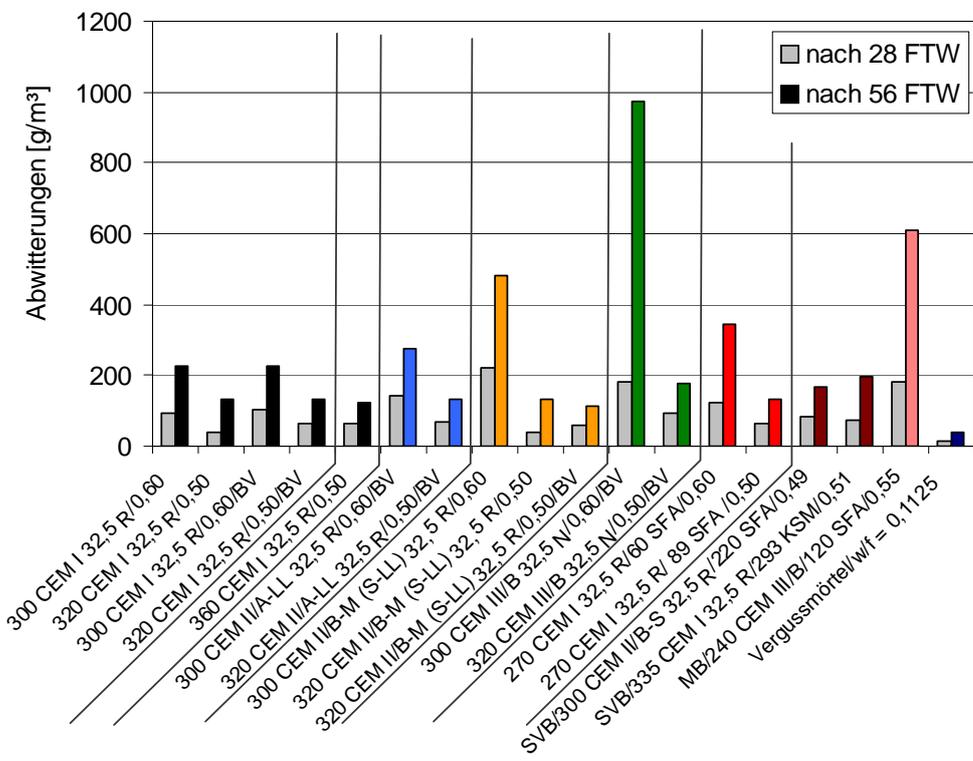


Bild 4: Abwitterungen der einzelnen Betone nach 28 bzw. 56 FTW geprüft nach dem CIF-Verfahren

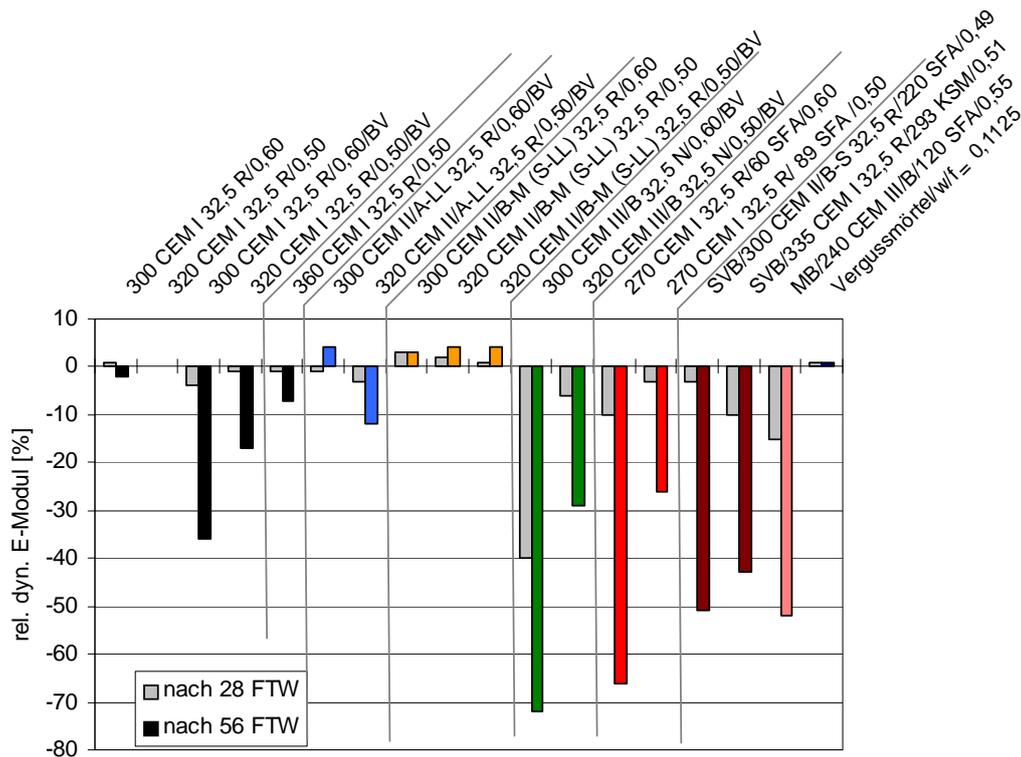


Bild 5: Abfall des rel. dyn. E-Moduls der einzelnen Betone nach 28 bzw. 56 FTW geprüft nach dem CIF-Verfahren

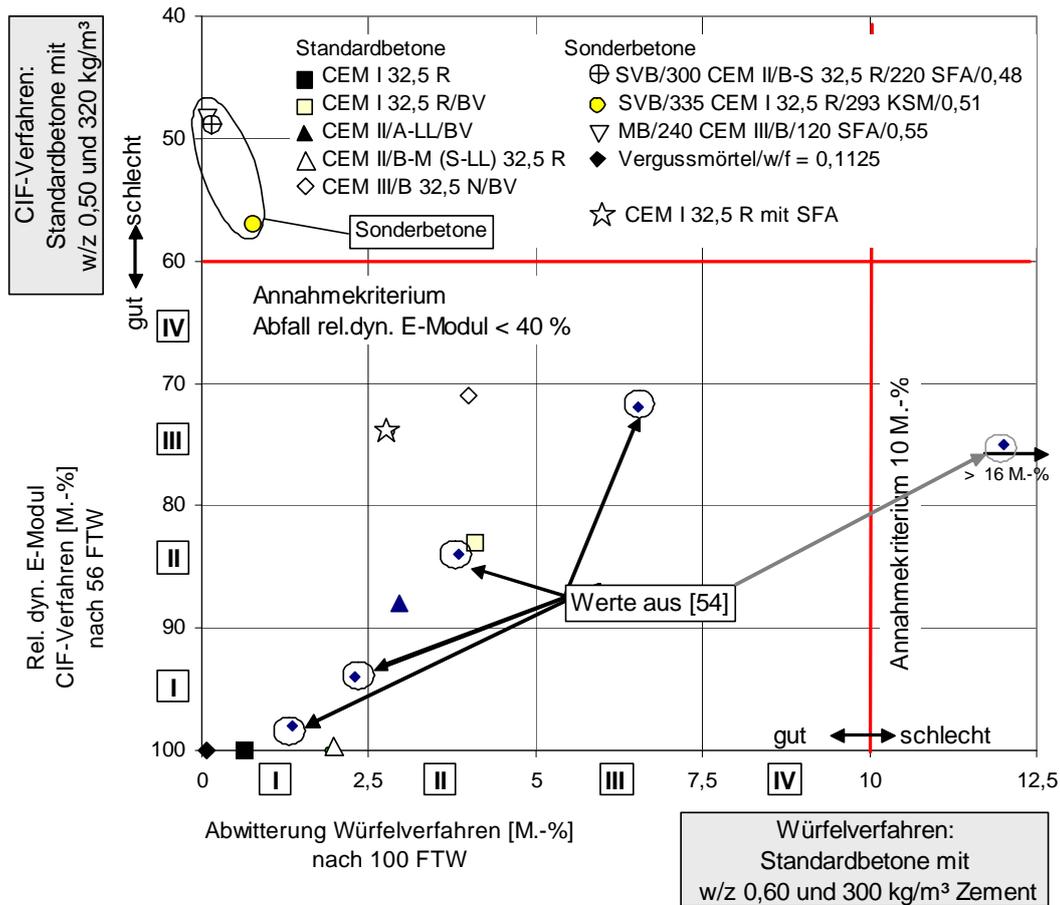
### 3.4 Korrelation der Ergebnisse von Betonen mit 300 kg/m<sup>3</sup> Zement geprüft nach dem Würfelverfahren und Betone mit 320 kg/m<sup>3</sup> Zement geprüft nach dem CIF-Verfahren

Eine Beurteilung des Frostwiderstands über die innere Gefügeschädigung ist aussagekräftiger als über die Abwitterungen. In Bild 6 wurde der Frostwiderstand nach 100 FTW beim Würfelverfahren und nach 56 FTW beim CIF-Verfahren beurteilt. Bei den Standardbetonen ist eine Korrelation zwischen den Abwitterungsmengen der Würfel und der inneren Gefügeschädigung der CIF-Probekörper zu erkennen. So liegt der überwiegende Teil der Betone im Quadranten „I/I“ oder „II/II“.

Um eine Korrelation des Würfelverfahrens mit dem CIF-Verfahren deutlicher zu machen, wurden in Bild 6 Ergebnisse ausgewertet und aufgenommen, die den Unterlagen der SVA „Betontechnologie“ PG „Frost- und Frosttausalzprüfung“ entnommen worden sind. Werden diese Betone berücksichtigt, so kristallisiert sich eine Korrelation heraus, die folgendermaßen aussehen könnte: Betone, deren Abwitterungsmengen nach dem Würfelverfahren dem Annahmehereich I zugeordnet werden können (0 bis 2,5 M.-% Abwitterungen), weisen einen rel. dyn. E-Modul beim CIF-Verfahren zwischen 100 und 90 % (bez. auf die Nullmessung) auf. Nach dem gleichen Prinzip können die drei weiteren Annahmehereiche eingeteilt werden (vgl. nachfolgende Tabelle):

Tabelle 1: Einteilung der Annahmekriterien des Würfel- und CIF-Verfahrens in vier Annahmebereiche

Annahmebereich:	I	II	III	IV
Abwitterungen Würfelverfahren	0-2,5 M.-%	2,5 – 5,0 M.-%	5,0 – 7,5 M.-%	7,5 – 10,0 M.-%
Rel. dyn. E-Modul CIF-Verfahren	100 – 90 %	90 – 80 %	80 – 70 %	70 – 60 %



([54] = SVA „Betontechnologie“ PG „Frost- und Frost-Tausalzprüfung“, Beratungsunterlagen für die 2. Sitzung am 07.04.2005 in Berlin)

Bild 6: Abwitterungen von Betonen mit 300 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,60 (Würfelverfahren - 100 FTW) bzw. rel. dyn. E-Moduln von Betonen mit 320 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,50 (CIF-Verfahren – 56 FTW) sowie der SFA-haltigen Betone und der Sonderbetone

Bei den mehlkornreichen Betonen (zwei SVB und der Massenbeton) ist keine Abhängigkeit zwischen dem Würfel- und dem CIF-Verfahren zu finden. Während diese drei Betone nach dem Würfelverfahren in sehr gut frostbeständige Betone eingestuft werden, müssten sie nach dem CIF-Verfahren aufgrund der großen inneren Gefügeschädigungen ganz deutlich in nicht frostbeständige Betone eingestuft werden (vgl. Bild 6, Ellipse). Wenn die Sonderbetone, die nach dem CIF-Verfahren geprüft wurden, aber nach 28 FTW beurteilt werden, so wie es das Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ der Bundesanstalt für Wasserbau vorsieht, liegen die ermittelten rel. dyn. E-Moduln über dem Annahmekriterium, das nach 28 FTW einen max. Abfall des rel. dyn. E-Moduls von 25 % vorsieht. Diese Sonderbetone könnten dann sicher in frostbeständige Betone eingestuft werden.

#### **4 Schlussfolgerungen**

Eine Korrelation zwischen den Abwitterungsmengen der Würfel und der inneren Gefügeschädigung der CIF-Probekörper wurde für normgerecht zusammengesetzte Standardbetone mit unterschiedlichen Zementen nachgewiesen. Um diese Korrelation zu kräftigen, sollten aber noch weitere Untersuchungen folgen.

Bei sehr mehlkornreichen Betonen, wie es bei den Sonderbetonen dieses Forschungsvorhabens der Fall war, besteht diese Korrelation aber nicht. Die Abwitterungsmengen waren bei den untersuchten mehlkornreichen Sonderbetonen beim Würfelverfahren sehr gering, so dass diese als frostbeständig eingestuft werden würden. Hingegen war das in diesen Betonen vorhandene Porensystem für die Transportmechanismen, die sich während des CIF-Verfahrens einstellten, so ungünstig, dass diese Betone während der Frostprüfung sehr große innere Gefügeschäden zeigten und deshalb bei einer Auswertung nach 56 FTW als nicht frostbeständig eingestuft werden müssten. Bei einer Beurteilung nach 28 FTW könnten diese mehlkornreichen Sonderbetone aber sicher in frostbeständige Betone eingestuft werden. Diese Ergebnisse zeigen die Notwendigkeit, ein Annahmekriterium für das CIF-Verfahren festzulegen.

## Literatur

- [1] Heft 422 des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton: Prüfung von Beton, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048 (erarbeitet vom Arbeitsausschuss DIN 1048, zusammengestellt von Norbert Bunke).
- [2] DIN CEN/TS 12390-9:2006-08: Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung; Deutsche Fassung CEN/TS 12390-9:2006, Beuth Verlag GmbH.
- [3] Merkblatt „Frostprüfung von Beton“, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Dezember 2004. Eigenverlag; Karlsruhe, Hamburg, Ilmenau 2004.
- [4] DIN 1045:2001-07: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2001.