

Auswertung vorhandener Studien

Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit CEM II/C-M (S-LL)- und CEM II/B-LL-Zementen

Christoph Müller, Sebastian Palm und Wibke Hermerschmidt, Düsseldorf

Mit der nächsten Fassung der DIN EN 197-1 werden mit CEM II/C-M und CEM VI weitere klinkereffiziente Zemente genormt sein (Bild 1). CEM II/C-M-Zemente enthalten mindestens 50 M.-% Klinker, CEM VI-Zemente mindestens 35 M.-%. Weitere Hauptbestandteile sind Kalkstein, Hüttensand, Flugasche und Puzzolane. Die VDZ gGmbH hat sich in den vergangenen Jahren in einer Reihe von Forschungsprojekten mit den Eigenschaften von Betonen, die mit einigen dieser Zemente hergestellt wurden, beschäftigt. In dem Beitrag werden Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie Dauerhaftigkeitskennwerte von Betonen mit CEM II/C-M (S-LL)-Zementen aus diesen Projekten sowie weiterer Literatur dargestellt. Wo möglich, werden die Ergebnisse mit den in Deutschland üblichen Bewertungskriterien bzw. mit den Eigenschaften von Betonen beispielsweise mit CEM I oder CEM III/A (Referenzbetone) verglichen. Der Beitrag enthält zudem Ergebnisse von Untersuchungen mit CEM II/B-LL Zementen. CEM II/B-LL-Zemente sind bereits in der DIN EN 197-1 enthalten, wurden aber bisher in Deutschland im konstruktiven Bereich nur vereinzelt eingesetzt. Sie könnten aufgrund der Rohstoffverfügbarkeit ggf. eine größere Bedeutung gewinnen. Die expositionsabhängigen Verwendungsmöglichkeiten von CEM II/B-LL- und CEM II/C-M (S-LL)-Zementen können anhand dieser Daten abgeschätzt werden.

1 Datenbasis

Es wurden Daten aus [1–8] sowie anonymisierte Daten von VDZ-Mitgliedsunternehmen ausgewertet. Die Datenbasis umfasst 21 CEM II/C-M (S-LL)-Zemente und 31 CEM II/B-LL-Zemente, die in bis zu vier Betonzusammensetzungen eingesetzt wurden. Zum Vergleich wurden Betone mit CEM I, CEM II/A-LL, CEM II/A- bzw. B-S, CEM III/A sowie CEM III/B aus den genannten Quellen herangezogen. Die hier ausgewerteten Daten sind als Mittelwerte in den Tafeln 2 bis 11 dargestellt.

2 Normdruckfestigkeiten der Zemente

In Bild 2 sind die Druckfestigkeiten an Normmörteln nach 2, 7 und 28 Tagen gemäß DIN EN 196-1 dargestellt. Mit „n“ ist die jedem Mittelwert zugrunde liegende Anzahl an Ergebnissen im Diagramm angegeben. Die untersuchten Zemente CEM II/C-M (S-LL) und CEM II/B-LL entsprachen den Festigkeitsklassen 32,5 N bis 52,5 N.

3 Betone

3.1 Allgemeines

Es wurden vier Betonzusammensetzungen verwendet, die in Tafel 1 angegeben sind.

3.2 Ausbreitmaß und Betondruckfestigkeit

Neben den in Tafel 1 genannten Dauerhaftigkeitseigenschaften wurden die Beton-

druckfestigkeiten an Würfeln gemäß DIN EN 12390-3 im Alter von 28 Tagen sowie in einigen Fällen das Ausbreitmaß gemäß DIN EN 12350-5 bestimmt. In Bild 3 ist die Schwankungsbreite des Ausbreitmaßes für Betone B1 bis B4 (s. Tafel 1) unter

Verwendung der Referenzzemente sowie der Zemente CEM II/B-LL und CEM II/C-M (S-LL) dargestellt. Alle untersuchten Betone wurden ohne Fließmittel oder Betonverflüssiger hergestellt. Betone mit CEM II/C-M (S-LL)- und CEM II/B-LL-Zementen

Die Autoren:

Dr.-Ing. Christoph Müller studierte Bauingenieurwesen an der RWTH Aachen mit der Fachrichtung „Konstruktiver Ingenieurbau“. Nach Abschluss des Studiums arbeitete er als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Bauforschung der RWTH Aachen (ibac), wo er im Jahr 2000 zum Thema „Beton als kreislaufgerechter Baustoff“ promovierte. Seit Mai 2000 arbeitet er im Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) Düsseldorf in der Abteilung Betontechnik. Er beschäftigt sich dort mit allen Bereichen der Betontechnologie und ist Mitglied in zahlreichen nationalen und internationalen Normungsgremien des Betonbaus. Seit Beginn des Jahres 2007 ist er Leiter der Abteilung Betontechnik im FIZ und seit 2010 Obmann des CEN/TC 104 „Beton und zugehörige Produkte“. Er ist Mitglied des Vorstands und des engeren Vorstands des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) und seit Beginn des Jahres 2012 Geschäftsführer der VDZ gGmbH und seit 2014 Honorarprofessor an der Ruhr-Universität Bochum (RUB).

Dr.-Ing. Sebastian Palm studierte „Glas-Keramik-Bindemittel“ an der TU Clausthal. 2009 promovierte er am Lehrstuhl Bindemittel und Baustoffe des Instituts für Nichtmetallische Werkstoffe der TU Clausthal zum Thema „Optimierung der Raumausfüllung und der Komponentenverteilung von Multikompositzementen“. Seit 2009 ist er im VDZ, Düsseldorf, in der Abteilung Betontechnik tätig. Er beschäftigt sich dort schwerpunktmäßig mit den Themen Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen und Dauerhaftigkeit von Beton.

Dr.-Ing. Wibke Hermerschmidt studierte Bauingenieurwesen an der TU Braunschweig mit den Vertiefungsfächern Baustofftechnologie, Massivbau und Baustatik. Von 2009 bis 2016 war sie als wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz (iBMB) der TU Braunschweig tätig, wo sie 2016 zum Thema „Modelle zur Beschreibung der thermomechanischen Materialeigenschaften jungen Betons“ promovierte. Seit September 2016 ist sie Mitarbeiterin in der Abteilung Betontechnik der VDZ gGmbH.

zeigen vergleichbare Ausbreitmaße wie die in den jeweiligen Forschungsvorhaben verwendeten Referenzbetone.

Bild 4 zeigt die Schwankungsbreite der Betondruckfestigkeiten. Die minimalen Betondruckfestigkeiten der Betone B1, B3 und B4 mit CEM II/C-M (S-LL) bzw. CEM II/B-LL sind vergleichbar mit denen der Referenzbetone. Jedoch weisen Betone mit Portlandzement insbesondere bei hohen Wasserzementwerten ($w/z = 0,65$) z.T. deutlich höhere maximale Betondruckfestigkeiten auf. Insgesamt lassen sich mit CEM II/C-M (S-LL)- und CEM II/B-LL-Zementen Betone aller praxisrelevanten Druckfestigkeiten in adäquater Art und Weise herstellen.

3.3 Carbonatisierung

Für die Expositionsklasse XC3 müssen Betone in Deutschland mindestens einen Zementgehalt von 260 kg/m^3 , einen Wasserzementwert von höchstens $w/z = 0,65$ sowie eine Mindestdruckfestigkeitsklasse C20/25 aufweisen. Von Betonen dieser Zusammensetzung wurden in verschiedenen aus-

Tafel 1: Betonzusammensetzungen

Beton	Zementgehalt [kg/m ³]	Wasserzementwert	Frischbetonluftgehalt [%]	Dauerhaftigkeitsprüfung
B1	260	0,65	–	Carbonatisierungswiderstand gemäß DAfStb Heft 422
B2	300	0,60	–	Frostwiderstand mit dem Würfelverfahren gemäß DIN CEN/TS 12390-9
B3	320	0,50	–	Chloridmigration gemäß BAW-Merkblatt „Chloridmigration“ Frostwiderstand mit dem CIF-Verfahren gemäß DIN CEN/TS 12390-9
B4	320	0,50	$5,0 \pm 0,5$	Frost-Tausalz widerstand mit dem CDF-Verfahren gemäß DIN CEN/TS 12390-9

gewerteten Literaturstellen die Carbonatisierungstiefen bis zu einem Alter von 365 Tagen gemäß DAfStb Heft 422 bestimmt. In den Bildern 5 und 6 sind die Carbonatisierungstiefen von Betonen mit neun CEM II/B-LL sowie fünf CEM II/C-M (S-LL)-Zementen dargestellt. Gemäß DIN 1045-2 sind in dieser Expositions-

klasse sowohl CEM I- als auch CEM III/A-Zemente zugelassen. Betone mit CEM I und CEM III/A spannen daher in dieser Datenzusammenstellung das Feld üblicher Carbonatisierungsverläufe auf. Ergänzend sind jeweils die Carbonatisierungstiefen eines Betons mit einem CEM II/A-LL dargestellt.

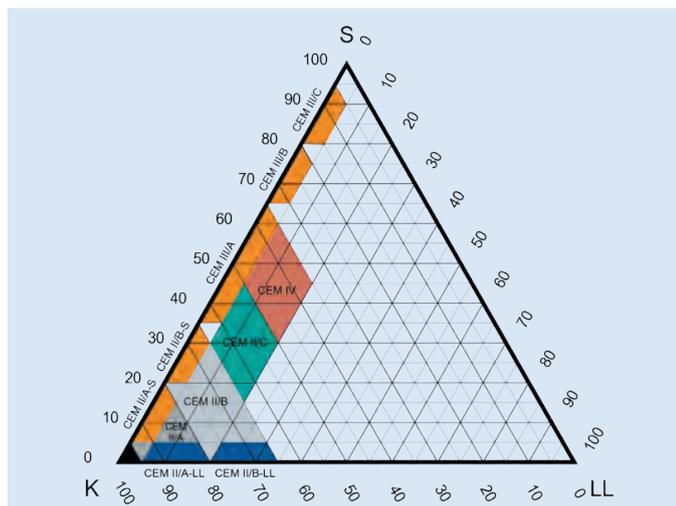


Bild 1: Zemente im System K-S-LL der derzeitigen sowie der überarbeiteten DIN EN 197-1

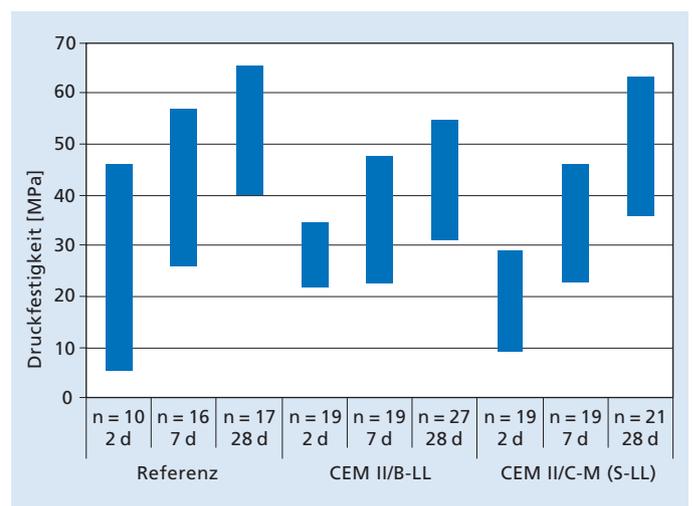


Bild 2: Normmörteldruckfestigkeiten

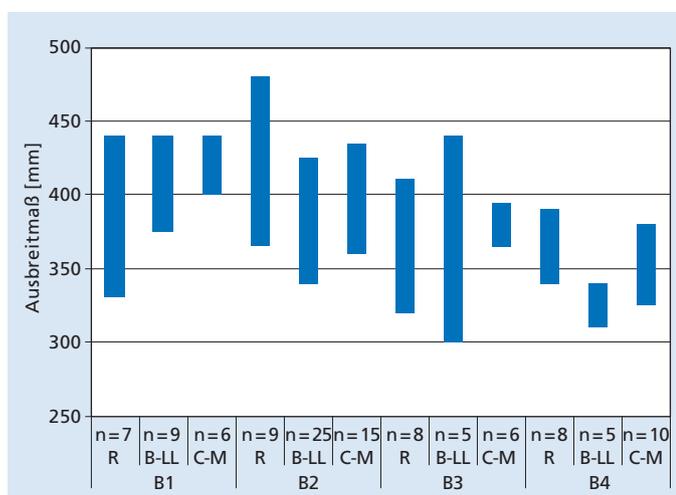


Bild 3: Ausbreitmaße der Betone mit Referenzzementen („R“), CEM II/B-LL („B-LL“) und CEM II/C-M (S-LL) („C-M“)

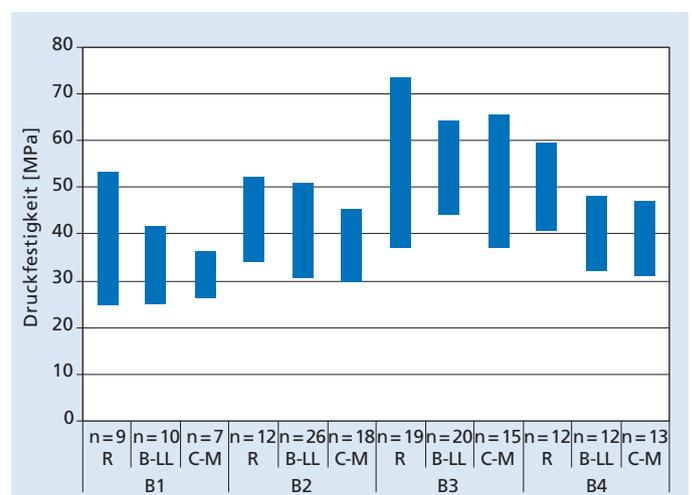


Bild 4: Druckfestigkeiten von Betonen im Alter von 28 Tagen mit Referenzzementen („R“), CEM II/B-LL („B-LL“) und CEM II/C-M (S-LL) („C-M“)

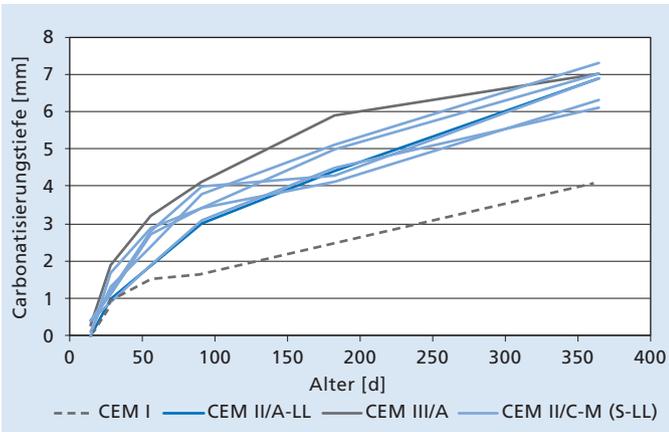


Bild 5: Carbonatisierungsverlauf von Betonen B1 mit CEM II/C-M (S-LL)

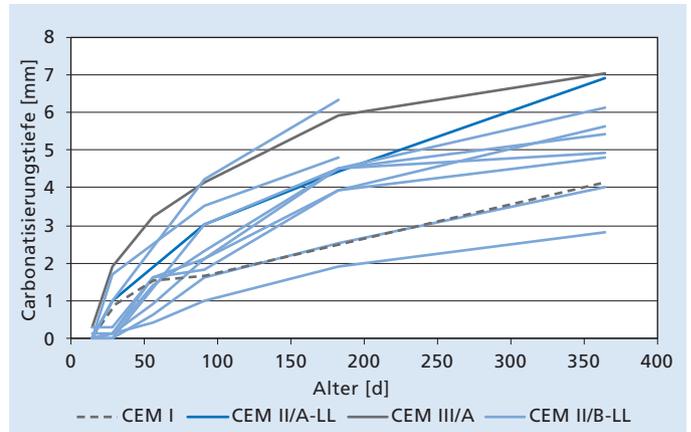


Bild 6: Carbonatisierungsverlauf von Betonen B1 mit CEM II/B-LL

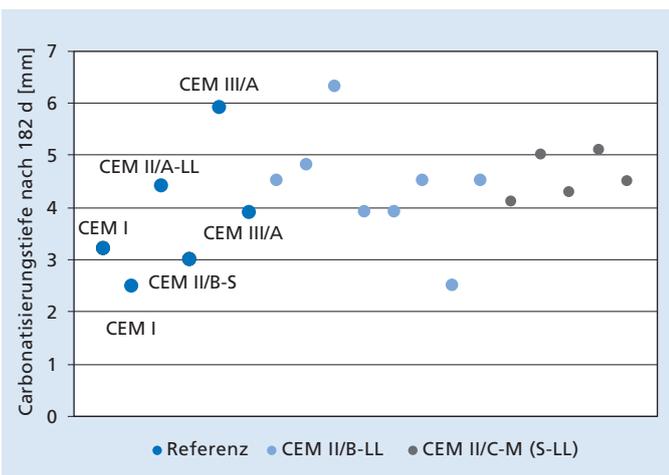


Bild 7: Carbonatisierungstiefen der Betone B1 im Alter von 182 Tagen

In Bild 7 sind die Carbonatisierungstiefen im Alter von 182 d zusammenfassend dargestellt. Die Betone mit Zementen CEM II/B-LL sowie CEM II/C-M (S-LL) ordnen sich zwischen einem Beton mit CEM I und einem Beton mit CEM III/A ein.

Die Carbonatisierungstiefe wird nach Lagerung im Klima 20 °C, 65 % relativer Feuchte und natürlicher CO₂-Konzentration im Alter von 147 Tagen bzw. 168 Tagen bestimmt. In Bild 8 sind die vorliegenden Ergebnisse vor dem Bewertungshin-

tergrund des DIBt dargestellt. Die Daten- grundlage ist geringer als in den Betonver- suchen mit $w/z = 0,65$. Die Ergebnisse lassen sich dennoch in Abhängigkeit zur Druck- festigkeit in den Bewertungshintergrund einordnen und bestätigen im Prinzip die Beobachtungen an den Betonen mit $w/z = 0,65$.

tergrund des DIBt dargestellt. Die Daten- grundlage ist geringer als in den Betonver- suchen mit $w/z = 0,65$. Die Ergebnisse lassen sich dennoch in Abhängigkeit zur Druck- festigkeit in den Bewertungshintergrund einordnen und bestätigen im Prinzip die Beobachtungen an den Betonen mit $w/z = 0,65$.

3.4 Chlorideindringwiderstand

Für die Expositionsklassen XD2 und XS2 müssen Betone in Deutschland mindestens einen Zementgehalt von 320 kg/m³, einen Wasserzementwert von höchstens $w/z = 0,50$ sowie eine Mindestdruckfestigkeitsklasse C35/45 aufweisen. Von Betonen dieser Zusammen- setzung wurden in verschiedenen ausgewerteten Literaturstellen die Chlorid- eindringwiderstände gemäß BAW-Merk- blatt „MDCC“ [9] bestimmt. Die Chlorid- migrationskoeffizienten, gemessen im Alter von 28 Tagen, sind in Bild 9 dargestellt. Alle untersuchten Betone mit CEM II/C-M (S- LL) bestehen das XD2/XS2-Kriterium der BAW. Die Betone mit CEM II/B-LL liegen in der Regel zwischen dem XD2/XS2- Kriterium der BAW und dem Kriterium, das

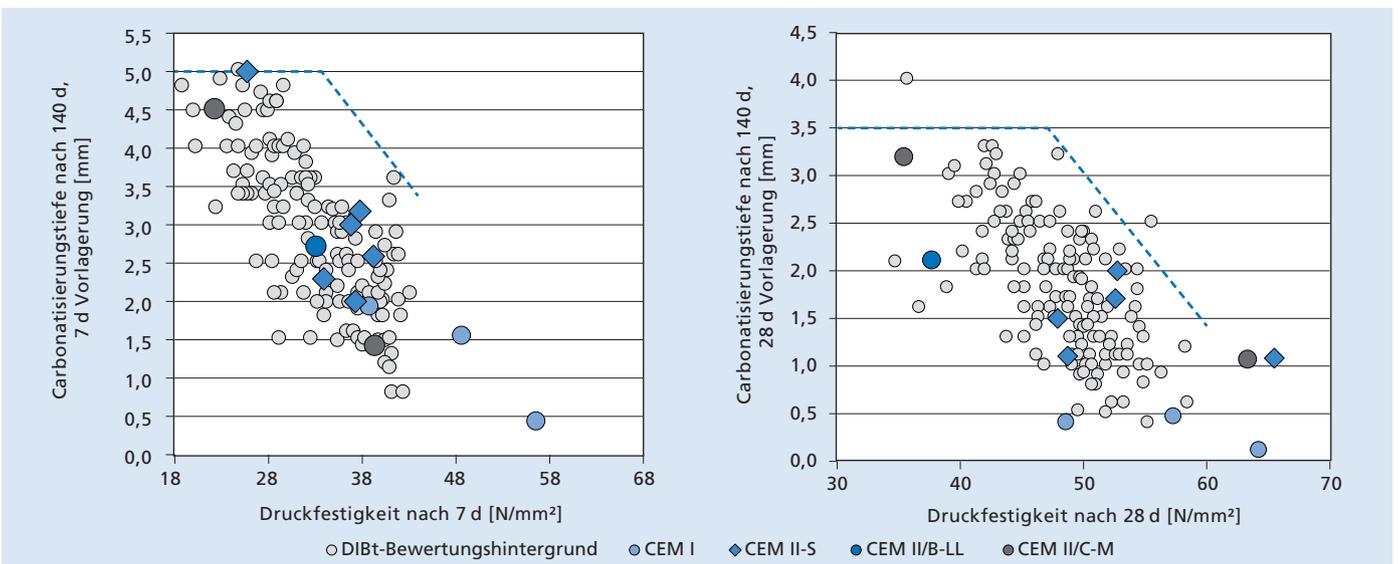


Bild 8: Carbonatisierung von DIBt-Feinbetonprismen

Faxantwort an: 061 23 / 9238-244

oder per Post an Anschrift:

Abo-Service
Fachzeitschrift beton
Große Hub 10

65344 Eltville

**Gleich
Bestellkarte
ausfüllen!**

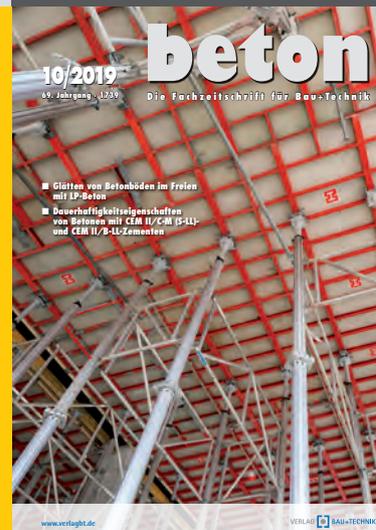
Fachzeitschrift beton:

Informiert über die Gebiete
der Betonherstellung und
Betonverwendung

Liefert Erkenntnisse aus
Forschung und Baubetrieb

Setzt Impulse
für neue Bauverfahren
und wirtschaftliche
Anwendungstechniken

„JA, ICH WILL DAS JAHRES-ABO!“



Mein Jahresabonnement kostet 378,00 € inkl. MwSt. und Versand (Ausland 388,00 €) und verlängert sich jeweils um ein weiteres Jahr, wenn es nicht spätestens 6 Wochen vor Ablauf der Bezugszeit schriftlich gekündigt wird.

Firma

Name, Vorname

Straße, Nr.

PLZ, Ort

Telefon, Fax-Nr.

E-Mail

Meine Vorteile:

- › Über 11 % Preisvorteil gegenüber der Einzelheftbestellung
- › Lieferung frei Haus
- › Jederzeit kündbar (Mindestbezug: 1 Jahr)
- › 20 % Rabatt auf alle Bücher der „edition beton“

Datum, 1. Unterschrift für das Jahresabo

Datum, 2. Unterschrift für die Kenntnisnahme des Widerrufsrechts

Mir ist bekannt, dass ich das Recht habe, den Abschluss meines Vertrags innerhalb von 2 Wochen beim Leserservice, Fachzeitschrift beton, Große Hub 10, 65344 Eltville, zu widerrufen. Zur Wahrung der Frist genügt die rechtzeitige Absendung des Widerrufs.

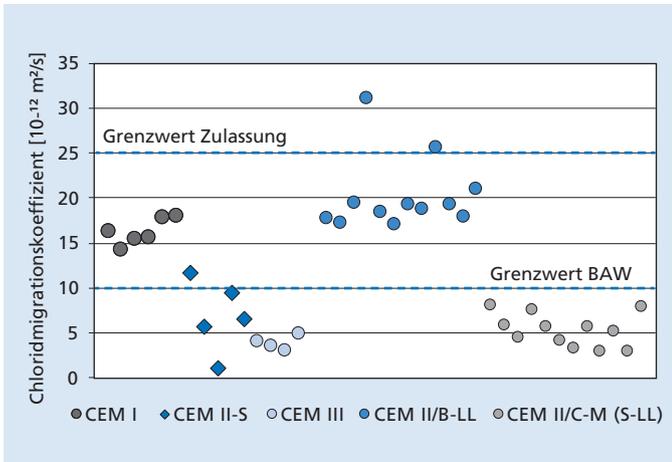


Bild 9: Chlorideindringwiderstand der Betone B3

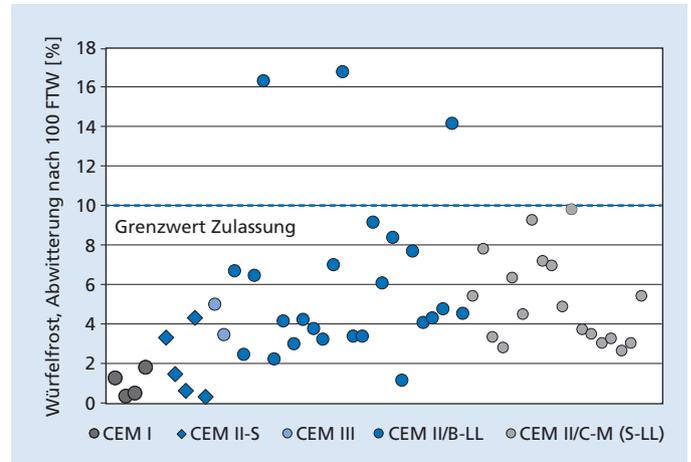


Bild 10: Abwitterung der Betone B2 im Würfelfrostverfahren

in Deutschland für bauaufsichtliche Zulassungen u.a. von Zementen angewandt wird und damit in der gleichen Größenordnung wie Betone mit Portlandzementen. Einige der Betone mit CEM II/B-LL liegen jedoch auch oberhalb des Zulassungskriteriums.

3.5 Frostwiderstand mit dem Würfelverfahren

Für die Expositionsklasse XF1 müssen Betone in Deutschland mindestens einen Zementgehalt von 280 kg/m³, einen Wasserzementwert von höchstens w/z = 0,60 sowie eine Mindestdruckfestigkeitsklasse C25/30 aufweisen. Für XF3 gilt ein höchstzulässiger Wasserzementwert von w/z = 0,50 bei einem Mindestzementgehalt von 320 kg/m³.

In Zulassungsuntersuchungen des DIBt [10] für Zemente wurde über viele Jahre die Verwendbarkeit für die Expositionsklasse XF3 an Betonen mit einem Mindestzementgehalt von 300 kg/m³ und einem Wasserzementwert von w/z = 0,60 im Würfelverfahren gemäß prEN 12390-9 überprüft. Der Grenzwert beträgt 10 M.-% Abwitterung nach 100 Frost-Tauwechseln (FTW).

Von Betonen dieser Zusammensetzung wurde in verschiedenen ausgewerteten Literaturstellen der Frostwiderstand bestimmt.

Bild 10 zeigt die Abwitterungen nach 100 FTW. Alle Betone mit CEM II/C-M (S-LL)-Zementen halten das genannte Abnahmekriterium ein. Betone mit CEM II/B-LL liegen teilweise auch jenseits des Grenzwerts.

3.6 Frostwiderstand mit dem CIF-Verfahren

In Zulassungsverfahren des DIBt kann auch das CIF-Verfahren gemäß prEN 12390-9 als Nachweis des Frostwiderstands für die Expositionsklasse XF3 verwendet werden. Als Grenzwert wird eine höchst zulässige Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls nach 28 FTW auf 75 % des Werts vor der Frostbelastung angewendet [11]. Die Prüfung erfolgt an einem Beton mit einem Mindestzementgehalt von 320 kg/m³ und einem Wasserzementwert von w/z = 0,50 (B3).

Die Ergebnisse sind in Bild 11 dargestellt. Das CIF-Verfahren führt deutlich häufiger zu einer negativen Bewertung und scheint damit zur Bewertung der Eignung für die Expositionsklasse XF3 das schärfere Prüfverfahren zu sein. Dies zeigt auch ein direkter Vergleich beider Frostprüfverfahren an Betonen B2 bzw. B3 mit identischen Zemen-

ten kommen die Prüfverfahren zur gleichen Bewertung (Quadranten I und III). Eine negative Bewertung durch die CIF-Prüfung bei gleichzeitiger positiver Bewertung durch das Würfelverfahren (Quadrant II) kommt in rd. 40 % der untersuchten Fälle vor.

Ein Ausschluss von der Verwendung in der Expositionsklasse XF3 aufgrund der Ergebnisse im CIF-Test muss nicht zwangsläufig bedeuten, dass die Zemente nicht in frostbeanspruchten Bauteilen verwendet werden können. Nach [12] sind Betone mit einer Abwitterung von maximal 10 M.-% nach 100 Frost-Tauwechseln im Würfelverfahren mindestens für die Verwendung in der Expositionsklasse XF1 geeignet.

3.7 Frost-Tausalzwanstand mit dem CDF-Verfahren

Für die Expositionsklasse XF4 müssen Betone in Deutschland mindestens einen Zementgehalt von 320 kg/m³, einen Wasserzementwert von höchstens w/z = 0,50, einen größtkornabhängigen Gehalt an künstlichen Luftporen von mindestens 3,5 % bis 5,5 % sowie eine Mindestdruckfestigkeitsklasse C30/37 aufweisen. In Zulassungsverfahren des DIBt wird das CDF-Verfahren in Kombination mit dem Grenzwert der BAW [11]

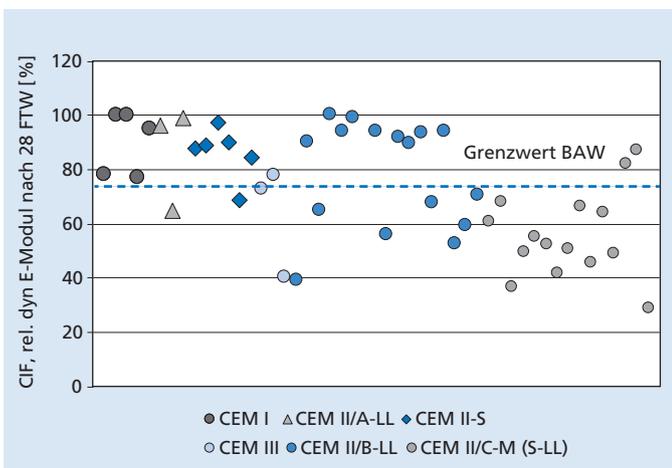


Bild 11: Relativer dynamischer E-Modul der Betone B3 im CIF-Verfahren

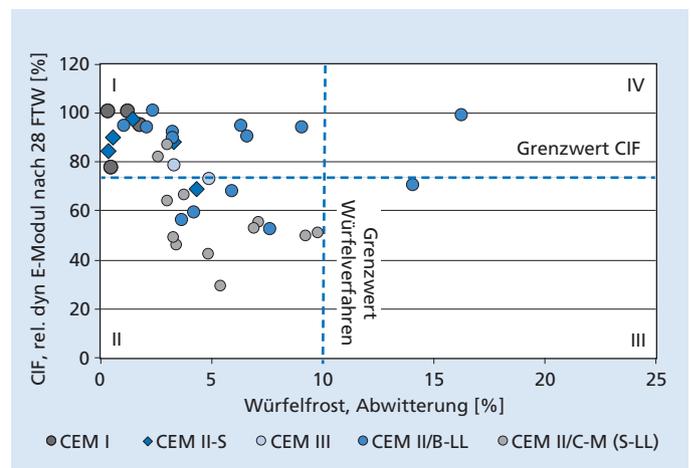


Bild 12: Vergleich CIF-Ergebnisse (Beton B3) mit Ergebnissen des Würfelverfahrens (Beton B2)

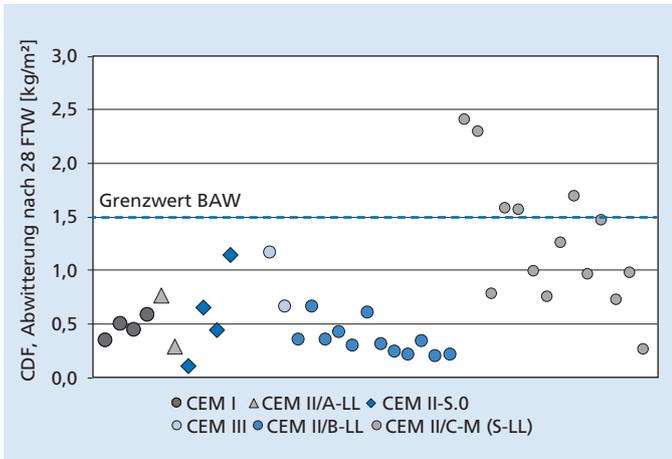


Bild 13: Abwitterung der Betone B4 im CDF-Verfahren

verwendet: Die Abwitterung nach 28 FTW darf höchstens 1,5 kg/m² betragen.

An Betonen dieser Zusammensetzung wurde in verschiedenen ausgewerteten Literaturstellen der Frost-Tausalz widerstand mit dem CDF-Verfahren bestimmt. Bild 13 zeigt die Abwitterungen nach 28 FTW. Alle untersuchten Betone mit CEM II/B-LL-Zementen halten das genannte Abnahme-

bauteile erfüllt werden können. In Deutschland stehen derzeit jährlich rd. 7 Mio. Tonnen und in Europa rd. 21 Mio. Tonnen Hütten sand zur Verfügung [13]. Bis zum Jahr 2035 wird für Deutschland von einer Verfügbarkeit von rd. 6,7 Mio. Tonnen im unteren und rd. 8,9 Mio. Tonnen im oberen Szenario des Bundesverbands Baustoffe, Steine und Erden ausgegangen [14]. Der Zementinlands-

kriterium ein. Betone mit CEM II/C-M (S-LL) liegen teilweise auch jenseits des Grenzwerts.

4 Zusammenfassung

Die vorgestellte Auswertung eigener Untersuchungen und von Literaturdaten zeigt, dass mit CEM II/B-LL- und CEM II/C-M (S-LL)-Zementen wesentliche Anforderungen an Frisch- und Festbetoneigenschaften für Innen- und Außen-

versand in Deutschland beträgt derzeit rd. 29 Mio. Tonnen jährlich [15]. Geht man von einer Verwendung der Zemente zu rd. 56 % in Transportbeton aus, so entspricht dies rd. 16 Mio. Tonnen. Auf Innen- und Außenbauteile (XC1 bzw. XF1/XC4) entfallen dabei schätzungsweise rd. 65 %, also rd. 10,5 Mio. Tonnen Zement.

Für CEM II/C-M (S-LL)-Zemente werden in der Grenzzusammensetzung 30 M.-% Hütten sand benötigt (sulfat träger frei). Rechnerisch würden also rd. 3,2 Mio. Tonnen Hütten sand benötigt, um alle aus Transportbeton hergestellten Innen- und Außenbauteile in Deutschland mit CEM II/C-M (S-LL)-Zementen herzustellen. Diese Menge wird nach den oben genannten Prognosen auch in mittlerer Zukunft zur Verfügung stehen, wobei regionale Unterschiede in der Verfügbarkeit bestehen.

CEM II/C-M (S-LL)-Zemente und CEM II/B-LL-Zemente haben also hinsichtlich ihrer technischen Eigenschaften sowie der Verfügbarkeit der zu ihrer Herstellung notwendigen Ausgangsstoffe das Potenzial, in weiten Teilen des Betonbaus in Deutschland eingesetzt zu werden und so zur Reduzierung der CO₂-Emissionen der Betonbauweise beizutragen.

5 Daten

Tafel 2: Zusammensetzung der Referenzzemente und Mörteldruckfestigkeiten

Zement	Her- kunft	Zusammensetzung			Mörteldruckfestigkeit [MPa]		
		K [M.-%]	S [M.-%]	LL [M.-%]	2 d	7 d	28 d
CEM I	[8]	100	0	0	45,8	56,9	64,4
CEM I	[4]	100	0	0	23,9	39,4	51,2
CEM I	[3]	100	0	0	-	-	57,7
CEM I	[5]	100	0	0	-	48,9	57,4
CEM I	[5]	100	0	0	-	39,2	48,7
CEM I	[6]	100	0	0	-	-	-
CEM II/A-LL	[4]	80	0	20	21,5	34,5	43,9
CEM II/A-LL	[5]	80	0	20	-	28,5	40,2
CEM II/A-LL	A	unbekannt			22,5	40,5	49,7
CEM II/A-S	A	unbekannt			25,6	47,1	61,4
CEM II/A-S	[8]	80	20	0	20,8	34,0	47,9
CEM II/B-S	[4]	65	35	0	18,6	35,1	53,7
CEM II/B-S	A	unbekannt			22,0	38,9	57,3
CEM II/B-S	[5]	65	35	0	-	37,8	52,6
CEM II/B-S	[5]	65	35	0	-	27,2	51,2
CEM II/B-S	[5]	65	35	0	-	39,3	65,4
CEM III/A	[2]	unbekannt			-	-	-
CEM III/A	[6]	unbekannt			-	-	-
CEM III/A	A	55	45	0	-	-	-
CEM III/B	[8]	20	80	0	-	-	-

Tafel 3: Betondruckfestigkeiten und Ausbreitmaße der Betone mit Referenzzementen

Zement	Her- kunft	Ausbreitmaß [mm]				Betondruckfestigkeit nach 28 d [MPa]			
		B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
CEM I	[8]	330	-	320	-	53,3	-	67,6	-
CEM I	[4]	440	470	410	380	34,5	37,8	55,7	44,0
CEM I	[3]	-	470	410	380	-	35,8	55,7	44,0
CEM I	[5]	-	385	-	350	-	52,2	73,4	59,3
CEM I	[5]	-	365	-	340	-	38,5	59,1	45,4
CEM I	[6]	-	-	-	-	38,9	-	61,5	-
CEM II/A-LL	[4]	430	480	400	390	31,6	-	52,0	44,5
CEM II/A-LL	[5]	-	-	375	-	-	-	45,5	-
CEM II/A-LL	A	-	-	-	-	-	34,0	51,2	41,4
CEM II/A-S	A	415	-	360	-	-	41,2	53,2	41,6
CEM II/A-S	[8]	-	-	-	-	35,1	-	49,1	-
CEM II/B-S	[4]	420	430	-	350	35,9	43,5	57,0	41,3
CEM II/B-S	A	-	-	-	-	-	34,7	54,4	40,3
CEM II/B-S	[5]	-	390	-	370	-	36,4	60,6	50,2
CEM II/B-S	[5]	-	-	-	-	-	-	-	-
CEM II/B-S	[5]	-	385	375	-	-	50,9	70,2	-
CEM III/A	[2]	405	465	-	360	36,0	41,4	55,5	42,0
CEM III/A	[6]	-	-	-	-	42,3	-	62,1	-
CEM III/A	A	-	-	-	-	-	40,1	51,6	42,6
CEM III/B	[8]	370	-	360	-	24,8	-	36,1	-

- keine Daten vorhanden

A anonymisierte Daten aus der Zementindustrie

Tafel 4: Dauerhaftigkeitsrelevante Parameter der Betone mit Referenzzementen

Zement	Herkunft	Carbonatisierungstiefe nach 182 d [mm]	Würfelfrost, Abwitterung [%]	Chloridmigrations- koeffizient [10 ⁻¹² m ² /s]	ClF, rel. dyn E-Modul [%], 28 FTW	CDF, Abwitterung, 28 FTW [kg/m ²]
		B1	B2	B3	B3	B4
CEM I	[8]	–	–	16,3	78,4	–
CEM I	[4]	3,2	1,2	14,3	100,4	0,4
CEM I	[3]	–	0,4	15,5	100,4	0,5
CEM I	[5]	–	0,5	15,6	77,3	0,4
CEM I	[5]	–	1,8	17,8	94,9	0,6
CEM I	[6]	2,5	–	18,0	–	–
CEM II/A-LL	[4]	4,4	–	28,2	96,1	0,8
CEM II/A-LL	[5]	–	–	–	64,9	–
CEM II/A-LL	A	–	0,9	–	99,0	0,3
CEM II/A-S	A	–	3,3	11,6	88,0	0,1
CEM II/A-S	[8]	–	–	–	88,8	–
CEM II/B-S	[4]	3,0	1,5	5,7	97,3	0,7
CEM II/B-S	A	–	0,6	1,1	90,0	0,5
CEM II/B-S	[5]	–	4,3	9,4	68,7	1,1
CEM II/B-S	[5]	–	–	–	–	–
CEM II/B-S	[5]	–	0,4	6,6	84,3	–
CEM III/A	[2]	5,9	5,0	4,0	72,7	1,2
CEM III/A	[6]	3,9	–	3,5	–	–
CEM III/A	A	–	3,4	2,9	78,0	0,7
CEM III/B	[8]	–	–	4,8	40,1	–

Tafel 5: Zusammensetzung der CEM II/B-LL-Zemente und Mörteldruckfestigkeiten

Zement	Her- kunft	Zusammensetzung			Mörteldruckfestigkeit [MPa]		
		K [M.-%]	S [M.-%]	LL [M.-%]	2 d	7 d	28 d
LL-1	[8]	65	0	35	25,2	33,2	37,8
LL-2	[2]	70	0	30	33,8	42,1	48,0
LL-3	[2]	65	0	35	22,0	33,2	40,8
LL-4	[4]	75	0	25	27,9	42,6	49,6
LL-5	[4]	70	0	30	24,1	32,8	42,8
LL-6	[4]	65	0	35	22,1	32,2	39,7
LL-7	[3]	65	0	35	–	–	39,7
LL-8	[3]	65	0	35	–	–	46,9
LL-9	[3]	65	0	35	–	–	54,7
LL-10	[3]	65	0	35	–	–	49,5
LL-11	[3]	70	0	30	–	–	–
LL-12	[3]	65	0	35	–	–	–
LL-13	[3]	65	0	35	–	–	46,9
LL-14	[3]	65	0	35	–	–	46,5
LL-15	[3]	65	0	35	–	–	48,0
LL-16	[3]	65	0	35	–	–	46,5
LL-17	[5]	75	0	25	–	–	–
LL-18	[7]	70	0	30 ^{*)}	32,5	45,6	52,6
LL-19	[7]	70	0	30	30,2	45,9	53,3
LL-20	[7]	70	0	30 ^{*)}	32,1	47,5	53,5
LL-21	[7]	70	0	30	33,1	46,2	53,0
LL-22	[7]	70	0	30 ^{*)}	32,6	46,1	50,4
LL-23	[7]	70	0	30	32,7	46,6	53,8
LL-24	[7]	70	0	30	30,9	46,4	54,0
LL-25	[7]	70	0	30 ^{*)}	33,7	45,6	51,6
LL-26	[7]	70	0	30 ^{*)}	34,6	45,2	50,5
LL-27	[7]	70	0	30 ^{*)}	34,0	47,8	53,3
LL-28	[7]	70	0	30 ^{*)}	33,8	46,9	54,0
LL-29	[7]	70	0	30 ^{*)}	31,9	46,7	53,0
LL-30	[7]	70	0	30 ^{*)}	33,0	46,3	53,9

Tafel 6: Betondruckfestigkeiten und Ausbreitmaße der Betone mit CEM II/B-LL

Zement	Her- kunft	Ausbreitmaß [mm]				Betondruckfestigkeit nach 28 d [MPa]			
		B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
LL-1	[8]	–	–	–	–	28,8	–	44,8	–
LL-2	[2]	–	425	–	340	–	41,9	58,8	47,9
LL-3	[2]	–	395	–	335	–	37,9	53,6	38,5
LL-4	[4]	400	400	–	–	34,2	41,3	55,3	42,5
LL-5	[4]	400	380	390	–	36,8	37,6	46,0	41,5
LL-6	[4]	440	380	440	–	28,7	34,2	43,7	32,4
LL-7	[3]	–	–	–	–	–	30,7	43,7	–
LL-8	[3]	–	390	–	–	–	41,5	55,9	43,3
LL-9	[3]	–	400	–	–	–	39,9	–	–
LL-10	[3]	–	410	–	–	–	40,7	–	–
LL-11	[3]	–	–	390	–	–	–	46,0	–
LL-12	[3]	–	–	–	–	–	–	52,2	–
LL-13	[3]	–	400	–	–	–	40,4	–	37,8
LL-14	[3]	–	400	–	330	–	40,7	53,3	35,8
LL-15	[3]	–	410	–	310	–	42,6	–	37,2
LL-16	[3]	–	410	–	–	–	38,8	–	39,8
LL-17	[5]	–	–	–	–	–	–	49,7	–
LL-18	[7]	–	380	–	–	–	43,2	–	–
LL-19	[7]	425	410	–	–	41,6	45,8	58,4	–
LL-20	[7]	395	390	–	–	24,9	42,0	64,0	–
LL-21	[7]	405	375	–	–	33,5	40,9	54,5	–
LL-22	[7]	405	345	–	–	28,0	42,2	50,8	37,2
LL-23	[7]	375	375	–	–	37,4	42,7	–	–
LL-24	[7]	405	385	405	–	–	42,6	53,9	–
LL-25	[7]	–	360	–	–	–	43,0	56,0	–
LL-26	[7]	–	395	–	–	–	43,5	–	–
LL-27	[7]	–	340	300	–	–	50,8	62,4	42,2
LL-28	[7]	–	365	–	–	–	42,6	–	–
LL-29	[7]	–	355	–	–	38,0	44,7	55,0	–
LL-30	[7]	–	360	–	–	–	43,9	–	–

– keine Daten vorhanden A anonymisierte Daten aus der Zementindustrie *) CaCO₃-Gehalt des Kalksteins entspricht nicht den Anforderungen der DIN EN 197-1

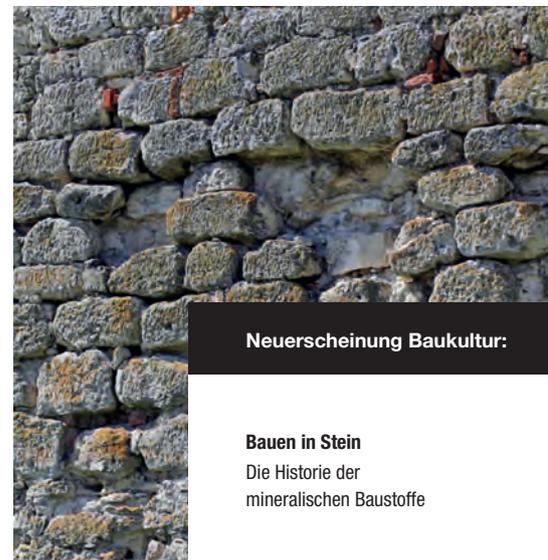
Tafel 7: Dauerhaftigkeitsrelevante Parameter der Betone mit CEM II/B-LL

Zement	Herkunft	Carbonatisierungstiefe nach 182 d [mm]	Würfelfrost, Abwitterung [%]	Chloridmigrationskoeffizient [$10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$]	CIF, rel. dyn E-Modul, 28 FTW [%]	CDF, Abwitterung, 28 FTW [kg/m^2]
		B1	B2	B3	B3	B4
LL-1	[8]	-	-	-	39,1	-
LL-2	[2]	-	6,6	-	90,0	0,4
LL-3	[2]	-	-	-	65,1	0,7
LL-4	[4]	4,5	2,4	-	100,4	0,4
LL-5	[4]	4,8	6,4	-	94,1	0,4
LL-6	[4]	6,3	16,3	-	98,8	0,3
LL-7	[3]	-	-	17,7	-	-
LL-8	[3]	-	2,1	-	93,8	0,6
LL-9	[3]	-	4,1	-	-	-
LL-10	[3]	-	3,0	-	-	-
LL-11	[3]	-	-	17,1	-	-
LL-12	[3]	-	-	19,3	-	-
LL-13	[3]	-	4,2	-	-	0,3
LL-14	[3]	-	3,7	-	55,7	0,2
LL-15	[3]	-	3,2	-	-	0,2
LL-16	[3]	-	7,0	-	-	0,3
LL-17	[5]	-	-	31,0	-	-
LL-18	[7]	-	16,7	-	-	-
LL-19	[7]	3,9	3,3	18,4	91,6	-
LL-20	[7]	-	3,3	16,9	89,5	-
LL-21	[7]	3,9	9,1	19,2	93,5	-
LL-22	[7]	4,5	6,0	18,7	67,8	0,2
LL-23	[7]	2,5	8,3	-	-	-
LL-24	[7]	-	1,1	25,6	94,2	-
LL-25	[7]	-	7,7	19,2	52,5	-
LL-26	[7]	-	4,0	-	-	-
LL-27	[7]	-	4,3	17,8	59,1	0,2
LL-28	[7]	-	4,8	-	-	-
LL-29	[7]	4,5	14,1	20,9	70,4	-
LL-30	[7]	-	4,5	-	-	-

- keine Daten vorhanden

Literatur

- [1] Proske, T.; Rezvani, M.; Palm, S.; Müller, C.; Graubner, C.-A.: Concretes made of efficient multi-composite cements with slag and limestone. Cement and Concrete Composites 89 (2018), pp. 107-119
- [2] Müller, C.; Severins, K.; Hauer, B.: New findings concerning the performance of cements containing limestone, granulated blastfurnace slag and fly ash as main constituents - parts 1 and 2. CEMENT INTERNATIONAL 8 (2010) No. 3, pp. 80-86, and No. 4, pp. 82-93
- [3] ECO-Serve CLUSTER 2: Production and Application of Blended Cements. Research Activities - CONTRACT N°: G1RD-CT-2002-00782, Final report, 30.11.2005
- [4] Müller, C.; Lang, E.: Dauerhaftigkeit von Beton mit Portlandkalkstein- und Portlandkompositzement CEM II/M (S-LL) - Teile 1 bis 3. beton 55 (2005) H. 3, S. 131-138, H. 4, S. 197-202, H. 5, S. 266-269
- [5] Palm, S.; Müller, C.; Wolter, A.; Bohne, T.: Hydratationsgrad basierte Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton. Sammelband Betontechnische Berichte 2013-2015, Düsseldorf 2016
- [6] Niedermeier, D.; Tomala, N.: Grenzzustandsbezogene Optimierung von Betonzusammensetzungen: Ein Schritt zur weiteren Reduzierung der CO₂-Emissionen bei der Herstellung von Beton - gefördert durch die „Dres. Edith und Klaus Dyckerhoff-Stiftung. Abschlussbericht, Düsseldorf 2017
- [7] Rickert, J.: Einfluss der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung von Kalkstein als Zementhauptbestandteil auf die Eigenschaften von Zementen und die Dauerhaftigkeit damit hergestellter Betone. Abschlussbericht IGF 17226 N, Düsseldorf 2014
- [8] Palm, S.; Müller, C.: Bisher unveröffentlichte Daten aus dem Forschungsvorhaben DURAFOR, CORNET EN187, Düsseldorf 2019
- [9] Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC). Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe 2017
- [10] CEN/TR 16563 2013. Principles of the equivalent durability procedure
- [11] Frostprüfung von Beton. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe 2012
- [12] Siebel, E.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton. Düsseldorf 1995
- [13] Schuster, T.; Baetzner, S.; Bolte, G.; Ehrenberg, A.; Neufert, W.; Palm, S.: Stoffliche Potenziale für klinkereffiziente Zemente. Vortrag Fachtagung „Zementchemie“, Düsseldorf 2019
- [14] Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland. Bundesverband Baustoffe, Steine und Erden (BBS), Berlin 2016
- [15] Zahlen und Daten: Zementindustrie in Deutschland 2019. Stand August 2019,VDZ e.V., Berlin 2019



Neuerscheinung Baukultur:

Bauen in Stein

Die Historie der mineralischen Baustoffe



Helmut Eifert

2015, 170 S., gebunden

16,5 x 23,5 cm, € 39,80

ISBN 978-3-7640-0607-5

Das Buch gibt einen hervorragenden Überblick über die Geschichte der wesentlichen mineralischen Baustoffe in Deutschland und Umgebung. Dabei hat Dr. Helmut Eifert die Baukunst, die Entwicklung der Bauberufe, die Tragwerke und die Baustoffherstellung in einen Zusammenhang gebracht, wie er sich aus der Sicht eines Ingenieurs ergibt.

Verlag Bau+Technik GmbH

Fax: 02 11/9 24 99-55

Tel.: 02 11/9 24 99-21

E-Mail: vertrieb@verlagbt.de

Jetzt portofrei bestellen unter:
www.verlagbt.de ▶ bookshop

Tafel 8: Zusammensetzung der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente und Mörteldruckfestigkeiten

Zement	Herkunft	Zusammensetzung			Mörteldruckfestigkeit [MPa]		
		K [M.-%]	S [M.-%]	LL [M.-%]	2 d	7 d	28 d
C-M-1	[1]	50	30	20	20,9	39,6	63,3
C-M-2	[8]	50	30	20	13,8	31,7	47,4
C-M-3	[8]	50	30	20	9,0	22,5	35,6
C-M-4	A	unbekannt			12,5	25,7	41,1
C-M-5	A	unbekannt			13,5	28,1	45,4
C-M-6	A	unbekannt			16,0	30,2	47,2
C-M-7	A	unbekannt			18,2	35,0	48,7
C-M-8	A	unbekannt			16,9	30,6	46,3
C-M-9	A	unbekannt			17,5	31,1	46,9
C-M-10	[2]	60	20	20	19,6	34,6	52,0
C-M-11	[2]	50	30	20	14,0	30,3	49,1
C-M-12	[2]	50	40	10	14,1	30,8	53,9
C-M-13	[2]	60	20	20	20,5	37,7	54,8
C-M-14	[2]	60	20	20	18,5	32,6	52,1
C-M-15	[2]	50	40	10	15,5	37,0	59,5
C-M-16	[2]	50	40	10	14,3	31,7	57,3
C-M-17	[3]	50	30	20	–	–	50,9
C-M-18	[3]	50	30	20	–	–	51,1
C-M-19	A	unbekannt			29,2	45,7	60,6
C-M-20	A	unbekannt			27,3	45,8	63,0
C-M-21	A	unbekannt			26,2	44,0	63,4

Tafel 9: Betondruckfestigkeiten und Ausbreitmaße der Betone mit CEM II/C-M (S-LL)

Zement	Herkunft	Ausbreitmaß [mm]				Betondruckfestigkeit nach 28 d [MPa]			
		B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
C-M-1	[1]	–	–	–	–	–	–	59,9	–
C-M-2	[8]	–	–	–	–	30,0	–	42,6	–
C-M-3	[8]	400	–	380	–	26,5	–	36,0	–
C-M-4	A	–	385	–	360	–	30,8	–	31,0
C-M-5	A	–	380	–	350	–	29,7	–	31,0
C-M-6	A	–	365	–	–	–	35,2	–	–
C-M-7	A	–	385	–	–	–	36,6	–	–
C-M-8	A	–	365	–	–	–	32,8	–	–
C-M-9	A	–	360	–	–	–	34,4	–	–
C-M-10	[2]	400	410	–	355	36,1	40,1	57,1	38,4
C-M-11	[2]	420	435	–	370	32,6	38,9	53,1	35,0
C-M-12	[2]	425	430	395	380	32,2	40,4	54,2	39,0
C-M-13	[2]	440	400	380	340	34,5	43,8	64,5	41,6
C-M-14	[2]	–	385	380	325	–	42,7	58,9	44,4
C-M-15	[2]	435	425	365	360	36,3	42,9	56,9	40,5
C-M-16	[2]	–	395	370	340	–	45,3	59,7	46,9
C-M-17	[3]	–	420	–	–	–	41,7	54,0	–
C-M-18	[3]	–	420	–	360	–	40,3	58,1	43,3
C-M-19	A	–	–	–	–	–	42,5	50,1	45,3
C-M-20	A	–	–	–	–	–	40,6	53,3	44,5
C-M-21	A	–	–	–	–	–	42,4	54,1	42,5

– keine Daten vorhanden

Tafel 10: Dauerhaftigkeitsrelevante Parameter der Betone mit CEM II/C-M (S-LL)

Zement	Herkunft	Carbonatisierungstiefe nach 182 d [mm]	Würfelfrost, Abwitterung [%]	Chloridmigrationskoeffizient [10 ⁻¹² m ² /s]	ClF, rel. dyn E-Modul, 28 FTW [%]	CDF, Abwitterung, 28 FTW [kg/m ²]
		B1	B2	B3	B3	B4
C-M-1	[1]	–	–	–	60,9	–
C-M-2	[8]	–	–	–	68,4	–
C-M-3	[8]	–	–	–	37,1	–
C-M-4	A	–	–	5,4	–	2,4
C-M-5	A	–	–	7,8	–	2,3
C-M-6	A	–	–	3,3	–	–
C-M-7	A	–	–	2,8	–	–
C-M-8	A	–	–	6,3	–	–
C-M-9	A	–	–	4,5	–	–
C-M-10	[2]	4,1	8,0	9,2	49,5	0,8
C-M-11	[2]	5,0	5,8	7,2	55,2	1,6
C-M-12	[2]	4,3	4,5	7,0	52,6	1,6
C-M-13	[2]	5,1	7,6	4,9	42,0	1,0
C-M-14	[2]	–	5,6	9,8	50,8	0,8
C-M-15	[2]	4,5	4,1	3,8	66,3	1,3
C-M-16	[2]	–	3,3	3,5	45,8	1,7
C-M-17	[3]	–	5,6	3,0	64,1	1,0
C-M-18	[3]	–	3,0	3,3	49,0	1,5
C-M-19	A	–	5,1	2,6	82,0	0,7
C-M-20	A	–	3,0	3,0	87,0	1,0
C-M-21	A	–	7,9	5,4	29,0	0,3

Tafel 11: Carbonatisierungstiefe gemäß DIBt-Verfahren

Zement	Herkunft	Druckfestigkeit nach 7 d [MPa]	Druckfestigkeit nach 28 d [MPa]	Carbonatisierungstiefe nach 7 d VL, 140 d HL [mm]	Carbonatisierungstiefe nach 28 d VL, 140 d HL [mm]
CEM I	[8]	56,9	64,4	0,4	0,1
CEM I	[5]	48,9	57,4	1,5	0,5
CEM I	[5]	39,2	48,7	1,9	0,4
CEM II/A-S	[8]	34,0	47,9	2,3	1,5
CEM II/B-S	[5]	37,8	52,6	3,2	1,7
CEM II/B-S	[5]	39,3	65,4	2,6	1,1
CEM III/B	[8]	25,9	40,4	5,0	3,8
CEM II/B-LL	[8]	33,2	37,8	2,7	2,1
CEM II/C-M (S-LL)	[1]	39,6	63,3	1,4	1,1
CEM II/C-M (S-LL)	[8]	22,5	35,6	4,5	3,2

– keine Daten vorhanden A anonymisierte Daten aus der Zementindustrie VL Vorlagerung HL Hauptlagerung



Neuerscheinung Bauplanung:

Gestaltete Zementestriche

Planung, Ausschreibung und Ausführung



Rendchen (Hrsg.) u.a.

2016, 252 S., 16,5 x 23,5 cm,

261 Abb., 21 Taf., geb., € 49,80

ISBN 978-3-7640-0517-7

Vorwort / Anforderungen an Estriche / Baustoffe zur Herstellung gestalteter Zementestriche / Planungshinweise: Schwimmender Estrich, Heizestrich, Verbundestrich, Estrich auf Trennschicht, Hochbeanspruchbarer Estrich / Bauausführung / Gestaltete Zementestriche: Herstellung, Gestaltungsvarianten, Systeme für die Oberflächenbearbeitung, Maschinen, Geräte und Verfahren zur Herstellung gestalteter Zementestriche / Terrazzo / Oberflächenbehandlung / Abnahme / Pflege, Instandhaltung und Instandsetzung

Verlag Bau+Technik GmbH

Fax: 02 11/9 24 99-55

Tel.: 02 11/9 24 99-21

E-Mail: vertrieb@verlagbt.de

Jetzt portofrei bestellen unter:

www.verlagbt.de ▶ bookshop