

**Vergleichbarkeit von
zwei Laborprüfverfahren
zur Untersuchung des
Frostwiderstands von Beton**

T 3174

T 3174

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprotechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprotechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2008

ISBN 978-3-8167-7791-5

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon (07 11) 9 70 - 25 00

Telefax (07 11) 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

FORSCHUNGSBERICHT

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

INHALTVERZEICHNIS

1	PROBLEMSTELLUNG UND ZIELSETZUNG	4
1.1	In Deutschland übliche Verfahren zur Quantifizierung des Frostwiderstands.....	4
1.2	Nachweis des Frostwiderstands im Rahmen von Zulassungsverfahren.....	5
1.2.1	Bisherige Vorgehensweise	5
1.2.2	Aktuelle Probleme bei der bisherigen Vorgehensweise.....	6
1.3	Zielsetzung	6
2	GRUNDLAGEN ZUM FROSTWIDERSTAND.....	7
2.1	Schadensbild.....	7
2.2	Betontechnologische Einflüsse auf den Frostwiderstand.....	7
2.2.1	Gefüge des erhärteten Betons	7
2.2.2	Transport von Wasser in den Poren.....	9
2.2.3	Gefrierverhalten der Porenlösung.....	10
2.3	Schädigungsmechanismus während der Frost- und Taubeanspruchung.....	12
2.4	Folgerungen für die Frostprüfung im Labor.....	13
3	PRÜFVERFAHREN ZUM FROSTWIDERSTAND	14
3.1	Prüfverfahren zum Nachweis des Frostwiderstands.....	14
3.1.1	Würfelverfahren	14
3.1.2	CIF-Verfahren	15
3.1.3	Zusammenfassender Vergleich der Prüfverfahren	16
4	UNTERSUCHUNGEN	19
4.1	Übersicht	19
4.2	Zusammensetzung der Betone.....	20
4.2.1	Zusammensetzung der Standardbetone	20
4.2.2	Zusammensetzung der Sonderbetone	22
4.3	Herstellung der Betone.....	24
4.3.1	Mischregime der Standardbetone	24
4.3.2	Mischregime der Sonderbetone	25
4.3.3	Untersuchungen am Frischbeton	27
4.3.4	Herstellung und Lagerung der Probekörper	28
4.4	Untersuchungen am Festbeton	29
4.4.1	Druckfestigkeit	29
4.4.2	Frostwiderstand nach dem Würfel-Verfahren.....	30
4.4.3	Frostwiderstand nach dem CIF-Verfahren	31

5	ERGEBNISSE.....	32
5.1	Frischbetonkennwerte.....	32
5.2	Druckfestigkeit	33
5.3	Frostwiderstand	38
5.3.1	Frostwiderstand nach dem Würfel-Verfahren.....	38
5.3.2	Frostwiderstand nach dem CIF-Verfahren.....	40
5.3.3	Detaillierte Darstellung der Ergebnisse der Frostprüfungen.....	44
5.4	Korrelationen zwischen den Ergebnissen zum Frostwiderstand.....	68
5.4.1	Betone mit 300 bzw. 320 kg/m ³ Zement – geprüft nach dem Würfelverfahren	68
5.4.2	Betone mit 300 bzw. 320 kg/m ³ Zement – geprüft nach dem CIF-Verfahren	70
5.4.3	Betone mit 300 kg/m ³ Zement – geprüft nach dem Würfel- bzw. CIF-Verfahren.....	71
5.4.4	Betone mit 320 kg/m ³ Zement geprüft nach dem Würfel- bzw. CIF-Verfahren.....	73
5.4.5	Betone mit 300 kg/m ³ Zement geprüft nach dem Würfelverfahren und Betone mit 320 kg/m ³ Zement geprüft nach dem CIF-Verfahren	75
6	ZUSAMMENFASSUNG.....	81
7	SCHLUSSFOLGERUNGEN	84
8	LITERATUR.....	85

1 Problemstellung und Zielsetzung

1.1 In Deutschland übliche Verfahren zur Quantifizierung des Frostwiderstands

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

Das Würfelverfahren ist in Heft 422 des Deutschen Ausschuss [1] aufgeführt und mit nur kleinen Modifikationen in DIN CEN/TS 12390-9:2006-08 [2] übernommen worden. Hierbei werden zwei Würfel (Kantenlänge: 100 mm) einer zyklischen Befrostung und Auftauphase ausgesetzt. Der Frostangriff findet über alle sechs Seiten des Würfels statt. Als Belastungsdauer sind in Heft 422 [1] 100 Frost-Tau-Wechsel und in DIN CEN/TS 12390-9:2006-08 [2] 56 Frost-Tau-Wechsel vorgesehen. Die äußere Schädigung wird über den Masseverlust der Würfel (Abwitterung) aufgenommen. Zusätzlich ist es möglich, die innere Schädigung über eine Messung der Ultraschalllaufzeit aufzunehmen. Zu beachten ist hierbei allerdings, dass die Ultraschallköpfe an eine geschädigte Randzone angekoppelt werden und die Laufzeit des Ultraschallsignals in diesem Fall eine integrale Messung darstellt, da das Signal sowohl durch zwei geschädigte Randzonen als auch durch den teilweise noch nicht geschädigten Kernbeton verläuft. Ein Anstieg der Laufzeit ist daher nicht direkt einer entsprechenden Schädigung des Betons zuzuordnen.

Das CIF-Verfahren ist als eine vom RILEM TC 176 erstellte Prüfvorschrift veröffentlicht [3]. Hierbei werden Platten ($110 \times 150 \times 70 \text{ mm}^3$) einem eindimensionalen Frostangriff ausgesetzt (Temperatur und Feuchte werden über eine Prüffläche mit den Abmessungen $110 \times 150 \text{ mm}^2$ aufgebracht). Es werden die flächige Abwitterung an der Prüffläche und die Veränderung des dynamischen E-Moduls im Probekörper ermittelt. Der dynamische E-Modul wird hierbei parallel zur Befrostungsfläche in einer Tiefe von 35 mm mit Hilfe einer Ultraschalllaufzeitmessung bestimmt. Dies hat im Gegensatz zur Ermittlung der inneren Schädigung beim Würfelverfahren den Vorteil, dass die Schädigung in einer gleichmäßig geschädigten Schicht erfolgt. Als maßgebend für die Schädigung des Betons wird der Abfall des dynamischen E-Moduls angesehen. 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 [4] ist das CIF-Verfahren mit einigen Modifikationen, die die Präzision und die Dokumentation der Prüfung erhöhen sollen, aufgenommen worden.

Bei beiden Verfahren ist zu beachten, dass keine in Normen hinterlegten Annahmekriterien existieren, wie dies zum Beispiel beim Nachweis einer Festigkeitsklasse bei Beton der Fall ist.

1.2 Nachweis des Frostwiderstands im Rahmen von Zulassungsverfahren

1.2.1 Bisherige Vorgehensweise

Der Nachweis des Frostwiderstands im Rahmen von Zulassungsverfahren des DIBt wird bisher mit dem Würfelverfahren geführt. In den entsprechenden Prüfplänen (z.B. Prüfplan für die Zulassung von Portlandkompositzementen [5]) ist die Ermittlung der Abwitterung von zyklisch belasteten Würfeln vorgeschrieben. Bei Bindemittelzulassungen wird ein Beton mit dem zu prüfenden Bindemittel hergestellt, bei dem in Anlehnung an die nun zurückgezogene DIN 1045:1988-07 [6] ein Wasserzementwert von 0,60 eingestellt wird. Der Zementgehalt liegt bei 300 kg/m³, die Sieblinie ist vorgegeben und liegt im Bereich AB 32. Da DIN 1045-2:2001-07 [12] den Wasserzementwert für die entsprechende Expositionsklasse XF3 auf 0,50 festlegt (und den Mindestzementgehalt auf 320 kg/m³), wird bei der Bindemittelprüfung „schärfer“ als der späteren Anwendung entsprechend geprüft. Bei Zulassungen im Rahmen von Sonderbetonen (wie z.B. SVB) war es in der Vergangenheit in der Regel üblich, die vom Antragsteller vorgegebene und später baupraktisch eingesetzte Rezeptur mit dem tatsächlichen Wasserzementwert zu prüfen. Geprüft wurde mit dem Würfelverfahren. Nur vereinzelt liegen Erfahrungen zum Frostwiderstand von SVB geprüft nach dem CIF-Verfahren vor. So kann nach [7] z.B. auf eine längere Nachbehandlung eines SVB mit hohem SFA-Gehalt (> 200 kg/m³) verzichtet werden, wenn ein CEM I nach DIN EN 197-1 verwendet wird und die normativen Vorgaben bezüglich Zementgehalt und w/z-Wert eingehalten werden. Andere Untersuchungen mit einem SVB mit Kalksteinmehl wiesen im CIF-Verfahren einen hohen Frostwiderstand auf [8, 9].

Eine Bewertung der Ergebnisse findet immer in den entsprechenden Sachverständigenausschüssen statt. Als Grundlage für eine Bewertung der Ergebnisse steht eine Reihe von Hintergrundinformationen zur Verfügung. So schlägt Siebel [10] als Annahmekriterium für einen frostbeständigen Beton eine maximale Abwitterung von 5 M.-% nach 50 Frost-Tau-Wechseln bzw. 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln vor. Außerdem wurde bei den ersten Zulassungsverfahren zusätzlich zu dem Bindemittel, für das eine Zulassung beantragt wurde, die Prüfung des Frostwiderstands eines Vergleichsbetons, der mit einem Normzement (z.B. Portlandzement) hergestellt wurde, vorgeschrieben. Auf diese Weise kann ein direkter Vergleich eines nach Norm zulässigen Zementes und des in der Zulassung befindlichen Bindemittels stattfinden. Des Weiteren wurde durch die Vielzahl an Zulassungsversuchen und Vergleichsuntersuchungen eine Datenbasis geschaffen, die in [11] zusammengefasst ist und auf die im Rahmen der Bewertung zurückgegriffen werden kann.

1.2.2 Aktuelle Probleme bei der bisherigen Vorgehensweise

Wasserzementwert

Im Rahmen der Überarbeitung der DIN 1045 wurde für einen frostsicheren Beton ohne Mikroluftporen (Expositionsklasse XF 3) ein maximaler Wasserzementwert von 0,50 festgelegt (vgl. DIN 1045-2:2001-07 [12]). Das bedeutet, dass der Wasserzementwert der in den Zulassungsprüfungen für Bindemittel hergestellten Betone mit +0,10 weit über dem derzeit überhaupt zulässigen Wasserzementwert liegt. Eine Anpassung des Wasserzementwertes fand bisher nicht statt, da dies einerseits eine Prüfung mit einem gewissen Vorhaltemaß bedeutet, andererseits bei einer Änderung die bis dato geschaffene Datenbasis [11] zur Bewertung nicht mehr herangezogen werden kann.

Im Rahmen von Zulassungen für Betone und Mörtel (z.B. Zulassung von SVB, Massenbeton, Vergussmörtel), bei denen ein Nachweis des Frostwiderstands gefordert wird, ist zumeist eine Erhöhung des Wasserzementwertes nicht möglich (z.B. aufgrund gleichzeitig erhöhter Sedimentation von SVB). Daher wurden bei diesen Zulassungen die Betone mit den dort beantragten Wasserzementwerten geprüft.

Anzahl der Frost-Tau-Wechsel

Eine Änderung im Ablauf der Frostversuche erfolgte mit Einführung des Entwurfs der DIN CEN/TS 12390-9:2006-08 [2]. Im Unterschied zu dem bisherigen Verfahren aus [1], in dem 100 Frost-Tau-Wechsel vorgeschrieben waren, wurden hier nur 56 Frost-Tau-Wechsel gefordert. Diese Änderung wurde z.B. in die Prüfungs- und Überwachungsgrundsätze für anorganische Betonzusatzstoffe [13] aufgenommen.

Zu berücksichtigen ist hierbei, dass kritische Betone oftmals erst nach 56 Frost-Tau-Wechseln eine starke Zunahme der Schädigung zeigen. Eine zielsichere Unterscheidung zwischen frostbeständigen und nicht frostbeständigen Betonen ist daher bei einer Prüfung von nur 56 Frost-Tau-Wechseln nicht möglich (vgl. Datenbasis in [11]).

1.3 Zielsetzung

Ziel dieses Forschungsvorhabens ist 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 Grundlagen zum Frostwiderstand

2.1 Schadensbild

Bei einem Frostangriff muss generell zwischen einer äußeren und einer inneren Schädigung des Betons unterschieden werden. So können durch eine Frosteinwirkung am Beton Abplatzungen auftreten, die zu Oberflächenschäden des Betons und Abtragung der Randzone führen. Außerdem können innere Schädigungen auftreten, bei denen im Kernbeton Risse (meist in der Grenzschicht zwischen Gesteinskörnung und Zementsteinmatrix) entstehen, die die Gebrauchseigenschaften des Betons (Druckfestigkeit, E-Modul, Dauerhaftigkeit) signifikant vermindern.

2.2 Betontechnologische Einflüsse auf den Frostwiderstand

2.2.1 Gefüge des erhärteten Betons

Zementgebundene Baustoffe haben einen Porenradienbereich über mehrere Zehnerpotenzen (Bild 1). Neben den Gel- und Kapillarporen, die durch die chemischen bzw. physikalischen Prozesse der Hydratation entstehen, gibt es herstellungsbedingte Verdichtungs-poren. Sie werden auch als "Rüttelporen" oder wie in Tabelle 1 als „Grob-poren“ bezeichnet und bleiben selbst bei vollständiger Verdichtung im Beton zurück. In Tabelle 1 ist eine von der internationalen Vereinigung der Angewandten Chemiker (IUPAC) getroffene Einteilung der Porengrößen dargestellt, die von Setzer verfeinert und um die Angabe des Gefrier-verhaltens des in den Poren evtl. enthaltenen Porenwassers erweitert wurde [14].

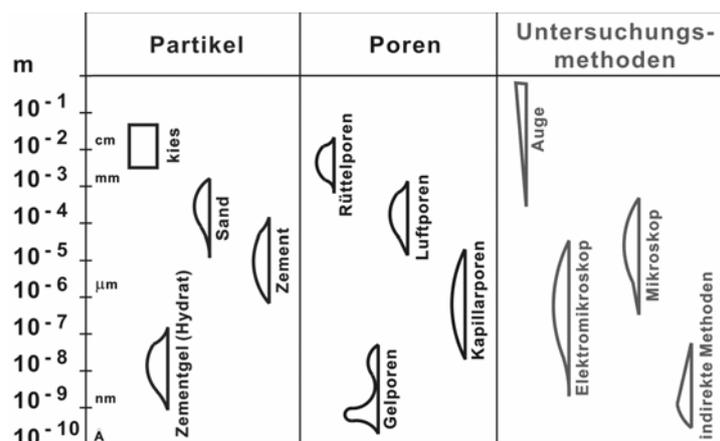


Bild 1: Größenordnung der Zementsteinporen, Vergleich mit Betonbestandteilen und mögliche Untersuchungsmethoden nach Setzer [15]

Tabelle 1: Porengrößenverteilung und Wassermodifikation nach Setzer [16]

Porenart	Porengröße R_h [μm]	Porenwasser	Gefrierpunkt
Grobporen	≥ 1000	leer	0 °C bis -20 °C
Makrokapillaren	< 1000	saugend, sofort befüllbar	
Mesokapillaren	< 30	saugend, in Minuten bis Wochen befüllbar	
Mikrokapillaren	< 1	durch kapillares Saugen nicht vollständig befüllbar	-20 °C bis -39 °C
Mesogelporen	$< 0,030$	durch Kondensation bei rel. F. von 50 % - 98 % befüllbar	
Mikrogelporen	$< 0,001$	durch Sorption bei rel. F. < 50 % befüllbar	ca. - 90 °C

Kapillarporen entstehen durch überschüssiges Wasser im Zementstein, welches weder in den Hydratationsprodukten noch physikalisch in den Gelporen gebunden ist. Dieses Überschusswasser wird in der Regel in der ersten Trocknungsphase abgegeben und hinterlässt die nach außen offenen Kapillarporen. Abhängig von der Umgebungsfeuchte und vom Porenradius können diese Poren durch kapillares Saugen mehr oder weniger schnell wieder aufgefüllt werden.

Durch den Einsatz von Betonzusatzstoffen, wie z.B. Steinkohlenflugasche und Kalksteinmehl, wie sie bei SVB oder Massenbetonen zum Einsatz kommen, kann die Ausbildung des Porengefüges im Beton erheblich beeinflusst werden [17]. Die Wirkung des Kalksteinmehls beruht dabei in erster Linie auf dem sog. Füllereffekt. Dieser lässt sich prinzipiell in die Teileffekte der physikalischen Hohlräumausfüllung und einer Beschleunigung der Zementhydratation einteilen. Die hohlraumausfüllende Wirkung hängt aufgrund geometrischer Überlegungen vor allem von der Feinheit der Zemente und des Zusatzstoffs ab. Der Einfluss der Steinkohlenflugasche auf die Ausbildung des Porensystems beruht dagegen nur in den ersten Tagen nach der Betonherstellung ausschließlich auf dem Füllereffekt. Zusätzlich trägt die nach 2 bis 7 Tagen nach Herstellung einsetzende puzzolanische Reaktion zu einer Veränderung des Porengefüges im Beton bei. Wesentliches Merkmal der puzzolanischen Reaktion der Steinkohlenflugasche ist die Bildung von zusätzlichen CSH-Phasen aus der amorphen Kieselsäure der Flugasche und dem im Zementstein vorhandenen $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Die Bildung der zusätzlichen CSH-Phasen ist dabei verbunden mit einer deutlichen Zunahme des Gelporenvolumens bei einer gleichzeitigen Reduzierung des Anteils an größeren Kapillarporen und einer Unterbrechung der Kontinuität des Kapillarporengefüges. Der Einfluss der puzzolanischen Reaktion auf das Porengefüge ist jedoch vor allem in höherem Betonalter von Bedeutung, da der Reaktionsgrad der Flugasche nach 28 Tagen nur etwa 5 bis 10 % beträgt (vgl. [17]).

Okazawa berichtete in [18] über Untersuchungen zum Gefüge selbstverdichtender Betone im Vergleich zu Normalbetonen mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie. Die selbstverdichtenden Betone wurden unter Verwendung unterschiedlicher Hochleistungsfließmittel hergestellt. Im Alter von 28 d und 180 d wurden die Betone hinsichtlich ihrer Porengrößenverteilung untersucht. Das Porenvolumen aller selbstverdichtenden Betone war - unabhängig von der Zusammensetzung und der verwendeten Fließmittel - sowohl im Alter von 28 d als auch im Alter von 180 d deutlich geringer als das der Rüttelbetone.

2.2.2 Transport von Wasser in den Poren

Für alle Transportmechanismen im Beton ist die Porenstruktur des Betons, d.h. das Porenvolumen, die Porengrößenverteilung und die Art und Weise, wie die Poren untereinander verbunden sind, von entscheidender Bedeutung.

Während Gelporen unter Normalbedingungen mit Porenwasser gefüllt und somit praktisch undurchlässig für Flüssigkeiten und Gase sind, wird der Transport von Wasserdampf und Flüssigkeiten von der Kapillarporosität und damit wesentlich vom w/z -Wert des Betons beeinflusst [19].

Die Kapillarporen sind zunächst mit Zugabewasser gefüllt, das man auch als Kapillarwasser oder "freies Wasser" im Beton bezeichnet. Dieses Kapillarwasser ist im Zementstein ungebunden eingelagert und wird bei Temperatur- oder Luftfeuchteänderungen abgegeben bzw. wieder aufgenommen [20].

Der Feuchtetransport im Beton nimmt deutlich zu, wenn die Kapillarporen untereinander in Verbindung stehen (Kontinuität). Kontinuität liegt nach Powers [21] bei einem Kapillarporenanteil von ca. 25 Vol.-% vor. Um bei vollständiger Hydratation unterhalb dieses Grenzwertes zu bleiben, darf der Wasserzementwert 0,60 nicht übersteigen. Geht man von praxisnahen Hydratationsbedingungen aus, liegt der Hydratationsgrad jedoch auch bei guter Nachbehandlung unter 100 %. Für Betone mit Portlandzement kann von einem Hydratationsgrad von ca. 75 bis 80 % ausgegangen werden [22]. Demnach kann erst bei einem w/z -Wert von rd. 0,50 die Kontinuität des Kapillarporensystems effektiv verringert werden (vgl. Bild 2).

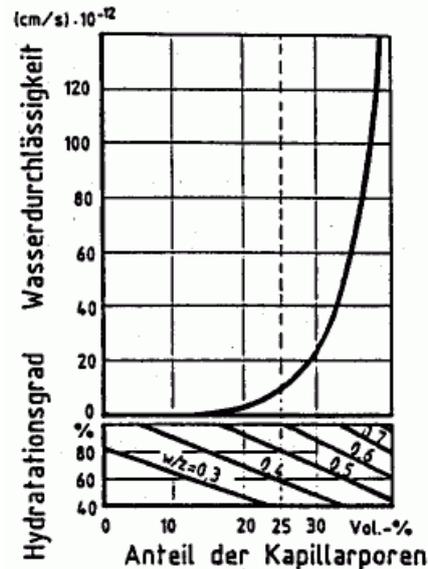


Bild 2: Abhängigkeit der Wasserundurchlässigkeit von Zementstein vom w/z-Wert, dem Hydratationsgrad und dem Kapillarporenraum nach [23]

2.2.3 Gefrierverhalten der Porenlösung

Bei reinem Wasser unter atmosphärischen Bedingungen entspricht der Dampfdruck von Wasser bei 0 °C dem des Dampfdrucks von Eis, d.h. Wasser kann bei dieser Temperatur sowohl in flüssiger, als auch in fester Form vorliegen. Diese Gleichgewichtstemperatur kann im Zementstein jedoch durch hohe Drücke, gelöste Stoffe in der Porenlösung und durch den Einfluss der Oberflächenkräfte verringert werden.

Bei Gelporen, die in etwa nur um den Faktor 10 größer als die Wassermoleküle sind, befindet sich das gesamte Wasser im Gelporenraum im Einflussbereich der Porenoberfläche. Das Gelporenwasser bleibt daher unter normalen Prüfbedingungen (Minimaltemperatur -20 °C) ungefroren.

Setzer und Auberg [24] konnten anhand von Differential-Scanning-Calorimetry-Kurven (DSC) die Gefrierbereiche des Porenwassers von Zementstein, der in NaCl-Lösungen unterschiedlicher Konzentration vorgelagert wurde, graphisch darstellen. Das Gefrierverhalten des Porenwassers kann durch die oberste Kurve in Bild 3 erklärt werden: der erste Ausschlag zwischen -10 °C und -20 °C zeigt den Gefrierübergang des makroskopischen Kapillarporenwassers an, der zweite Ausschlag zeigt den Gefrierbereich des vorstrukturierten Gelporenwassers an. Bei einer üblichen Minimaltemperatur von Frostversuchen im Labor von -15 °C bzw. -20 °C bedeutet dies, dass praktisch ausschließlich das Kapillarporenwasser gefriert und somit der Sättigungsgrad der Kapillarporen das Ergebnis der Frostprüfung entscheidend beeinflusst. Während der Frost-Prüfung ist somit das ungefrorene und damit auch bei tiefen Temperaturen immer noch bewegliche Gelporenwasser für erhebliche

Wasserbewegungen verantwortlich und bietet Erklärungsansätze für Zerstörungsmechanismen, die die Mikrostruktur des Betons betreffen.

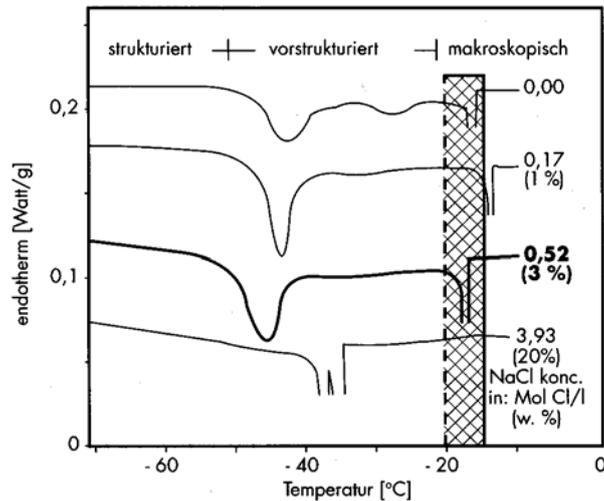


Bild 3: Gefrierbereiche des Porenwassers (Differential Scanning Calorimetry Kurven) [24]

Auf Flüssigkeiten in engen Kapillaren wirken Kräfte ein, die die physikalischen Gesetzmäßigkeiten des Gefrierens und Tausens beeinflussen. Die große innere Oberfläche der Zementsteinmatrix (ca. $200 \text{ m}^2/\text{g}$) besteht aus vielen unterschiedlichen Porengrößen und Porengeometrien. Vor allem bei Poren mit Radien $< 100 \text{ nm}$ wird durch die wirkenden Oberflächenkräfte das chemische Potential des Porenwassers verändert. Die daraus folgende Absenkung des Gefrierpunktes hängt also direkt vom Porenradius ab: je kleiner der Porenradius ist, desto größer ist die Gefrierpunkterniedrigung (vgl. Bild 4).

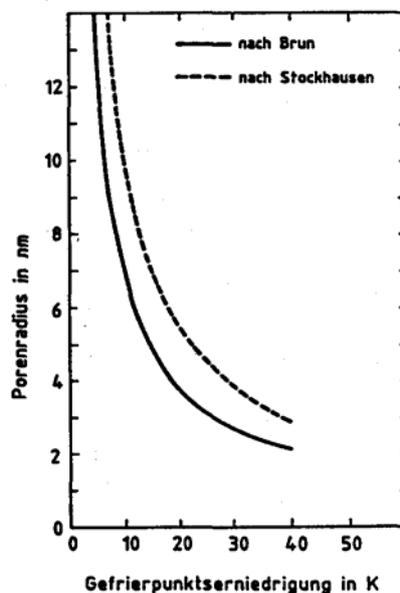


Bild 4: Beziehung zwischen Porenradius und Gefrierpunkterniedrigung für Wasser in zylindrischen Poren [25]

Nach Grübl und Sotkin [26] findet der Phasenübergang in der Porenlösung von Zementstein bei $-1,3\text{ °C}$ statt. Die Ursache dafür liegt in der Gefrierpunktniedrigung durch gelöste Stoffe, wie z.B. die in der Porenlösung befindlichen Alkalien, Sulfate und das durch die Hydratation in großen Mengen gebildete Ca(OH)_2 . Die auftretende Gefrierpunktniedrigung ist direkt proportional zur Konzentration des gelösten Stoffes in der Porenlösung. Werden keine Taumittel verwendet, spielt dieser Einfluss auf das Gefrierverhalten der Porenlösung aber eine eher untergeordnete Rolle.

Der vorhandene Porenraum spielt also eine entscheidende Rolle hinsichtlich der Frostschädigung. Die Porengrößenverteilung beeinflusst direkt die Transportarten und Aufnahmemengen von Wasser [27]. Von ihr ist es abhängig, wie intensiv die Transportvorgänge von Wasser ablaufen, d.h. wie weit eine Entwässerung der kleinen Poren stattfindet und sich dementsprechend beim Erreichen der jeweiligen Gefriertemperatur bei der Eisbildung ein Sprengdruck aufbaut [28] (vgl. nächstes Kapitel).

2.3 Schädigungsmechanismus während der Frost- und Taubeanspruchung

Die Grundzüge des Frostangriffs können im Prinzip auf alle porösen Baustoffe übertragen werden. Beim Gefrieren kommt es zu einer Ausdehnung des Wassers um 9,1 Vol.-%. Wenn der kritische Sättigungswert des Porenraums erreicht ist und das Eis einen zu geringen Expansionsraum hat, entsteht eine Sprengwirkung und es kommt zu inneren Gefügeschäden, die sich als irreversible Dehnung, Festigkeitsverlust und Abfall des E-Moduls sowie Abwitterungen äußern.

Bis zu einer Schädigung durch den Sprengdruck des Eises laufen im Porensystem während der Frostbeanspruchung mehrere Vorgänge ab. Zunächst verhält sich das Wasser in den Poren nicht wie freies Wasser, sondern kondensiert schon unterhalb des Sättigungsdampfdruckes und gefriert erst bei tieferen Temperaturen. Bei einer Temperaturabsenkung unter 0 °C kommt es also zunächst zu keiner Eisbildung, da der Gefrierpunkt der Porenlösung bedingt durch das Calciumhydroxid tiefer liegt (vgl. Kap. 2.2.3, S.10).

Die Gefrierpunktniedrigung, bedingt durch die Porengröße, führt dazu, dass bei Temperaturen unter 0 °C im Porensystem immer Wasser, Eis und Dampf gleichzeitig nebeneinander vorhanden sind. Da der Dampfdruck über Eis geringer ist als über Wasser, entsteht ein örtlich begrenztes Dampfdruckgefälle, was zur Folge hat, dass noch flüssiges Wasser zum Eis hin diffundiert und dort in Eis übergeht. Kleine Poren werden entwässert und in den größeren Poren sammelt sich Eis an. Setzer [29] führt dies unter der Bezeichnung „Mikroeislinienbildung“ auf die Wirkung von Oberflächenkräften zwischen dem Feststoff und Wasser zurück. Die Mikroeislinienbildung kann durch Schwinderscheinungen im Gelporenbereich infolge von Wasserumverteilung von den kleinen Poren hin zu größeren zu

Schäden am Beton führen. Verursacht werden diese Schädigungen durch die Expansion des Eises und daraus entstehende hydraulische Drücke innerhalb geschlossener Porensysteme.

Nach Setzer [29, 30] kann dieser Zerstörungsmechanismus nur eintreten, wenn zumindest lokal ein bestimmter kritischer Sättigungsgrad erreicht ist. Die künstliche Wassersättigung entsteht durch die Oberflächenwechselwirkung zwischen Porenwasser und Matrix während des zyklischen Gefrierens in der Frosttruhe.

Fagerlund [31, 32] sieht die Frostschädigung stark abhängig vom Feuchtigkeitsgehalt des Betons. Ab einem gewissen kritischen Wassergehalt treten auch schon nach einer geringen Frostzyklenanzahl Schäden auf.

Bei einem Temperaturanstieg taut das Eis in den kleineren Poren als erstes auf. Wieder wandert das Wasser dann aufgrund des geringeren Dampfdruckes der eisgefüllten Poren zu diesen hin. Wenn die Betonoberfläche zu diesem Zeitpunkt mit flüssigem Wasser in Kontakt steht, wie dies bei Betonen der Expositionsklasse XF3 und XF4 bzw. bei allen Laborversuchen der Fall ist, wird Wasser aufgrund des Unterdrucks in das Betoninnere hineingezogen. Wenn dann der kritische Wassersättigungsgehalt erreicht ist, kommt es zu einer Schädigung, weil nun während des Gefrierens eine kritische Spannung aufgebaut wird [33].

2.4 Folgerungen für die Frostprüfung im Labor

Ausschlaggebend für einen ausreichenden Frostwiderstand bei jedem Laborverfahren ist, ob während der vorgesehenen Frostwechsel der kritische Wassersättigungsgehalt in den Probekörpern erreicht wird. Um zwei Laborprüfverfahren miteinander zu vergleichen, ist es wichtig, dass einerseits der Kapillar- und der Gelporengehalt der jeweiligen Betonprobekörper weitgehend konstant sind und andererseits der Luftporengehalt möglichst gering bleibt (1,5 Vol.-%), da dieser die Transportmechanismen während der Prüfung beeinflussen kann.

Bei einer Prüfung des Frostwiderstands im Labor müssen also alle Randbedingungen der Prüfung normiert sein. Dies betrifft die prüftechnischen Randbedingungen, wie z.B. Anzahl der Frost-Tauwechsel, maximal und minimal auftretende Temperaturen. Bei der Prüfung von Betonausgangsstoffen über festgelegte Betonzusammensetzungen müssen aber auch die betontechnologischen Randbedingungen, wie Verdichtbarkeit, Konsistenzbereich und Luftgehalt der hergestellten Frischbetone eingehalten werden.

3 Prüfverfahren zum Frostwiderstand

3.1 Prüfverfahren zum Nachweis des Frostwiderstands

Bei der Bestimmung des Frostwiderstands wird zwischen indirekten und direkten Prüfverfahren unterschieden. Bei einem indirekten Prüfverfahren wird aus den Eigenschaften des Betons auf seinen Frostwiderstand geschlossen. Bei den direkten Verfahren hingegen wird der Beton einem Frost-Tau-Zyklus ausgesetzt und die Abwitterungsmenge sowie die Änderung des rel. dyn. E-Moduls bestimmt. Die Abwitterung stellt dabei ein Maß für die äußere Schädigung dar, die Änderung des rel. dyn. E-Moduls steht für die innere Schädigung und wird über eine Ultraschallmessung untersucht.

Im Folgenden werden kurz die im Rahmen dieses Forschungsvorhabens verwendeten Prüfverfahren beschrieben und miteinander verglichen.

3.1.1 Würfelverfahren

Für die Frostprüfung werden zwei Betonwürfel (Kantenlänge = 100 mm) hergestellt. Nach einer eintägigen Lagerung in der Schalung bei 20 °C/ 98 % r.F. werden die Würfel ausgeschalt und verbleiben bis zum Alter von 7 Tagen in der Wasserlagerung (20 °C), anschließend werden sie für 20 Tage im Klima 20 °C/ 65 % r.F. gelagert.

Im Alter von 27 Tagen wird die Masse bestimmt und die Rohdichte berechnet. Danach werden zwei Würfel in einen mit der Prüfflüssigkeit (i.d.R. Wasser oder Tausalzölösung) gefüllten Edelstahlbehälter gestellt, 24 h vorgesättigt und nochmals gewogen. Der Probenbehälter mit den beiden Würfeln wird in einer Frostkammer in Luft bis -15 °C abgekühlt und in 20 °C warmem Wasser aufgetaut. Als Referenzpunkt für die Einhaltung der Temperatur dient die Würfelmitte, der Temperaturverlauf ist in Bild 5 dargestellt.

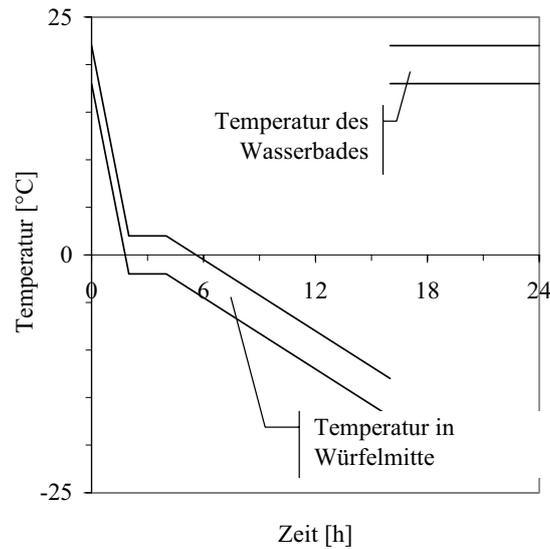


Bild 5: Temperaturbereich während eines FTW (Würfelverfahren)

Üblicherweise wird nach 10, 25, 50, 75 und 100 Wechsellagerungen das Wasser in den Behältern getauscht und die Abwitterungen nach Abbürsten von der geschädigten Betonoberfläche bestimmt. Als Kriterium gelten die Abwitterungen bzw. eine augenscheinliche Begutachtung der Oberfläche. Nach Siebel [34] sind für einen frostbeständigen Beton Abwitterungen von 5 M.-% nach 50 FTW und 10 M.-% nach 100 FTW erlaubt.

3.1.2 CIF-Verfahren

Für den CIF-Test (capillary suction, internal damage and freeze thaw test) werden nach Setzer et al. [35] fünf Probekörper ($h \sim 70$ mm) mit einer Gesamtprüffläche von mindestens 800 cm^2 empfohlen. Die Probekörper werden nach einem Tag ausgeschalt und 6 Tage unter Wasser ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) und danach bis zum 28. Tag im Klima $20 \text{ }^\circ\text{C}/65 \text{ } \%$ r.F. gelagert. 7 bis 2 Tage vor Beendigung der Trockenlagerung werden die Probekörper seitlich abgedichtet (Aluminiumfolie mit Butylklebung oder lösungsmittelfreies Epoxydharz). Nach der Trockenlagerung werden die Probekörper mit der Oberseite als Prüffläche nach unten auf Abstandshalter in Edelstahlbehälter gelegt. Anschließend wird in die Behälter bis 5 mm über der Unterseite der Prüfkörper Prüflösung eingefüllt. Das kapillare Saugen dauert 7 Tage. Danach werden die Behälter mit den Probekörpern und der Prüflösung in eine Frosttruhe gestellt. Als Referenzpunkt für den Temperaturverlauf dient die Kühlflüssigkeit, in der die Behälter mit den Probekörpern stehen. Der Temperaturzyklus ist in Bild 6 dargestellt, ein Zyklus dauert 12 Stunden.

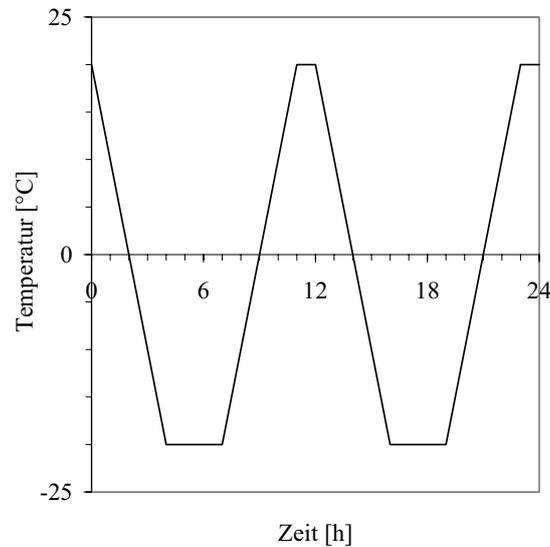


Bild 6: Temperaturverlauf (zulässige Abweichung: $\pm 0,5$ K) eines FTW nach dem CIF- bzw. CDF-Verfahren

Die Beurteilung des Frostwiderstands erfolgt über die abgewitterte Masse und über die Bestimmung der inneren Schädigung (dynamischer E-Modul). Das Ablösen von noch an der Betonoberfläche anhaftender Abwitterung erfolgt hierbei durch ein Ultraschallbad.

Als frostbeständig wird nach [37] ein Beton eingestuft, wenn er nach 56 FTW eine Abwitterung von unter 2000 g/m^2 (CF-Test) bzw. einen maximalen Abfall des dynamischen E-Moduls von 40 % (CIF-Test) aufweist. Nach neueren Untersuchungen ist eine eindeutige Differenzierung zwischen geschädigtem und nicht geschädigtem Beton möglich, wenn der rel. dyn. E-Modul um mehr als 20 % abgefallen ist [36]. Hierbei ist die Anzahl der FTW maßgebend, bei der dieser Abfall eintritt. Diese Erkenntnisse wurden im „Merkblatt Frostprüfung von Beton“ der Bundesanstalt für Wasserbau umgesetzt: sofern nichts anderes vereinbart, gilt ein Beton als geschädigt, wenn der rel. dyn. E-Modul nach 28 Tagen um mehr als 25 % gefallen ist [4].

3.1.3 Zusammenfassender Vergleich der Prüfverfahren

Die beschriebenen Verfahren sind, wie bereits erwähnt, zur Prüfung von Betonen der Expositionsklasse XF3, d.h. Prüfung mit voller Wassersättigung, konzipiert. Grundsätzlich lassen sich die Verfahren hinsichtlich der Probenpräparation, der Art und Weise des simulierten Angriffs und der Schadensaufnahme bzw. Auswertung unterscheiden. Ein genauer Überblick der unterschiedlichen Vorgehensweisen der beiden Verfahren ist gemäß der Darstellung in [37] in nachfolgender Tabelle wiedergegeben:

Tabelle 2: Vergleich der Prüfbedingungen des Frostwiderstands nach dem Würfel- bzw. CIF-Verfahren

Prüfkriterien		Prüfmethode	
		Würfel-Verfahren	CIF-Test
Probenpräparation	Lagerung: Wasser (w), Luft (20 °C/65 % r. F.)	W (6 d) L (21 d) W (1 d)	W (6 d) L (21 d) W (7 d)
	Prüfkörper	Würfel Kantenlänge 100 mm	150 x 110 x 70 mm ³
	Dauer des kapillaren Saugens	1 d	7 d
	Prüfalter (Frostbeginn)	28 d	35 d
Schadensangriff	Prüffläche/Prüflösung	geschalt, in demineralisiertem Wasser voll eingetaucht	geschalt; stehend in demineralisiertem Wasser (15 mm)
	Richtung	allseitig	einseitig
	Temperaturen des Zyklus: T_{\min}/T_{\max}	-15 °C/+20 °C mittig Probe	-20 °C/+20 °C unter Prüfbehälter (therm. Kontakt)
	Dauer des Zyklus / Anzahl FTW	24 h/100 FTW	12 h/28 FTW (bzw. 56 FTW)
Schadensaufnahme	Art	Abwitterungsmenge	
	Grenzwerte	< 5,0 Gew.-% nach 50 Wechseln < 10,0 Gew.-% nach 100 Wechseln	< 1000 g/m ² nach 28 FTW *) < 2000 g/m ² nach 56 FTW **)
	Art	Innere Gefügeschäden	
	Grenzwerte	---	Abfall des dyn. E-Moduls nach 28 FTW max. 25 % *) nach 56 FTW max. 40 % **)

*) Merkblatt „Frostprüfung von Beton“, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Dezember 2004. Eigenverlag; Karlsruhe, Hamburg, Ilmenau 2004.

**) Auberger, R.: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton mit dem CDF- und CIF-Test. Essen : Universität Gesamthochschule. - In: Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften (1999), Nr. 6 = Dissertation, 1998 = In: Beton 50 (2000), Nr. 7, S. 396.

- Unterschiede bei der Probenpräparation

Festzuhalten ist, dass die Prüfflächen der jeweiligen Probekörper unterschiedliche Schalflächen hatten. Während beim CIF-Verfahren eine Teflon-Scheibe als Schalfläche dient, werden die fünf Seiten der Würfelschalung eingeölt. Dies könnte einen Einfluss auf die Wasseraufnahme und die Abwitterungen haben.

- Kapillares Saugen (Vorlagerung)

Die Probekörper nach dem Würfel- bzw. CIF-Verfahren saugen über eine unterschiedlich lange Zeit kapillar Wasser (1 d bzw. 7 d), bevor die Frost-Tau-Wechsel beginnen. Dies führt evtl. zu unterschiedlich hohen aufgenommenen Wassermengen. Ob dies einen Einfluss auf die Frostschädigung hat, ist ungeklärt.

- Minimaltemperatur

Die Minimaltemperatur der beiden Prüfverfahren unterscheidet sich um 5 °C. Zu berücksichtigen sind hierbei natürlich die unterschiedlichen Anordnungen der Referenzpunkte für die jeweiligen Temperaturverläufe. Beim CIF-Verfahren ist dieser die Kühlflüssigkeit, in der die Behälter stehen. Kasperek und Setzer stellten beim CIF-Verfahren sowohl beim Kühlen als auch beim Erwärmen einen nahezu linearen Temperaturverlauf über die Höhe des Probekörpers (75 mm) fest [38]. Ein Zentimeter über Unterkante Probekörper stellte sich während des Frostzyklus eine Temperatur von -19 °C ein, in Probekörpermitte lag die Temperatur bei ca. -18,3 °C. Für die Randzone würde sich nach linearer Interpolation eine Temperatur von 19,3 °C ergeben. Beim Würfelverfahren dient als Referenzpunkt für den Temperaturverlauf die Würfelmitte. Hier sollen während der Frostzeit -15 °C erreicht werden. Eigene Untersuchungen ergaben, dass die Temperatur des Wasserbades nicht weit unter -15 °C sinken muss, um dies zu erreichen. Die Temperaturen der Randzonen der Probekörper beim Würfel- und beim CIF-Verfahren unterscheiden sich also um ca. 4 °C. Dies hat zur Folge, dass beim CIF-Verfahren im Vergleich zum Würfelverfahren Wasser in kleineren Kapillarporen gefriert. Untersuchungen mit dem CDF-Verfahren [39] zeigten, dass die Abwitterungsmenge im Mittel um 10% je ein Kelvin Temperaturanstieg abnahm. Rein theoretisch müssten sich demnach – auch wenn die vorliegenden Untersuchungen mit demineralisiertem Wasser und nicht mit NaCl-Lösung durchgeführt werden – beim Würfelverfahren geringe Abwitterungsmengen ergeben, als beim CIF-Verfahren.

- Geschwindigkeit des Temperaturabfalls

Die Geschwindigkeit, mit der bei den beiden Verfahren die Minimaltemperatur erreicht wird, unterscheidet sich extrem. Identisch ist zwar der angestrebte Abfall von +20 °C auf 0 °C innerhalb von zwei Stunden, die weitere Abkühlung erfolgt aber beim Würfelverfahren wesentlich langsamer und über einen längeren Zeitraum als beim CIF-Verfahren. Der thermodynamische Vorgang der Wassersättigung unter Frostbelastung ist beim CIF-Verfahren aufgrund dieser schnelleren Abkühlung im Vergleich zum Würfelverfahren stärker vorhanden. Es ist also wahrscheinlich, dass eine Mikroeislinnenbildung beim CIF-Verfahren stärker vorhanden sein wird als beim Würfelverfahren. Das bedeutet aber auch, dass die Schädigungswirkung eines einzelnen Frost-Tau-Wechsel bei den beiden Prüfverfahren unterschiedlich ist.

4 Untersuchungen

4.1 Übersicht

Das Untersuchungsprogramm gliedert sich in zwei Teile: im ersten Teil werden Standardbetone untersucht, deren Zusammensetzungen einerseits an den Prüfplan des DIBt und andererseits an die Zusammensetzung nach der derzeit gültigen Norm DIN 1045-2:2001-07 [12] für die Expositionsklasse XF3 angelehnt sind. Im zweiten Teil werden insgesamt vier Sonderbetone untersucht, darunter sind zwei selbstverdichtende Betone, ein Massenbeton und ein Vergussmörtel.

Es sollte untersucht werden, ob bei Standardbetonen, hergestellt nach den entsprechenden Prüfplänen des DIBt, der Frostwiderstand geprüft nach dem Würfelverfahren mit den Ergebnissen des CIF-Verfahrens korreliert, wenn die Betonzusammensetzung der Probekörper, die mit dem CIF-Verfahren geprüft werden, den Anforderungen an die Zusammensetzung der derzeit gültigen Norm entspricht. Da von jedem Beton sowohl Probekörper nach dem CIF-Verfahren als auch nach dem Würfelverfahren geprüft wurden, kann gleichzeitig untersucht werden, ob eine Korrelation zwischen diesen beiden Prüfverfahren besteht, wenn die Betonzusammensetzung der Prüfkörper identisch ist. Darüber hinaus kann eine Korrelation zwischen den Ergebnissen von Betonen mit 300 bzw. 320 kg/m³ Zement, die beide nach dem Würfelverfahren geprüft wurden sowie zwischen den Ergebnissen, die nach dem CIF-Verfahren geprüft wurden, gesucht werden.

Eine Systemskizze der Versuchsmatrix und der möglichen Korrelationen ist in Bild 7 dargestellt. Die wichtigste zu untersuchende Korrelation ist die diagonal, fett gedruckte. Hauptaugenmerk der Untersuchungen ist also zu klären, ob bestehende Ergebnisse von Frostuntersuchungen nach dem Würfelverfahren mit Ergebnissen aus dem CIF-Verfahren korrelieren.

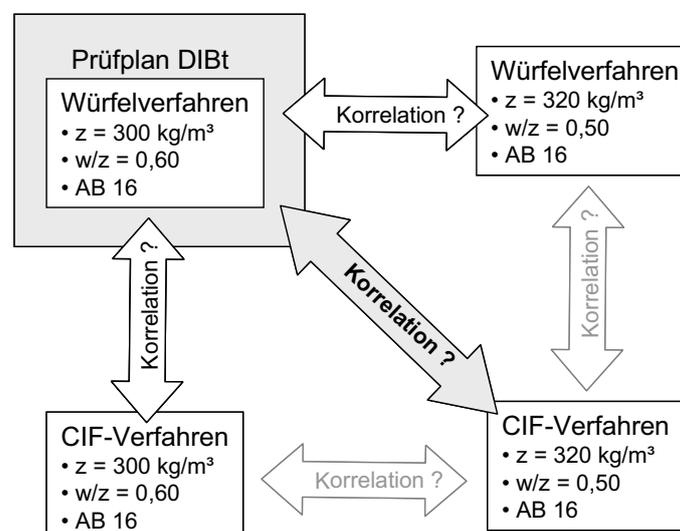


Bild 7: Systemskizze der Versuchsmatrix (Standardbetone nach Prüfplänen)

4.2 Zusammensetzung der Betone

4.2.1 Zusammensetzung der Standardbetone

Beim Nachweis des Frostwiderstands im Rahmen von Zulassungsverfahren für Bindemittel wird die zu prüfende Betonrezeptur durch das DIBt vorgegeben. In den derzeit gültigen Prüfplänen wird der Nachweis des Frostwiderstands an einem Beton mit einem Wasserzementwert von 0,60 geführt. Der Zementgehalt liegt bei 300 kg/m^3 . Im Rahmen von Zulassungsverfahren für Steinkohlenflugaschen (SFA) hat die zu prüfende Betonrezeptur einen Zementgehalt von 270 kg/m^3 und einen SFA-Gehalt von 60 kg/m^3 ($w/(z+0,4 \cdot f) = 0,60$).

Zunächst wurden deshalb vier Betone mit unterschiedlichen Zementen sowie ein Beton mit einer Steinkohlenflugasche gemäß den entsprechenden Prüfplänen hergestellt (w/z-Wert: 0,60). Die Betone hatten demnach einen Zementgehalt von 300 kg/m^3 (vgl. Tabelle 1) bzw. der Beton, der zusätzlich Steinkohlenflugasche enthielt, einen Zementgehalt von 270 kg/m^3 und einen SFA-Gehalt von 60 kg/m^3 .

In Bezug auf den Frostwiderstand stellt der Wasserzementwert eine entscheidende Kenngröße der Mischungszusammensetzung dar. Deswegen und aufgrund der aktuellen Normung wurden Betone mit den gleichen Zementen, aber mit einem w/z-Wert von 0,50 hergestellt. Der Zementgehalt wurde entsprechend DIN 1045-2:2001-07 [12] mit 320 kg/m^3 gewählt.

Bei Betonen mit SFA kann nach der Norm der Mindestzementgehalt bei 270 kg/m^3 und der anrechenbare 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 [12] richtet.

Für die Bezeichnung der Betonprobekörper wurde folgendes Schema gewählt:

Zementgehalt und –art / Gehalt an SFA / w/z_{eq}
(SFA = Steinkohlenflugasche)

Eine Bezeichnung lautet z.B.:

300 CEM I 32,5 R/0,60 bzw. 270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60

Die einzelnen Betonzusammensetzungen dieser Versuchsreihe sind in Tabelle 1 zusammengefasst. Um den Luftporengehalt im Frischbeton zu senken, wurde einigen Betonen ein handelsüblicher Betonverflüssiger zugegeben. Dies wurde bei der Bezeichnung der Betone mit dem Kürzel „BV“ an letzter Stelle gekennzeichnet. Dieses Ziel verfolgte auch der Beton mit 360 kg/m^3 CEM I 32,5 R (vgl. Tabelle 3, 5. Zeile), dem kein Betonverflüssiger zugegeben wurde. Zusätzlich wurden ausgewählte Betone nochmals mit Betonverflüssiger hergestellt, um einen direkten Vergleich der Wirkung niedrigerer Luftporengehalte im Frisch- und Festbeton auf die Abwitterungsmenge zu erhalten. Es sind dies die Betone „300 CEM I 32,5 R/0,60/BV“, „320 CEM I 32,5 R/0,50/BV“ und „320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50/BV“.

Tabelle 3: Betonrezepturen der Standardbetone

Beton	w/z _{eq} -Wert [-] ¹⁾	Zement-gehalt [kg/m ³]	SFA-Gehalt [kg/m ³]	Wasser-gehalt [kg/m ³]	Leim-gehalt ²⁾ [dm ³ /m ³]
300 CEM I 32,5 R/0,60	0,60	300,0	--	180,0	291,87
320 CEM I 32,5 R/0,50	0,50	320,0	--	160,0	278,2
300 CEM I 32,5 R/0,60/BV	0,60	300,0	--	180,0	291,8
320 CEM I 32,5 R/0,50/BV	0,50	320,0	--	160,0	278,2
360 CEM I 32,5 R/0,50	0,5	360,0	--	180,0	311,1
300 CEM II/A-LL 32,5 R/0,60/BV	0,60	300,0	--	180,0	293,4
320 CEM II/A-LL 32,5 R/0,50/BV	0,50	320,0	--	160,0	279,9
300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	0,60	300,0	--	180,0	293,4
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50	0,50	320,0	--	160,0	279,9
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50/BV	0,50	320,0	--	160,0	279,9
300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV	0,60	300,0	--	180,0	293,4
320 CEM III/B 32,5 N/0,50/BV	0,50	320,0	--	160,0	279,9
270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60	0,60	270,0	60,0	176,4	304,6
270 CEM I 32,5 R/ 89 SFA /0,50	0,50	270,0	89,1	152,8	293,7

¹⁾ $w/z_{eq} = w/(z+0,4 \cdot f)$
²⁾ Als Leimgehalt wird das Volumen von „Wasser + Zement + SFA + Luft (=15 dm³)“ in dm³/m³ verstanden.

Um Einflüsse durch unterschiedliche Frischbetoneigenschaften auf die Versuchsergebnisse zu vermeiden, wurde das Größtkorn der Betone für alle Probekörper vereinheitlicht. Es betrug wegen der kleineren Abmessungen der CIF-Probekörper 16 mm. Bei den Betonen wurde also auf die im Prüfplan des DIBt für das Würfelverfahren geforderte Sieblinie AB 32 verzichtet und eine Sieblinie AB 16 verwendet. Bei allen Standardbetonen (Tabelle 3) und dem MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55 (vgl. nächstes Kapitel) wurde die Gesteinskörnung gemäß der in Bild 8 dargestellten Sieblinie zusammengesetzt. Das Überkorn der Lieferkörnung 8-16 mm wurde abgesiebt, so dass das Größtkorn exakt 16 mm betrug. Bei der Gesteinskörnung handelte es sich um Moränekies aus dem Münchner Raum.

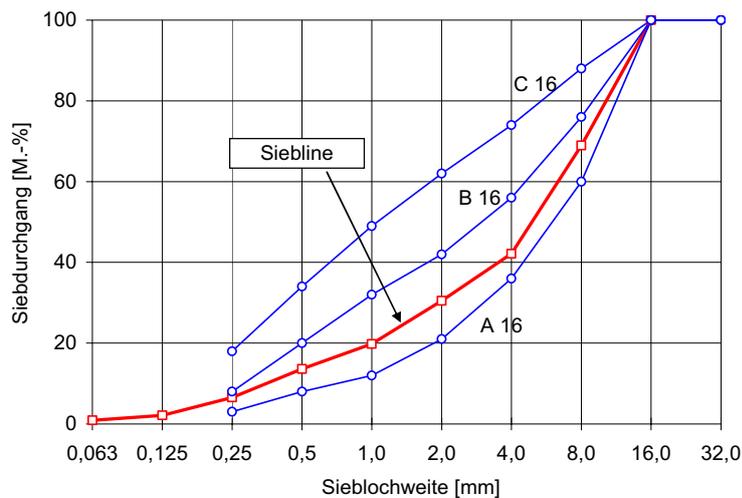


Bild 8: Zusammensetzung (Sieblinie) der Gesteinskörnung für alle Standardbetonen und für den MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55

Bei den Untersuchungen wurden ein handelsüblicher Portlandzement (CEM I 32,5 R), ein Portlandkalksteinzement (CEM II/A-LL 32,5 R), ein Portlandkompositzement (CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R) und ein Hochofenzement (CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA) verwendet. Die Zemente entsprechen den Anforderungen der DIN EN 197-1:2001-02 [40]. Der Portlandzement, der Portlandkalksteinzement und der Hochofenzement dürfen für die Expositions-klasse XF3 gemäß DIN 1045-2:2001-07 und DIN EN 206-1:2001-07 [12, 41] verwendet werden. Der Portlandkompositzement ist ein für diese Expositions-klasse bauaufsichtlich zugelassener Zement. Die Ergebnisse der werkseigenen Produktionskontrolle der Zemente CEM I 32,5 R, CEM II/A-LL 32,5 R und CEM III/B sind im Anhang in Tabelle A 1 dargestellt.

Die verwendete Steinkohlenflugasche (Trockenkammerfeuerung) entspricht den Anforderungen der DIN EN 450:1995-01 [42], ihre materialspezifischen Eigenschaften sind im Anhang in Tabelle A 2 dargestellt.

Als Betonverflüssiger wurden bei den Standardbetonen zwei Zusatzmittel auf Basis von Polycarboxylatether verwendet.

4.2.2 Zusammensetzung der Sonderbetone

Beim Nachweis des Frostwiderstands von Sonderbetonen ist der Wassorzementwert 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.

Im Rahmen der Überprüfung eines Zusammenhangs zwischen der herkömmlichen Frostprüfung mit dem Würfelverfahren und dem CIF-Verfahren wurden insgesamt vier

unterschiedliche Sonderbetone geprüft, zwei selbstverdichtende Betone (SVB), ein Massenbeton sowie ein Vergussmörtel (vgl. Tabelle 4).

Ein selbstverdichtender Beton wurde mit 300 kg/m^3 CEM II/B-S 32,5 R und 220 kg/m^3 Steinkohlenflugasche hergestellt, zusammen mit dem Mehlkorn aus der Gesteinskörnung lag der Mehlkorngehalt bei 527 kg/m^3 . Der Mehlkorngehalt des zweiten selbstverdichtenden Betons lag mit 634 kg/m^3 an der oberen Grenze gemäß der Richtlinie für selbstverdichtenden Beton [43], sein Zementgehalt betrug 335 kg/m^3 , als Betonzusatzstoff wurden 293 kg/m^3 Kalksteinmehl verwendet (vgl. Tabelle 4). Beide selbstverdichtenden Betone wurden ebenfalls mit dem Kies 4/8 mm und 8/16 mm aus dem Münchner Raum, aber mit einem anderen Sand, der sich für SVB bewährt hat, hergestellt.

Der Massenbeton wurde mit einem Hochofenzement (CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA; vgl. Tabelle 4) hergestellt. Es wurden der Kies und Sand aus dem Münchner Raum verwendet (vgl. Kap. 4.2.1).

Als letzter Sonderbeton wurde ein Vergussmörtel mit einem Größtkorn von 5 mm hergestellt, dessen Mörtel einen Wasserfeststoffwert w/f von 0,1125 hatte.

Die Zusammensetzung der einzelnen Sonderbetone sind Tabelle 4 zu entnehmen, die jeweiligen Rezepturen sind im Anhang dargestellt. Die Sonderbetone werden in diesem Bericht nach dem bereits genannten Schema folgendermaßen bezeichnet:

SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48

SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51

MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55

Vergussmörtel w/f = 0,1125

Darin bedeuten:

SVB = selbstverdichtender Beton

SFA = Steinkohlenflugasche

KSM = Kalksteinmehl

w/f = Wasser-Feststoffwert

Tabelle 4: Betonrezepturen der Sonderbetone

Beton	CEM II/B-S 32,5 R [kg/m ³]	SFA [kg/m ³]	Wasser [kg/m ³]	w/(z) _{eq} [-]	BV/ST [M.-% v.Z.]	Sieblinie [-]
SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48	300,0	220,0	165,0	0,486	2,0/0,13	AB 16

$$w/z_{eq} = w/(z+0,4 \cdot f) \text{ mit } f_{max} = 0,33 \cdot z$$

Beton	CEM I 32,5 R [kg/m ³]	KSM [kg/m ³]	Wasser [kg/m ³]	w/(z) [-]	BV/ST [M.-% v.Z.]	Sieblinie [-]
SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51	335,0	293,0	172,0	0,513	2,0/0,5	AB 16

Beton	CEM III / B 32,5 N- LH/HS/NA [kg/m ³]	SFA [kg/m ³]	Wasser [kg/m ³]	w/(z) _{eq} [-]	BV [M.-% v.Z.]	Sieblinie [-]
MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55	240,0	120,0	149,4	0,550	0,76	AB 16

$$w/z_{eq} = w/(z+0,4 \cdot f) \text{ mit } f_{max} = 0,33 \cdot z$$

Beton	
Vergussmörtel/ w/f = 0,1125	Verwendung eines zugelassenen Vergussmörtels aus der Praxis

4.3 Herstellung der Betone

4.3.1 Mischregime der Standardbetone

Die Temperaturen des Prüfraumes, der Geräte, des Lagerraums und der Ausgangsstoffe betragen während der Betonherstellung zwischen 18 und 22 °C. Das Mischen erfolgte in einem 100-Liter-Zwangsmischer. Die Reihenfolge der Zugabe der Ausgangsstoffe und die Mischdauer der Betone ohne Betonverflüssiger sind in Tabelle 5 angegeben, die der Betone mit Betonverflüssiger sind Tabelle 6 zu entnehmen.

Tabelle 5: Mischregime der Standardbetone ohne Betonverflüssiger

Vorgang	Dauer
	[s]
Einfüllen von Gesteinskörnung, Zement und evtl. SFA	-
Trocken mischen	30
Wasserzugabe (innerhalb 30 s) Mischen	120
Σ Nassmischzeit ab Wasserzugabe	120

Tabelle 6: Mischregime der Standardbetone mit Betonverflüssiger

Vorgang	Dauer
	[s]
Einfüllen von Gesteinskörnung, Zement und evtl. SFA	-
Trocken mischen	30
Wasserzugabe (innerhalb 30 s) Zugabe BV nach 20 s innerhalb 10 s Mischen	120
Falls Nachdosierung des BV erforderlich Mischen	60
Σ Nassmischzeit ab Wasserzugabe	120 bzw. 180

4.3.2 Mischregime der Sonderbetone

SVB

Die Temperaturen des Prüfraumes, der Geräte, des Lagerraums und der Ausgangsstoffe betragen während der Betonherstellung ebenfalls zwischen 18 und 22 °C. Das Mischen erfolgte in einem 100-Liter-Zwangsmischer. Die Reihenfolge der Zugabe der Ausgangsstoffe der beiden selbstverdichtenden Betone und die Mischdauer sind in Tabelle 7 angegeben.

Tabelle 7: Mischregime der SVB

Vorgang	Dauer
	[s]
Einfüllen von Gesteinskörnung, Zement, Füller und Stabilisierer	-
Trocken mischen	30
Wasserzugabe (innerhalb 30 sec) Mischen	120
Zugabe Betonverflüssiger (innerhalb 10 sec) Mischen	240
Σ Nassmischzeit ab Wasserzugabe	360

Massenbeton

Die Temperaturen des Prüfraumes, der Geräte, des Lagerraums und der Ausgangsstoffe betragen während der Betonherstellung ebenfalls zwischen 18 und 22 °C. Das Mischen erfolgte in einem 100-Liter-Zwangsmischer. Das Mischregime für den Massenbeton ist in Tabelle 8 dargestellt:

Tabelle 8: Mischregime für den Massenbeton

Vorgang	Dauer
	[s]
Einfüllen von Gesteinskörnung, Zement und SFA	-
Trocken mischen	30
Wasserzugabe (innerhalb 30 sec) Mischen	120
Zugabe Betonverflüssiger (innerhalb 10 sec) Mischen	120
Σ Nassmischzeit ab Wasserzugabe	240

Vergussmörtel

Die Temperaturen des Prüfraumes, der Geräte, des Lagerraums und der Ausgangsstoffe betragen während der Betonherstellung zwischen 18 und 22 °C. Das Mischen erfolgte in dem 100-Liter-Zwangsmischer. Der Vergussmörtel wurde im cbm mit zwei Mitarbeitern der Produktionsfirma entsprechend den Herstellerangaben gemischt. Das Mischregime des Vergussmörtels ist in Tabelle 9 dargestellt:

Tabelle 9: Mischregime für den Vergussmörtel

Vorgang	Dauer [s]
Einfüllen von Wasser	-
Einfüllen des Materials (Sackware)	--
Mischen	360
Einstellung der gewünschten Konsistenz über Nachdosierung von Material bzw. Wasser (vom Hersteller des Vergussmörtels vorgenommen)	--
Zusätzliches Mischen (insg.)	240
Σ Nassmischzeit ab Wasserzugabe (gesamt)	600

4.3.3 Untersuchungen am Frischbeton

Nach Beendigung des Mischvorganges wurden die Frischbetonkennwerte zu den in Tabelle 10 aufgeführten Zeitpunkten bestimmt. Bei den Standardbetonen und beim Sonderbeton „MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55“ wurde die Verarbeitbarkeit in Abhängigkeit der Konsistenz entweder mit dem Verdichtungsmaß oder mit dem Ausbreitmaß bewertet und in die im DIN-Fachbericht 100 [44] aufgeführten C- bzw. F-Klassen eingeteilt. Bei den beiden selbstverdichtenden Betonen wurde das Setzfließmaß mit Blockierring und der V- Trichter Versuch zur Bestimmung der Fließeigenschaften durchgeführt. Der Vergussmörtel wurde über das Ausfließmaß gemäß der Vergussbeton-Richtlinie [45] charakterisiert.

Der Luftgehalt wurde bei allen Betonen nach dem Druckausgleichsverfahren in einem 8-Liter-Luftporentopf ermittelt. Hierzu wurden die Standardbetone sowie der Massenbeton so lange verdichtet, bis keine großen Luftbläschen mehr an der Oberfläche auftraten. Die selbstverdichtenden Betone und der Vergussmörtel wurden über eine Fließrinne in den LP-Topf gefüllt und nicht verdichtet. Vor der Bestimmung der Luftporengehalte wurden die Rohdichten aller Betone bestimmt.

Tabelle 10: Zeiten der Bestimmung der Frischbetonkennwerte und Normenverweise

Kennwert	Zeit nach Wasserzugabe	Normenverweis
[-]	[min]	[-]
Temperatur	3	-
Konsistenz (Verdichtungsmaß)	5	DIN EN 12350-4:2000-06 [46]
Konsistenz (Ausbreitmaß)	5	DIN EN 12350-5:2000-06 [47]
Rohdichte	10	DIN EN 12350-6:2000-03 [48]
Luftporengehalt	10	DIN EN 12350-7:2000-11 [49]
Setzfließmaß	5	SVB Richtlinie [50]
V-Trichter	5	SVB Richtlinie [50]

4.3.4 Herstellung und Lagerung der Probekörper

Die Probekörper der Standardbetone und des Massenbetons wurden gemäß DIN EN 12390-2:2001-06 [51] hergestellt. Alle Probekörper wurden in zwei Lagen befüllt, die Rüttelzeit auf dem Laborrütteltisch der jeweiligen Lage betrug 30 Sekunden, so dass zum Ende der Verdichtung keine größeren Luftbläschen mehr aufstiegen. Die Probekörper der selbstverdichtenden Betone und des Vergussmörtels wurden über eine Fließrinne befüllt, damit der Beton ausreichend Zeit zur Entlüftung hatte.

Alle Probekörper wurden bis zum Ausschalen 24 Stunden im Klimaschrank bei 20 °C/98 % r. F. gelagert. Anschließend wurden sie je nach vorgesehener Prüfung gelagert (vgl. Tabelle 11).

Tabelle 11: Lagerungsarten der Probekörper

Probekörper	Lagerung
28-Tage-Druckfestigkeit	1 d in 20 ± 2 °C/ 98 ± 2 % r.F. 6 d in Wasser (20 ± 2 °C) 21 d in 20 ± 2 °C/ 65 ± 2 % r.F.
Frost-Widerstand (CIF-Prüfung) bzw. nach dem Merkblatt der BAfW	1 d in 20 ± 2 °C/ 98 ± 2 % r.F. 6 d in Wasser (20 ± 2 °C) 21 d in 20 ± 2 °C/ 65 ± 2 % r.F.
Würfelverfahren	1 d in 20 ± 2 °C/ 98 ± 2 % r.F. 6 d in Wasser (20 ± 2 °C) bis zur Prüfung in 20 ± 2 °C/ 65 ± 2 % r.F.

Um den positiven Einfluss der Nachbehandlung auszunutzen, wurde bei den Probekörpern des Massenbetons die Wasserlagerung nach Herstellung auf 14 Tage ausgeweitet. Anschließend wurden die Probekörper 42 ± 1 Tage im Klima 20°C/65% r.F. gelagert. Die

Probekörper des Massenbetons, die mit dem Würfelverfahren geprüft werden, wurden im Alter von 55 Tagen unter Wasser gelegt, die Frost-Tau-Wechsel begannen in einem Alter von 56 Tagen. Bei dem CIF-Verfahren wurde in einem Alter von 56 Tagen mit der sieben Tage andauernden Vorsättigung durch kapillares Saugen begonnen (gem. der Empfehlung des Merkblattes „Frostprüfung von Beton“ der Bundesanstalt für Wasserbau [4]), danach begannen die Frost-Tau-Wechsel.

4.4 Untersuchungen am Festbeton

4.4.1 Druckfestigkeit

Die Ermittlung der Rohdichte und Druckfestigkeit erfolgte nach DIN EN 12390-3:2002-04 [52] an Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm.

Für die Bestimmung der charakteristischen Druckfestigkeit ($f_{c, \text{cube}}$) wurde der 28 Tage-Wert der Druckfestigkeit verwendet. Hierbei darf die Druckfestigkeit bei Lagerung nach dem Referenzverfahren der DIN EN 12390-2:2001-06 [51] ($f_{c, \text{cube}}$) aus der Druckfestigkeit bei Lagerung nach DIN EN 12390-2:2001-06, Anhang NA ($f_{c, \text{dry}}$) gemäß DIN 1045-2:2001-07, Abschnitt 5.5.1.2 [12] nach folgender Beziehung berechnet werden:

Normalbeton bis einschließlich C 50/60:

$$f_{c, \text{cube}} = 0,92 \cdot f_{c, \text{dry}}$$

hochfester Normalbeton ab C 55/67:

$$f_{c, \text{cube}} = 0,95 \cdot f_{c, \text{dry}}$$

Nach dem DIN-Fachbericht 100 [44] muss bei der Erstprüfung von Beton die mittlere Druckfestigkeit bei normalfesten Betonen 4 N/mm^2 über der charakteristischen Druckfestigkeit liegen, während jeder Einzelwert um bis zu 4 N/mm^2 unter der charakteristischen Druckfestigkeit liegen darf. Die Druckfestigkeit eines im Labor hergestellten muss die Werte von f_{ck} um ein gewisses Vorhaltemaß überschreiten. Das Vorhaltemaß sollte ungefähr das Doppelte der erwarteten Standardabweichung sein, das heißt zwischen 6 N/mm^2 und 12 N/mm^2 liegen. Zur Einteilung der Betone in Festigkeitsklassen wurde ein Vorhaltemaß von 8 N/mm^2 verwendet:

Das Kriterium für die Annahme der Erstprüfungen für Standardbeton lautet:

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \text{ N/mm}^2$$

Damit ergeben sich die in [Tabelle 12](#) dargestellten Anforderungen in Abhängigkeit der Festigkeitsklasse.

Tabelle 12: Anforderungen an die Druckfestigkeit ausgewählter Festigkeitsklassen

Festigkeitsklasse	$f_{ck,cube}$	$f_{cm,cube} = f_{ck,cube} + 8$
[-]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
C 16/20	20	28
C 20/25	25	33
C 25/30	30	38
C 30/37	37	45
C 35/45	45	53

4.4.2 Frostwiderstand nach dem Würfel-Verfahren

Um den Frostwiderstand nach dem Würfelverfahren zu bestimmen, wurden je zwei Würfel (Kantenlänge: 100 mm) einer zyklischen Befrostung und Auftauphase ausgesetzt. Zuvor wurde die Wasseraufnahme über 24 Stunden ab dem Alter von 27 Tagen bestimmt. Der Frost-Tau-Zyklus entsprach den Anforderungen der DIN CEN/TS 12390-9:2006-08 [2]. Als Belastungsdauer wurden gemäß Heft 422 [1] 100 Frost-Tau-Wechsel gewählt. Die Abwitterungen der einzelnen Würfelpaare wurden nach 10, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 70, 75, 80, 90 und 100 Frost-Tau-Wechseln bestimmt. Als Prüflüssigkeit wurde demineralisiertes Wasser verwendet.

Zusätzlich wurde die Ultraschalllaufzeit über je zwei gegenüberliegende Seitenflächen der Würfel bestimmt. Aus der Änderung der Ultraschallgeschwindigkeit kann auf eine Schädigung des Würfels geschlossen werden. Da die Ultraschalllaufzeit aber durch zwei geschädigte Randzonen läuft, kann bei einem Abfall der Laufzeit nicht unmittelbar auf eine innere Gefügeschädigung geschlossen werden, weil es durchaus möglich ist, dass nur die Randzone geschädigt ist.

Beim Würfelverfahren wird üblicherweise nur die Wasseraufnahme der Würfel bei der 24-stündigen Wasserlagerung vor Beginn der Frostprüfung in M.-% auf 0,1 gerundet angegeben. Um die Porensituation, also die Wassermenge im vorhandenen Porensystem, der Probekörper, die im Würfelverfahren geprüft werden, mit der Porensituation der Probekörper aus dem CIF-Verfahren vergleichen zu können, wurde die Wasseraufnahme zusätzlich über den ganzen Prüfzeitraum berechnet. Die Wasseraufnahme wurde gravimetrisch als Differenz der Probekörpermasse nach einer festgelegten Anzahl von Frost-Tau-Wechseln und der Ausgangsmasse im Alter von 28 Tagen (nach dem kapillaren Saugen) unter Berücksichtigung der Abwitterungen bestimmt. Sie wird angegeben als Wasseraufnahme in M.-% (vgl. Gleichung 1).

$$M. - \% = \frac{M_{nFTW} - M_{nass} + \sum MAbw_{nFTW}}{M_{nass} - \sum MAbw_{nFTW}} \cdot 100 \text{ [M.-\%]} \text{ [Gleichung 1]}$$

mit

- M_{nFTW} = Masse der Probekörper nach n FTW
 M_{nass} = Masse der Probekörper im Alter von 28 Tagen nach 1-tägiger
 Wasserlagerung (vor Frost)
 $\sum MAbw_{nFTW}$ = Summe der Abwitterungen über n FTW

4.4.3 Frostwiderstand nach dem CIF-Verfahren

Der Frostwiderstand nach dem CIF-Verfahren wurde gemäß DIN CEN/TS 12390-9:2006-08 [2] ermittelt. Hierzu wurden aus den nach Kapitel 4.3.4 hergestellten und gelagerten Probekörpern Platten mit den Abmessungen 150 x 110 x 70 mm³ gesägt und die Seitenflächen mit einer aluminiumkaschierten Butylkautschukfolie beklebt.

Die Probekörper saugten ab einem Alter von 28 Tagen für sieben Tage über die geschalte Stirnseite kapillar Wasser. Anschließend wurden die Probekörper 56 Frost-Tau-Wechseln ausgesetzt. Vor und während der Frostbeanspruchung wurden die feuchte Masse der Probekörper, die getrocknete Abwitterung und die Ultraschalllaufzeit bestimmt. Aus der Änderung der Ultraschalllaufzeit wurde der rel. dyn. E-Modul berechnet und aus diesem auf die innere Schädigung geschlossen. Als Prüflüssigkeit wurde demineralisiertes Wasser verwendet.

Neben der inneren Gefügeschädigung wurden auch die Abwitterungen bestimmt und auf die Prüffläche bezogen in g/m² angegeben. Zusätzlich stellt die Wasseraufnahme vor und während der Frostprüfung eine Information über die Porensituation dar. Die Wasseraufnahme wurde wie beim Würfelverfahren gravimetrisch bestimmt.

5 Ergebnisse

5.1 Frischbetonkennwerte

In Tabelle 13 und Tabelle 14 sind die Frischbetonkenndaten der Standard- und Sonderbetone zusammengestellt.

Tabelle 13: Frischbetonkenndaten der Standardbetone

Beton	T [°C]	ρ_{FB} [kg/m ³]	LP [Vol.-%]	v [-]	a [mm]
300 CEM I 32,5 R/0,60	20,0	2390	2,2	1,09	--
320 CEM I 32,5 R/0,50	19,7	2410	2,7	1,30	--
300 CEM I 32,5 R/0,60/BV	18,5	2420	1,2	--	430
320 CEM I 32,5 R/0,50/BV	19,0	2440	1,2	--	400
360 CEM I 32,5 R/0,50	19,0	2430	1,0	1,17	350
300 CEM II/A-LL 32,5 R/0,60/BV	20,2	2400	1,5	--	395
320 CEM II/A-LL 32,5 R/0,50/BV	19,6	2440	1,2	1,02	450
300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	19,8	2360	2,7	--	395
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50	20,2	2410	2,9	1,29	--
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50/BV	20,6	2430	1,7	--	400
300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV	18,9	2390	1,3	--	450
320 CEM III/B 32,5 N/0,50/BV	20,4	2420	1,6	--	390
270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60	19,5	2430	1,0	1,14	--
270 CEM I 32,5 R/ 89 SFA /0,50	20,2	2410	2,3	1,40	--

Tabelle 14: Frischbetonkenndaten der Sonderbetone

Beton	T [°C]	ρ_{FB} [kg/m ³]	LP [Vol.-%]	SF*) [mm]	V- Trichter [s]
SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48	20,3	2350	1,3	710	14
SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51	19,1	2410	1,8	690	15
Vergussmörtel/w/f= 0,1125	24,4	2290	1,4	740	--

*) Setzfließmaß
mit Blockierring

Beton	T [°C]	ρ_{FB} [kg/m ³]	LP [Vol.-%]	v [-]	a [mm]
MB/240 CEM III/B/120 SFA/0,55/BV	21,1	2410	2,0	--	450

In Tabelle 15 ist der Konsistenzbereich der einzelnen Betone dargestellt.

Tabelle 15: Konsistenzbereiche aller hergestellten Betone

Beton	Konsistenzbereich	
300 CEM I 32,5 R/0,60	C 3	--
320 CEM I 32,5 R/0,50	C 1	
300 CEM I 32,5 R/0,60/BV		F 3
320 CEM I 32,5 R/0,50/BV		F 2
360 CEM I 32,5 R/0,50	C 2	F 2
300 CEM II/A-LL 32,5 R/0,60/BV		F 2
320 CEM II/A-LL 32,5 R/0,50/BV	C 3	F 3
300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	--	F 2
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50	C 1	--
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50/BV	--	F 2
300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV		F 3
320 CEM III/B 32,5 N/0,50/BV		F 2
270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60	C 2	
270 CEM I 32,5 R/ 89 SFA /0,50	C 1	
SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48		> F 6
SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51		> F 6
MB/240 CEM III/B/120 SFA/0,55/BV	--	F 3
Vergussmörtel/w/f = 0,1125		> F 6

5.2 Druckfestigkeit

Die Druckfestigkeiten der Betone wurden an laborgelagerten Probekörpern ermittelt. Die gemittelten Werte der 28-Tage-Druckfestigkeiten und die Einteilung der Betone in Festigkeitsklassen sind Tabelle 16 zu entnehmen. Die Einzelwerte der Festigkeiten nach 7, 28, 56 und 90 Tagen sind im Anhang in den Tabellen 5 bis 8 zusammengefasst sowie von Bild 9 bis Bild 14 dargestellt.

Für die Expositionsklasse XF3 sieht die derzeit gültige Norm DIN 1045-2:2001-07 [12] eine Mindestdruckfestigkeitsklasse von C 35/45 vor (bei w/z-Wert 0,5 und $z_{\min} = 320 \text{ kg/m}^3$). Dieses Kriterium wurde von den Betonen „320 CEM I 32,5 R/0,50/BV“ und „320 CEM II/A-LL 32,5 R/0,50“ erfüllt. Die Betone „320 CEM III/B 32,5 N/0,50/BV“ und „270 CEM I 32,5 R/ 89 SFA /0,50“ verfehlten die erforderliche Festigkeit für das Annahmekriterium der Festigkeitsklasse C 35/45 nur sehr knapp.

Tabelle 16: Druckfestigkeit der Betone nach 28 Tagen

Beton	$f_{c,cube}$ nach 28 Tagen [N/mm ²]	Einteilung in eine Festigkeitsklasse (Vorhaltemaß: 8 N/mm ²)
300 CEM I 32,5 R/0,60	35	C 20/25
320 CEM I 32,5 R/0,50	43	C 25/30
300 CEM I 32,5 R/0,60/BV	43	C 25/30
320 CEM I 32,5 R/0,50/BV	53	C 35/45
360 CEM I 32,5 R/0,50	49	C 30/37
300 CEM II/A-LL 32,5 R/0,60	39	C 25/30
320 CEM II/A-LL 32,5 R/0,50	53	C 35/45
300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	33	C 20/25
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50	42 *) nach 56 d: 49	C 25/30
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50/BV	52	C 30/37
300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV	34	C 20/25
320 CEM III/B 32,5 N/0,50/BV	46	C 30/37
270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60	41	C 25/30
270 CEM I 32,5 R/ 89 SFA /0,50	48	C 30/37
SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48	53	C 35/45
SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51	51	C 30/37
MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55 **)	45	C 30/37
Vergussmörtel/w/f = 0,1125	96	C 70/85

*) = Werte abgeleitet aus 7 und 56 Tage-Festigkeit

**)= Festigkeit nach 56 Tagen

In den folgenden Bildern ist die Festigkeitsentwicklung über 90 Tage dargestellt.

Um den Luftgehalt im Frischbeton zu senken, wurden die Betone „300 CEM I 32,5 R/0,6“ und „320 CEM I 32,5 R/0,5“ nochmals mit einem Betonverflüssiger hergestellt. Die Luftgehalte konnten um 1 bzw. 1,5 Vol.-% gesenkt werden, so dass die 28-Tage-Festigkeiten dieser Betone um 8 bzw. 10 N/mm² über denen der vergleichbaren Betone ohne Betonverflüssiger lagen (vgl. Bild 9).

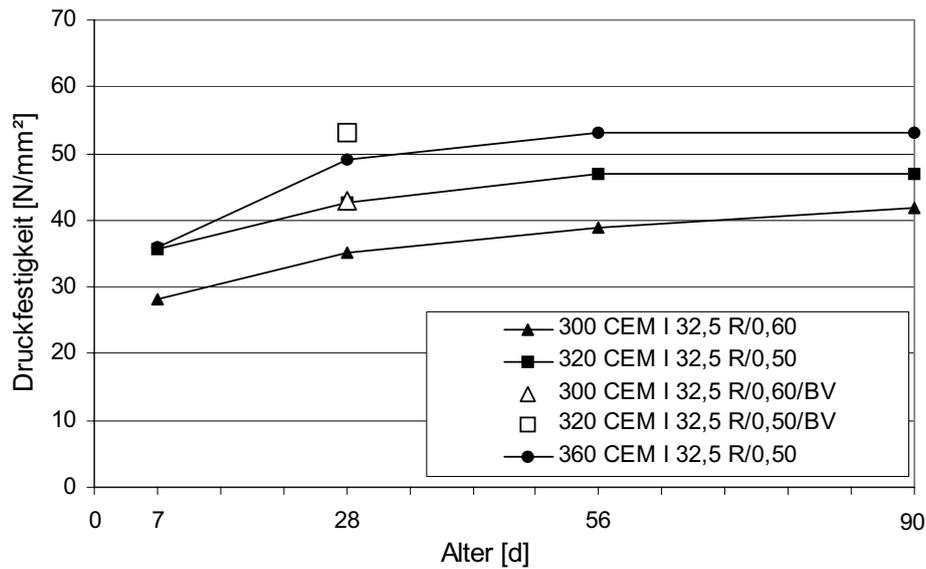


Bild 9: Festigkeitsentwicklung der Standardbetone mit dem CEM I 32,5 R

Die 7-Tage-Festigkeit des Betons „320 CEM II/A-LL 32,5 R/0,50/BV“ war um 13 N/mm^2 höher als die des Betons „300 CEM II/A-LL 32,5 R/0,60/BV“. Die Festigkeitsentwicklung vom 7. bis zum 28. Tag war bei beiden Betonen nahezu identisch. Nach dem 28. Tag war bei beiden Betonen nur eine geringfügige Festigkeitsentwicklung zu erkennen (vgl. Bild 10).

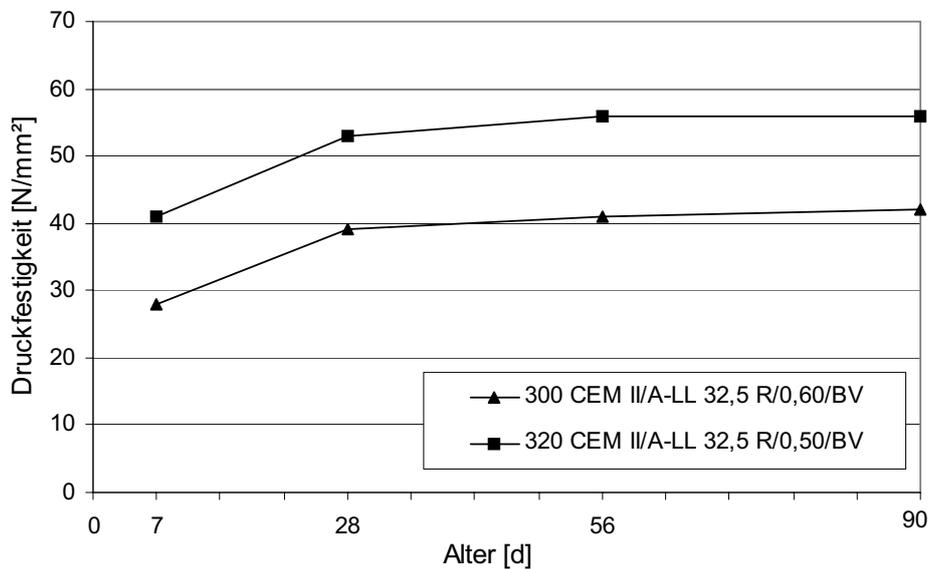


Bild 10: Festigkeitsentwicklung der Standardbetone mit dem CEM II/A-LL 32,5 R mit Betonverflüssiger

Auch bei der Standardbetonserie mit dem CEM II/B-M 32,5 R waren die Festigkeiten bei dem Beton mit w/z-Wert 0,50 erwartungsgemäß stets höher als bei dem Beton mit w/z-Wert 0,60 (vgl. Bild 11). Die 28-Tage-Festigkeitslagen lagen unter denen der bereits vorgestellten Betone, was offensichtlich durch die hohen Luftgehalte (2,7 bzw. 2,9 Vol.-%) bedingt war, da

der Beton „320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50/BV“ mit Betonverflüssiger (Luftgehalt = 1,7 Vol.-%) nach 28 Tagen eine Druckfestigkeit von 52 N/mm² aufwies.

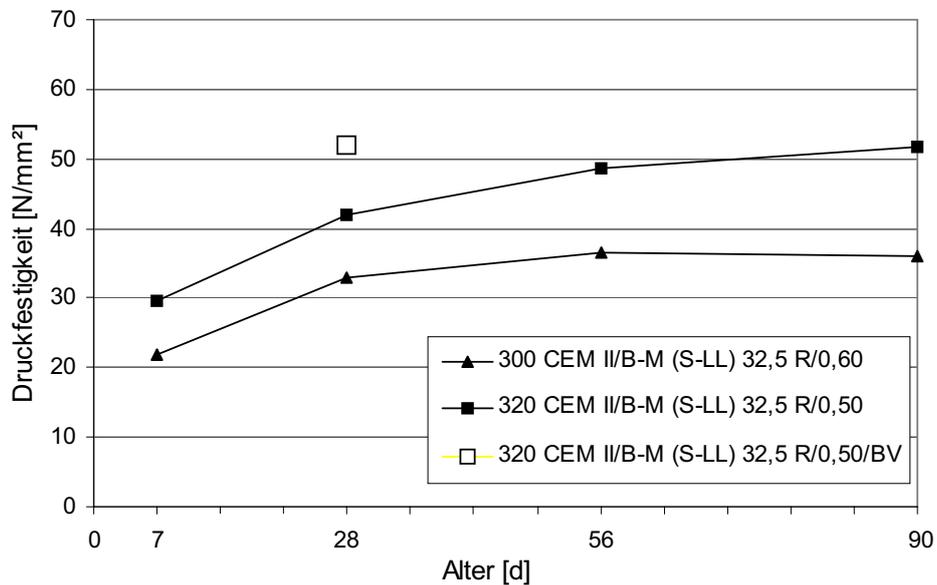


Bild 11: Festigkeitsentwicklung der Standardbetone mit dem CEM II/B-M 32,5 R

Die 28-Tage-Festigkeitswerte der Betone mit dem CEM III/B 32,5 R lagen bei 34 bzw. 46 N/mm². Auffallend war, dass nach 28 Tagen keine weiteren Festigkeitszunahmen mehr beobachtet werden konnten.

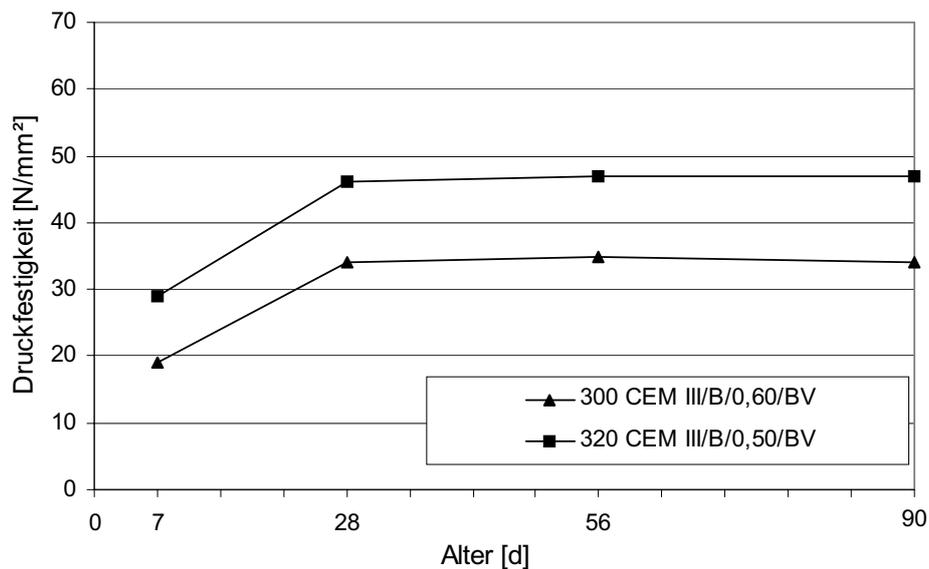


Bild 12: Festigkeitsentwicklung der Standardbetone mit dem CEM III/B 32,5 R mit Betonverflüssiger

Bei den Betonen mit Portlandzement und Steinkohlenflugasche wurde einerseits die im Rahmen von Zulassungsverfahren für SFA zu prüfende Rezeptur untersucht, andererseits wurde eine Zusammensetzung untersucht, deren SFA-Gehalt sich für die anrechenbare Menge nach dem oberen Grenzwert der DIN 1045-2:2001-07 [12] richtet (Beton „270 CEM I 32,5 R/ 89 SFA /0,50“). Erwartungsgemäß liegen die Festigkeiten des Betons mit w/z_{eq} 0,50 über denen des Betons mit w/z_{eq} 0,60. Auffallend gering ist aber der Festigkeitszuwachs nach 56 Tagen des Betons mit dem höheren SFA-Gehalt.

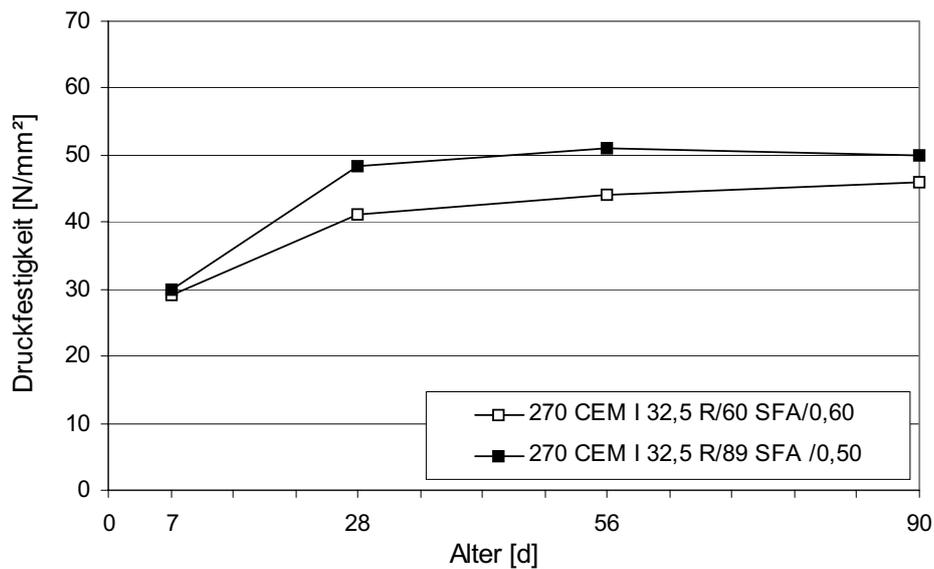


Bild 13: Festigkeitsentwicklung der Standardbetone mit dem CEM I 32,5 R und SFA

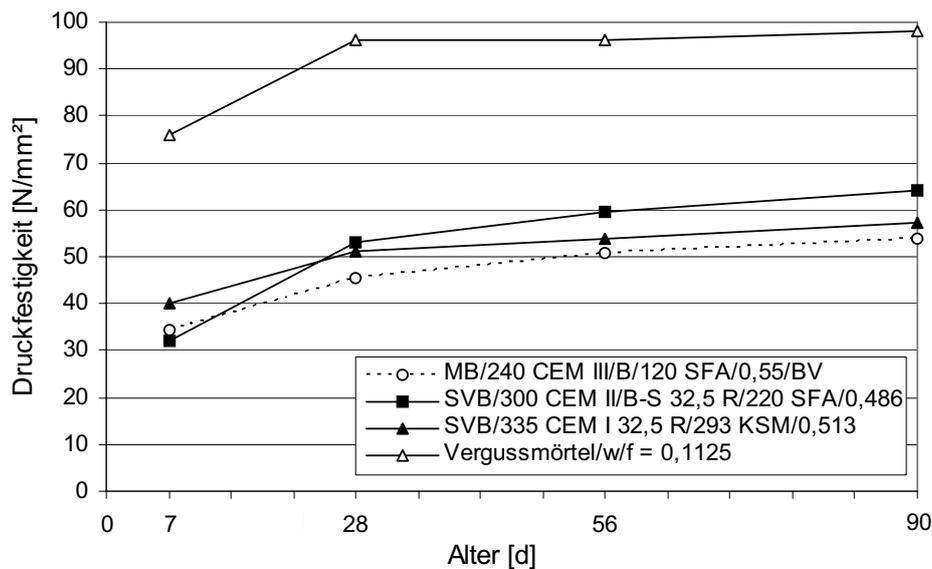


Bild 14: Festigkeitsentwicklung der Sonderbetone

Die Festigkeitsentwicklungen der Sonderbetone sind in Bild 14 dargestellt. Die Festigkeit nach 28 Tagen des Vergussmörtels lag mit 96 N/mm^2 weit über den anderen Festigkeiten, die zwischen 45 und 56 N/mm^2 lagen.

5.3 Frostwiderstand

5.3.1 Frostwiderstand nach dem Würfel-Verfahren

Um einen ersten, schnellen Überblick über alle Ergebnisse, die zur Beurteilung eines frostbeständigen Betons herangezogen werden, zu erhalten, werden in diesem und im nächsten Kapitel alle Ergebnisse der Frostprüfungen zunächst getrennt jeweils nach den beiden Prüfverfahren dargestellt. Eine detaillierte Versuchsauswertung für die jeweils zusammengehörigen Betone, also die einzelnen Betonpaare, wird in Kap. 5.3.3 durchgeführt. Korrelationen zwischen den Ergebnissen der Frostversuche nach Bild 7, S. 26 werden im Kap. 5.4 besprochen.

Die Abwitterungen in M.-% nach 50 bzw. 100 FTW sowie die Änderungen der rel. dyn. E-Moduln sind in Tabelle 17 zusammengestellt. Zur Übersicht wurden die Abwitterungen nochmals in Bild 15 zusammengefasst.

Das Würfelverfahren sieht als Regelfall keine Bewertung hinsichtlich der inneren Schädigung, die durch eine Änderung der Ultraschalllaufzeit beobachtet werden kann, vor. Zur Beurteilung werden lediglich die Abwitterungen in M.-% herangezogen. Hier schlägt Siebel [53] als Annahmekriterium für einen frostbeständigen Beton eine maximale Abwitterung von 5 M.-% nach 50 Frost-Tau-Wechseln bzw. 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln vor. Es wurden aber bei keinem Beton aus dem Untersuchungsprogramm Abwitterungen in diesen Größenordnungen festgestellt.

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.

Tabelle 17: Abwitterungen und absolute Änderung in % der rel. dyn. E-Moduln der einzelnen Betone nach 50 bzw. 100 FTW geprüft nach dem Würfel-Verfahren

Beton	LP [Vol.-%]	Abwitterungen [M.-%]		Änderung des rel. dyn. E-Moduls [%] *	
		50 FTW	100 FTW	50 FTW	100 FTW
300 CEM I 32,5 R/0,60	2,2	0,15	0,63	--	+ 2
320 CEM I 32,5 R/0,50	2,7	0,06	0,10	--	+ 1
300 CEM I 32,5 R/0,60/BV	1,2	0,57	4,10	+ 4	+ 6
320 CEM I 32,5 R/0,50/BV	1,2	0,12	0,29	+ 7	+ 9
360 CEM I 32,5 R/0,50	1,0	0,46	1,05	- 1	+ 6
300 CEM II/A-LL 32,5 R/0,60/BV	1,5	1,25	2,95	+ 6	+ 6
320 CEM II/A-LL 32,5 R/0,50/BV	1,2	0,15	1,70	+ 6	+ 6
300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	2,7	1,05	1,90	0	+ 2
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50	2,9	0,07	0,17	0	+ 1
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50/BV	1,7	0,47	--	+ 4	--
300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV	1,3	2,26	4,0	- 6	-17
320 CEM III/B 32,5 N/0,50/BV	1,6	0,16	0,39	+ 1	+ 4
270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60	1,0	0,31	2,81	--	- 16
270 CEM I 32,5 R/ 89 SFA /0,50	2,3	0,46	0,90	0	- 1
SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48	1,3	0,10	0,14	k.A.	-9
SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51 W	1,8	0,29	0,76	+ 6.	+ 8
MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55	2,0	0,06	0,09	k.A.	- 8
Vergussmörtel/w/f = 0,1125	1,4	0,03	0,07	0	0

*) + = Anstieg
 - = Abfall

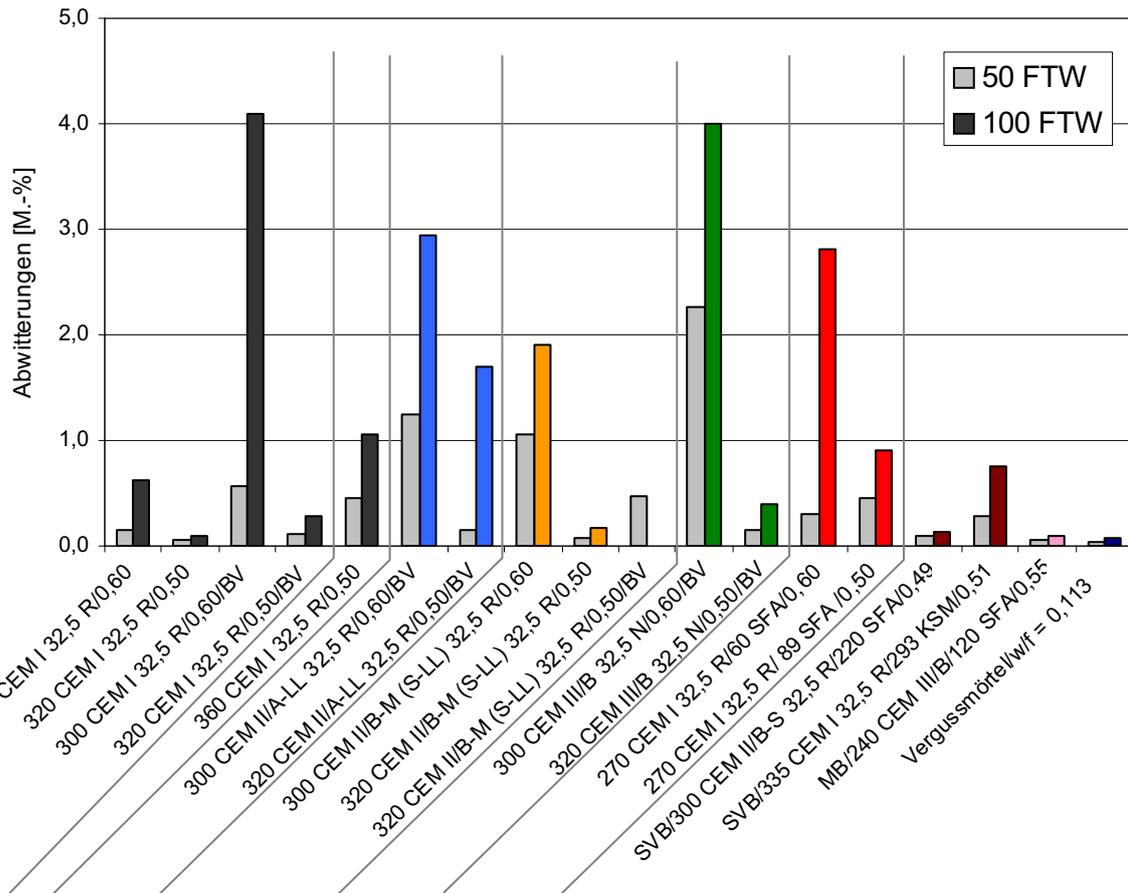


Bild 15: Abwitterungen der einzelnen Betone nach 50 bzw. 100 FTW geprüft nach dem Würfel-Verfahren

Die Auswirkung geringer Luftgehalte kann an Betonen beobachtet werden, die ohne und mit Betonverflüssiger hergestellt wurden (Betone mit CEM I 32,5 R und mit CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R, vgl. Bild 15). Die Luftgehalte der einzelnen Betone können ebenfalls [Tabelle 17](#) entnommen werden. Bei allen Betonen mit Betonverflüssiger erhöhte sich –wenn auch nur geringfügig– die Abwitterungsmenge, da dem Wasser bei der Eisbildung weniger Expansionsraum zur Verfügung stand. Die gesamte Abwitterungsmenge nach 50 bzw. 100 FTW lag aber immer noch weit unter dem Akzeptanzkriterium von 5 bzw. 10 M.-%.

5.3.2 Frostwiderstand nach dem CIF-Verfahren

Die Abwitterungen in g/m^2 sowie die absoluten Änderungen der dyn. E-Moduln in % nach 28 bzw. 56 FTW der Standard- und Sonderbetone sind in [Tabelle 18](#) zusammengefasst, die Abwitterungen sind zusätzlich in [Bild 16](#) dargestellt, der Abfall des rel. dyn. E-Moduls in [Bild 17](#).

Tabelle 18: Abwitterungen und absolute Änderung in % der rel. dyn. E-Moduln der einzelnen Betone nach 28 bzw. 56 FTW geprüft nach dem CIF-Verfahren

Beton	LP [Vol.-%]	Abwitterungen [g/m ²]		Änderung des rel. dyn. E-Moduls [%]	
		28 FTW	56 FTW	28 FTW	56 FTW
300 CEM I 32,5 R/0,60	2,2	95	224	+1	- 2
320 CEM I 32,5 R/0,50	2,7	41	133	0	0
300 CEM I 32,5 R/0,60/BV	1,2	101	227	- 4	- 36
320 CEM I 32,5 R/0,50/BV	1,2	65	134	- 1	- 17
360 CEM I 32,5 R/0,50	1,0	64	124	- 1	- 7
300 CEM II/A-LL 32,5 R/0,60/BV	1,5	144	277	- 1	+ 4
320 CEM II/A-LL 32,5 R/0,50/BV	1,2	70	133	- 3	- 12
300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	2,7	221	481	+ 3	+3
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50	2,9	41	133	+ 2	+4
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50/BV	1,7	57	113	+ 1	+ 4
300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV	1,3	180	975	- 40	- 72
320 CEM III/B 32,5 N/0,50/BV	1,6	92	175	- 6	- 29
270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60	1,0	125	342	- 10	- 66
270 CEM I 32,5 R/ 89 SFA /0,50	2,3	64	135	- 3	- 26
SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48	1,3	86	165	- 3	- 51
SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51	1,8	73	197	- 10	- 43
MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55	2,0	184	609	- 15	- 52
Vergussmörtel/w/f = 0,1125	1,4	15	39	+1	+1

*) + = Anstieg
 - = Abfall

Die größten Abwitterungen waren beim Beton „300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV“ zu beobachten (975 g/m²). Hier war auch die innere Schädigung, d.h. der Abfall des rel. dyn. E-Moduls am größten. Der Beton „300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60“ zeigte ebenfalls große Abwitterungen (481 g/m²), aber keinen Abfall im rel. dyn. E-Modul. Der Beton „270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60“ wies Abwitterungen von 342 g/m² und auch eine innere Schädigung auf (Abfall des rel. dyn. E-Moduls um über 60 %).

Auffallend ist, dass die Abwitterungen nach 56 FTW der Betone „300 CEM I 32,5 R/0,60“ und „300 CEM I 32,5 R/0,60/BV“ sowie der Betone „320 CEM I 32,5 R/0,50“ und „320 CEM I 32,5 R/0,50/BV“ nahezu identisch sind. Die innere Schädigung der Betone mit den niedrigeren LP-Gehalten (Betone mit Betonverflüssiger) war aber bedingt durch den

geringeren Expansionsraum während der Eisbildung wesentlich größer (vgl. Tabelle 18, letzte Spalte – Abfall des rel. dyn. E-Moduls). Dieses Ergebnis bestätigte sich aber nicht beim Beton „320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50/BV“, bei dem es ebenso wie beim Beton „320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50 keine innere Schädigung gab. Offensichtlich lag hier trotz des bereits reduzierten Luftgehaltes eine Porensituation vor, die dem Eis genügend Expansionsraum bot.

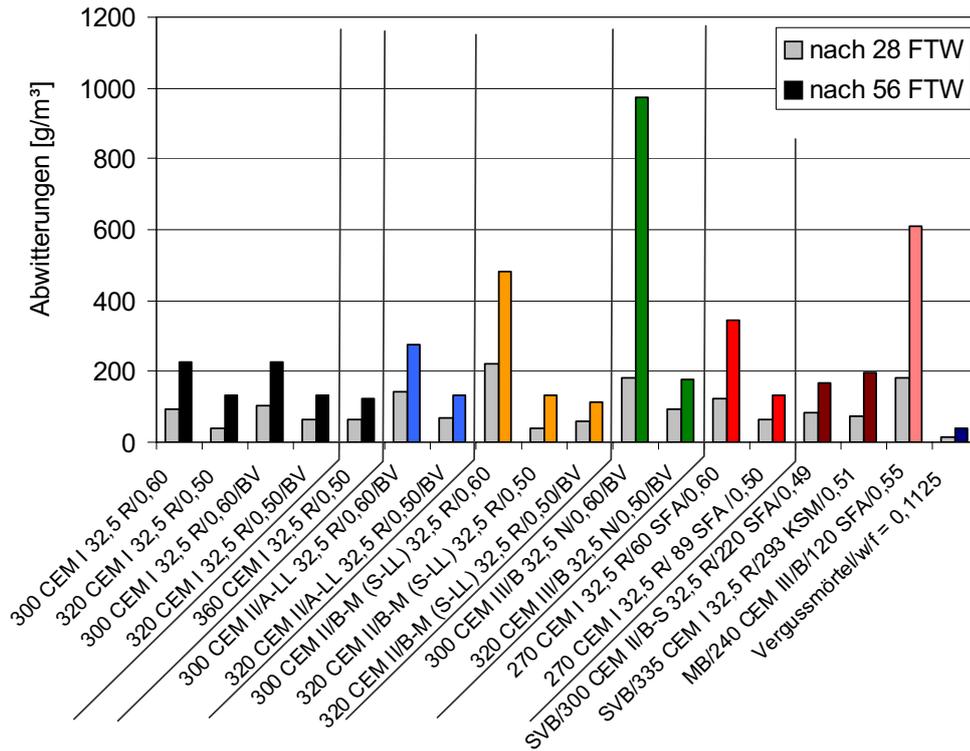


Bild 16: Abwitterungen der einzelnen Betone nach 28 bzw. 56 FTW geprüft nach dem CIF-Verfahren

Dennoch kann festgehalten werden, dass sich eine Reduzierung des Luftporengehaltes gravierend auf die inneren Gefügeschädigungen auswirken kann. Das würde aber auch bedeuten, dass bei einer Beurteilung des Frostwiderstands nach dem CIF-Verfahren der Luftporengehalt im Frischbeton unbedingt berücksichtigt werden muss, da er einen maßgebenden Einfluss auf das Annahmekriterium – den Abfall des rel. dyn. E-Moduls – hat. Beim Würfelverfahren, bei dem nur die Abwitterungen zu einer Beurteilung herangezogen werden, war die Auswirkung der Luftporen nicht so deutlich zu erkennen.

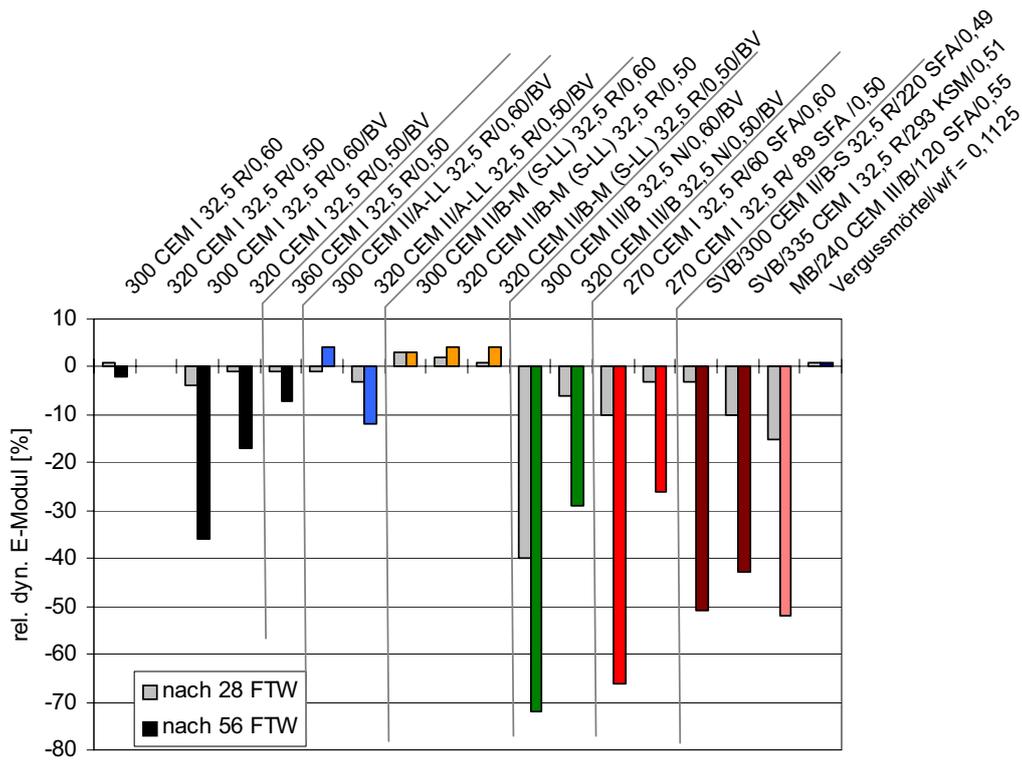


Bild 17: Abfall der rel. dyn. E-Moduln der einzelnen Betone nach 28 bzw. 56 FTW geprüft nach dem CIF-Verfahren

Nach der Prüfvorschrift des CIF-Verfahrens, die in RILEM TC 176 veröffentlicht wird [3], soll die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel festgehalten werden, bei der die innere Gefügeschädigung so groß ist, dass sie einen Abfall des rel. dyn. E-Moduls von 20 % bewirkt. Bild 18 zeigt die Betone, bei denen dies der Fall war. Betone, die im Bild 18 keinen Balken skizziert haben, wiesen keinen oder einen geringeren Abfall des rel. dyn. E-Moduls auf.

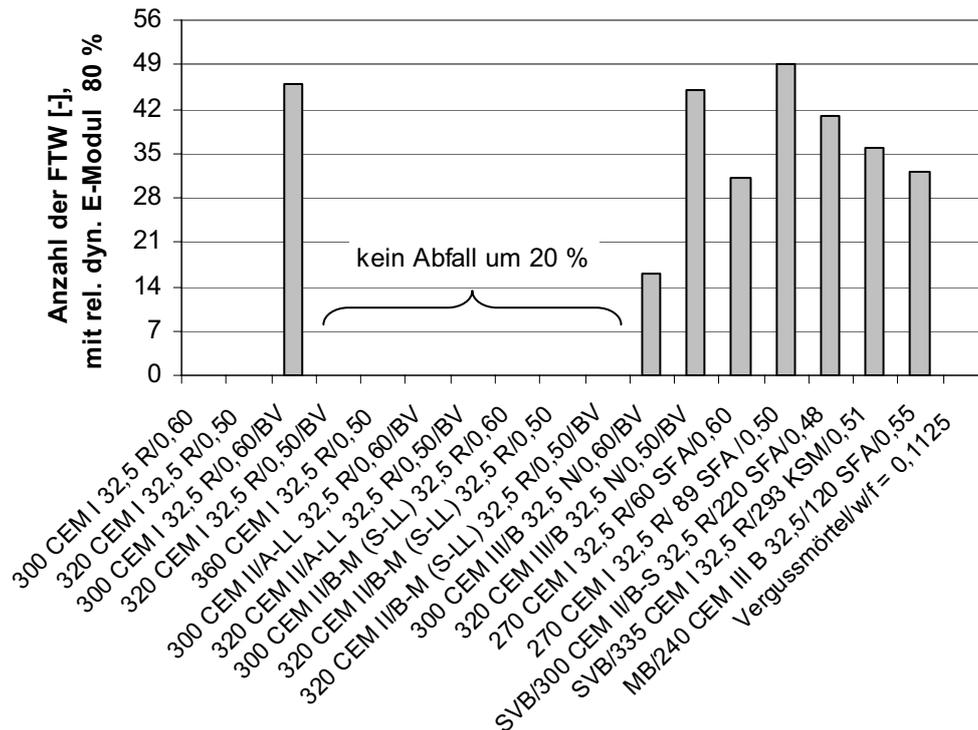


Bild 18: Anzahl der FTW, bei denen der Abfall des rel. dyn. E-Moduls bei 20 % lag

5.3.3 Detaillierte Darstellung der Ergebnisse der Frostprüfungen

Um die Porensituation im Probekörperinneren bewerten zu können, wurde zunächst die Wasseraufnahme der Proben vor und während der Frostlagerung untersucht. Anschließend wurden die Abwitterungen und der Abfall der rel. dyn. E-Moduln miteinander verglichen.

- Betone mit CEM I 32,5 R:

In Bild 19 ist die Wasseraufnahme vor und nach der Frostbeanspruchung der Betone mit dem CEM I 32,5 R ohne Betonverflüssiger dargestellt. Die Luftporengehalte im Frischbeton lagen bei 2,2 Vol.-% (für Beton „300 CEM I 32,5 R/0,60“) bzw. bei 2,7 Vol.-% (für Beton „320 CEM I 32,5 R/0,50“). Um diese zu senken, wurden die Betone nochmals mit einem Betonverflüssiger hergestellt. Bei beiden Betonen konnte der Luftgehalt im Frischbeton auf 1,2 Vol.-% gesenkt werden. Die Wasseraufnahme dieser Betone ist in Bild 20 dargestellt.

Es zeigten sich keine deutlichen Änderungen hinsichtlich der Wasseraufnahme vor und nach Frostbeginn bei den Betonen mit weniger Luftgehalt (Bild 19 und Bild 20, links). Bei den Betonen ohne Betonverflüssiger pendelte sich das Frostsaugen beim Würfelverfahren auf einem etwas höheren Niveau bei ca. 0,8 M.-% ein als bei den Betonen mit Betonverflüssiger.

Das Frostsaugen beim CIF-Verfahren stieg im Vergleich zu dem des Würfelverfahrens stetig an. Die Wasseraufnahme nach Frostbeginn war somit größer als beim Würfelverfahren (Bild 19 und Bild 20, rechts).

Dies könnte daran liegen, dass die Mikroeislinsepumpe beim Würfelverfahren aufgrund der geringeren Gefriertemperatur schwächer ist. Zusätzlich kommt beim Würfelverfahren hinzu, dass die Würfel während der eintägigen Vorlagerung mehr Wasser aufnehmen als die CIF-Probekörper. Das heißt, dass beim Frostbeginn in den Würfeln bereits mehr Poren mit Wasser gefüllt sind als bei den Poren im CIF-Probekörper. Zusätzlich könnte es sein, dass beim Würfelverfahren nur so viel Wasser aufgenommen wird, bis der Druck im inneren Porensystem eine weitere Wasseraufnahme verhindert. Beim CIF-Verfahren hingegen kann die kapillare Steighöhe des Wassers den Porenraum über die gesamte Probekörperhöhe auffüllen.

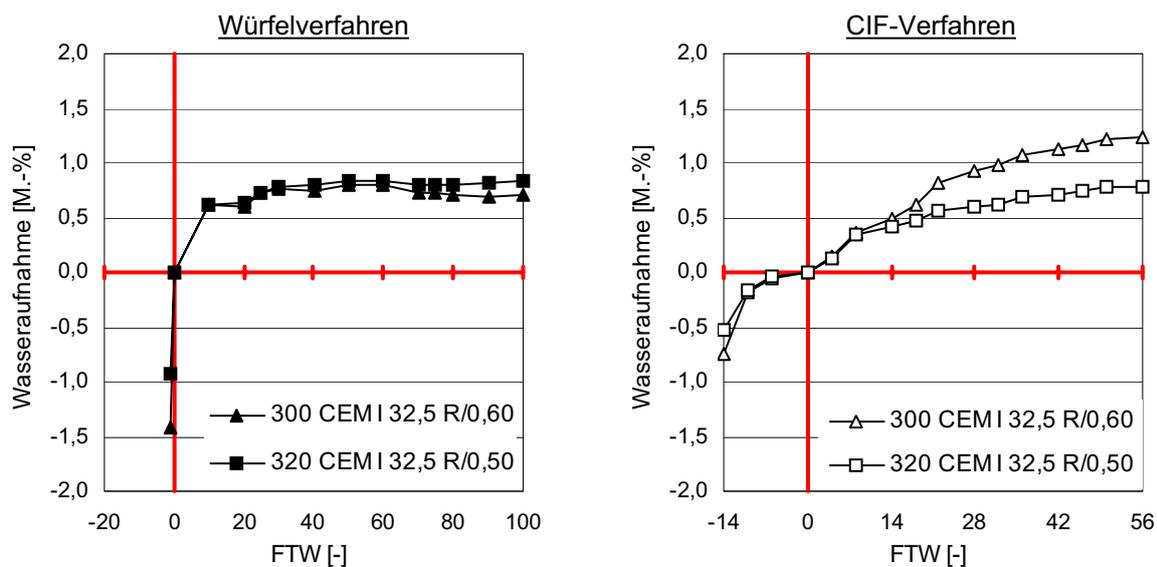


Bild 19: Wasseraufnahme vor und nach der Frostbeanspruchung der Betone mit dem CEM I 32,5 R

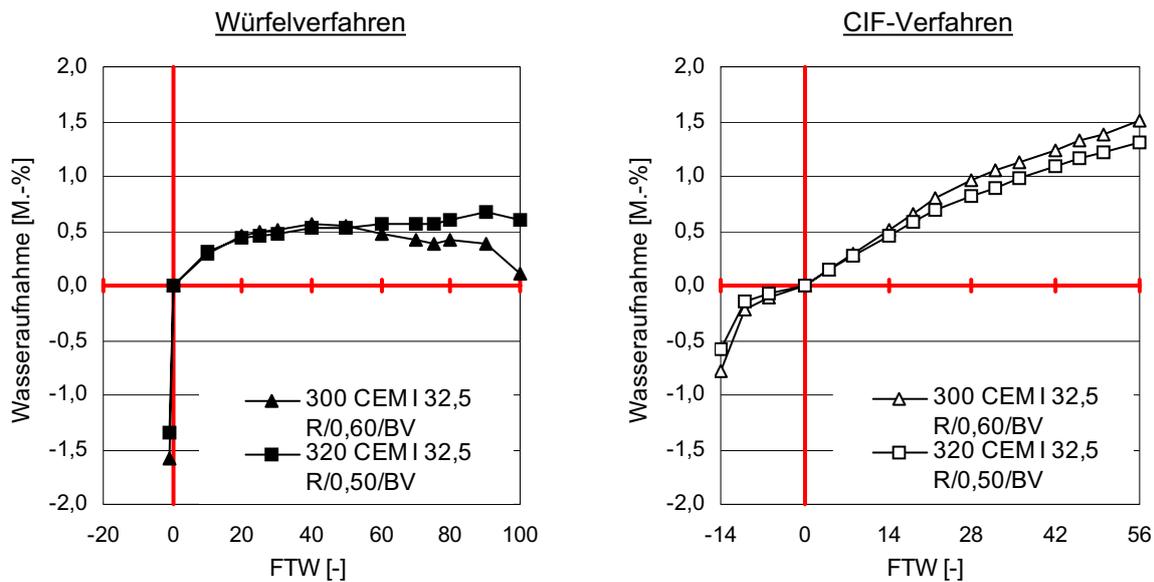


Bild 20: Wasseraufnahme vor und nach der Frostbeanspruchung der Betone mit dem CEM I 32,5 R und Betonverflüssiger

Die Wasseraufnahmen wurden gravimetrisch als Differenz der Probekörpermasse nach der jeweiligen Anzahl von FTW und der feuchten Ausgangsmasse im Alter von 28 Tagen unter Berücksichtigung der Abwitterungen bestimmt. Bei größeren Abwitterungsmengen und einem nur geringen kapillaren Saugen zwischen den Frost-Tau-Wechseln, kann es vorkommen, dass die Wasseraufnahme in M.-% abfällt. Das bedeutet aber nicht, dass der Probekörper während des Versuches Wasser abgibt, sondern dass der aktuelle Wassergehalt im verbleibenden Porensystem niedriger ist als zu einem früheren Versuchszeitpunkt.

Ein Abfall der Kurven war ausschließlich beim Würfelverfahren zu beobachten. Er ist sicher auch auf das Berechnungsverfahren zurückzuführen, bei dem die trockenen Abwitterungen berücksichtigt werden (Berechnung nach Gleichung 1, S. 31). Viel stärker ins Gewicht fällt aber, dass es beim Würfelverfahren offensichtlich vorkommen kann, dass die äußere Randzone wassergesättigt ist, aufgrund der Druckverhältnisse wenig oder kein Wasser ins innere Porensystem transportiert wird und deswegen nach einer starken Abwitterung der Randzone der Wassergehalt in M.-% (im Diagramm an das CIF-Verfahren angeglichen ausgedrückt als Wasseraufnahme in M.-%) abfällt. Dies war bei Beton „300 CEM I 32,5 R/0,60/BV“ der Fall.

Die insgesamt aufgenommenen Wassermengen vor und nach Frostbeginn der Betone mit dem CEM I 32,5 R sind in Tabelle 19 dargestellt. Bei den Betonen mit Betonverflüssiger (BV) waren sie tendenziell höher als bei den Betonen ohne BV. Offensichtlich führte der Betonverflüssiger dazu, dass sich ein feineres Porensystem ausbildete, bei dem die kritische Wassersättigung zumindest stellenweise während der Prüfzeit erreicht wird, so dass es zu Abwitterungen beim „300 CEM I 32,5 R/0,60/BV“ und zu inneren Gefügeschäden bei beiden Betonen mit BV kam, während die Betone ohne BV keine Schädigung zeigten.

Tabelle 19: Wasseraufnahme (gesamt) der Betone mit CEM I 32,5 R vor und nach Frostbeginn

Beton	insgesamt aufgenommene Wassermenge in M.-%	
	Würfelverfahren	CIF-Verfahren
300 CEM I 32,5 R/0,60	2,12	2,03
320 CEM I 32,5 R/0,50	1,76	1,35
300 CEM I 32,5 R/0,60/BV	2,14 *)	2,34
320 CEM I 32,5 R/0,50/BV	1,93	1,94

*) bez. auf den Wassergehalt beim 40. FTW

Die Abwitterungen der Betonpaare mit dem Portlandzement CEM I 32,5 R mit und ohne Betonverflüssiger sind in den nachfolgenden Bildern dargestellt. Auffallend war, dass die Verringerung der Luftgehalte im Frischbeton die Abwitterungen und deren zeitlichen Verlauf beim CIF-Verfahren nicht beeinflusste (vgl. Bild 21 und Bild 22, jeweils rechts), während beim Würfelverfahren zumindest beim Beton „300 CEM I 32,5 R/0,60/BV“ (Bild 21 links) die Abwitterungsmenge im Vergleich zum Beton „300 CEM I 32,5 R/0,60“ (Bild 22 links) ab dem 50. FTW stark anstieg. Anscheinend war bei diesem Beton der kritische Sättigungsgrad in der Randzone überschritten, da es zwar zu hohen Abwitterungen, nicht aber zu einem gleich hoch bleibenden Wassergehalt kam (vgl. Auswertung von Bild 20).

Dies ist offensichtlich durch den geringeren Luftporenraum im Beton „300 CEM I 32,5 R/0,60/BV“ und die erhöhte Wassermenge, die dieser Beton im Vergleich zum „300 CEM I 32,5 R/0,60“ aufnimmt, bedingt (vgl. Tabelle 19). Dem Eis steht weniger Expansionsraum zur Verfügung, so dass es zu größeren Abplatzungen kommt. Der scharfe Anstieg der Abwitterungen deutet darauf hin, dass zumindest im oberflächennahen Bereich lokal die kritische Wassersättigung des Betons erreicht ist (vgl. Bild 22, links).

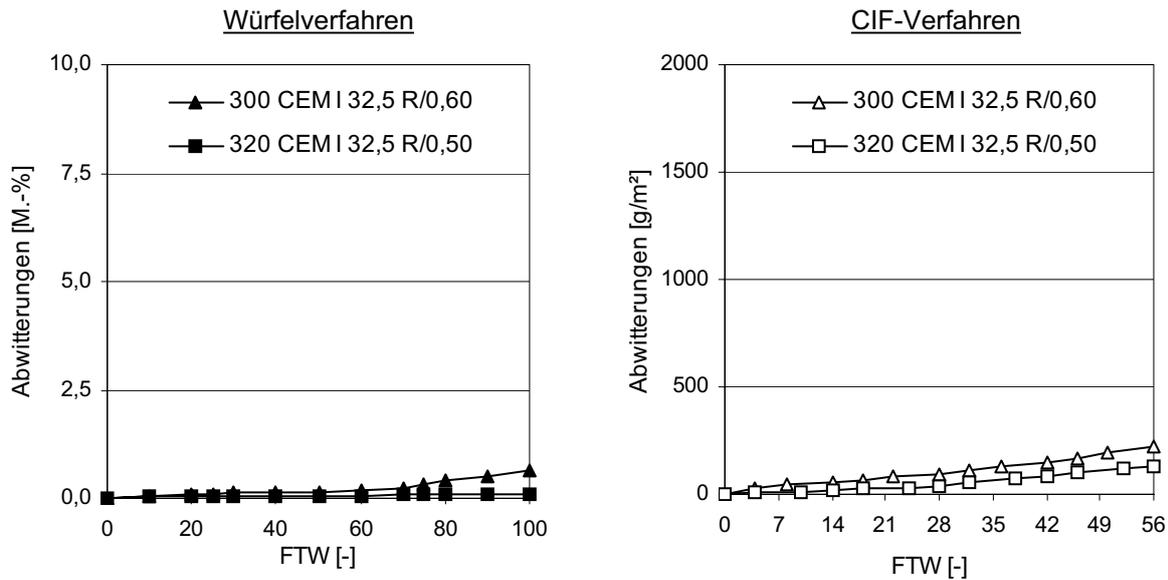


Bild 21: Abwitterungen in g/m^2 nach dem Würfel- und dem CIF-Verfahren der Betone mit dem CEM I 32,5 R

Der kritische Wassergehalt bei diesem Beton („300 CEM I 32,5 R/0,60/BV“) wurde offensichtlich auch innerhalb der Zeitspanne der CIF-Prüfung erreicht, da hier der rel. dyn. E-Modul nach dem 35. FTW deutlich abfiel (Bild 23, rechts, dreieckiges Symbol). Trotz fast identisch aufgenommenener Wassermenge wurde beim Würfelverfahren aber keine innere Schädigung beobachtet. Dies könnte daran liegen, dass das Wasser in den kleinen Kapillarporen beim Würfelverfahren nicht gefriert (Gefriertemperatur in Würfelmitte $-15\text{ }^\circ\text{C}$), während es in vergleichbar großen Poren beim CIF-Verfahren evtl. doch gefriert (Gefriertemperatur an Probekörperunterseite rd. $-20\text{ }^\circ\text{C}$).

In Bild 23 rechts, ist zusätzlich die Anzahl der Frost-Tau-Wechsel markiert, bei der es zu einem Abfall des rel. dyn. E-Moduls von mehr als 20 % kam. Nach RILEM TC 176 [3] soll dieses Kriterium beim CIF-Verfahren festgehalten werden. Eine Mindestanzahl von Frost-Tau-Wechseln bis zu diesem Abfall von 20 % ist aber nicht festgelegt, so dass diese Beurteilung auch nicht als Annahmekriterium herangezogen werden kann. Beim Beton „300 CEM I 32,5 R/0,60/BV“ war nach 46 FTW ein Abfall von 20 % beim rel. dyn. E-Modul zu beobachten.

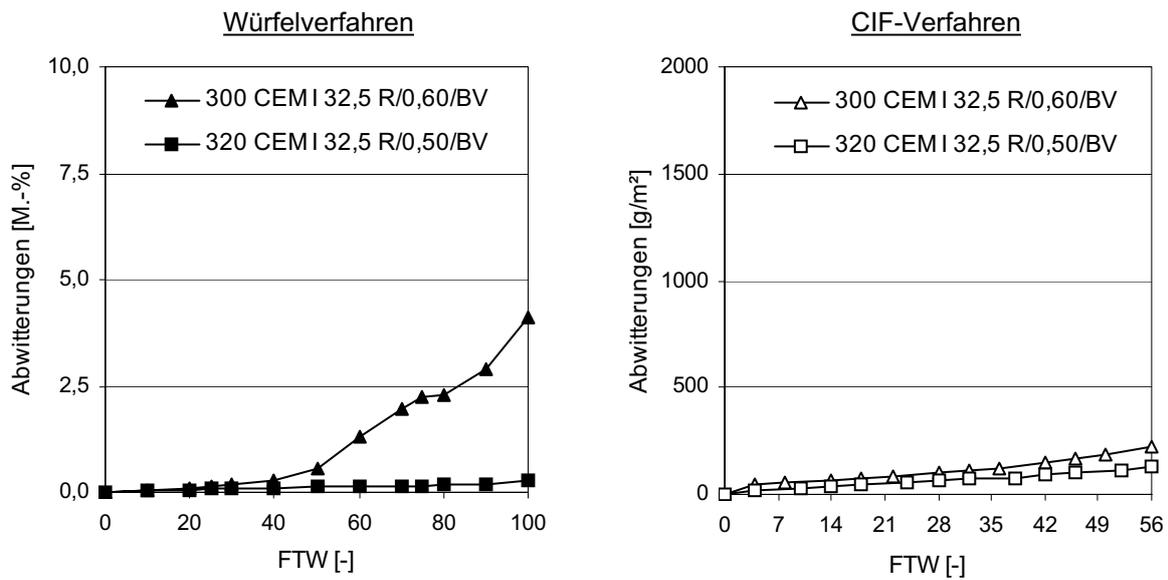


Bild 22: Abwitterungen in g/m² nach dem Würfel- und dem CIF-Verfahren der Betone mit dem CEM I 32,5 R und BV

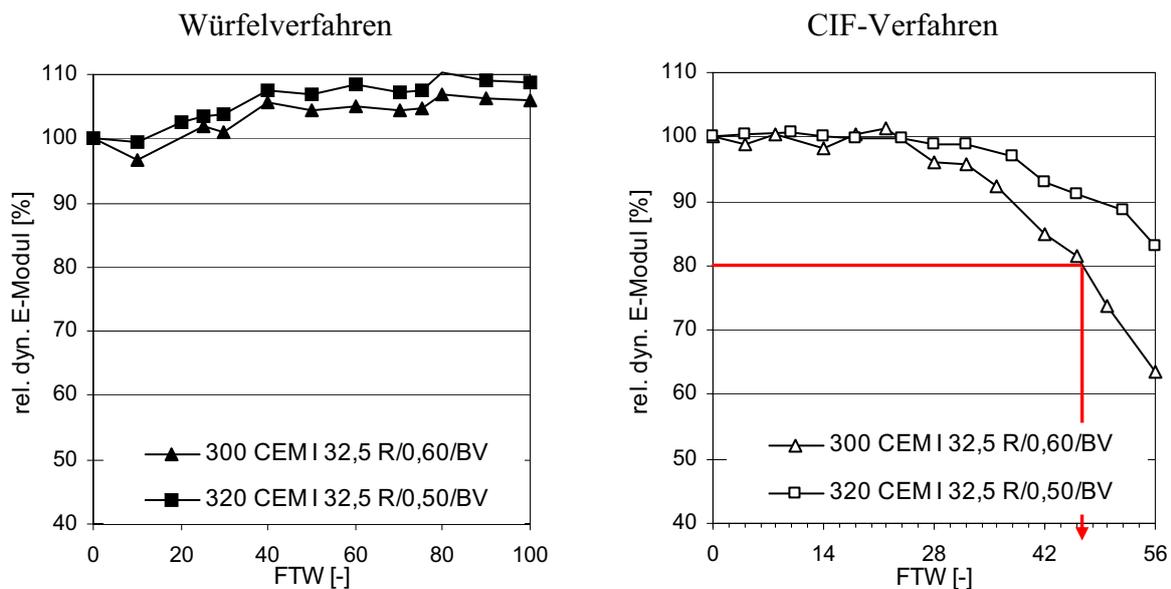


Bild 23: Abfall der rel. dyn. E-Modul in % nach dem Würfel- und dem CIF-Verfahren der Betone mit dem CEM I 32,5 R und BV

Generell sind die Betone mit 300 bzw. 320 kg/m³ CEM I 32,5 R (w/z = 0,60 bzw. 0,50) mit oder ohne Betonverflüssiger als frostbeständig einzustufen.

Um den Luftgehalt im Frischbeton zu senken, wurde ein Beton mit mehr Zementleim hergestellt (Beton „360 CEM I 32,5 R/0,50“). Auch wenn diese Betonzusammensetzung nicht für zukünftige Frostprüfungen als Referenzrezeptur herangezogen werden wird, soll sie der Vollständigkeit halber in diesem Prüfbericht vorgestellt werden. Die Wasseraufnahmen über den FTW nach Frostbeginn zeigten wieder eine asymptotische Näherung eines fixen Wertes beim Würfelverfahren und eine stetige Zunahme der Wasseraufnahme beim CIF-Verfahren. Insgesamt war die aufgenommene Wassermenge vor und nach Frostbeginn beim Würfel- und beim CIF-Verfahren mit 1,61 und 1,69 M.-% nahezu identisch.

Die Abwitterungsmengen waren bei beiden Prüfverfahren gering, sie lagen weit unter den jeweiligen Annahmekriterien. Auffällig war, dass eine innere Gefügeschädigung wieder nur bei den Probekörpern des CIF-Verfahrens zu beobachten war, nicht aber bei den Probekörpern des Würfelverfahrens.

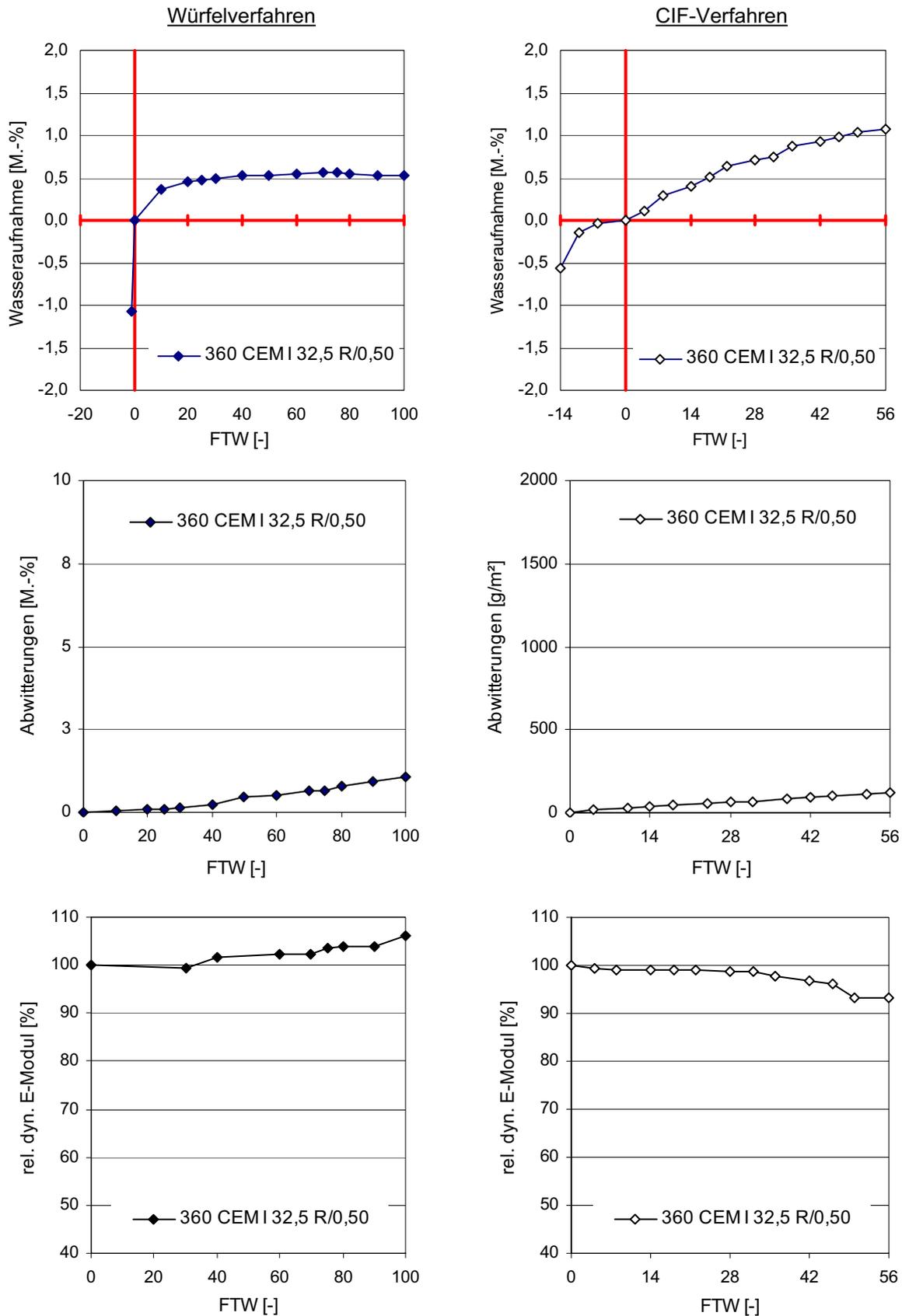


Bild 24: Wasseraufnahme vor und nach Frostbeginn, Abwitterungen in M.-% nach dem Würfel- und in g/m² nach dem CIF-Verfahren und Abfall der rel. Dyn. E-Moduln in % nach dem Würfel- und dem CIF-Verfahren (Beton mit 360 kg/m³ CEM I 32,5 R)

- Betone mit CEM/II A-LL 32,5 R:

Bei den Betonen mit dem CEM II/A-LL 32,5 R war bei den Probekörpern, die nach dem Würfelverfahren geprüft wurden, ab dem 40. FTW keine deutliche Zunahme der Wasseraufnahme zu beobachten. Die Probekörper, die nach dem CIF-Verfahren geprüft wurden, nahmen bei jedem Wechsel stets Wasser auf.

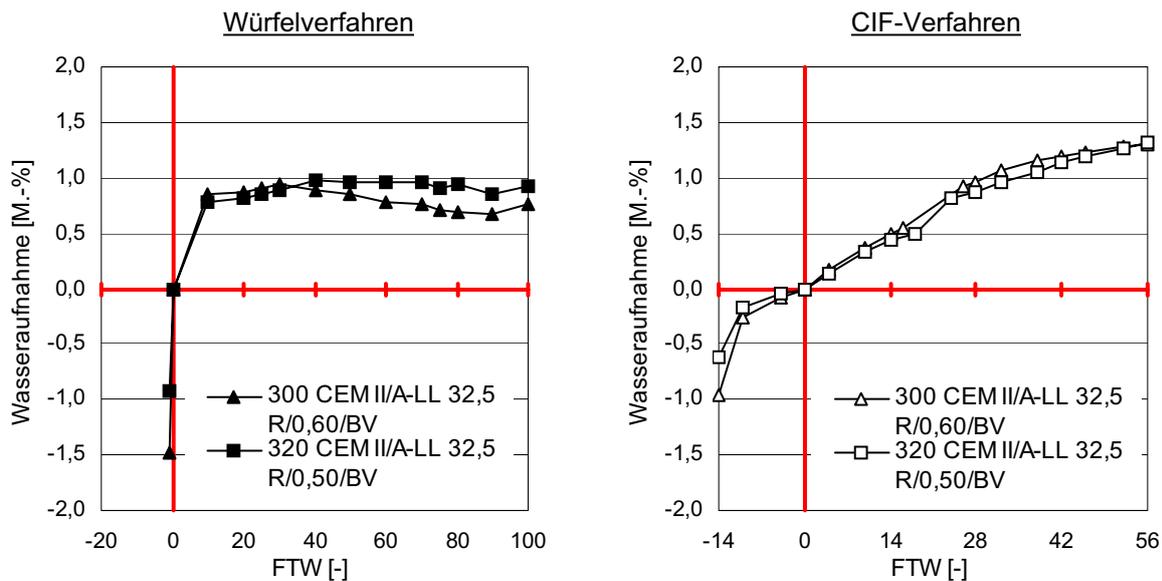


Bild 25: Wasseraufnahme vor und nach der Frostbeanspruchung der Betone mit CEM II/A LL 32,5 R und BV

Beim Beton mit 300 kg/m² CEM II/A-LL 32,5 R war beim Würfelverfahren ab dem 30. FTW ein deutlicher Anstieg der Abwitterungen zu erkennen (Bild 26). Beim CIF-Verfahren hingegen stiegen die Abwitterungen kontinuierlich an. Dieser Beton wies weder beim Würfelverfahren noch beim CIF-Verfahren einen Abfall des rel. dyn. E-Modul auf. Der rel. dyn. E-Modul beim Beton mit 320 kg/m³ CEM II/A-LL 32,5 R fiel hingegen beim CIF-Verfahren bis zum 56. FTW um 12 % ab (nach 28. FTW war ein Abfall von 3 % zu beobachten). Eine innere Gefügeschädigung konnte beim Würfelverfahren nicht beobachtet werden (vgl. Bild 27, rechts).

Das Frostsaugen dieser Betone war nahezu identisch (1,3 M.-%; vgl. Bild 25 rechts).

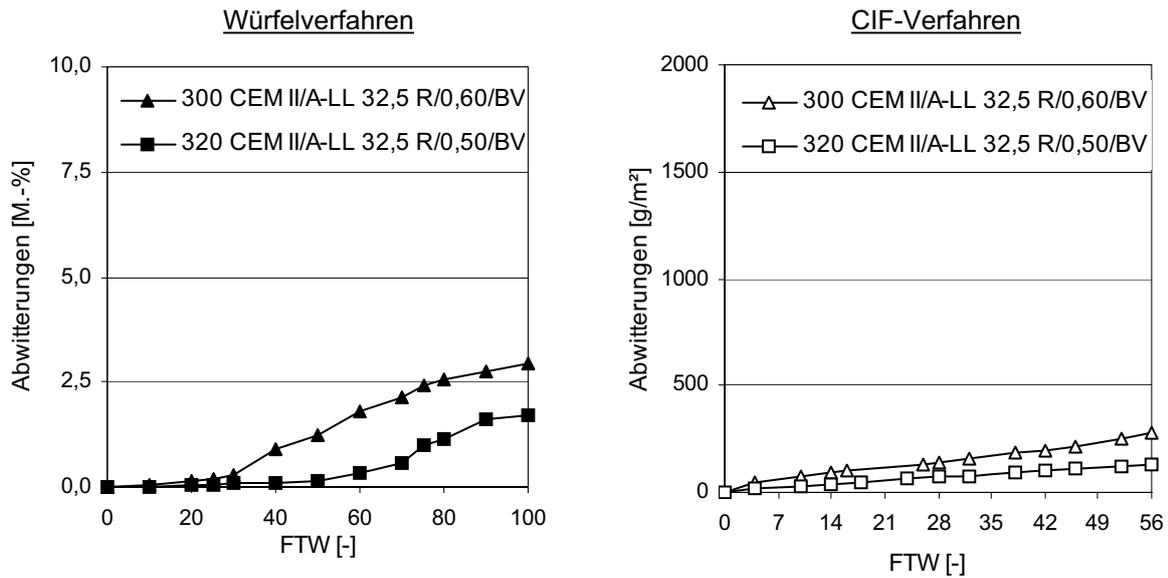


Bild 26: Abwitterungen nach dem Würfel- und dem CIF-Verfahren der Betone mit dem CEM II/A-LL 32,5 R und BV

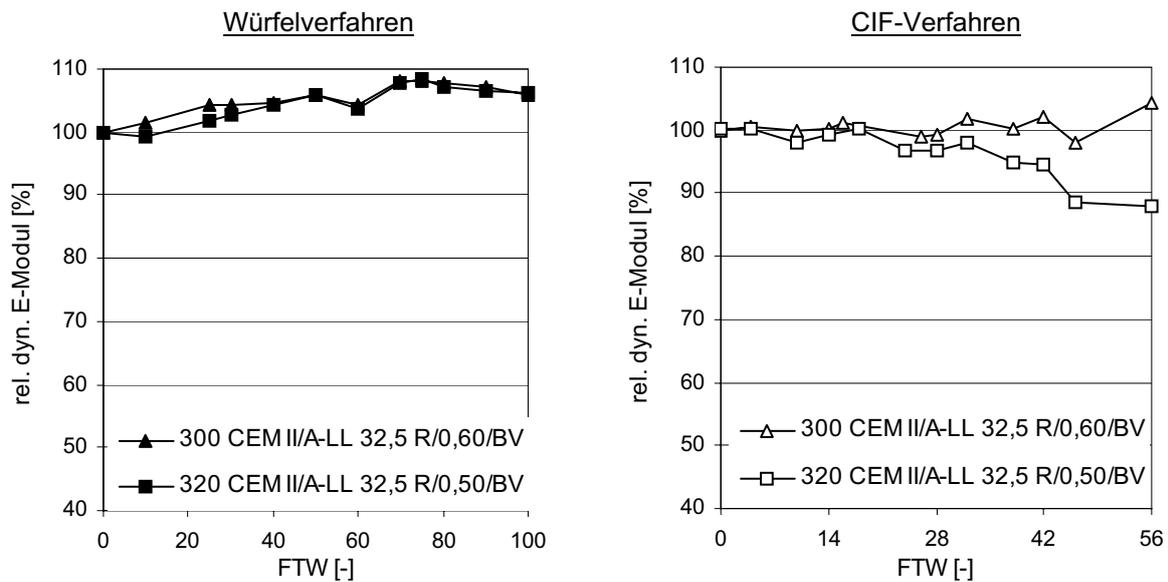


Bild 27: Abfall der rel. dyn. E-Moduln in % nach dem Würfel- und dem CIF-Verfahren der Betone mit dem CEM II/A-LL 32,5 R und BV

- Betone mit CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R:

Die kapillare Wasseraufnahme vor der Befrostung war bei den Betonen, die nach dem Würfelverfahren geprüft wurden, größer als bei denen, die nach dem CIF-Verfahren geprüft wurden. Bei beiden Prüfverfahren war das kapillare Wassersaugen vor Frostbeginn bei den Betonen mit $w/z = 0,6$ erwartungsgemäß größer als bei den Betonen mit $w/z = 0,5$.

Die gesamte Wasseraufnahme (vgl. Tabelle 20) war bei dem Beton „CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60“ bei beiden Prüfverfahren nahezu identisch. Allerdings änderte sich der Wassergehalt der Würfel nach dem rd. 40. FTW nicht auffallend, während die CIF-Probekörper über den gesamten Prüfzeitraum Wasser nachsaugten (vgl. Bild 28).

Um sicherzustellen, dass der Beton „320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50“ auch mit weniger Luftporen das Annahmekriterium des CIF-Verfahrens erfüllt, wurde der Beton nochmals mit einem Betonverflüssiger hergestellt. Zusätzlich wurde dieser Beton nach dem Würfelverfahren bis zum 50. FTW geprüft. Der Versuch wurde deswegen gekürzt, da nach dem 50. FTW bereits ein ausreichend hoher Frostwiderstand nachgewiesen werden konnte und das Ergebnis für eine weitere Auswertung (Korrelation zum CIF-Verfahren) unbedeutend ist. Durch den Betonverflüssiger konnte der LP-Gehalt von 2,9 Vol.-% auf 1,7 Vol.-% gesenkt werden. Der Beton „320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50/BV“ mit Betonverflüssiger nahm vor der Frostbeanspruchung etwas weniger Wasser auf als der Beton ohne Betonverflüssiger.

Tabelle 20: Wassersaugen der Betone mit CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R

Beton	insgesamt aufgenommene Wassermenge in M.-%	
	Würfelverfahren	CIF-Verfahren
300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	3,03	3,15
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50	2,38	2,10
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50/BV	2,05 (bis zum 50 FTW)	1,91

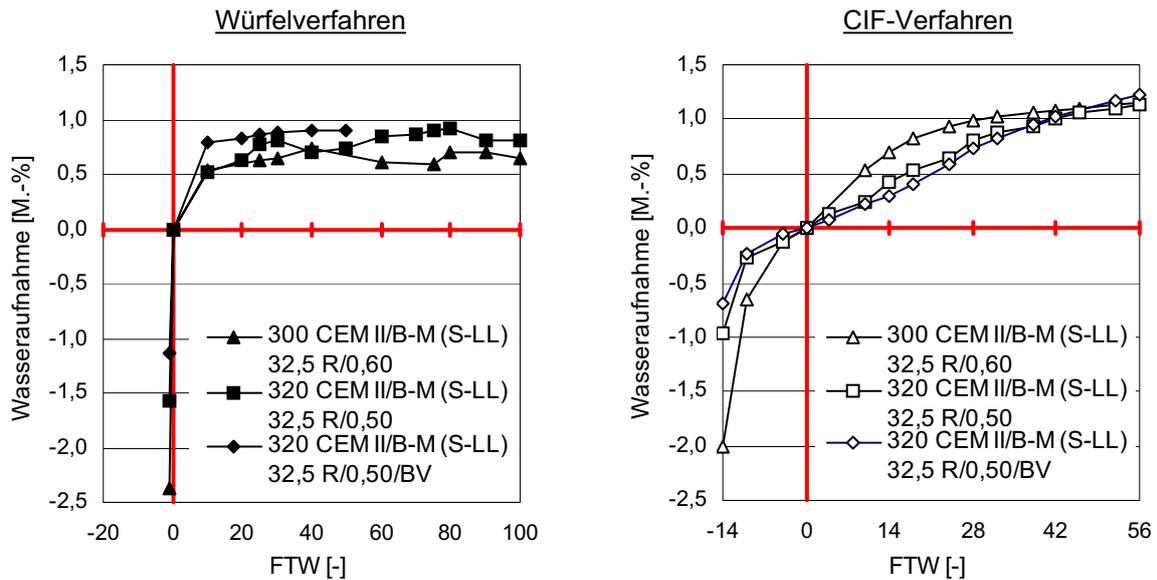


Bild 28: Wasseraufnahme vor und nach der Frostbeanspruchung der Betone mit dem CEM II/B-M (S-LL)

Die Abwitterungen des Betons mit 300 kg/m^3 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R sind in Bild 29 dargestellt (dreieckige Symbole). Mit knapp 2,0 M.-% beim Würfelverfahren und 500 g/m^2 beim CIF-Verfahren lagen sie in einer vergleichbaren Größenordnung. Die Abwitterungen des Betons „320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50“ waren bei beiden Prüfverfahren sehr gering (vgl. Bild 29). Die Zugabe des Betonverflüssigers bewirkte beim Würfelverfahren bis zum 50. FTW eine um 0,4 M.-% höhere Abwitterung, beim CIF Verfahren hingegen war kein Einfluss zu beobachten, die Abwitterungskurven verliefen hier nahezu identisch.

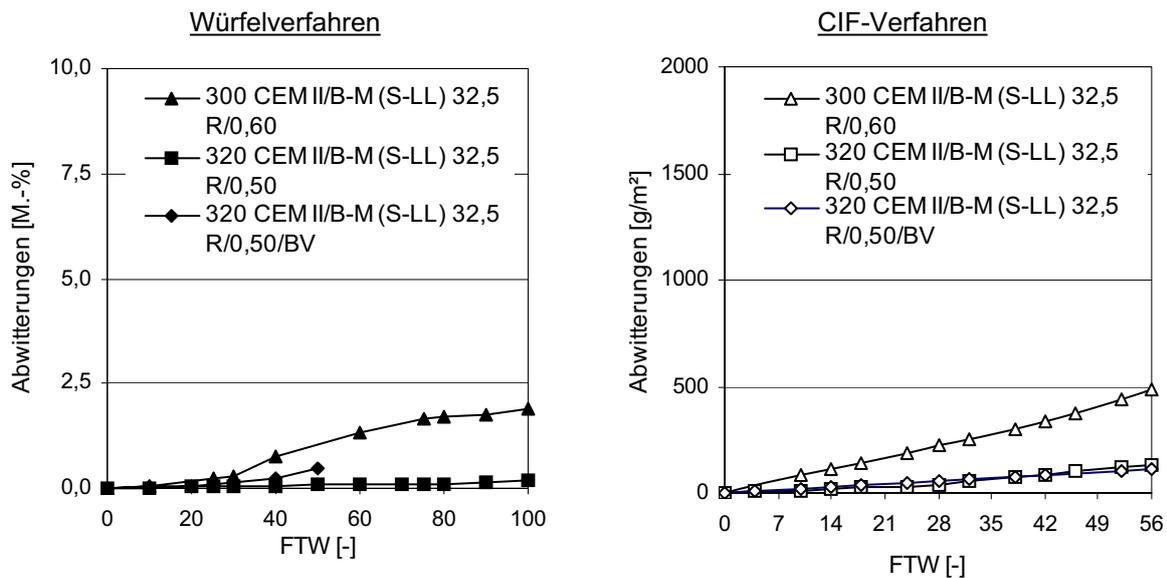


Bild 29: Abwitterungen nach dem Würfel- und dem CIF-Verfahren der Betone mit dem CEM II/B-M (S-LL)

Die im Vergleich zum Beton ohne Betonverflüssiger zumindest andere Porenstruktur des Betons mit Betonverflüssiger hatte offensichtlich keine Auswirkung auf die innere Gefügestabilität. So wurde bei keinem der Betone mit dem CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R ein Abfall der rel. dyn. E-Moduln beobachtet, sondern vielmehr ein Zuwachs, der auf eine höhere Wassersättigung des Porensystems zurückzuführen ist (vgl. Tabelle 17 und Tabelle 18, S. 39 bzw. 41).

- Betone mit CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA und BV

Die Wasseraufnahmen der Betone mit dem CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA und mit BV sind in Bild 30 dargestellt. Eine sehr große Wasseraufnahme während der Frost-Tau-Wechsel (2,0 M.-%) war beim Beton „300 CEM III/B 32,5/0,60/BV“, der nach dem CIF-Verfahren geprüft wurde, zu beobachten. Die gesamte Wasseraufnahme lag bei diesem Beton bei 3,6 M.-% (vgl. Tabelle 21). Beim Würfelverfahren lag die gesamte Wasseraufnahme bei 1,9 M.-%. Das starke Wassersaugen beim CIF-Verfahren deutet darauf hin, dass das innere Gefüge dieser Probekörper stark geschädigt wurde und so der Beton sehr viel Wasser aufnehmen konnte. Diese Schlussfolgerung wird bei der Auswertung der Ultraschalllaufzeit durch den starken Abfall des rel. dyn. E-Moduls bestätigt (Bild 32 rechts).

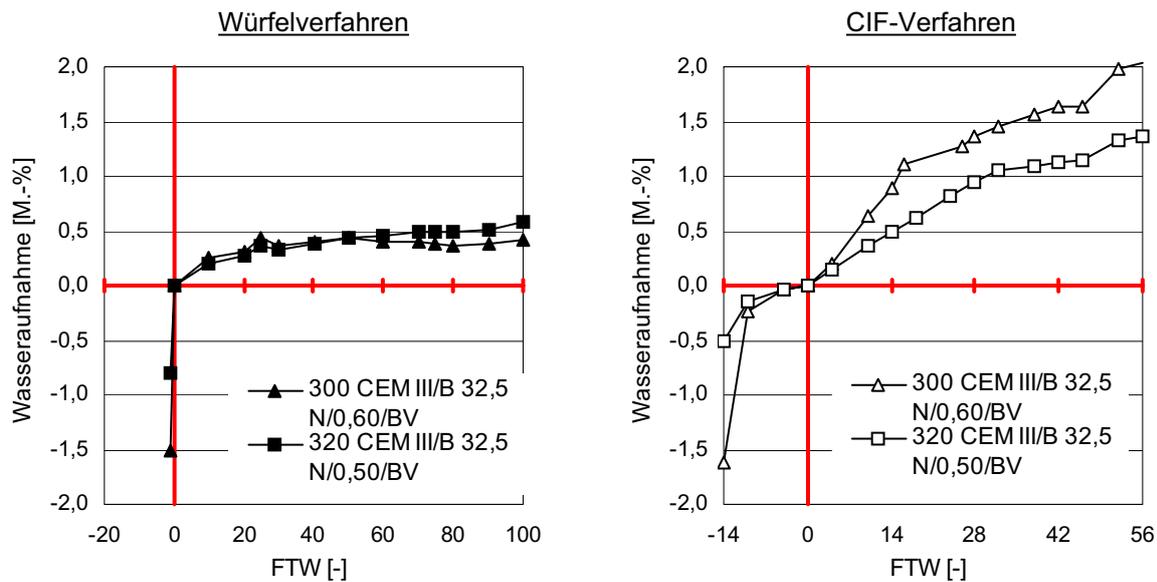


Bild 30: Wasseraufnahme vor und nach der Frostbeanspruchung der Betone mit dem CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA

Tabelle 21: Wassersaugen der Betone mit CEM III/B 32,5 N-LH/HS/N und BV

Beton	insgesamt aufgenommene Wassermenge in M.-%	
	Würfelverfahren	CIF-Verfahren
300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV	1,91	3,66
320 CEM III/B 32,5 N/0,50/BV	1,39	1,88

Die Abwitterungen des Betons „300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV“ waren bei beiden Verfahren im Vergleich zu den anderen Standardbetonen sehr hoch (Bild 31). Auffallend war der abrupte Anstieg der Abwitterungen nach 28 FTW beim CIF-Verfahren.

Der Beton „300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV“ (geprüft nach dem CIF-Verfahren) erfüllt die Annahmekriterien wegen des großen Abfalls des rel. dyn. E-Moduls weder nach [4] noch nach [37] (vgl. auch Tabelle 2, S. 17). Beim Würfelverfahren liegt er aber mit einer Abwitterungsmenge von 4 M.-% weit unter dem Annahmekriterium von 10 M.-%. Ein Abfall um 20 % beim rel. dyn. E-Modul war bei diesen Beton nach 16 FTW zu beobachten, beim Beton „320 CEM III/B 32,5 N/0,50/BV“ wurde dieses Kriterium nach 45 FTW erreicht (vgl. Bild 32 rechts). Beim Würfelverfahren hingegen kam es bei diesem Beton offensichtlich zu keiner inneren Gefügeschädigung. Aus diesen Ergebnissen lässt sich erwartungsgemäß schließen, dass die Probekörper beim CIF-Verfahren wesentlich mehr beansprucht werden als beim Würfelverfahren.

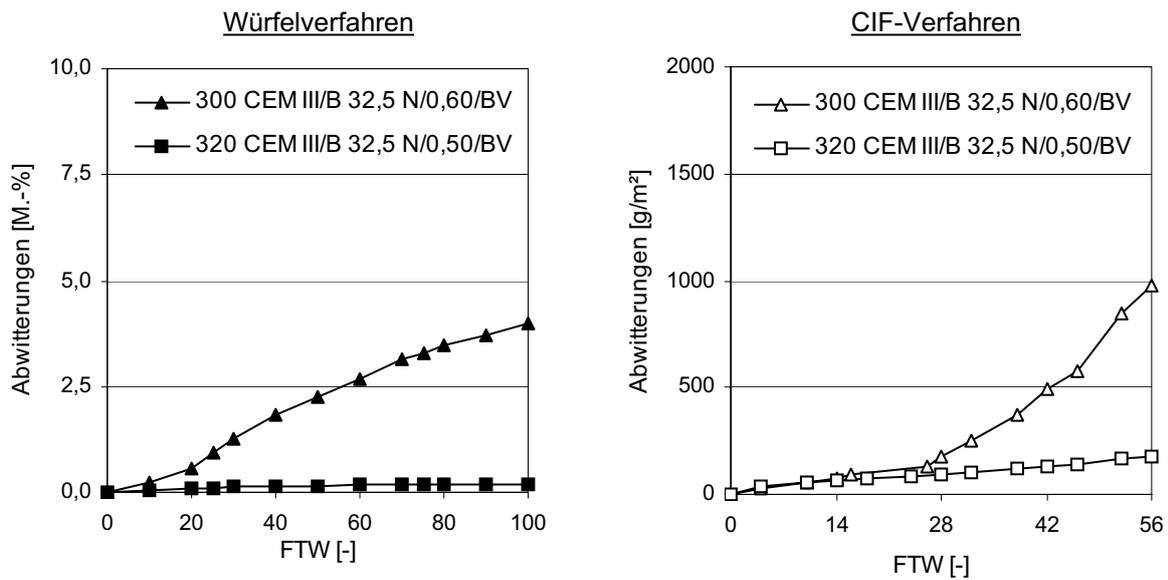


Bild 31: Abwitterungen nach dem Würfel- und dem CIF-Verfahren der Betone mit dem CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA

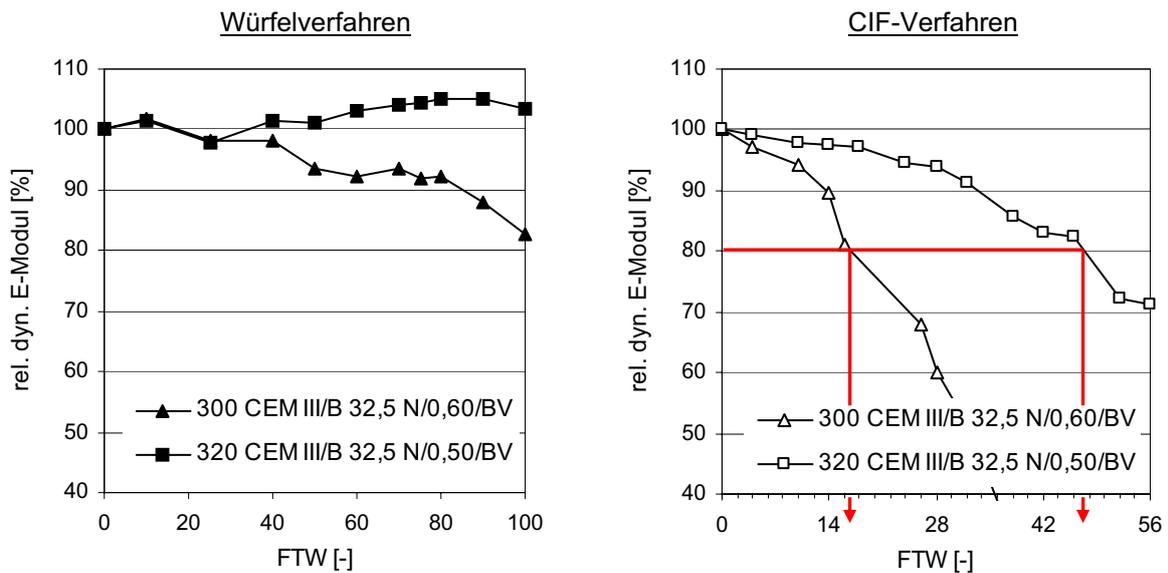


Bild 32: Abfall der rel. dyn- E-Moduln in % nach dem Würfel- und dem CIF-Verfahren der Betone mit dem CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA

- CEM I 32,5 R mit SFA

Es konnte wieder eine stetige Zunahme des Wassergehaltes (bezogen auf die Masse der feuchten Probekörper unmittelbar vor Frostbeginn) beim CIF-Verfahren beobachtet werden, während sich die Wasseraufnahme beim Würfelverfahren einem Endwert näherte (Bild 33). Die stark ansteigende Wasseraufnahme des Betons „270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60“ deutet auf innere Gefügeschäden hin.

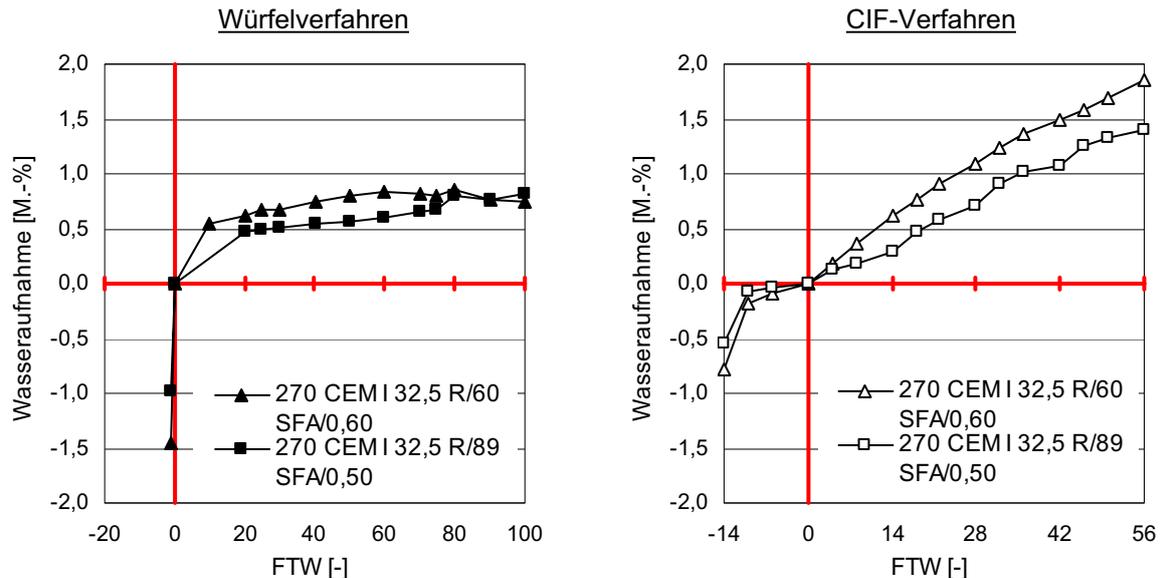


Bild 33: Wasseraufnahme vor und nach der Frostbeanspruchung der Betone mit dem CEM I 32,5 R und SFA

Tabelle 22: Wassersaugen der Betone mit CEM I 32,5 und SFA

Beton	insgesamt aufgenommene Wassermenge in M.-%	
	Würfelverfahren	CIF-Verfahren
270 CEM I 32,5/60 SFA/0,60	2,19	2,62
270 CEM I 32,5/89 SFA/0,50	1,80	1,95

Beim „270 CEM I 32,5/60 SFA/0,60“ waren die Abwitterungen und der Abfall der rel. dyn. E-Moduln bei beiden Verfahren größer als beim „270 CEM I 32,5/89 SFA/0,50“. Der Beton „270 CEM I 32,5/60 SFA/0,60“ erfüllte das Annahmekriterium hinsichtlich der inneren Gefügeschädigung nach dem Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau [4], da bis zum 28. FTW der Abfall des rel. dyn. E-Moduls nur 10 % betrug (vgl. Bild 35, rechts). Nach den Empfehlungen von Auberg [37] wäre er aber in einen geschädigten Beton eingestuft worden, da bis zum 56. FTW der rel. dyn. E-Modul auf 34 % abfiel. Ein Abfall des rel. dyn. E-Moduls um 20 % war bei diesem Beton nach 32 FTW zu beobachten. Auch beim Würfelverfahren

fällt der rel. dyn. E-Modul bei diesem Beton deutlich ab. Allerdings kann es sich hier neben inneren Gefügeschäden auch um eine Schädigung der Betonrandzone handeln (vgl. Bild 35, links).

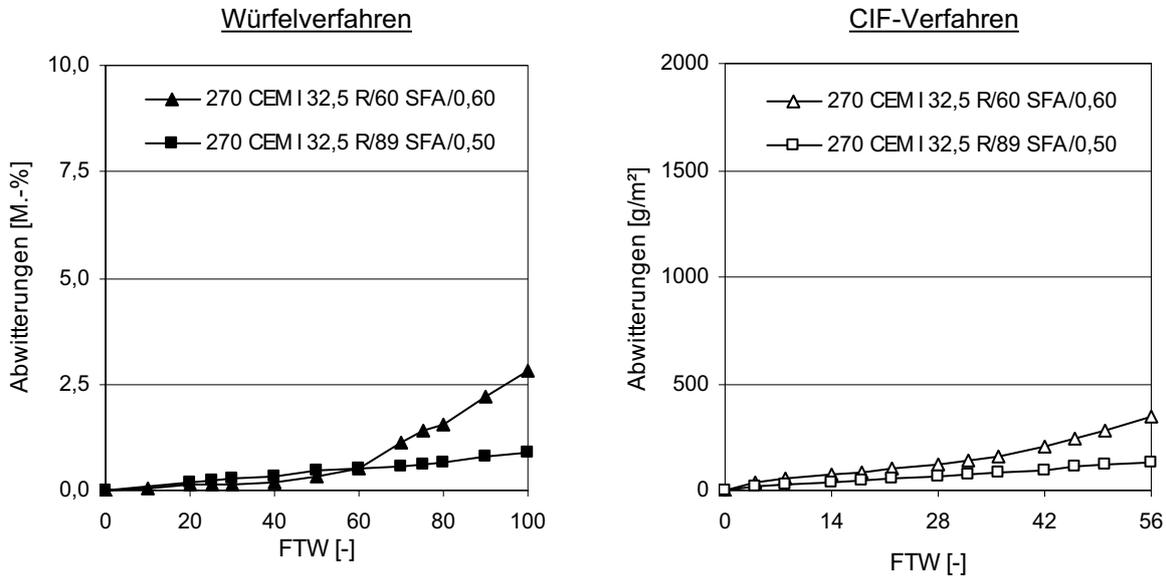


Bild 34: Abwitterungen nach dem Würfel- (links) und dem CIF-Verfahren (rechts) der Betone mit dem CEM I 32,5 R und SFA

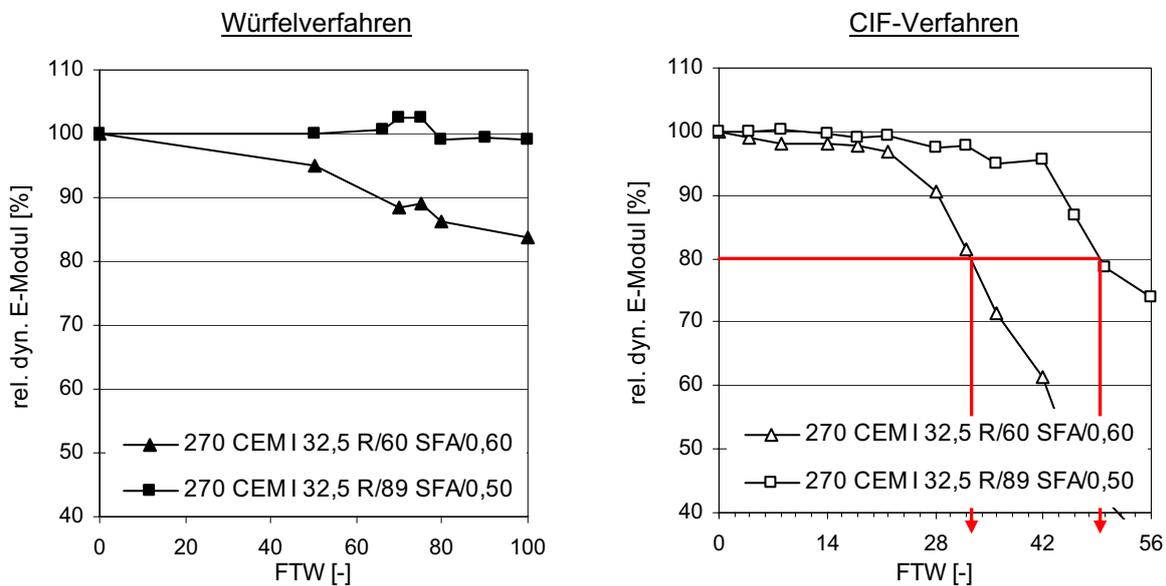


Bild 35: Abfall der rel. dyn. E-Moduln in % nach dem Würfel- und dem CIF-Verfahren der Betone mit dem CEM I 32,5 R und SFA

Beim Beton „270 CEM I 32,5/89 SFA/0,50“ fiel die innere Gefügeschädigung nach 49 FTW so groß aus, dass sie einen Abfall beim rel. dyn. E-Modul um 20 % auslöste. Generell wäre dieser Beton nach den vorgestellten Annahmekriterien [4 und 37] als frostbeständig einzustufen.

- SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48

Bild 36 zeigt die Wasseraufnahme des SVB mit 300 kg/m^3 CEM II/B-S 32,5 R und 220 kg/m^3 Steinkohlenflugasche vor und nach Frostbeanspruchung nach dem Würfel- bzw. CIF-Verfahren. Es war bei beiden Verfahren eine stetige Zunahme des Wassergehaltes im Porengefüge zu beobachten. Das Frostsaugen beim CIF-Verfahren war größer als beim Würfelverfahren. Insgesamt betrug die Wasseraufnahme vor und nach Frostbeginn beim Würfelverfahren 1,66 M.-% und beim CIF-Verfahren 1,98 M.-%.

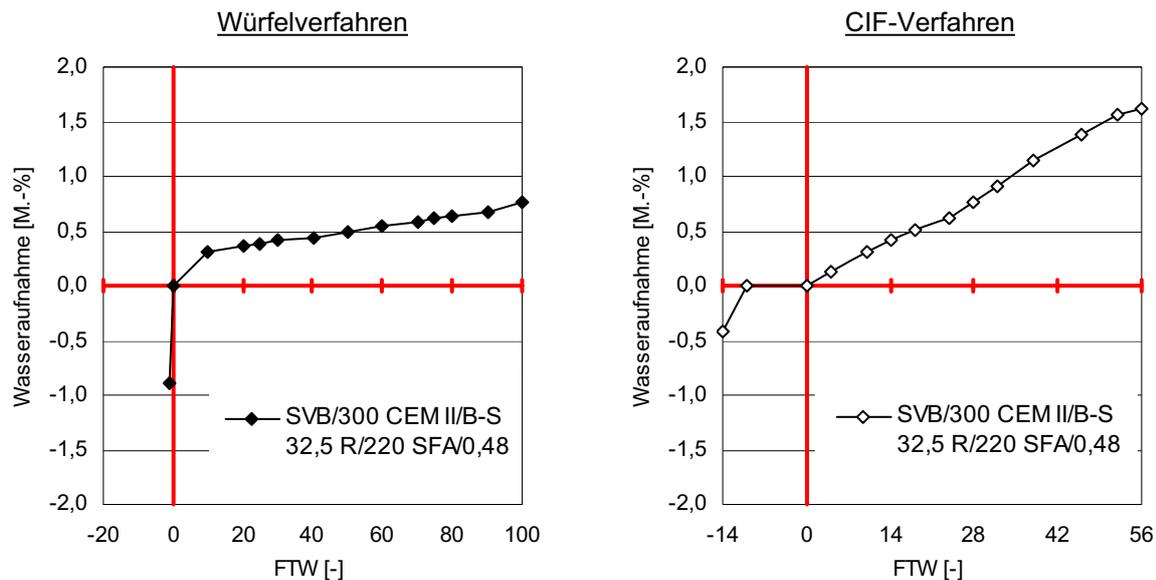


Bild 36: Wasseraufnahme vor und nach der Frostbeanspruchung des selbstverdichtenden Betons SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48

Die Abwitterungen der Probekörper des Würfelverfahrens waren mit 0,14 M.-% nach 100 FTW sehr gering, sie decken sich aber mit Erfahrungen, die bei Zulassungsprüfungen von selbstverdichtenden Betonen gemacht wurden. Auch beim CIF-Verfahren sind die Abwitterungen gering (Bild 37). Auffallend schlecht schnitt im Vergleich zu den Abwitterungen aber der rel. dyn. E-Modul ab. Nach 28 FTW war er beim CIF-Verfahren zwar nur um 3 % gesunken und erfüllte das Annahmekriterium des Merkblattes der Bundesanstalt für Wasserbau [4], nach 56 FTW lag der rel. dyn. E-Modul aber bei 49 % und erfüllte das Abnahmekriterium nach [37] somit nicht mehr (vgl. Bild 38 rechts).

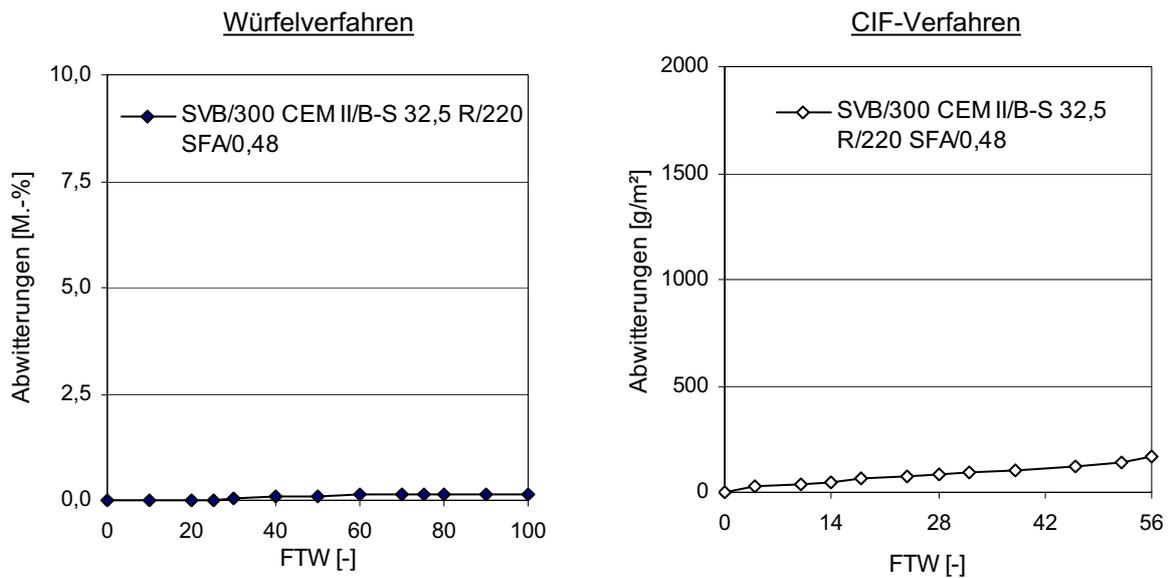


Bild 37: Abwitterungen nach dem Würfel- (links) und dem CIF-Verfahren (rechts) des selbstverdichtenden Betons SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48

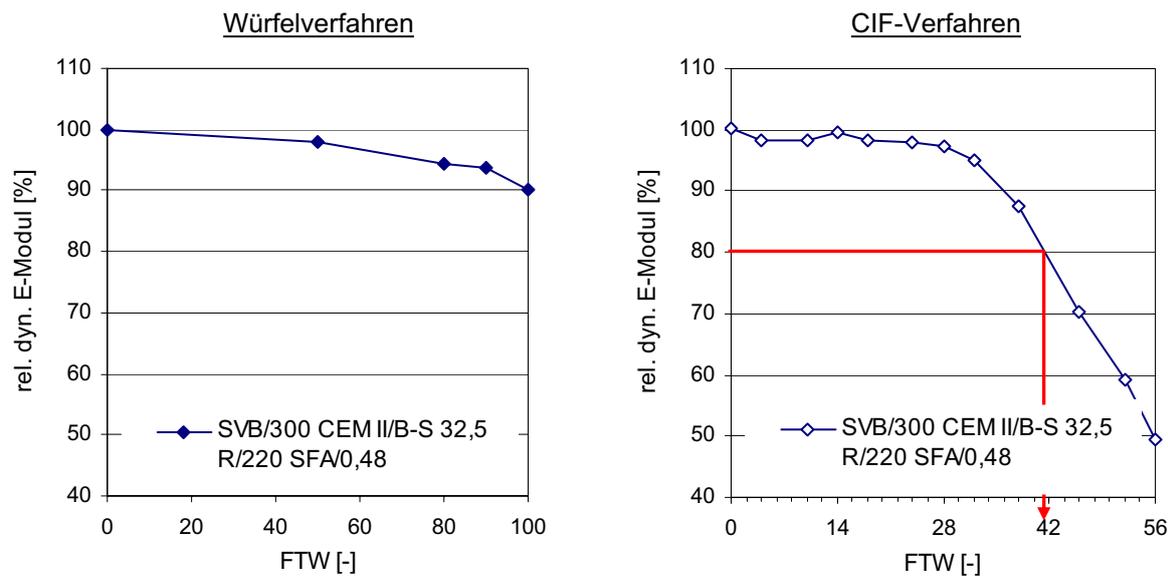


Bild 38: Abfall der rel. dyn. E-Moduln in % nach dem Würfel- und dem CIF-Verfahren des selbstverdichtenden Betons SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48

In der Regel ist das Porenvolumen bei SVB deutlich feiner als bei Normalbetonen, die gerüttelt werden. Beim vorliegenden Beton war im Porensystem nach 28 FTW die kritische Wassersättigung erreicht, so dass es zu einem abrupten Abfall des rel. dyn. E-Moduls kam. Um 20 % ist der rel. dyn. E-Modul nach 41 FTW gefallen (vgl. Bild 38, rechts)

- SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51

Die Wasseraufnahme der Probekörper des SVB mit Kalksteinmehl nach dem Würfel- und CIF-Verfahren sind in Bild 39 dargestellt. Beim Würfelverfahren zeigte sich wieder wie bei den CIF-Probekörpern eine stetige Zunahme des Wassergehaltes. Das hohe Wassersaugen der CIF-Probekörper lag daran, dass die Probekörper nach weniger als 28 FTW innere Gefügeschäden aufwiesen und in die Mikrorisse kapillar Wasser gesaugt wurde.

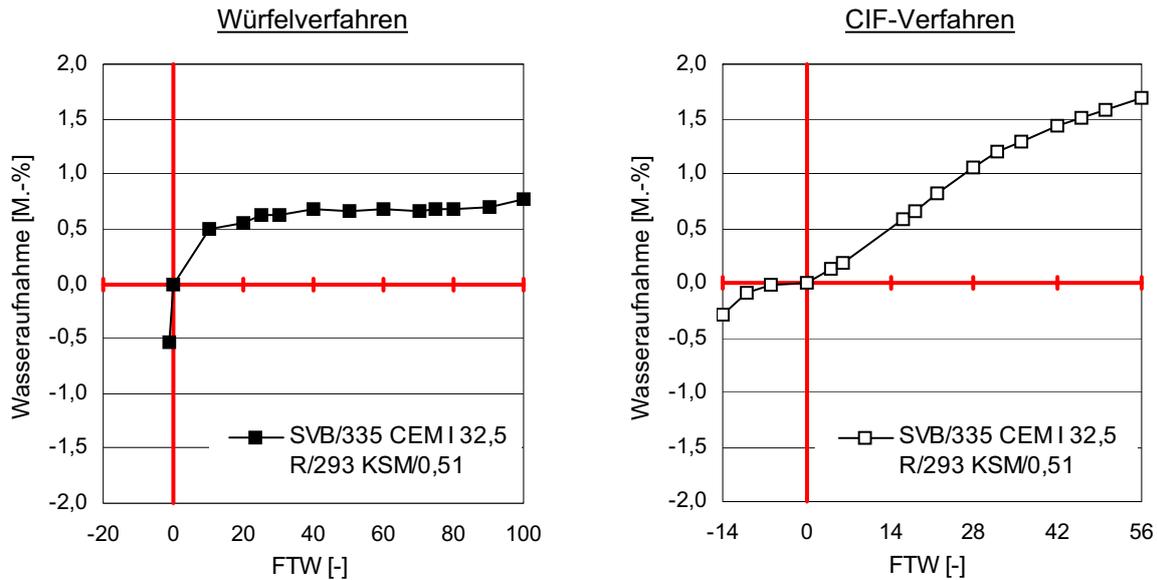


Bild 39: Wasseraufnahme vor und nach der Frostbeanspruchung des selbstverdichtenden Betons SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51

Die Abwitterungen (vgl. Bild 40) fielen bei beiden Verfahren sehr gering aus. Bei den rel. dyn. E-Moduln zeigte sich das bereits bei dem SVB mit SFA beschriebene Bild: der SVB mit KSM erfüllte das Annahmekriterium des Merkblattes der Bundesanstalt für Wasserbau [4], würde aber nach [37] durchfallen, da nach 56 FTW der Abfall des rel. dyn. E-Moduls über 40 % betrug (Bild 41). Ein Abfall von 20 % war nach 36 FTW zu verzeichnen.

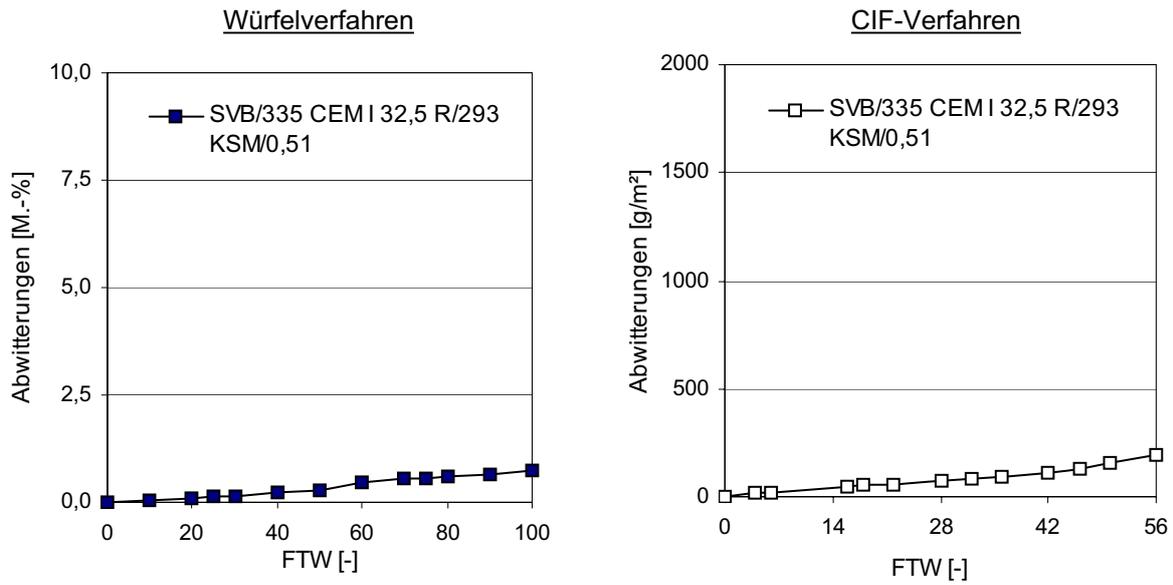


Bild 40: Abwitterungen nach dem Würfel- (links) und dem CIF-Verfahren (rechts) des selbstverdichtenden Betons SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51

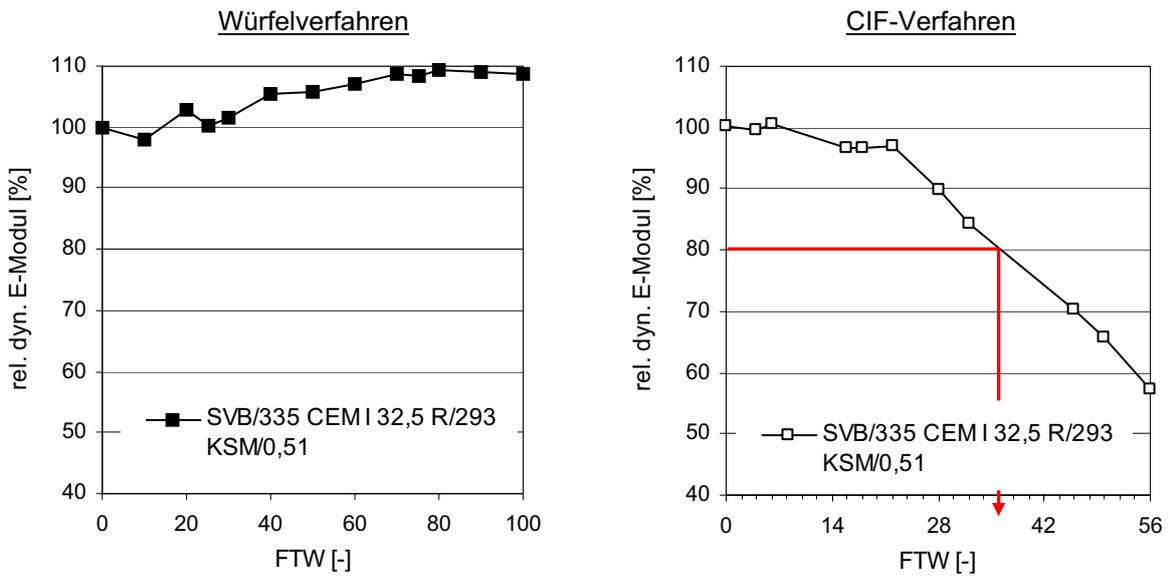


Bild 41: Abfall der rel. dyn- E-Moduln in % nach dem Würfel- und dem CIF-Verfahren des selbstverdichtenden Betons SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51

Das Porenvolumen ist bei selbstverdichtenden Betonen feiner als bei Rüttelbetonen. Offensichtlich hat sich bei dem hier hergestellten SVB die Porenradienverteilung hin zu engeren Porenradien verschoben. So entsteht ein relativ dichter Beton, der nur eine geringe äußere Schädigung aufweist, wegen der vielen kleinen Poren ist die kritische Wassersättigung aber zumindest lokal schneller erreicht als bei einem Beton mit vielen Rüttelporen und größeren Kapillarporen. Die Folge sind innere Gefügeschäden, die abrupt auftreten (Bild 41 rechts). Beim Würfelverfahren kommt es aufgrund der Wassereinlagerung im Porensystem zu einer kürzeren Ultraschalllaufzeit, was eine Erhöhung des rel. dyn. E-Moduls bedingt. Eine innere Schädigung tritt bei diesem Beton bedingt durch die höhere Gefriertemperatur von -15 °C nicht auf. Das Ergebnis beim CIF-Verfahren deckt sich nicht mit den Untersuchungen eines anderen Instituts, bei dem ein SVB mit Kalksteinmehl nach 56 FTW nur einen Abfall des rel. dyn. E-Moduls von 6 % hatte [8, 9].

- MB/240 CEM III/B 32,5/120 SFA/0,55

Auffallend beim Massenbeton war das sehr günstige Abschneiden beim Würfelverfahren (vgl. geringe Abwitterungen; Bild 43) im Gegensatz zum deutlich ungünstigeren Verhalten beim CIF-Verfahren (vgl. höhere Abwitterungen und größerer E-Modul-Abfall (Bild 44)). Trotzdem erfüllt der Beton zumindest das Annahmekriterium des Merkblattes der Bundesanstalt für Wasserbau [4]. Ein Abfall um 20 % beim rel. dyn. E-Modul war nach 32 FTW zu beobachten.

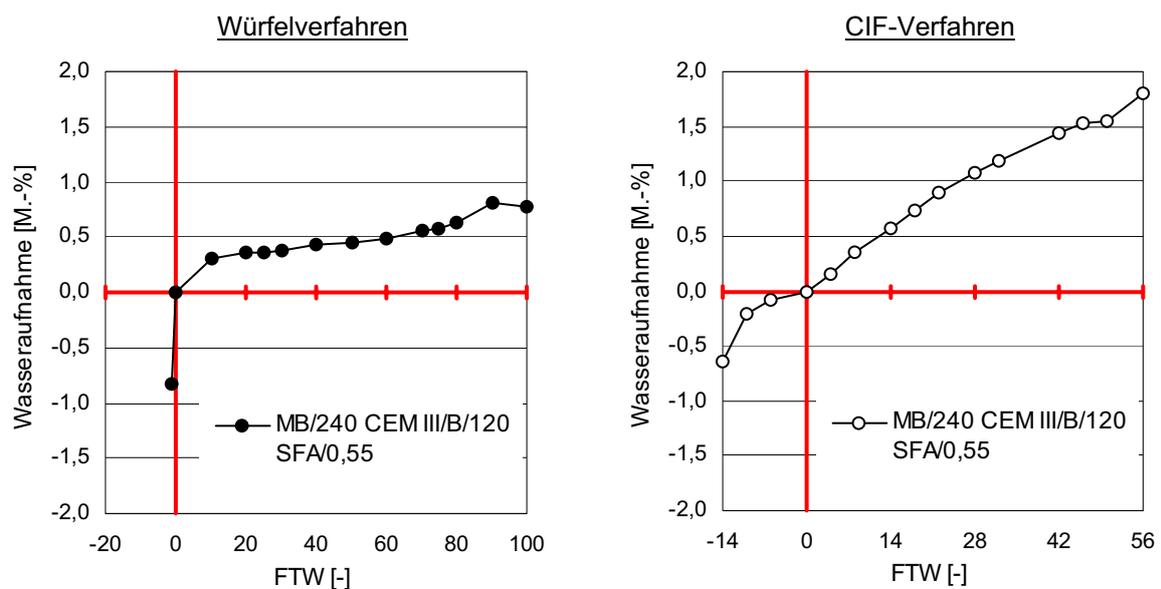


Bild 42: Wasseraufnahme vor und nach der Frostbeanspruchung des MB/240 CEM III/B 32,5/120 SFA/0,55

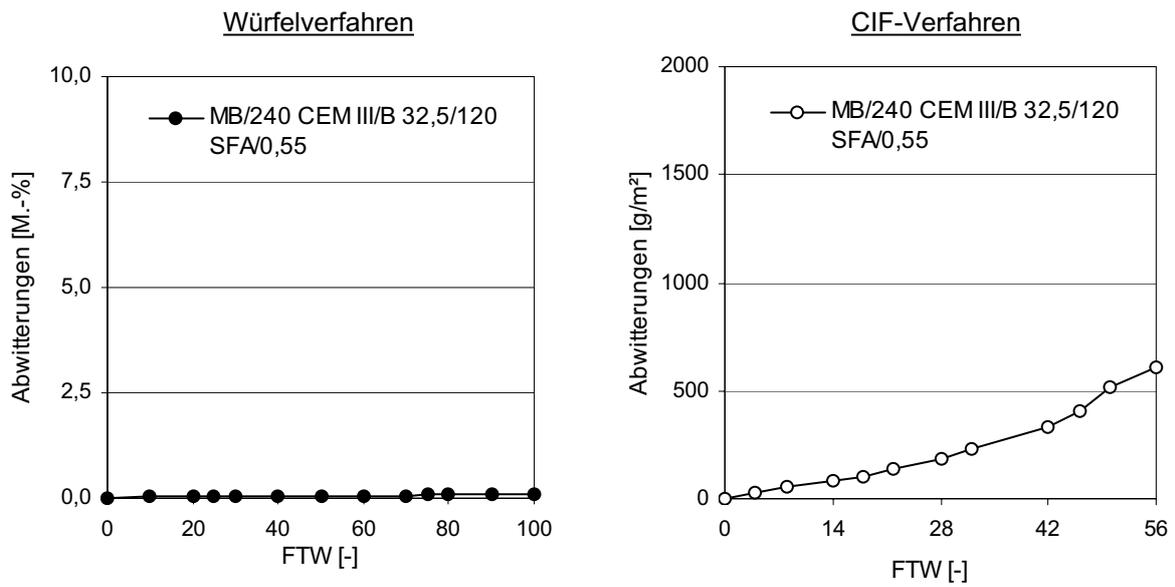


Bild 43: Abwitterungen in g/m² nach dem Würfel- (links) und dem CIF-Verfahren (rechts) des MB/240 CEM III/B 32,5/120 SFA/0,55

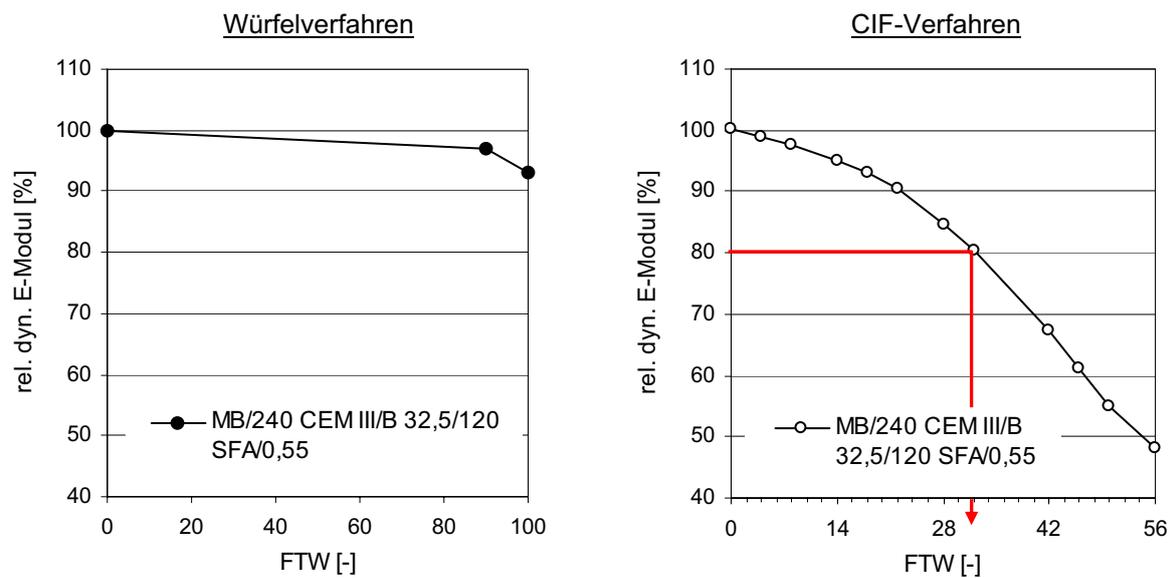


Bild 44: Abfall der rel. dyn. E-Moduln in % nach dem Würfel- und dem CIF-Verfahren des MB/240 CEM III/B 32,5/120 SFA/0,55

- Vergussmörtel w/f=0,1125

Bild 45 zeigt die Wasseraufnahmen von Probekörpern, die nach dem Würfelverfahren bzw. nach dem CIF-Verfahren lagerten. In beiden Fällen waren sie sehr gering, so dass es weder zu nennenswerten Abwitterungen (vgl. Tabelle 17, S. 39) noch zu inneren Gefügeschädigungen kam (vgl. Tabelle 18, S. 41). Dies lag an dem sehr dichten Gefüge des Vergussmörtels.

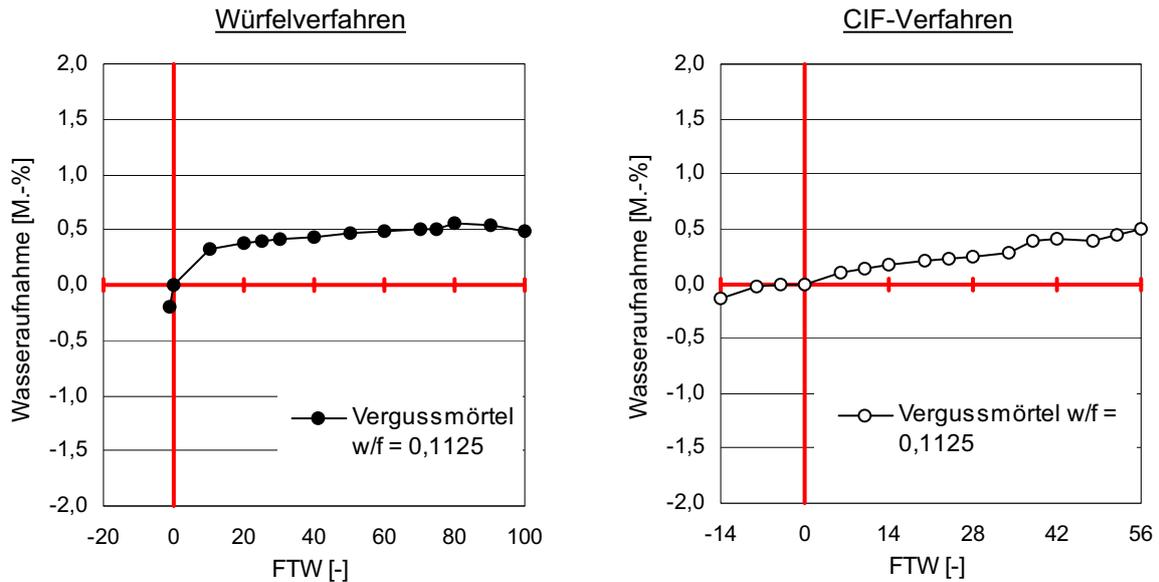


Bild 45: Wasseraufnahme vor und nach der Frostbeanspruchung des Vergussmörtels

5.4 Korrelationen zwischen den Ergebnissen zum Frostwiderstand

Das Versuchsprogramm ermöglicht es fünf Korrelationen zu untersuchen, wobei das Hauptaugenmerk auf der in Bild 46 diagonal, fett gedruckten Korrelation zwischen den Ergebnissen des Würfelverfahrens von Betonen mit 300 kg/m^3 Zement und $w/z = 0,60$ und den Ergebnissen des CIF-Verfahrens von Betonen mit 320 kg/m^3 Zement und $w/z = 0,50$ liegt. Zur besseren Übersicht wurde nachfolgende Systemskizze mit den Kapitelnummern ergänzt, in denen die einzelnen Korrelationen ausgewertet werden.

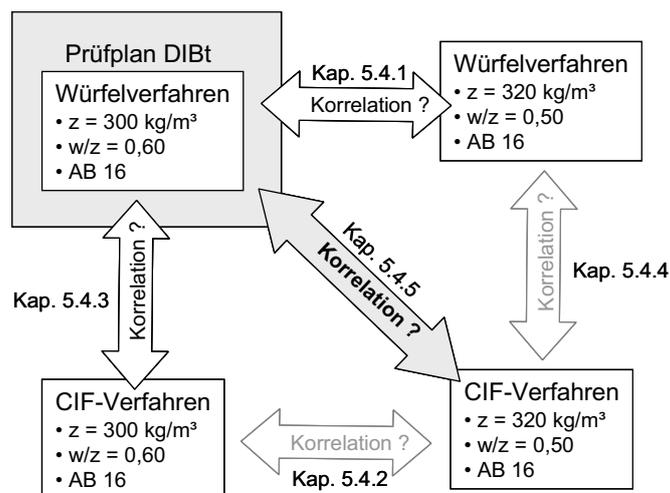


Bild 46: Systemskizze der Versuchsmatrix (Standardbetone nach Prüfplänen)

5.4.1 Betone mit 300 bzw. 320 kg/m^3 Zement – geprüft nach dem Würfelverfahren

Bei allen Standardbetonen sind die Abwitterungen nach 100 FTW bei den Betonen mit einem Zementgehalt von 300 kg/m^3 und einem w/z -Wert von $0,60$ höher als bei Betonen mit einem Zementgehalt von 320 kg/m^3 und einem w/z -Wert von $0,50$ (Bild 47).

Eine Auswertung der Abfälle der rel. dyn. E-Moduln dieser Betone (Bild 48) zeigt, dass das Würfelverfahren ungeeignet ist, um innere Gefügeschädigungen zu beobachten. Bei vier der fünf Betone wurden aufgrund der erhöhten Wassergehalte im Porensystem kürzere Ultraschalllaufzeiten gemessen, was zu höheren rel. dyn. E-Moduln führte. Von Korrelationen, die die rel. dyn. E-Moduln der Probekörper des Würfelverfahrens berücksichtigen, wurde wegen dieser nur wenig aussagekräftigen Ergebnisse in den nachfolgenden Kapiteln abgesehen.

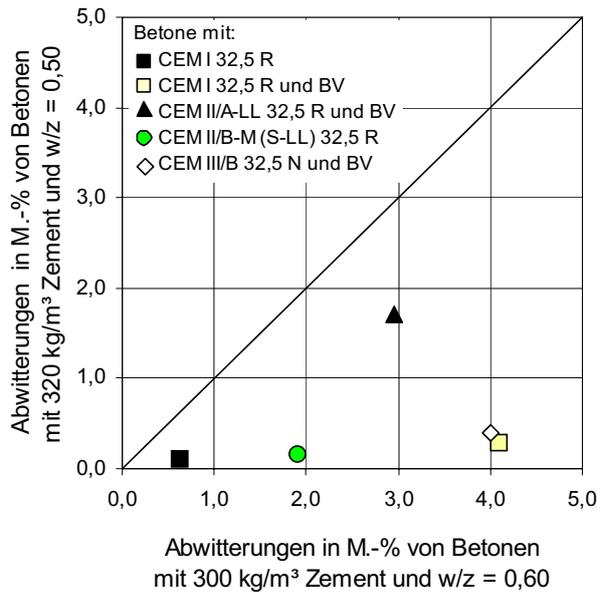


Bild 47: Abwitterungen von Betonen mit 300 bzw. 320 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,60 bzw. 0,50 geprüft nach dem Würfelverfahren

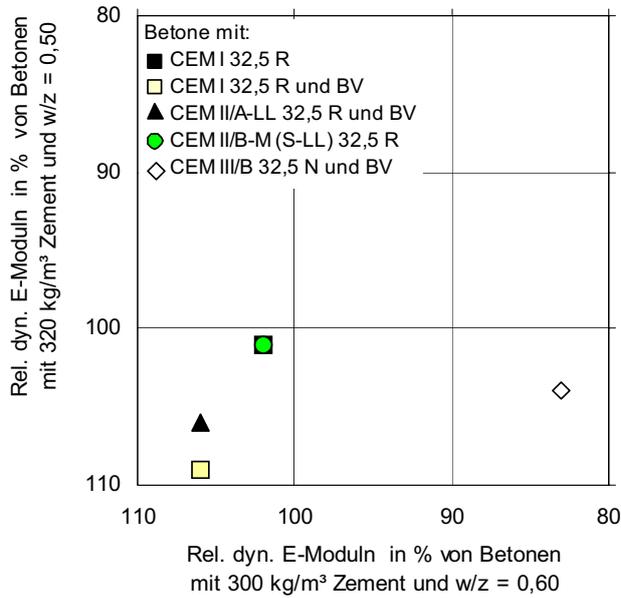


Bild 48: Rel. dyn. E-Moduln von Betonen mit 300 bzw. 320 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,60 bzw. 0,50 geprüft nach dem Würfelverfahren

5.4.2 Betone mit 300 bzw. 320 kg/m³ Zement – geprüft nach dem CIF-Verfahren

Auch beim CIF-Verfahren waren bei allen Standardbetonen die Abwitterungen nach 56 FTW bei den Betonen mit w/z-Wert 0,60 höher als bei Betonen mit w/z-Wert 0,50.

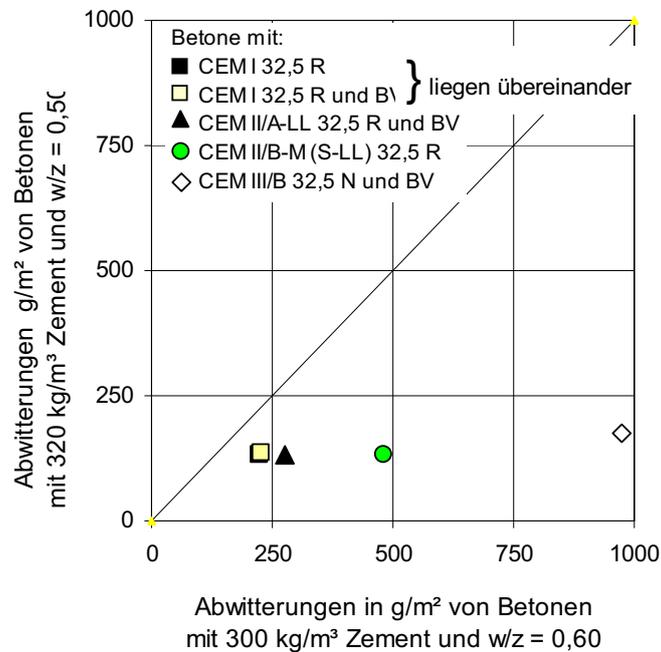


Bild 49: Abwitterungen von Betonen mit 300 bzw. 320 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,60 bzw. 0,50 geprüft nach dem CIF-Verfahren

Auffallend sind die nahezu identischen Abwitterungsmengen aller Betone mit 320 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,50 (Bild 49), während die rel. dyn. E-Moduln bei diesen Betonen bei den unterschiedlichen Zementen variierten (Bild 50). Am schlechtesten schnitten hier bei beiden Betonzusammensetzungen diejenigen mit dem CEM III/B ab.

Es lässt sich wieder erkennen, dass die Betone mit 300 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,60 nach 100 Frost-Tau-Zyklen neben den größeren Abwitterungsmengen auch größere innere Gefügeschäden aufwiesen.

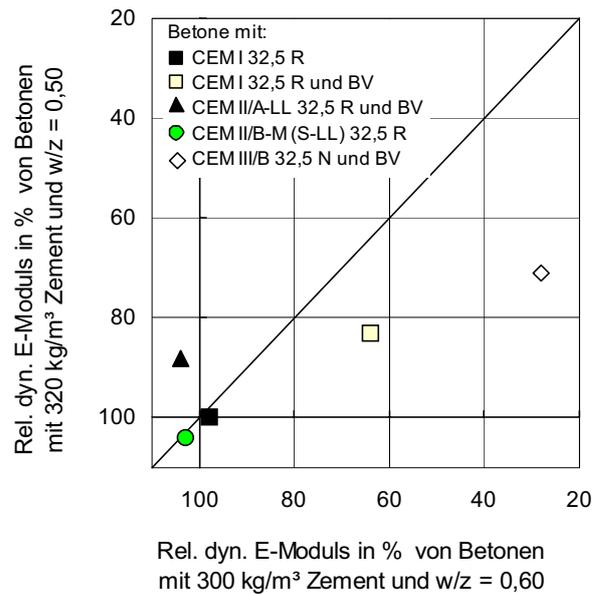


Bild 50: Abfall der rel. dyn. E-Moduln von Betonen mit 300 bzw. 320 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,60 bzw. 0,50 geprüft nach dem CIF-Verfahren

5.4.3 Betone mit 300 kg/m³ Zement – geprüft nach dem Würfel- bzw. CIF-Verfahren

Eine Korrelation zwischen Standardbetonen mit 300 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,60 kann Bild 51 entnommen werden. Betone, die beim Würfelverfahren Abwitterungen im Bereich zwischen 0 und 2,5 M.-% aufwiesen, lagen auch bei den Abwitterungsmengen bei der Prüfung nach dem CIF-Verfahren im untersten Viertel zwischen 0 und 500 g/m². Der Beton mit dem CEM III/B wies nach beiden Verfahren ebenfalls vergleichbar hohe Abwitterungen auf.

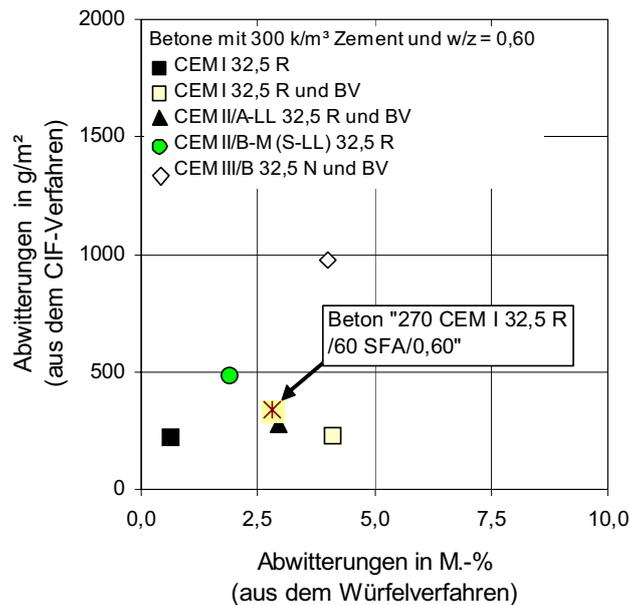


Bild 51: Abwitterungen von Betonen mit 300 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,60 geprüft nach dem Würfel- und CIF-Verfahren

Die Betone mit dem CEM II/A-LL 32,5 R und BV sowie der Beton mit dem CEM I 32,5 R und BV und der „270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60“ mit Steinkohlenflugasche wiesen im Würfelverfahren Abwitterungen zwischen 2,5 und 5,0 M.-% auf. Bei diesen Betonen lagen die Abwitterungen des CIF-Verfahrens zwischen 0 und 500 g/m². Die Schadensmechanismen unterscheiden sich bei beiden Prüfverfahren, so dass eine unterschiedliche Reihung der Abwitterungsmengen beobachtet werden konnte.

Die Korrelation zwischen Abwitterungen beim Würfelverfahren und innerer Gefügeschädigung im CIF-Verfahren ist in nachfolgendem Bild dargestellt. Der Beton mit dem CEM III/B und BV und der steinkohlenflugaschehaltige Beton zeigten so große innere Gefügeschädigungen, dass sie als nicht frostbeständige Betone eingestuft werden müssten. Die Abwitterungen dieser Betone nach dem Würfelverfahren lagen hingegen weit unter dem Annahmekriterium. Es kann an dieser Stelle festgehalten werden, dass eine Beurteilung der inneren Gefügeschädigung nach dem CIF-Verfahren aussagekräftiger ist als eine Beurteilung über die Abwitterungen.

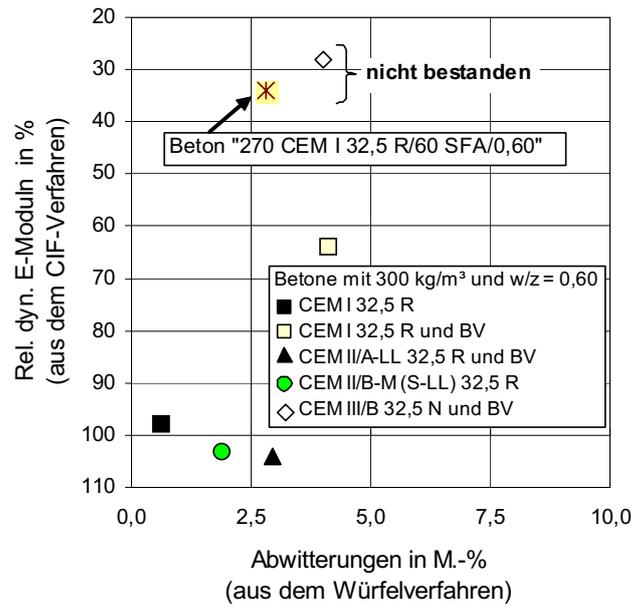


Bild 52: Abwitterungen von Betonen mit 300 kg/m^3 Zement und einem w/z-Wert von 0,60 geprüft nach dem Würfelverfahren und rel. dyn. E-Moduln in % derselben Betone geprüft nach dem CIF-Verfahren

5.4.4 Betone mit 320 kg/m^3 Zement geprüft nach dem Würfel- bzw. CIF-Verfahren

Die Auswertungen der Ergebnisse der Betone mit 320 kg/m^3 Zement zeigen nochmals deutlich, wie unbefriedigend eine Beurteilung des Frostwiderstands nur nach der Abwitterungsmenge ist (Bild 53). Alle Ergebnisse sind in einer vergleichbaren Größenordnung zwischen 0,1 und 0,4 M.-% beim Würfelverfahren und liegen bei rd. 135 g/m^2 beim CIF-Verfahren.

Eine höhere Trennschärfe beim CIF-Verfahren bietet lediglich die Ultraschallmessung, aus der der Abfall des rel. dyn. E-Moduls berechnet wird. In Bild 54 sind hier sogar deutliche Unterschiede bei den Ergebnissen hinsichtlich des Frostwiderstands der einzelnen Betone zu erkennen. Eine Beurteilung des Frostwiderstands sollte also immer die inneren Gefügeschädigungen berücksichtigen.

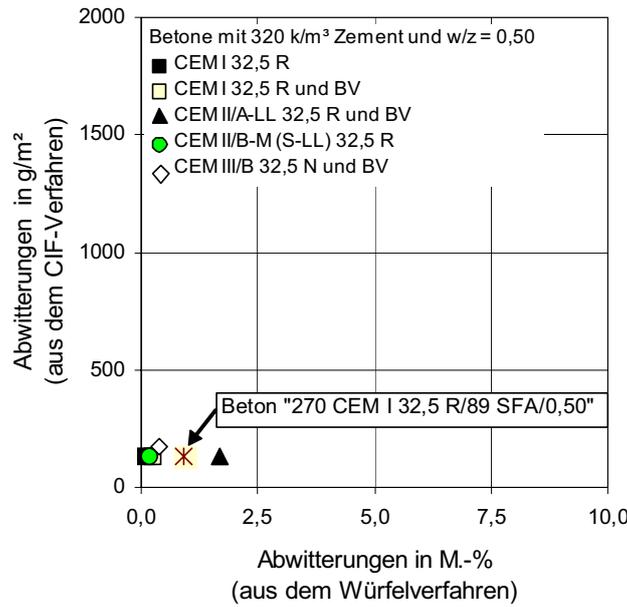


Bild 53: Abwitterungen von Betonen mit 320 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,50 geprüft nach dem Würfel- bzw. nach dem CIF-Verfahren

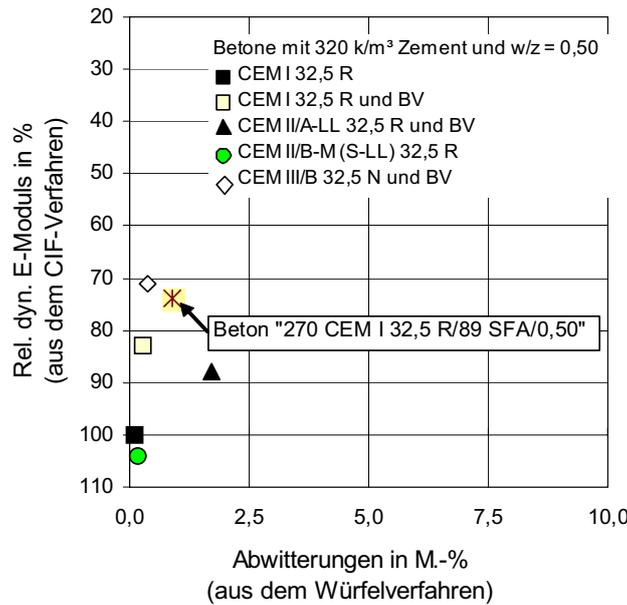


Bild 54: Abwitterungen von Betonen mit 320 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,50 geprüft nach dem Würfelverfahren und rel. dyn. E-Moduln in % derselben Betone geprüft nach dem CIF-Verfahren

5.4.5 Betone mit 300 kg/m³ Zement geprüft nach dem Würfelverfahren und Betone mit 320 kg/m³ Zement geprüft nach dem CIF-Verfahren

Hauptaugenmerk der Auswertung lag darin, eine Korrelation der Ergebnisse der Untersuchungen nach dem Würfelverfahren mit denen des CIF-Verfahrens zu finden. In nachfolgendem Bild sind die Abwitterungsmengen dargestellt, die an Betonen mit 300 kg/m³ Zement und w/z-Wert 0,60 nach dem Würfelverfahren gemessen wurden (x-Achse) sowie die Abwitterungen der Betone mit 320 kg/m³ Zement und w/z-Wert 0,50 nach dem CIF-Verfahren (y-Achse). Zusätzlich wurden im Diagramm alle Sonderbetone mit aufgenommen, deren Frostwiderstände sowohl mit dem Würfel- als auch mit dem CIF-Verfahren untersucht wurden. Der steinkohlenflugaschehaltige Beton (Stern-Symbol) wurde in den beiden nachfolgenden Bildern folgendermaßen ausgewertet: Die Ergebnisse des Betons „270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60“ aus dem Würfelverfahren wurden in Abhängigkeit der Ergebnisse des Betons „270 CEM I 32,5 R/89 SFA/0,50“ aus dem CIF-Verfahren dargestellt.

Um eine Korrelation zwischen den Ergebnissen beider Prüfverfahren graphisch darzustellen, wurden die Annahmekriterien beider Verfahren in vier Bereiche (I bis IV) eingeteilt.

Wie bereits in den vorhergehenden Auswertungen festgestellt, liegen die Abwitterungsmengen beim CIF-Verfahren mit Ausnahme des Massenbetons „MB/240 CEM III/B/120 SFA/055“ im Bereich I sehr nah beieinander. Auch die Abwitterungsmengen nach dem Würfelverfahren sind gering und liegen im Bereich I und II. Eine Korrelation ist zwischen den Ergebnissen aber nicht zu erkennen.

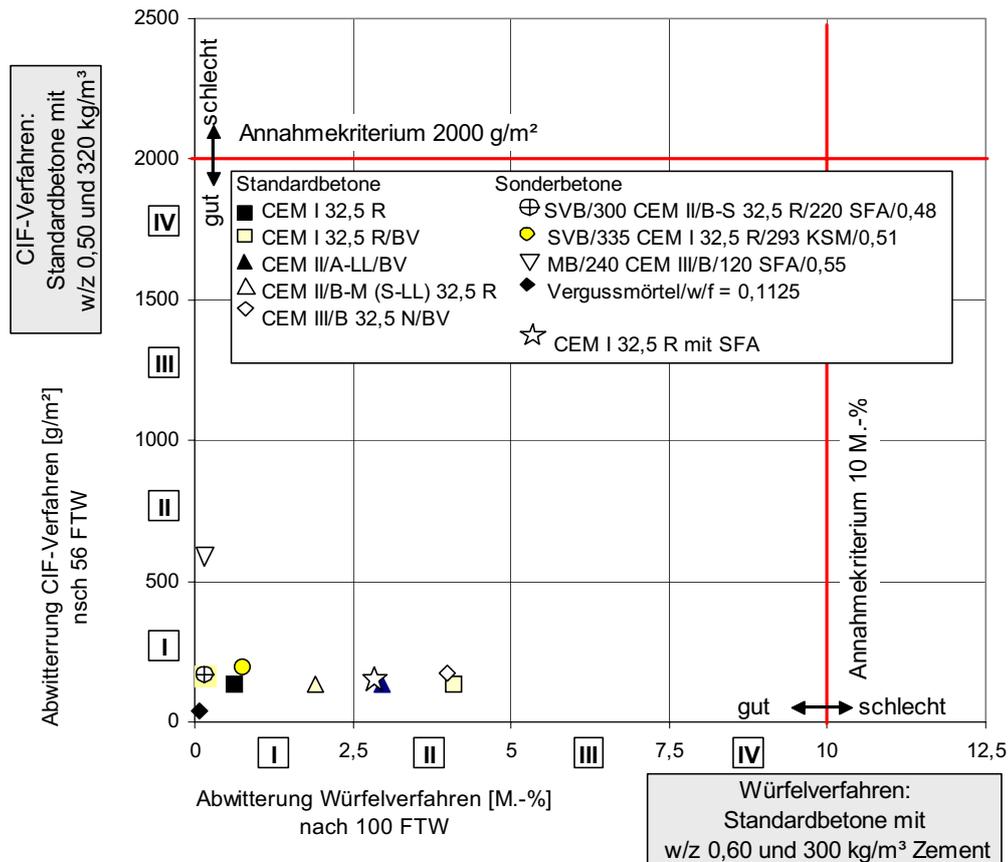


Bild 55: Abwitterungen von Betonen mit 300 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,60 (Würfelverfahren) bzw. 320 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,50 (CIF-Verfahren) sowie der SFA-haltigen Betone und der Sonderbetone

Da bei den vorherigen Auswertungen aber festgehalten wurde, dass eine Beurteilung des Frostwiderstands über die innere Gefügeschädigung aussagekräftiger ist, soll als nächstes die Möglichkeit einer Korrelation zwischen den Abwitterungen nach dem Würfelverfahren und dem Abfall der rel. dyn. E-Moduln nach dem CIF-Verfahren in Betracht gezogen werden (Bild 56). Beurteilt wurde der Frostwiderstand nach 100 FTW beim Würfelverfahren und nach 56 FTW beim CIF-Verfahren.

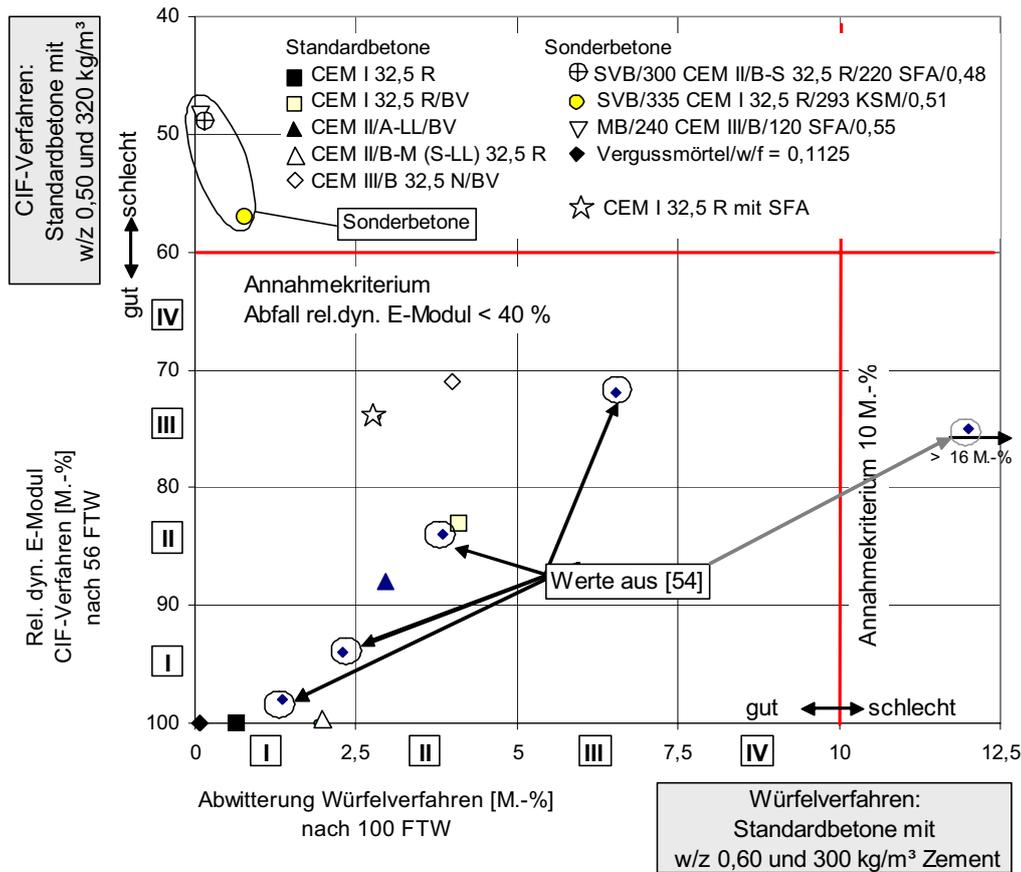


Bild 56: Abwitterungen von Betonen mit 300 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,60 (Würfelfverfahren - 100 FTW) bzw. rel. dyn. E-Moduln von Betonen mit 320 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,50 (CIF-Verfahren – 56 FTW) sowie der SFA-haltigen Betone und der Sonderbetone

Bei den 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“.

Bei den Betonen mit Steinkohlenflugasche ist wieder zu beachten, dass die Abwitterungen vom Würfelfverfahren des Betons mit 60 kg/m³ SFA (w/z = 0,60) mit der inneren Gefügeschädigung der CIF-Probekörper des Betons mit 89 kg/m³ SFA (w/z = 0,50) verglichen werden. Hier liegt das Ergebnis des Würfelfverfahrens im Bereich II, das Ergebnis der inneren Gefügeschädigung im Bereich III (Stern-Symbol). Die große innere Gefügeschädigung wird offensichtlich durch das Porensystem bedingt. Bei Betonen mit großen Mengen Steinkohlenflugasche ist das Porensystem feiner und dichter, so dass bei Erreichen des kritischen Wassergehaltes dem Eis weniger Expansionsraum zur Verfügung steht und es zu inneren Gefügespannungen und Mikrorissen kommt.

Um eine Korrelation des Würfelverfahrens mit dem CIF-Verfahren deutlicher zu machen, wurden in Bild 56 Ergebnisse ausgewertet und aufgenommen, die den Unterlagen der PG „Frost- und Frost-Tausalzprüfung“ (SVA „Betontechnologie“) [54] entnommen worden sind. Werden diese Betone berücksichtigt, so kristallisiert sich eine Korrelation heraus, die folgendermaßen aussehen könnte: Betone, deren Abwitterungsmengen nach dem Würfelverfahren dem Annahmehbereich I zugeordnet werden können (0 bis 2,5 M.-%), 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 Annahmehbereiche eingeteilt werden (vgl. nachfolgende Tabelle).

Tabelle 23: Einteilung der Abnahmekriterien des Würfel- und CIF-Verfahrens in vier Annahmehbereiche

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

Nach den Untersuchungen aus [54] gilt diese Korrelation aber nicht mehr für Betone mit sehr hohen Kalksteingehalten (über 35 %). Auch bei den Untersuchungen dieses Vorhabens ist bei mehlkornreichen Betonen keine Abhängigkeit zu finden. Dies wird deutlich bei den Sonderbetonen mit viel Steinkohlenflugasche (SVB mit SFA und Massenbeton) oder mit Kalksteinmehl (SVB mit KSM). 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 als nicht frostbeständige Betone eingestuft werden (vgl. Bild 56, Ellipse).

Wenn die Sonderbetone, die nach dem CIF-Verfahren geprüft wurden, aber nach 28 FTW beurteilt werden, liegen die ermittelten rel. dyn. E-Moduln über dem Annahmekriterium. Bild 57 zeigt wieder eine Korrelation zwischen den Abwitterungen nach dem Würfelverfahren und dem Abfall der rel. dyn. E-Moduln nach dem CIF-Verfahren, allerdings diesmal jeweils nach der halben Prüfzeit, d.h. nach 50 bzw. 28 FTW.

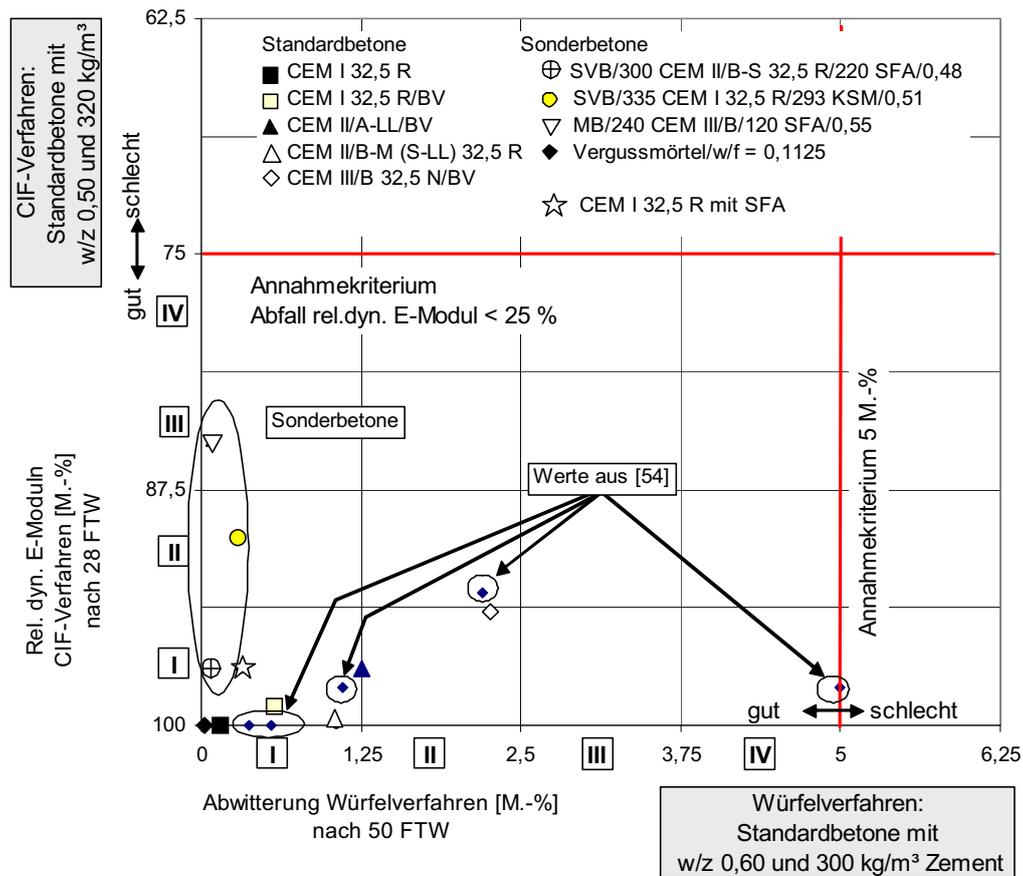


Bild 57: Abwitterungen von Betonen mit 300 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,60 (Würfelverfahren - 50 FTW) bzw. rel. dyn. E-Moduln von Betonen mit 320 kg/m³ Zement und einem w/z-Wert von 0,50 (CIF-Verfahren - 28 FTW) sowie der SFA-haltigen Betone und der Sonderbetone

Auch bei einer Gegenüberstellung der Ergebnisse nach 50 FTW (Würfel-Verfahren) bzw. 28 FTW (CIF-Verfahren) ist eine Korrelation bei den Standardbetonen zu erkennen (vgl. Bild 57). Die meisten Ergebnisse liegen im Bereich „I“, d.h. beim Würfelverfahren waren nur sehr geringe Abwitterungsmengen zu beobachten und beim CIF-Verfahren ein nur geringer Abfall der rel. dyn. E-Moduln. Zwar widersprechen die Ergebnisse der stark mehlkornreichen Sonderbetone dieser Korrelation, da der Abfall der rel. dyn. E-Moduln (vgl. Ellipse im Bild) bezogen auf die Abwitterungen nach 50 FTW beim Würfelverfahren groß ist, es ist aber dennoch festzuhalten, dass insbesondere diese Sonderbetone bei einer Auswertung über das CIF-Verfahren nach 28 FTW sicher in frostbeständige Betone eingestuft werden können.

Die Auswertung der Anzahl der FTW, bei denen ein Abfall des rel. dyn. E-Modul von 20 % zu beobachten war, könnte zukünftig auch ein Annahmekriterium sein. Die drei Sonderbetone wiesen hier nach 41 FTW (SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48), 36 FTW (SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51) bzw. 32 FTW (MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55) einen Abfall dieser Größe auf. Aufgrund der linearen Abfälle der Kurvenverläufe der rel. dyn. E-Moduln, wäre es durchaus möglich, ein Annahmekriterium durch lineare Interpolation unter Einbeziehung des Annahmekriteriums des Merkblattes der Bundesanstalt für Wasserbau festzulegen. Hier wäre dann zu fordern, dass der Beton erst nach dem 22. FTW einen Abfall beim rel. dyn. E-Modul von 20 % haben darf.

Festzuhalten ist, dass bei den Standardbetonen nach der vorliegenden Datenmenge eine Korrelation hinsichtlich der beiden Prüfverfahren besteht. Um diese zu stützen, sollten aber noch weitere Untersuchungen folgen.

6 Zusammenfassung

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.

Beim Nachweis des Frostwiderstands im Rahmen von Zulassungsverfahren für Bindemittel wird die zu prüfende Betonrezeptur durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) vorgegeben. In den derzeit gültigen Prüfplänen wird der Nachweis des Frostwiderstands an einem Beton mit einem Wasserzementwert von 0,60 geführt. Der Zementgehalt liegt bei 300 kg/m^3 . Im Rahmen von Zulassungsverfahren für Steinkohlenflugaschen (SFA) hat die zu prüfende Betonrezeptur einen Zementgehalt von 270 kg/m^3 und einen SFA-Gehalt von 60 kg/m^3 ($w/(z+0,4 \cdot f) = 0,60$).

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^3 (vgl. Tabelle 1) bzw. der Beton, der zusätzlich Steinkohlenflugasche enthielt, einen Zementgehalt von 270 kg/m^3 und einen SFA-Gehalt von 60 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 kg/m^3 gewählt.

Bei Betonen mit SFA kann nach der Norm der Mindestzementgehalt bei 270 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.

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.

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 die Luftporengehalte dann im Bereich zwischen $1,5 \pm 0,3$ Vol.-% lagen. Die Sonderbetone waren ihren Anforderungen entsprechend verarbeitbar.

Druckfestigkeit

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

Frostwiderstand

Der Frostwiderstand wurde nach dem Würfelverfahren und nach dem CIF-Verfahren untersucht. Folgende Ergebnisse können festgehalten werden:

- Beim Würfelverfahren wurden die Abwitterungen in M.-% sowie der rel. dyn. E-Moduln bestimmt. Nach 100 FTW variierten die Abwitterungen zwischen 0,07 und 4,1 M.-%, die Änderungen der rel. dyn. E-Moduln lagen zwischen + 9 und – 17 %.
- Beim CIF-Verfahren lagen die Abwitterungen nach 56 FTW zwischen 39 und 975 g/m^2 und die Änderungen der rel. dyn. E-Moduln zwischen + 4 und – 72 %.

Darüber hinaus wurden bei den Untersuchungen mit den beiden Prüfverfahren folgende Beobachtungen gemacht:

- Bei allen Standardbetonen waren die Abwitterungen bei Betonen mit einem Zementgehalt von 300 kg/m^3 und einem w/z -Wert von 0,60 höher als bei Betonen mit einem Zementgehalt von 320 kg/m^3 und einem w/z -Wert von 0,50. Dies gilt sowohl für das Würfel- als auch für das CIF-Verfahren.

- Beim Würfelverfahren lagen die Abwitterungen nach 100 FTW nicht über 5 M.-%, das Annahmekriterium von 10 M.-% Abwitterungsmenge wurde also von allen Betonen erfüllt.
- Auch beim CIF-Verfahren lagen die Abwitterungen nach 56 FTW stets weit unter dem Annahmekriterium von 2000 g/m². Die Ergebnisse zeigten, dass eine Beurteilung des Frostwiderstands über die inneren Gefügeschäden wesentlich aussagekräftiger ist als die Auswertung der Abwitterungen.
- Darüber hinaus zeigten die Ergebnisse, dass eine Beurteilung der inneren Gefügeschädigung über die Messung der Ultraschalllaufzeit nach dem CIF-Verfahren wiederum wesentlich aussagekräftiger war als eine Messung der Ultraschalllaufzeit an Würfeln, die nach dem Würfelverfahren geprüft wurden.

Hauptaugenmerk der Auswertungen lag darin, eine Korrelation der Ergebnisse der Untersuchungen nach dem Würfelverfahren (von Betonen mit $w/ = 0,60$ und Zementgehalten von 300 kg/m³) mit denen des CIF-Verfahrens (von Betonen mit $w/ = 0,50$ und Zementgehalten von 320 kg/m³) zu finden. Bei allen Standardbetonen ist eine Korrelation zwischen den Abwitterungsmengen der Würfel und der inneren Gefügeschädigung der CIF-Probekörper zu erkennen. Die Untersuchungen bestätigen somit erste Auswertungen des PG „Frost- und Frost-Tausalzprüfung“ der SVA „Betontechnologie“ hinsichtlich einer Korrelation. Nach dieser Korrelation könnten die insgesamt akzeptierten Abwitterungsmengen nach dem Würfelverfahren in vier Bereiche eingeteilt werden, die dann wiederum entsprechenden Annahmebereichen der Änderungen der rel. dyn. E-Moduln nach dem CIF-Verfahren zugeordnet werden:

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

Bei sehr mehlkornreichen Betonen, wie es bei den Sonderbetonen dieses Forschungsvorhabens der Fall war, besteht diese Korrelation aber nicht. Die Abwitterungsmengen waren bei den vorliegenden mehlkornreichen Sonderbetonen beim Würfelverfahren sehr gering, so dass diese als frostbeständig eingestuft werden würden. Das in diesen Betonen vorhandene Porensystem war für die Transportmechanismen, die sich während des CIF-Verfahrens einstellten, aber 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, so wie sie das Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ der Bundesanstalt für Wasserbau vorsieht, können diese mehlkornreichen Sonderbetone aber sicher in frostbeständige Betone eingestuft werden.

7 Schlussfolgerungen

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

Darüber hinaus werden beim CIF-Verfahren dem Beton aufgrund der tieferen Gefrier-temperatur offensichtlich höhere innere Gefügeschäden zugeführt als beim Würfelverfahren. Diese höhere Beanspruchung sollte bei der Beurteilung des Frostwiderstands über ein Annahmekriterium bei der Prüfung von mehlkornreichen Sonderbetonen mit einem sehr dichten Porengefüge unbedingt berücksichtigt werden.

Die vorliegenden Untersuchungen machen deutlich, dass bei Sonderbetonen eine Beurteilung nach dem Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau, das als Abnahmekriterium einen Abfall des rel. dyn. E-Moduls von max. 25 % nach 28 FTW vorsieht, sinnvoll ist.

Grundsätzlich zeigen die Ergebnisse die Notwendigkeit auf, ein Annahmekriterium für die Prüfung des Frostwiderstands nach dem CIF-Verfahren festzulegen, um den Frostwiderstand von Beton klassifizieren zu können.

8 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] *Setzer M. J.*: Prüfvorschrift CIF-Test, Testmethode zur Bestimmung des Frostwiderstandes von Beton.
- [4] Merkblatt „Frostprüfung von Beton“, Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe, Dezember 2004. Eigenverlag; Karlsruhe, Hamburg, Ilmenau 2004.
- [5] Prüfplan für die Zulassungsprüfung von Portlandkompositzement CEM II/B-M, Fassung Januar 2003; Deutsches Institut für Bautechnik; Berlin 2003.
- [6] DIN 1045:1988-07: Beton und Stahlbeton – Bemessung und Ausführung; Beuth Verlag GmbH; Berlin 1988.
- [7] *Friebert, M.; Stark, J.*: Selbstverdichtenden Beton – Stoffliche Aspekte der Dauerhaftigkeit, Kurzbericht zum Forschungsbericht (DBV-Nr. 235 / AiF-Vorhaben Nr. 13418 BR), http://gonzo.uni-weimar.de/~fib/forschung/berichte/Kurzbericht_Friebert.doc.
- [8] *Budelmann, H.; Hariri, K.*: Hightech Betontechnologie (SVB) beim Phaeno Science Center, Tiefbau %/2004, S. 282.-287.
- [9] *Budelmann, H.; et. al.*: Das Science Center „Phaneo“, Betontechnologische Wege zur Umsetzung exzellenter Architektur mit Selbstverdichtenden Beton, Beton- und Stahlbeton 99, Heft 1.
- [10] *Siebel E.*: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton – Beurteilung mittels Würfelverfahren; Beton 42, Seiten 496 – 501, 1992.
- [11] *Schießl P., Brandes Chr.*: Streuung der Ergebnisse von Frost- und Frost-Tausalz-Prüfverfahren (Literaturauswertung), Forschungsbericht, München 2002.
- [12] DIN 1045-2:2001-07: Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2001.
- [13] Zulassungs- und Überwachungsgrundsätze – Anorganische Betonzusatzstoffe, Fassung Oktober 2002; Deutsches Institut für Bautechnik; Berlin 2002.
- [14] *Feldrappe, V.*: Zum Frostwiderstand gefügedichter Betone mit geringen Wasserzementwerten, Dissertation, TU Braunschweig: IBMB, 2006, <http://www.digibib.tu-bs.de/?docig=00014507>.
- [15] *Setzer, M.J.*: Einfluß des Wassergehaltes auf die Eigenschaften des erhärteten Betons. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 280 (1977).
- [16] *Setzer, M.J.; Auberg, R.; Hartmann, V.*: Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstands von Transportbeton. Schriftenreihe des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie Heft 11 (1999); S. 12.

- [17] *Härdtl, R.*: Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung von Steinkohleflugasche und ihr Einfluß auf die Betoneigenschaften. DAFStb, Heft 448, Beuth Verlag (1995).
- [18] *Okazawa, S.; Umezawa, K.; Tanaka, Y.*: A New Polycarboxylate Based Polymer: Physical Properties of Concrete. Concrete 2000: Economic and durable construction through excellence. Vol. II: Proceedings held at the University of Dundee 1993, S.: 1813-1824.
- [19] *Weigler, H.; Karl, S.*: Beton. Arten – Herstellung – Eigenschaften. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2001.
- [20] *Hilsdorf, H.K.*: Austrocknen und Schwinden von Beton. Stahlbetonbau-Berichte aus Forschung und Praxis. Verlag Ernst Sohn, Berlin (1969), S. 17-30.
- [21] *Powers, T.C.; Copeland, L.E.*: Capillary continuity and discontinuity in cement pastes. In: Portland Cement Association (1959), *Bulletin Nr. 110*.
- [22] *Jungwirth, D.; Bayer, E.; Grübl, P.*: Dauerhafte Betonbauwerke. Substanzerhaltung und Schadensvermeidung in Forschung und Praxis. Beton-Verlag, Düsseldorf 1986.
- [23] *Powers, T.C.*: Structure and physical properties of hardened portland cement paste. In: Journal of the American Ceramic Society Vol. 41 (1958), S. 1-6.
- [24] *Setzer, M.J.; Auberg, R.*: Testing of Freeze Thaw and Deicing Salt Resistance. Second International Workshop on Concrete Block Paving, Oslo (1994).
- [25] *Beddoe, R.E.; Setzer, M.J.*: Änderung der Zementsteinstruktur durch Chlorideinwirkung. Forschungsberichte aus dem Bereich Bauwesen der Universität-Gesamthochschule-Essen Heft 48 (1990).
- [26] *Grübl, P.; Sotkin, A.*: Rapid ice formation in hardened cement paste, mortar and concrete due to supercooling. Cement and Concrete Research Vol. 10 (1980), S. 333 – 345.
- [27] *Setzer, M.J., Auberg, R.*: Prüfung des Frostwiderstandes an hydraulisch gebundenen Tragschichten. In: Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 721, 1996, S. 65-99.
- [28] *Weigler, H.; Karl, S.*: Beton. Arten – Herstellung – Eigenschaften. Ernst & Sohn Verlag, Berlin 2001.
- [29] *Setzer, M.J.*: Innere Schädigung von Beton durch Frost-Tau-Angriff. Weimar : Bauhaus-Universität, 1997. - In: 13. Internationale Baustofftagung, - ibausil - 24. - 26. September 1997 in Weimar, S. 1.0591-1.0610X 23-6,14,a.
- [30] *Setzer, M.J.*: Mikroeislinnenbildung und Frostscha-den. Stuttgart : ibidem, 1999. - In: Werkstoffe im Bauwesen - Theorie und Praxis : Festschrift zum 60. Geburtstag von Prof. Dr.-Ing. H.W. Reinhardt, (Eligehausen, R. (Ed.)), S. 397-413, 1999.
- [31] *Fagerlund, G. ; Nordström, K.*: Studies of the Internal Frost Resistance of HPC. Oslo : Norwegian Concrete Association, 1999. - In: Utilization of High Strength/High Performance Concrete, 5th International Symposium in Sandefjord, 20-24 June 1999, (Holand, I. ; Sellevold, E.J. (Ed.)), Vol. 2, S. 1092-1103.

- [32] *Fagerlund, G.*: Frost Attack as a Moisture Mechanics Problem. Weimar : Bauhaus-Universität, 2000. - In: 14. Internationale Baustofftagung, - ibausil -, 20. - 23. September 2000 in Weimar, S. 1-0023-0037, 2000.
- [33] *Auberg, R., Palecki, S. Setzter M.J.*: Zerstörungsfreie Prüfung der inneren Schädigung von Beton durch Frostangriff, Deutsche Gesellschaft für zerstörungsfreie Prüfung, Fachtagung Bauwerksdiagnose – Praktische Anwendung Zerstörungsfreier Prüfungen, 21.-22. Januar 1999 in der neuen Messe München.
- [34] *Siebel E.*: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton, Beurteilung mittels Würfelverfahren; pp. 496 – 501; Beton 42 (1992).
- [35] *Setzter M.-J., G. Fagerlund, D.-J. Janssen*: CDF Test – Test method for the freeze-thaw resistance of concrete – test with sodium chlorid solution (CDF); Materials and Structure vol. 29; 1996
- [36] *Setzter, M. J.*: Frostschaden: Grundlagen und Prüfung, In: Beton- und Stahlbetonbau 97 (2002), Nr. 7. S. 350-359.
- [37] *Auberg, R.*: Zuverlässige Prüfung des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstands von Beton mit dem CDF- und CIF-Test. Essen: Universität Gesamthochschule. - In: Mitteilungen aus dem Institut für Bauphysik und Materialwissenschaften (1999), Nr. 6 = Dissertation, 1998 = In: Beton 50 (2000), Nr. 7, S. 396.
- [38] *Kasperek, S.; Setzter, M.J.*: Vergleich des Wärmetransports und der Temperaturverteilung im CIF-Test und im Slab-Test, 15. Internationale Baustofftagung, 24.-27. Sept. 2003, ibausil, Weimar.
- [39] *Hartmann, V.*: Optimierung und Kalibrierung der Frost-Tausalz-Prüfung von Beton (CDF-Test), Dissertation, Universität Essen, 1993.
- [40] DIN EN 197 1:2001 02. Zement; Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement. Deutsche Fassung EN 197 1: 2000.
- [41] DIN EN 206 1:2001 07. Beton – Eigenschaften, Herstellung und Konformität.
- [42] DIN EN 450:1995 01. Flugasche für Beton – Definitionen, Anforderungen und Güteüberwachung; Deutsche Fassung EN 450: 1994.
- [43] Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau (DAfStb): DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), Ergänzungen und Änderungen zu DIN 1045-2:2001 und DIN EN 206-1 sowie DIN 1045-3:2001, Schlusssentwurf November 2003.
- [44] DIN-Fachbericht 100: Beton – Zusammenstellung von DIN EN 206-1 und DIN 1045-2; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2001.
- [45] DAfStb-Richtlinie: Herstellung und Verwendung von zementgebundenen Vergussbeton und Vergussmörtel, Ausgabe Juni 2006.
- [46] DIN EN 12350-4:2000-06: Prüfung von Frischbeton - Teil 4: Verdichtungsmaß; Deutsche Fassung EN 12350-5:1999; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2000.
- [47] DIN EN 12350-5:2000-06: Prüfung von Frischbeton - Teil 5: Ausbreitmaß; Deutsche Fassung EN 12350-5:1999; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2000.

- [48] DIN EN 12350-6:2000-06: Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Frischbetonrohddichte; Deutsche Fassung EN 12350-6:1999; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2000.
- [49] DIN EN 12350-7:2000-11: Prüfung von Frischbeton - Teil 6: Luftporengehalte, Druckverfahren; Deutsche Fassung EN 12350-7:2000; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2000.
- [50] Deutscher Ausschuss für Stahlbetonbau (DAfStb): DAfStb-Richtlinie Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie), Ergänzungen zu DIN 1045:1988-07; Ausgabe Juni 2001.
- [51] DIN EN 12390-2:2001-06: Prüfung von Festbeton – Teil 2: Herstellung und Lagerung von Probekörpern für Festigkeitsprüfung; Deutsche Fassung EN 12390-2:2000; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2001.
- [52] DIN EN 12390-3:2002-4: Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; Deutsche Fassung EN 12390-3:2001; Beuth Verlag GmbH; Berlin 2002.
- [53] *Siebel E.*: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton – Beurteilung mittels Würfelverfahren; Beton 42, Seiten 496 – 501, 1992.
- [54] SVA „Betontechnologie“ PG „Frost- und Frost-Tausalzprüfung“, Beratungsunterlagen für die 2. Sitzung am 07.04.2005 in Berlin.

ANHANG

Tabelle A 1: Zemente – Kennwerte aus der werkseigenen Produktionskontrolle

		Zemente der Standardbetone und des MB		
		CEM I 32,5 R	CEM II/A-LL 32,5 R	CEM III/B 32,5 N-LH/HS/NA
Mahlfeinheit				
Siebrückstand 200 µm	%	0,1	0,1	0,0
Siebrückstand 90 µm	%	2,0	0,3	0,1
Siebrückstand 63 µm	%	7,9	3,3	0,6
spez. Oberfläche (Blaine)	cm ² /g	2780	3600	4100
Mörteltechnische Prüfung				
Wasseranspruch	%	26,9	27,7	29,6
Erstarren, Beginn	min	160	150	230
Ende	min	200	200	300
Kochprobe		bestanden	bestanden	bestanden
Dehnungsmaß (Le Chatelier)	mm	0,9	0,6	0,6
Druckfestigkeit nach				
2 Tagen	N/mm ²	25,3	26,3	--
7 Tagen	N/mm ²	--	--	31,4
28 Tagen	N/mm ²	50,9	50,0	47,5
Chemische Analyse				
Glühverlust	%	2,21	7,82	2,05
Unlösliches	%	0,30	1,27	0,47
SO ₃	%	3,19	2,93	2,90
Cl ⁻	%	0,07	0,07	0,07
Kalkstein	%	<i>k.A.</i>	17	<i>k.A.</i>
Na ₂ O-Äquivalent	%	<i>k.A.</i>	<i>k.A.</i>	0,78
Hüttensand	%	<i>k.A.</i>	<i>k.A.</i>	70
Hydratationswärme	J/g	<i>k.A.</i>	<i>k.A.</i>	204

k.A. = keine Angabe

Tabelle A 2: materialspezifische Kennwerte der Steinkohlenflugasche (für Standardbetone und Massenbeton)

Parameter	Einheit	KW Voerde
		Flugasche
		-
Physikalische Parameter		
Reindichte	g/cm ³	2,23
Blaine Wert	cm ² /g	3400
BET	cm ² /g	10650
Kornanteil > 45µm	M.-%	25,5
Kornanteil > 200µm	M.-%	2,8
Mörtel- und Bindemittelleim Untersuchungen		
Wasseranspruch/Normsteife	%	26,0
β _p -Wert	--	0,649
Chemische Parameter		
GV	M.-%	3,33
CaO		3,05
SiO ₂		49,5
Al ₂ O ₃		27,4
Fe ₂ O ₃		7,29
MgO		2,24
TiO ₂		1,05
MnO		0,09
SO ₃		0,84
Na ₂ O		1,1
K ₂ O		3,78
Na ₂ O-Äquivalent		3,59
P ₂ O ₅		0,54
Cl		< 0,02

Tabelle A 3: Zusammensetzung der Standardbetone

300 CEM I 32,5 R/0,60	
Ausgangsmaterialien	Menge
CEM I 32,5 R	300,00 kg/m ³
Wasser	180,00 kg/m ³
Sand 0/4	318,70 kg/m ³
Kies 4/8	177,06 kg/m ³
Kies 8/16	212,47 kg/m ³

320 CEM I 32,5 R/0,50	
Ausgangsmaterialien	Menge
CEM I 32,5 R	320,00 kg/m ³
Wasser	160,00 kg/m ³
Sand 0/4	324,80 kg/m ³
Kies 4/8	180,44 kg/m ³
Kies 8/16	216,53 kg/m ³

300 CEM I 32,5 R/0,60/BV	
Ausgangsmaterialien	Menge
CEM I 32,5 R	300,00 kg/m ³
Wasser	180,00 kg/m ³
Sand 0/4	318,70 kg/m ³
Kies 4/8	177,06 kg/m ³
Kies 8/16	212,47 kg/m ³
Zugabe von BV	0,40 M.% v.Z.

320 CEM I 32,5 R/0,50/BV	
Ausgangsmaterialien	Menge
CEM I 32,5 R	320,00 kg/m ³
Wasser	160,00 kg/m ³
Sand 0/4	324,80 kg/m ³
Kies 4/8	180,44 kg/m ³
Kies 8/16	216,53 kg/m ³
Zugabe von BV	0,60 M.% v.Z.

Fortsetzung Tabelle A 3: Zusammensetzung der Standardbetone

300 CEM II/A-LL 32,5 R/0,60/BV	
Ausgangsmaterialien	Menge
CEM II/A-LL 32,5 R	300,00 kg/m ³
Wasser	180,00 kg/m ³
Sand 0/4	317,99 kg/m ³
Kies 4/8	176,66 kg/m ³
Kies 8/16	211,99 kg/m ³
Zugabe von BV	0,35 M.% v.Z.

320 CEM II/A-LL 32,5 R/0,50	
Ausgangsmaterialien	Menge
CEM II/A-LL 32,5 R	320,00 kg/m ³
Wasser	160,00 kg/m ³
Sand 0/4	324,04 kg/m ³
Kies 4/8	180,02 kg/m ³
Kies 8/16	216,02 kg/m ³
Zugabe von BV	0,70 M.% v.Z.

300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	
Ausgangsmaterialien	Menge
CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R	300,00 kg/m ³
Wasser	180,00 kg/m ³
Sand 0/4	317,99 kg/m ³
Kies 4/8	176,66 kg/m ³
Kies 8/16	211,99 kg/m ³

320 CEM/II B-M (S-LL) 32,5 R/0,50	
Ausgangsmaterialien	Menge
CEM/II B-M (S-LL) 32,5 R	320,00 kg/m ³
Wasser	160,00 kg/m ³
Sand 0/4	324,04 kg/m ³
Kies 4/8	180,02 kg/m ³
Kies 8/16	216,02 kg/m ³

Fortsetzung Tabelle A 3: Zusammensetzung der Standardbetone:

300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV	
Ausgangsmaterialien	Menge
CEM III/B 32,5 N-LH-HS-NA	300,00 kg/m ³
Wasser	180,00kg/m ³
Sand 0/4	317,99 kg/m ³
Kies 4/8	176,66 kg/m ³
Kies 8/16	211,99 kg/m ³
Zugabe von BV	0,2 M.% v.Z.

320 CEM III/32,5 N/0,50/BV	
Ausgangsmaterialien	Menge
CEM III/B 32,5 N-LH-HS-NA	320,00 kg/m ³
Wasser	160,00 kg/m ³
Sand 0/4	324,04 kg/m ³
Kies 4/8	180,02 kg/m ³
Kies 8/16	216,02 kg/m ³
Zugabe von BV	0,30 M.% v.Z.

270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60	
Ausgangsmaterialien	Menge
CEM I 32,5 R	270,00 kg/m ³
Steinkohlenflugasche	60,00 kg/m ³
Wasser	176,40 kg/m ³
Sand 0/4	312,94 kg/m ³
Kies 4/8	173,85 kg/m ³
Kies 8/16	208,62 kg/m ³

270 CEM I 32,5 R/ 89 SFA /0,50	
Ausgangsmaterialien	Menge
CEM I 32,5 R	270,00 kg/m ³
Steinkohlenflugasche	89,10 kg/m ³
Wasser	152,82 kg/m ³
Sand 0/4	317,85 kg/m ³
Kies 4/8	176,59 kg/m ³
Kies 8/16	211,90 kg/m ³

Tabelle A 4: Zusammensetzung des SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48

SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48	
Ausgangsmaterialien	Menge
Zement CEM II/B-S 32,5 R	300 kg/m ³
Zusatzstoff Steinkohlenflugasche	220 kg/m ³
Wasser	165 kg/m ³
Gesteinskörnung	
Sand 0/2a	697 kg/m ³
Kies 2/8	395 kg/m ³
Kies 8/16	600 kg/m ³
Zusatzmittel	
Betonverflüssiger TYP A(B)	2,0 M.-% v.Z.
Stabilisierer TYP A(S)	0,13 M.-% v.Z.

Tabelle A 5: Zusammensetzung des SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51

SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51	
Ausgangsmaterialien	Menge
Zement CEM I 32,5 R	335 kg/m ³
Zusatzstoff Kalksteinmehl	293 kg/m ³
Wasser	172 kg/m ³
Gesteinskörnung	
Sand 0/2	690 kg/m ³
Kies 2/8	392 kg/m ³
Kies 8/16	521 kg/m ³
Zusatzmittel	
Betonverflüssiger TYP B(B)	2,0 M.-% v.Z.
Stabilisierer TYP B(S)	0,5 M.-% v.Z.

Tabelle A 6: Zusammensetzung des MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55

MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55	
Ausgangsmaterialien	Menge
Zement CEM III B 32,5	240 kg/m ³
Zusatzstoff Steinkohlenflugasche	120 kg/m ³
Wasser	149,4 kg/m ³
Gesteinskörnung	
Sand 0/4	864 kg/m ³
Kies 4/8	480 kg/m ³
Kies 8/16	575 kg/m ³
Zusatzmittel	
Betonverflüssiger TYP C(B)	0,76 M.-% v.Z.

Tabelle A 7: Rohdichte und Druckfestigkeit der Betone im Alter von 7 Tagen

Bezeichnung der Betone	Rohdichte			Druckfestigkeit		
	Einzelwert	Mittelwert	Variationskoeffizient	Einzelwert	Mittelwert	Variationskoeffizient
[-]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
300 CEM I 32,5 R/0,60	2,40	2,40	0,078	29	28	3,022
	2,40			28		
	2,40			28		
320 CEM I 32,5 R/0,50	2,40	2,40	0,199	35	36	2,409
	2,41			35		
	2,40			37		
360 CEM I 32,5 R/0,50	2,40	2,40	0,216	36	36	1,612
	2,40			37		
	2,39			35		
300 CEM II/A-LL 32,5 R/0,60-BV	2,39	2,39	0,292	28	28	0,373
	2,38			28		
	2,40			26		
320 CEM II/A-LL 32,5 R/0,50-BV	2,42	2,44	0,604	41	41	2,911
	2,45			42		
	2,45			39		
300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	2,38	2,38	0,082	22	22	2,091
	2,38			21		
	2,38			22		
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50	2,36	2,38	0,881	29	30	0,877
	2,39			30		
	2,40			30		
300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV	2,40	2,40	0,223	20	19	3,319
	2,41			20		
	2,40			19		
320 CEM III/B 32,5 N/0,50/BV	2,40	2,40	0,236	29	29	1,188
	2,41			28		
	2,41			28		
270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60	2,41	2,41	0,123	32	29	9,437
	2,41			27		
	2,40			27		
270 CEM I 32,5 R/ 89 SFA /0,50	2,39	2,39	0,283	30	30	2,548
	2,38			31		
	2,38			29		
285 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	2,38	2,38	0,280	21	21	1,505
	2,39			21		
	2,38			21		
SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48	2,34	2,34	0,108	32	32	2,975
	2,34			31		
	2,34			33		
SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51	2,42	2,41	0,522	39	40	1,300
	2,40			40		
	2,42			40		
MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55 *)	2,40	2,40	0,159	35	34	1,361
	2,41			34		
	2,40			34		
Vergussmörtel/w/f = 0,1125	2,30	2,30	0,254	69	76	7,127
	2,30			80		
	2,29			78		

*) geprüft im Alter von 14 Tage (Lagerung 14 Tage unter Wasser)

Tabelle A 8: Rohdichte und Druckfestigkeit der Betone im Alter von 28 Tagen

Bezeichnung der Betone	Rohdichte			Druckfestigkeit		
	Einzelwert	Mittelwert	Variationskoeffizient	Einzelwert	Mittelwert	Variationskoeffizient
[-]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
300 CEM I 32,5 R/0,60	2,36	2,36	0,479	35	35	4,627
	2,37			37		
	2,35			33		
320 CEM I 32,5 R/0,50	2,38	2,38	0,183	42	43	2,405
	2,38			42		
	2,37			44		
300 CEM I 32,5 R/0,60/BV	2,39	2,38	0,091	42	43	2,988
	2,38			42		
	2,38			44		
320 CEM I 32,5 R/0,50/BV	2,39	2,39	0,119	52	53	1,356
	2,39			53		
	2,39			53		
360 CEM I 32,5 R/0,50	2,39	2,39	0,040	49	49	0,620
	2,39			49		
	2,40			49		
300 CEM II/A-LL 32,5 R/0,60/BV	2,35	2,35	0,049	40	39	1,203
	2,35			39		
	2,35			39		
320 CEM II/A-LL 32,5 R/0,50/BV	2,41	2,41	0,149	53	53	0,281
	2,40			53		
	2,41			54		
300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	2,28	2,30	0,852	32	33	1,625
	2,31			33		
	2,31			33		
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50	<i>Prüfung wurde nicht durchgeführt</i>			<i>Prüfung wurde nicht durchgeführt</i>		
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50/BV	2,41	2,40	0,499	51	52	2,456
	2,39			54		
	2,39			52		
300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV	2,37	2,37	0,220	33	34	3,554
	2,37			35		
	2,36			33		
320 CEM III/B 32,5 N/0,50/BV	2,37	2,38	0,412	46	46	1,391
	2,39			47		
	2,38			46		
270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60	2,37	2,37	0,473	42	41	1,105
	2,37			41		
	2,35			41		
270 CEM I 32,5 R/ 89 SFA /0,50	2,36	2,37	0,372	49	48	0,821
	2,38			48		
	2,37			48		
285 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	<i>Prüfung wurde nicht durchgeführt</i>			<i>Prüfung wurde nicht durchgeführt</i>		
SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48	2,35	2,35	0,169	54	53	2,544
	2,34			51		
	2,35			54		
SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51	2,38	2,38	0,062	49	51	4,098
	2,38			53		
	2,38			51		
MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55	2,40	2,39	0,424	47	45	4,005
	2,38			44		
	2,40			45		
Vergussmörtel/w/f = 0,1125	2,29	2,29	0,350	95	96	1,202
	2,30			97		
	2,28			95		

n.n.h. = noch nicht hergestellt

Tabelle A 9: Rohdichte und Druckfestigkeit der Betone im Alter von 56 Tagen

Bezeichnung der Betone	Rohdichte			Druckfestigkeit		
	Einzelwert	Mittelwert	Variationskoeffizient	Einzelwert	Mittelwert	Variationskoeffizient
[-]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
300 CEM I 32,5 R/0,60	2,34	2,34	0,507	39	39	2,235
	2,33			38		
	2,35			39		
320 CEM I 32,5 R/0,50	2,38	2,38	0,277	47	47	0,659
	2,37			47		
	2,38			47		
300 CEM II/A-LL 32,5 R/0,60/BV	2,33	2,34	0,357	42	41	0,702
	2,35			42		
	2,34			41		
320 CEM II/A-LL 32,5 R/0,50/BV	2,40	2,40	0,216	57	56	2,180
	2,39			55		
	2,40			57		
300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	2,32	2,31	0,350	36	37	3,297
	2,30			36		
	2,31			38		
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50	2,39	2,37	0,784	49	49	3,326
	2,36			50		
	2,35			47		
300 CEM III/B/0,60-BV	2,41	2,38	1,022	35	35	2,518
	2,37			34		
	2,37			36		
320 CEM III/B/0,50-BV	2,33	2,34	0,291	43	47	1,048
	2,35			45		
	2,34			44		
270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60	2,36	2,37	0,405	40	44	2,093
	2,36			39		
	2,38			38		
270 CEM I 32,5 R/ 89 SFA /0,50	2,37	2,34	1,007	55	51	7,237
	2,32			47		
	2,33			52		
285 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	3,32	2,32	0,416	34	35	0,222
	2,33			35		
	2,32			34		
SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48	2,32	2,33	0,527	60	60	3,626
	2,33			61		
	2,34			57		
SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51	2,37	2,38	0,487	55	54	3,213
	2,39			55		
	2,38			52		
MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55	2,38	2,39	0,192	51	51	1,464
	2,39			51		
	2,39			50		
Vergussmörtel/w/f = 0,1125	2,30	2,28	0,504	105	96	8,157
	2,28			93		
	2,28			90		

Tabelle A 10: Rohdichte und Druckfestigkeit der Betone im Alter von 91 Tagen

Bezeichnung der Betone	Rohdichte			Druckfestigkeit		
	Einzelwert	Mittelwert	Variationskoeffizient	Einzelwert	Mittelwert	Variationskoeffizient
[-]	[kg/dm ³]	[kg/dm ³]	[%]	[N/mm ²]	[N/mm ²]	[%]
300 CEM I 32,5 R/0,60	2,35	2,35	0,975	41	42	6,362
	2,37			45		
	2,32			40		
320 CEM I 32,5 R/0,50	2,34	2,36	0,696	46	47	2,130
	2,37			48		
	2,36			47		
300 CEM II/A-LL 32,5 R/0,60-BV	2,34	2,34	0,226	42	42	0,602
	2,34			42		
	2,33			42		
320 CEM II/A-LL 32,5 R/0,50-BV	2,40	2,40	0,216	57	56	2,180
	2,39			55		
	2,40			57		
300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	2,32	2,31	0,167	36	36	2,568
	2,31			37		
	2,31			35		
320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50	2,34	2,35	0,360	52	52	1,980
	2,36			53		
	2,35			51		
300 CEM III/B/0,60-BV	2,34	2,35	0,430	33	34	3,063
	2,36			34		
	2,35			35		
320 CEM III/B/0,50-BV	2,37	2,38	0,600	46	47	1,877
	2,37			46		
	2,39			48		
270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60	2,37	2,37	0,180	46	46	3,804
	2,37			44		
	2,37			47		
270 CEM I 32,5 R/ 89 SFA /0,50	2,37	2,37	0,258	51	50	3,303
	2,38			49		
	2,36			48		
285 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60	2,31	2,32	0,351	39	38	2,656
	2,33			37		
	2,32			38		
SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48	2,36	2,37	0,515	63	64	1,675
	2,38			64		
	2,37			65		
SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51	2,39	2,39	0,225	55	57	3,785
	2,38			57		
	2,39			60		
MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55	2,37	2,39	0,638	53	54	1,927
	2,40			54		
	2,39			55		
Vergussmörtel/w/f = 0,1125	2,30	2,29	0,516	96	101	4,209
	2,29			105		
	2,28			102		

Tabelle A 11: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „300 CEM I 32,5 R/0,60“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.422,18	2.408,21	4.830,39	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.456,80	2.441,81	4.898,61	-	<i>1,41</i>
10 FTW	2.469,62	2.455,82	4.925,44	2,99	0,06
20 FTW	2.469,23	2.453,79	4.923,02	2,18	0,11
25 FTW	2.472,05	2.456,72	4.928,77	0,28	0,11
30 FTW	2.472,56	2.457,15	4.929,71	0,53	0,12
40 FTW	2.471,75	2.457,22	4.928,97	0,53	0,13
50 FTW	2.472,99	2.457,23	4.930,22	0,60	0,15
60 FTW	2.471,92	2.456,74	4.928,66	1,68	0,18
70 FTW	2.469,74	2.452,94	4.922,68	3,07	0,25
75 FTW	2.468,86	2.450,27	4.919,13	3,06	0,31
80 FTW	2.466,42	2.447,06	4.913,48	4,48	0,40
90 FTW	2.462,02	2.445,75	4.907,77	4,90	0,50
100 FTW	2.458,56	2.444,21	4.902,77	6,19	0,63

 Tabelle A 12: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „320 CEM I 32,5 R/0,50“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.439,54	2.461,52	4.901,06	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.462,22	2.484,57	4.946,79	-	<i>0,93</i>
10 FTW	2.477,07	2.498,34	4.975,41	1,61	0,03
20 FTW	2.477,10	2.498,87	4.975,97	0,78	0,05
25 FTW	2.479,37	2.500,99	4.980,36	0,05	0,05
30 FTW	2.480,56	2.501,78	4.982,34	0,25	0,05
40 FTW	2.480,40	2.502,69	4.983,09	0,17	0,06
50 FTW	2.481,40	2.503,47	4.984,87	0,21	0,06
60 FTW	2.481,56	2.503,61	4.985,17	0,25	0,07
70 FTW	2.480,43	2.502,38	4.982,81	0,41	0,08
75 FTW	2.480,24	2.502,30	4.982,54	0,24	0,08
80 FTW	2.480,22	2.502,09	4.982,31	0,20	0,09
90 FTW	2.480,51	2.502,24	4.982,75	0,27	0,09
100 FTW	2.480,37	2.502,49	4.982,86	0,58	0,10

Tabelle A 13: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „300 CEM I 32,5 R/0,60/BV“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.399,63	2.426,46	4.826,09	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.439,99	2.462,91	4.902,90	-	1,59
10 FTW	2.445,89	2.468,66	4.914,55	2,80	0,06
20 FTW	2.448,86	2.471,72	4.920,58	2,20	0,10
25 FTW	2.448,91	2.471,36	4.920,27	1,34	0,13
30 FTW	2.449,31	2.470,24	4.919,55	1,73	0,17
40 FTW	2.447,94	2.468,30	4.916,24	5,73	0,29
50 FTW	2.435,78	2.466,25	4.902,03	13,71	0,57
60 FTW	2.408,49	2.453,47	4.861,96	36,60	1,33
70 FTW	2.392,86	2.434,44	4.827,30	31,52	1,98
75 FTW	2.385,64	2.426,53	4.812,17	13,15	2,25
80 FTW	2.385,62	2.426,88	4.812,50	1,45	2,28
90 FTW	2.360,80	2.420,34	4.781,14	29,49	2,90
100 FTW	2.335,12	2.375,24	4.710,36	58,32	4,10

 Tabelle A 14: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „320 CEM I 32,5 R/0,50/BV“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.422,06	2.420,11	4.842,17	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.451,55	2.455,69	4.907,24	-	1,34
10 FTW	2.457,29	2.462,72	4.920,01	1,98	0,04
20 FTW	2.460,51	2.465,42	4.925,93	1,12	0,06
25 FTW	2.460,22	2.465,55	4.925,77	0,79	0,08
30 FTW	2.460,59	2.465,84	4.926,43	0,22	0,08
40 FTW	2.460,96	2.466,56	4.927,52	1,06	0,11
50 FTW	2.461,17	2.466,49	4.927,66	0,65	0,12
60 FTW	2.461,20	2.466,75	4.927,95	0,78	0,14
70 FTW	2.461,20	2.466,74	4.927,94	0,68	0,15
75 FTW	2.460,88	2.466,60	4.927,48	0,50	0,16
80 FTW	2.461,43	2.467,13	4.928,56	0,24	0,17
90 FTW	2.462,05	2.469,07	4.931,12	1,46	0,20
100 FTW	2.457,20	2.465,06	4.922,26	4,80	0,29

Tabelle A 15: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „360 CEM I 32,5 R/0,50“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.430,03	2.422,95	4.852,98	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.455,76	2.449,52	4.905,28	-	1,08
10 FTW	2.463,54	2.457,29	4.920,83	2,29	0,05
20 FTW	2.464,79	2.458,74	4.923,53	2,05	0,09
25 FTW	2.464,72	2.458,05	4.922,77	1,00	0,11
30 FTW	2.464,71	2.456,81	4.921,52	2,24	0,16
40 FTW	2.463,66	2.456,40	4.920,06	3,23	0,22
50 FTW	2.455,84	2.453,21	4.909,05	11,53	0,46
60 FTW	2.454,26	2.452,17	4.906,43	3,32	0,53
70 FTW	2.451,35	2.449,73	4.901,08	5,88	0,65
75 FTW	2.450,79	2.449,13	4.899,92	0,98	0,67
80 FTW	2.446,12	2.448,06	4.894,18	4,83	0,77
90 FTW	2.438,97	2.446,46	4.885,43	8,49	0,94
100 FTW	2.436,27	2.443,40	4.879,67	5,18	1,05

 Tabelle A 16: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „300 CEM II/A-LL 32,5 R/0,60“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.371,19	2.383,67	4.754,86	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.406,06	2.419,03	4.825,09	-	1,48
10 FTW	2.425,26	2.437,62	4.862,88	3,27	0,07
20 FTW	2.424,99	2.435,72	4.860,71	3,42	0,14
25 FTW	2.424,71	2.435,44	4.860,15	1,81	0,18
30 FTW	2.422,93	2.435,07	4.858,00	4,04	0,26
40 FTW	2.399,48	2.425,52	4.825,00	30,02	0,90
50 FTW	2.391,76	2.414,28	4.806,04	16,73	1,25
60 FTW	2.373,59	2.402,34	4.775,93	26,97	1,81
70 FTW	2.362,92	2.396,08	4.759,00	15,61	2,14
75 FTW	2.358,50	2.384,57	4.743,07	13,31	2,42
80 FTW	2.353,57	2.381,54	4.735,11	7,02	2,57
90 FTW	2.350,52	2.374,88	4.725,40	9,00	2,76
100 FTW	2.347,94	2.372,71	4.720,65	8,87	2,95

Tabelle A 17: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „320 CEM II/A-LL 32,5 R/0,50“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.382,11	2.406,01	4.788,12	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.406,26	2.425,77	4.832,03	-	0,92
10 FTW	2.433,48	2.445,01	4.878,49	1,06	0,02
20 FTW	2.423,45	2.445,67	4.869,12	1,17	0,05
25 FTW	2.424,01	2.446,19	4.870,20	0,63	0,06
30 FTW	2.424,75	2.447,01	4.871,76	0,61	0,07
40 FTW	2.425,12	2.449,07	4.874,19	1,64	0,11
50 FTW	2.424,29	2.446,64	4.870,93	2,00	0,15
60 FTW	2.420,35	2.442,12	4.862,47	9,03	0,34
70 FTW	2.415,22	2.435,57	4.850,79	11,15	0,57
75 FTW	2.401,25	2.425,61	4.826,86	21,35	1,02
80 FTW	2.395,45	2.426,39	4.821,84	6,72	1,16
90 FTW	2.389,82	2.405,83	4.795,65	21,24	1,60
100 FTW	2.390,46	2.404,25	4.794,71	4,60	1,70

 Tabelle A 18: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.376,58	2.378,64	4.755,22	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.434,48	2.433,93	4.868,41	-	2,38
10 FTW	2.445,64	2.446,96	4.892,60	1,85	0,04
20 FTW	--	--	--	--	--
25 FTW	2.444,74	2.443,29	4.888,03	8,82	0,22
30 FTW	2.444,38	2.441,91	4.886,29	2,58	0,28
40 FTW	2.438,51	2.429,88	4.868,39	22,79	0,76
50 FTW	--	--	--	--	--
60 FTW	2.424,19	2.410,38	4.834,57	26,98	1,33
70 FTW	--	--	--	--	--
75 FTW	2.418,68	2.398,41	4.817,09	16,22	1,67
80 FTW	2.420,56	2.400,53	4.821,09	1,50	1,70
90 FTW	2.417,79	2.399,76	4.817,55	3,53	1,77
100 FTW	2.413,25	2.395,61	4.808,86	6,11	1,90

Tabelle A 19: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.376,46	2.419,25	4.795,71	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.412,69	2.458,14	4.870,83	-	1,57
10 FTW	2.424,70	2.470,27	4.894,97	0,94	0,02
20 FTW	2.427,29	2.472,67	4.899,96	0,58	0,03
25 FTW	2.430,55	2.476,21	4.906,76	0,41	0,04
30 FTW	2.431,95	2.475,55	4.907,50	0,40	0,05
40 FTW	2.428,32	2.473,74	4.902,06	0,82	0,07
50 FTW	2.428,80	2.474,16	4.902,96	0,36	0,07
60 FTW	2.431,18	2.477,03	4.908,21	0,18	0,08
70 FTW	2.431,69	2.477,10	4.908,79	0,32	0,08
75 FTW	2.432,73	2.478,05	4.910,78	0,17	0,09
80 FTW	2.432,57	2.478,16	4.910,73	0,24	0,09
90 FTW	2.429,03	2.475,32	4.904,35	1,64	0,13
100 FTW	2.427,98	2.474,58	4.902,56	1,90	0,17

 Tabelle A 20: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50/BV“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.414,81	2.425,68	4.840,49	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.444,16	2.451,71	4.895,87	-	1,14
10 FTW	2.461,53	2.470,43	4.931,96	2,19	0,05
20 FTW	2.462,17	2.471,10	4.933,27	0,78	0,06
25 FTW	2.462,45	2.470,98	4.933,43	2,03	0,10
30 FTW	2.462,54	2.470,69	4.933,23	1,00	0,12
40 FTW	2.460,71	2.468,05	4.928,76	5,33	0,23
50 FTW	2.455,53	2.461,81	4.917,34	11,24	0,47

Tabelle A 21: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.407,16	2.398,04	4.805,20	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.443,62	2.433,70	4.877,32	-	1,50
10 FTW	2.442,24	2.435,34	4.877,58	12,21	0,25
20 FTW	2.430,22	2.434,05	4.864,27	15,70	0,58
25 FTW	2.428,57	2.425,66	4.854,23	16,49	0,92
30 FTW	2.425,08	2.407,73	4.832,81	17,59	1,29
40 FTW	2.408,30	2.401,60	4.809,90	24,88	1,81
50 FTW	2.394,02	2.394,89	4.788,91	21,96	2,26
60 FTW	2.383,23	2.384,89	4.768,12	19,18	2,66
70 FTW	2.375,77	2.370,36	4.746,13	22,15	3,12
75 FTW	2.370,69	2.367,22	4.737,91	7,07	3,27
80 FTW	2.368,19	2.359,03	4.727,22	10,13	3,48
90 FTW	2.365,77	2.350,34	4.716,11	11,53	3,72
100 FTW	2.357,70	2.346,69	4.704,39	13,24	4,00

 Tabelle A 22: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „320 CEM III/B 32,5 N/0,50/BV“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.434,64	2.441,70	4.876,34	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.454,08	2.461,18	4.915,26	-	0,80
10 FTW	2.457,63	2.464,84	4.922,47	2,92	0,06
20 FTW	2.458,40	2.465,80	4.924,20	1,59	0,09
25 FTW	2.460,55	2.467,68	4.928,23	0,80	0,11
30 FTW	2.459,31	2.466,15	4.925,46	0,61	0,12
40 FTW	2.460,21	2.466,98	4.927,19	0,98	0,14
50 FTW	2.461,04	2.467,53	4.928,57	0,88	0,16
60 FTW	2.461,59	2.468,10	4.929,69	0,51	0,17
70 FTW	2.461,99	2.468,42	4.930,41	0,47	0,18
75 FTW	2.461,81	2.468,08	4.929,89	0,38	0,19
80 FTW	2.461,71	2.468,01	4.929,72	0,18	0,19
90 FTW	2.462,11	2.468,59	4.930,70	0,44	0,20
100 FTW	2.463,64	2.470,25	4.933,89	0,39	0,21

Tabelle A 23: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.451,26	2.450,24	4.901,50	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.487,27	2.485,40	4.972,67	-	1,45
10 FTW	2.499,67	2.497,10	4.996,77	2,65	0,05
20 FTW	2.500,12	2.497,43	4.997,55	3,45	0,12
25 FTW	2.500,80	2.498,00	4.998,80	0,79	0,14
30 FTW	2.500,96	2.498,17	4.999,13	0,46	0,15
40 FTW	2.501,66	2.498,58	5.000,24	1,89	0,19
50 FTW	2.501,49	2.495,42	4.996,91	6,01	0,31
60 FTW	2.495,71	2.492,34	4.988,05	10,72	0,53
70 FTW	2.480,02	2.477,93	4.957,95	28,60	1,11
75 FTW	2.469,55	2.472,52	4.942,07	15,08	1,42
80 FTW	2.466,72	2.472,35	4.939,07	5,46	1,53
90 FTW	2.448,40	2.453,43	4.901,83	32,85	2,20
100 FTW	2.431,16	2.439,54	4.870,70	29,74	2,81

 Tabelle A 24: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „270 CEM I 32,5 R/ 89 SFA /0,50“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.453,20	2.433,60	4.886,80	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.477,41	2.457,20	4.934,61	-	0,98
10 FTW			n.n.b.		n.n.b.
20 FTW	2.485,16	2.463,55	4.948,71	9,28	0,19
25 FTW	2.484,69	2.462,51	4.947,20	2,15	0,23
30 FTW	2.484,49	2.462,46	4.946,95	1,43	0,26
40 FTW	2.483,41	2.461,64	4.945,05	3,43	0,33
50 FTW	2.481,64	2.458,10	4.939,74	6,18	0,46
60 FTW	2.480,61	2.457,99	4.938,60	3,18	0,52
70 FTW	2.480,05	2.458,44	4.938,49	2,97	0,59
75 FTW	2.479,71	2.457,95	4.937,66	1,24	0,61
80 FTW	2.481,52	2.460,60	4.942,12	2,00	0,65
90 FTW	2.476,67	2.455,84	4.932,51	8,03	0,82
100 FTW	2.475,46	2.455,44	4.930,90	4,16	0,90

Tabelle A 25: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.401,91	2.392,44	4.794,35	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.423,22	2.413,78	4.837,00	-	0,89
10 FTW	2.430,62	2.421,20	4.851,82	0,24	0,01
20 FTW	2.431,48	2.422,30	4.853,78	0,35	0,01
25 FTW	2.432,07	2.422,57	4.854,64	0,13	0,02
30 FTW	2.431,80	2.422,58	4.854,38	1,71	0,05
40 FTW	2.431,31	2.422,11	4.853,42	1,90	0,09
50 FTW	2.432,36	2.423,56	4.855,92	0,34	0,10
60 FTW	2.433,12	2.424,60	4.857,72	0,96	0,12
70 FTW	2.434,07	2.425,48	4.859,55	0,30	0,124
75 FTW	2.434,64	2.425,97	4.860,61	0,10	0,126
80 FTW	2.434,98	2.426,25	4.861,23	0,11	0,128
90 FTW	2.435,93	2.427,10	4.863,03	0,33	0,135
100 FTW	2.438,62	2.428,52	4.867,14	0,45	0,144

 Tabelle A 26: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.398,52	2.387,66	4.786,18	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.411,71	2.400,47	4.812,18	-	0,54
10 FTW	2.423,03	2.411,92	4.834,95	1,33	0,03
20 FTW	2.423,11	2.410,31	4.833,42	3,58	0,10
25 FTW	2.424,53	2.411,47	4.836,00	1,04	0,12
30 FTW	2.424,25	2.410,77	4.835,02	1,14	0,15
40 FTW	2.425,10	2.408,97	4.834,07	3,45	0,22
50 FTW	2.423,49	2.407,00	4.830,49	3,20	0,29
60 FTW	2.419,60	2.403,20	4.822,80	7,81	0,45
70 FTW	2.417,71	2.400,66	4.818,37	4,14	0,54
75 FTW	2.417,66	2.400,09	4.817,75	1,22	0,56
80 FTW	2.417,25	2.399,58	4.816,83	0,99	0,58
90 FTW	2.416,79	2.398,06	4.814,85	2,99	0,65
100 FTW	2.417,02	2.395,86	4.812,88	5,52	0,76

Tabelle A 27: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.424,86	2.468,50	4.893,36	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.445,03	2.488,66	4.933,69	-	0,82
10 FTW	2.451,15	2.495,70	4.946,85	1,60	0,03
20 FTW	2.453,21	2.496,12	4.949,33	0,19	0,04
25 FTW	2.452,79	2.496,87	4.949,66	0,15	0,04
30 FTW	2.453,25	2.497,31	4.950,56	0,14	0,04
40 FTW	2.454,21	2.498,36	4.952,57	0,22	0,05
50 FTW	2.454,35	2.498,43	4.952,78	0,47	0,06
60 FTW	2.455,23	2.499,44	4.954,67	0,31	0,06
70 FTW	2.456,35	2.501,08	4.957,43	0,30	0,07
75 FTW	2.457,52	2.501,21	4.958,73	0,10	0,07
80 FTW	2.458,32	2.503,13	4.961,45	0,10	0,07
90 FTW	2.462,50	2.507,02	4.969,52	0,30	0,08
100 FTW	2.461,49	2.506,21	4.967,70	0,34	0,09

 Tabelle A 28: Abwitterungen nach dem Würfelverfahren des Betons
 „Vergussmörtel w/f = 0,1125“

Beschreibung	Masse [g]			Abwitterung [g]	Massenverlust [M-%]
	PK 1	PK 2	Σ		
trocken	2.309,67	2.318,69	4.628,36	-	<i>Wasseraufnahme in den ersten 24h</i>
feucht	2.314,55	2.323,26	4.637,81	-	0,20
10 FTW	2.322,32	2.330,08	4.652,40	0,31	0,01
20 FTW	2.323,71	2.330,66	4.654,37	0,28	0,01
25 FTW	2.324,11	2.331,11	4.655,22	0,09	0,01
30 FTW	2.324,31	2.331,35	4.655,66	0,11	0,02
40 FTW	2.324,73	2.331,81	4.656,54	0,35	0,02
50 FTW	2.325,11	2.332,45	4.657,56	0,30	0,03
60 FTW	2.325,35	2.332,92	4.658,27	0,31	0,04
70 FTW	2.325,53	2.333,07	4.658,60	0,32	0,04
75 FTW	2.325,67	2.333,44	4.659,11	0,15	0,05
80 FTW	2.326,38	2.334,41	4.660,79	0,17	0,05
90 FTW	2.325,78	2.333,78	4.659,56	0,43	0,06
100 FTW	2.325,80	2.334,14	4.659,94	0,52	0,07

Tabelle A 29: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „300 CEM I 32,5 R/0,60“ (CIF-Verfahren)

Beton 300 CEM I 32,5R/0,60

Herstelldatum	12.07.2006	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	10,94	11,00	10,93	10,92	10,86
Länge	[cm]	15,00	15,05	15,02	15,01	15,00

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]	[d]	ohne Abdichtung	02.08.2006	2738,98	2785,57	2720,79	2698,92	2724,99
		mit Abdichtung	02.08.2006	2800,96	2847,46	2782,92	2760,84	2787,49
	-7	trocken	09.08.2006	2798,39	2844,75	2780,11	2758,22	2784,92
	-5	kapillares Saugen	11.08.2006	2814,32	2860,58	2795,78	2773,69	2800,65
	-2		14.08.2006	2818,10	2864,59	2799,73	2777,49	2804,52
0	0	vor Frost	16.08.2006	2819,37	2865,74	2801,08	2778,81	2806,17
4	2	Frost	18.08.2006	2822,46	2869,35	2804,81	2782,45	2809,79
10	5		21.08.2006	2827,60	2875,02	2810,88	2788,45	2815,53
14	7		23.08.2006	2831,10	2879,03	2814,79	2792,12	2819,22
18	9		25.08.2006	2833,95	2882,46	2818,18	2795,25	2822,59
24	12		28.08.2006	2839,58	2888,19	2823,55	2800,63	2828,31
28	14		30.08.2006	2843,18	2891,18	2826,07	2803,15	2830,43
32	16		01.09.2006	2844,49	2892,29	2827,37	2804,91	2831,82
38	19		04.09.2006	2846,92	2893,59	2829,31	2807,24	2833,68
42	21		06.09.2006	2848,27	2894,92	2830,30	2808,32	2835,17
46	23		08.09.2006	2849,26	2895,68	2830,93	2808,88	2835,99
52	26		11.09.2006	2850,93	2896,77	2832,00	2809,92	2837,53
56	28		13.09.2006	2851,07	2896,97	2831,79	2809,36	2837,24

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
4	2	Frost	18.08.2006	0,66	0,66	0,34	0,33	0,26
10	5		21.08.2006	0,32	0,19	0,25	0,41	0,20
14	7		23.08.2006	0,23	0,29	0,17	0,16	0,15
18	9		25.08.2006	0,21	0,26	0,22	0,19	0,11
24	12		28.08.2006	0,27	0,31	0,32	0,17	0,18
28	14		30.08.2006	0,23	0,20	0,20	0,16	0,14
32	16		01.09.2006	0,27	0,24	0,32	0,20	0,13
38	19		04.09.2006	0,37	0,51	0,44	0,37	0,26
42	21		06.09.2006	0,20	0,35	0,26	0,31	0,10
46	23		08.09.2006	0,23	0,30	0,58	0,17	0,36
52	26		11.09.2006	0,38	0,53	0,65	0,56	0,27
56	28		13.09.2006	0,34	0,36	0,59	0,68	0,27

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	16.08.2006	44,0	44,1	44,1	44,2	43,8	108,2
4	2	Frost	18.08.2006	44,3	44,4	44,3	44,6	44,1	108,1
10	5		21.08.2006	44,3	44,3	44,2	44,4	44,0	108,2
14	7		23.08.2006	44,0	44,0	43,9	44,1	43,6	108,2
18	9		25.08.2006	44,0	44,0	43,9	44,1	43,7	108,0
24	12		28.08.2006	43,8	44,0	43,8	44,0	43,6	108,0
28	14		30.08.2006	43,7	43,9	43,8	44,1	43,4	107,9
32	16		01.09.2006	43,7	43,9	43,9	44,1	43,5	108,1
38	19		04.09.2006	43,9	44,2	43,9	44,4	43,6	108,2
42	21		06.09.2006	44,2	44,5	44,1	44,5	43,9	108,2
46	23		08.09.2006	44,2	44,6	44,2	44,6	44,0	108,1
52	26		11.09.2006	44,5	44,9	44,4	45,0	44,2	107,9
56	28		13.09.2006	44,9	45,2	44,6	45,2	44,6	108,1

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	16.08.2006	35,6	36,3	36,4	36,4	36,4	86,1
4	2	Frost	18.08.2006	35,7	36,4	36,6	36,6	36,5	85,7
10	5		21.08.2006	35,6	36,4	36,3	36,5	36,3	85,6
14	7		23.08.2006	35,6	36,3	36,4	36,5	36,2	86,0
18	9		25.08.2006	35,5	36,4	36,4	36,5	36,1	85,5
24	12		28.08.2006	35,5	36,4	36,3	36,4	36,3	85,8
28	14		30.08.2006	35,5	36,4	36,4	36,4	36,1	85,9
32	16		01.09.2006	35,5	36,4	36,4	36,4	36,2	86,3
38	19		04.09.2006	35,6	36,4	36,4	36,4	36,1	85,4
42	21		06.09.2006	35,5	36,5	36,4	36,5	36,2	85,6
46	23		08.09.2006	35,4	36,5	36,3	36,3	36,2	85,9
52	26		11.09.2006	35,5	36,5	36,2	36,5	36,2	85,8
56	28		13.09.2006	35,6	36,6	36,2	36,5	36,2	85,9

Tabelle A 30: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „320 CEM I 32,5 R/0,50“ (CIF-Verfahren)

Beton 320 CEM I 32,5R/0,50

Herstelldatum	10.07.2006	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	10,99	10,90	10,88	10,89	10,87
Länge	[cm]	14,55	15,00	15,00	14,58	15,00

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]		ohne Abdichtung	31.07.2006	2847,21	2750,76	2718,98	2676,87	2734,71
		mit Abdichtung	31.07.2006	2908,54	2812,00	2780,60	2738,84	2795,66
	-7	trocken	09.08.2006	2906,26	2809,69	2778,26	2736,58	2793,39
	-5	kapillares Saugen	11.08.2006	2917,02	2820,33	2789,01	2746,38	2804,28
	-2		14.08.2006	2920,32	2823,09	2792,45	2749,83	2807,75
0	0	vor Frost	16.08.2006	2921,38	2824,03	2793,78	2751,17	2809,23
4	2	Frost	18.08.2006	2925,42	2827,50	2796,84	2754,94	2813,15
10	5		21.08.2006	2931,14	2833,04	2802,26	2760,09	2819,87
14	7		23.08.2006	2932,89	2835,33	2805,07	2761,67	2821,27
18	9		25.08.2006	2934,38	2837,17	2806,72	2762,99	2823,09
24	12		28.08.2006	2937,55	2839,57	2809,26	2765,13	2825,36
28	14		30.08.2006	2938,08	2840,77	2809,83	2766,46	2826,32
32	16		01.09.2006	2939,24	2841,55	2810,24	2767,28	2823,90
38	19		04.09.2006	2939,73	2843,23	2811,44	2768,44	2828,00
42	21		06.09.2006	2940,27	2844,02	2811,86	2769,14	2828,32
46	23		08.09.2006	2940,94	2844,70	2812,31	2770,15	2828,74
52	26		11.09.2006	2941,63	2845,13	2813,17	2770,97	2829,79
56	28		13.09.2006	2941,35	2844,92	2813,40	2770,30	2829,45

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
4	2	Frost	18.08.2006	0,15	0,11	0,13	0,08	0,09
10	5		21.08.2006	0,10	0,11	0,11	0,07	0,10
14	7		23.08.2006	0,09	0,07	0,07	0,08	0,08
18	9		25.08.2006	0,13	0,08	0,11	0,10	0,12
24	12		28.08.2006	0,13	0,10	0,14	0,09	0,18
28	14		30.08.2006	0,16	0,13	0,09	0,11	0,18
32	16		01.09.2006	0,28	0,19	0,15	0,12	0,27
38	19		04.09.2006	0,35	0,18	0,33	0,19	0,42
42	21		06.09.2006	0,27	0,16	0,22	0,09	0,24
46	23		08.09.2006	0,29	0,25	0,28	0,14	0,28
52	26		11.09.2006	0,32	0,33	0,33	0,24	0,31
56	28		13.09.2006	0,30	0,30	0,12	0,22	0,29

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	16.08.2006	46,3	43,4	43,4	45,0	43,4	108,2
4	2	Frost	18.08.2006	46,5	43,6	43,5	45,2	43,6	108,0
10	5		21.08.2006	46,5	43,4	43,5	45,2	43,5	108,2
14	7		23.08.2006	46,2	43,2	43,2	45,0	43,2	108,2
18	9		25.08.2006	46,2	43,4	43,1	44,9	43,3	108,0
24	12		28.08.2006	46,0	43,3	43,1	44,9	43,2	108,0
28	14		30.08.2006	46,0	43,2	43,2	44,8	43,2	107,9
32	16		01.09.2006	46,0	43,3	43,1	44,9	43,2	108,1
38	19		04.09.2006	46,1	43,3	42,8	44,9	43,2	108,2
42	21		06.09.2006	46,3	43,6	43,4	45,1	43,4	108,2
46	23		08.09.2006	45,8	43,6	43,3	45,0	43,3	108,1
52	26		11.09.2006	46,0	43,5	43,3	45,0	43,2	107,9
56	28		13.09.2006	46,1	43,7	43,4	45,2	43,4	108,1

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	16.08.2006	35,8	35,9	35,6	35,9	36,3	86,2
4	2	Frost	18.08.2006	35,9	36,0	35,7	36,0	36,6	85,7
10	5		21.08.2006	35,9	35,9	35,6	36,0	36,5	85,6
14	7		23.08.2006	35,7	35,8	35,5	35,8	36,4	86,0
18	9		25.08.2006	35,6	35,8	35,6	35,9	36,5	85,5
24	12		28.08.2006	35,7	35,8	35,6	36,0	36,4	85,8
28	14		30.08.2006	35,8	35,9	35,6	36,1	36,5	85,9
32	16		01.09.2006	35,8	35,9	35,7	35,9	36,5	86,3
38	19		04.09.2006	35,9	35,9	35,5	35,9	36,5	85,4
42	21		06.09.2006	35,8	35,9	35,6	35,9	36,6	85,6
46	23		08.09.2006	35,8	35,9	35,6	36,0	36,5	85,9
52	26		11.09.2006	35,7	35,8	35,6	35,8	36,5	85,8
56	28		13.09.2006	35,7	35,8	35,6	36,1	36,4	85,9

Tabelle A 31: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „300 CEM I 32,5 R/0,60/BV“ (CIF-Verfahren)

Beton 300 CEM I 32,5R/0,60/BV

Herstelldatum	19.03.2007	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	10,86	10,67	11,00	10,96	11,00
Länge	[cm]	15,00	15,02	15,01	15,02	15,03

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]		ohne Abdichtung	19.04.2007	2734,22	2695,27	2917,87	2729,21	2776,63
		mit Abdichtung	19.07.2007	2798,40	2759,53	2982,18	2793,92	2840,92
	-7	trocken	23.04.2007	2797,29	2758,18	2980,59	2792,73	2839,80
	-5	kapillares Saugen	25.04.2007	2812,61	2773,59	2995,21	2809,65	2858,96
	-3		27.04.2007	2815,35	2776,80	2998,86	2812,68	2862,46
0	0	vor Frost	30.04.2007	2817,48	2779,46	3001,46	2815,43	2866,66
4	2	Frost	02.05.2007	2820,50	2783,24	3005,40	2818,67	2869,68
8	4		04.05.2007	2823,68	2787,22	3009,36	2821,95	2874,36
14	7		07.05.2007	2829,26	2793,23	3016,05	2828,20	2880,63
18	9		09.05.2007	2833,18	2797,35	3020,31	2832,12	2885,29
22	11		11.05.2007	2837,95	2800,85	3023,76	2836,17	2889,15
28	14		14.05.2007	2844,32	2804,16	3027,49	2839,99	2893,00
32	16		16.05.2007	2847,64	2806,59	3029,88	2842,49	2895,34
36	18		18.05.2007	2850,21	2808,29	3031,16	2844,31	2897,19
42	21		21.05.2007	2853,23	2810,90	3033,71	2846,77	2899,66
46	23		23.05.2007	2855,81	2812,86	3036,05	2848,72	2901,58
50	25		25.05.2007	2856,85	2814,12	3037,27	2849,89	2902,84
58	29		29.05.2007	2860,31	2817,26	3040,39	2852,55	2906,07

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
4	2	Frost	02.05.2007	0,86	0,63	0,50	0,93	0,60
8	4		04.05.2007	0,27	0,15	0,19	0,22	0,14
14	7		07.05.2007	0,26	0,21	0,17	0,28	0,26
18	9		09.05.2007	0,14	0,13	0,12	0,19	0,15
22	11		11.05.2007	0,27	0,14	0,10	0,18	0,12
28	14		14.05.2007	0,23	0,19	0,15	0,22	0,26
32	16		16.05.2007	0,18	0,07	0,10	0,17	0,22
36	18		18.05.2007	0,23	0,18	0,12	0,35	0,25
42	21		21.05.2007	0,31	0,28	0,18	0,67	0,34
46	23		23.05.2007	0,21	0,17	0,13	0,69	0,29
50	25		25.05.2007	0,41	0,29	0,14	0,67	0,29
58	29		29.05.2007	0,52	0,41	0,25	1,49	0,74

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	30.04.2007	43,4	44,4	44,1	44,7	44,7	108,7
4	2	Frost	02.05.2007	43,4	44,1	44,4	44,6	44,8	108,4
8	4		04.05.2007	43,4	44,0	44,2	44,5	44,6	108,4
14	7		07.05.2007	43,4	44,3	44,2	44,8	44,7	108,7
18	9		09.05.2007	42,8	43,5	43,6	44,0	43,8	108,2
22	11		11.05.2007	42,8	43,9	43,8	44,3	44,3	108,5
28	14		14.05.2007	43,8	44,9	44,8	45,3	45,3	108,1
32	16		16.05.2007	44,1	45,4	45,0	45,9	46,3	108,3
36	18		18.05.2007	45,2	45,8	45,8	46,4	47,0	108,1
42	21		21.05.2007	47,4	47,3	46,9	48,4	49,1	108,5
46	23		23.05.2007	49,8	48,4	48,3	50,1	50,7	108,3
50	25		25.05.2007	53,0	50,1	50,4	52,3	53,5	108,5
58	29		29.05.2007	58,9	53,8	53,9	56,8	57,9	108,5

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	30.04.2007	37,1	37,9	36,2	36,3	36,1	86,1
4	2	Frost	02.05.2007	37,4	38,5	36,5	36,8	36,1	86,5
8	4		04.05.2007	37,0	38,1	36,2	36,4	35,8	86,5
14	7		07.05.2007	37,5	38,7	36,7	36,9	36,6	86,5
18	9		09.05.2007	37,8	38,7	36,6	36,9	36,2	86,7
22	11		11.05.2007	37,0	38,2	36,2	36,4	35,8	86,4
28	14		14.05.2007	37,9	38,9	36,8	36,9	36,5	86,2
32	16		16.05.2007	37,6	38,7	36,6	36,6	36,5	86,4
36	18		18.05.2007	38,1	39,4	37,0	37,4	37,0	86,8
42	21		21.05.2007	40,3	39,9	38,1	38,0	38,8	86,8
46	23		23.05.2007	39,9	39,6	38,0	38,2	39,7	86,1
50	25		25.05.2007	42,4	40,4	39,0	39,5	41,4	86,0
58	29		29.05.2007	44,5	42,4	40,4	41,9	44,3	87,0

Tabelle A 32: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „320 CEM I 32,5 R/0,50/BV“ (CIF-Verfahren)

Beton 320 CEM I 32,5R/0,50/BV

Herstelldatum	19.03.2007	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	11,10	10,90	10,84	10,88	10,94
Länge	[cm]	14,96	15,00	14,93	15,02	14,96

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]	[d]	ohne Abdichtung	19.04.2007	2868,05	2762,08	2688,39	2775,04	2722,39
		mit Abdichtung	19.07.2007	2932,41	2825,99	2752,69	2839,88	2787,03
	-7	trocken	23.04.2007	2931,69	2824,51	2750,85	2838,67	2785,76
	-5	kapillares Saugen	25.04.2007	2945,39	2834,74	2761,56	2852,45	2799,88
	-3		27.04.2007	2948,29	2836,73	2763,62	2854,75	2802,21
0	0	vor Frost	30.04.2007	2950,41	2838,31	2764,99	2856,54	2804,67
4	2	Frost	02.05.2007	2954,30	2841,50	2768,60	2860,67	2808,62
8	4		04.05.2007	2957,80	2844,67	2771,76	2864,20	2811,94
14	7		07.05.2007	2963,38	2849,57	2776,98	2869,44	2817,02
18	9		09.05.2007	2967,67	2853,03	2779,92	2872,72	2820,95
22	11		11.05.2007	2970,87	2855,71	2782,81	2875,63	2823,68
28	14		14.05.2007	2974,71	2859,23	2785,64	2879,18	2827,84
32	16		16.05.2007	2977,02	2861,33	2787,55	2880,75	2830,32
36	18		18.05.2007	2979,59	2863,54	2789,27	2882,75	2832,74
42	21		21.05.2007	2982,64	2866,30	2791,69	2885,17	2836,54
46	23		23.05.2007	2984,68	2868,33	2793,11	2886,98	2839,03
50	25		25.05.2007	2986,21	2869,70	2794,18	2888,45	2840,57
58	29		29.05.2007	2988,51	2871,62	2796,15	2890,44	2842,86

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
4	2	Frost	02.05.2007	0,25	0,22	0,36	0,40	0,36
8	4		04.05.2007	0,10	0,09	0,12	0,18	0,12
14	7		07.05.2007	0,17	0,14	0,17	0,17	0,16
18	9		09.05.2007	0,13	0,10	0,15	0,17	0,16
22	11		11.05.2007	0,16	0,11	0,16	0,17	0,14
28	14		14.05.2007	0,13	0,12	0,20	0,24	0,15
32	16		16.05.2007	0,11	0,10	0,10	0,12	0,14
36	18		18.05.2007	0,08	0,09	0,15	0,10	0,07
42	21		21.05.2007	0,18	0,22	0,16	0,20	0,21
46	23		23.05.2007	0,18	0,23	0,28	0,18	0,18
50	25		25.05.2007	0,19	0,10	0,15	0,14	0,14
58	29		29.05.2007	0,32	0,34	0,45	0,40	0,37

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	30.04.2007	44,0	43,8	44,0	43,9	44,1	108,2
4	2	Frost	02.05.2007	43,8	43,7	43,8	43,6	44,0	108,5
8	4		04.05.2007	43,8	43,7	43,8	43,6	44,2	108,2
14	7		07.05.2007	43,3	43,3	43,2	43,3	43,8	108,2
18	9		09.05.2007	43,5	43,5	43,3	43,4	43,7	108,3
22	11		11.05.2007	44,0	43,8	43,8	43,7	44,3	107,8
28	14		14.05.2007	44,5	43,9	43,9	44,1	44,3	107,9
32	16		16.05.2007	44,7	43,9	43,9	44,4	44,3	107,9
36	18		18.05.2007	45,0	44,2	44,3	44,6	44,8	108,0
42	21		21.05.2007	45,9	45,1	45,0	45,4	46,0	108,2
46	23		23.05.2007	46,7	45,5	45,4	45,8	47,1	108,1
50	25		25.05.2007	47,7	46,0	46,0	46,3	48,2	108,2
58	29		29.05.2007	49,5	47,2	47,1	47,5	50,0	108,5

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	30.04.2007	35,1	35,9	36,1	36,5	36,1	85,7
4	2	Frost	02.05.2007	35,3	36,2	36,3	36,6	36,2	86,8
8	4		04.05.2007	35,1	35,9	36,1	36,5	36,0	86,4
14	7		07.05.2007	35,6	36,5	36,6	36,9	36,7	86,6
18	9		09.05.2007	35,8	36,4	36,6	37,0	36,8	86,6
22	11		11.05.2007	35,2	36,0	36,1	36,5	36,4	86,2
28	14		14.05.2007	35,3	36,1	36,2	36,7	36,7	86,2
32	16		16.05.2007	35,3	36,0	36,3	36,5	36,5	86,2
36	18		18.05.2007	35,5	36,4	36,5	36,9	36,8	86,6
42	21		21.05.2007	36,2	36,5	37,2	36,9	38,2	86,3
46	23		23.05.2007	36,3	36,4	37,2	36,9	38,5	86,0
50	25		25.05.2007	36,8	36,6	37,5	37,0	38,9	86,0
58	29		29.05.2007	37,9	37,3	38,2	37,8	41,3	87,0

Tabelle A 33: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „360 CEM I 32,5 R/0,50“ (CIF-Verfahren)

Beton 360 CEM I 32,5R/0,50

Herstelldatum	12.07.2006	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	11,00	10,95	11,00	11,00	10,94
Länge	[cm]	15,00	14,98	15,01	15,02	15,02

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]	[d]	ohne Abdichtung	01.02.2007	2807,35	2736,02	2817,42	2810,07	2765,50
		mit Abdichtung	01.02.2007	2882,56	2811,16	2890,73	2885,19	2838,50
	-7	trocken	07.02.2007	2880,77	2809,36	2888,72	2883,45	2836,84
	-5	kapillares Saugen	09.02.2007	2891,61	2822,35	2901,23	2895,97	2848,37
	-2		12.02.2007	2894,70	2826,01	2904,32	2899,37	2851,49
0	0	vor Frost	14.02.2007	2895,93	2827,06	2905,31	2900,40	2852,56
4	2	Frost	16.02.2007	2899,08	2829,94	2908,41	2903,30	2855,44
10	5		19.02.2007	2904,12	2834,51	2913,81	2908,30	2860,69
14	7		21.02.2007	2906,74	2837,54	2917,21	2911,47	2863,11
18	9		23.02.2007	2909,14	2840,17	2920,57	2914,37	2865,33
24	12		26.02.2007	2912,51	2844,14	2924,77	2918,31	2868,46
28	14		28.02.2007	2914,13	2846,39	2927,23	2920,31	2870,05
30	15		01.03.2007	2915,52	2847,23	2928,45	2921,27	2870,63
38	19		05.03.2007	2918,67	2851,03	2931,99	2924,46	2874,02
42	21		07.03.2007	2919,83	2851,97	2933,47	2925,67	2875,48
46	23		09.03.2007	2921,47	2853,01	2934,98	2927,07	2876,71
52	26		12.03.2007	2923,14	2854,18	2936,99	2928,22	2877,95
56	28		14.03.2007	2924,63	2854,78	2938,67	2929,01	2879,15

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
4	2	Frost	16.02.2007	0,23	0,60	0,28	0,45	0,23
10	5		19.02.2007	0,11	0,22	0,17	0,19	0,17
14	7		21.02.2007	0,09	0,16	0,06	0,12	0,09
18	9		23.02.2007	0,11	0,09	0,12	0,14	0,13
24	12		26.02.2007	0,16	0,22	0,14	0,22	0,13
28	14		28.02.2007	0,07	0,21	0,08	0,16	0,11
30	15		01.03.2007	0,04	0,09	0,04	0,10	0,06
38	19		05.03.2007	0,18	0,33	0,23	0,30	0,16
42	21		07.03.2007	0,14	0,19	0,14	0,15	0,11
46	23		09.03.2007	0,10	0,29	0,19	0,16	0,11
52	26		12.03.2007	0,14	0,22	0,19	0,19	0,19
56	28		14.03.2007	0,14	0,23	0,09	0,32	0,13

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	14.02.2007	44,0	44,0	43,8	43,2	43,4	108,5
4	2	Frost	16.02.2007	44,3	44,2	44,1	43,3	43,5	108,4
10	5		19.02.2007	44,3	44,1	44,0	43,4	43,7	108,3
14	7		21.02.2007	44,4	44,1	44,0	43,3	43,5	108,2
18	9		23.02.2007	44,3	44,1	44,0	43,3	43,6	108,3
24	12		26.02.2007	44,4	44,1	44,0	43,4	43,5	108,4
28	14		28.02.2007	44,4	44,1	44,1	43,5	43,6	108,4
30	15		01.03.2007	44,3	44,2	44,3	43,5	43,5	108,4
38	19		05.03.2007	44,6	44,6	44,7	43,6	43,5	108,3
42	21		07.03.2007	45,1	44,8	45,0	43,8	43,6	108,3
46	23		09.03.2007	45,1	45,3	45,4	44,0	43,8	108,4
52	26		12.03.2007	45,6	45,5	46,1	44,0	44,1	108,4
56	28		14.03.2007	45,6	45,1	46,4	44,0	44,0	108,0

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	14.02.2007	35,5	35,9	35,2	34,6	35,5	86,7
4	2	Frost	16.02.2007	35,6	35,6	35,3	34,7	35,6	86,6
10	5		19.02.2007	35,7	35,7	35,4	34,7	35,7	86,7
14	7		21.02.2007	35,7	35,8	35,3	34,8	35,6	86,4
18	9		23.02.2007	35,7	35,8	35,3	34,8	35,7	86,4
24	12		26.02.2007	35,7	35,7	35,4	34,7	35,7	86,6
28	14		28.02.2007	35,8	35,9	35,3	34,8	35,7	86,6
30	15		01.03.2007	35,9	35,6	35,4	34,7	35,6	86,4
38	19		05.03.2007	35,9	36,1	35,4	34,8	35,7	86,3
42	21		07.03.2007	36,0	36,1	35,4	34,9	35,7	86,6
46	23		09.03.2007	36,1	36,1	35,4	34,9	35,7	86,5
52	26		12.03.2007	36,7	36,9	36,0	35,6	36,1	86,7
56	28		14.03.2007	36,7	37,1	36,3	35,5	36,1	86,6

Tabelle A 34: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „300 CEM II/A-LL 32,5 R/0,60“ (CIF-Verfahren)

Beton 300 CEM II/A-LL 32,5R/0,60

Herstelldatum	21.02.2007	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	11,05	10,92	11,07	11,05	11,01
Länge	[cm]	15,00	14,99	14,98	15,01	15,03

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]	[d]	ohne Abdichtung	14.03.2007	2755,80	2691,20	2770,22	2773,72	2754,18
		mit Abdichtung	14.03.2007	2823,88	2754,83	2834,98	2838,25	2817,25
	-7	trocken	21.03.2007	2822,61	2752,24	2832,86	2835,00	2813,65
	-5	kapillares Saugen	23.03.2007	2840,83	2769,45	2853,43	2855,46	2833,31
	-2		26.03.2007	2845,58	2773,62	2859,22	2860,60	2838,41
0	0	vor Frost	28.03.2007	2847,79	2775,64	2861,74	2863,20	2840,95
4	2	Frost	30.03.2007	2851,31	2778,87	2866,07	2867,15	2845,01
10	5		02.04.2007	2856,82	2783,03	2871,12	2872,71	2851,67
14	7		04.04.2007	2860,04	2786,03	2874,79	2876,03	2854,55
16	8		05.04.2007	2861,13	2786,91	2875,90	2877,43	2855,89
26	13		10.04.2007	2870,96	2795,52	2885,72	2888,03	2864,99
28	14		11.04.2007	2872,72	2796,84	2886,72	2889,42	2865,70
32	16		13.04.2007	2875,71	2799,78	2888,47	2891,44	2867,47
38	19		16.04.2007	2878,71	2802,96	2889,94	2893,33	2868,96
42	21		18.04.2007	2880,09	2803,55	2891,05	2893,99	2869,53
46	23		20.04.2007	2880,91	2804,37	2891,75	2894,48	2870,15
52	26		23.04.2007	2882,02	2805,42	2892,05	2894,32	2870,97
56	28		25.04.2007	2882,60	2805,94	2892,28	2894,07	2871,18

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
4	2	Frost	30.03.2007	0,79	0,63	0,81	0,72	0,66
10	5		02.04.2007	0,33	0,43	0,63	0,63	0,30
14	7		04.04.2007	0,18	0,28	0,50	0,33	0,26
16	8		05.04.2007	0,12	0,15	0,18	0,15	0,09
26	13		10.04.2007	0,45	0,57	0,62	0,67	0,52
28	14		11.04.2007	0,11	0,18	0,24	0,16	0,22
32	16		13.04.2007	0,13	0,21	0,40	0,24	0,31
38	19		16.04.2007	0,33	0,25	0,49	0,30	0,51
42	21		18.04.2007	0,23	0,31	0,26	0,25	0,25
46	23		20.04.2007	0,18	0,35	0,37	0,29	0,30
52	26		23.04.2007	0,42	0,39	0,45	1,45	0,44
56	28		25.04.2007	0,28	0,27	0,43	0,46	0,45

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	28.03.2007	45,1	45,6	44,9	45,1	45,1	108,1
4	2	Frost	30.03.2007	45,2	45,5	44,8	45,2	45,3	107,8
10	5		02.04.2007	45,6	45,7	45,0	45,5	45,6	108,2
14	7		04.04.2007	45,5	45,9	45,1	45,5	45,5	108,5
16	8		05.04.2007	45,4	45,6	45,0	45,2	45,4	108,1
26	13		10.04.2007	45,4	45,9	45,1	45,6	45,4	108,5
28	14		11.04.2007	45,4	45,9	45,1	45,5	45,4	108,7
32	16		13.04.2007	45,5	45,6	45,0	45,4	45,5	108,8
38	19		16.04.2007	45,4	45,7	45,2	45,5	45,4	108,7
42	21		18.04.2007	45,2	45,5	45,2	45,3	45,3	108,3
46	23		20.04.2007	44,6	45,0	44,5	44,8	44,7	108,0
52	26		23.04.2007	44,8	44,9	44,3	44,9	44,8	107,7
56	28		25.04.2007	44,6	44,9	44,2	44,9	44,6	108,3

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	28.03.2007	37,2	37,4	37,4	36,4	37,4	87,0
4	2	Frost	30.03.2007	36,8	37,2	36,8	36,4	37,2	86,6
10	5		02.04.2007	36,8	37,5	36,8	36,4	37,1	86,5
14	7		04.04.2007	36,8	37,1	36,9	36,2	37,0	86,6
16	8		05.04.2007	36,5	37,0	36,6	36,2	37,0	86,8
26	13		10.04.2007	36,9	37,6	37,4	36,7	37,3	86,7
28	14		11.04.2007	37,0	37,6	37,2	36,7	37,4	86,9
32	16		13.04.2007	36,2	36,9	36,4	36,0	36,7	86,6
38	19		16.04.2007	36,6	37,3	36,9	36,3	37,1	86,7
42	21		18.04.2007	36,2	36,8	36,4	36,0	36,6	86,2
46	23		20.04.2007	37,7	38,5	38,3	37,4	38,6	86,7
52	26		23.04.2007						
56	28		25.04.2007	36,2	36,6	36,4	35,6	36,5	86,2

Tabelle A 35: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „320 CEM II/A-LL 32,5 R/0,50“ (CIF-Verfahren)

Beton 320 CEM II/A-LL 32,5R/0,50

Herstelldatum	21.02.2007	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	11,06	11,20	11,11	11,09	11,02
Länge	[cm]	14,98	15,04	15,00	15,00	15,02

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]		ohne Abdichtung	14.03.2007	2859,05	2836,66	2788,44	2864,49	2791,49
		mit Abdichtung	14.03.2007	2933,87	2910,47	2861,91	2938,64	2865,56
	-7	trocken	21.03.2007	2931,75	2908,22	2859,54	2936,39	2863,26
	-5	kapillares Saugen	23.03.2007	2946,30	2920,38	2872,99	2949,23	2875,49
	-2		26.03.2007	2950,43	2923,47	2876,26	2952,84	2878,27
0	0	vor Frost	28.03.2007	2952,32	2924,57	2877,87	2954,11	2879,54
4	2	Frost	30.03.2007	2956,20	2928,27	2881,26	2957,78	2883,16
10	5		02.04.2007	2962,27	2933,23	2886,50	2963,40	2887,99
14	7		04.04.2007	2965,29	2936,59	2889,03	2966,29	2890,81
16	8		05.04.2007	2966,55	2937,76	2890,45	2967,70	2892,19
26	13		10.04.2007	2974,29	2947,34	2899,29	2977,20	2901,02
28	14		11.04.2007	2974,97	2948,61	2900,64	2978,63	2902,37
32	16		13.04.2007	2976,87	2951,49	2903,10	2980,99	2905,34
38	19		16.04.2007	2979,43	2954,63	2905,39	2983,68	2908,05
42	21		18.04.2007	2981,58	2957,16	2907,65	2985,85	2909,49
46	23		20.04.2007	2982,46	2958,73	2908,86	2986,99	2910,75
52	26		23.04.2007	2984,44	2961,39	2910,84	2989,51	2912,78
56	28		25.04.2007	2985,58	2962,84	2912,02	2990,61	2913,88

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
4	2	Frost	30.03.2007	0,27	0,21	0,24	0,27	0,22
10	5		02.04.2007	0,20	0,28	0,32	0,26	0,25
14	7		04.04.2007	0,15	0,19	0,17	0,19	0,17
16	8		05.04.2007	0,08	0,08	0,04	0,10	0,07
26	13		10.04.2007	0,27	0,33	0,29	0,28	0,34
28	14		11.04.2007	0,11	0,20	0,09	0,08	0,09
32	16		13.04.2007	0,11	0,08	0,10	0,11	0,12
38	19		16.04.2007	0,17	0,20	0,17	0,23	0,25
42	21		18.04.2007	0,14	0,18	0,21	0,12	0,14
46	23		20.04.2007	0,18	0,17	0,18	0,13	0,15
52	26		23.04.2007	0,25	0,21	0,28	0,21	0,22
56	28		25.04.2007	0,20	0,18	0,20	0,18	0,20

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	28.03.2007	43,9	44,3	44,3	43,7	43,9	108,1
4	2	Frost	30.03.2007	44,2	44,3	44,5	43,5	44,1	107,9
10	5		02.04.2007	44,7	44,5	44,6	44,0	44,5	108,6
14	7		04.04.2007	44,3	44,7	44,7	44,1	44,5	108,1
16	8		05.04.2007	44,8	44,4	44,7	43,8	44,3	108,2
26	13		10.04.2007	44,9	45,0	44,9	44,6	44,5	108,5
28	14		11.04.2007	44,9	45,2	45,0	45,0	44,5	108,7
32	16		13.04.2007	45,2	46,0	45,2	45,5	44,6	108,8
38	19		16.04.2007	45,6	46,5	45,4	46,9	45,0	108,7
42	21		18.04.2007	46,5	47,6	46,0	47,6	45,2	108,7
46	23		20.04.2007	46,1	47,0	45,4	47,7	45,3	108,0
52	26		23.04.2007	47,4	49,6	46,1	50,4	45,6	108,2
56	28		25.04.2007	47,8	50,3	46,3	51,3	45,7	108,3

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	28.03.2007	36,5	35,8	36,2	35,4	36,7	87,0
4	2	Frost	30.03.2007	36,1	35,5	36,0	35,2	36,8	86,7
10	5		02.04.2007	36,8	35,9	36,5	35,7	36,8	86,9
14	7		04.04.2007	36,6	35,5	36,0	35,2	36,5	86,7
16	8		05.04.2007	36,3	35,2	35,7	35,1	36,4	86,9
26	13		10.04.2007	36,9	36,1	36,3	35,8	37,2	86,7
28	14		11.04.2007	36,8	36,0	36,4	35,8	37,1	86,9
32	16		13.04.2007	36,2	35,3	35,8	35,2	36,4	86,6
38	19		16.04.2007	36,7	36,0	36,2	35,6	36,8	86,7
42	21		18.04.2007	36,3	35,7	35,9	35,5	36,1	86,2
46	23		20.04.2007	38,4	38,0	37,8	38,0	38,0	86,7
52	26		23.04.2007						
56	28		25.04.2007	37,2	37,4	36,4	37,0	36,6	86,1

Tabelle A 36: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60“ (CIF-Verfahren)

Beton 300 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,60

Herstelldatum	09.05.2006	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	11,05	10,89	10,97	10,97	10,97
Länge	[cm]	14,99	15,01	15,05	14,99	14,99

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]	[d]	ohne Abdichtung	30.05.2006	2649,25	2641,33	2658,25	2674,70	2675,65
		mit Abdichtung	30.05.2006	2723,36	2704,28	2721,36	2738,27	2738,87
	-7	trocken	07.06.2006	2718,87	2700,29	2717,19	2734,80	2734,85
	-5	kapillares Saugen	09.06.2006	2754,58	2737,67	2750,15	2777,99	2769,18
	-2		12.06.2006	2766,97	2752,98	2763,03	2794,72	2782,86
0	0	vor Frost	14.06.2006	2769,76	2756,40	2766,07	2798,85	2786,50
10	5	Frost	19.06.2006	2781,34	2769,66	2778,81	2812,76	2799,58
14	7		21.06.2006	2784,92	2773,62	2783,27	2815,61	2803,74
18	9		23.06.2006	2788,10	2777,18	2787,08	2816,66	2807,37
24	12		26.06.2006	2791,97	2779,12	2790,26	2817,23	2810,29
28	14		28.06.2006	2793,66	2779,52	2791,34	2816,92	2811,04
32	16		30.06.2006	2795,01	2780,07	2791,69	2817,41	2811,91
38	19		03.07.2006	2795,50	2779,92	2791,79	2817,46	2812,17
42	21		05.07.2006	2795,56	2779,31	2791,87	2817,30	2811,95
46	23		07.07.2006	2795,97	2779,30	2791,84	2816,76	2812,13
52	26		10.07.2006	2796,22	2778,90	2791,47	2816,09	2811,62
56	28		12.07.2006	2796,42	2778,72	2790,91	2815,47	2811,53

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
10	5	Frost	19.06.2006	0,90	1,71	1,47	1,91	0,84
14	7		21.06.2006	0,35	0,69	0,41	0,80	0,42
18	9		23.06.2006	0,23	0,48	0,42	0,70	0,33
24	12		26.06.2006	0,56	0,88	0,65	1,15	0,50
28	14		28.06.2006	0,41	0,73	0,47	0,75	0,37
32	16		30.06.2006	0,50	0,61	0,50	0,73	0,27
38	19		03.07.2006	0,51	0,96	0,85	0,70	0,57
42	21		05.07.2006	0,44	0,87	0,55	0,77	0,82
46	23		07.07.2006	0,42	0,79	0,73	0,68	0,62
52	26		10.07.2006	0,47	0,98	0,91	1,25	1,28
56	28		12.07.2006	0,54	0,73	0,72	1,00	0,69

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	14.06.2006	46,0	45,4	45,6	45,3	44,5	107,9
10	5	Frost	19.06.2006	45,6	45,1	45,3	44,9	44,2	107,8
14	7		21.06.2006	45,4	44,9	45,1	44,8	44,1	107,7
18	9		23.06.2006	45,4	44,8	45,0	44,7	44,0	108,0
24	12		26.06.2006	45,2	44,8	45,0	44,7	44,0	108,0
28	14		28.06.2006	45,2	44,8	44,9	44,8	44,0	108,0
32	16		30.06.2006	45,2	44,8	44,8	44,7	43,8	108,0
38	19		03.07.2006	45,2	44,9	44,8	44,7	43,9	108,0
42	21		05.07.2006	45,2	44,8	44,9	44,6	44,1	108,1
46	23		07.07.2006	45,2	44,8	44,9	44,7	44,0	107,8
52	26		10.07.2006	45,2	44,9	45,0	44,8	44,1	107,9
56	28		12.07.2006	45,2	45,0	45,0	44,9	44,1	108,1

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	14.06.2006	37,6	38,3	36,7	37,1	37,6	85,5
10	5	Frost	19.06.2006	37,4	37,9	36,5	36,7	37,4	85,2
14	7		21.06.2006	37,2	37,9	36,4	36,7	37,3	85,1
18	9		23.06.2006	37,1	37,8	36,3	36,7	37,3	85,3
24	12		26.06.2006	37,0	37,7	36,3	36,7	37,2	85,3
28	14		28.06.2006	37,0	37,7	36,2	36,6	37,2	85,4
32	16		30.06.2006	37,0	37,7	36,2	36,6	37,2	85,7
38	19		03.07.2006	37,0	37,7	36,2	36,6	37,1	85,5
42	21		05.07.2006	37,0	37,7	36,2	36,6	37,2	85,7
46	23		07.07.2006	37,0	37,7	36,2	36,6	37,2	85,3
52	26		10.07.2006	37,0	37,7	36,3	36,6	37,2	85,3
56	28		12.07.2006	36,9	37,7	36,2	36,6	37,2	85,3

Tabelle A 37: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50“ (CIF-Verfahren)

Beton 320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50

Herstelldatum	12.06.2006	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	10,96	10,93	10,94	10,93	10,89
Länge	[cm]	15,00	15,00	14,99	15,00	15,01

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]		ohne Abdichtung	04.07.2006	2800,49	2751,92	2671,70	2756,67	2786,78
		mit Abdichtung	04.07.2006	2862,53	2814,30	2734,35	2818,76	2848,56
	-7	trocken	10.07.2006	2860,80	2812,48	2732,55	2816,98	2846,73
	-5	kapillares Saugen	12.07.2006	2879,98	2832,32	2750,08	2837,75	2865,80
	-3		14.07.2006	2883,84	2836,03	2753,64	2841,91	2869,77
0	0	vor Frost	17.07.2006	2887,42	2839,75	2757,04	2845,43	2873,11
4	2	Frost	19.07.2006	2890,09	2842,97	2759,41	2849,36	2877,49
8	4		21.07.2006	2892,99	2846,22	2761,84	2852,57	2881,35
14	7		24.07.2006	2897,51	2851,03	2765,50	2858,53	2887,27
18	9		26.07.2006	2900,85	2853,90	2767,39	2861,84	2891,14
22	11		28.07.2006	2904,09	2857,20	2769,42	2865,12	2894,28
28	14		31.07.2006	2908,47	2861,35	2773,03	2869,13	2897,68
32	16		02.08.2006	2910,76	2863,23	2775,24	2870,69	2899,47
36	18		04.08.2006	2912,44	2864,59	2777,30	2872,10	2900,44
42	21		07.08.2006	2914,43	2866,34	2780,70	2873,60	2902,09
46	23		09.08.2006	2915,80	2867,37	2781,88	2874,40	2902,53
50	25		11.08.2006	2916,45	2867,99	2783,08	2875,01	2903,55
56	28		14.08.2006	2917,62	2869,36	2784,50	2875,60	2904,39

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
4	2	Frost	19.07.2006	0,07	0,06	0,11	0,15	0,15
8	4		21.07.2006	0,14	0,06	0,08	0,10	0,04
14	7		24.07.2006	0,19	0,15	0,14	0,15	0,27
18	9		26.07.2006	0,11	0,08	0,10	0,18	0,15
22	11		28.07.2006	0,06	0,13	0,14	0,14	0,08
28	14		31.07.2006	0,18	0,15	0,20	0,20	0,23
32	16		02.08.2006	0,16	0,11	0,13	0,12	0,13
36	18		04.08.2006	0,15	0,12	0,12	0,15	0,13
42	21		07.08.2006	0,16	0,15	0,17	0,31	0,22
46	23		09.08.2006	0,11	0,10	0,20	0,25	0,18
50	25		11.08.2006	0,16	0,18	0,18	0,23	0,20
56	28		14.08.2006	0,25	0,20	0,34	0,47	0,24

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	17.07.2006	43,0	44,2	44,4	43,9	43,7	108,1
4	2	Frost	19.07.2006	43,1	44,3	44,6	44,0	43,9	108,3
8	4		21.07.2006	43,1	44,2	44,6	44,0	44,0	108,1
14	7		24.07.2006	43,1	44,2	44,5	43,9	43,9	108,1
18	9		26.07.2006	42,9	44,0	44,4	43,8	43,7	108,0
22	11		28.07.2006	42,7	44,0	44,3	43,6	43,6	108,0
28	14		31.07.2006	42,6	43,8	44,3	43,5	43,5	107,9
32	16		02.08.2006	42,6	43,8	44,1	43,5	43,3	108,0
36	18		04.08.2006	42,5	43,6	44,0	43,3	43,3	108,0
42	21		07.08.2006	42,6	43,5	44,1	43,2	43,3	108,0
46	23		09.08.2006	42,5	43,5	43,8	43,2	43,3	108,0
50	25		11.08.2006	42,4	43,5	43,6	43,2	43,1	108,1
56	28		14.08.2006	42,5	43,4	43,7	43,2	43,2	108,0

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	17.07.2006	36,3	35,8	36,2	36,3	36,6	85,3
4	2	Frost	19.07.2006	36,4	35,8	36,3	36,3	36,7	85,3
8	4		21.07.2006	36,4	35,8	36,2	36,3	36,6	85,3
14	7		24.07.2006	36,3	35,8	36,2	36,2	36,5	85,1
18	9		26.07.2006	36,2	35,8	36,1	36,1	36,5	85,1
22	11		28.07.2006	36,2	35,7	36,1	36,0	36,5	85,1
28	14		31.07.2006	36,1	35,6	36,1	36,0	36,3	85,3
32	16		02.08.2006	36,0	35,5	36,0	35,9	36,2	85,5
36	18		04.08.2006	36,0	35,6	35,9	35,9	36,2	85,8
42	21		07.08.2006	35,9	35,4	35,8	35,9	36,2	85,9
46	23		09.08.2006	35,8	35,4	35,8	35,8	36,1	85,8
50	25		11.08.2006	35,8	35,4	35,8	35,8	36,2	85,9
56	28		14.08.2006	35,8	35,4	35,7	35,8	36,0	86,2

Tabelle A 38: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50/BV“ (CIF-Verfahren)

Beton 320 CEM II/B-M (S-LL) 32,5 R/0,50/BV

Herstelldatum	25.07.2007	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	10,86	10,85	10,95	10,84	10,92
Länge	[cm]	14,98	15,01	15,03	15,01	15,01

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]	[d]	ohne Abdichtung	16.08.2007	2693,80	2672,38	2782,08	2713,07	2798,76
		mit Abdichtung	16.08.2007	2755,15	2733,94	2843,37	2773,32	2860,82
	-7	trocken	22.08.2007	2752,66	2731,64	2840,98	2770,59	2858,07
	-5	kapillares Saugen	24.08.2007	2764,60	2745,56	2853,60	2783,05	2869,58
	-2		27.08.2007	2769,79	2750,24	2858,79	2787,82	2875,26
0	0	vor Frost	29.08.2007	2771,05	2750,94	2860,08	2789,03	2877,12
4	2	Frost	31.08.2007	2772,21	2753,81	2861,71	2790,91	2879,72
10	5		03.09.2007	2775,88	2758,16	2864,94	2794,54	2884,66
14	7		05.09.2007	2777,28	2760,26	2866,40	2796,46	2887,13
18	9		07.09.2007	2779,51	2762,81	2869,16	2799,19	2890,12
24	12		10.09.2007	2783,67	2767,64	2874,15	2804,14	2895,75
28	14		12.09.2007	2786,89	2771,96	2878,20	2807,51	2898,92
32	16		14.09.2007	2789,79	2773,96	2880,60	2810,06	2901,25
38	19		17.09.2007	2793,50	2777,55	2883,75	2813,19	2904,19
42	21		19.09.2007	2795,85	2779,58	2885,75	2815,06	2906,01
52	26		24.09.2007	2800,22	2783,48	2889,24	2818,63	2909,72
56	28		26.09.2007	2801,10	2784,70	2890,88	2819,95	2910,95

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
4	2	Frost	31.08.2007	0,16	0,13	0,14	0,11	0,12
10	5		03.09.2007	0,19	0,21	0,26	0,14	0,22
14	7		05.09.2007	0,09	0,11	0,19	0,10	0,11
18	9		07.09.2007	0,15	0,14	0,13	0,13	0,10
24	12		10.09.2007	0,25	0,18	0,24	0,19	0,20
28	14		12.09.2007	0,16	0,12	0,11	0,13	0,12
32	16		14.09.2007	0,14	0,12	0,14	0,17	0,11
38	19		17.09.2007	0,21	0,14	0,23	0,20	0,14
42	21		19.09.2007	0,14	0,07	0,19	0,12	0,11
52	26		24.09.2007	0,36	0,26	0,38	0,28	0,27
56	28		26.09.2007	0,24	0,10	0,19	0,16	0,14

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	29.08.2007	36,4	36,6	36,0	36,1	36,0	86,2
4	2	Frost	31.08.2007	36,7	36,8	36,0	36,1	36,0	86,6
10	5		03.09.2007	36,4	36,7	35,9	36,0	35,9	86,5
14	7		05.09.2007	36,6	36,7	36,0	36,0	36,0	86,9
18	9		07.09.2007	36,7	36,6	35,9	36,1	35,9	86,6
24	12		10.09.2007	36,5	36,6	36,0	36,0	35,9	86,2
28	14		12.09.2007	36,6	36,5	36,0	36,0	35,8	86,3
32	16		14.09.2007	36,6	36,4	35,9	35,9	35,7	86,5
38	19		17.09.2007	36,5	36,4	35,8	35,9	35,7	85,9
42	21		19.09.2007	36,0	36,0	35,4	35,6	35,3	86,0
52	26		24.09.2007	35,8	36,1	35,5	35,5	35,3	86,2
56	28		26.09.2007	35,6	36,1	35,5	35,5	35,4	86,1

Tabelle A 39: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „300 CEM III/B 32,5 N/0,60/BV“ (CIF-Verfahren)

Beton 300 CEM III/B 32,5N/0,60/BV

Herstelldatum	07.02.2007	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	10,90	11,00	11,02	11,08	10,93
Länge	[cm]	15,01	14,99	14,98	15,03	15,00

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]	[d]	ohne Abdichtung	28.02.2007	2790,75	2816,30	2693,56	2738,68	2770,65
		mit Abdichtung	28.02.2007	2865,12	2890,31	2769,39	2714,50	2845,76
	-7	trocken	07.03.2007	2863,14	2888,29	2767,32	2712,48	2843,74
	-5	kapillares Saugen	09.03.2007	2882,21	2908,57	2786,13	2833,33	2862,68
	-2		12.03.2007	2887,66	2913,52	2790,43	2839,35	2868,42
0	0	vor Frost	14.03.2007	2889,30	2914,04	2791,20	2840,62	2869,87
4	2	Frost	16.03.2007	2894,50	2918,09	2797,06	2846,30	2875,48
10	5		19.03.2007	2906,63	2930,16	2808,58	2857,84	2887,01
14	7		21.03.2007	2913,33	2937,78	2815,39	2864,08	2893,49
18	9		23.03.2007	2919,03	2944,41	2820,92	2869,00	2899,15
24	12		26.03.2007	2922,78	2949,20	2824,80	2872,34	2902,39
28	14		28.03.2007	2924,32	2951,31	2827,50	2874,13	2904,30
32	16		30.03.2007	2925,38	2953,32	2828,35	2875,09	2905,55
38	19		02.04.2007	2926,96	2955,28	2829,20	2875,30	2907,35
40	20		03.04.2007	2927,43	2954,50	2828,93	2874,73	2907,66
44	22		05.04.2007	2926,92	2954,18	2828,75	2869,25	2907,90
54	27		10.04.2007	2931,60	2960,21	2833,07	2873,67	2913,10
56	28		11.04.2007	2930,60	2959,39	2831,19	2873,31	2914,17

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
4	2	Frost	16.03.2007	0,78	0,20	0,43	0,65	0,50
10	5		19.03.2007	0,54	0,21	0,32	0,32	0,32
14	7		21.03.2007	0,47	0,14	0,32	0,28	0,30
18	9		23.03.2007	0,49	0,25	0,31	0,38	0,40
24	12		26.03.2007	0,75	0,42	0,52	1,00	0,79
28	14		28.03.2007	1,15	0,46	0,47	0,91	0,77
32	16		30.03.2007	1,18	0,67	1,57	1,63	0,95
38	19		02.04.2007	1,57	1,26	1,88	3,25	1,84
40	20		03.04.2007	1,45	1,44	1,83	3,54	1,47
44	22		05.04.2007	1,14	1,21	1,69	2,56	0,78
54	27		10.04.2007	4,36	4,52	5,67	3,43	4,24
56	28		11.04.2007	2,38	1,60	2,87	2,53	1,07

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	14.03.2007	44,0	43,8	44,6	44,1	44,6	108,2
4	2	Frost	16.03.2007	44,6	44,4	45,2	44,6	45,2	107,4
10	5		19.03.2007	44,9	44,8	46,0	45,4	46,0	107,6
14	7		21.03.2007	45,9	45,3	47,0	46,6	47,0	107,6
18	9		23.03.2007	49,3	47,3	49,5	49,2	49,7	107,9
24	12		26.03.2007	54,0	50,8	53,2	53,1	54,1	107,9
28	14		28.03.2007	57,4	53,5	55,7	56,8	56,8	108,1
32	16		30.03.2007	60,5	56,4	58,9	60,1	60,9	108,0
38	19		02.04.2007	67,9	61,7	68,1	67,8	68,3	108,5
40	20		03.04.2007	68,2	67,9	68,3	68,2	68,5	108,4
44	22		05.04.2007	68,6	68,4	68,7	68,3	68,8	108,3
54	27		10.04.2007	68,8	68,3	68,4	68,7	68,5	108,5
56	28		11.04.2007	69,0	68,9	68,2	68,7	68,2	108,7

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	14.03.2007	37,4	37,1	36,9	36,3	37,2	86,7
4	2	Frost	16.03.2007	37,7	37,6	37,2	36,9	37,4	86,9
10	5		19.03.2007	38,1	38,0	37,8	37,3	37,8	86,8
14	7		21.03.2007	38,7	38,6	38,8	38,2	38,5	86,6
18	9		23.03.2007	40,0	39,3	40,3	39,6	39,6	86,8
24	12		26.03.2007	43,1	42,0	42,9	42,8	43,1	86,8
28	14		28.03.2007	45,3	44,3	45,0	45,1	45,3	86,8
32	16		30.03.2007	49,8	47,5	48,1	48,4	48,1	86,7
38	19		02.04.2007	73,6	72,7	73,4	72,3	72,3	86,7
40	20		03.04.2007	75,9	74,7	73,8	72,7	74,9	86,6
44	22		05.04.2007	76,3	75,1	73,1	73,4	76,8	86,9
54	27		10.04.2007	85,8	74,4	75,0	73,9	76,0	86,7
56	28		11.04.2007	83,5	74,4	72,5	73,8	76,0	86,9

Tabelle A 40: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „320 CEM III/B 32,5 N/0,50/BV“ (CIF-Verfahren)

Beton 320 CEM III/B 32,5N/0,50/BV

Herstelldatum	07.02.2007	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	11,01	10,97	10,99	11,02	11,00
Länge	[cm]	14,99	15,02	15,02	14,55	15,00

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]		ohne Abdichtung	28.02.2007	2814,98	2722,45	2807,49	2732,53	2699,60
		mit Abdichtung	28.02.2007	2889,35	2797,52	2883,16	2807,53	2774,59
	-7	trocken	07.03.2007	2888,00	2796,19	2881,83	2806,16	2773,30
	-5	kapillares Saugen	09.03.2007	2898,57	2806,35	2892,07	2817,23	2783,75
	-2		12.03.2007	2901,54	2809,75	2895,14	2819,91	2786,43
0	0	vor Frost	14.03.2007	2902,33	2810,62	2895,94	2820,68	2787,42
4	2	Frost	16.03.2007	2905,36	2814,06	2899,25	2824,07	2791,09
10	5		19.03.2007	2911,29	2819,59	2905,65	2830,03	2797,12
14	7		21.03.2007	2914,87	2822,49	2908,92	2833,19	2800,40
18	9		23.03.2007	2918,15	2825,86	2912,83	2836,69	2803,92
24	12		26.03.2007	2923,24	2830,64	2918,61	2841,66	2808,76
28	14		28.03.2007	2926,76	2834,14	2921,97	2845,30	2812,03
32	16		30.03.2007	2929,29	2837,18	2925,00	2848,04	2814,99
38	19		02.04.2007	2930,39	2838,26	2925,32	2848,99	2815,51
40	20		03.04.2007	2930,96	2838,60	2926,07	2849,52	2816,52
44	22		05.04.2007	2931,91	2839,62	2927,05	2849,94	2816,76
54	27		10.04.2007	2935,51	2843,68	2931,75	2854,38	2821,40
56	28		11.04.2007	2936,24	2844,95	2932,64	2854,97	2822,32

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
4	2	Frost	16.03.2007	0,76	0,48	0,40	0,60	0,46
10	5		19.03.2007	0,49	0,32	0,31	0,23	0,21
14	7		21.03.2007	0,27	0,16	0,16	0,14	0,17
18	9		23.03.2007	0,23	0,15	0,15	0,09	0,12
24	12		26.03.2007	0,28	0,16	0,16	0,15	0,19
28	14		28.03.2007	0,25	0,12	0,08	0,09	0,14
32	16		30.03.2007	0,30	0,18	0,15	0,15	0,12
38	19		02.04.2007	0,49	0,26	0,27	0,24	0,25
40	20		03.04.2007	0,12	0,16	0,18	0,16	0,21
44	22		05.04.2007	0,14	0,18	0,11	0,13	0,07
54	27		10.04.2007	0,73	0,35	0,37	0,42	0,42
56	28		11.04.2007	0,19	0,12	0,12	0,16	0,11

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	14.03.2007	43,4	42,9	43,8	45,2	43,4	108,0
4	2	Frost	16.03.2007	43,7	43,0	44,1	45,5	43,6	107,5
10	5		19.03.2007	43,9	43,3	44,2	45,7	43,9	107,6
14	7		21.03.2007	43,9	43,5	44,2	45,8	43,9	107,5
18	9		23.03.2007	44,4	44,2	44,6	46,2	44,6	108,0
24	12		26.03.2007	44,7	44,4	45,2	46,4	44,9	108,0
28	14		28.03.2007	44,8	44,9	45,4	46,9	44,9	108,1
32	16		30.03.2007	45,4	45,3	46,0	47,2	45,6	108,0
38	19		02.04.2007	46,8	46,8	47,4	48,3	46,9	108,6
40	20		03.04.2007	47,3	47,6	48,3	49,2	47,6	108,2
44	22		05.04.2007	47,5	47,8	48,3	49,4	47,7	108,2
54	27		10.04.2007	49,2	49,7	50,3	51,2	49,6	108,5
56	28		11.04.2007	49,6	50,1	50,9	51,5	50,0	108,7

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	14.03.2007	36,5	37,0	36,6	36,4	36,3	86,6
4	2	Frost	16.03.2007	36,4	36,9	36,7	36,4	36,4	86,6
10	5		19.03.2007	36,6	37,1	37,0	36,7	36,6	86,8
14	7		21.03.2007	36,8	37,1	37,1	36,5	36,8	86,7
18	9		23.03.2007	36,4	37,0	36,8	36,2	36,6	86,8
24	12		26.03.2007	37,0	37,6	37,2	37,0	37,1	86,9
28	14		28.03.2007	36,9	37,6	37,4	37,0	37,1	86,9
32	16		30.03.2007	37,1	38,0	37,8	37,6	37,6	86,5
38	19		02.04.2007	38,5	38,8	38,7	38,3	38,4	86,9
40	20		03.04.2007	38,4	39,0	39,1	39,0	38,7	86,7
44	22		05.04.2007	38,8	39,1	39,4	39,1	39,0	86,9
54	27		10.04.2007	41,6	42,1	42,1	42,2	41,9	86,7
56	28		11.04.2007	42,5	42,1	42,1	41,9	42,1	86,9

Tabelle A 41: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60“ (CIF-Verfahren)

Beton 270 CEM I 32,5 R/60 SFA/0,60

Herstelldatum	09.10.2006	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	11,33	11,30	11,29	11,27	11,10
Länge	[cm]	14,55	14,55	14,56	15,00	14,55

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]		ohne Abdichtung	30.10.2006	2884,68	2827,99	2840,91	2708,99	2821,23
		mit Abdichtung	30.10.2006	2957,35	2900,63	2914,72	2783,39	2895,59
	-7	trocken	06.11.2006	2954,34	2897,49	2911,56	2780,29	2892,67
	-5	kapillares Saugen	08.11.2006	2971,09	2914,56	2929,57	2796,05	2907,94
	-3		10.11.2006	2973,82	2917,37	2932,61	2798,36	2910,54
0	0	vor Frost	13.11.2006	2976,34	2920,08	2935,76	2800,76	2913,21
4	2	Frost	15.11.2006	2980,78	2924,61	2940,62	2804,31	2918,45
8	4		17.11.2006	2985,51	2929,09	2946,10	2808,05	2923,49
14	7		20.11.2006	2993,13	2936,32	2952,95	2813,84	2931,09
18	9		22.11.2006	2998,16	2941,36	2956,66	2817,53	2934,21
22	11		24.11.2006	3002,39	2945,19	2960,55	2821,41	2937,36
28	14		27.11.2006	3007,10	2950,84	2965,29	2826,63	2941,72
32	16		29.11.2006	3010,25	2954,47	2968,90	2829,71	2945,12
36	18		01.12.2006	3014,14	2958,00	2971,54	2833,14	2948,23
42	21		04.12.2006	3017,86	2961,13	2975,13	2836,11	2950,79
46	23		06.12.2006	3019,99	2963,46	2977,09	2837,56	2951,97
50	25		08.12.2006	3022,24	2966,26	2979,19	2840,20	2953,45
56	28		11.12.2006	3027,00	2970,89	2982,94	2842,41	2956,65

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
4	2	Frost	15.11.2006	0,56	0,53	0,72	1,00	0,35
8	4		17.11.2006	0,31	0,20	0,21	0,32	0,19
14	7		20.11.2006	0,34	0,28	0,35	0,52	0,27
18	9		22.11.2006	0,22	0,13	0,22	0,27	0,21
22	11		24.11.2006	0,21	0,17	0,16	0,21	0,18
28	14		27.11.2006	0,42	0,29	0,52	0,46	0,53
32	16		29.11.2006	0,28	0,23	0,34	0,31	0,22
36	18		01.12.2006	0,34	0,22	0,31	0,22	0,36
42	21		04.12.2006	0,62	0,58	0,81	0,44	1,09
46	23		06.12.2006	0,62	0,36	0,63	0,55	0,84
50	25		08.12.2006	0,88	0,41	1,06	0,51	0,79
56	28		11.12.2006	1,17	0,72	1,67	0,66	0,62

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	13.11.2006	45,7	45,7	45,8	43,3	45,5	107,9
4	2	Frost	15.11.2006	45,8	46,1	45,9	43,4	45,8	107,9
8	4		17.11.2006	45,7	45,9	45,9	43,5	45,7	107,8
14	7		20.11.2006	45,9	46,0	46,2	43,5	45,9	107,9
18	9		22.11.2006	46,0	46,2	46,2	43,5	45,9	107,7
22	11		24.11.2006	46,5	46,5	46,8	43,5	45,8	107,8
28	14		27.11.2006	48,1	48,3	49,1	43,8	46,8	107,6
32	16		29.11.2006	51,1	51,6	52,8	45,6	49,4	108,5
36	18		01.12.2006	54,8	56,0	56,1	47,7	51,3	107,9
42	21		04.12.2006	58,0	56,5	56,4	48,2	52,5	107,7
46	23		06.12.2006	67,9	67,2	66,5	57,1	60,7	107,7
50	25		08.12.2006	68,4	67,1	68,9	61,1	66,0	107,9
56	28		11.12.2006	68,0	67,5	69,7	68,1	69,1	108,0

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	13.11.2006	34,2	33,9	34,3	33,8	35,4	87,0
4	2	Frost	15.11.2006	34,5	34,0	34,4	33,8	35,5	86,6
8	4		17.11.2006	34,7	34,3	34,7	34,2	35,9	87,3
14	7		20.11.2006	34,6	34,2	34,6	34,0	35,8	86,2
18	9		22.11.2006	34,5	34,3	34,3	34,0	35,9	86,4
22	11		24.11.2006	34,7	34,3	34,4	34,0	36,1	86,6
28	14		27.11.2006	35,8	36,0	35,3	34,7	36,7	86,7
32	16		29.11.2006	37,0	38,1	36,3	35,2	37,4	87,1
36	18		01.12.2006	39,7	41,5	38,3	36,5	38,6	86,5
42	21		04.12.2006	45,0	47,2	43,1	40,1	41,9	86,4
46	23		06.12.2006	48,3	49,8	46,4	42,6	43,7	86,8
50	25		08.12.2006	52,0	53,2	49,2	46,1	45,7	86,5
56	28		11.12.2006	57,9	82,0	59,3	50,7	49,2	86,7

Tabelle A 42: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „270 CEM I 32,5 R/ 89 SFA /0,50“ (CIF-Verfahren)

Beton 270 CEM I 32,5 R/89 SFA/0,50

Herstelldatum	19.10.2006	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	10,94	10,95	11,05	11,01	10,96
Länge	[cm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,00

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]		ohne Abdichtung	09.11.2006	2825,07	2798,75	2895,37	2740,71	2808,59
		mit Abdichtung	09.11.2006	2896,85	2871,44	2967,57	2811,77	2880,52
	-7	trocken	17.11.2006	2894,78	2869,30	2965,30	2809,73	2878,69
	-4	kapillares Saugen	20.11.2006	2907,67	2881,82	2977,68	2823,53	2893,33
	-2		22.11.2006	2908,98	2882,82	2978,62	2824,45	2895,01
0	0	vor Frost	24.11.2006	2909,93	2884,03	2979,52	2825,52	2896,24
6	3	Frost	27.11.2006	2913,16	2888,04	2982,31	2827,89	2899,48
10	5		29.11.2006	2914,71	2890,11	2983,84	2829,31	2901,55
14	7		01.12.2006	2918,25	2893,06	2986,46	2831,47	2904,54
20	10		04.12.2006	2922,62	2898,50	2991,51	2835,15	2909,33
24	12		06.12.2006	2925,70	2901,76	2994,74	2838,49	2912,14
28	14		08.12.2006	2928,87	2905,15	2998,62	2842,00	2915,75
34	17		11.12.2006	2934,14	2909,96	3004,45	2847,98	2920,07
38	19		13.12.2006	2936,88	2913,48	3007,70	2851,46	2923,43
42	21		15.12.2006	2937,91	2914,58	3009,21	2853,66	2924,85
48	24		18.12.2006	2942,66	2918,96	3014,67	2858,07	2929,03
52	26		20.12.2006	2945,10	2920,64	3016,13	2860,82	2930,42
56	28		22.12.2006	2947,09	2922,69	3017,38	2862,73	2932,57

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
6	3	Frost	27.11.2006	0,19	0,25	0,37	0,35	0,38
10	5		29.11.2006	0,21	0,15	0,12	0,12	0,17
14	7		01.12.2006	0,16	0,09	0,10	0,13	0,14
20	10		04.12.2006	0,22	0,11	0,15	0,19	0,24
24	12		06.12.2006	0,18	0,07	0,16	0,08	0,13
28	14		08.12.2006	0,18	0,08	0,17	0,19	0,16
34	17		11.12.2006	0,35	0,14	0,17	0,23	0,23
38	19		13.12.2006	0,30	0,15	0,15	0,20	0,10
42	21		15.12.2006	0,21	0,10	0,10	0,07	0,04
48	24		18.12.2006	0,25	0,28	0,28	0,24	0,21
52	26		20.12.2006	0,14	0,47	0,17	0,14	0,17
56	28		22.12.2006	0,17	0,32	0,17	0,15	0,16

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	24.11.2006	43,5	43,1	43,2	43,3	43,7	107,8
6	3	Frost	27.11.2006	43,3	43,1	43,2	43,4	43,8	107,6
10	5		29.11.2006	43,3	42,9	43,2	43,3	43,7	107,5
14	7		01.12.2006	43,4	43,0	43,5	43,6	44,1	107,9
20	10		04.12.2006	43,2	43,1	43,7	43,7	43,9	107,8
24	12		06.12.2006	43,2	42,9	43,3	43,1	43,7	107,7
28	14		08.12.2006	43,9	43,6	43,7	43,8	44,4	107,9
34	17		11.12.2006	43,4	43,1	43,0	43,0	44,1	108,0
38	19		13.12.2006	43,9	44,0	43,7	43,6	45,0	107,8
42	21		15.12.2006	44,0	43,8	43,7	43,6	44,9	108,4
48	24		18.12.2006	45,4	46,1	45,9	45,4	47,4	108,5
52	26		20.12.2006	47,5	48,3	48,9	48,2	50,0	108,6
56	28		22.12.2006	48,9	49,6	50,1	49,6	51,5	108,6

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	24.11.2006	35,8	35,2	34,7	35,7	35,4	86,6
6	3	Frost	27.11.2006	35,9	35,2	34,6	35,8	35,5	86,7
10	5		29.11.2006	35,8	35,1	34,8	35,7	35,5	87,1
14	7		01.12.2006	35,7	35,0	34,8	35,7	35,5	86,5
20	10		04.12.2006	36,0	35,3	34,9	35,8	35,5	86,4
24	12		06.12.2006	36,0	35,6	34,9	35,9	35,8	86,8
28	14		08.12.2006	36,1	35,7	35,0	35,9	35,9	86,5
34	17		11.12.2006	36,4	36,1	35,4	36,2	36,1	86,7
38	19		13.12.2006	36,6	36,2	35,9	36,4	36,5	86,7
42	21		15.12.2006	36,4	36,2	35,8	36,3	36,4	86,9
48	24		18.12.2006	37,4	37,2	37,4	37,3	37,9	86,5
52	26		20.12.2006	38,2	38,2	38,8	38,2	39,4	86,6
56	28		22.12.2006	39,1	39,2	39,8	39,2	40,7	87,1

Tabelle A 43: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48“ (CIF-Verfahren)

SVB/300 CEM II/B-S 32,5 R/220 SFA/0,48

Herstelldatum	06.09.2006	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	10,96	10,90	10,92	10,87	10,78
Länge	[cm]	15,00	15,00	14,99	15,00	15,00

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]	[d]	ohne Abdichtung	27.09.2006	2818,72	2725,77	2764,37	2720,72	2663,44
		mit Abdichtung	27.09.2006	2889,64	2797,60	2836,41	2790,97	2733,68
	-7	trocken	04.10.2006	2888,32	2796,28	2835,13	2789,64	2732,33
	-2	kapillares Saugen	09.10.2006	2899,89	2807,95	2846,18	2801,60	2744,44
	0		vor Frost	11.10.2006	2899,68	2808,18	2846,00	2801,66
4	2	Frost	13.10.2006	2903,13	2811,24	2849,10	2804,90	2746,63
10	5		16.10.2006	2908,10	2816,03	2853,39	2809,99	2750,98
14	7		18.10.2006	2910,80	2818,60	2856,47	2811,93	2754,04
18	9		20.10.2006	2913,38	2821,20	2859,03	2813,93	2755,77
24	12		23.10.2006	2916,35	2824,99	2862,50	2817,08	2758,53
28	14		25.10.2006	2919,77	2828,74	2866,68	2820,74	2761,80
32	16		27.10.2006	2923,88	2832,40	2870,16	2824,82	2764,80
38	19		30.10.2006	2930,57	2839,24	2875,99	2831,12	2770,95
46	23		03.11.2006	2936,55	2845,27	2881,99	2837,01	2778,35
52	26		06.11.2006	2941,11	2850,34	2886,05	2841,63	2783,18
56	28		08.11.2006	2942,07	2851,29	2886,86	2842,50	2784,41

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
4	2	Frost	13.10.2006	0,35	0,37	0,38	0,36	0,57
10	5		16.10.2006	0,22	0,17	0,20	0,20	0,19
14	7		18.10.2006	0,23	0,22	0,24	0,19	0,15
18	9		20.10.2006	0,15	0,28	0,26	0,16	0,16
24	12		23.10.2006	0,26	0,25	0,16	0,23	0,18
28	14		25.10.2006	0,19	0,14	0,19	0,18	0,16
32	16		27.10.2006	0,17	0,13	0,10	0,16	0,17
38	19		30.10.2006	0,18	0,13	0,22	0,20	0,19
46	23		03.11.2006	0,31	0,29	0,37	0,38	0,24
52	26		06.11.2006	0,39	0,33	0,36	0,25	0,17
56	28		08.11.2006	0,26	0,34	0,49	0,37	0,30

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	11.10.2006	43,0	43,0	42,7	42,9	43,3	107,7
4	2	Frost	13.10.2006	43,8	43,6	43,6	43,7	44,1	108,3
10	5		16.10.2006	43,9	43,6	43,7	43,7	44,1	108,4
14	7		18.10.2006	43,2	43,3	43,0	43,3	43,7	107,8
18	9		20.10.2006	43,9	43,7	43,6	43,8	44,2	108,2
24	12		23.10.2006	43,8	43,5	43,6	43,6	44,1	108,1
28	14		25.10.2006	43,8	43,6	43,5	43,8	44,1	108,0
32	16		27.10.2006	43,9	44,0	43,7	44,1	44,1	108,0
38	19		30.10.2006	45,1	44,9	44,9	45,3	44,8	107,8
46	23		03.11.2006	49,1	49,0	49,2	48,7	47,3	108,3
52	26		06.11.2006	52,5	53,0	52,9	52,4	49,9	107,9
56	28		08.11.2006	56,1	57,6	56,5	57,6	52,8	108,1

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	11.10.2006	35,3	35,7	35,2	35,7	36,1	86,2
4	2	Frost	13.10.2006	35,1	35,4	35,1	35,7	36,4	86,0
10	5		16.10.2006	35,1	35,4	35,0	35,5	36,3	86,1
14	7		18.10.2006	35,1	35,4	35,0	35,6	36,3	86,3
18	9		20.10.2006	35,2	35,3	35,1	35,6	36,3	86,6
24	12		23.10.2006	35,1	35,6	35,3	35,8	36,3	86,4
28	14		25.10.2006	35,3	35,7	35,3	36,1	36,4	86,1
32	16		27.10.2006	35,8	36,0	36,1	36,7	36,7	86,0
38	19		30.10.2006	37,6	37,5	38,2	38,3	37,9	86,1
46	23		03.11.2006	41,7	41,5	42,2	42,9	42,4	86,6
52	26		06.11.2006	44,9	45,4	45,5	45,9	46,0	87,1
56	28		08.11.2006	48,4	49,5	49,3	49,8	50,1	86,7

Tabelle A 44: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51 (CIF-Verfahren)

SVB/335 CEM I 32,5 R/293 KSM/0,51

Herstelldatum	26.02.2007	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	11,10	11,14	10,95	11,12	11,02
Länge	[cm]	15,00	15,00	14,99	14,61	14,99

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]	[d]	ohne Abdichtung	19.03.2007	2851,31	2760,71	2831,62	2692,33	2733,70
		mit Abdichtung	19.03.2007	2916,08	2825,26	2896,43	2757,52	2798,35
	-7	trocken	26.03.2007	2913,92	2822,90	2894,17	2755,15	2796,19
	-5	kapillares Saugen	28.03.2007	2918,48	2828,94	2900,07	2762,08	2802,49
	-3		30.03.2007	2919,72	2830,51	2901,70	2763,73	2804,40
0	0	vor Frost	02.04.2007	2920,51	2831,09	2902,79	2764,74	2804,40
4	2	Frost	04.04.2007	2923,20	2834,20	2905,75	2768,18	2808,55
6	3		05.04.2007	2924,58	2835,86	2907,40	2769,54	2809,71
16	8		10.04.2007	2934,42	2847,19	2918,21	2780,80	2820,47
18	9		11.04.2007	2936,22	2848,86	2920,21	2782,58	2822,54
22	11		13.04.2007	2940,39	2853,62	2924,61	2787,07	2826,55
28	14		16.04.2007	2946,55	2860,31	2931,32	2793,47	2833,12
32	16		18.04.2007	2949,81	2864,36	2934,84	2796,47	2836,62
36	18		20.04.2007	2952,78	2866,87	2938,14	2798,79	2839,48
42	21		23.04.2007	2956,70	2870,14	2942,15	2802,27	2842,70
46	23		25.04.2007	2959,13	2871,50	2944,04	2803,31	2843,88
50	25		27.04.2007	2960,57	2873,41	2945,69	2804,45	2845,56
56	28		30.04.2007	2963,15	2876,29	2948,48	2806,26	2848,03

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
4	2	Frost	04.04.2007	0,20	0,33	0,26	0,20	0,28
6	3		05.04.2007	0,07	0,08	0,07	0,06	0,09
16	8		10.04.2007	0,44	0,55	0,47	0,24	0,39
18	9		11.04.2007	0,14	0,09	0,11	0,05	0,09
22	11		13.04.2007	0,12	0,15	0,13	0,09	0,12
28	14		16.04.2007	0,23	0,27	0,22	0,23	0,28
32	16		18.04.2007	0,15	0,16	0,19	0,16	0,16
36	18		20.04.2007	0,13	0,14	0,16	0,29	0,13
42	21		23.04.2007	0,27	0,31	0,35	0,26	0,33
46	23		25.04.2007	0,19	0,27	0,25	0,55	0,29
50	25		27.04.2007	0,30	0,36	0,46	0,50	0,34
56	28		30.04.2007	0,47	0,51	0,59	1,26	0,66

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	02.04.2007	43,7	43,8	43,9	45,9	44,2	108,4
4	2	Frost	04.04.2007	43,6	44,1	44,1	46,0	44,5	108,1
6	3		05.04.2007	43,4	44,0	43,9	46,0	44,4	108,3
16	8		10.04.2007	43,8	44,3	44,3	46,3	44,7	108,5
18	9		11.04.2007	43,9	44,3	44,3	46,3	44,6	108,7
22	11		13.04.2007	44,1	44,6	44,7	46,5	44,8	108,8
28	14		16.04.2007	44,6	46,3	45,7	47,4	45,5	108,7
32	16		18.04.2007	45,9	48,1	47,4	49,1	47,3	108,5
36	18		20.04.2007	46,6	49,4	48,4	49,8	48,1	108,0
42	21		23.04.2007	49,2	51,0	50,6	51,4	49,4	108,1
46	23		25.04.2007	50,1	52,0	51,2	52,0	50,1	108,5
50	25		27.04.2007	51,7	53,5	52,9	52,9	51,2	108,3
56	28		30.04.2007	54,0	56,2	55,2	54,9	53,2	108,7

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	02.04.2007	35,5	36,1	35,9	36,0	35,7	86,8
4	2	Frost	04.04.2007	35,5	35,9	36,0	35,8	35,8	86,7
6	3		05.04.2007	35,2	35,7	35,9	35,7	35,6	86,9
16	8		10.04.2007	36,0	36,7	36,9	36,5	36,5	86,7
18	9		11.04.2007	36,0	36,7	37,2	36,6	36,4	86,9
22	11		13.04.2007	35,4	36,6	36,9	36,4	36,1	86,6
28	14		16.04.2007	36,6	38,4	38,8	37,7	37,7	86,7
32	16		18.04.2007	36,7	39,1	39,2	38,8	38,5	86,3
36	18		20.04.2007	40,2	56,2	59,9	56,6	67,5	86,8
42	21		23.04.2007						
46	23		25.04.2007	39,2	42,1	44,0	41,6	42,2	86,3
50	25		27.04.2007	40,3	43,3	45,4	42,7	43,5	86,0
56	28		30.04.2007	43,1	46,9	51,1	46,0	46,9	85,8

Tabelle A 45: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „MB/240 CEM III B 32,5/120 SFA/0,55“ (CIF-Verfahren)

MB/240 CEM III 32,5/120 SFA/0,55

Herstelldatum	17.07.2006	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	10,73	10,82	10,90	10,82	10,88
Länge	[cm]	14,87	14,99	15,00	15,02	14,99

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]	[d]	ohne Abdichtung	04.09.2006	2715,90	2696,47	2729,34	2774,93	2786,59
		mit Abdichtung	04.09.2006	2775,51	2753,46	2787,09	2832,52	2846,44
	-7	trocken	11.09.2006	2774,68	2752,64	2786,27	2831,64	2845,57
	-5	kapillares Saugen	13.09.2006	2786,40	2765,05	2799,45	2843,03	2857,99
	-3		15.09.2006	2789,29	2768,80	2802,76	2846,30	2860,94
0	0	vor Frost	18.09.2006	2791,37	2771,80	2805,52	2848,96	2862,90
4	2	Frost	20.09.2006	2795,34	2775,44	2809,40	2852,92	2867,44
8	4		22.09.2006	2800,72	2780,33	2814,77	2857,91	2872,18
14	7		25.09.2006	2806,15	2786,17	2821,03	2863,61	2878,56
18	9		27.09.2006	2809,76	2790,07	2825,05	2867,32	2883,26
22	11		29.09.2006	2814,33	2794,18	2828,29	2871,68	2887,76
28	14		02.10.2006	2819,71	2799,14	2832,03	2875,74	2890,74
32	16		04.10.2006	2822,42	2801,16	2834,29	2877,84	2892,29
42	21		09.10.2006	2828,04	2807,56	2840,30	2883,60	2897,22
46	23		11.10.2006	2828,61	2809,60	2841,73	2884,93	2898,69
50	25		13.10.2006	2828,30	2809,00	2839,67	2885,87	2892,30
56	28		16.10.2006	2832,67	2814,18	2844,17	2890,43	2901,73

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
4	2	Frost	20.09.2006	0,34	0,50	0,39	0,50	0,40
8	4		22.09.2006	0,29	0,43	0,41	0,49	0,49
14	7		25.09.2006	0,33	0,41	0,45	0,48	0,50
18	9		27.09.2006	0,22	0,39	0,34	0,39	0,40
22	11		29.09.2006	0,41	0,57	0,74	0,44	0,58
28	14		02.10.2006	0,45	0,55	1,20	0,67	1,18
32	16		04.10.2006	0,29	0,59	0,68	0,55	1,31
42	21		09.10.2006	1,39	1,56	1,99	1,38	2,15
46	23		11.10.2006	1,31	1,10	1,23	1,07	1,51
50	25		13.10.2006	1,85	1,72	2,52	0,77	1,75
56	28		16.10.2006	1,44	1,07	1,82	1,17	2,23

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	18.09.2006	43,3	43,7	44,1	43,2	43,2	107,9
4	2	Frost	20.09.2006	43,5	43,9	44,5	43,3	43,4	108,1
8	4		22.09.2006	43,7	44,2	44,7	43,6	43,7	108,0
14	7		25.09.2006	44,5	45,2	45,9	44,5	44,6	108,1
18	9		27.09.2006	45,1	46,0	46,3	45,0	45,3	108,6
22	11		29.09.2006	45,8	46,6	47,0	45,7	46,0	108,5
28	14		02.10.2006	46,4	48,0	48,2	46,4	47,4	108,4
32	16		04.10.2006	47,2	49,2	49,2	47,5	48,4	108,3
42	21		09.10.2006	50,8	54,7	54,1	51,0	52,4	108,5
46	23		11.10.2006	51,5	62,0	67,5	52,0	53,3	107,7
50	25		13.10.2006	55,1	68,0	68,2	54,6	57,5	108,2
56	28		16.10.2006	61,5	67,5	67,7	59,9	62,0	108,4

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	18.09.2006	36,4	35,7	36,1	36,0	35,5	85,9
4	2	Frost	20.09.2006	36,7	35,9	36,1	36,3	35,7	86,1
8	4		22.09.2006	36,8	36,0	36,2	36,4	35,8	85,9
14	7		25.09.2006	36,8	36,1	36,6	36,4	35,8	86,1
18	9		27.09.2006	36,8	36,3	36,6	36,7	36,0	86,0
22	11		29.09.2006	37,1	36,8	36,7	37,0	36,5	86,3
28	14		02.10.2006	38,1	37,9	38,0	37,9	37,9	85,7
32	16		04.10.2006	38,8	38,8	38,9	38,9	38,6	86,1
42	21		09.10.2006	41,1	41,4	41,4	41,4	41,4	86,3
46	23		11.10.2006	41,6	42,4	42,1	41,8	41,8	86,2
50	25		13.10.2006	42,9	44,0	43,3	43,3	43,3	86,0
56	28		16.10.2006	44,5	46,1	45,5	46,2	46,2	86,1

Tabelle A 46: Abwitterungen und Ultraschalllaufzeiten des Betons
 „Vergussmörtel w/f = 0,1125“ (CIF-Verfahren)

Vergussmörtel w/f = 0,1125

Herstelldatum	04.10.2006	Laufstrecke	lang	160
		Laufstrecke	kurz	120

Geometrie		1	2	3	4	5
Breite	[cm]	11,02	11,10	11,11	11,05	11,08
Länge	[cm]	15,00	15,00	15,00	15,00	15,01

FTW	Alter	Masse [g]	Datum	1	2	3	4	5
[-]	[d]	ohne Abdichtung	25.10.2006	2684,71	2715,23	2703,32	2698,62	2696,49
		mit Abdichtung	25.10.2006	2760,07	2789,22	2777,19	2772,05	2771,31
	-7	trocken	03.11.2006	2759,17	2788,25	2776,24	2771,30	2770,62
	-4	kapillares Saugen	06.11.2006	2762,23	2791,25	2778,78	2774,25	2773,81
	-2		08.11.2006	2762,74	2791,87	2779,28	2774,80	2774,34
0	0	vor Frost	10.11.2006	2763,18	2792,28	2779,53	2775,24	2774,67
6	3	Frost	13.11.2006	2765,68	2794,97	2782,62	2778,06	2777,43
10	5		15.11.2006	2766,61	2796,38	2783,75	2778,90	2778,53
14	7		17.11.2006	2767,50	2797,38	2784,66	2779,73	2778,90
20	10		20.11.2006	2768,67	2797,54	2786,25	2780,74	2779,59
24	12		22.11.2006	2768,41	2798,15	2786,75	2781,07	2780,01
28	14		24.11.2006	2769,11	2798,91	2786,66	2781,94	2780,52
34	17		27.11.2006	2770,11	2799,86	2787,81	2782,93	2781,67
38	19		29.11.2006	2770,98	2800,57	2788,77	2793,59	2782,03
42	21		01.12.2006	2771,95	2801,61	2789,79	2794,53	2782,76
48	24		04.12.2006	2773,37	2803,23	2791,38	2785,91	2783,98
52	26		06.12.2006	2774,51	2804,26	2792,77	2786,93	2784,98
56	28		08.12.2006	2775,75	2805,85	2794,02	2788,21	2785,93

FTW	Alter	Abwitterung [g]	Datum	1	2	3	4	5
6	3	Frost	13.11.2006	0,05	0,10	0,04	0,09	0,05
10	5		15.11.2006	0,07	0,05	0,06	0,08	0,08
14	7		17.11.2006	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03
20	10		20.11.2006	0,09	0,12	0,08	0,06	0,03
24	12		22.11.2006	0,00	0,02	0,00	0,02	0,00
28	14		24.11.2006	0,00	0,01	0,02	0,01	0,00
34	17		27.11.2006	0,07	0,13	0,06	0,06	0,07
38	19		29.11.2006	0,02	0,04	0,01	0,03	0,06
42	21		01.12.2006	0,01	0,01	0,00	0,05	0,01
48	24		04.12.2006	0,06	0,11	0,05	0,08	0,08
52	26		06.12.2006	0,07	0,04	0,06	0,06	0,08
56	28		08.12.2006	0,11	0,14	0,12	0,14	0,12

FTW	Alter	Laufzeit lang [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	10.11.2006	44,8	44,9	44,8	44,7	44,6	107,9
6	3	Frost	13.11.2006	44,6	44,8	44,7	44,6	44,5	107,9
10	5		15.11.2006	44,5	44,7	44,5	44,5	44,4	107,9
14	7		17.11.2006	44,5	44,7	44,6	44,6	44,4	107,8
20	10		20.11.2006	44,5	44,7	44,7	44,6	44,5	107,9
24	12		22.11.2006	44,6	44,7	44,6	44,6	44,5	107,7
28	14		24.11.2006	44,3	44,6	44,5	44,4	44,3	107,8
34	17		27.11.2006	44,5	44,6	44,7	44,5	44,0	107,6
38	19		29.11.2006	44,4	44,5	44,4	44,4	44,3	107,5
42	21		01.12.2006	44,6	44,8	44,7	44,7	44,6	107,9
48	24		04.12.2006	44,5	44,7	44,6	44,6	44,5	107,7
52	26		06.12.2006	44,2	44,4	44,3	44,3	44,2	107,7
56	28		08.12.2006	44,8	45,0	44,9	44,9	44,7	107,9

FTW	Alter	Laufzeit kurz [ms]	Datum	1	2	3	4	5	Wasser
		vor Frost	10.11.2006	36,0	35,5	35,4	35,5	35,1	86,5
6	3	Frost	13.11.2006	35,7	35,5	35,3	35,4	35,2	87,0
10	5		15.11.2006	35,7	35,4	35,2	35,4	35,1	86,6
14	7		17.11.2006	35,9	35,6	35,4	35,6	35,4	87,3
20	10		20.11.2006	35,6	35,4	35,3	35,5	35,1	86,2
24	12		22.11.2006	35,7	35,4	35,3	35,5	35,1	86,4
28	14		24.11.2006	35,6	35,3	35,3	35,4	35,0	86,6
34	17		27.11.2006	35,7	35,5	35,3	35,4	35,0	86,7
38	19		29.11.2006	35,6	35,4	35,3	35,4	35,1	87,1
42	21		01.12.2006	35,6	35,2	35,3	35,4	35,0	86,5
48	24		04.12.2006	35,7	35,4	35,3	35,5	35,1	86,4
52	26		06.12.2006	35,6	35,3	35,3	35,4	35,1	86,8
56	28		08.12.2006	35,7	35,4	35,3	35,4	35,0	86,5