

Abschlussbericht

zum Forschungsvorhaben

„Frostwiderstand von Betonen mit klinkereffizienten CEM II/C- und CEM VI-Zementen“

**gefördert durch die
„Dres. Edith und Klaus Dyckerhoff-Stiftung“**

Bearbeiter:
M. Sc. Nikita Gula
Tel.: 0049 211 4578 362
E-Mail: nikita.gula@vdz-online.de

Zuwendungsempfänger:
VDZ Technology gGmbH
Toulouser Allee 71
40476 Düsseldorf

Ansprechpartner:

Dr. Martin Schneider
Tel.: 0049 211 4578 200
E-Mail: martin.schneider@vdz-online.de

Dr.-Ing. Jörg Rickert
Tel.: 0049 211 4578 233
E-Mail: joerg.rickert@vdz-online.de

Dr. Christoph Müller
Tel.: 0049 211 4578 372
E-Mail: christoph.mueller@vdz-online.de

Inhaltsverzeichnis

Vorwort und Dank	3
1 Ausgangssituation und Problemstellung	3
2 Ziel und Umfang der Arbeiten	5
3 Angaben zu den verwendeten Zementen	5
3.1 Prüfungen an den Ausgangsstoffen und an den Zementen	7
3.1.1 Physikalische Prüfungen	7
3.1.2 Chemische Zusammensetzung	7
3.1.3 Mineralphasenbestand	8
3.1.4 Druckfestigkeiten	10
4 Prüfverfahren sowie Darstellung der Ergebnisse	10
4.1 Allgemeines	10
4.2 Prüfungen zum Frostwiderstand	11
4.2.1 Betonzusammensetzung, Herstellung und Lagerung	11
4.2.2 Frisch- und Festbetoneigenschaften	11
4.2.3 Frostwiderstand	13
5 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse und Ausblick	25
5.1 Erweiterung der Datenbasis zur Anwendung neuer, klinkereffizienter Zemente	25
5.2 Vergleich der üblichen mit der beschleunigten Prüfung des Frostwiderstands mit dem Würfelverfahren	26
6 Literatur	27
7 Anhang	28
A Bilder	28

Vorwort und Dank

Das Forschungsvorhaben „Frostwiderstand von Betonen mit klinkereffizienten CEM II/C- und CEM VI-Zementen“ wurde über die Dres. Edith und Klaus Dyckerhoff-Stiftung finanziell gefördert. Für die Förderung des Forschungsvorhabens danken wir der Dres. Edith und Klaus Dyckerhoff-Stiftung ganz herzlich.

1 Ausgangssituation und Problemstellung

Als wichtiger Beitrag zur Dekarbonisierung von Zement und Beton wird gemäß der Studie „Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien“ des VDZ [vdz20] ein Anteil der CEM II/C-Zemente am Inlandversand im Jahr 2030 von etwa 45 Prozent angestrebt. Bis spätestens 2050 soll der Anteil von CEM II/C- und CEM VI-Zementen (siehe **Tabelle 1**) auf rund 60 Prozent des Inlandversands steigen. Die normative Grundlage für diese Zemente ist die Zementnorm EN 197-5 [N01], siehe **Tabelle 1**. Die Auswahl der Hauptbestandteile neben Portlandzementklinker ist dabei von der regionalen Verfügbarkeit sowie der Leistungsfähigkeit in Bezug auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften und die Dauerhaftigkeit abhängig. In Deutschland sind dies aktuell vor allem Hüttensand, Steinkohlenflugasche und Kalkstein. Die Mengen an Hüttensand und Steinkohlenflugasche werden voraussichtlich in den nächsten Jahren abnehmen, siehe z. B. [BBS16], [Hei18], [Ass19]. Der effiziente Einsatz dieser Hauptbestandteile im Zement in Kombination mit Kalkstein ist ein wichtiges Instrument für die weitere Senkung des Klinker/Zement-Faktors [Lau16], [Mül19]. Darüber hinaus wird seit einigen Jahren die Bedeutung von calcinierten Tönen als Zementhauptbestandteil hervorgehoben [Pie18], oftmals in Kombination mit Kalkstein [Scr18]. Im Referenzszenario der VDZ-Roadmap [vdz20] wird angenommen, dass bis 2030 etwa 0,5 Mio. Tonnen bzw. in 2050 2,5 Mio. Tonnen calcinierte Tone in der Zementherstellung verwendet werden. Das Klimaneutralitätsszenario rechnet mit einer Verwendung von 2,5 Mio. Tonnen in 2030 sowie bis zu 4,5 Mio. Tonnen in 2050. Natürlich vorkommenden Tone unterscheiden sich in ihren Eigenschaften teilweise deutlich voneinander [Lud18]. Gerade in Kombination mit Kalkstein und bei geringen Klinkergehalten werden die Eigenschaften der Zemente und hieraus hergestellter Betone zu überprüfen sein. Für eine breite Anwendung dieser Zemente ist es wichtig, dass alle Beteiligten Vertrauen in die neuen Produkte entwickeln. Daher muss sichergestellt werden, dass auch bei Verwendung dieser Zemente ohne Langzeiterfahrung die benötigten Frischbetoneigenschaften zielgenau eingestellt und Festigkeitsentwicklung sowie die Wärmeentwicklung bei der Planung und Bauausführung berücksichtigt werden können. Für langlebige Bauwerke steht zudem die Dauerhaftigkeit des Betons im Fokus.

Tabelle 1 CEM II/C-M und CEM VI gemäß EN 197-5 [N01]

Hauptarten	Bezeichnung der Produkte (Zementarten)	Zusammensetzung (Massenanteile in Prozent ^a)										Nebenbestandteile
		Hauptbestandteile										
		Klinker	Hüttensand	Silicastaub	Puzzolan		Flugasche		Gebrannter Schiefer	Kalkstein		
					natürlich	natürlich getempert	kieselsäurereich	kalkreich				
		K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L ^c	LL ^c	
CEM II	CEM II/C-M	50-64	◁----- 36-50 -----▷									0-5
CEM VI	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	–	6-20	–	–	–	–	–	–	0-5
	CEM VI (S-V)	35-49	31-59	–	–	–	6-20	–	–	–	–	0-5
	CEM VI (S-L)	35-49	31-59	–	–	–	–	–	–	6-20	–	0-5
	CEM VI (S-P)	35-49	31-59	–	–	–	–	–	–	–	6-20	0-5
	CEM VI (S-LL)	35-49	31-59	–	6-20	–	–	–	–	–	–	0-5
^a Die Werte in der Tabelle beziehen sich auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile.												
^b Der Anteil an Silicastaub ist auf 6-10 M.-% begrenzt.												
^c Der Anteil an Kalkstein (Summe von L, LL) ist auf 6-20 M.-% begrenzt.												
^d Die Hauptbestandteile außer Klinker müssen durch die Bezeichnung des Zements angegeben werden												

In zwei Forschungsvorhaben der VDZ Technology gGmbH werden Maßnahmen zur Steuerung der Dauerhaftigkeit von Betonen mit klinkereffizienten CEM II/C-M- und CEM VI-Zementen untersucht. Die Ergebnisse werden dazu beitragen, weitere Anwendungsregeln für neue, klinkereffiziente Zemente vorzuschlagen und damit die CO₂-Bilanz von Beton weiter zu verbessern. Die Basis des Arbeitsprogramms bilden Dauerhaftigkeitsuntersuchungen an Betonen mit klinkereffizienten Zementen im Labor. Der Fokus liegt hierbei auf Untersuchungen zur Karbonatisierung und zum Chlorideindringen. In Ergänzung hierzu sollen Versuche zum Frostwiderstand durchgeführt werden.

Sowohl in Forschungsprojekten [Mül19] als auch bei Untersuchungen für allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen hat sich gezeigt, dass an Betonen mit CEM II/C-M, CEM VI oder ähnlichen Zementen zum Teil die einschlägigen Nachweise zum Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand nicht in jedem Fall sicher gelingen. Um eine breite Anwendung der Zemente zu ermöglichen, soll untersucht werden, inwiefern die betontechnologischen Parameter (insbesondere der Wasserzementwert) angepasst werden können und müssen, damit die geforderte Dauerhaftigkeit bei den heute z. B. in Zulassungsverfahren verwendeten Prüfverfahren und Bewertungskriterien auch von Betonen mit neuen, klinkereffizienten Zementen erreicht wird. Benötigt wird eine umfangreiche Datenbasis zum Verhalten der Betone in Frostprüfungen, wobei als Variationsparameter der Wasserzementwert untersucht wird.

Derzeit sehen die Prüfpläne für Zulassungsprüfungen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) folgende Prüfungen für die Prüfung des Frostwiderstandes ohne Taumittel vor:

- XF1: Würfelprüfverfahren mit 100 Frost-Tau-Wechseln (FTW) an Beton mit $z = 300 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,55$
- XF1 bis XF3: Würfelprüfverfahren mit 100 Frost-Tau-Wechseln (FTW) an Beton mit $z = 300 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,60$

Darüber hinaus gibt es auch Prüfverfahren für die Anwendung von Zementen mit von DIN 1045-2 abweichenden Regeln (Nachweis mit leicht abgesenktem Wasserzementwert):

- XF1: Würfelprüfverfahren mit 100 Frost-Tau-Wechseln (FTW) an Beton mit $z = 350 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,45$
- XF1 bis XF3: CIF-Verfahren mit 28 Frost-Tau-Wechseln (FTW) an Beton mit $z = 350 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,45$

Das in der DIN CEN/TS 12390-9 [N02] bzw. im BAW-Merkblatt MFB [N03] geregelte Würfelprüfverfahren zum Frostwiderstand sieht eine Vorlagerung von 28 d sowie eine Prüfdauer von 100 d mit je einem Frost-Tau-Wechsel pro Tag vor. Eine verkürzte Prüfdauer von 50 d mit je zwei Frost-Tau-Wechseln pro Tag, wie sie beispielsweise im CF/CDF-Verfahren in der gleichen Norm definiert ist, würde einen flexibleren und effizienteren Einsatz des Prüfverfahrens ermöglichen und die Zulassungsprüfverfahren deutlich beschleunigen. Neben der oben genannten Datensammlung soll diese Variante im Forschungsvorhaben untersucht werden.

2 Ziel und Umfang der Arbeiten

Erstes Ziel des Forschungsvorhabens ist die Erweiterung der Datenbasis zur Anwendung neuer, klinkereffizienter Zemente. Es soll untersucht werden, ob ausgewählte CEM II/C-M- und CEM VI-Zemente unter bestehenden bzw. ggf. unter angepassten betontechnologischen Randbedingungen für die Expositionsklassen XF1 bzw. XF3 zugelassen werden können. In diesem Forschungsvorhaben wird zunächst ausschließlich das Würfelfrostverfahren betrachtet.

An ausgewählten Zementen wird zusätzlich eine beschleunigte Frostprüfung mit zwei Frost-Tau-Wechseln pro Tag durchgeführt (Prüfdauer 50 d). Anhand eines Vergleichs mit der üblichen Prüfdauer von 100 d (1 FTW pro Tag) kann festgestellt werden, inwiefern eine beschleunigte Frostprüfung in Zulassungsverfahren Anwendung finden könnte.

Folgende Versuche wurden in diesem Forschungsvorhaben durchgeführt:

- Auswahl von 8 klinkereffizienten Zementen aus dem bereits laufenden Forschungsvorhaben "Dauerhaftigkeit von Betonen mit klinkereffizienten CEM II/C-M- und CEM VI-Zementen" (Fokus auf Karbonatisierung und Chlorideindringen, Förderkennzeichen 22204 N)
- Durchführung von Frostprüfungen im Würfelverfahren (DIN CEN/TS 12390-9) mit einer Prüfdauer von 100 d (1 FTW pro Tag) bzw. 50 d (2 FTW pro Tag) in Anlehnung an Prüfpläne des DIBt
 - XF1, 3: mit $z = 300 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,60$
 - XF1: mit $z = 300 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,55$
 - XF1: mit $z = 350 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,45$ für die Anwendung mit abgesenktem w/z -Wert

3 Angaben zu den verwendeten Zementen

Zur Untersuchung von klinkereffizienten CEM II/C-M und CEM VI wurden verschiedene Ausgangsstoffe beschafft. Die Ausgangsstoffe sind in **Tabelle 2** aufgeführt.

Tabelle 2 Ausgangsstoffe

Bezeichnung		Beschreibung 1	Beschreibung 2
K	CEM I 52,5 R	Klinkerkomponente	-
S1	HSM	Hüttensandmehl (Mischsand)	-
S2	HSM	Hüttensandmehl	-
LL1	KST	Kalksteinmehl	ca. $3000 \text{ cm}^2/\text{g}$
LL2	KST	Kalksteinmehl aus LL1	ca. $6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ (Gemahlen im VDZ)
Q1	Ton	Calcinierter Ton	Brenntemperatur 700°C , Feinheit ca. $20 \mu\text{m}$
Q2	Ton	Calcinierter Ton	Brenntemperatur 700°C , Feinheit ca. $20 \mu\text{m}$
Q3	FK	Calcinierter Ton (Filterkuchen)	Brenntemperatur 700°C , Feinheit ca. $20 \mu\text{m}$
AN	-	Anhydritmehl	Zur Sulfatisierung hüttensandhaltiger Zemente

Geprüft wurden zwei Zemente CEM II/C-M (S-LL), zwei Zemente CEM II/C-M (Q-LL), zwei Zemente CEM VI (S-LL) und zwei Zemente CEM VI (S-Q). Die sulfatträgerhaltigen Zementzusammensetzungen sind in **Tabelle 3** angegeben.

Tabelle 3 Zementarten und Zusammensetzung (Sulfatträgerhaltig)

Nr.	Zement		Hauptbestandteil in M.-%				Anhydritmehl in M.-%
			K	S	Q	LL	
E05	Portlandkompositzement	CEM II/C-M (S1-LL1)	49,0	29,4	-	19,6	2,0
E11		CEM II/C-M (S2-LL2)	49,0	29,4	-	19,6	2,0
E23		CEM II/C-M (Q1-LL2)	49,1	-	29,5	19,6	1,8
E27		CEM II/C-M (Q3-LL2)	49,0	-	29,4	19,6	2,1
E29	Kompositzement	CEM VI (S1-LL1)	34,0	43,7	-	19,4	2,9
E35		CEM VI (S2-LL2)	34,0	43,7	-	19,4	3,0
E41		CEM VI (S1-Q2)	34,0	43,7	19,4	-	3,0
E45		CEM VI (S1-Q3)	34,0	43,7	19,4	-	3,0

Die sulfatträgerfreien Zementzusammensetzungen sind in **Tabelle 4** angegeben.

Tabelle 4 Zementarten und Zusammensetzung (Sulfatträgerfrei)

Nr.	Zement		Hauptbestandteil in M.-%			
			K	S	Q	LL
E05	Portlandkompositzement	CEM II/C-M (S1-LL1)	50	30	-	20
E11		CEM II/C-M (S2-LL2)	50	30	-	20
E23		CEM II/C-M (Q1-LL2)	50	-	30	20
E27		CEM II/C-M (Q3-LL2)	50	-	30	20
E29	Kompositzement	CEM VI (S1-LL1)	35	45	-	20
E35		CEM VI (S2-LL2)	35	45	-	20
E41		CEM VI (S1-Q2)	35	45	20	-
E45		CEM VI (S1-Q3)	35	45	20	-

Die Bezeichnung der Zemente bzw. Betone (siehe erste Spalten in **Tabelle 3** und **Tabelle 4**) ist aus dem bereits laufenden Forschungsvorhaben "Dauerhaftigkeit von Betonen mit klinkereffizienten CEM II/C- und CEM VI-Zementen" entnommen. Damit ist eine eindeutige Zuordnung zwischen den beiden Forschungsvorhaben sichergestellt.

3.1 Prüfungen an den Ausgangsstoffen und an den Zementen

3.1.1 Physikalische Prüfungen

Die spezifische Oberfläche und die Reindichte der Ausgangsstoffe wurden gemäß DIN EN 196-6 bestimmt (**Tabelle 5**).

Tabelle 5 Physikalische Kenngrößen

Zement		Spezifische Oberfläche in cm ² /g	Reindichte in g/cm ³
K2	CEM I 52,5 R	5587	3,115
S1	HSM	5240	2,861
S2	HSM	6038	2,900
LL1	KST	3153	2,705
LL2	KST	6010	n. b.
AN	-	5492	2,923

n. b. – nicht bestimmt

3.1.2 Chemische Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung aller in **Tabelle 2** enthaltenen Ausgangsstoffe wurde mit der Röntgenfluoreszenzanalyse, einem Alternativverfahren nach DIN EN 196-2, ermittelt. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 6** und **Tabelle 7** zusammengestellt.

Tabelle 6 Chemische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe

Messwerte	Einheit	CEM I 52,5 R (K)	HSM (S1)	HSM (S2)	KST (LL1)	KST (LL2)
Kohlendioxid	M.-% ^{1) 2)}	0,88	0,88	0,88	0,88	siehe LL1
Wasser		0,66	0,66	0,66	0,66	
Glühverlust		1,54	1,54	1,54	1,54	
Silizium(IV)-oxid		20,70	20,70	20,70	20,70	
Aluminiumoxid		5,51	5,51	5,51	5,51	
Titandioxid		0,32	0,32	0,32	0,32	
Phosphor(V)-oxid		0,11	0,11	0,11	0,11	
Eisen(III)-oxid		2,38	2,38	2,38	2,38	
Mangan(III)-oxid		0,06	0,06	0,06	0,06	
Magnesiumoxid		1,62	1,62	1,62	1,62	
Calciumoxid		62,77	62,77	62,77	62,77	
Sulfat als SO ₃		3,67	3,67	3,67	3,67	
Kaliumoxid		0,77	0,77	0,77	0,77	
Natriumoxid		0,21	0,21	0,21	0,21	
Na ₂ O-Äquivalent	M.-% ¹⁾	0,72	0,72	0,72	0,72	

¹⁾ glühverlusthaltig (Glühverlust = Summe aus Kohlendioxid und Wasser)

²⁾ die Parameter der chemischen Zusammensetzung ergeben zusammen 100 %

Tabelle 7 Chemische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe

Messwerte	Einheit	Ton (Q1)	Ton (Q2)	Ton (FK) (Q3)	AN
Kohlendioxid	M.-% ^{1) 2)}	4,16	0,08	0,18	0,45
Wasser		5,48	5,93	4,07	0,59
Glühverlust		10,06	6,04	4,41	1,05
Silizium(IV)-oxid		64,52	70,02	66,17	0,21
Aluminiumoxid		10,06	17,00	15,21	0,18
Titandioxid		0,63	1,27	0,92	0,02
Phosphor(V)-oxid		0,04	0,04	0,11	0,01
Eisen(III)-oxid		4,52	2,82	8,42	0,20
Mangan(III)-oxid		0,02	0,01	0,09	<0,01
Magnesiumoxid		1,13	0,36	0,59	0,03
Calciumoxid		4,81	0,20	0,20	41,27
Sulfat als SO ₃		2,10	0,04	0,06	56,45
Kaliumoxid		2,05	1,82	3,92	0,03
Natriumoxid		0,18	0,09	0,10	0,05
Na ₂ O-Äquivalent	M.-% ¹⁾	1,53	1,29	2,68	0,07

¹⁾ glühverlusthaltig (Glühverlust = Summe aus Kohlendioxid und Wasser)

²⁾ die Parameter der chemischen Zusammensetzung ergeben zusammen 100 %

3.1.3 Mineralphasenbestand

Die Mineralphasengehalte aller in **Tabelle 2** enthaltenen Ausgangsstoffe sind in **Tabelle 8**, **Tabelle 9**, **Tabelle 10** dargestellt. Die Mineralphasen wurden mittels Rietveld-Auswertung semi-quantitativ bestimmt.

Tabelle 8 Mineralphasenbestand der Ausgangsstoffe

Messwerte	Einheit	CEM I 52,5 R (K)
Alit	%	55,6
Belit		19,3
C3A kub		8,7
C3A orth		2,3
C3A (kub+orth)		
C4AF		5,6
Freikalk		Spuren
Portlandit		< 0,5
Periklas		0,7
Quarz		0,5
Aphtitalit		0,5
Arkanit		1,1
Gips		0,7
Bassanit		2,2
Anhydrit		1,5
Calcit		1,0

Tabelle 9 Mineralphasenbestand der Ausgangsstoffe

Messwerte	Einheit	HSM (S1)	HSM (S2)	KST (LL1)	KST (LL2)	AN
Quarz	%	< 0,5	-	1	siehe LL1	< 0,5
Gips		-	-	-		< 0,5
Anhydrit		Spuren	< 0,5	-		98
Calcit		3	< 0,5	95		1
Dolomit		-	-	1		-
Plagioklase (Albit, Anorthit)		-	-	2		-
Illit, Muskowit		-	-	< 1		< 0,5
Magnesit		-	-	-		-
Alit		-	3	-		-
amorphe Bestandteile		96	ca. 96	-		-
Freikalk		-	-	-		-
Periklas		-	-	-		-
Mullit		-	-	-		-
Hämatit		-	-	-		-
Magnetit		-	-	-		-
Gehlenit/Akermanit		-	-	-		-

Tabelle 10 Mineralphasenbestand der Ausgangsstoffe

Messwerte	Einheit	Ton (Q1)	Ton (Q2)	Ton (FK) (Q3)
Quarz	%	ca. 45	45 – 50	45 – 50
Calcit		5 – 10	< 0,5	
Siderit			< 0,5	
Feldspat-Gruppe		< 2	< 2	
Chlorit-Gruppe				< 1
Dolomit		< 1	< 0,5	
Illit		35 – 40	25 – 30	40 – 45
Chlorit		< 1		
Kaolinit		10 – 15	15 – 20	ca. 5
K-Feldspat		2 – 5		2 – 5
Pyrit		< 2	< 0,5	
Goethit		< 2	< 2	
Bassanit		< 0,5		
Hämatit				ca. 5
Rutil			< 2	

3.1.4 Druckfestigkeiten

Die Biegezug- und Druckfestigkeit an Normmörtelprismen wurden gemäß DIN EN 196-1 im Alter von 2, 7, 28 und 90 Tagen bestimmt. Die Mittelwerte sind in **Tabelle 11** angegeben.

Tabelle 11 Biegezug- und Druckfestigkeit an Normmörtelprismen

Nr.	Zement	Biegezugfestigkeit in MPa Mittelwert aus 3 Prismen				Druckfestigkeit in MPa Mittelwert aus 6 Prismenhälften			
		2d	7d	28d	90d	2d	7d	28d	90d
M-E05	CEM II/C-M (S1-LL1)	4,7	7,5	9,9	9,4	22,2	35,2	46,1	63,1
M-E11	CEM II/C-M (S2-LL2)	4,6	8,0	10,3	10,2	19,2	37,8	54,5	68,8
M-E23	CEM II/C-M (Q1-LL2)	3,8	5,6	7,5	7,5	17,7	29,4	35,0	46,5
M-E27	CEM II/C-M (Q3-LL2)	3,3	4,7	6,2	6,7	14,2	20,5	27,9	36,3
M-E29	CEM VI (S1-LL1)	3,3	6,2	9,3	9,3	13,2	32,8	42,4	63,9
M-E35	CEM VI (S2-LL2)	3,0	7,0	9,5	10,6	12,8	30,5	48,0	63,6
M-E41	CEM VI (S1-Q2)	3,3	6,9	8,0	9,1	15,5	35,5	41,8	61,9
M-E45	CEM VI (S1-Q3)	3,6	6,5	8,5	9,3	15,2	34,8	53,8	63,4

4 Prüfverfahren sowie Darstellung der Ergebnisse

4.1 Allgemeines

Tabelle 12 gibt eine Übersicht der untersuchten Betone gemäß üblichen Prüfplänen des DIBt.

Tabelle 12 Zementgehalt, Wassorzementwert w/z, Luftgehalt und Sieblinie SL der Betonzusammensetzungen

Beton		Zement	Zementgehalt in kg/m³	w/z	Luftgehalt in vol.-%	SL	Prüfungen			
WF1	E05	CEM II/C-M (S1-LL1)	300	0,60	keine Vor- gabe	DIBt ²⁾	Druck- festigkeit, Würfelfrost			
	E11	CEM II/C-M (S2-LL2)								
	E23	CEM II/C-M (Q1-LL2)								
	E27	CEM II/C-M (Q3-LL2)								
	E29	CEM VI (S1-LL1)								
	E35	CEM VI (S2-LL2)								
	E41	CEM VI (S1-Q2)								
	E45	CEM VI (S1-Q3)								
WF2	E23	CEM II/C-M (Q1-LL2)	300	0,55	keine Vor- gabe	DIBt ²⁾	Druck- festigkeit, Würfelfrost			
	E29	CEM VI (S1-LL1)								
	E35	CEM VI (S2-LL2)								
WF3	E27	CEM II/C-M (Q3-LL2)	350	0,45				keine Vor- gabe	DIBt ²⁾	Druck- festigkeit, Würfelfrost
	E29	CEM VI (S1-LL1)								

²⁾ siehe **Tabelle 13**

4.2 Prüfungen zum Frostwiderstand

4.2.1 Betonzusammensetzung, Herstellung und Lagerung

Der Frostwiderstand wurde mit dem Würfelverfahren nach DIN CEN/TS 12390-9 an allen Betonen (siehe **Tabelle 12**) geprüft. Als Gesteinskörnung wurden Rheinsand und Rheinkies verwendet. Die im Prüfplan vorgegebene und die verwendete Sieblinie ist in **Tabelle 13** angegeben.

Tabelle 13 Kornzusammensetzung der Gesteinskörnung für Betone WF1 bis WF3 zur Prüfung des Frostwiderstands

Sieb in mm	Siebdurchgang in M.-%							
	0,125	0,25	1	2	4	8	16	32
Soll	1,5 *)	5,0	35,0	45,0	56,0	70,0	85,0	100,0
Ist	1,1	8,3	34,2	47,7	52,6	70,8	84,9	100,0

*) Richtwert

Für die Untersuchungen zum Frostwiderstand wurden folgende Probekörper hergestellt:

- drei Würfel mit der Kantenlänge 150 mm zur Bestimmung der Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen
- vier Würfel mit der Kantenlänge 100 mm für das Würfelfrostverfahren.

Die drei Würfel mit der Kantenlänge 150 mm wurden nach DIN EN 12390-2, nationaler Anhang gelagert.

Die vier Würfel mit der Kantenlänge 100 mm wurden nach DIN CEN/TS 12390-9 gelagert.

4.2.2 Frisch- und Festbetoneigenschaften

Zehn Minuten nach Wasserzugabe wurden für die untersuchten Betone die Frischbetontemperatur (T_f), die Frischbetonrohddichte (ρ_f) nach DIN EN 12350-6, der Luftgehalt (LP_{10}) nach DIN EN 12350-7 und das Ausbreitmaß (a_{10}) nach DIN EN 12350-5 ermittelt.

Die Frischbetoneigenschaften und die Druckfestigkeiten nach DIN EN 12350-3 sind in **Tabelle 14**, **Tabelle 15** und **Tabelle 16** zusammengestellt.

Tabelle 14 Dosierung des Fließmittelgehalts FM¹⁾, Frischbetonrohddichte ρ_f , Ausbreitmaß a_{10} , Luftgehalt LP₁₀, Frischbetontemperatur T_f und Betondruckfestigkeit der Betone WF1

Beton	FM ¹⁾	ρ_f	a_{10}	LP ₁₀	T _f	Betondruckfestigkeit in MPa	
	M.-% ²⁾	kg/m ³	mm	Vol.-%	°C	Einzel- werte	Mittelwert
WF1-E05 CEM II/C-M (S1-LL1)	-	2,32	350	2,4	23,0	45,2	44,1
						40,1	
						46,9	
WF1-E11 CEM II/C-M (S2-LL2)	-	2,32	365	2,5	22,2	46,8	47,1
						46,4	
						48,0	
WF1-E23 CEM II/C-M (Q1-LL2)	-	2,34	390	2,3	22,9	37,0	36,9
						36,4	
						37,2	
WF1-E27 CEM II/C-M (Q3-LL2)	0,50	2,33	415	2,2	22,6	25,7	25,4
						25,6	
						25,0	
WF1-E29 CEM VI (S1-LL1)	-	2,33	395	2,0	20,2	40,7	40,7
						41,0	
						40,2	
WF1-E35 CEM VI (S2-LL2)	-	2,32	390	2,1	20,4	39,4	39,7
						40,6	
						39,3	
WF1-E41 CEM VI (S1-Q2)	0,50	2,33	415	2,0	22,1	45,7	45,0
						45,0	
						44,2	
WF1-E45 CEM VI (S1-Q3)	0,50	2,34	435	1,9	21,0	42,4	42,4
						41,7	
						43,0	

¹⁾ MasterGlenium ACE 460 und Mastersuna SBS 6080, 1:1 gemischt²⁾ bezogen auf den Zementgehalt

Tabelle 15 Dosierung des Fließmittelgehalts FM¹⁾, Frischbetonrohddichte ρ_f , Ausbreitmaß a_{10} , Luftgehalt LP₁₀, Frischbetontemperatur T_f und Betondruckfestigkeit der Betone WF2

Beton	FM ¹⁾	ρ_f	a_{10}	LP ₁₀	T_f	Betondruckfestigkeit in MPa	
	M.-% ²⁾	kg/m ³	mm	Vol.-%	°C	Einzel- werte	Mittelwert
WF2-E23 CEM II/C-M (Q1-LL2)	0,25	2,34	395	2,5	20,5	39,5	39,6
						39,8	
						39,4	
WF2-E29 CEM VI (S1-LL1)	-	2,34	385	2,7	19,4	46,4	46,8
						45,4	
						48,4	
WF2-E35 CEM VI (S2-LL2)	-	2,34	390	2,8	19,1	45,3	46,1
						46,1	
						47,1	

¹⁾ MasterGlenium ACE 460 und Mastersuna SBS 6080, 1:1 gemischt²⁾ bezogen auf den Zementgehalt**Tabelle 16** Dosierung des Fließmittelgehalts FM¹⁾, Frischbetonrohddichte ρ_f , Ausbreitmaß a_{10} , Luftgehalt LP₁₀, Frischbetontemperatur T_f und Betondruckfestigkeit der Betone WF3

Beton	FM ¹⁾	ρ_f	a_{10}	LP ₁₀	T_f	Betondruckfestigkeit in MPa	
	M.-% ²⁾	kg/m ³	mm	Vol.-%	°C	Einzel- werte	Mittelwert
WF3-E27 CEM II/C-M (Q3-LL2)	0,45	2,35	390	2,9	20,7	44,6	44,6
						44,5	
						44,7	
WF3-E29 CEM VI (S1-LL1)	0,45	2,34	410	3,2	19,0	58,2	56,7
						54,4	
						57,4	

¹⁾ MasterGlenium ACE 460 und Mastersuna SBS 6080, 1:1 gemischt²⁾ bezogen auf den Zementgehalt

4.2.3 Frostwiderstand

Die Abwitterungen aller Betone in der Prüfung des Frostwiderstands mit dem Würfelverfahren sind in **Tabelle 17** bis **Tabelle 26** angegeben. Der Verlauf der Abwitterung geht aus **Bild 4-1** bis **Bild 4-10** hervor. **Bild 7-1** bis **Bild 7-42** im Anhang enthalten Fotos der Würfel nach 100 Frost-Tau-Wechseln (FTW) im Würfelverfahren.

Tabelle 17 Abwitterungen im Würfelverfahren - WF1-E05

Beton	Frost-Tau-Wechsel	Abwitterung in M.-%		
		Würfel 1 + 2	Würfel 3 + 4	Mittelwert
WF1-E05 CEM II/C-M (S1-LL1) 1 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	7	0,30	0,20	0,25
	14	0,60	0,40	0,50
	28	1,70	0,90	1,30
	42	2,10	1,30	1,70
	56	2,40	1,70	2,05
	70	3,00	2,10	2,55
	99	5,20	3,20	4,20
WF1-E05 CEM II/C-M (S1-LL1) 2 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	8	0,20	0,20	0,20
	14	0,30	0,40	0,35
	28	0,90	1,00	0,95
	42	1,60	1,90	1,75
	56	2,50	2,70	2,60
	70	3,20	3,10	3,15
	100	4,40	4,20	4,30

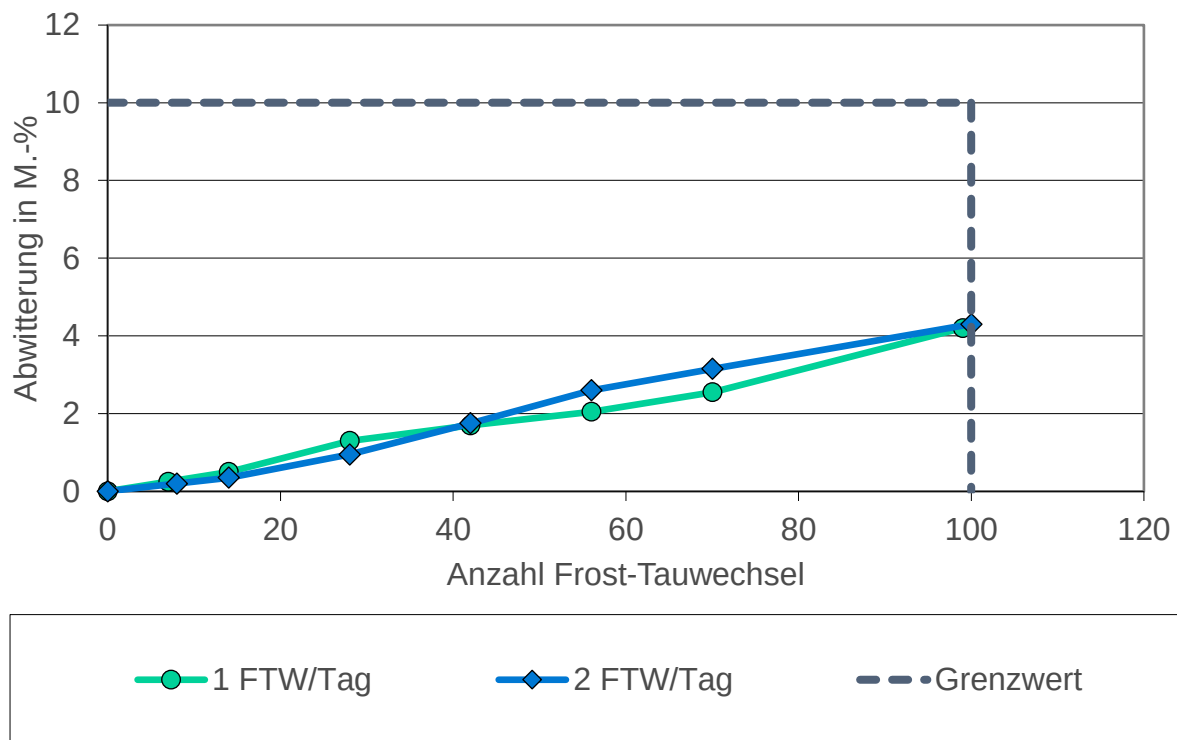
**Bild 4-1** Abwitterung im Würfelverfahren - WF1-E05

Tabelle 18 Abwitterungen im Würfelverfahren - WF1-E11

Beton	Frost-Tau-Wechsel	Abwitterung in M.-%		
		Würfel 1 + 2	Würfel 3 + 4	Mittelwert
WF1-E11 CEM II/C-M (S2-LL2) 1 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	7	0,20	0,10	0,15
	14	0,40	0,30	0,35
	28	0,90	0,90	0,90
	42	1,30	1,30	1,30
	56	1,90	1,80	1,85
	71	2,60	2,30	2,45
	99	4,50	3,70	4,10
WF1-E11 CEM II/C-M (S2-LL2) 2 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,00
	14	0,20	0,20	0,20
	28	0,70	0,60	0,65
	42	1,20	1,40	1,30
	56	2,00	2,20	2,10
	70	2,90	2,90	2,90
	100	5,10	4,30	4,70

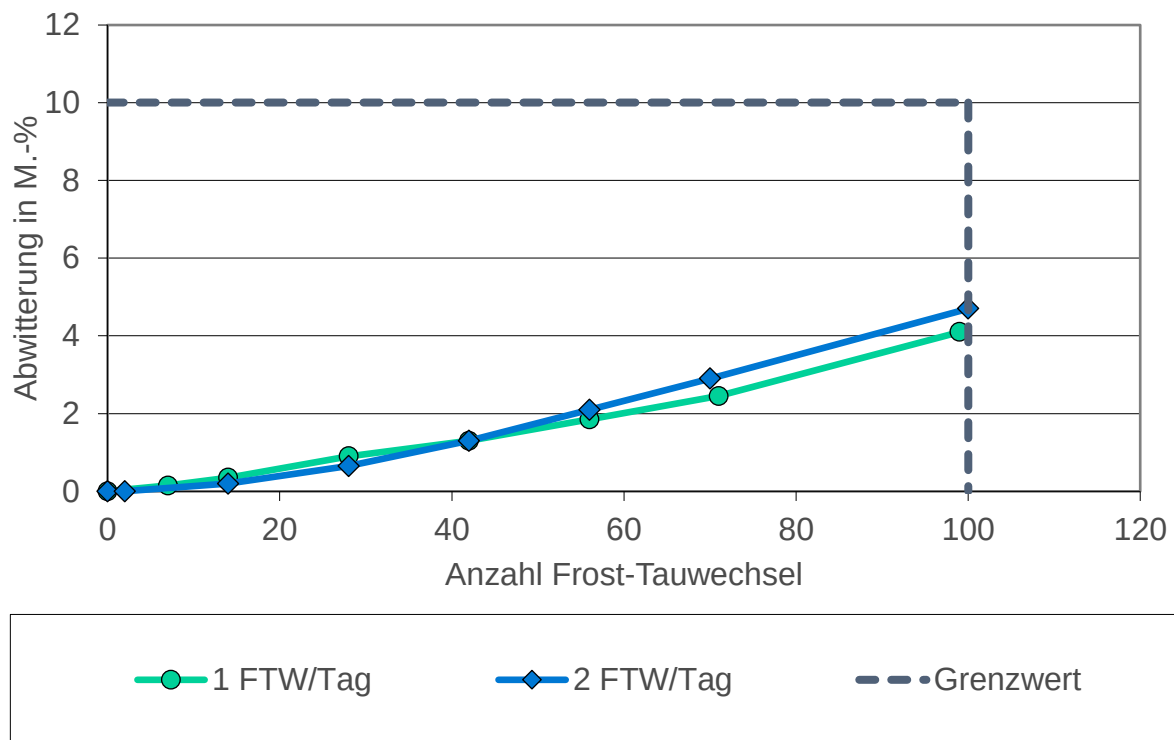
**Bild 4-2** Abwitterung im Würfelverfahren - WF1-E11

Tabelle 19 Abwitterungen im Würfelverfahren - WF1-E23

Beton	Frost-Tau-Wechsel	Abwitterung in M.-%		
		Würfel 1 + 2	Würfel 3 + 4	Mittelwert
WF1-E23 CEM II/C-M (Q1-LL1) 1 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	7	0,60	0,40	0,50
	14	2,30	1,60	1,95
	29	4,60	5,50	5,05
	42	8,00	6,80	7,40
	56	10,10	8,00	9,05
	70	13,80	9,30	11,55
	99	26,80	14,40	20,60
WF1-E23 CEM II/C-M (Q1-LL1) 2 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	2	0,00	0,00	0,00
	14	1,10	1,50	1,30
	28	3,50	3,70	3,60
	42	5,40	5,20	5,30
	58	7,80	7,30	7,55
	70	10,00	8,80	9,40
	100	20,10	18,40	19,25

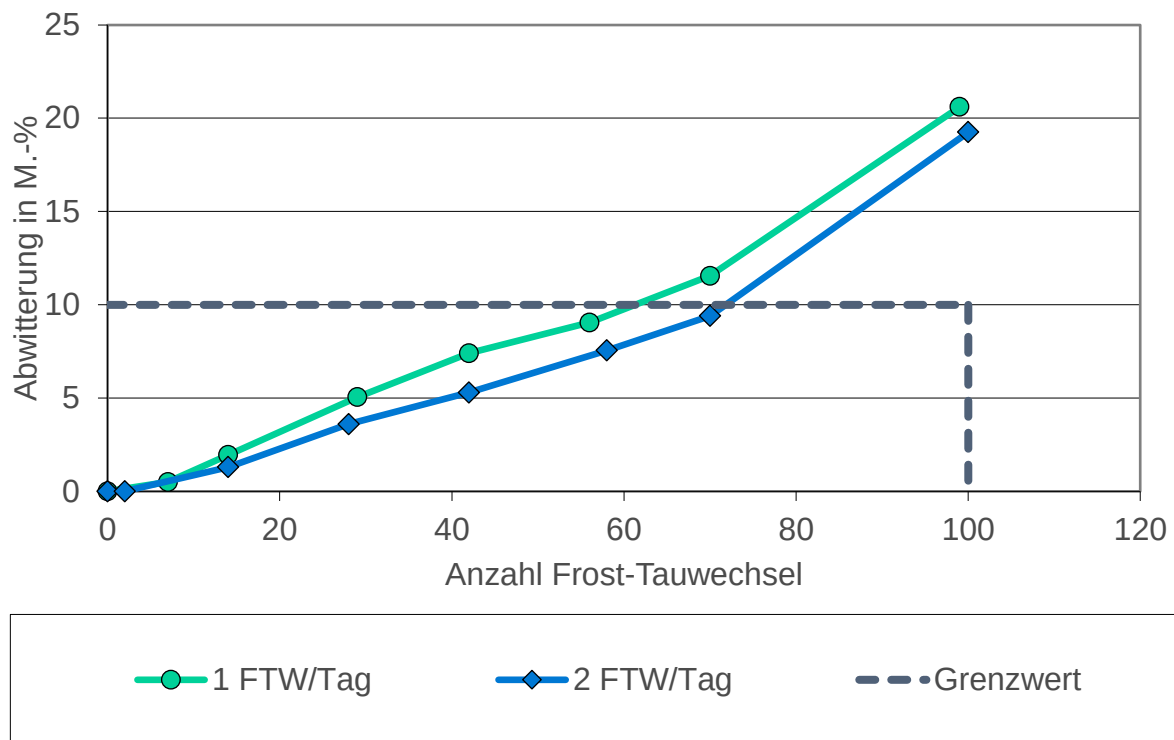
**Bild 4-3** Abwitterung im Würfelverfahren - WF1-E23

Tabelle 20 Abwitterungen im Würfelverfahren - WF1-E27

Beton	Frost-Tau-Wechsel	Abwitterung in M.-%		
		Würfel 1 + 2	Würfel 3 + 4	Mittelwert
WF1-E27 CEM II/C-M (Q3-LL2) 1 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	8	0,30	0,40	0,35
	14	0,80	1,00	0,90
	28	2,60	3,20	2,90
	42	4,90	6,40	5,65
	56	8,40	11,20	9,80
	70	14,20	18,40	16,30
	98	33,90	30,10	32,00
WF1-E27 CEM II/C-M (Q3-LL2) 2 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	16	1,20	0,70	0,95
	28	3,10	2,40	2,75
	42	5,70	5,00	5,35
	58	8,20	7,30	7,75
	70	11,90	11,10	11,50
	100	22,40	20,90	21,65

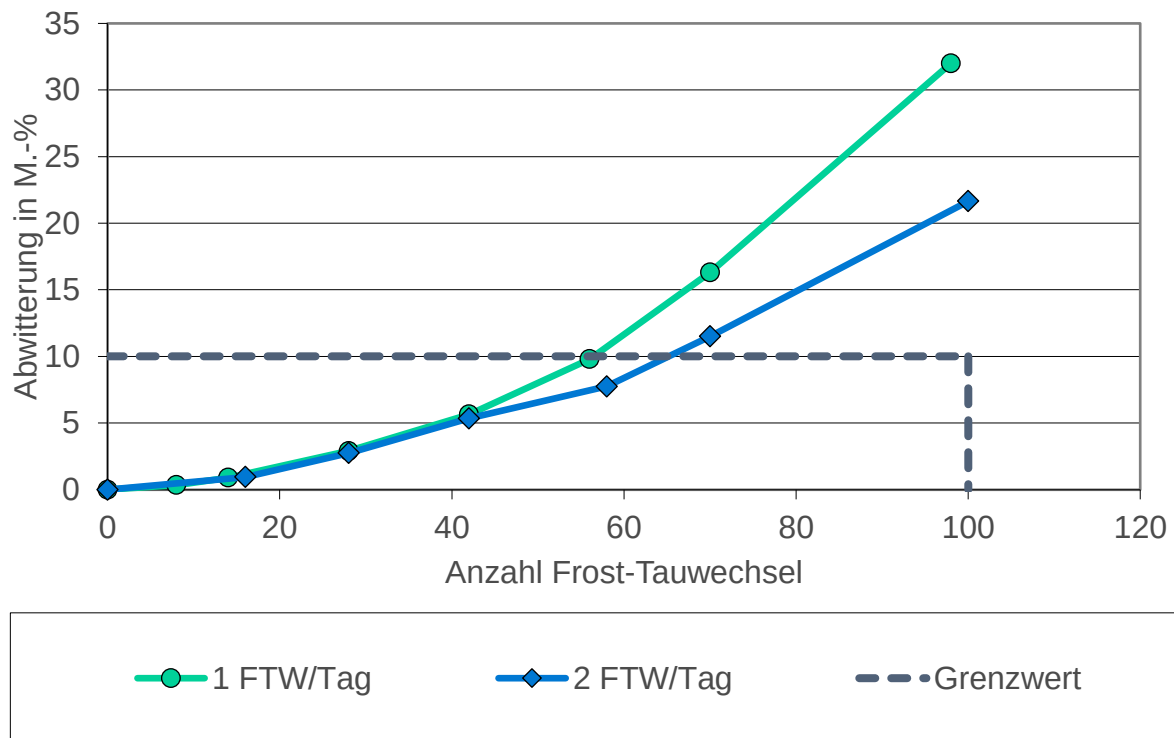
**Bild 4-4** Abwitterung im Würfelverfahren - WF1-E27

Tabelle 21 Abwitterungen im Würfelverfahren - WF1-E29

Beton	Frost-Tau-Wechsel	Abwitterung in M.-%		
		Würfel 1 + 2	Würfel 3 + 4	Mittelwert
WF1-E29 CEM VI (S1-LL1) 1 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	7	0,10	0,20	0,15
	14	3,60	0,90	2,25
	28	4,60	1,60	3,10
	42	4,80	2,20	3,50
	56	5,00	3,00	4,00
	70	5,30	3,70	4,50
	100	5,90	4,80	5,35
WF1-E29 CEM VI (S1-LL1) 2 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	8	0,10	0,10	0,10
	14	1,10	0,60	0,85
	28	2,80	2,40	2,60
	42	4,20	3,80	4,00
	56	5,20	4,90	5,05
	70	5,70	5,70	5,70
	100	6,70	7,00	6,85

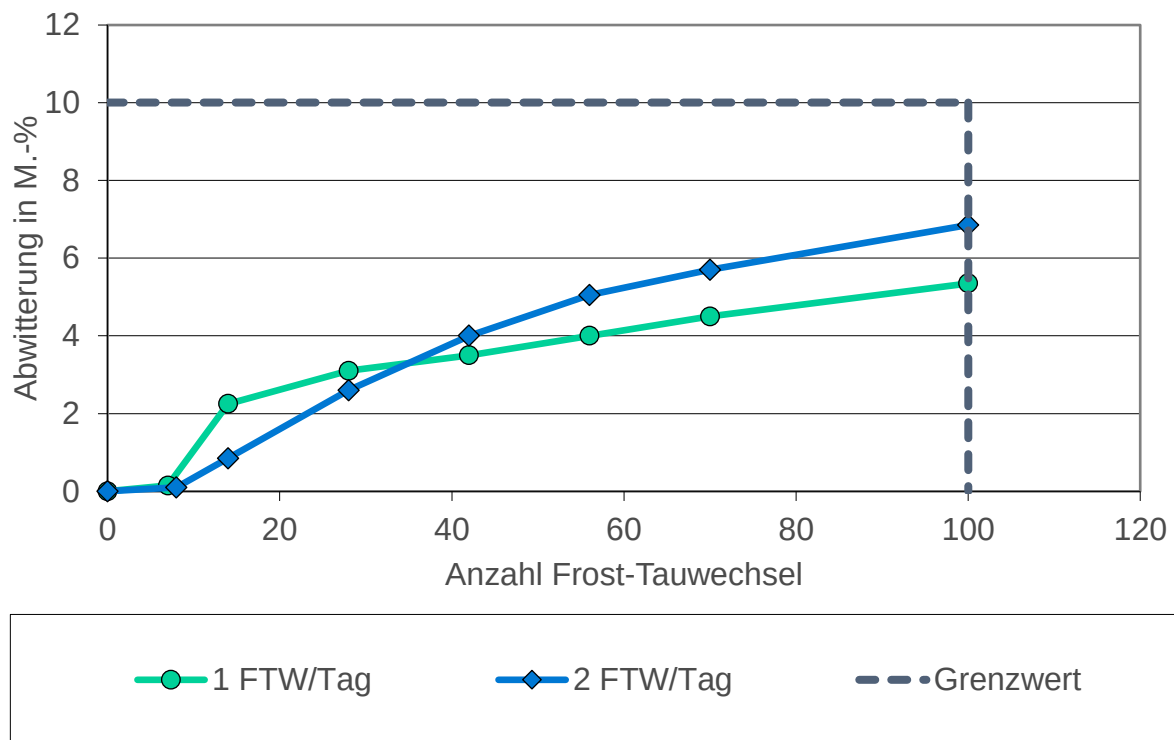
**Bild 4-5** Abwitterung im Würfelverfahren - WF1-E29

Tabelle 22 Abwitterungen im Würfelverfahren - WF1-E35

Beton	Frost-Tau-Wechsel	Abwitterung in M.-%		
		Würfel 1 + 2	Würfel 3 + 4	Mittelwert
WF1-E35 CEM VI (S2-LL2) 1 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	7	0,10	0,20	0,15
	14	0,60	1,10	0,85
	28	2,70	3,30	3,00
	42	4,00	4,70	4,35
	56	6,40	5,70	6,05
	70	7,20	6,30	6,75
	100	8,00	7,60	7,80
WF1-E35 CEM VI (S2-LL2) 2 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	8	0,10	0,00	0,05
	14	1,70	1,50	1,60
	28	4,10	4,10	4,10
	42	6,00	5,60	5,80
	56	7,10	6,90	7,00
	70	7,90	7,90	7,90
	100	10,40	9,40	9,90

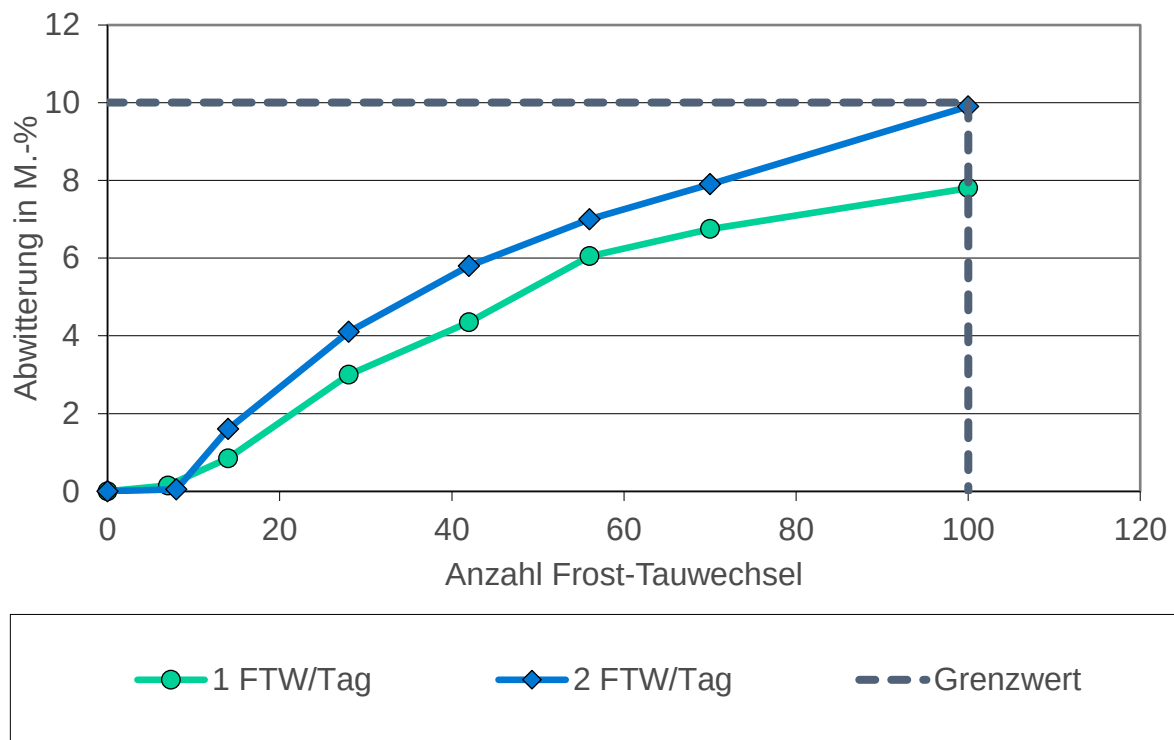
**Bild 4-6** Abwitterung im Würfelverfahren - WF1-E35

Tabelle 23 Abwitterungen im Würfelverfahren - WF1-E41

Beton	Frost-Tau-Wechsel	Abwitterung in M.-%		
		Würfel 1 + 2	Würfel 3 + 4	Mittelwert
WF1-E41 CEM VI (S1-Q2) 1 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	7	0,20	0,20	0,20
	14	0,40	0,30	0,35
	28	1,30	0,80	1,05
	42	1,70	1,30	1,50
	56	2,20	2,00	2,10
	70	2,60	2,80	2,70
	102	3,60	4,00	3,80
WF1-E41 CEM VI (S1-Q2) 2 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	8	0,20	0,10	0,15
	14	0,40	0,20	0,30
	28	1,10	1,00	1,05
	42	2,10	1,90	2,00
	56	2,80	2,80	2,80
	70	3,50	3,20	3,35
	100	4,30	3,90	4,10

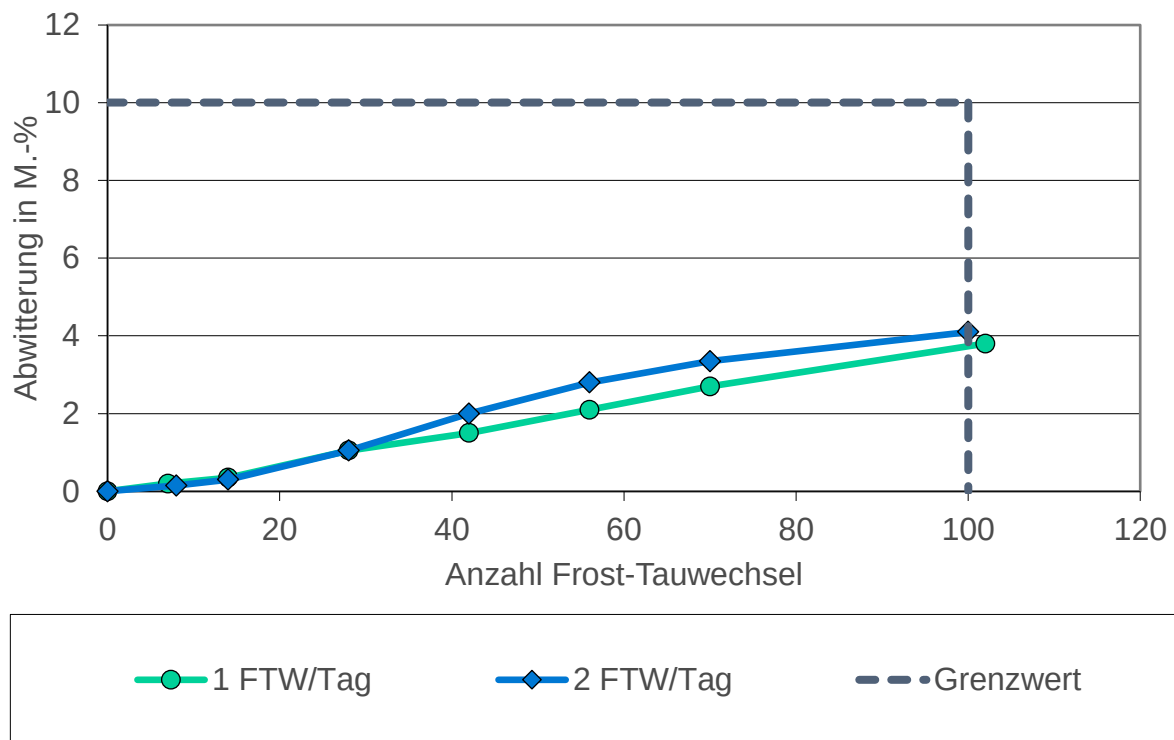
**Bild 4-7** Abwitterung im Würfelverfahren - WF1-E41

Tabelle 24 Abwitterungen im Würfelverfahren - WF1-E45

Beton	Frost-Tau-Wechsel	Abwitterung in M.-%		
		Würfel 1 + 2	Würfel 3 + 4	Mittelwert
WF1-E45 CEM VI (S1-Q3) 1 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	7	0,30	0,20	0,25
	14	0,40	0,30	0,35
	28	1,00	0,90	0,95
	42	1,80	1,50	1,65
	56	2,30	2,10	2,20
	70	2,70	2,40	2,55
	102	3,70	3,30	3,50
WF1-E45 CEM VI (S1-Q3) 2 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	8	0,20	0,20	0,20
	14	0,40	0,50	0,45
	28	1,30	1,30	1,30
	42	2,30	2,10	2,20
	56	3,20	2,80	3,00
	70	3,60	3,30	3,45
	100	4,20	3,90	4,05

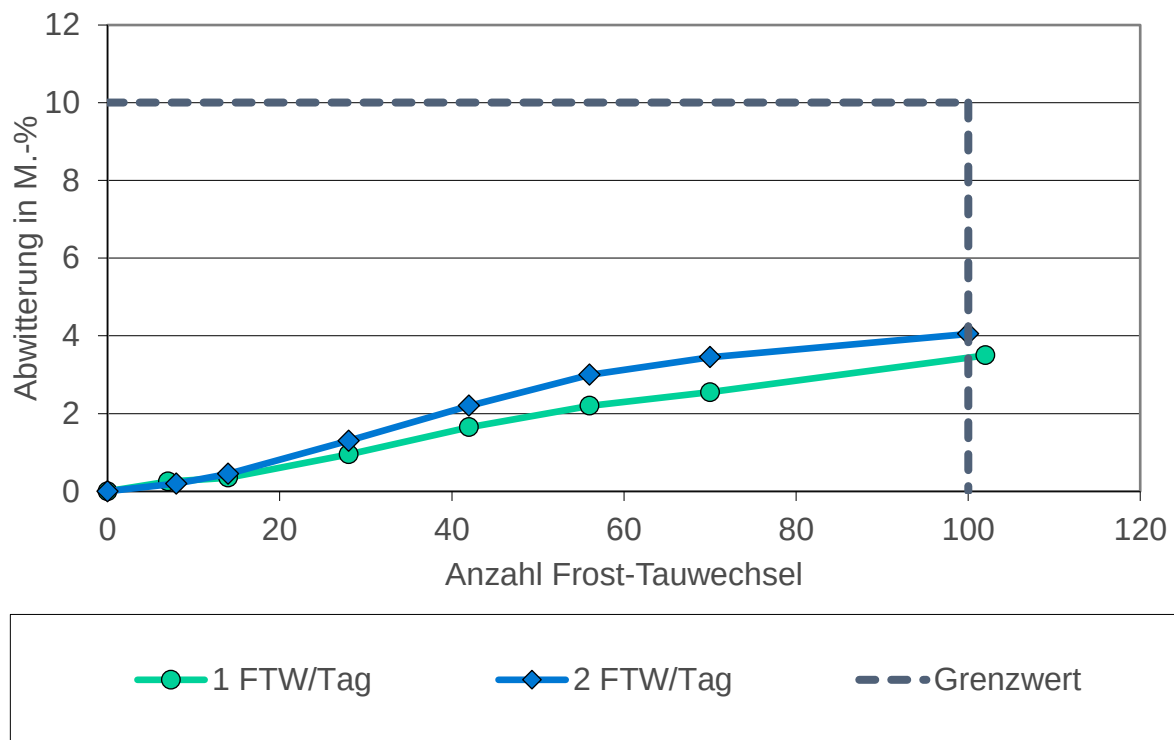
**Bild 4-8** Abwitterung im Würfelverfahren - WF1-E45

Tabelle 25 Abwitterungen im Würfelverfahren – Betone WF2-E23, WF2-E29 und WF2-E35

Beton	Frost-Tau-Wechsel	Abwitterung in M.-%		
		Würfel 1 + 2	Würfel 3 + 4	Mittelwert
WF2-E23 CEM II/C-M (Q1-LL2) 1 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	7	0,30	0,70	0,50
	14	0,70	1,30	1,00
	28	1,60	2,20	1,90
	42	2,70	3,20	2,95
	56	3,70	3,80	3,75
	70	4,30	4,50	4,40
	99	5,40	5,90	5,65
WF2-E29 CEM VI (S1-LL1) 1 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	7	0,10	0,10	0,10
	14	0,20	0,20	0,20
	28	0,40	0,50	0,45
	42	0,70	0,90	0,80
	56	0,70	0,90	0,80
	70	1,30	1,10	1,20
	100	1,90	1,80	1,85
WF2-E35 CEM VI (S2-LL2) 1 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	7	0,40	0,50	0,45
	14	0,90	1,00	0,95
	28	1,40	1,70	1,55
	42	2,00	2,20	2,10
	56	2,40	2,60	2,50
	70	2,80	2,90	2,85
	100	3,80	3,60	3,70

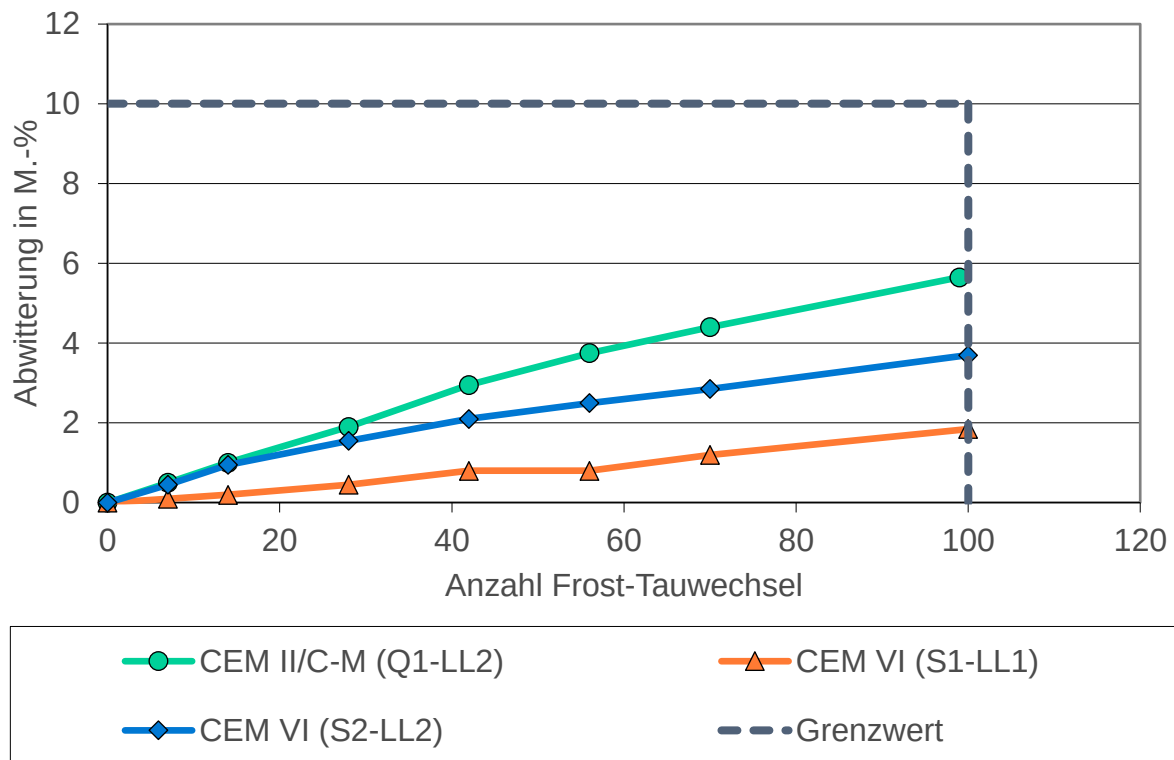
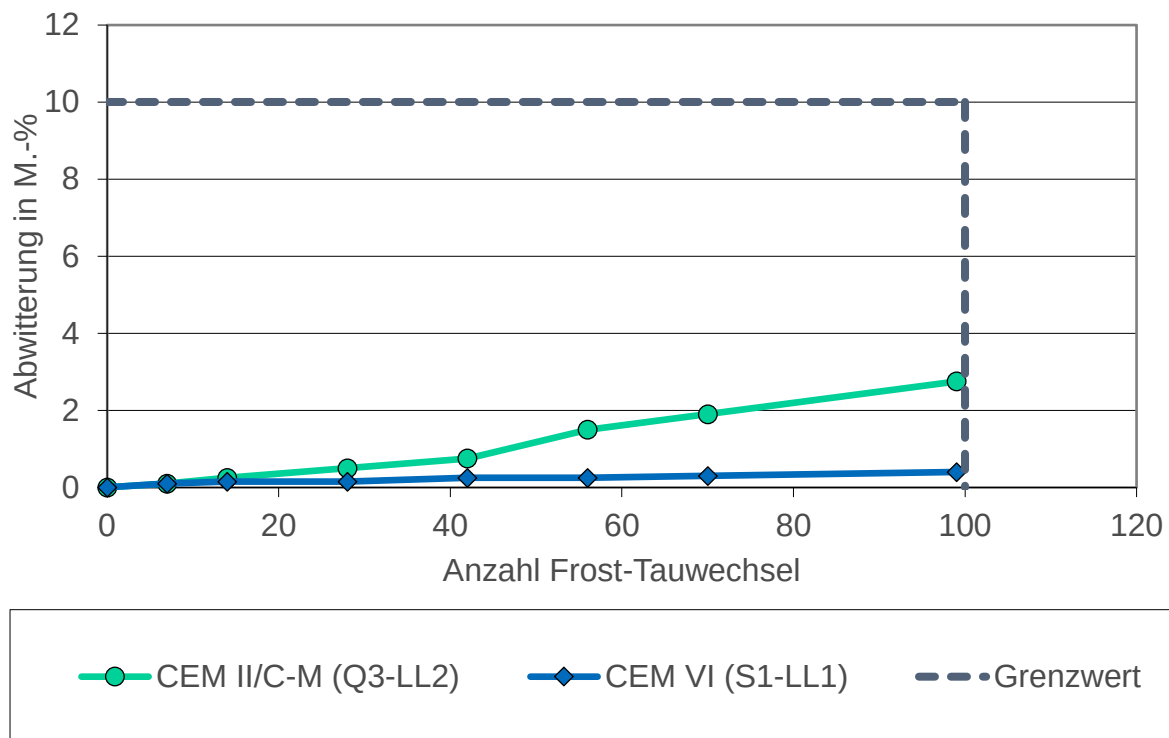


Bild 4-9 Abwitterung im Würfelverfahren – Betone WF2-E23, WF2-E29 und WF2-E35

Tabelle 26 Abwitterungen im Würfelverfahren – Betone WF3-E27 und WF3-E29

Beton	Frost-Tau-Wechsel	Abwitterung in M.-%		
		Würfel 1 + 2	Würfel 3 + 4	Mittelwert
WF3-E27 CEM II/C-M (Q3-LL2) 1 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	7	0,10	0,10	0,10
	14	0,30	0,20	0,25
	28	0,60	0,40	0,50
	42	0,80	0,70	0,75
	56	1,20	1,80	1,50
	70	1,60	2,20	1,90
	99	2,70	2,80	2,75
WF3-E29 CEM VI (S1-LL1) 1 FTW/Tag	0	0,00	0,00	0,00
	7	0,10	0,10	0,10
	14	0,20	0,10	0,15
	28	0,20	0,10	0,15
	42	0,30	0,20	0,25
	56	0,30	0,20	0,25
	70	0,40	0,20	0,30
	99	0,50	0,30	0,40

**Bild 4-10** Abwitterung im Würfelverfahren – Betone WF3-E27 und WF3-E29

5 Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse und Ausblick

5.1 Erweiterung der Datenbasis zur Anwendung neuer, klinkereffizienter Zemente

Bild 5-1 zeigt die Verläufe der Abwitterung für die Betone WF1-E23 und WF2-E23 mit einem CEM II/C-M (Q1-LL2). Der Beton WF1-E23 mit $w/z = 0,60$ wies wegen des höheren w/z -Wertes auch deutliche höhere Abwitterungen als der Beton WF2-E23 mit $w/z = 0,55$ auf.

Bild 5-2 zeigt die Verläufe der Abwitterung für die Betone WF1-E27 und WF3-E27 mit einem CEM II/C-M (Q3-LL2). Der Beton WF1-E27 mit $w/z = 0,60$ wies wegen des viel höheren w/z -Wertes auch deutliche höhere Abwitterungen als der Beton WF3-E27 mit $w/z = 0,45$ auf.

Das Kriterium des DIBt konnte von den Betonen mit $w/z = 0,60$ nicht eingehalten werden. Mit abgesenkten Wasserzementwerten wären die Prüfungen bestanden.

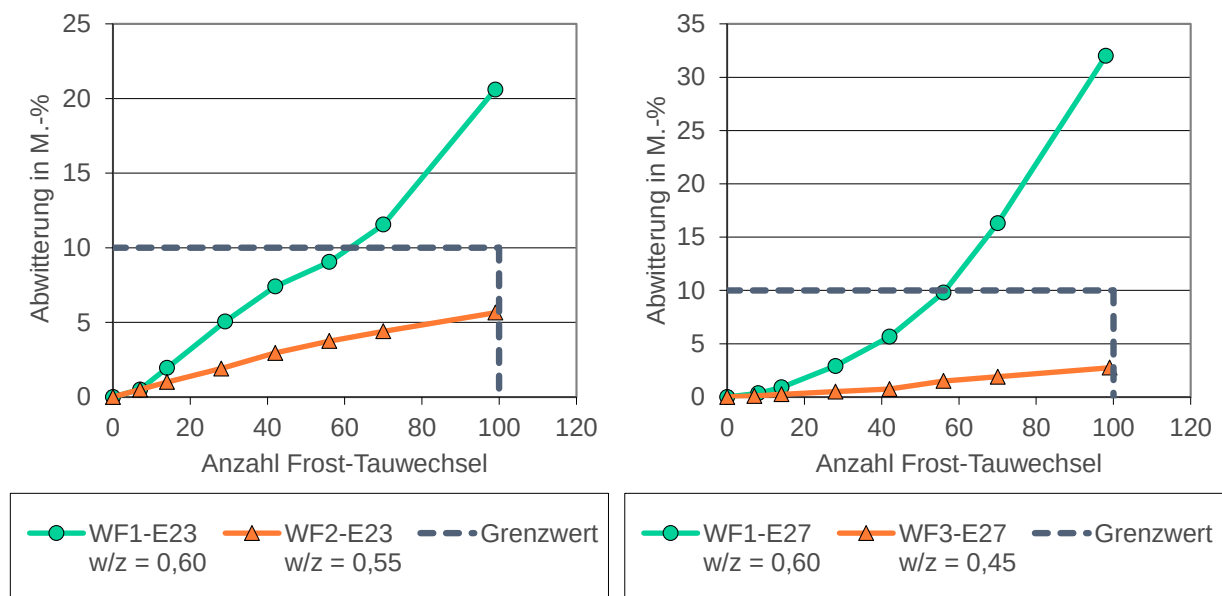


Bild 5-1 Abwitterung im Würfelverfahren – Betone WF1-E23 und WF2-E23 mit einem CEM II/C-M (Q1-LL2)

Bild 5-2 Abwitterung im Würfelverfahren – Betone WF1-E27 und WF3-E27 mit einem CEM II/C-M (Q3-LL2)

Bild 5-3 zeigt die Verläufe der Abwitterung für die Betone WF1-E29, WF2-E29 und WF3-E29 mit einem CEM VI (S1-LL1). **Bild 5-4** zeigt die Verläufe der Abwitterung für die Betone WF1-E35 und WF2-E35 mit einem CEM VI (S2-LL2). Anhand von Bild **Bild 5-3** und **Bild 5-4** erkennt man, dass mit abnehmendem w/z -Wert die Abwitterung gesenkt werden kann.

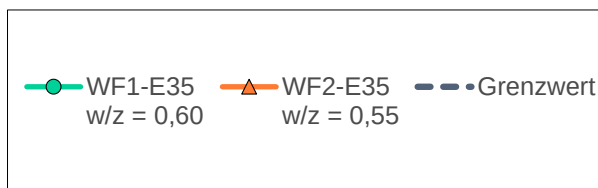
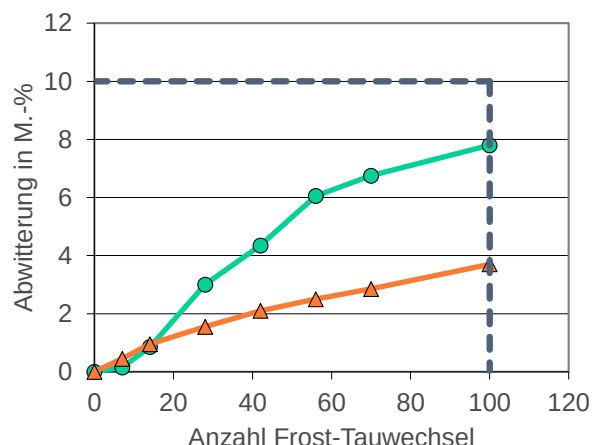
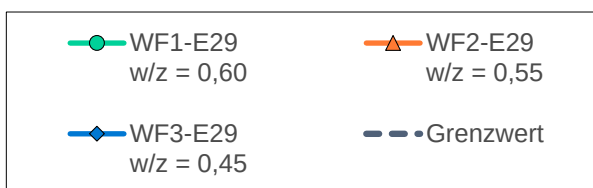
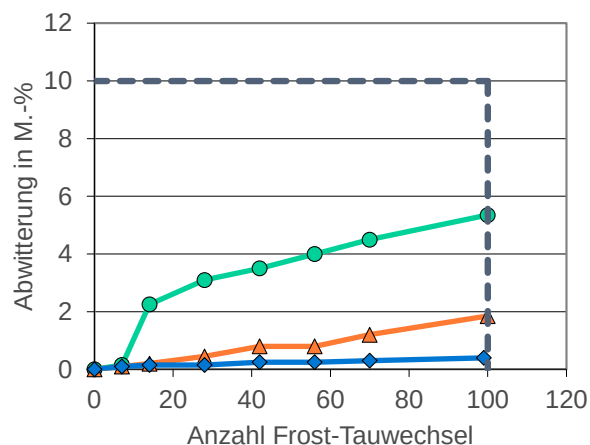


Bild 5-3 Abwitterung im Würfelverfahren – Betone WF1-E29, WF2-E29 und WF3-E29 mit einem CEM VI (S1-LL1)

Bild 5-4 Abwitterung im Würfelverfahren – Betone WF1-E35 und WF2-E35 mit einem CEM VI (S2-LL2)

5.2 Vergleich der üblichen mit der beschleunigten Prüfung des Frostwiderstands mit dem Würfelverfahren

Der Vergleich einer üblichen Frostprüfung mit einem Frost-Tau-Wechsel pro Tag (Prüfdauer von 100 d) und der beschleunigten Frostprüfung mit zwei Frost-Tau-Wechseln pro Tag (Prüfdauer von 50 d) an den 8 ausgewählten Zementen bzw. Betonen zeigte Folgendes:

Die Betone WF1-E05 und WF1-E11 haben bei der Frostprüfung sowohl mit einem als auch mit zwei Frost-Tau-Wechseln pro Tag vergleichbare Ergebnisse hinsichtlich der Abwitterungsmengen gezeigt (siehe **Bild 4-1** und **Bild 4-2**).

Der in den Zulassungsprüfungen des DIBt verwendete Grenzwert für Abwitterungen von 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln wurde mit Ausnahme der Betone WF1-E23 und WF1-E27 eingehalten. Diese Betone haben bei der Frostprüfung sowohl mit einem als auch mit zwei Frost-Tau-Wechseln pro Tag das Kriterium des DIBt überschritten (siehe **Bild 4-3** und **Bild 4-4**).

Bei den Betonen WF1-E29, WF1-E35, WF1-E41 und WF1-E45 wurden in der Frostprüfung mit zwei Frost-Tau-Wechseln pro Tag (2 FTW/Tag) höhere Abwitterungen als in der Frostprüfung mit einem Frost-Tau-Wechsel pro Tag (1 FTW/Tag) festgestellt (siehe **Bild 4-5** bis **Bild 4-8**).

Aus den Ergebnissen kann gefolgert werden, dass die beschleunigte Prüfung des Frostwiderstands mit dem Würfelverfahren nach DIN CEN/TS 12390-9 mit zwei Frost-Tau-Wechseln pro Tag (Prüfdauer von 50 d) hinsichtlich der Abwitterungen nicht zu signifikant anderen Ergebnissen hinsichtlich des Grenzwertes führt. Somit könnte die beschleunigte Prüfung des Frostwiderstands mit dem Würfelverfahren bei allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen im Sinne einer Verringerung des Kosten- und Zeitaufwands in Betracht gezogen werden.

6 Literatur

- [Ass19] Aßbrock, O.: Ressourcenverfügbarkeit - Konsequenzen aus Sicht der Transportbetonindustrie. DAFStb-Fachkolloquium Ressourcenverfügbarkeit, 18. September 2019
- [BBS16] Bundesverband Baustoffe, Steine und Erden, BBS. Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland. Berlin: 2016
- [Hei18] Heinz, D.; Heisig, A.: Flugasche und Hüttensand – Zusatzstoffe mit Zukunft? In: 14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 21. März 2018
- [Lau16] Lauch, K.-S.; Dieryck, V.: Durability of concrete made with ternary cements containing slag or fly ash and limestone filler. In: International RILEM Conference on Materials, Systems and Structures in Civil Engineering Conference segment on Concrete with SCM's,
- [Lud18] Ludwig, H.-M.: Neuartige Bindemittel – Die Zeit nach dem Portlandzement. In: Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen. 14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 21. März 2018
- [Mül19] Müller, C.; Palm, S.; Hermerschmidt, W.: Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit CEM II/B-LL und CEM II/C-M (S-LL) – Zementen. Zeitschrift beton 10/2019, S.362-371
- [N01] DIN EN 197-5: Zement - Teil 5: Portlandkompositzement CEM II/C-M und Kompositzement CEM VI; Deutsche und Englische Fassung prEN 197-5:2021; Ausgabedatum: 2021-07
- [N02] DIN CEN/TS 12390-9: Prüfung von Festbeton -Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung; Deutsche Fassung CEN/TS 12390-9:2016
- [N03] Merkblatt: Frostprüfung von Beton (MFB). Karlsruhe: Bundesanstalt für Wasserbau, BAW, Ausgabedatum: 2012-09
- [Pie18] Pierkes, R.; Schulze, Simone E.; Rickert, J.: Durability of composite cements with calcined clay ICR DECEMBER 2018
- [Scr18] Scrivener, K.; Martinera, F.; Bishnoi, S.; Maity, S.: Calcined clay limestone cements (LC³). Cement and Concrete Research 114 (2018), pp. 49-56
- [vdz20] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg.): Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2020

7 Anhang

A Bilder

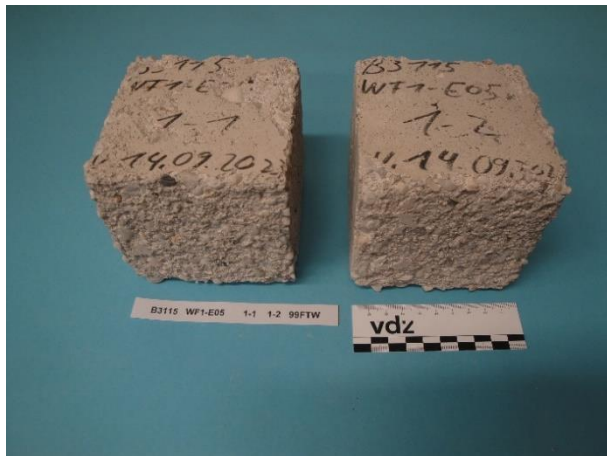


Bild 7-1 Beton WF1-E05 – CEM II/C-M (S1-LL1), 1 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 99 FTW im Würfelverfahren

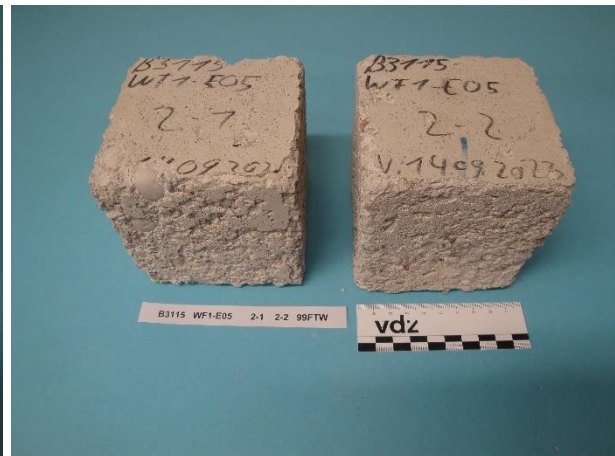


Bild 7-2 Beton WF1-E05 – CEM II/C-M (S1-LL1), 1 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 99 FTW im Würfelverfahren

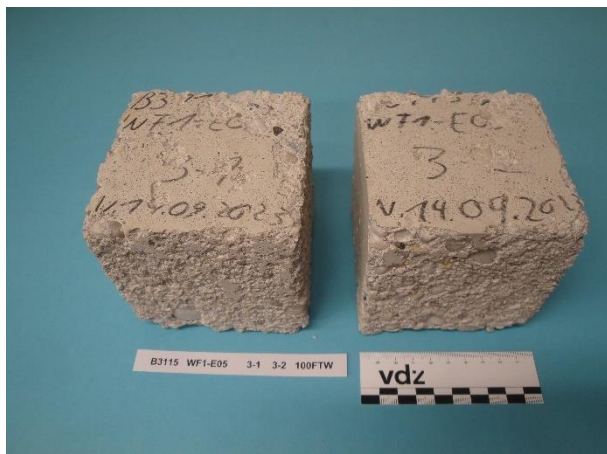


Bild 7-3 Beton WF1-E05 – CEM II/C-M (S1-LL1), 2 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 100 FTW im Würfelverfahren

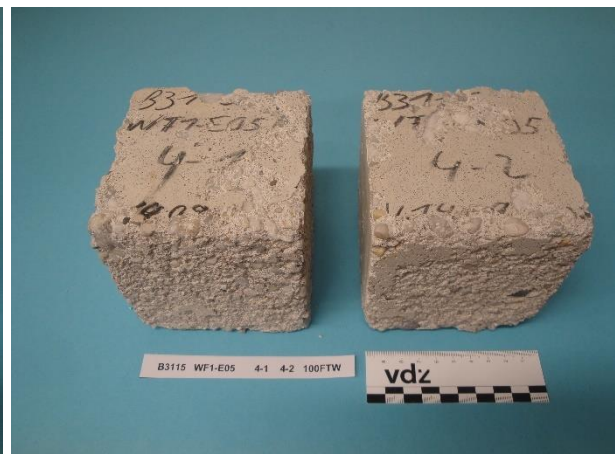


Bild 7-4 Beton WF1-E05 – CEM II/C-M (S1-LL1), 2 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 100 FTW im Würfelverfahren

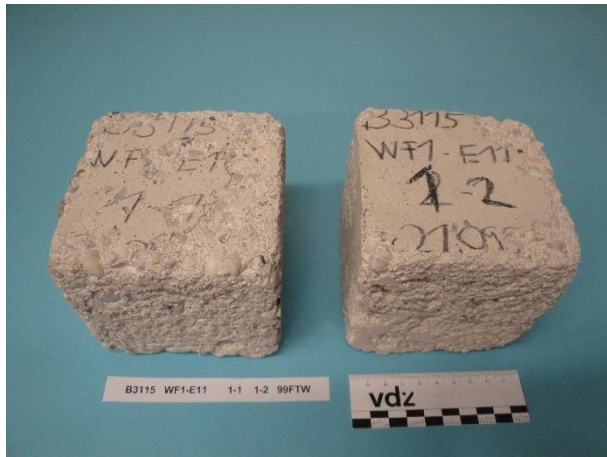


Bild 7-5 Beton WF1-E11 – CEM II/C-M (S2-LL2), 1 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 99 FTW im Würfelverfahren

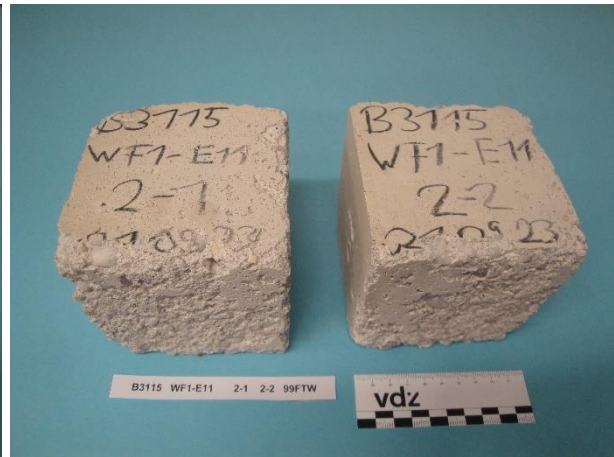


Bild 7-6 Beton WF1-E11 – CEM II/C-M (S2-LL2), 1 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 99 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-7 Beton WF1-E11 – CEM II/C-M (S2-LL2), 2 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 100 FTW im Würfelverfahren

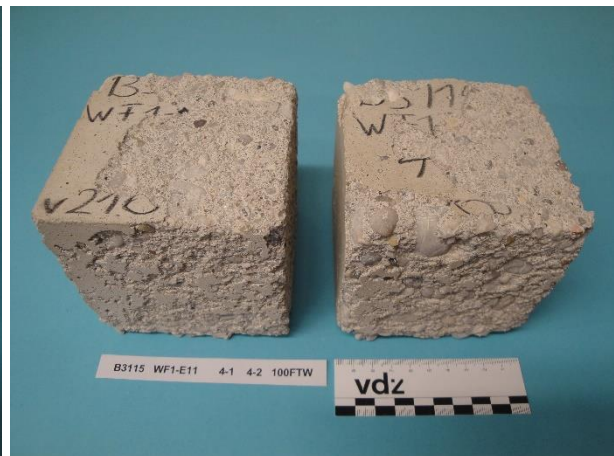


Bild 7-8 Beton WF1-E11 – CEM II/C-M (S2-LL2), 2 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-9 Beton WF1-E23 – CEM II/C-M (Q1-LL2), 1 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 99 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-10 Beton WF1-E23 – CEM II/C-M (Q1-LL2), 1 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 99 FTW im Würfelverfahren

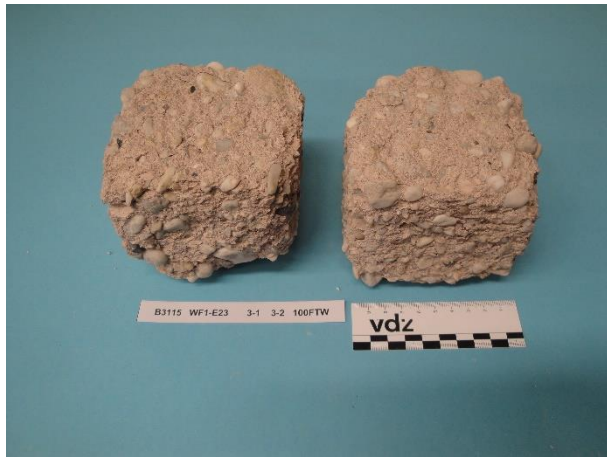


Bild 7-11 Beton WF1-E23 – CEM II/C-M (Q1-LL2), 2 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-12 Beton WF1-E23 – CEM II/C-M (Q1-LL2), 2 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-13 Beton WF1-E27 – CEM II/C-M (Q3-LL2), 1 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 98 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-14 Beton WF1-E27 – CEM II/C-M (Q3-LL2), 1 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 98 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-15 Beton WF1-E27 – CEM II/C-M (Q3-LL2), 2 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-16 Beton WF1-E27 – CEM II/C-M (Q3-LL2), 2 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 100 FTW im Würfelverfahren

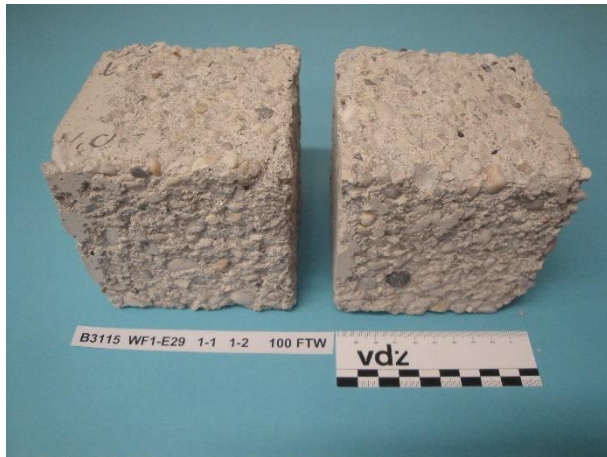


Bild 7-17 Beton WF1-E29 – CEM VI (S1-LL1), 1 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-18 Beton WF1-E29 – CEM VI (S1-LL1), 1 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-19 Beton WF1-E29 – CEM VI (S1-LL1), 2 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-20 Beton WF1-E29 – CEM VI (S1-LL1), 2 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 100 FTW im Würfelverfahren

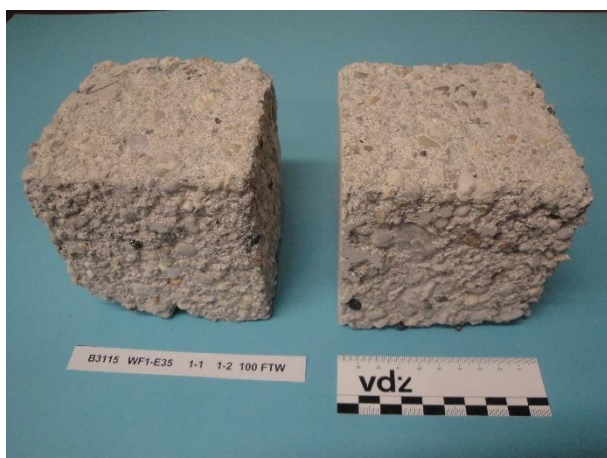


Bild 7-21 Beton WF1-E35 – CEM VI (S2-LL2), 1 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 100 FTW im Würfelverfahren

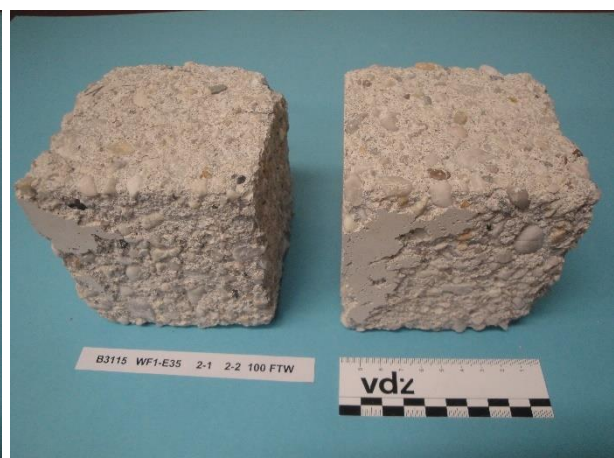


Bild 7-22 Beton WF1-E35 – CEM VI (S2-LL2), 1 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-23 Beton WF1-E35 – CEM VI (S2-LL2), 2 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 100 FTW im Würfelverfahren

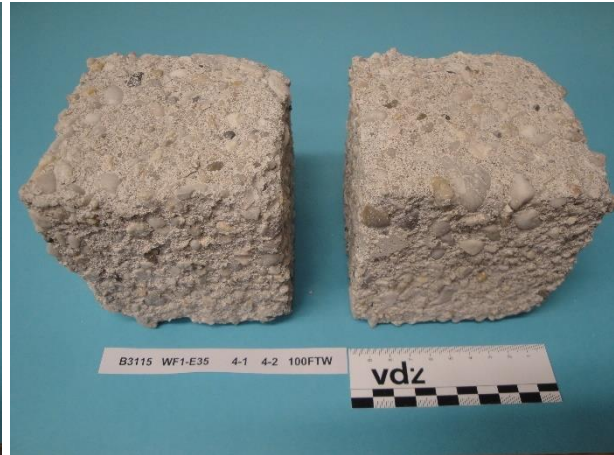


Bild 7-24 Beton WF1-E35 – CEM VI (S2-LL2), 2 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-25 Beton WF1-E41 – CEM VI (S1-Q2), 1 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 102 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-26 Beton WF1-E41 – CEM VI (S1-Q2), 1 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 102 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-27 Beton WF1-E41 – CEM VI (S1-Q2), 2 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-28 Beton WF1-E41 – CEM VI (S1-Q2), 2 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-29 Beton WF1-E45 – CEM VI (S1-Q3), 1 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 102 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-30 Beton WF1-E45 – CEM VI (S1-Q3), 1 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 102 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-31 Beton WF1-E45 – CEM VI (S1-Q3), 2 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-32 Beton WF1-E45 – CEM VI (S1-Q3), 2 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-33 Beton WF2-E23 – CEM II/C-M (Q1-LL2), 1 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 99 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-34 Beton WF-E23 – CEM II/C-M (Q1-LL2), 1 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 99 FTW im Würfelverfahren

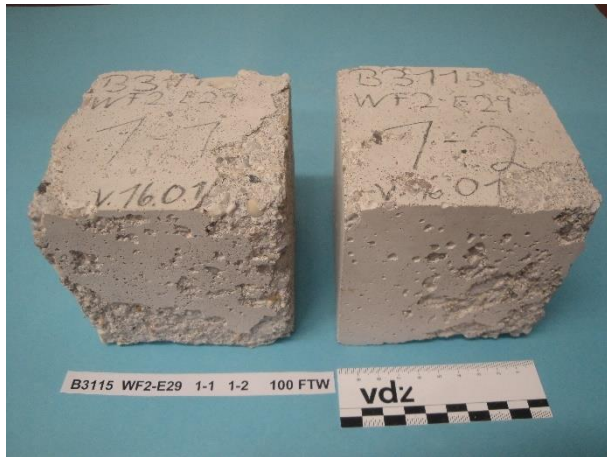


Bild 7-35 Beton WF2-E29 – CEM VI (S1-LL1), 1 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-36 Beton WF2-E29 – CEM VI (S1-LL1), 1 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-37 Beton WF2-E35 – CEM VI (S2-LL2), 1 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 100 FTW im Würfelverfahren

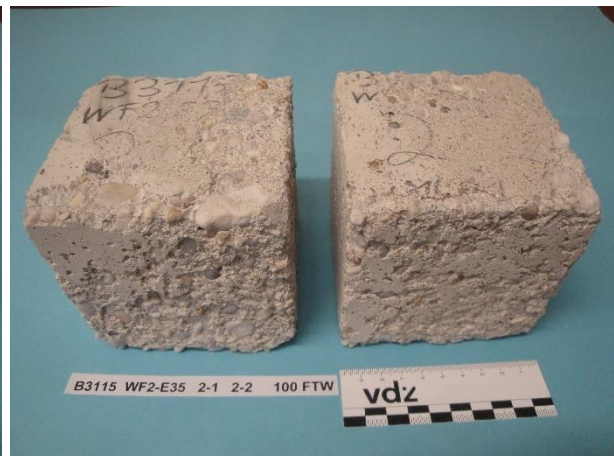


Bild 7-38 Beton WF2-E35 – CEM VI (S2-LL2), 1 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 100 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-39 Beton WF3-E27 – CEM II/C-M (Q3-LL2), 1 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 99 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-40 Beton WF3-E27 – CEM II/C-M (Q3-LL2), 1 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 99 FTW im Würfelverfahren



Bild 7-41 Beton WF3-E29 – CEM VI (S1-LL1),
1 FTW/Tag, Würfel 1 und 2 nach 99 FTW
im Würfelverfahren



Bild 7-42 Beton WF3-E29 – CEM VI (S1-LL1),
1 FTW/Tag, Würfel 3 und 4 nach 99 FTW
im Würfelverfahren