

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Forschungsvereinigung:	VDZ Technology gGmbH
Forschungseinrichtung 1:	VDZ Technology gGmbH Forschungsinstitut der Zementindustrie
Forschungseinrichtung 2:	Bauhaus Universität Weimar F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde
IGF-Vorhaben-Nr.:	19823 BG
Bewilligungszeitraum	01.11.2017 – 30.04.2020

Forschungsthema:

Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton für die Expositionsklasse XF2

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	3
2	Untersuchungen	3
2.1	Vorgehensweise	3
2.2	Betone	4
2.2.1	Zemente	4
2.2.2	Betonrezepturen	4
2.3	Anpassung des Plattenprüfverfahrens	5
2.3.1	Ausgangssituation – Plattenprüfverfahren XF4	5
2.3.2	Modifikation der Probekörpergeometrie und -präparation	6
2.3.3	Anpassung der Prüfbedingungen	7
2.4	Anpassung des CDF-Verfahrens	8
2.4.1	Ausgangssituation – CDF-Verfahren (XF4)	8
2.4.2	Anpassung der Prüfbedingungen	9
2.5	Weiterführende Untersuchungen	9
3	Ergebnisse Plattenprüfverfahren	10
3.1	Modifizierung der Prüfbedingungen	10
3.1.1	Maßnahmen zur Abschwächung gemäß der Glue Spall Theorie	10
3.1.2	Maßnahmen zur Abschwächung gemäß der Cryogenic Suction Theorie und der Theorie der Mikroeislinsepumpe	11
3.2	Evaluierung der Untersuchungsergebnisse aus der Parameterstudie	16
4	Ergebnisse CDF-Verfahren	19
4.1	Parameterstudie	19
4.2	Evaluierung der Untersuchungsergebnisse aus der Parameterstudie	22
5	Zusammenfassung	30
5.1	Angepasstes Plattenprüfverfahren (XF2)	30
5.2	Angepasstes CDF-Verfahren XF2	31
5.3	Vorlagerungsbedingungen beider Verfahren	32
6	Literatur und Normen	33
6.1	Literatur	33
6.2	Normen	34

1 Einleitung

In der Praxis des Betonbaus werden Dauerhaftigkeitsprüfungen nur in wenigen Fällen durchgeführt. Meistens kommen deskriptive Regelungen zur Anwendung, deren Anforderungen auf entsprechenden Erfahrungen in der Praxis basieren. Eine Prüfung wird insbesondere bei Betonausgangsstoffen bzw. Betonen ohne Praxisbewährung notwendig. Für die Expositionsklasse XF2 (Frost-Tausalz-Angriff bei mäßiger Wassersättigung) gibt es bisher kein allgemein anerkanntes Prüfverfahren. Im Jahr 2007 wurde von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) ein Laborprüfverfahren für Betone der Expositionsklasse XF2 veröffentlicht [Setzer2007]. Hierzu war das CDF-Prüfverfahren XF4 wie folgt modifiziert worden:

- die Anhebung der Minimaltemperatur von - 20 °C auf – 10 °C und
- die Verringerung der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel von 28 auf 14.

Als Beurteilungskriterium wurde später ein Wert für die Abwitterung von max. 1.000 g/m² vorgeschlagen [Gehlen2011]. Aus der Praxis wird berichtet, dass die Anwendung dieses Verfahrens von einigen ausschreibenden Stellen mittlerweile gefordert wird. Vergleichende Untersuchungen haben jedoch gezeigt, dass dieses modifizierte CDF-Prüfverfahren relativ hohe Prüfstreuungen aufweist und teilweise zu fehlerhaften Eignungsbewertungen führen kann [Seidel 2015]. Insbesondere die Anhebung der Minimaltemperatur auf -10 °C ist dabei kritisch zu hinterfragen, da die im ursprünglichen CDF-Verfahren vorgesehene Minimaltemperatur von -20 °C als wesentliche Voraussetzung für geringe Prüfstreuungen angesehen wurde [Setzer1994]. Dies war Anlass für Überlegungen, alternative Ansätze für die Prüfung von XF2-Betonen auf Grundlage des CDF-Verfahrens und des Plattenprüfverfahrens (Slab-Test) zu entwickeln.

2 Untersuchungen

2.1 Vorgehensweise

Ausgangspunkt der Untersuchungen waren das Plattenprüfverfahren (Slab-Test) und das CDF-Verfahren nach [DIN CEN/TS 12390-9]. Der Beanspruchungsgrad dieser Verfahren sollte gezielt abgeschwächt werden, um einer Beanspruchung in der Expositionsklasse XF2 besser gerecht zu werden.

Im ersten Schritt erfolgte dafür eine Parameterstudie zur **Modifizierung der Prüfbedingungen**. Die Maßnahmen zur Verringerung der Schadensintensität sollten dabei auch unter Berücksichtigung aktueller Theorien zum Schadensmechanismus bei einem Frost-Tausalz-Angriff erfolgen. Hierbei wurde auf die sogenannte „Glue Spall Theorie“ [Valenza2006] und die „Cryogenic Suction Theorie“ [Lindmark1998, Liu2015] zurückgegriffen, sowie auf die Theorie der Mikroeislinsepumpe [Setzer2000]. Weiterführende Informationen zu den Schadenstheorien können [Müller2019] entnommen werden.

Gemäß der Glue Spall Theorie kann eine Verringerung der Eisschichtdicke zu einer Abschwächung des Angriffes führen [Tremblay2007]. In der Cryogenic Suction Theorie wird davon ausgegangen, dass eine Reduzierung des Sättigungsgrades in der Betonrandzone zu einer Abschwächung des Angriffes führt [Liu2015]. Die Theorie der Mikroeislinsepumpe [Setzer2000] war für die Parametermodifikationen ebenfalls von Relevanz, da eine innere Betonschädigung im Prüfverfahren möglichst vermieden werden sollte.

Im zweiten Schritt wurde eine größere Anzahl Betone auf Basis unterschiedlicher Zemente geprüft, um einen „**Erfahrungshintergrund**“ zu generieren und die Prüfbedingungen zu evaluieren und ggf. zu optimieren.

2.2 Betone

2.2.1 Zemente

Es wurden folgende Zemente aus unterschiedlichen Werken verwendet.

Tabelle 1 Zemente und wesentliche Eigenschaften

Zement	Mahlfeinheit (BLAINE)	Wasser- anspruch	Druckfestigkeit nach		
			2d	7d	28d
	cm ² /g	%	MPa	MPa	MPa
CEM I 42,5 R	3.680	28,5	29,8	46,0	59,3
CEM II/A-S 42,5 R	3.830	28,6	26,3	43,9	55,1
CEM II/B-S 42,5 N	5.600	29,0	33,8	48,2	53,0
CEM II/A-LL 42,5 R	4.090	29,5	23,2	37,5	53,9
CEM II/A-LL 32,5 R	4.480	25,5	25,3	39,2	46,2
CEM II/B-LL 32,5 R (AZ)	4.960	31,5	27,7	33,8	40,9
CEM III/A 42,5 N-LH (na)	4.120	31,0	14,6	28,5	48,2
CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N	4.450	27,0	17,6	31,4	43,2
CEM I 52,5 R (na)	5.010	30,0	42,1	55,9	66,0
CEM II/A-M (V-LL) 42,5 N	4.240	27,5	24,1	41,7	51,0

2.2.2 Betonrezepturen

Für den Beton wurden Rheinsand 0-2 mm sowie Rheinkies 2-8 mm und 8-16 mm verwendet. Zusätzlich wurden auch Rheinsand in der Korngruppe 1-2 mm sowie Quarzmehl zur Korrektur der Sieblinie im Feinbereich eingesetzt.

Für die Betonuntersuchungen wurden die zwei Betonqualitäten A und B vorgesehen. Betonqualität A wurde dabei so konzipiert, dass die deskriptiven Anforderungen an die Betonexpositions-kategorie XF2 eingehalten wurden. Daraus ergaben sich folgende Anforderungen an die Betonqualität A (ohne künstliche Luftporen):

- Höchstzulässiger Wasserzementwert: 0,50
- Mindestdruckfestigkeitsklasse: C35/45
- Mindestzementgehalt: 320 kg/m³.

In Abhängigkeit von der Normdruckfestigkeit der Zemente wurden Wasserzementwerte (w/z-Werte) zwischen 0,40 und 0,50 gewählt, um die Mindestdruckfestigkeitsklasse C35/45 zu erreichen. Als Vorhaltemaß wurden 6 MPa festgelegt, so dass sich eine Zieldruckfestigkeit von 51 MPa ergab.

Die Betonqualität B unterscheidet sich vorrangig durch den w/z-Wert. Dieser wurde um 0,10 gegenüber der jeweiligen Rezeptur der Qualität A erhöht. Eine sichere Unterscheidung der beiden Betonqualitäten stellte ein wichtiges Bewertungskriterium für die angepassten Frost-Tausalz-Prüfverfahren dar.

Der starke Einfluss des w/z-Wertes auf die Frischbetonkonsistenz wurde teilweise kompensiert, indem bei der Betonqualität A durch Verwendung eines Fließmittels eine Ausbreitmaßklasse F3 realisiert wurde. In der Betonqualität B ergaben sich durch die w/z-Werte bis 0,60 Ausbreitmaße der Konsistenzklasse F4. Die folgende Abbildung gibt einen Überblick der w/z-Werte und der resultierenden Betondruckfestigkeiten nach 28 Tagen.

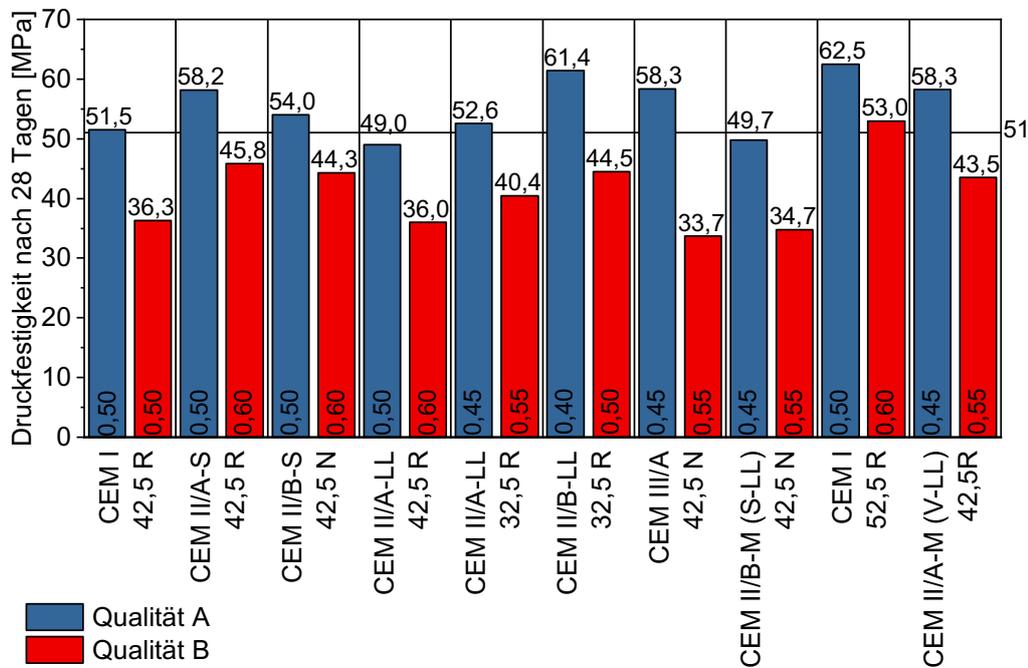


Bild 1 Übersicht w/z-Werte und Betondruckfestigkeiten nach 28 Tagen

Die angestrebte Betondruckfestigkeitsklasse C35/45 (einschl. Vorhaltemaß ≥ 51 MPa) wurde mit den Betonen der Betonqualität A bis auf zwei Rezepturen gut erreicht. Da die Unterschreitung bei den beiden Rezepturen mit 49,0 MPa bzw. 49,7 MPa nur geringfügig war, wurden die Rezepturen beibehalten.

2.3 Anpassung des Plattenprüfverfahrens

2.3.1 Ausgangssituation – Plattenprüfverfahren XF4

Ausgangspunkt war das Plattenprüfverfahren gemäß [DIN CEN/TS 12390-9]. Bild 2 zeigt einen Probekörper mit Prüfflüssigkeit und thermischer Isolierung (Styrodur-Ummantelung und Folienhaube). Die Anordnung von Proben im Slab-Tester (Prüfgerät) ist in Bild 3 dargestellt.

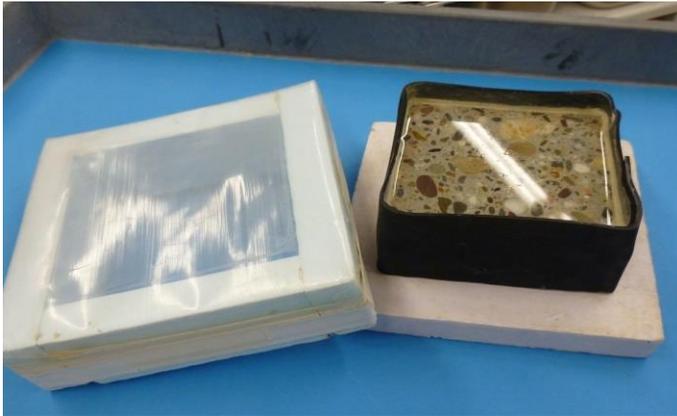


Bild 2 Probekörper des Ursprungsverfahrens (Plattenprüfverfahren (XF4))



Bild 3 Prüfgerät („Slab-Tester“) mit Probekörpern im Innenraum

Als primäre Prüfgröße wurde die Abwitterungsmenge bestimmt. Zusätzlich wurde die Ultraschalllaufzeit durch die Probekörper parallel zur Prüffläche in Längs- und Querrichtung nach [CEN/TR 15177] gemessen. Ergänzend zu den Frost-Tausalz-Prüfungen wurden mit dem Verfahren nach [DIN EN 12390-10] an separat hergestellten Probekörpern im Betonalter von 28 Tagen die Dicke der carbonatisierten Randschicht der Prüffläche gemessen.

Beim Plattenprüfverfahren erfolgt die Temperaturbeaufschlagung der Proben mittels Luftkühlung bzw. -heizung im Slab-Tester. Aufgrund der Styrodur-Ummantelung und der Luftschicht zwischen Prüffläche und Folienhaube ist der Wärmeübergang zwischen der temperierten Luft im Slab-Tester und der Betonprobe stark gedämpft. Insgesamt ist die Regelung der Probentemperatur aufgrund der Isolationsschichten um die Probe herum sehr träge. Im Zuge der Anpassung an XF2-Prüfbedingungen war daher auch die Steuerbarkeit aufgrund der Isolierung zu überdenken.

Um eine Abschwächung des Beanspruchungsgrades gegenüber dem XF4-Verfahren zu erreichen, wurden insbesondere die Prüfflächen und die Probenpräparation angepasst. Dabei wurde auch angestrebt, Imperfektionen des Ursprungsverfahrens zu korrigieren.

2.3.2 Modifikation der Probekörpergeometrie und -präparation

Folgende Parameter bzgl. der Probekörpergeometrie und -präparation wurden variiert:

- Länge und Breite der Probekörper
- Art und Umfang der Wärmeisolierung der Probekörper
- Art und Umfang des Verdunstungsschutzes für die Prüfflüssigkeit
- Form der Prüffläche der Probekörper.

Ausgehend von der Plattengeometrie des Slab-Tests ($150 \times 150 \times 50 \text{ mm}^3$) wurden die Abmessungen der Probekörper auf $150 \times 110 \times 70 \text{ mm}^3$ geändert, um eine erhöhte Anzahl von fünf Probekörpern je Serie und damit ein statistisch sichereres Ergebnis zu erhalten.

Die Trägheit der Temperaturregelung gegenüber dem Ursprungsverfahren wurde durch Reduzierung bzw. Verzicht auf eine Wärmeisolierung vermindert. Dies wurde auch vor dem

Hintergrund vorgenommen, dass erfahrungsgemäß die seitliche Isolierung im Slab Test eine allseitige Abkühlung des Betons ohnehin nicht vermeiden kann [Setzer2009].

Das Plattenprüfverfahren wird standardmäßig mit aufstehender Prüflösung durchgeführt, welche mittels einer Moosgummiabdichtung auf der Probekörperoberfläche gehalten wird. Bei einer Schädigung der Probekörper kann sich die Abdichtung stellenweise lösen und die Prüflösung kann austreten. Um dies zu verhindern, wurden die Prüfflächen durch trapezartig geformte Teflon-Schalungen wannenartig vertieft hergestellt (siehe Bild 4). Als Verdunstungsschutz für die Prüflösung auf der Prüffläche diente eine starre PE-Folie, die auf den seitlichen Aufkantungen aufsteht (siehe Bild 5).

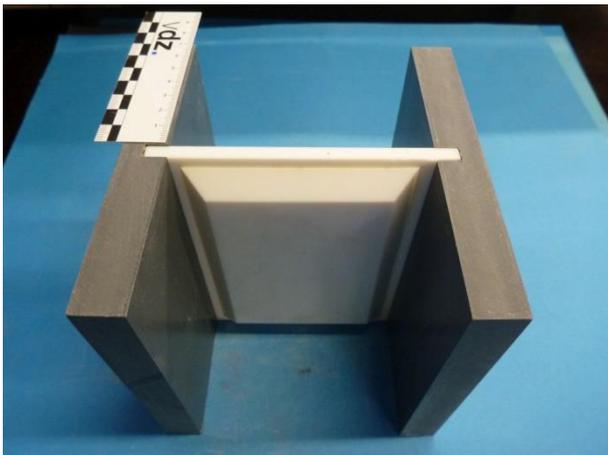


Bild 4 Trapezartige ausgeformte Scheibe aus PTFE (Teflon, weiß) zur Herstellung wannenartig vertiefter Prüfflächen von zwei Probekörpern zum Einfügen in eine 150 mm Würfelschalung



Bild 5 Probekörper mit wannenartiger vertiefter Prüffläche mit Prüflösung unter einem Verdunstungsschutz aus Kunststoff

Auf eine seitliche Abdichtung der Betonprobekörper wurde zudem verzichtet. Durch diesen Schritt wurde eine kritische Aufsättigung der Prüflösung im Inneren des Betons verhindert, da überschüssige Flüssigkeit aus dem Gefüge über die Seitenflächen des Probekörpers verdunsten kann. Das Potenzial für eine innere Schädigung des Betons während der kombinierten Beanspruchung durch Frost-Tauwechsel und Tausalzlösung wurde somit gesenkt.

2.3.3 Anpassung der Prüfbedingungen

In Bezug auf die Prüfbedingungen wurden folgende Parameter variiert:

- Höhe der Prüflüssigkeit (im gefrorenen Zustand als Eisschichtdicke bezeichnet)
- vertikale Prüffläche wie im Spritzwasserbereich von XF2-Bauteilen
- Anzahl der Frost-Tauwechsel pro Tag (Prüfgeschwindigkeit)
- Anzahl der Frost-Tauwechsel insgesamt.

2.4 Anpassung des CDF-Verfahrens

2.4.1 Ausgangssituation – CDF-Verfahren (XF4)

Grundlage der Untersuchungen war das CDF-Verfahren nach [DIN CEN/TS 12390-9]. Als Probekörper dienten jeweils fünf Betonscheiben, die durch Teilen einer 150 mm Würfelform mit einer mittig angeordneten PTFE-Platte hergestellt wurden. Zum Ende der Vorlagerung wurden die Probekörperseitenflächen mit aluminiumkaschiertem Butylband abgedichtet. Im Alter von 28 Tagen begann das 7tägige kapillare Saugen, bei dem die Probekörper mit der 3 M.-% NaCl-Lösung vorgesättigt wurden. Danach wurden die Proben bis zu 28 Frost-Tau-Wechseln, ebenfalls in 3 M.-% NaCl-Lösung, unterzogen. Als Prüfoberfläche wurde die der PTFE-Platte zugewandte Fläche verwendet.

Nach 4, 6, 14 und 28 Frost-Tau-Wechseln wurde die Masse des abgewitterten Materials bestimmt. Die innere Schädigung während der Frost-Tausalz-Prüfung wurde anhand des relativen dynamischen E-Moduls in Anlehnung an [CEN/TR 15177] bestimmt. Abweichend zur Norm erfolgte die Messung nicht über eine Wasservorlaufstrecke, sondern mittels Direktankopplung der Ultraschallmessköpfe (vgl. Bild 6).

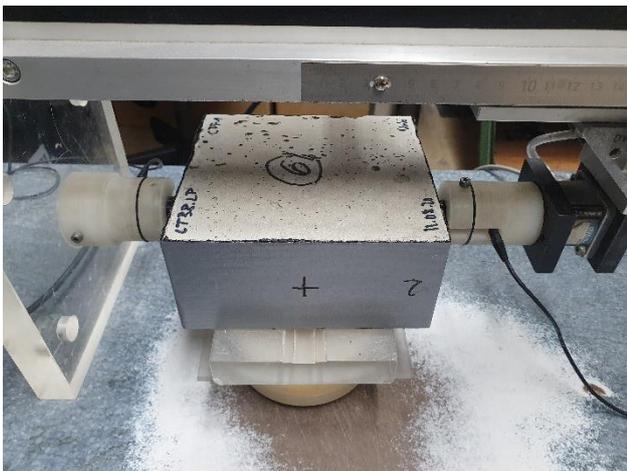


Bild 6 Versuchsanordnung für die Bestimmung des relativen dynamischen E-Moduls mittels Direktankopplung der Ultraschallmessköpfe

2.4.2 Anpassung der Prüfbedingungen

Die folgende Tabelle fasst die verschiedenen Parametervarianten zusammen.

Tabelle 2 Übersicht über die Parametervariationen

Variation	Angepasste Parameter	Änderung gegenüber Standard-CDF-Verfahren*
Eisschichtdicke	Abstandshalter	Verringerung der Dicke der Abstandshalter von 5 mm auf 1 mm
1h Trocknung	Einführung von Trocknungsphasen zwischen den Frost-Tau-Wechseln	1h Trocknung bei 40 °C nach jedem 2. FTW, ausgenommen Wochenenden
2h Trocknung		2h Trocknung bei 40 °C nach jedem 2. FTW, ausgenommen Wochenenden
Intervalltrocknung		24h Trocknung im Normklima nach jedem 2. FTW, ausgenommen Wochenenden
Schnelle Heizrate	Heizrate im CDF-Temperaturzyklus	Heizrate von 20 K/h anstelle 10 K/h
Schnelle Heizrate; Eisschichtdicke	Heizrate im CDF-Temperaturzyklus, Abstandshalter	Heizrate von 20 K/h anstelle 10 K/h; Verringerung der Dicke der Abstandshalter auf 1 mm
Schnelle Heizrate; 6,0 M.-% NaCl	Heizrate im CDF-Temperaturzyklus, Tausalzkonzentration	Heizrate von 20 K/h anstelle 10 K/h; Erhöhte Tausalzkonzentration von 6,0 M.-% NaCl

Alle Variationen, ausgenommen Eisschichtdicke, dienen der Verringerung des Sättigungsgrades, insbesondere im Bereich der Prüffläche.

2.5 Weiterführende Untersuchungen

Begleitende Untersuchungen sollten eine vergleichende Beurteilung der Ergebnisse der Frost-Tausalz-Prüfverfahren ermöglichen. Als potentiell geeignete Kenngrößen wurden hier die Vickershärte sowie die im Temperaturbereich bis -20 °C gefrierbare Porenlösung des Zementsteins herangezogen.

Allgemeine Grundsätze der Vickershärteprüfung können [Skarabis2020] entnommen werden. Die Messungen im Rahmen dieses Projektes wurden am Zementstein mit einer Prüflast von 10 kg bzw. 98,1 N bei einer Belastungsdauer von 15 s ausgeführt. Die Diagonalen der Pyramideneindrücke wurden anschließend lichtmikroskopisch vermessen und in die Vickershärte umgerechnet. Die Vorgehensweise zur Bestimmung der bis -20 °C gefrierbaren Porenlösung wird in [Müller2021] beschrieben.

3 Ergebnisse Plattenprüfverfahren

3.1 Modifizierung der Prüfbedingungen

Das Kriterium für einen Beton mit hohem Frost-Tausalz-Widerstand für Bauteile für die Expositionsklasse XF4 beträgt $1,0 \text{ kg/m}^2$ nach 56 FTW (gemäß CEN/TS 12390-9). Die Abwitterung des Betons mit dem Referenzzement 1 (CEM I 42,5 R) und einem Wassermenge-Wert von 0,50 (Qualität A) lag mit dem Plattenprüfverfahren gemäß DIN CEN/TS 12390-9 (Slab-Test) nach 21 Frost-Tauwechseln über diesem Kriterium (siehe Bild 7). Das war nicht anders zu erwarten, da der Beton ohne künstlich eingeführte Luftporen hergestellt wurde, die gemäß DIN 1045-2 für XF4-Betone zu verwenden sind. Bild 8 zeigt das Erscheinungsbild der Prüfflächen nach 28 Frost-Tauwechseln.

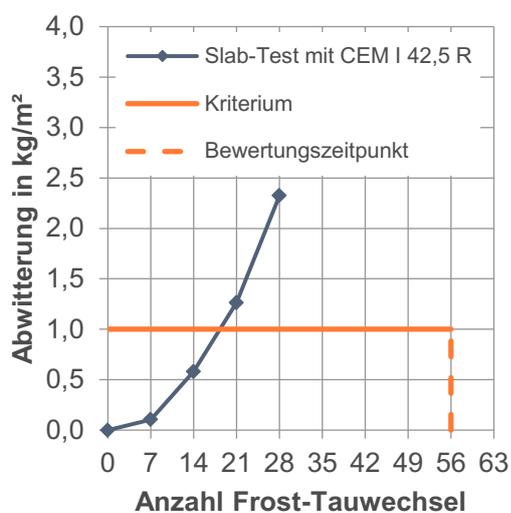


Bild 7 Kumulierte Abwitterung mit dem Plattenprüfverfahren gemäß DIN CEN/TS 12390-9 (3 mm ESD = Slab-Test)



Bild 8 Prüffläche des Betons mit CEM I 42,5 R und nach 28 FTW im Plattenprüfverfahren (Slab-Test)

Die Abschwächung der Frost-Tausalz-Belastung wurde durch Anpassung der Prüfbedingungen und der Präparation der Probekörper des Plattenprüfverfahrens angestrebt.

3.1.1 Maßnahmen zur Abschwächung gemäß der Glue Spall Theorie

Als Maßnahme zur Abschwächung der physikalischen Beanspruchung der Probekörperoberfläche infolge der Frost-Tau-Zyklen in Verbindung mit gefrierender und tauender Taumittellösung wurde gemäß der Glue Spall Theorie [Valenza2006] die Prüfflüssigkeitshöhe (Eisschichtdicke) verringert.

Es wurde untersucht, ob sich der Angriffsgrad abschwächt, wenn anstelle von 3 mm (entspricht dem Slab-Test nach DIN CEN/TS 12390-9) die Prüfflüssigkeitshöhe auf 1 mm abgesenkt wird. Die verminderte Prüfflüssigkeitshöhe bestätigte die Wirksamkeit der Glue-Spall-Theorie gemäß [Valenza2006]. Die angestrebte Abschwächung des Frost-Tausalzangriffs wurde erreicht. Dieser Effekt war jedoch aufgrund praktischer Probleme bei der Einstellung der Prüfflüssigkeitsschicht nicht immer reproduzierbar. In den sich durch ungleichmäßige Abwitterung bildenden Vertiefungen der Prüffläche verstärkte sich die Abwitterung wiederum

selbst dadurch, dass die Prüflösung bevorzugt in diese Vertiefungen lief und diese zuerst ausfüllte. Dort war das Prüflüssigkeitslevel höher als 1 mm, wohingegen die Prüflüssigkeit in höher gelegenen Prüfflächenbereichen fehlte, wodurch dort wieder weniger Material abwitterte. Dies führte zur Ausbildung eines „Berg-und-Tal-Profiles“, wobei die „Berge“ aus nicht abgewitterter Zementsteinoberfläche wie Inseln aus der Prüflüssigkeit herausstanden. Im Ergebnis ergab sich eine ungleichmäßig abgewitterte Prüffläche (siehe Bild 9). Verstärkt wurde die ungleichmäßige oder reduzierte Abwitterung durch Undichtigkeiten zwischen Probekörperkante und Dichtungsband. Um dem entgegenzuwirken wurde die Prüflüssigkeitshöhe wieder auf 3 mm erhöht. Zusätzlich wurde die Prüffläche wannenartig vertieft (siehe Bild 10).



Bild 9 Ebene Prüffläche nach Belastung mit 1 mm dicker Eischichtdicke

Bild 10 Wannenartige vertiefte Prüffläche nach Belastung mit 3 mm dicker Eischichtdicke

3.1.2 Maßnahmen zur Abschwächung gemäß der Cryogenic Suction Theorie und der Theorie der Mikroislinsenpumpe

Gemäß den o. g. wissenschaftlichen Ansätzen sollte die innere Schädigung der Probekörper reduziert bzw. ganz vermieden werden. Dieses Ziel wurde durch die Senkung des Sättigungsgrades angestrebt.

Abdichtung

Das Eindringen von Prüflüssigkeit in den Probekörper erfolgte ausschließlich über die Oberfläche. Es wurde untersucht, wie sich das Vorhandensein einer alleits umgebenden, einer seitlichen Abdichtung sowie der Verzicht auf eine Abdichtung auf die innere Schädigung des Betons auswirkt.

Hierzu wurden die Seitenflächen der Probekörper mit einem seitlichen Anstrich (Primer Haftvermittler zwischen Beton und Aluminium-Butylband im CDF-Verfahren) versehen. Bild 11 zeigt einen Probekörper mit seitlicher Primer-Abdichtung. Bild 12 stellt einen Probekörper mit zusätzlich bestrichenen Aufkantungen und Schrägflächen dar.



Bild 11 Probekörper mit seitlicher Abdichtung (Präparationsart #07a)



Bild 12 Probekörper mit Abdichtung der Seitenflächen und Aufkantung, während der Frostlagerung mit Moosgummi-band und Frischhaltefolie versehen (Präparationsart #07)

Im Ergebnis führte die seitliche Abdichtung zu einer Aufsättigung der Probekörper mit Prüfflüssigkeit, die die innere Schädigung des Betons begünstigte. Die Abdichtung verstärkte den Abfall des relativen dynamischen E-Moduls des Betons umso mehr, je höher der abgedichtete Flächenanteil war (Bild 13).

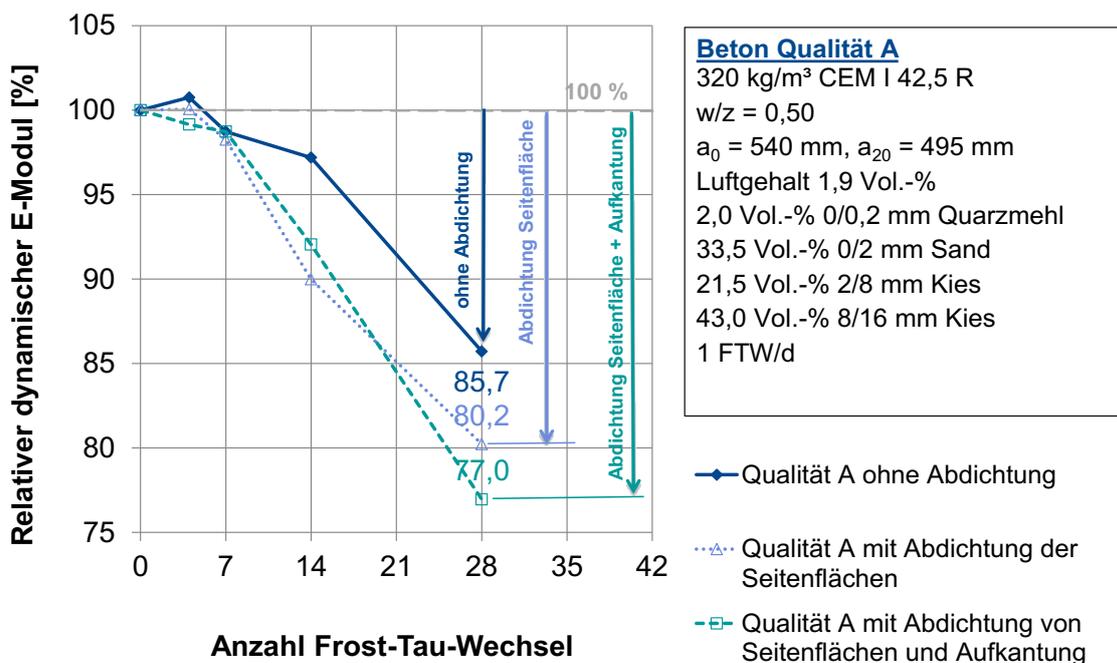


Bild 13 Verlauf des relativen dynamischen E-Moduls bei unterschiedlicher Abdichtung der Probekörper angepassten Plattenprüfverfahren (XF2)

Das Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ der Bundesanstalt für Wasserbau [BAW2012] legt die Grenze zur Beurteilung der inneren Schädigung bei einem Abfall des relativen dynamischen E-Moduls auf unter 75 % fest. Dieses Kriterium wurde in den Untersuchungen eingehalten. Für das angepasste XF2-Verfahren wird jedoch eine geringere innere Schädigung angestrebt. Daher wurde in den folgenden Untersuchungen auf eine Abdichtung verzichtet.

Wärmedämmung

Für die Einhaltung der Solltemperatur musste bei Proben mit Styrodur-Wärmedämmung die programmierte Temperatur zum Abkühlen deutlich tiefer (bis ca. -24 °C) und zum Auftauen deutlich höher (bis ca. $+26\text{ °C}$) eingestellt werden (Bild 14).

Der Verzicht auf wärmeisolierende Ummantelung mit Styrodur und die Verringerung der Luftschichtdicke unter dem Verdunstungsschutz führten zu einer beschleunigten Anpassung zwischen der die Probekörper umgebenden Lufttemperatur im Slab-Tester und der Temperatur an der Oberfläche der Probekörper (Prüffläche). Die Geschwindigkeit der Temperaturanpassung verbesserte sich sogar bei einer Prüfgeschwindigkeit von zwei Frost-Tauwechseln pro Tag (Zykluszeit 12 Stunden, vgl. Bild 14 mit Bild 15). Die Probenpräparation des Plattenprüfverfahrens wurde sukzessive vereinfacht und Schwächen des Ursprungsverfahrens beseitigt. Durch den letztendlichen Verzicht auf die wärmedämmende Styrodur-Ummantelung mit Folienhaube und Reduzierung der Luftschichtdicke zwischen Folienhaube und Prüffläche wurde die Steuerung der Probentemperatur über die Lufttemperatur beschleunigt. Die Luftschichtdicke wurde durch Verwendung anderer Arten des Verdunstungsschutzes reduziert.

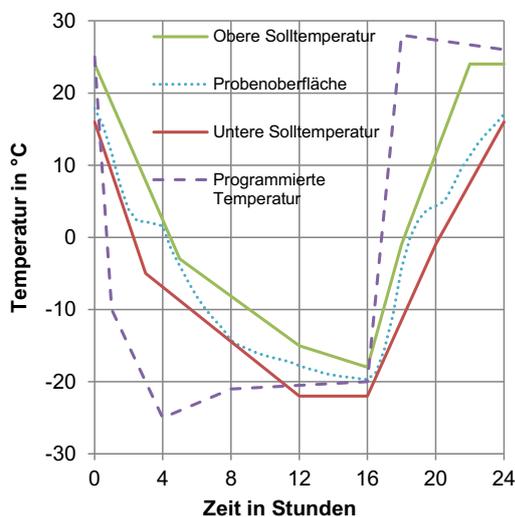


Bild 14 Messaufzeichnung des Temperaturprofils im Slab-Tester mit 1 FTW/d und mit Styrodur-Wärmedämmung)

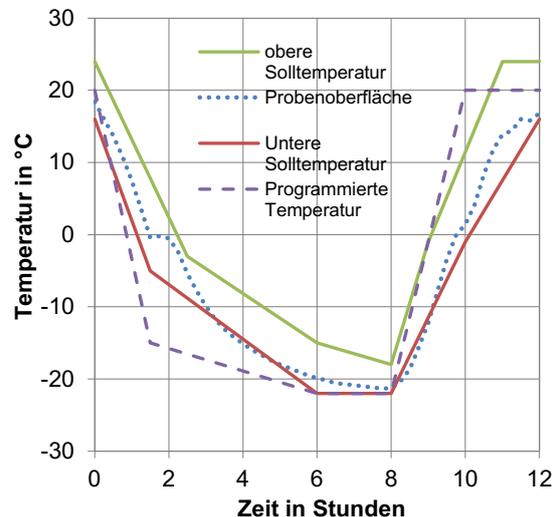


Bild 15 Messaufzeichnung des Temperaturprofils im Slab-Tester mit 2 FTW/d und ohne Styrodur-Wärmedämmung)

Prüfdauer

Mit den beschriebenen Anpassungen in der Probenpräparation und der Wärmeisolierung wurde für Betone auf Basis des Referenzzementes CEM I 42,5 R ein angemessenes

Schädigungsniveau erreicht. Wie Bild 16 zeigt, war dabei auch eine Differenzierung der verschiedenen Betonqualitäten A und B möglich. Das Abwitterungsniveau des Qualität-A-Betons lag stets unterhalb des Abwitterungsniveaus des in Qualität B hergestellten Betons.

Für den Abfall des relativen dynamischen E-Moduls (RDM) war ebenfalls eine gewisse Differenzierung der Betonqualitäten festzustellen (Bild 17).

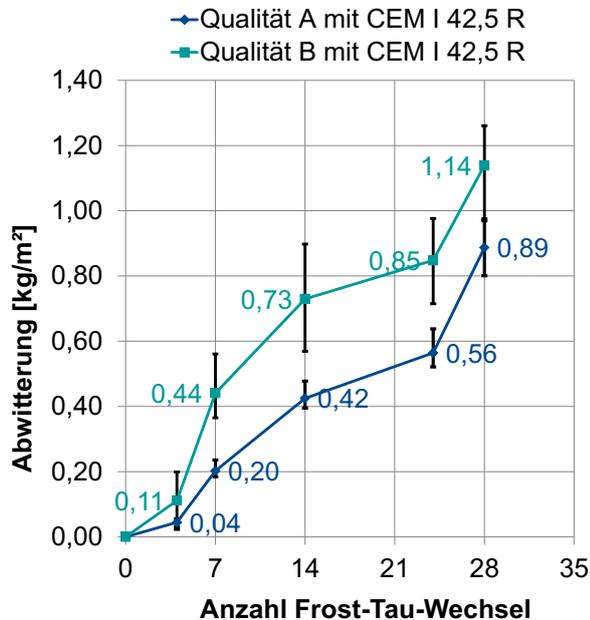


Bild 16 Ergebnisse mit dem angepassten Plattenprüfverfahren (XF2) – Abwitterung

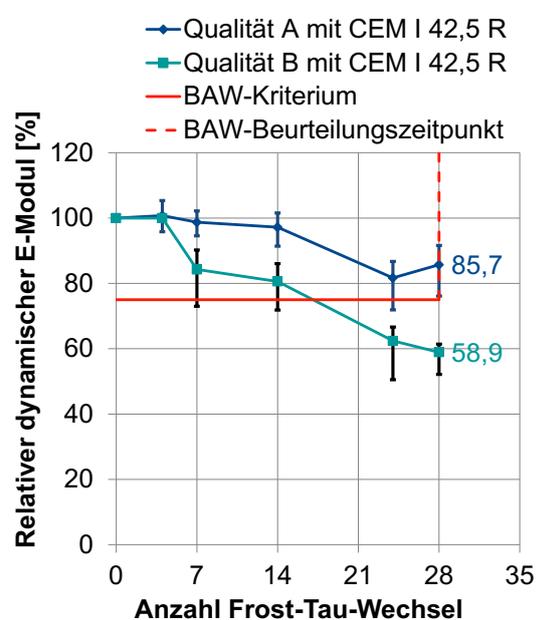


Bild 17 Ergebnisse mit dem angepassten Plattenprüfverfahren (XF2) – Innere Schädigung

Bei der Abwitterung ließ sich auch mit Hochofenzement eine Differenzierung der zwei Betonqualitäten erkennen (Bild 18). Allerdings lag die Abwitterungsmenge insgesamt auf einem deutlich höheren Niveau (vgl. Bild 16). Ein signifikanter Abfall des relativen dynamischen E-Moduls fand im Gegensatz zu Beton mit Portlandzement CEM I nicht statt (siehe Bild 19).

Das hohe Abwitterungsniveau lässt darauf schließen, dass trotz der Maßnahmen zur Abschwächung des Prüfverfahrens, die Schadensintensität nach 28 Frost-Tau-Wechseln noch zu hoch ist. Durch eine Verkürzung auf 14 Frost-Tau-Wechsel kann hier eine zusätzliche Verringerung des Schadensniveaus erreicht werden, ohne die Trennschärfe des Verfahrens zu verringern.

Unabhängig von der Zementart trat bis zum 14. Frost-Tauwechsel (FTW) kein nennenswerter Abfall des relativen dynamischen E-Moduls (RDM) auf. Erst bei längerer Prüfdauer wies ein signifikanter Abfall des relativen dynamischen E-Modul auf eine innere Schädigung hin.

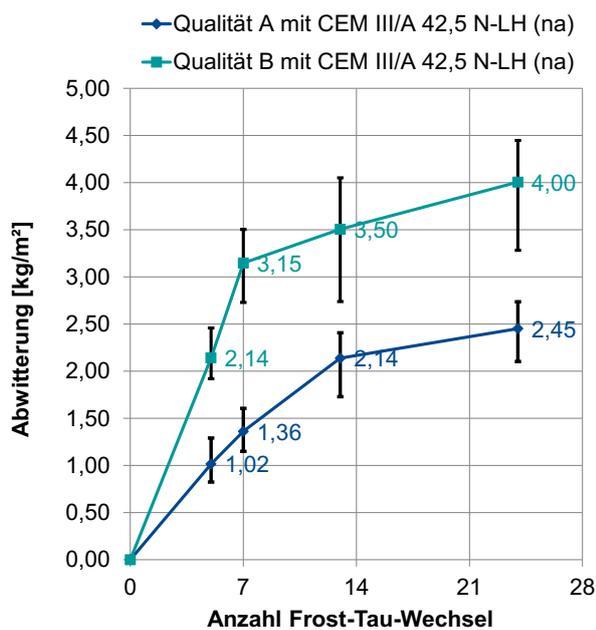


Bild 18 Ergebnisse mit dem angepassten Plattenprüfverfahren (XF2) – Abwitterung

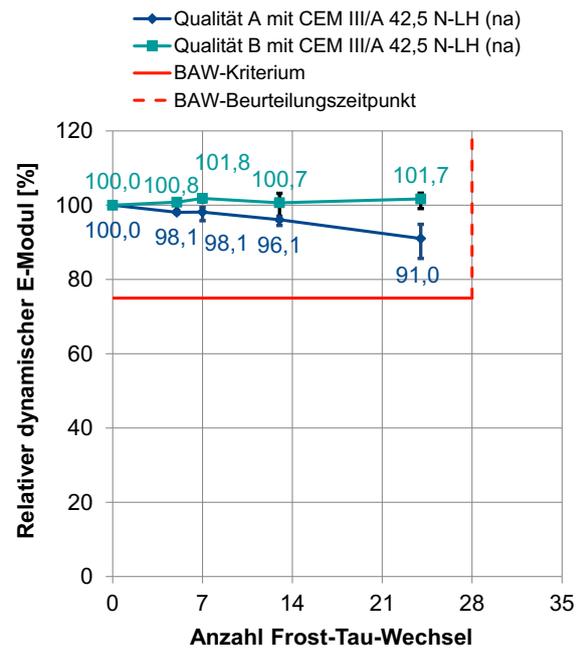


Bild 19 Ergebnisse mit dem angepassten Plattenprüfverfahren (XF2) – Innere Schädigung

Fazit der Parameterstudie

Letztlich wurden ausgehend vom Referenzprüfverfahren (Ursprungsverfahren) folgende Veränderungen vorgenommen, um den Beanspruchungsgrad an die Expositionsklasse XF2 anzunähern und auch um Imperfektionen des Ursprungsverfahrens möglichst zu beseitigen:

- fünf Probekörper pro Serie anstelle von vier
- Außenmaße der Probekörper 150 x 110 x 70 mm³ (vorher 150 x 150 x 50 mm³)
- Prüffläche ist nun die gegen eine Teflon-Schalung betonierete, wannenartige vertiefte Oberfläche, (nicht mehr die gesägte Fläche)
- Verzicht auf eine seitliche Abdichtung der Probekörper mit Moosgummi
- Verzicht auf die wärmedämmende Ummantelung der Probekörper mit Styrodur
- Verdunstungsschutz aus starrer Kunststoffolie, die auf den Ecken der äußeren Aufkantung (Wannenrand) aufsteht
- ggf. Reduzierung der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel auf max. 14.

Folgende Parameter des Ursprungsverfahrens (Plattenprüfverfahren gemäß DIN CEN/TS 12390-9) wurden beibehalten:

- Prüfgerät Slab-Tester
- ein Frost-Tauwechsel pro Tag
- Tiefsttemperatur -20 °C
- Abkühl- und Auftauraten innerhalb der Norm-Grenzen
- 3 mm Prüfflüssigkeitshöhe (im gefrorenen Zustand = Eisschichtdicke)

- 3 %ige Natriumchlorid-Prüflösung.

Die mit diesem Prüfaufbau erzielten Ergebnisse führten zwar zu einer Differenzierung nach Wasserzementwert, allerdings war der Einfluss der Zementart zum Teil deutlich größer.

3.2 Evaluierung der Untersuchungsergebnisse aus der Parameterstudie

Nach Durchführung von acht Modifikationen der Probenpräparation erfolgten die weiteren Untersuchungen mit der Präparationsart #09 (wannenartig vertiefte Prüffläche mit Verdunstungskappe ohne eine Abdichtung).

Abwitterung

Die nachfolgenden Bilder zeigen die maximale Abwitterungsmenge der untersuchten Betone. Die Abwitterungsmenge wird wegen Feiertags- bzw. Brückentagen z. T. nach 24 und 28 FTW bzw. 13 und 14 FTW miteinander verglichen.

Die Ergebnisse zeigten auch weiterhin das unterschiedlich hohe Abwitterungsniveau der Betone in Abhängigkeit der Zementart. Mit CEM I waren die Abwitterungsmengen am geringsten. Mit CEM III-Beton waren sie am höchsten. Die Abwitterungsmengen der anderen Betone ordnen sich dazwischen ein (siehe Bild 20).

Die Zementart hat einen starken Einfluss auf das Abwitterungsniveau und überlagerte im Einzelfall den Einfluss der Betonqualität auf die Abwitterungsmenge. Das zeigte sich im Fall des Betons mit CEM II/B-M (S-LL 42,5 N) nach 13 bzw. 14 Frost-Tauwechselln. Hier war die Abwitterungsmenge in Qualität A etwas höher als in Qualität B.

Auch eine kürzere Prüfdauer von 7 Frost-Tauwechselln führt zur selben Einschätzung (Bild 20). Zudem sinkt die Abwitterungsmenge bei den CEM I-Betonen auf ein sehr niedriges Niveau, was die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse ungünstig beeinflussen kann. Die Betone mit CEM I witterten selbst in Qualität B nur wenig ab.

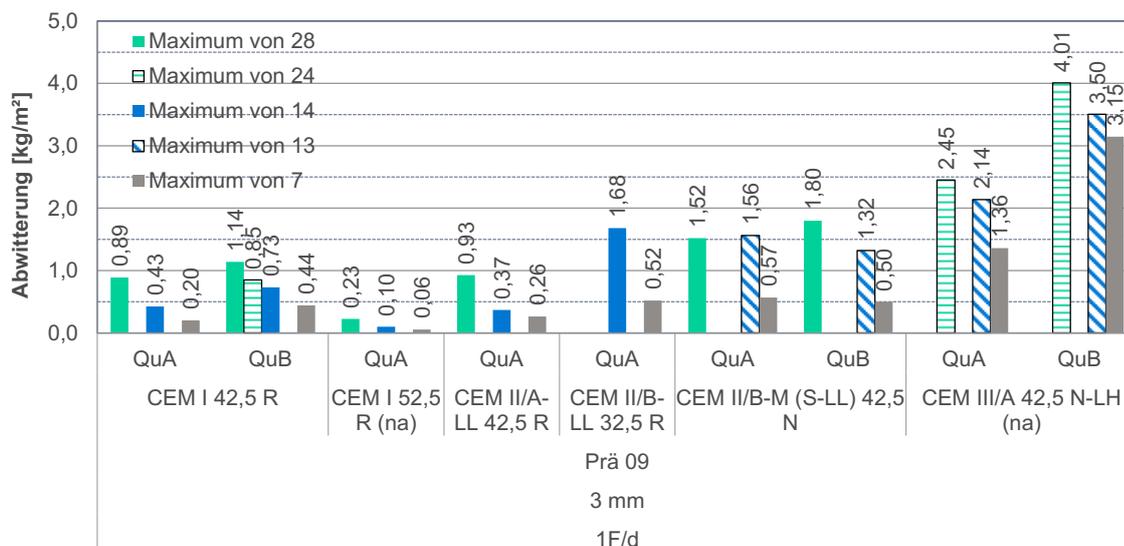


Bild 20 Abwitterung der Betonqualitäten A und B in der Präparationsart #09 nach 28, 24, 14, 13 bzw. 7 Frost-Tauwechselln

Eine Differenzierung der Betonqualitäten A und B ist bzgl. der Abwitterungsmenge möglich. Allerdings sind die Abwitterungen auf unterschiedlich hohem Niveau.

Innere Schädigung

Betonprobekörper der Betone in Qualität A wiesen keinen Abfall des relativen dynamischen E-Moduls auf (Bild 21). Ein signifikanter Abfall des relativen dynamischen E-Moduls unter das BAW-Kriterium zeigte sich bei Beton der Qualität B mit CEM I 42,5 R ab dem 24. und bei Beton mit CEM II/B-M (S-LL) 42,5 N ab dem 28. Frost-Tauwechsel. Innere Schädigungen treten insbesondere bei Qualität A nicht auf.

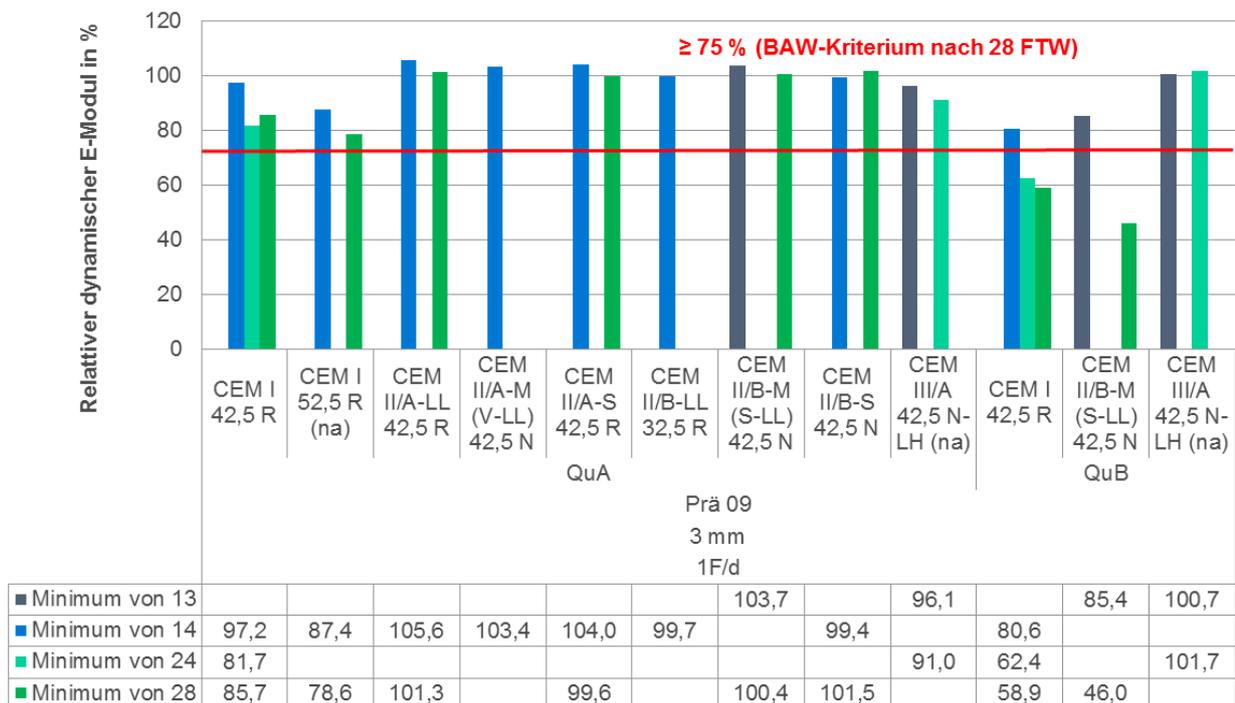


Bild 21 Relativer dynamischer E-Modul nach 13, 14, 24 bzw. 28 FTW als Maß für die innere Schädigung

Einfluss der Startbedingungen

Das unterschiedliche Abwitterungsniveau insbesondere im Vergleich von Portlandzement und hüttensandhaltigen Zementen kann u. a. mit deren unterschiedlichem Carbonatisierungsverhalten begründet werden. [Feldrappe2017] berichtete über den Einfluss der Carbonatisierungsbedingungen auf den Frost-Tausalzswiderstand von XF4-Beton. Dass die Carbonatisierungstiefe abhängig ist vom Zement, hat sich auch in den hier durchgeführten Untersuchungen bestätigt. Betone in Qualität A mit Hochofenzement wiesen nach 14 und 28 Tagen gegenüber dem Beton mit Portlandzement eine bis zu 4fach höhere Carbonatisierungstiefe auf (siehe Bild 22). Auch bei Betonen mit CEM II/B-S, CEM II/A-LL oder CEM II/B-LL war die carbonatisierte Randschicht gegenüber CEM I-Beton signifikant größer. Die Carbonatisierungstiefe des Betons mit CEM II/A-S war mit der eines Betons mit CEM I 42,5 R vergleichbar. Beton mit CEM I 52,5 R in Qualität A wies weder nach 14 noch nach 28 Frost-Tauwechseln eine messbare Carbonatisierungstiefe auf.

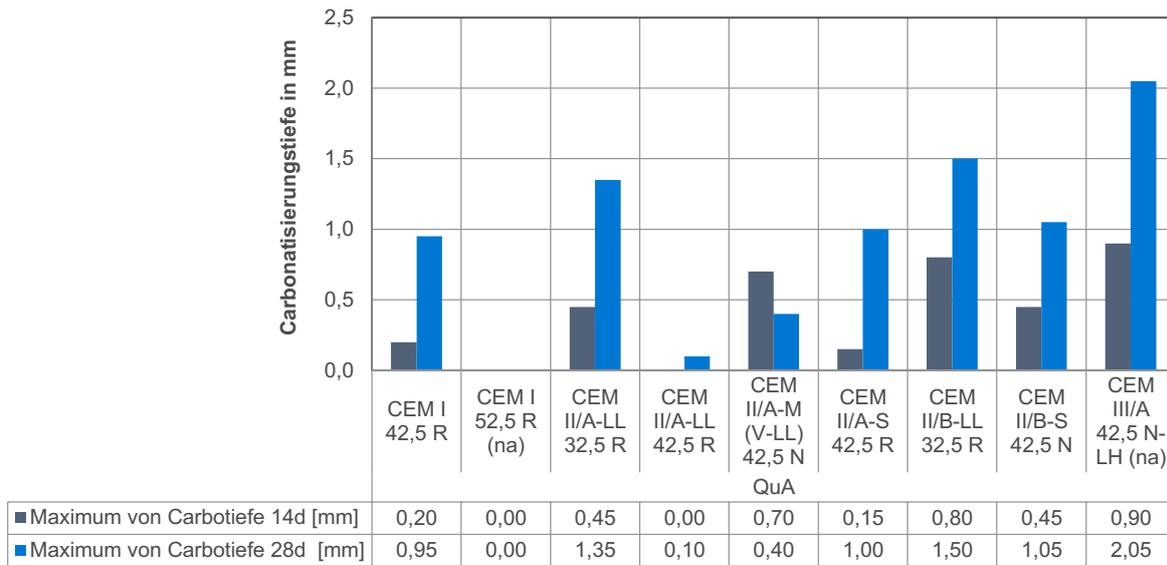


Bild 22 Carbonatisierungstiefen von Betonen der Qualität A im Alter von 14 und 28 Tagen

Mit zunehmender Carbonatisierungstiefe erhöhten sich die Abwitterungsmengen. Dies zeigte sich erwartungsgemäß im Alter von 28 Tagen bei Beton mit Hochofenzement (siehe Bild 23).

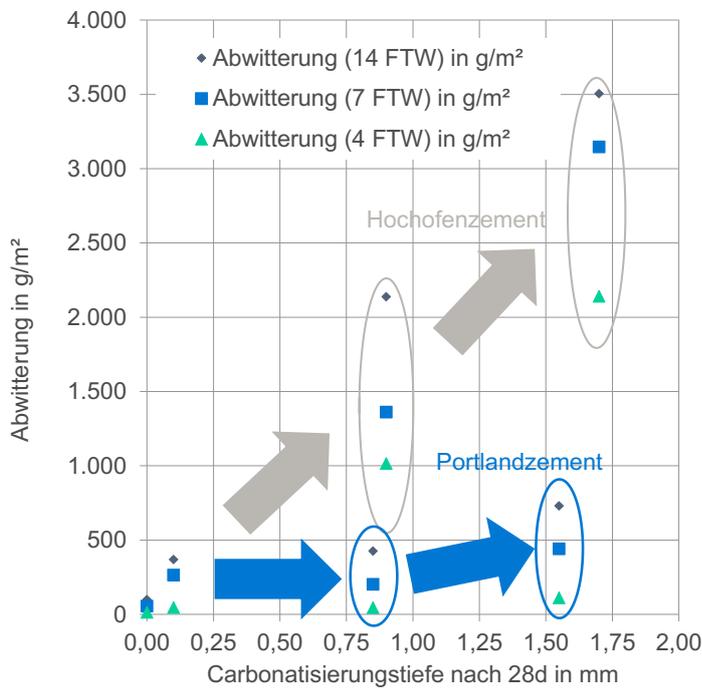


Bild 23 Einfluss der Carbonatisierungstiefe auf die Abwitterung von Beton mit CEM I bzw. CEM III

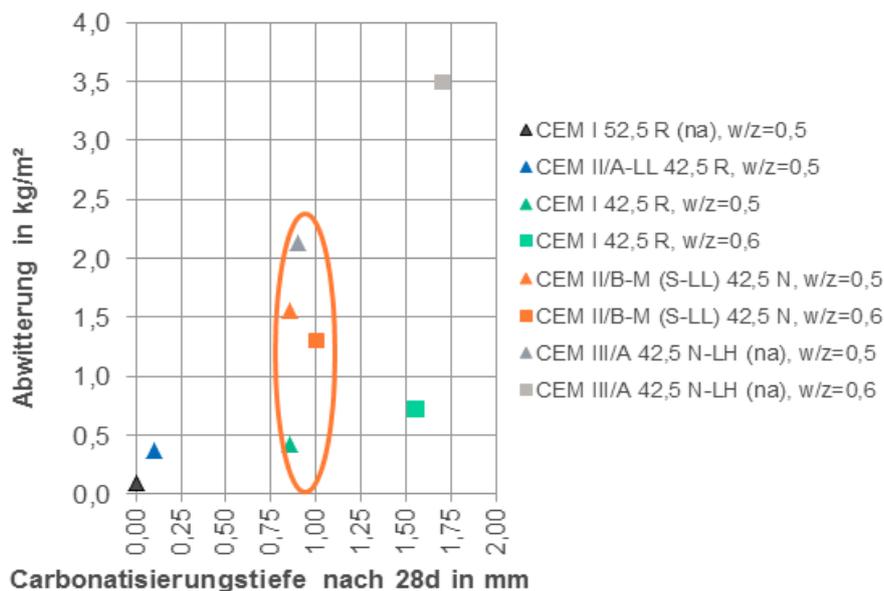


Bild 24 Zusammenhang zwischen Carbonatisierungstiefe und Abwitterung in Abhängigkeit von w/z-Wert und Zementart (Präparation #9)

Die hohen Abwitterungen der Betone mit CEM II/B-M (S-LL) mit w/z 0,50 bzw. w/z 0,60 (Bild 24, orange Marker in der orangen Ellipse) wurden bei vergleichbarer Carbonatisierungstiefe nur überschritten von der Abwitterung des Betons der Qualität A mit CEM III/A (graues Dreieck in der orangen Ellipse).

Die Untersuchungen hier zeigen, wie bereits an anderer Stelle, den Einfluss der Vorlagebedingungen auf das Ergebnis von Frost-Tausalz-Prüfungen in Abhängigkeit der Carbonatisierungsempfindlichkeit des Betons.

4 Ergebnisse CDF-Verfahren

4.1 Parameterstudie

Ausgangspunkt der Untersuchungen war das CDF-Verfahren für die Expositionsklasse XF4. Im ersten Schritt erfolgte eine Parameterstudie, um geeignete Stellgrößen für eine Abschwächung des Angriffsgrades zu erreichen. Hierbei wurden Betone mit Portlandzement und Wasserzementwerten von w/z = 0,50 und w/z = 0,60 verwendet.

Standardmäßig werden in der CDF-Prüfung 28 Frost-Tauwechsel (FTW) durchgeführt. Es konnte frühzeitig festgestellt werden, dass eine Reduzierung auf maximal 14 FTW notwendig ist, um eine möglichst geringe innere Schädigung der Betone zu gewährleisten, unabhängig von der Variation der Prüfparameter. Im Folgenden werden daher die Ergebnisse nach 14 FTW vergleichend dargestellt.

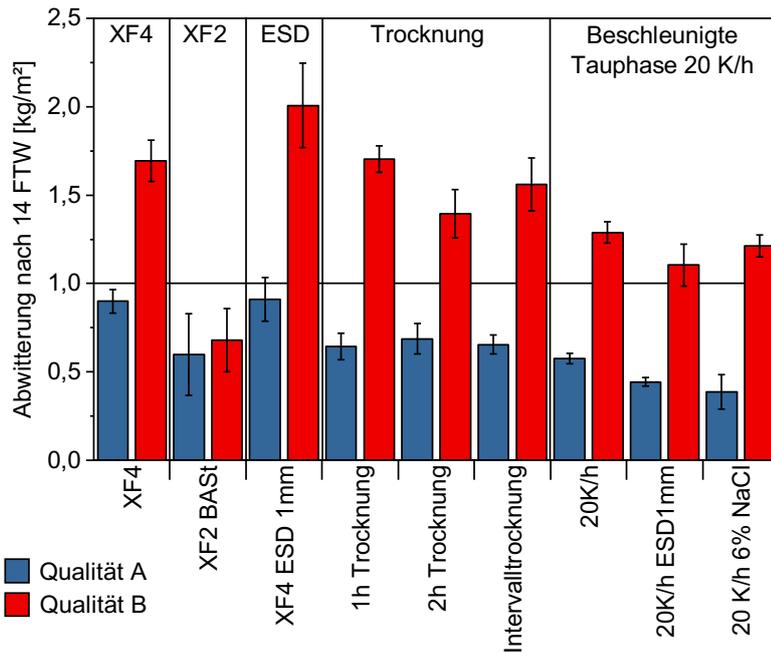


Bild 25 Vergleich der summierten Abwitterung nach 14 FTW für die unterschiedlichen Prüfbedingungen

Mit Ausnahme des modifizierten CDF-Verfahrens (XF2) der BAST konnte mit allen Varianten eine Differenzierung der Betonqualitäten erreicht werden (vgl. Bild 25). In Hinblick auf die innere Schädigung (vgl. Bild 26) erwies sich insbesondere die Variante „Beschleunigte Heizrate 20 K/h; 3 % NaCl“ als am besten geeignete Anpassung des CDF-Verfahrens. Besonders günstig bei dieser Form der Anpassung ist, dass sich der Aufwand des Prüfverfahrens im Vergleich zum Standard-CDF-Verfahren nicht erhöht. Varianten mit Trocknungsphasen wären mit einem erheblich höheren Prüfaufwand verbunden.

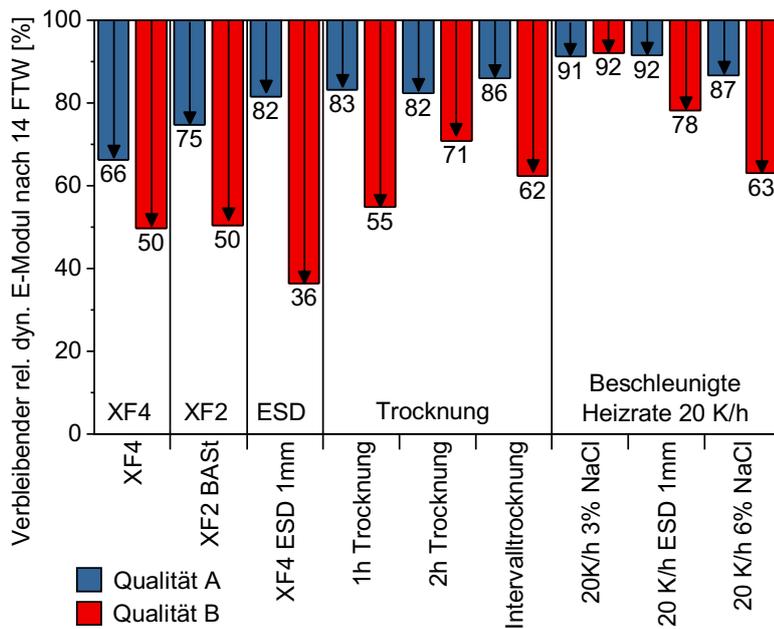


Bild 26 Auswirkung der Parametervariationen auf den verbleibenden relativen dynamischen E-Modul nach 14 FTW für die unterschiedlichen Prüfbedingungen (Pfeile kennzeichnen den E-Modulabfall.)

Für die Auswahl der Prüfvariante ist die Präzision von besonderer Bedeutung. Als erstes Indiz dafür kann der Variationskoeffizient für die summierten Abwitterungen nach 14 Frost-Tau-Wechseln innerhalb der einzelnen Prüfvarianten (Serie aus 5 Probekörpern) herangezogen werden (vgl. Bild 27).

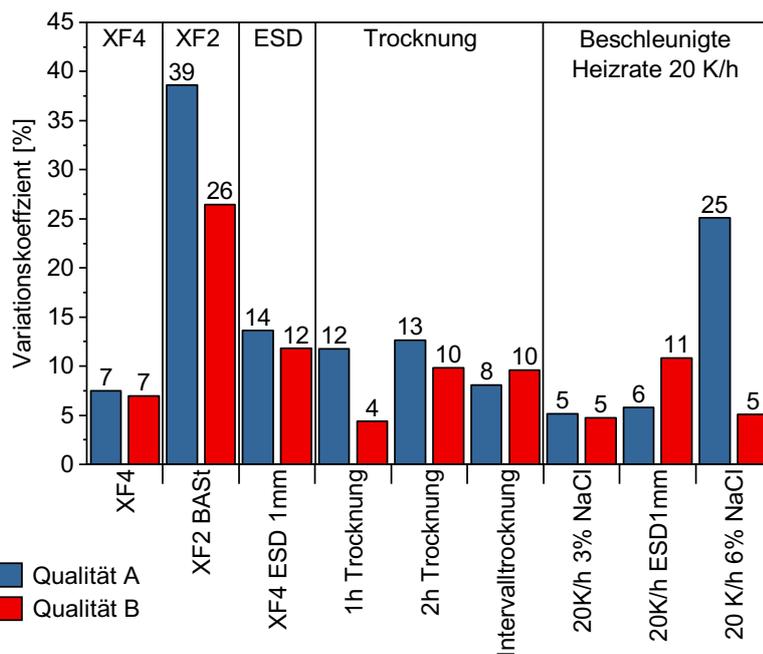


Bild 27 Vergleich der Variationskoeffizienten der summierten Abwitterung nach 14 FTW für die unterschiedlichen Prüfbedingungen

Die Variante „Beschleunigte Heizrate 20 K/h; 3 % NaCl“ weist für beide Betonqualitäten einen sehr niedrigen Variationskoeffizienten von 5 % auf. Aus Sicht der Präzision erscheint die Variante demnach ebenfalls als sehr geeignet. Zur Bestätigung der Ergebnisse mit der Vorzugsvariante wurden noch drei Wiederholungsprüfungen durchgeführt (vgl. Bild 28).

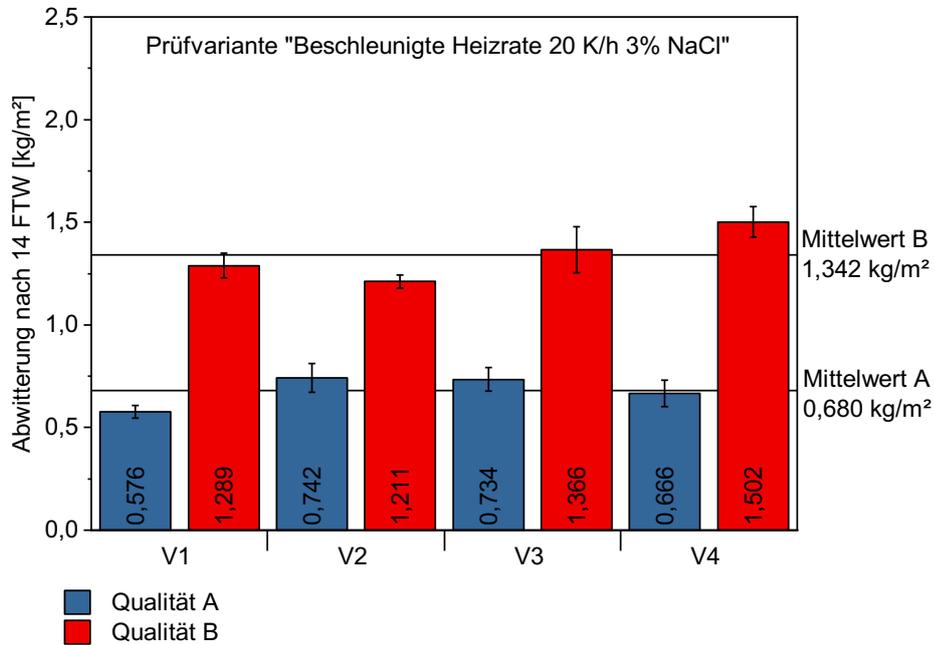


Bild 28 Vergleich der Abwitterungen nach 14 FTW der Prüfvariante „Beschleunigte Heizrate 20 K/h 3 %NaCl“ – Serie aus 4 Versuchen Fehlerbalken = Standardabweichung

Die Ergebnisse der gewählten Prüfvariante zeigen eine gute Reproduzierbarkeit. Für die Qualität A beträgt der Variationskoeffizient (Wiederholpräzision) 9,8 % bezogen auf den Mittelwert von 0,680 kg/m². Für die Qualität B beträgt der Variationskoeffizient (Wiederholpräzision) 8,0 % bei einem Mittelwert von 1,342 kg/m².

4.2 Evaluierung der Untersuchungsergebnisse aus der Parameterstudie

Die Untersuchungen erfolgten mit dem angepassten CDF-Verfahren anhand von Betonen der Qualität A und B unter Verwendung von 10 Zementen (9 + 1 Referenzzement) mit unterschiedlichen Klinkergehalten, Hauptbestandteilen und Festigkeitsklassen. Pro Zement wurden zwei Betonrezepturen (Qualität A und Qualität B) geprüft, die sich in ihrem w/z-Wert um 0,10 unterschieden. Das folgende Diagramm gibt einen Überblick über die summierten Abwitterungen nach 14 FTW für die verschiedenen Betone.

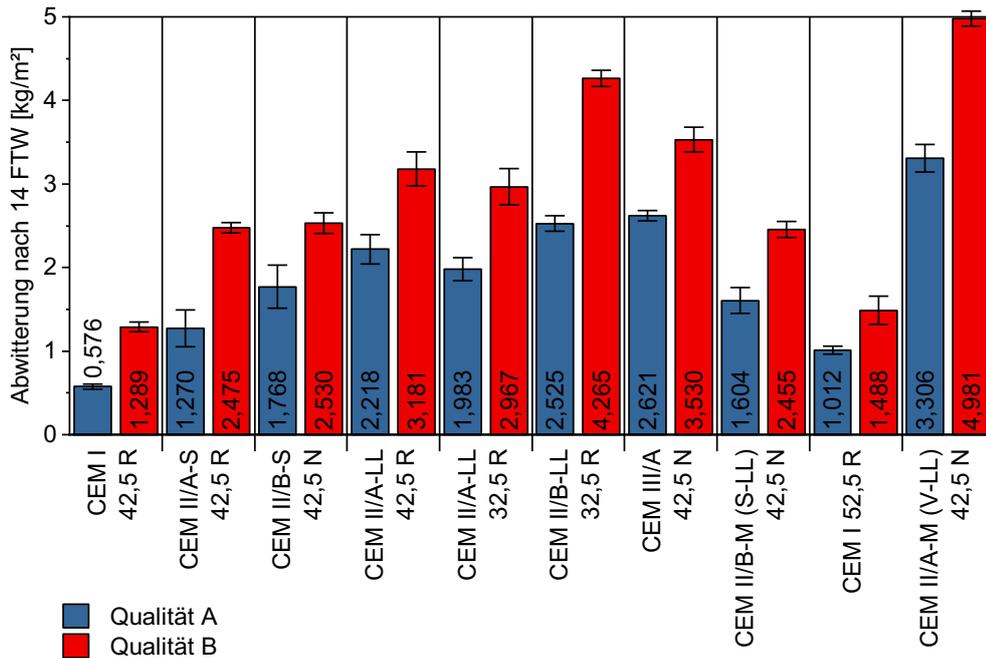


Bild 29 Einfluss der Zementart auf die summierten Abwitterungen nach 14 FTW mit dem angepassten CDF-Verfahren

Bei identischem Zement werden unterschiedliche Betonqualitäten mit dem angepassten CDF-Verfahren zielsicher unterschieden. Die Unterschiede zwischen den verschiedenen Zementen sind jedoch erheblich und überschreiten den Einfluss des w/z-Wertes (Qualität A vs. B) deutlich. Die Verwendung der klinkereffizienten Zemente führt im Vergleich zu den Portlandzementen zu einer Erhöhung des Abwitterungsniveaus nach 14 FTW. Dies ist prinzipiell kein ungewöhnliches Verhalten. Vergleichbare Erfahrungen liegen aus der Prüfung von Luftporenbetonen mit dem „regulären“ CDF-Verfahren vor [Ludwig2018; Ehrhard 2016].

Die zementabhängigen Unterschiede im Frost-Tausalz-Widerstand erschweren jedoch die angestrebte Festlegung eines Abwitterungskriteriums. Die Bewertung anhand des Abwitterungskriteriums in der angepassten CDF-Prüfung soll im Idealfall die Praxiserfahrung sowie die deskriptiven Vorgaben angemessen widerspiegeln.

Die Ergebnisse der inneren Schädigung (vgl. Bild 30) zeigen, dass auch mit dem „angepassten CDF-Verfahren“ eine innere Schädigung nach 14 FTW nicht in jedem Fall vermieden werden konnte. Um eine innere Schädigung sicher auszuschließen ist ein verbleibender rel. dyn. E-Modul von ca. 100 % anzustreben.

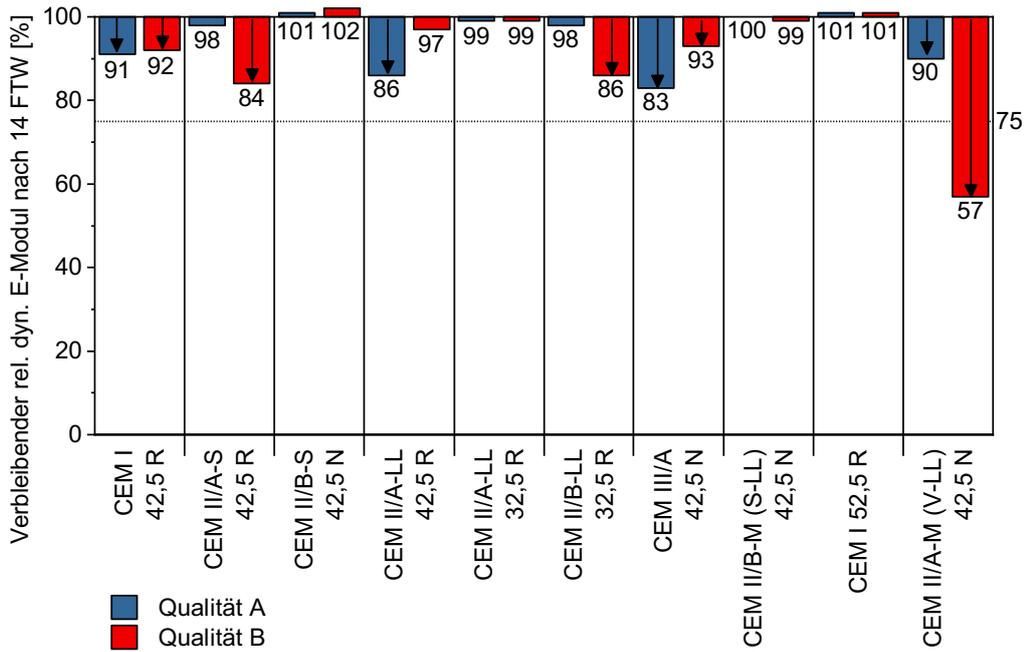


Bild 30 Verbleibender relativer dynamischer E-Modul nach 14 FTW in Abhängigkeit von Wasserzementwert und Zementart (Pfeile kennzeichnen den E-Modulabfall.)

Vor dem Hintergrund des zum Teil hohen Abwitterungsniveaus sowie des ebenfalls deutlichen Abfalls des E-Moduls ist eine geringere Anzahl an Frost-Tau-Wechseln für eine XF2 Beanspruchung ggf. besser geeignet. Das folgende Diagramm gibt einen Überblick der inneren Schädigung nach 6 Frost-Tau-Wechseln. Der relative dynamische E-Modul liegt nach 6 FTW bei allen Betonen in der Größenordnung von ca. 100 %.

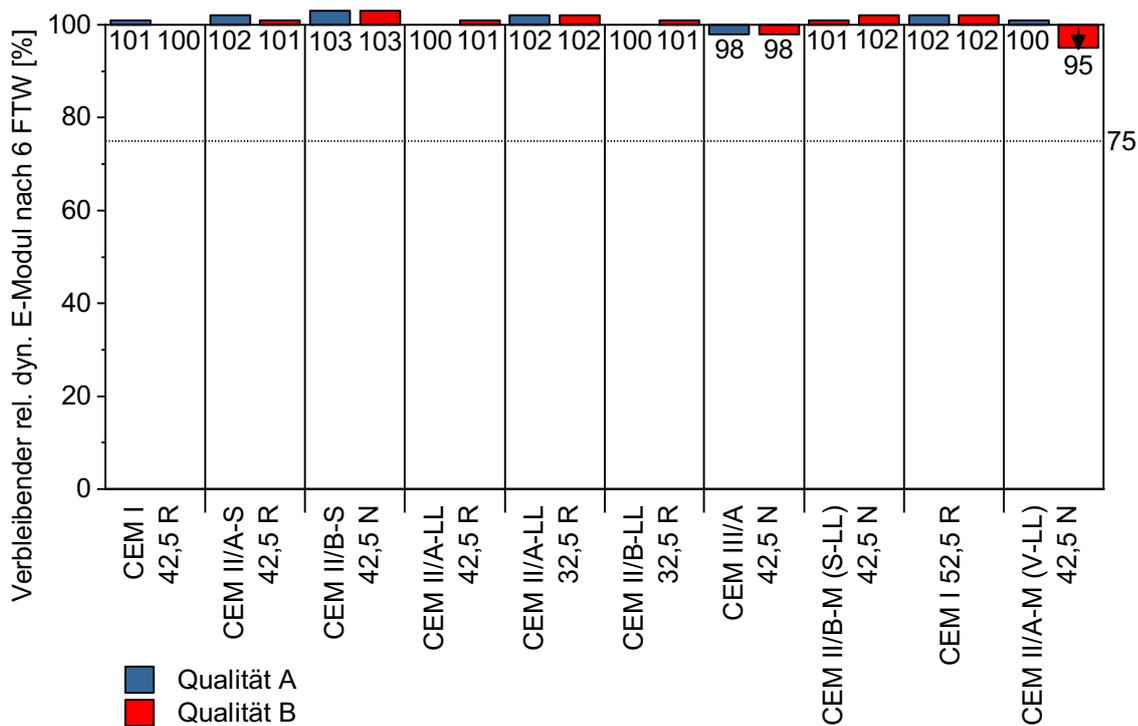


Bild 31 Einfluss der Zementart auf den relativen dynamischen E-Modul nach 6 FTW mit dem angepassten CDF-Verfahren

Die folgende Abbildung zeigt nunmehr die summierten Abwitterungen für die verschiedenen Betone nach 6 FTW.

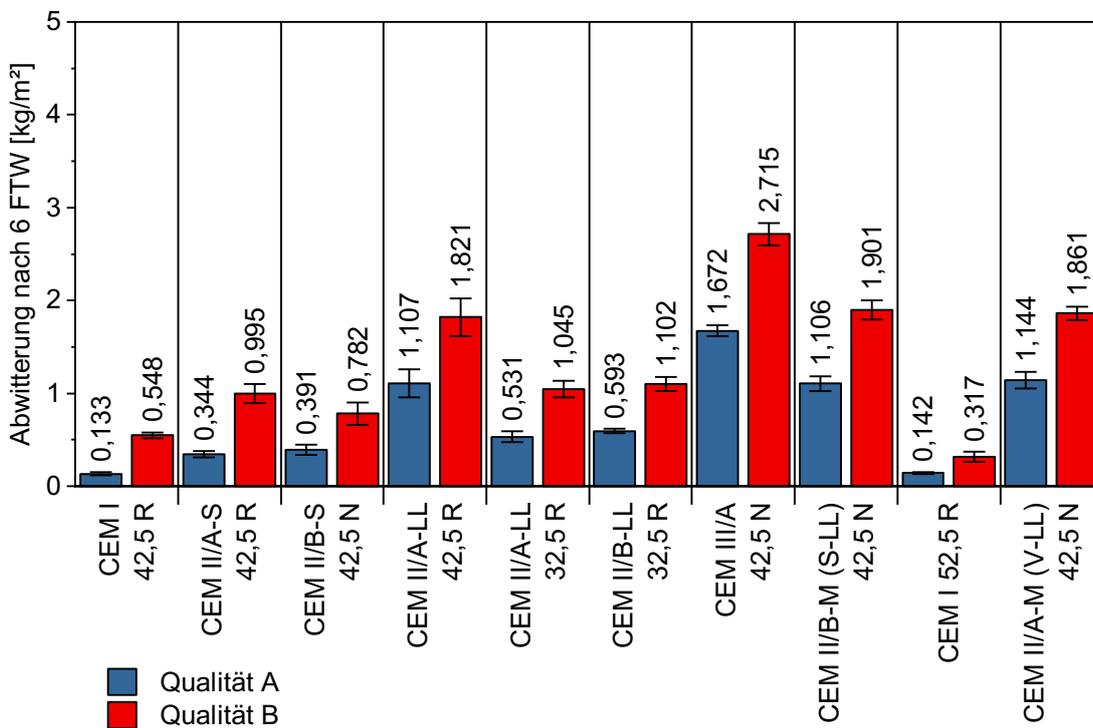


Bild 32 Einfluss des Wasserzementwertes und der Zementart auf die summierten Abwitterungen nach 6 FTW mit dem angepassten CDF-Verfahren

Bei 6 FTW ist immer noch eine gute Unterscheidung der Betonqualitäten (Wasserzementwerte) möglich. Die Festlegung eines einheitlichen Abwitterungskriteriums gestaltet sich hier ebenfalls schwierig, da auch nach 6 FTW das Abwitterungsniveau der CEM II/III-Zemente erhöht ist. Ein einheitliches Kriterium, welches zu einer Einstufung der Qualität A in „beständig“ und Qualität B in „nicht beständig“ führt, kann hier nicht festgelegt werden.

Neben dem Schädigungsniveau ist auch die Präzision des Verfahrens zu berücksichtigen. Da nur Einzelprüfungen durchgeführt wurden, muss für die Einschätzung zur Präzision auf die Daten zur Streuung innerhalb der einzelnen Prüfserien aus je 5 Probekörpern zurückgegriffen werden. Das folgende Diagramm zeigt die Variationskoeffizienten innerhalb der einzelnen Prüfserie über der Abwitterung nach 6 bzw. 14 Frost-Tau-Wechseln.

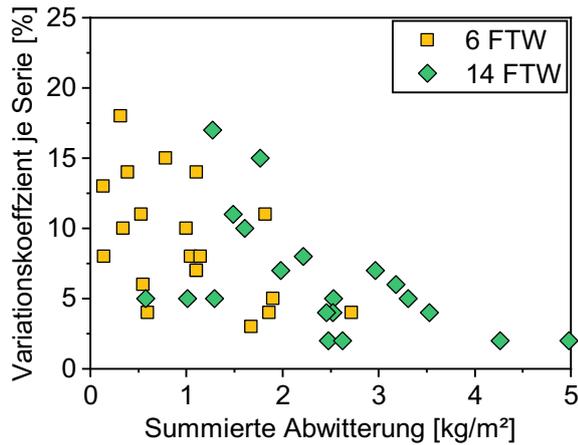


Bild 33 Variationskoeffizient je Serie über dem Abwitterungsniveau nach 6 und 14 FTW

Erwartungsgemäß tritt mit zunehmendem Abwitterungsniveau eine Verringerung des Variationskoeffizienten auf. Dementsprechend werden für die Abwitterungen nach 14 FTW tendenziell geringere Variationskoeffizienten erreicht. Im Hinblick auf die Präzision wäre demgemäß eine Prüfung bis 14 FTW in Verbindung mit einem Abwitterungskriterium von 2,0 kg/m² oder höher vorzuziehen. Bei einer Prüfung mit 6 FTW bietet es sich an, die erhöhten Streuungen durch eine höhere Probekörperanzahl oder eine Mehrfachprüfung zu kompensieren. Aufgrund der kurzen Prüfdauer ergäbe sich daraus nur ein geringer Mehraufwand gegenüber der Prüfung mit 14 FTW.

Einfluss des bis -20 °C gefrierbaren Wassers im Zementstein

Das folgende Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen der Menge des gefrierbaren Wassers im Zementstein und den Abwitterungen nach 14 FTW im angepassten CDF-Verfahren am Beton. Über die einzelnen Versuchspunkte wurde mit linearer Regression eine Trendlinie ermittelt. Der Beton mit CEM II/A-M (V-LL) ist hier nicht berücksichtigt, da dieser nachträglich in das Projekt mit einbezogen wurde, nachdem die Thermoanlysemessungen schon abgeschlossen waren.

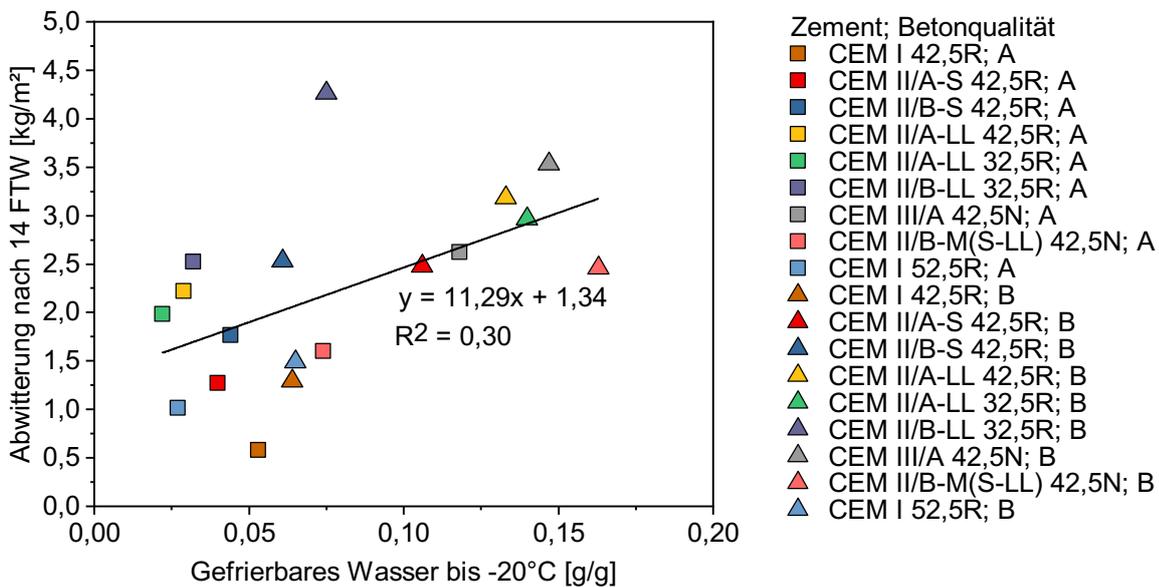


Bild 34 Zusammenhang zwischen der Menge des bis -20 °C gefrierbaren Wassers im Zementstein und den Abwitterungsmengen nach 14 FTW am Beton

Tendenziell ist mit zunehmender Menge an gefrierbarem Wasser (bis $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$) im Zementstein auch eine Zunahme der Abwitterungsmengen nach 14 FTW zu verzeichnen. Mit einem Bestimmtheitsmaß R^2 von 0,30 liegt jedoch nur ein schwacher Zusammenhang zwischen den beiden Kenngrößen vor. Das folgende Diagramm stellt die Abwitterungen nach 6 FTW im Verhältnis zum gefrierbaren Wasser dar.

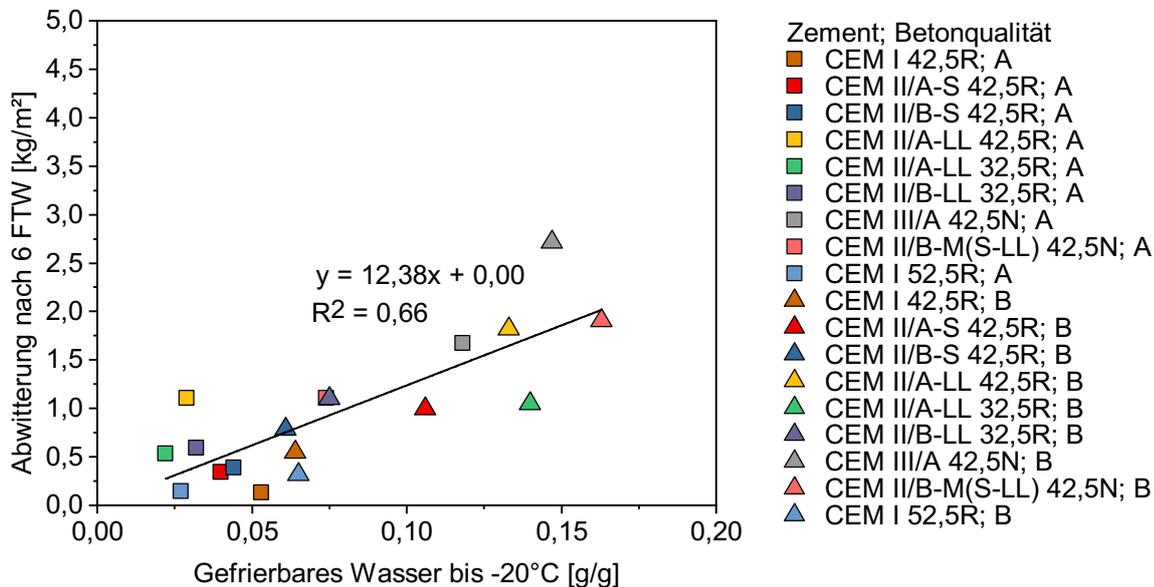


Bild 35 Zusammenhang zwischen der Menge des bis $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ gefrierbaren Wassers im Zementstein und den Abwitterungsmengen nach 6 FTW am Beton

Die Menge des gefrierbaren Wassers zeigt einen deutlich besseren Zusammenhang zu den Abwitterungsmengen nach 6 FTW. Das Bestimmtheitsmaß R^2 beträgt hier 0,66. Dieser verbesserte Zusammenhang kann als Indiz dafür gewertet werden, dass die Frost-Tausalz-Prüfung mit nur 6 FTW die für den Frost-Tausalz-Widerstand verantwortlichen Materialeigenschaften (oder zumindest einen wichtigen Teil) besser abbilden kann.

Zusammenhang mit der Vickershärte

Das folgende Diagramm zeigt den Zusammenhang zwischen der Vickershärte an Zementsteinproben und den Abwitterungen nach 14 FTW im angepassten CDF-Verfahren am Beton. Der Beton mit CEM II/A-M (V-LL) ist hier ebenfalls nicht berücksichtigt.

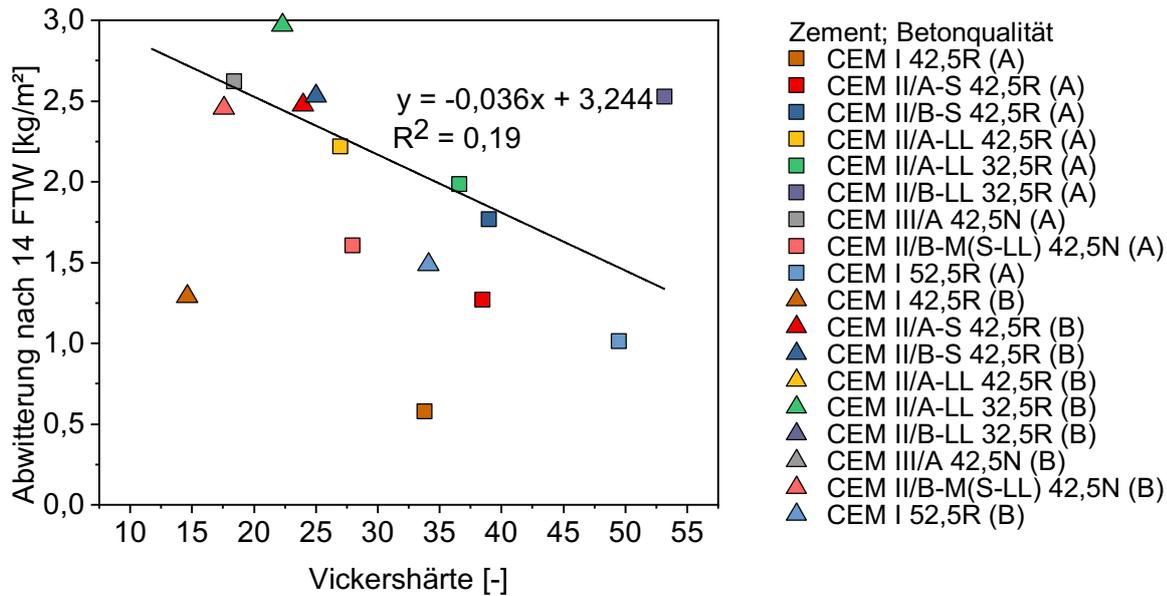


Bild 36 Zusammenhang zwischen der Vickershärte des Zementsteins und den Abwitterungsmengen nach 14 FTW am Beton

Zwischen der Vickershärte und den Abwitterungen nach 14 FTW ist kein Zusammenhang festzustellen ($R^2 = 0,19$). Das folgende Diagramm zeigt den Zusammenhang der Vickershärte mit den Abwitterungsmengen nach 6 FTW.

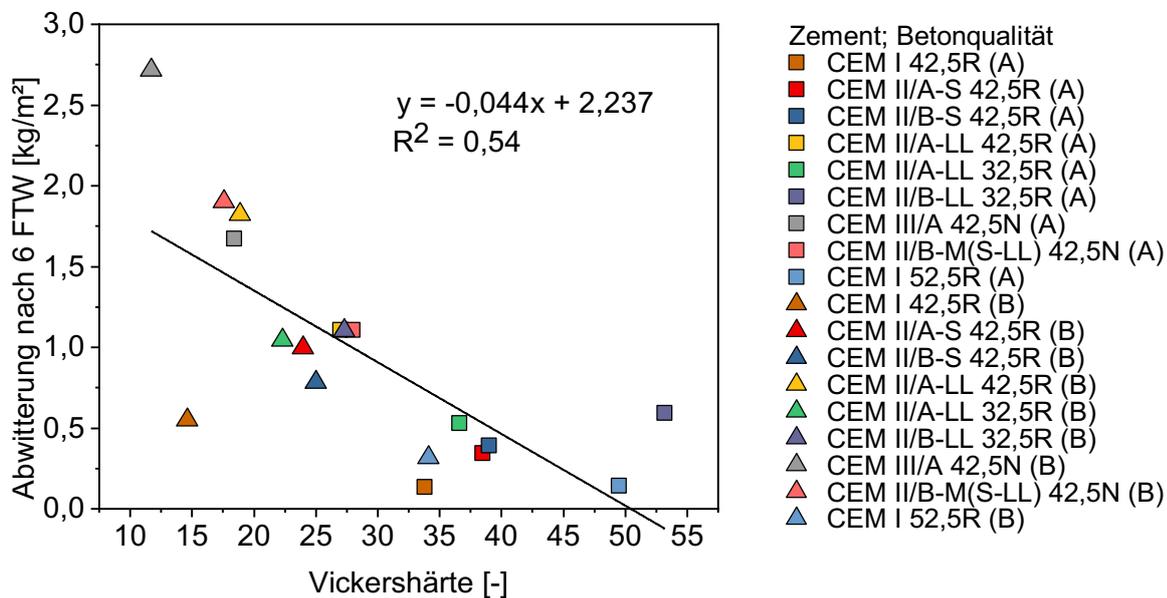


Bild 37 Zusammenhang zwischen der Vickershärte des Zementsteins und den Abwitterungsmengen nach 6 FTW am Beton

Die Abwitterungen nach 6 FTW zeigen einen besseren Zusammenhang ($R^2 = 0,54$) zur Vickershärte. Tendenziell nimmt mit steigender Vickershärte die Abwitterungsmenge ab. Dies ist plausibel, da eine höhere Vickershärte indirekt auf eine höhere Festigkeit und somit eine geringere Kapillarporosität der Betonrandzone schließen lassen. Zu berücksichtigen ist, dass die Härtemessungen an separat hergestellten Zementsteinproben erfolgten. Die Vorlagerungsbedingungen waren ähnlich der Betonrandzone der Betonprobekörper.

Auch aus dem Zusammenhang zur Vickershärte kann geschlussfolgert werden, dass eine Anzahl von 6 FTW besser für die angepasste CDF-Prüfung geeignet erscheint als 14 FTW.

Einfluss der Betondruckfestigkeit (28d)

Die Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen ist ebenfalls ein wichtiges deskriptives Kriterium, um einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand in der Expositionsklasse XF2 sicherzustellen. Im folgenden Diagramm werden daher die Ergebnisse des angepassten CDF-Verfahrens im Vergleich zur Betondruckfestigkeit dargestellt. Nur die Abwitterungen nach 6 FTW werden betrachtet. Als ein mögliches Abwitterungskriterium wurde hier eine Abwitterungsmenge von 1,0 kg/m² angesetzt. Als Kriterium für die Betondruckfestigkeit C35/45 wurden hier 51,0 MPa (45 MPa + 6 MPa Vorhaltemaß) verwendet.

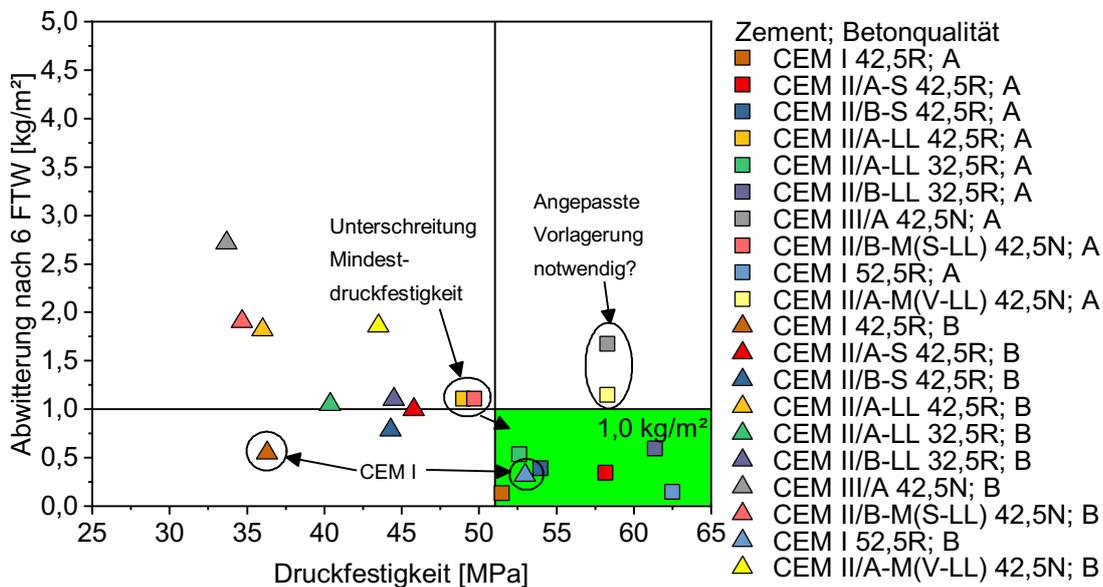


Bild 38 Resultierende Bewertung des Frost-Tausalz-Widerstandes nach 6 FTW im angepassten CDF-Verfahren unter Berücksichtigung der Druckfestigkeit

Prinzipiell ergibt sich nach 6 FTW folgende Bewertung:

1. Die Betone mit Portlandzement bleiben unabhängig von w/z-Wert und Druckfestigkeit unterhalb des Abwitterungskriteriums. Das Verhalten von Betonen mit Portlandzement ist demnach robust genug, um auch in „ungeeigneten“ Rezepturen einen hohen Frost-Tausalz-Widerstand in der Prüfung zu zeigen. Die Notwendigkeit einer Frost-Tausalz-Prüfung an Beton mit Portlandzement (ohne Zusatzstoffe), der allen deskriptiven Anforderungen der DIN 1045-2 entspricht, ist nicht erforderlich.
2. Zwei Betone der Qualität A überschreiten trotz ausreichender Druckfestigkeit das Kriterium von 1,0 kg/m². Einer der beiden Betone wurde mit einem Hochofenzement hergestellt. Vorliegende Erkenntnisse deuten darauf hin, dass der geringe Frost-Tausalz-Widerstand des Betons mit Hochofenzement auf die Vorlagerungsbedingungen zurückzuführen ist, die im Vergleich zur Praxis eine stärkere Carbonatisierung des Betons zulassen. Für diesen Beton sowie ggf. auch für den Beton auf Basis des CEM II/A-M (V-LL) sollten angepasste Vorlagerungsbedingungen in Betracht gezogen werden.

3. Zwei Betone der Qualität A unterschreiten die Mindestdruckfestigkeit geringfügig und überschreiten das Abwitterungskriterium ebenfalls geringfügig. Hier ist anzunehmen, dass bei Einhaltung der Mindestdruckfestigkeit das Abwitterungskriterium ebenfalls eingehalten wird.

In vielen, aber nicht in allen Fällen stellt die Mindestdruckfestigkeit ein effektives Kriterium dar, um einen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand in der Expositionsklasse XF2 ohne Luftporen abzusichern.

5 Zusammenfassung

Im Zuge des Forschungsvorhabens wurden wichtige Grundlagen für ein Prüfverfahren zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Betonen der Expositionsklasse XF2 gelegt. Auf der Grundlage des vorliegenden Entwicklungsstandes werden folgende (vorläufigen) Parameter für die angepassten Prüfverfahren empfohlen:

5.1 Angepasstes Plattenprüfverfahren (XF2)

Ausgehend vom Referenzprüfverfahren für Betone in der Expositionsklasse XF4 (Plattenprüfverfahren, auch Slab-Test genannt) wurde durch Modifikation der Prüfbedingungen eine für Betone für die Expositionsklasse XF2 abgeschwächte Prüfmethode angestrebt.

Die angestrebte Abschwächung des Frost-Tausalzangriffs gegenüber dem Referenzprüfverfahren konnte mit der Methode der verringerten Eisschichtdicke auf 1 mm i. d. R. erreicht werden. Dieser Effekt war jedoch aufgrund praktischer Probleme mit dieser geringen Prüflüssigkeitsschicht nicht immer reproduzierbar. Die Prüflüssigkeitshöhe wurde daher auf 3 mm festgelegt. Im Weiteren wurde auf die Wärmeisolierung und Abdichtung der Seitenflächen verzichtet und es wurde eine wannenartig vertiefte Prüffläche verwendet.

Die mit diesem Prüfaufbau erzielten Ergebnisse führten zwar zu einer Differenzierung nach Wasserzementwert, jedoch war der Einfluss der Zementart zum Teil deutlich größer.

Unabhängig von der Zementart trat bis zum 14. Frost-Tauwechsel (FTW) kein nennenswerter Abfall des relativen dynamischen E-Moduls (RDM) auf. Erst bei längerer Prüfdauer wies ein signifikanter Abfall des relativen dynamischen E-Moduls auf eine innere Schädigung hin. Die bisher erzielten Ergebnisse legen eine Verkürzung der Prüfdauer auf weniger als 14 Frost-Tauwechsel und eine differenzierte Betrachtung der Vorlagerungsbedingungen nahe.

Empfehlungen

Durch folgende Anpassungen wurde gegenüber dem Ursprungsverfahren eine Abschwächung der Wirkmechanismen des Frost-Tausalz-Angriffs auf Betonprobekörper erzielt. Es können folgende Maßnahmen empfohlen werden:

- Mit der trapezartigen Teflon-Schalung können die üblichen Würfelschalungen (Innenmaße 150 x 150 x 150 mm³) für eine einfache Herstellung wannenartig vertiefter Prüfflächen verwendet werden. Durch diese Profilierung der Prüfflächen wird ein seitliches Weglaufen der Prüflösung von der Prüffläche vermieden. Der Verzicht auf die seitliche Abdichtung mit Moosgummi mindert zudem die Aufsättigung im Inneren der Betonprobekörper, so dass keine signifikante innere Schädigung der Betone mehr auftritt.

- Durch die Verwendung eines Verdunstungsschutzes aus starrer Kunststoffolie anstatt der Folienhaube mit Styrodur-Rahmen wird die Luftschichtdicke über den Prüfflächen verringert. Dadurch beschleunigt sich der Wärmeübergang zwischen der die Probe umgebenden Luft im Slab-Tester (Prüfgerät) und den Prüfflächen der Probekörper. Die Geschwindigkeit der Temperaturanpassung zwischen Luft und Probe kann so beschleunigt werden. Nicht zuletzt führt eine gegenüber dem Ursprungsverfahren auf maximal 14 reduzierte Anzahl der Frost-Tauwechsel zu einer Abschwächung des Frost-Tausalz-Angriffs mit der Folge, dass sich die abgewitterte Materialmenge messtechnisch sinnvoll erfassen lässt. Die Verringerung der Probekörperbreite von 150 auf 110 mm verbunden mit der Erhöhung der Anzahl Probekörper von 4 auf 5 erhöht zudem die statistische Sicherheit des Mittelwerts des Prüfergebnisses.

Auf Basis der o. g. Erkenntnisse können zusammenfassend folgende Empfehlungen für ein angepasstes Plattenprüfverfahren XF2 gegeben werden:

- Probekörpergeometrie 150 x 110 x 70 mm³ anstelle von 150 x 150 x 50mm³
- wannenartig vertiefte Prüffläche gegen trapezartige Teflon-Schalung betoniert
- keine seitliche Abdichtung mit Moosgummi
- keine wärme-isolierende Ummantelung mit Styropor
- Verdunstungsschutz aus starrer Kunststoffolie anstatt Folienhaube mit Styrodur-Rahmen
- auf maximal 14 reduzierte Anzahl an Frost-Tauwechseln
- fünf anstelle von vier Probekörpern je Prüflös.

5.2 Angepasstes CDF-Verfahren XF2

Ausgangspunkt der Untersuchungen war das CDF-Verfahren für die Expositionsklasse XF4. Im ersten Schritt erfolgte eine Parameterstudie, um geeignete Stellgrößen für eine Abschwächung des Angriffsgrades zu erreichen. Hierbei wurden Betone mit Portlandzement und Wasserzementwerten von $w/z = 0,50$ und $w/z = 0,60$ verwendet.

Als aussichtsreich erwies sich eine Prüfvariante mit 14 statt 28 Frost-Tau-Wechseln sowie einem veränderten Temperaturzyklus (beschleunigte Heizrate mit 20 K/h, 3 h Haltezeit bei +20 °C statt 1h). Mit dieser Variante wurde anhand der Abwitterungsmenge eine sichere Unterscheidung der beiden Betonqualitäten bei Portlandzementbeton erreicht, bei gleichzeitig nur geringer innerer Schädigung.

Diese Prüfvariante bildete die Grundlage für die weiteren Untersuchungen zur Evaluierung des Verfahrens mit verschiedenen Betonen (bzw. Zementen). Die Unterschiede im Wasserzementwert ließen sich bei identischer Zementart gut unterscheiden. Das Schädigungsniveau der verschiedenen Betone war jedoch zementspezifisch sehr unterschiedlich, was die Festlegung eines einheitlichen Bewertungskriteriums erschwert. Zudem war das Schädigungsniveau gegenüber der Variante mit Portlandzement insgesamt deutlich erhöht.

Die Betrachtung der Abwitterungsmenge in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit zeigte, dass für ein Abwitterungskriterium von 1,000 kg/m² nach 6 FTW bei Einhalten der Mindestdruckfestigkeit C35/45 (mit 6 MPa Vorhaltemaß = 51 MPa) überwiegend eine erwartungsgemäße Einstufung der Betone erreicht wurde.

Eine innere Schädigung kann nach 6 FTW ausgeschlossen werden. Weiterführende Untersuchungen zum Gefrierverhalten der Porenlösung im Zementstein zeigten zudem eine gute Übereinstimmung zwischen Abwitterungsmenge und dem Anteil gefrierbaren Wassers im Zementstein. Auch zur Härte des Zementsteins wurde nach 6 FTW eine deutlich bessere Korrelation als nach 14 FTW festgestellt.

Im Hinblick auf die Präzision des Verfahrens wäre eine Prüfung bis 14 FTW vorzuziehen, da mit steigender Abwitterungsmenge die Prüfstreuungen in Relation zum Prüfergebnis geringer waren. Bei einer Prüfung mit nur 6 FTW bietet sich hingegen die Möglichkeit, die erhöhten Streuungen durch eine höhere Probekörperanzahl oder eine Mehrfachprüfung zu kompensieren. Aufgrund der kurzen Prüfdauer ergäbe sich daraus nur ein geringer Mehraufwand gegenüber der Prüfung mit 14 FTW.

5.3 Vorlagerungsbedingungen beider Verfahren

Bei einigen klinkereffizienten Zementen, insbesondere bei Hochofenzement, sollte berücksichtigt werden, dass die Standardvorlagerung vor der Frost-Tausalz-Prüfung gegenüber Praxisbedingungen ggf. zu pessimal ist. Hier sollte eine Anpassung der Vorlagerungsbedingungen erfolgen, um Diskrepanzen zwischen der Performance im Prüfverfahren und dem Verhalten unter Praxisbedingungen sicher zu vermeiden. Dies betrifft jedoch auch gleichermaßen die CDF-Prüfung für XF4-Beton.

Empfehlungen für ein angepasstes CDF-Verfahren XF2

Die Herstellung der Probekörper und die Durchführung der Prüfung erfolgt analog dem CDF-Verfahren nach DIN CEN/TS 12390-9 mit folgenden Anpassungen:

- Veränderung des Frost-Tau-Zyklus
 - Kühlen von +20 °C auf -20 °C mit 10 K/h
 - 3 h Haltezeit bei -20 °C
 - Aufheizen von -20 °C auf +20 °C mit 20 K/h
 - 3 h Haltezeit bei +20 °C
- Reduzierung der Frost-Tau-Wechsel auf 6 FTW
- Prüfung von insgesamt 10 Probekörpern aus 2 Herstellchargen
- Abwitterungskriterium: 1,000 kg/m².

Bei Anwendung von 6 FTW kann ggf. die ebenfalls erfolgte Änderung im Frost-Tau-Zyklus entfallen, da die geringe Anzahl an Frost-Tau-Wechseln eine ausreichende Abschwächung des Angriffsgrades darstellen kann. Die Verwendung des regulären Frost-Tau-Zyklus würde eine deutliche Vereinfachung der organisatorischen Abläufe in entsprechenden Prüflaboren mit sich bringen. Die Tauglichkeit dieses Ansatzes muss jedoch erst überprüft werden.

Auf Grundlage des vorliegenden Entwicklungsstandes sollten vorerst weitere Erfahrungen gesammelt werden, um eine praxisgerechte Einstufung des Frost-Tausalz-Widerstandes der Betone sicher zu erreichen. Vorher ist eine Einführung der angepassten Verfahren nicht anzustreben.

6 Literatur und Normen

6.1 Literatur

- [BAW2012] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW). Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton (Leistungsbereich 205), 2012.
- [Ehrhardt2016] Ehrhardt, D.: Zum Einfluss der Nachbehandlung auf die Gefügeausbildung und den Frost-Taumittelwiderstand der Betonrandzone. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2016.
- [Feldrappe2017] Feldrappe, V.: Praxisgerechte Modifikation von Lagerungsbedingungen für die Durchführung von Frostwiderstandsprüfungen. Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 18183, 2017.
- [Gehlen2011] Gehlen, C.; Lowke, D.; Michalowski, C.: Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes von Beton mit dem modifizierten CDF-Verfahren (XF2). Bergisch-Gladbach: Bericht zum Forschungsprojekt FE 15.460/2008/DRB 2011.
- [Lindmark1998] Lindmark, S.: Mechanisms of salt frost scaling on portland cement-bound materials: studies and hypothesis. Lunds Universitet, 1998.
- [Liu2015] Liu, Z.; Hansen, W.: A hypothesis for salt frost scaling in cementitious materials. Journal of Advanced Concrete Technology (Jahrgang 13) 2015, Heft 9, S. 403-414.
- [Ludwig2018] Ludwig, H.M.; Müller, M.; et al.: Dauerhafte Betonfahrbahndecken unter Berücksichtigung aktueller ökologischer und wirtschaftlicher Aspekte. Bundesanstalt für Straßenwesen, Bergisch-Gladbach, Bericht Nr. S124, 2018.
- [Müller2019] Müller, M.; Ludwig, H. M.; Ehrhardt, D.: Frost-Tausalz-Angriff aus Beton - Mechanismen und Schadensmodelle. Beton- und Stahlbetonbau (Jahrgang 114) 2019, Heft 6, S. 392-400.
- [Müller2021] Müller, M.: Frost-Tausalz-Angriff auf Beton – Neue Erkenntnisse zum Schadensmechanismus. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar, 2021.
- [Seidel2015] Seidel, M.; Müller, C.: Modifiziertes CDF-Verfahren zur Beurteilung von Betonen für die Expositionsklasse XF2 derzeit nicht geeignet. Information Betontechnik 09/2015.
- [Setzer1994] Setzer, M. J.: Entwicklung und Präzision eines Prüfverfahrens zum Frost-Tausalz-Widerstand. Wissenschaftliche Zeitschrift der Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar - HAB (Jahrgang 40) 1994, Heft 5/6/7, S. 87-93.
- [Setzer2000] Setzer, M. J.: Die Mikroeislinsepumpe – Eine neue Sicht bei Frostangriff und Frostprüfung. 14. Internationale Baustofftagung ibausil 2000, S. 1.0691-1.0705.

- [Setzer2007] Setzer, M. J.; Keck H.-J.; et al.: Entwicklung eines Prüfverfahrens für Beton in der Expositionsklasse XF2. Bergisch Gladbach: Schlussbericht zum Forschungsprojekt FE 15.367/2002/DRB 2007.
- [Skarabis2020] Skarabis, J.: Anwendung der Mikroindentation zur Gefügeuntersuchung von Fahrbahndeckenbetonen. Dissertation, Technische Universität München, 2020.
- [Tremblay2007] Tremblay, M. H.; Lory, F.; et al.: Ability of the glue spall model to account for the de-icer salt scaling deterioration of concrete. 12th ICCI 2007.
- [Valenza2006] Valenza II, J. J.; Scherer, G. W.: Mechanism for salt scaling. Journal of the American Ceramic Society (Jahrgang 89) 2006, Heft 4, S. 1161-1179.

6.2 Normen

DIN CEN/TS 12390-9:2017-05

Prüfung von Festbeton - Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand – Abwitterung; Deutsche Fassung CEN/TS 12390-9:2016

DIN EN 12390-10:2019-08

Prüfung von Festbeton - Teil 10: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton bei atmosphärischer Konzentration von Kohlenstoffdioxid; Deutsche Fassung EN 12390-10:2018

DIN-Fachbericht CEN/TR 15177:2006-06

Prüfung des Frost-Tauwiderstandes von Beton – Innere Gefügestörung; Deutsche Fassung CEN/TR 15177:2006

Förderhinweis

Das IGF-Vorhaben Nr. 19823 BG der VDZ Technology gGmbH, Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.