

Betontechnik



**Abschlussbericht
zum Forschungsvorhaben**

„Granulometrische Optimierung klinkereffizienter Zemente - Effekte auf die Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit von Beton“

gefördert von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt, Aktenzeichen AZ 34647/01

VDZ Technology gGmbH,

Abteilung Betontechnik

Christoph Müller, Katrin Severins

Bauhaus-Universität Weimar,

F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde

Horst-Michael Ludwig, Luise Wedekind

Ausgestellt am 29. Februar 2024

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Hintergrund und Ziele	5
3	Charakterisierung und Aufbereitung der Ausgangsrohstoffe	7
3.1	Ausgangsrohstoffe	7
3.2	Chemisch-mineralogische Untersuchungen an den Ausgangsrohstoffen	7
3.3	Mechanische Aufbereitung und granulometrische Eigenschaften	8
4	Herstellung und Zusammensetzung der klinkereffizienten Versuchszemente	11
4.1	Verfahren der labortechnischen und halbtechnischen Herstellung	11
4.2	Zusammensetzung der Versuchszemente	12
5	Vorversuche - Granulometrischer Einfluss der Hauptbestandteile auf die Eigenschaften von getrennt gemahlene CEM II/C-M-Zementen	13
5.1	Herstellung erster Versuchszemente GC1 bis GC 12	13
5.2	Untersuchungen zur Packungsdichte der Versuchszemente GC1- GC12	13
5.3	Granulometrische Einflüsse auf den Wasseranspruch für Normsteife nach DIN EN 196-3	14
5.4	Granulometrische Einflüsse auf das Ausbreitmaß nach DIN EN 1015-3 und das Erstarren der Zemente nach DIN EN 196-3	16
5.5	Untersuchungen zur Mörtelfestigkeit an den Versuchszementen CEM II/C-M (GC1- GC12) nach getrenntem Mahlen und anschließenden Mischen	17
5.6	Untersuchungen der Porengrößenverteilung an den Normmörteln der Versuchszemente CEM II/C-M (GC1- GC12) nach getrenntem Mahlen und anschließenden Mischen	18
5.7	Untersuchungen des Hydratationsgrades	19
6	Eigenschaften der Versuchszemente nach gemeinsamer Vermahlung auf einer Chargenkugelmühle	20
6.1	Gemeinsame Vermahlung der CEM II/C-M-Zemente mit Klinker, Hüttensand und Kalkstein	20
6.2	Gemeinsame Vermahlung der CEM II/C-M-Zemente mit Klinker, Ziegel und Kalkstein	23
7	Granulometrische Einflüsse auf den Wasseranspruch nach Punkte, den Wasseranspruch für Normsteife und das Erstarren von CEM II/C-M (S-LL)-Zementen gemäß DIN EN 196-3	27
8	Optimierungsversuche - Untersuchungen an Normmörteln unter Verwendung der Versuchszemente CEM II/C-M (S-LL)	32
8.1	Granulometrische Einflüsse auf die Konsistenz der Normmörtel mit konstantem Wasserzementwert ($w/z = 0,50$)	32
8.2	Druckfestigkeit der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente im Alter von zwei bzw. 28 Tagen gemäß DIN EN 196-1	33
8.2.1	Anfangsfestigkeit in Abhängigkeit der Packungsdichte	34
8.2.2	Normfestigkeit in Abhängigkeit der Packungsdichte	35
8.3	Granulometrische Einflüsse auf die Porengrößenverteilungen der CEM II/C-M (S-LL)-Zementmörtel im Alter von 28 Tagen	37
8.3.1	Porositätsmessungen	37
8.3.2	Gesamtporosität der Normmörtel in Abhängigkeit von Packungsdichte und Normfestigkeit der Zemente	38

8.3.3	Gelporosität der Normmörtel in Abhängigkeit von Packungsdichte und Normfestigkeit der Zemente	39
9	Zusammensetzung granulometrisch optimierter CEM II/C-M (S-LL)-, CEM VI- und CEM X-Zemente sowie ressourcenschonender CEM II/C-M (Q-LL)-Zemente aus getrennter Mahlung	41
10	Versuchszemente CEM X aus der gemeinsamen Mahlung der Hauptbestandteile Klinker, Kalkstein und Hüttensand auf einer Vertikal-Wälzmühle	44
10.1	Von der diskontinuierlichen zur kontinuierlichen Mahlung: Ziele der Mahlversuche	44
10.2	Untersuchung der granulometrischen Eigenschaften des Mahlgutes und der Zemente aus gemeinsamer Mahlung	45
10.3	Untersuchungen an Normmörteln unter Verwendung gemeinsam gemahlener Versuchszemente	48
10.4	Granulometrische Einflüsse auf die Porengrößenverteilungen der Normmörtel	49
11	Vergleich der CEM X-Zemente aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung mit CEM VI-Zementen aus getrennter Mahlung	50
12	Eigenschafts- und anwendungsgerechte Untersuchungsmethoden für Mörtel mit verringertem Wassergehalt bzw. abgesenktem w/z-Wert	53
12.1	Vom Normmörtel mit konstantem w/z-Wert zum Mörtel mit konstanter Konsistenz	53
12.2	Herstellung von Mörteln mit konstanter Zielkonsistenz	54
12.3	Wassermenge für Mörtel mit Zielkonsistenz SP bzw. WP	55
13	Untersuchungen an Mörteln mit abgesenktem w/z-Wert (SP) im Vergleich zum Normmörtel am Beispiel hüttensandhaltiger CEM VI- und CEM X-Zemente aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung	58
13.1	Zusammensetzung ausgewählter Zemente für SP-Betonversuche	58
13.2	Einflüsse auf das Ausbreitmaß der Frischmörtel SP im Vergleich zum Normmörtel	58
13.3	Einflüsse auf die Druckfestigkeit der SP-Mörtel im Alter von zwei und 28 Tagen im Vergleich zum Normmörtel	59
13.4	Einflüsse auf die Porengrößenverteilungen der SP-Mörtel im Alter von 28 Tagen im Vergleich zum Normmörtel	60
14	Auswertung der Untersuchungen an Mörteln mit abgesenktem w/z-Wert (SP) unter Verwendung hüttensand- und ziegelhaltiger Zemente in Vorbereitung der Betonversuche	61
14.1	Zusammensetzungen der Versuchszemente	61
14.2	Untersuchung der Druckfestigkeit der SP-Mörtel in Anlehnung an DIN EN 196-1 im Vergleich zum Normmörtel	62
14.3	Untersuchung der Porengrößenverteilungen der SP-Mörtel in Anlehnung an DIN EN 196-1 im Vergleich zum Normmörtel	64
14.4	Gesamt- und Gelporosität der SP-Mörtel im Vergleich zu ihrer Druckfestigkeit	67
15	Herstellung der Betone und Frischbetoneigenschaften	69
15.1	Konsistenz der Frischbetone B1 und B1-SP für das Würfelverfahren	69
15.2	Konsistenz der Frischbetone B3 und B3-SP für das CDF-Verfahren	70
16	Frostwiderstand der Betone im Würfelverfahren	71
16.1	Betondruckfestigkeit ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$ sowie w/z für SP)	72
16.2	Frostwiderstand: Abwitterungen	73

17	Frost-Tausalz-Widerstand der Betone im CDF-Verfahren	81
17.1	Druckfestigkeit der Luftporenbetone ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$ sowie w/z für SP)	81
17.2	Frost-Tausalz-Widerstand: Abwitterungen	83
18	Chlorideindringwiderstand der Betone im Migrationsschnelltest	86
18.1	Betondruckfestigkeit ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$)	86
18.2	Chlorideindringwiderstand: Migrationskoeffizient	88
19	Carbonatisierungswiderstand an Feinbetonen gemäß DIBt-Prüfplan	90
19.1	Druckfestigkeit der Feinbetone ($w/z = 0,50$)	90
19.2	Carbonatisierungswiderstand: Carbonatisierungstiefe	91
20	Treibhauspotenziale granulometrisch optimierter, klinkereffizienter Zemente	94
21	Aspekte der Klinker-, Ressourcen- und Energieeffizienz, der Dauerhaftigkeit und der Nachhaltigkeit im Überblick	96
22	Zusammenfassung	100
A	Anhang: Tabellen	104
B	Anhang: Bilder	107
23	Literaturverzeichnis	116
24	Präsentationen und Öffentlichkeitsarbeit	125
24.1	Präsentationen in VDZ-Gremien, in VDZ-Medien, im Rahmen von projektbegleitenden Meetings mit den Projektpartnern sowie von wissenschaftlichen Konferenzen (Baustoffforschung für die Praxis)	125
24.2	Präsentationen und wissenschaftliche Arbeiten am FIB sowie im Rahmen von projektbegleitenden Meetings mit den Projektpartnern	125
24.3	Beiträge zur IBAUSIL September 2023	125
25	Unterschriften	126

1 Einleitung

Mit welchem Konzept kann künftig die größtmögliche Klinker- und damit CO₂-Effizienz bei gleichzeitiger Sicherstellung der Leistungsfähigkeit und Dauerhaftigkeit in Mörtel und Beton erreicht werden? In welchem Maße können - neben herkömmlichen Hauptbestandteilen – auch alternative Ressourcen aus der Kreislaufwirtschaft Portlandzementklinker substituieren und dazu beitragen, primäre Ressourcen zu schonen und nachhaltiges Bauen zu forcieren? Vielversprechende Möglichkeiten bieten zum Beispiel granulometrische Optimierungsmaßnahmen an klinkerreduzierten Zementen bzw. die Anpassung des Wasserzementwertes entsprechender Betone. Gezielte Veränderungen von Zement- und Mörtelzusammensetzungen sollten dazu beitragen, wesentliche Frisch- und Festmörtel Eigenschaften zu steuern und somit Voraussetzungen zu schaffen, klinkerreduzierte Zemente in baupraktische Anwendungen zu bringen.

Die VDZ Technology gGmbH und das F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde haben klinkereffiziente Zemente unter Verwendung von Kalkstein in Kombination mit Hüttensand hergestellt. Der Klinkerfaktor lag bei 50% bzw. bei 35%. Außerdem kam ziegelreiches Recyclingmaterial aus der Planziegelproduktion als alternativer, puzzolanischer Zementbestandteil zur Anwendung. Einige Zemente wiesen bei einem Kalksteinanteil von 30 M.-% und einem Klinkeranteil von 40 M.-% Zusammensetzungen außerhalb der Zementnorm auf (sog. CEM X (S-LL)-Zemente). Durch die Verwendung eines solchen Zementes verringert sich das Treibhauspotential eines entsprechenden durchschnittlichen Betons vergleichbarer Festigkeit bzw. Dauerhaftigkeit um etwa 35 bzw. 25 %. In dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekt wurden die granulometrischen Eigenschaften der Zemente und ihre Effekte auf dauerhaftkeitsrelevante Betoneigenschaften untersucht. Darüber hinaus wurde untersucht, wie granulometrisch optimierte Zemente eigenschafts- und anwendungsgerecht geprüft werden können.

Das Forschungsprojekt "Granulometrische Optimierung klinkereffizienter Zemente – Effekte auf die Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit von Beton" (AZ 34647/01) wurde von der DBU gefördert sowie von der Spenner GmbH & Co. KG und der Loesche GmbH unterstützt.

2 Hintergrund und Ziele

Frühere Untersuchungen an CEM II/B-M-Zementen mit einem Klinkerfaktor von 65% zeigten mit zunehmender Zementpackungsdichte weichere Mörtelkonsistenzen mit entsprechend höheren Ausbreitmaßen und geringere Druckfestigkeiten in der Zementnormprüfung bei konstantem Wasserzementwert (vgl. IGF 17853 BG [1] [2]).

Auch die Dauerhaftigkeit der mit diesen Zementen hergestellten Betone wurde erheblich beeinflusst, sobald bei konstanter stofflicher Zementzusammensetzung sowie unter konstanten Randbedingungen während der Betonprüfung die Packungsdichten der Zemente variierten. Wurden Zemente mit vergleichsweise geringer Packungsdichte angewendet, so haben die Betone die in Deutschland (Zulassungsverfahren des Deutschen Instituts für Bautechnik, DIBt) geforderten dauerhaftkeitsrelevanten Parameter (Verfahren und Kriterien) i. d. R. erfüllt [1] [2]).

Die Zemente wiesen immer dann eine vergleichsweise geringe Packungsdichte auf, wenn der dominierende Hauptbestandteil Klinker mit einem Anteil vom **65 M.-%** im Zement eine möglichst enge Korngrößenverteilung (KGV) bei möglichst hoher Mahlfeinheit (Blainwert) aufwies. Auch die KGV bzw. die Feinheit der anderen Hauptbestandteile Kalkstein und Hüttensand hatten die Packungsdichte der Zemente – je nach Anteil im Zement – geringfügig beeinflusst. Insofern wurden die aus der KGV des Klinkers primär entstandenen granulometrischen Effekte verstärkt oder abgeschwächt. Im Idealfalle hatten alle Bestandteile bei jeweils hoher Mahlfeinheit und gleichzeitig enger KGV zu einer weiteren verringerten Packungsdichte eines CEM II/B-M (S-LL)-Zementes geführt, sodass sowohl in der Druckfestigkeitsprüfung als auch in der Dauerhaftigkeitsprüfung entsprechende Nachweise der Eignung erbracht werden konnten.

Die im Vorgängerprojekt (IGF 17853 BG) ermittelten Erkenntnisse sollten nunmehr auf Zusammensetzungen klinkerreduzierter Zemente angewendet werden. Es wurde untersucht, ob bei Einstellung einer besonders engen Klinker-KGV mit einem Anteil von **50 M.-%** bzw. **35 M.-%** Klinker im Zement ebenfalls granulometrische Effekte auf die Dauerhaftigkeit zu beobachten waren und welchen Einfluss die granulometrischen Eigenschaften der andern, z. T. weniger reaktiven Zementbestandteile hatten, wenn sie mit 20 M.-% bis zu 45 M.-% neben Klinker eingesetzt wurden.

Insofern wurden auch für diese Untersuchungen möglichst alle Bestandteile mit vergleichsweise hohen Feinheiten sowie engen KGV versehen, um den stofflichen „Verdünnungseffekt“ des von 65 M.-% auf 50 M.-% bzw. 35 M.-% verringerten Klinkeranteils granulometrisch abzufedern bzw. auszugleichen.

Neben dem technischen Ziel, granulometrisch optimierte Zemente herzustellen und in dauerhaften Betonen anzuwenden, wurden auch die umweltrelevanten Projektziele verfolgt. Die Kenntnisse aus dem Projekt tragen dazu bei, die Prozessemissionen (CO₂) bei der Herstellung von klinkereffizienten Zementen und damit die CO₂-Intensität der Betonbauweise weiter deutlich zu senken. Der Klinkerbrennprozess verursacht etwa 60% der bei der Portlandzementherstellung entstehenden CO₂-Emissionen. Zur Verringerung des Treibhauspotenzials wurde der Klinkeranteil der hier untersuchten Zemente auf 50 M.-% bzw. auf 35 M.-% reduziert.

Lag das Treibhauspotenzial eines deutschen Durchschnittszements mit ca. 75 M.-% Klinker zu Projektbeginn (2019) bei rd. 590 kg CO₂-Äq/t (zzgl. rd. 110 kg CO₂-Äq aus der Verbrennung von Sekundärbrennstoffen), so sollte das Treibhauspotenzial der klinkereffizienten Zemente mit 50 M.-% (CEM II/C) bzw. 35 M.-% Klinker (CEM VI) auf ≤ 400 kg CO₂-Äq/t (zzgl. Verbrennung von Sekundärbrennstoffen) reduziert werden.

Das folgende **Bild 1** veranschaulicht die umweltrelevanten Ziele des Projektes:

- das Treibhauspotenzial auf 400 kg CO₂-Äq/t absenken
- den Klinkerfaktor in Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen verringern

und vergleicht neue CEM II/C-Zemente mit 50 M.-% Klinker mit CEM II/B- bzw. CEM II/A-Zementen mit 65 M.-% bzw. 80 M.-% Klinker.

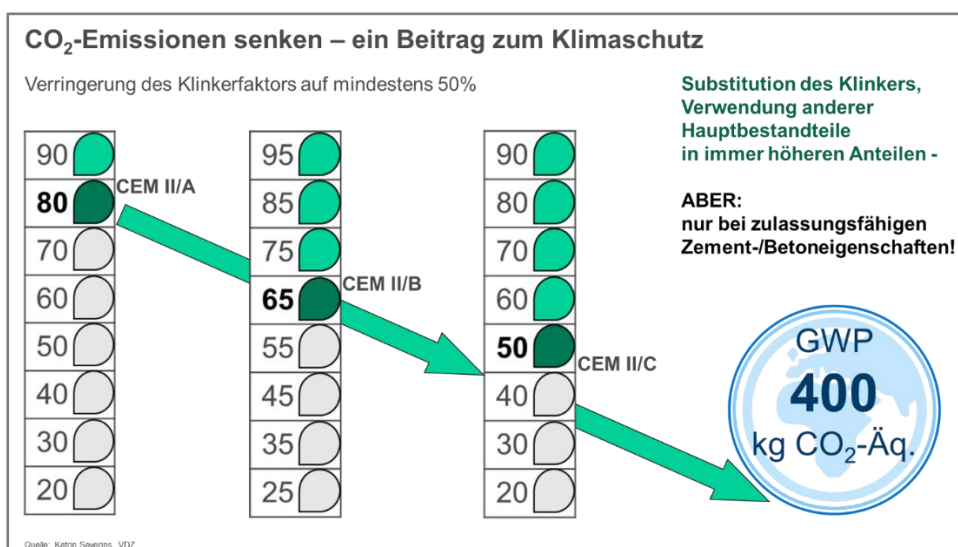


Bild 1

Schematische Darstellung der umweltrelevanten Projektziele

Quelle: „Granulometrische Einflüsse klinkereffizienter Zemente auf den Frost- und Frost-Tausalzweierstand von Beton“; Katrin Severins, Christoph Müller, Luise Wedekind, H.-M. Ludwig; IBAUSIL; Weimar, 13. – 15. September 2023

3 Charakterisierung und Aufbereitung der Ausgangsrohstoffe

3.1 Ausgangsrohstoffe

Die Versuchszemente bestanden aus mehreren Hauptbestandteilen, die durch getrenntes Mahlen und anschließendes Mischen sowie durch gemeinsames Mahlen ohne anschließendes Mischen hergestellt wurden. Als Hauptbestandteile wurden Klinker, Kalkstein, Hüttensand und Ziegelschleifstaub verwendet. Als Sulfatträger sind Anhydrit und Gips geregelte Zusätze für die Zemente (Sulfatträger). Der Rohstoff Gips muss, um als Sulfatträger eingesetzt zu werden, vorher thermisch entwässert und somit zu Halbhydrat umgewandelt werden.

Durch die getrennte Mahlung war es möglich, die granulometrischen Eigenschaften der Hauptbestandteile gezielt zu beeinflussen. Im Vorfeld wurden die Materialien gesondert zerkleinert und dann für die jeweiligen CEM II/C-M-Zemente bzw. CEM VI-Zemente gemischt. Für die erste Untersuchungsserie wurden vier Hauptkomponenten als Zementkomposite ausgewählt: Klinker, Kalkstein, Hüttensand und Ziegelschleifstaub (siehe **Bild 2**). Die Sulfatträger Anhydrit und Halbhydrat wurden vermahlen und bei 125 µm gesiebt.



Bild 2 Die Materialien Klinker (l.), Ziegelschleifstaub (o. r.) und Kalkstein vor der mechanischen Zerkleinerung in der Kugelmühle

3.2 Chemisch-mineralogische Untersuchungen an den Ausgangsrohstoffen

Die chemische Analyse der Ausgangsstoffe (Rohstoffe) ist in **Tabelle 1** dargestellt. Von insgesamt sechs Rohstoffen sind Klinker, Kalkstein, Hüttensand und Ziegelschleifstaub die Hauptzementkomposite. Halbhydrat und Anhydrit sind für das Erstarren notwendige Sulfatträger und damit Nebenbestandteile.

Tabelle 1 Analysenergebnisse aus der chemischen und mineralogischen Analyse, Bestimmung CO₂ und H₂O Gehalt wurde nach dem Prüfverfahren A-01-082:2012 (950°C/IR) durchgeführt, der Glühverlust ergibt sich aus der Summe aus CO₂ und H₂O Gehalt, Bestandteile wurden unter Beachtung der DIN EN 196-2:2013 bestimmt

Zusammensetzung in %	Klinker K	Kalkstein LL	Hüttensand S	Ziegelschleifstaub Q	Anhydrit AH	Gips DH
Kohlendioxid	0,14	43,22	0,12	0,40	2,97	0,42
Wasser	0,29	0,10	0,13	4,45	16,82	0,56
Glühverlust	0,43	43,32	0,25	4,85	19,79	0,98
Silizium(IV)oxid	22,09	0,69	36,91	0,33	6,48	28,91
Aluminiumoxid	4,44	0,27	11,28	<0,08	1,77	54,88
Titanoxid	0,22	0,02	1,07	0,01	0,10	15,81
Phosphor(V)oxid	0,17	0,05	<0,01	<0,01	0,02	0,74
Eisen(III)-oxid	3,16	0,15	0,38	0,05	0,71	0,18
Mangan(III)-oxid	0,06	0,02	0,37	<0,01	<0,01	6,45
Magnesiumoxid	1,77	1,27	7,39	0,34	1,99	0,19
Calciumoxid	66,37	54,01	42,36	39,35	29,31	5,47
Sulfat als SO ₃	0,55	0,01	0,09	54,73	38,36	10,60
Kaliumoxid	0,83	0,07	0,44	0,01	0,47	0,38
Natriumoxid	0,25	<0,02	0,26	<0,02	0,10	0,59
Na ₂ O-Äquivalent	0,80	0,06	0,55	<0,02	0,41	2,92
Amorpher Anteil			~ 100	~ 26		
Anhydrit					~ 66	
Gips					~ 34	~ 75
Dolomit		~ 1,3				~ 20
Quarz		~ 0,7		~ 23		~ 3
Calcit		~ 98				~ 2
C ₃ S	~ 56					
C ₂ S	~ 22					
C ₃ A	~ 10					
C ₄ AF	~ 12					
Albit				~ 12		
Biotit				~ 7		
Hämatit				~ 6		
Mikroclin				~ 26		

Neben den chemischen Analysen wurden die Ausgangsstoffe zudem mineralogisch untersucht. Die Ergebnisse gehen aus **Tabelle 1** sowie in **Bild B-2** bis **Bild B-7** im Anhang hervor. Diese Analyse bezieht sich vordergründig auf die Anwendungseigenschaften der Rohstoffe. Zum einen erfolgte durch die pulverdiffraktometrischen Untersuchungen eine Qualitätskontrolle, zum anderen dienten diese für weitere Schlussfolgerungen: Beim Ziegelschleifstaub konnte nachgewiesen werden, dass alle drei Kornfraktionen (< 125 µm, 125 - 500 µm, > 500 µm) die gleiche mineralogische Zusammensetzung aufweisen.

3.3 Mechanische Aufbereitung und granulometrische Eigenschaften

Für den Einsatz in den Versuchszementen wurden Klinker, Kalkstein, Hüttensand und Ziegelschleifstaub mittels Vertikalrollenmühle (Wälzmühle) der Loesche GmbH und/oder mittels einer Kugelmühle der Firma Laarmann aufgemahlen. Die im kontinuierlichen Betrieb arbeitende Wälzmühle ist mit einem integriertem Sieb ausgestattet: Das Mahlgut wird dem Mahlprozess solange erneut zugeführt, bis die Zielmahlfeinheit des Siebfeingutes erreicht wird. Bei der Kugelmühle werden die Materialien

diskontinuierlich aufgemahlen: Das Mahlgut verbleibt so lange in der Mühle, bis der gewünschte Zerkleinerungsgrad erreicht ist. Ziel der kontrollierten Zerkleinerung war, dass die Komponenten Klinker und Kalkstein in gleicher Feinheit, aber unterschiedlichen Partikelgrößenverteilungen vorliegen. Hüttensand sollte in gleicher Korngrößenverteilung aber unterschiedlicher Feinheit untersucht werden. Die puzzolanische Komponente Ziegelschleifstaub, welche bei der Herstellung von Planziegeln anfällt, hat als Schleifstaub nicht nur Feinanteile – sondern auch sogenanntes Spritzkorn oder Abplutzer, welche ebenfalls eine mechanische Zerkleinerung notwendig machten. Eine Übersicht aller Komponenten ist in **Tabelle 2** gelistet. Somit unterscheiden sich die Ausgangsstoffe für die Versuchszemente nicht nur chemisch-mineralogisch, sondern auch in ihren granulometrischen Eigenschaften.

Anhand der Mahldauer in der Chargenkugelmühle lassen sich Rückschlüsse auf die Mahlbarkeit der Ausgangsstoffe ziehen. Der Kalkstein wurde in der Kugelmühle binnen ca. 20 min auf die gewünschte Zielfeinheit vermahlen. Bei dem schwer mahlbaren Klinker wurde ein Wert von ca. 4000 cm²/g erst nach ca. 75 Minuten erreicht (bei gleicher Kugelmühle, Gattierung und Materialfüllgrad). Der sehr leicht mahlbare Ziegelschleifstaub wurde bei 125 µm abgesiebt, der Rückstand wurde gemahlen. Nach 5 Minuten wurde eine Mahlfeinheit von ca. 4500 cm²/g erreicht.

Tabelle 2 Granulometrische Eigenschaften der Ausgangsstoffe für die Versuchszemente, K = Klinkermehl, S = Hüttensandmehl, Q = Ziegelmehl, LL = Kalksteinmehl

Eigenschaften		Klinker		Kalkstein		Hüttensand		Ziegelschleifstaub
		K1-M	K1-W	LL0	LL1	S1-4	S1-5	
Mahlaggregat		Wälzmühle	Kugelmühle	Wälzmühle	Kugelmühle	Wälzmühle		Wälzmühle
Breite der KGV	-	eng	breit	breit	breit	eng		breit
Blaine-Wert	cm ² /g	5100	5010	3830	3875	4000	4970	9150
Reindichte	g/cm ³	3,254	3,240	2,772	2,773	2,989	3,012	2,097
Packungsdichte	-	0,386	0,485	0,548	0,580	0,391	0,381	0,404
Steigung n	-	0,94	0,78	0,73	0,70	1,05	1,10	0,83
Lageparameter x'	µm	8,04	8,09	21,94	21,61	13,65	10,39	14,05

Nach der mechanischen Aufbereitung im Mahlprozess folgte eine Zugabe der auf Klinker und Hüttensand angepassten Sulfatmengen und eine Homogenisierung aller Zementbestandteile. In Anlehnung an die Zusammensetzung von CEM II/C-M-Zementen wurden die Versuchszemente mit 50 M.-% Klinker und 20 M.-% Kalkstein und 30 M.-% Hüttensand bzw. Ziegelschleifstaub hergestellt. Durch die Zerkleinerung des Klinkers und des Hüttensandes auf der Wälzmühle wurden enge Partikelgrößenverteilungen erzeugt. Im Gegensatz dazu wurden bei der Mahlung des Klinkers und des Kalksteins mittels Kugelmühle breitere Korngrößenverteilungen erzielt. Obwohl durch die Mahlung des Kalksteins in der Vertikalmühle eine enge Korngrößenverteilung zu erwarten war, konnte dies durch die Steigung der Regressionsgeraden, welches als Maß für die Breite der Partikelgrößenverteilung verwendet wird, nicht eindeutig nachgewiesen werden (dies kann auch messtechnisch begründet sein). Anhand der unterschiedlichen Packungsdichten dieser beiden Kalksteinmehle kann aber davon ausgegangen werden, dass beide signifikante Unterschiede in der Verteilungsbreite zeigen.

In Laufe des Projektes wurden weitere Ausgangsstoffe verwendet. Die Analysen dieser Komposite sind in **Tabelle 3** dargestellt.

Tabelle 3 Granulometrische Eigenschaften der Ausgangsstoffe für die Versuchszemente, C5 = Klinkermehl, S2-6 = Hüttensandmehl, LL = Kalksteinmehl

Eigenschaften		Klinker	Kalkstein		Ziegelschleifstaub
		C5	LL1-7	LL2	S2-6
Mahlaggregat		Wälzmühle	Kugelmühle		Wälzmühle
Blaine-Wert	cm ² /g	5500	7500	3000	6250
Reindichte	g/cm ³	3,249	2,820	n. b.	3,018
Packungsdichte	-	0,448	0,516	n. b.	0,415
Steigung n	-	1,28	0,73	n. b.	1,29
Lageparameter x'	µm	10,28	22,13	n. b.	9,76

4 Herstellung und Zusammensetzung der klinkereffizienten Versuchszemente

4.1 Verfahren der labortechnischen und halbtechnischen Herstellung

Die Versuchszemente wurden vorrangig durch getrenntes Mahlen und anschließendes Mischen der mehlfinen Hauptbestandteile Klinker, Kalkstein und Hüttensand mit einem Sulfatträger im Labor hergestellt.

Es wurden darüber hinaus auch Kombinationen aus sulfatisiertem Klinker, Kalkstein und laborseitig aufbereitetem Ziegelschleifstaub (Ziegel-Recyclingmehl) gemischt (vgl. [3] [4]). Das puzzolanisch wirk-same Ziegel-Recyclingmehl wurde alternativ zur puzzolanischen Steinkohlenflugasche verwendet. Mit einem Anteil von 26,5 M.-% an reaktionsfähigem Siliciumdioxid erfüllte dieses Ziegelmehl das wesentliche Kriterium der DIN EN 197-1, Abschnitt 5.2.3.1 bzw. 5.2.3.3 geforderten Eigenschaften für natürliche getemperte Puzzolane (kurz: Q).

Einige klinkereffiziente Zemente mit vergleichsweise geringen Klinkergehalten von bis zu 35 M.-% bzw. erhöhten Anteilen anderer Bestandteile wurden auf der Basis eines großtechnisch hergestellten Portlandzements (CEM I 52,5 R als Klinkerkomponente) hergestellt. Außerdem kam in diesen Zementen ein weiteres, noch feineres Hüttensandmehl mit vergleichsweise enger Korngrößenverteilung aus großtechnischer Herstellung zur Anwendung.

Die großtechnisch gemahlene Ausgangsstoffe hatten die gleiche Werksherkunft wie die entsprechenden Ausgangsstoffe für die labortechnische Aufbereitung.

Das Prinzip der getrennten Aufbereitung und des anschließenden Mischens der Versuchszemente geht aus der schematischen Darstellung im **Bild 3** hervor.

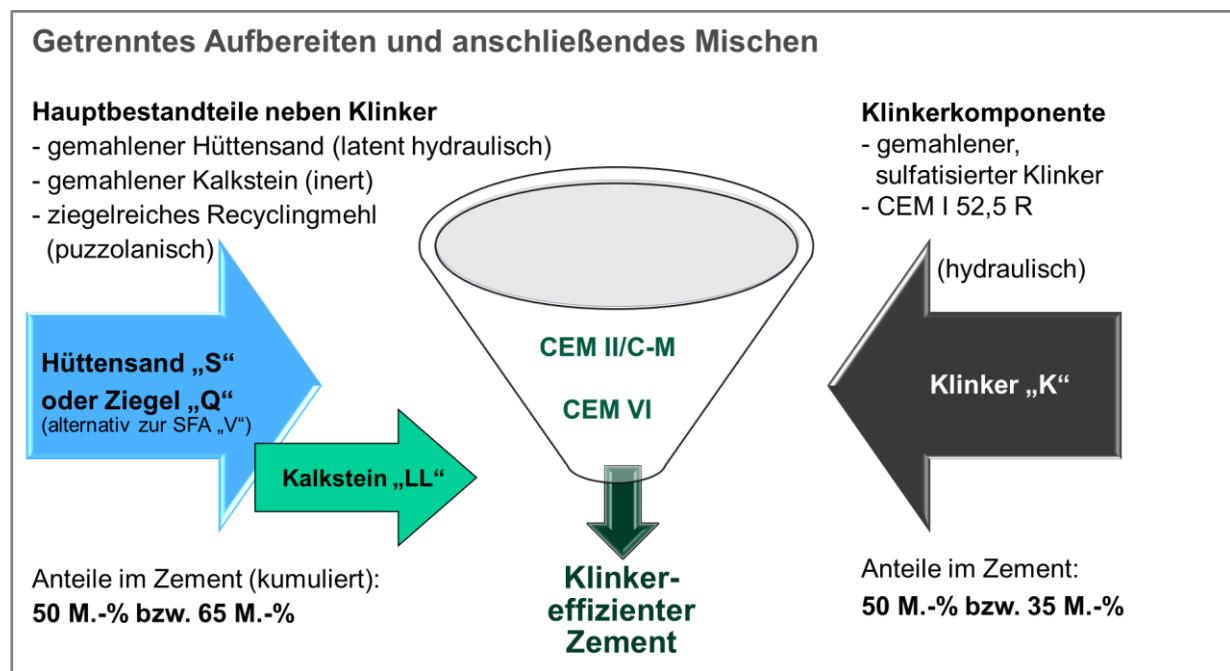


Bild 3 Schematische Darstellung zur Herstellung der Versuchszemente durch getrenntes Aufbereiten und anschließendes Mischen der mehlfinen Ausgangsstoffe

Darüber hinaus wurden drei Versuchszemente in CEM II/C-Zusammensetzung (50 M.-% Klinker) jeweils auf einer diskontinuierlichen Laborkugelmühle gemeinsam gemahlen. Vor dem Mahlversuch lag das jeweilige Frischgut in vergleichsweise geringer Feinheit vor. Ziel der Mahlversuche war es, die Mahlfinheit des Mahlgutes deutlich zu erhöhen und damit seine Packungsdichte weitestgehend zu verringern.

In einem weiteren Mahlversuch auf einer halbtechnischen Wälzmühle wurden Klinker, Hüttensand und Kalkstein in einer sog. „CEM X-Zusammensetzung (Zusammensetzung außerhalb der DIN EN 197-5) gemeinsam gemahlen. Die Wälzmühle arbeitete kontinuierlich im stationären Betrieb. Auch in diesem Mahlversuchen war es Ziel, die Packungsdichte des Mahlgutes maximal zu verringern.

4.2 Zusammensetzung der Versuchszemente

Der überwiegende Teil der Versuchszemente wies die stoffliche Zusammensetzung eines CEM II/C-M (S-LL) Zements mit konstant 50 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 20 M.-% Kalkstein auf. Durch Variation der Aufbereitungsverfahren sowie der granulometrischen Eigenschaften entstanden mehr als 20 Versuchszemente mit konstanter stofflicher Zusammensetzung. Die an ihnen untersuchten Zement- und Mörtel Eigenschaften bildeten eine ausführliche Datenbasis für Auswahl geeigneter Zemente für die Betonprüfung. Außerdem wurde aus den Ergebnissen der CEM II/C-M (S-LL)-Mörtelversuche abgeleitet, wie ein ziegelhaltiger CEM II/C-M (Q-LL), ein klinkerreduzierter CEM VI oder sogar ein CEM X mit 30 M.-% Kalkstein granulometrisch anzupassen wäre.

Die folgende Übersicht fasst die Zusammensetzung der Versuchszemente zusammen.

Tabelle 4 Zusammensetzung der Versuchszemente

Zement	Klinker	Hüttensand Ziegel	Kalkstein
CEM II/C-M (S-LL)	50 M.-% K	30 M.-% S	20 M.-% LL
CEM II/C-M (Q-LL)	50 M.-% K	30 M.-% Q	20 M.-% LL
CEM VI (S-LL)	35 M.-% K	45 M.-% S	20 M.-% LL
CEM X (S-LL)	40 M.-% K	30 M.-% S	30 M.-% LL
(CEM X (S-LL))	(35 M.-% K)	(30 M.-% S)	(35 M.-% LL)

5 Vorversuche - Granulometrischer Einfluss der Hauptbestandteile auf die Eigenschaften von getrennt gemahlene CEM II/C-M-Zementen

5.1 Herstellung erster Versuchszemente GC1 bis GC 12

Nach der getrennten Vermahlung der Hauptbestandteile und der Sulfatträger erfolgte das Mischen der Zemente der ersten Versuchsserie. Um eine vollständige Homogenisierung der Hauptbestandteile zu gewährleisten, wurden die Versuchszemente 30 bis 60 Minuten auf einer Rollenbank gemischt. Die mehlfine Sulfatträger, welche aufgrund der großen spezifischen Oberfläche agglomerieren können, wurden vor dem Mischen nochmals durch ein 125 µm Sieb desagglomeriert. Ziel war es, dass alle Bestandteile der CEM II/C-M-Zemente gleichmäßig verteilt in der Mischung vorliegen. Die Kontrolle der vollständigen Mischung erfolgte optisch und nachträglich mittels mineralogischer Untersuchungen (Röntgenbeugung).

5.2 Untersuchungen zur Packungsdichte der Versuchszemente GC1- GC12

Durch die spezifischen granulometrischen Eigenschaften der Ausgangsstoffe Klinker, Kalkstein, Hüttsand oder Ziegelschleifstaub können gezielt die granulometrischen Eigenschaften der CEM II/C-M-Zementmischungen eingestellt werden. Zusammensetzung und Eigenschaften dieser ersten CEM II/C-M Zemente sind in **Tabelle 5** dargestellt.

Tabelle 5 Übersicht zu der Zusammensetzung der Versuchszemente sowie der granulometrischen Eigenschaften der Versuchszemente GC 1 bis GC 12, K = Klinkermehl, HÜS = Hüttsandmehl, Q = Ziegelmehl, KS = Kalksteinmehl

Probennummer	Zementzusammensetzung			Granulometrische Eigenschaften			
	50 M.-% Klinker	30 M.-% Hüttsand bzw. Ziegel	20 M.-% Kalkstein	Lageparameter x' [µm]	Steigung n [-]	Packungsdichte [-]	Blaine [cm ² /g]
GC1	eng	HÜS grob	Wälzmühle	10,31	0,96	0,422	4900
GC2	eng	HÜS fein		9,35	0,99	0,416	5250
GC3	eng	Q		11,14	0,83	0,426	6200
GC4	breit	HÜS grob		12,00	0,83	0,459	4750
GC5	breit	HÜS fein		10,25	0,85	0,456	5350
GC6	breit	Q		13,86	0,71	0,456	5700
GC7	eng	HÜS grob	Kugelmühle	11,31	0,90	0,420	5050
GC8	eng	HÜS fein		11,08	0,89	0,412	5000
GC9	eng	Q		13,08	0,77	0,421	5200
GC10	breit	HÜS grob		12,23	0,78	0,458	4850
GC11	breit	HÜS fein		10,56	0,80	0,453	4800
GC12	breit	Q		11,86	0,75	0,452	5650

Die Packungsdichten der CEM II/C-M-Zemente (GC 1 bis GC 12) wurden maßgeblich von der Granulometrie der Hauptkomponente Klinker beeinflusst, die im Zement mit 50 M.-% vorlag. Durch das breit verteilte Klinkermehl, welches auf der Kugelmühle erzeugt wurde, sind die Packungsdichten dieser CEM II/C-M Zementmischungen deutlich höher als die Packungsdichten der CEM II/C-M mit Klinkermehl aus der Wälzmühle (siehe **Bild 4**).

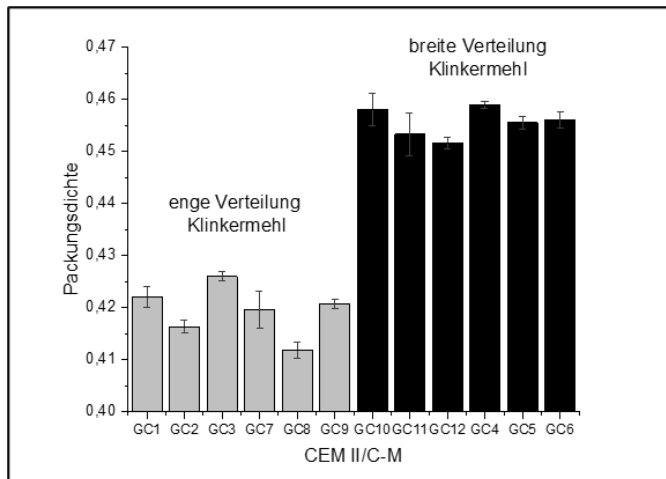


Bild 4 Packungsdichte der CEM II/C-M-Zemente GC 1 bis GC 12 aus der Vorversuchsserie

Die 20 M.-% Kalksteinmehl und 30 M.-% Hüttensand/Ziegelschleifstaub in den CEM II/C-M-Zementen haben massenbezogen einen kleineren Einfluss auf die Packungsdichte der jeweiligen Versuchszemente. Aus diesem Grund sind die Unterschiede der Packungsdichten bei Betrachtung dieser Komponenten (Kalksteinmehl, Hüttensand, Ziegelschleifstaub) nicht so signifikant (siehe **Bild 5**): Versuchszemente mit Kalksteinmehl aus der Kugelmühle zeigen etwas geringere Packungsdichten als Zementmischungen mit Kalksteinmehl aus der Wälzmühle. Versuchszemente mit feiner aufgemahltem Hüttensand zeigen geringere Packungsdichten als Versuchszemente mit gröberem Hüttensand. Versuchszemente mit Ziegelmehl zeigen keinen eindeutigen Trend in ihrer Packungsdichte.

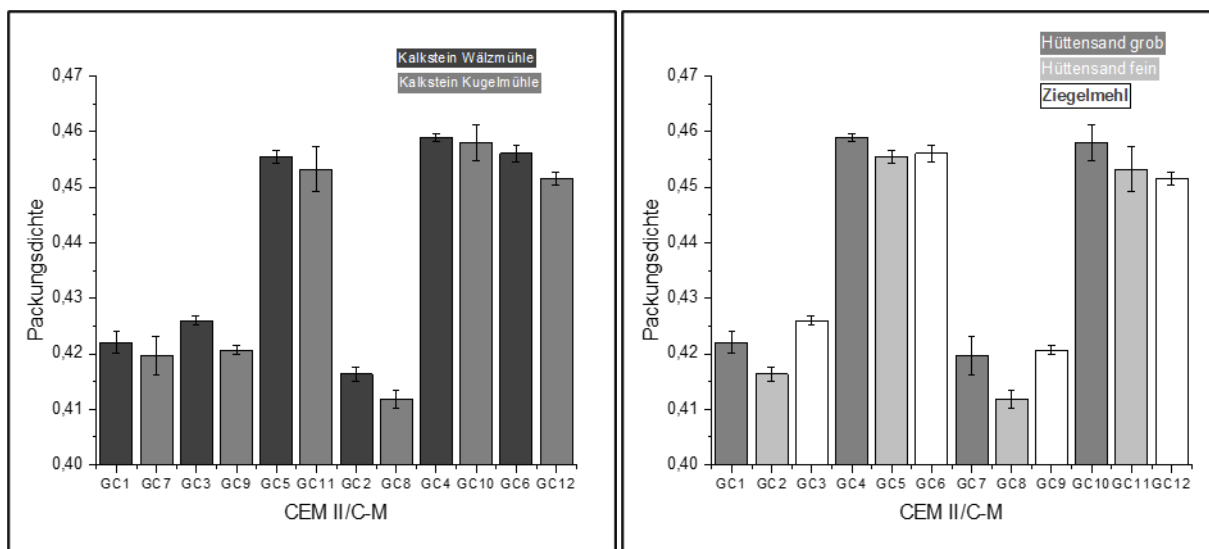


Bild 5 Packungsdichte der CEM II/C-M-Zemente, linkes Bild: 2 Säulen nebeneinander unterscheiden sich einzig in der Kalksteinaufbereitung, rechtes Bild: 3 Säulen nebeneinander unterscheiden sich einzig in der Hüttensandfeinheit bzw. im Ziegelmehlanteil

5.3 Granulometrische Einflüsse auf den Wasseranspruch für Normsteife nach DIN EN 196-3

Die granulometrischen Eigenschaften wie Steigung und Lageparameter der RRSB-Verteilung jeder Zementkomponente wirken sich mehr oder weniger stark auf die Packungsdichte der Versuchszemente aus. Je optimierter die Packungsdichte der Versuchszemente eingestellt wurde, um so geringer wird der Hohlraumgehalt im Zement. Dadurch steht weniger Raum für das Wasser, welches beim

Anmischen verwendet wird, zur Verfügung und der Wasseranspruch des zementären Systems wird geringer. Die Abnahme des Wasseranspruchs mit steigender Packungsdichte bei der Versuchsserie GC 1 bis GC 12 ist in **Bild 6** dargestellt.

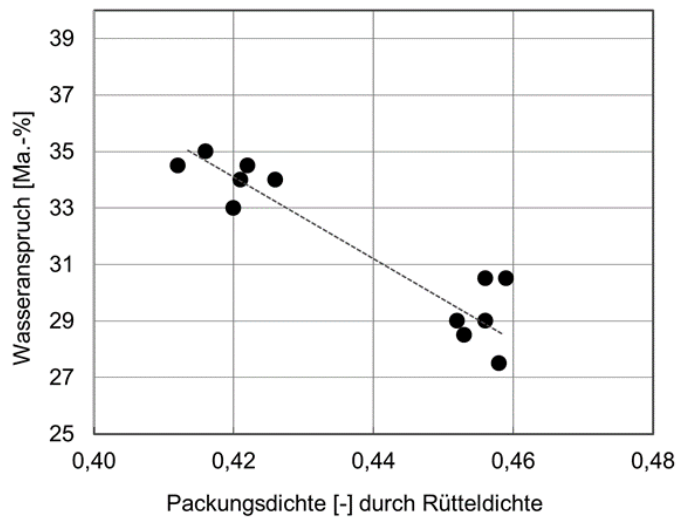


Bild 6 Veränderung des Wasseranspruchs für Normsteife mit steigender Packungsdichte des Zements

Betrachtet man im Speziellen das Diagramm bezüglich der Klinkerkomponente, ist zu erkennen, dass die Versuchszemente mit breit verteiltem Klinker eine höherer Packungsdichte als die Versuchszemente mit einem eng verteilten Klinker haben und dadurch auch einen geringeren Wasseranspruch aufweisen (siehe **Bild 7**). Bei den Kompositen Hüttensand, Ziegelschleifstaub und Hüttensand ist dieser Effekt nicht deutlich nachweisbar. Wie im **Bild 8** zu erkennen, liegen die Werte des händisch ermittelten Wasseranspruches so nah beieinander, dass kein eindeutiger Trend zu erkennen ist.

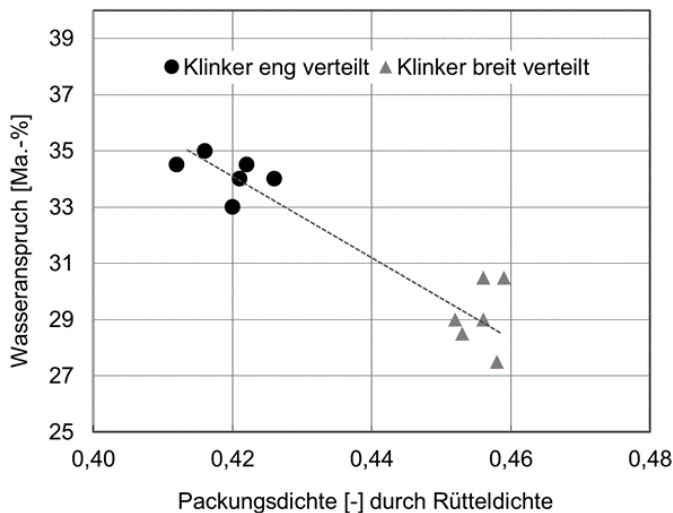


Bild 7 Veränderung des Wasseranspruchs für Normsteife mit steigender Packungsdichte des Zements, granulometrische Effekte aus der KGV des Klinkers

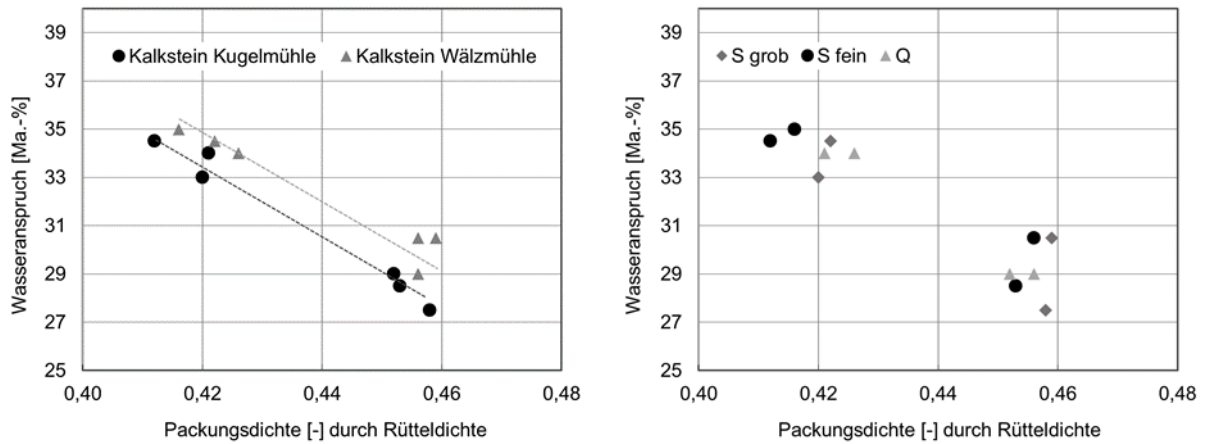


Bild 8 Veränderung des Wasseranspruchs für Normsteife mit steigender Packungsdichte des Zements, granulometrische Effekte aus der KGV des Kalksteins (links) und der KGV des Hüttensandes (rechts)

5.4 Granulometrische Einflüsse auf das Ausbreitmaß nach DIN EN 1015-3 und das Erstarren der Zemente nach DIN EN 196-3

Betrachtet man nach dem Wasseranspruch das Ausbreitmaß der Versuchszemente GC 1 bis GC 12, fällt auf, dass sich die unterschiedlichen Packungsdichten nicht auf das Ausbreitmaß und somit auf die Verarbeitbarkeit auswirken (siehe **Bild 9**).

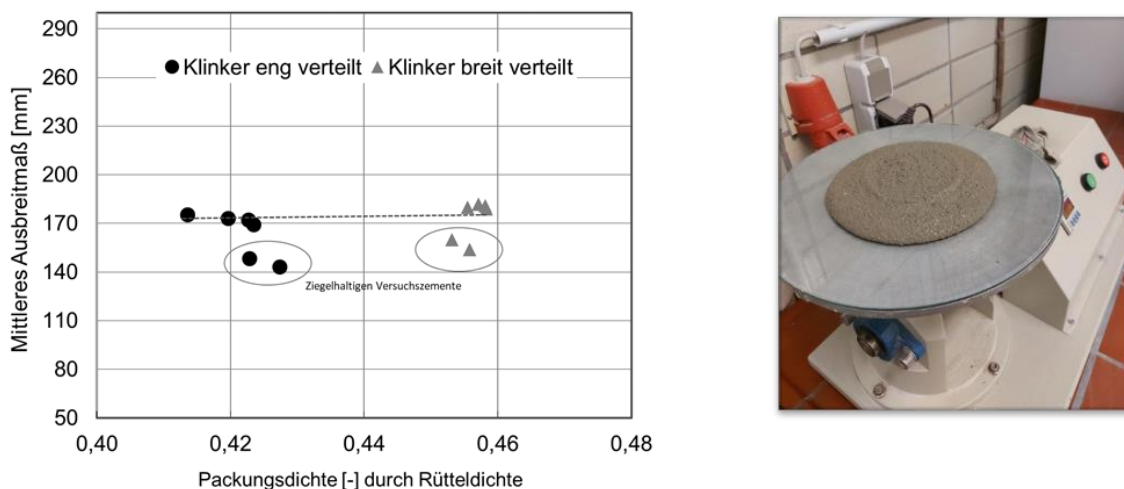


Bild 9 Auswirkungen der Packungsdichte des Zements auf das Ausbreitmaß der Mörtel (links), Bestimmung des Ausbreitmaßes am Beispiel des Versuchszementmörtels GC 11 (rechts)

Beim Wasseranspruch sowie beim Ausbreitmaß erfolgen die Untersuchungen kurz nach dem Mischen der Versuchszemente mit Wasser. Das heißt, dass hier die Packungsdichte eine entscheidende Rolle spielt. Die Bestimmung des Erstarrungsbeginns hat Bedeutung für die Praxis. Die Packungsdichte spielt dabei aber eine untergeordnete Rolle, weil die Hydratation schon weiter fortgeschritten ist. Aus diesem Grund sieht man in **Bild 10** unterschiedliche Trends im Erstarrungsbeginn bei Betrachtung der Hauptkomponente Klinker.

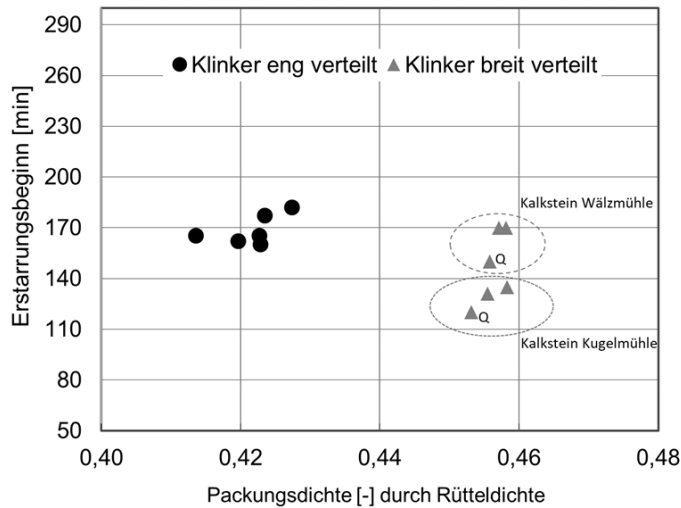


Bild 10 Auswirkungen der Packungsdichte auf den Erstarrungsbeginn des Zements

CEM II/C-M Versuchszemente mit eng verteiltem Klinkermehl und einer geringeren Packungsdichte zeigen keine signifikanten Unterschiede im Erstarrungsbeginn, obwohl die 6 Versuchszemente sich noch im Kalkstein, Hüttensand und Ziegelschleifstaubgehalt unterscheiden. Die CEM II/C-M Versuchszemente mit dem breit verteilten Klinkermehl aus der Kugelmühle und den höheren Packungsdichten weisen deutliche Unterschiede im Erstarrungsbeginn auf (siehe **Bild 10**). Für das jeweilige Materialsystem betrachtet, haben die Versuchszemente mit Kalksteinmehl aus der Kugelmühle einen früheren Erstarrungsbeginn als Versuchszemente mit Kalksteinmehl aus der Wälzmühle. Zudem erstarren Versuchszemente mit Ziegelmehl in ihrem jeweiligen Materialsystem früher als Versuchszemente mit Hüttensand.

5.5 Untersuchungen zur Mörtelfestigkeit an den Versuchszementen CEM II/C-M (GC1- GC12) nach getrenntem Mahlen und anschließenden Mischen

Nach den Untersuchungen am Zementleim bzw. am Frischmörtel folgte die Prüfung der Druckfestigkeit an Mörtelprismen (vgl. **Bild 11** und **Bild 12**).

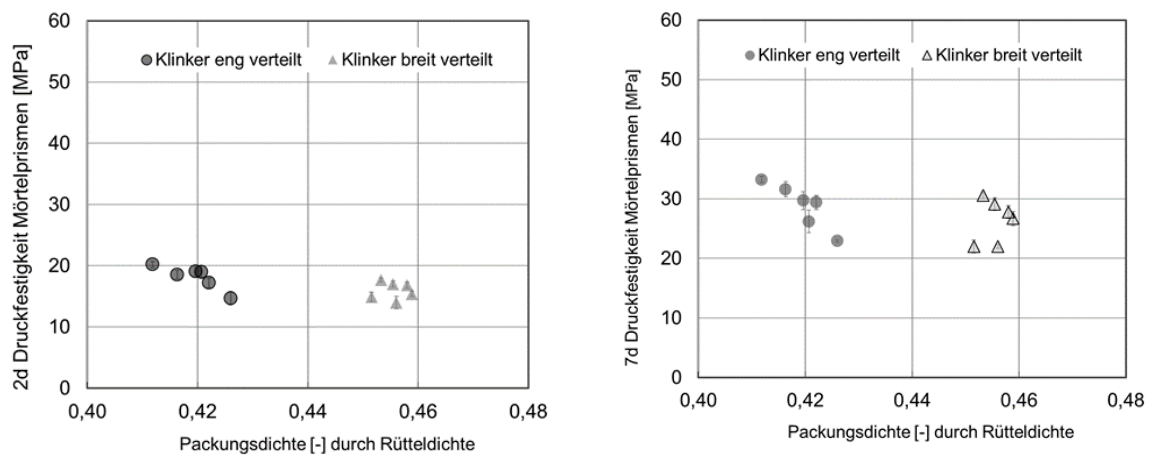


Bild 11 Einfluss der Packungsdichte auf die Druckfestigkeit der Mörtelprismen im Prüfalalter von zwei Tagen (links) und im Prüfalalter von sieben Tagen (rechts)

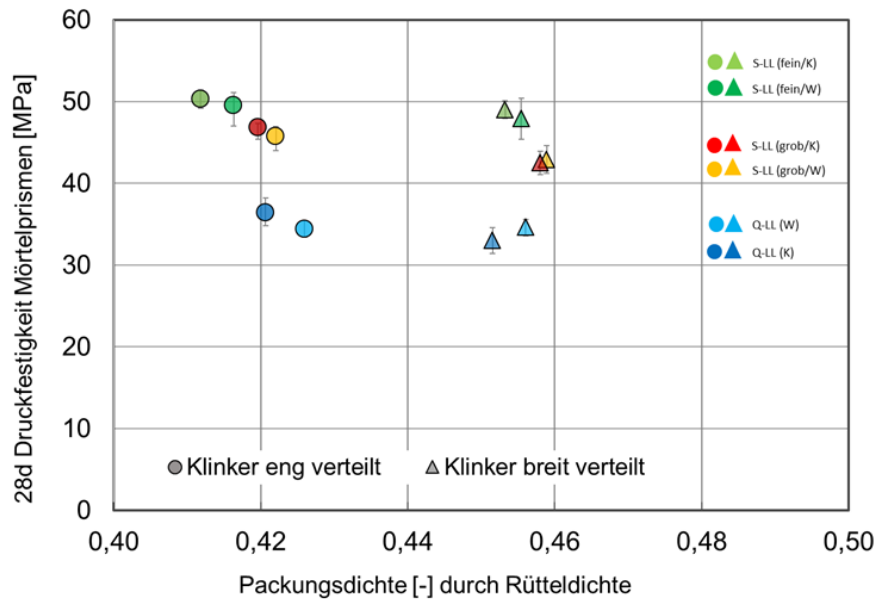


Bild 12 Einfluss der Packungsdichte auf die Druckfestigkeit der Mörtelprismen im Prüfalalter von 28 Tagen

Bei der 2- und 7 d-Festigkeit ist nur ein geringer Unterschied zwischen den einzelnen Druckfestigkeitswerten zu erkennen. Spätestens bei den 28 d-Festigkeiten sind klare Trends zu erkennen: Die Versuchszemente mit Ziegel zeigen deutlich niedrigere Festigkeitswerte, die Versuchszemente mit feinem Hüttensand zeigen deutlich höhere Festigkeiten. Die Versuchszemente mit grobem Hüttensand liegen dazwischen. Es ist erkennbar, dass die Versuchszemente mit höheren Packungsdichten unter Normbedingungen ($w/z = 0,50$) vergleichbare Festigkeiten wie die Versuchszemente mit geringerer Packungsdichte zeigen. Es besteht allerdings noch Verbesserungspotential durch eine Reduzierung des Wasserzementwertes bzw. des Wassergehaltes.

5.6 Untersuchungen der Porengrößenverteilung an den Normmörteln der Versuchszemente CEM II/C-M (GC1- GC12) nach getrenntem Mahlen und anschließenden Mischen

Neben den Untersuchungen zur Granulometrie der Zemente und den Mörtel Eigenschaften spielt die Porenstruktur eine entscheidende Rolle für die Dauerhaftigkeit von Betonen mit diesen Zementen. Je feiner die Porenstruktur, desto höher ist die Dauerhaftigkeit, da Wasser nicht in den Gelporenanteil des Betons eindringen kann und somit Frost-Tausalz Wechsel weniger Schäden verursachen können. Für die Bestimmung der Porengrößenverteilung wurden an ausgewählten Mörtelproben Quecksilberdruckporosimetriemessungen (siehe **Bild 13**) durchgeführt.

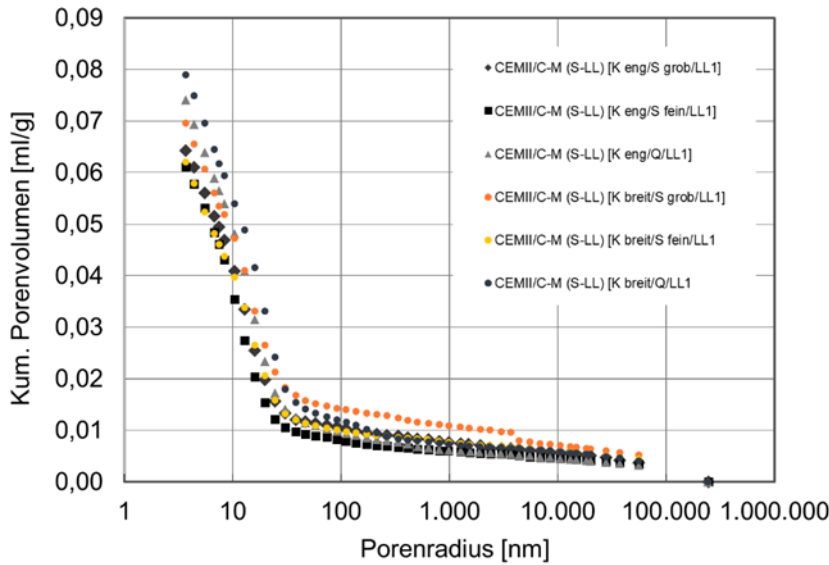


Bild 13 Porengrößenverteilung in Mörtelproben nach 28d ($w/z = 0,50$), Bestimmung mittels Quecksilberdruckporosimetrie

Bestimmt man den Grenzradius nach von den ausgewählten Versuchszementmörteln und trägt diesen auf, erkennt man, dass in den Mörtelproben aus den Versuchszementen bei geringeren Packungsdichten etwas geringere Porengrößen vorhanden sind (siehe **Bild 14**, rechts).

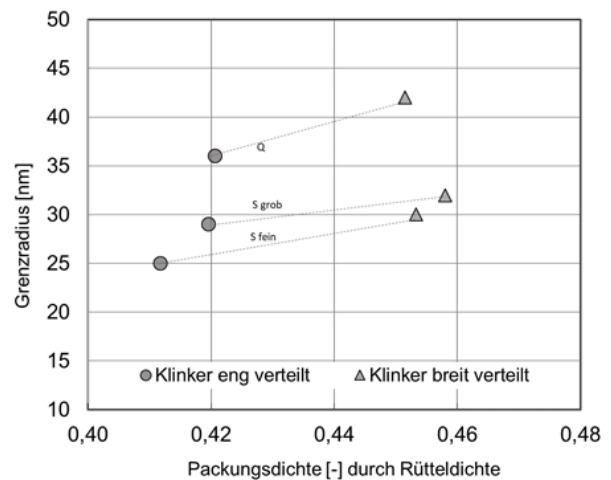
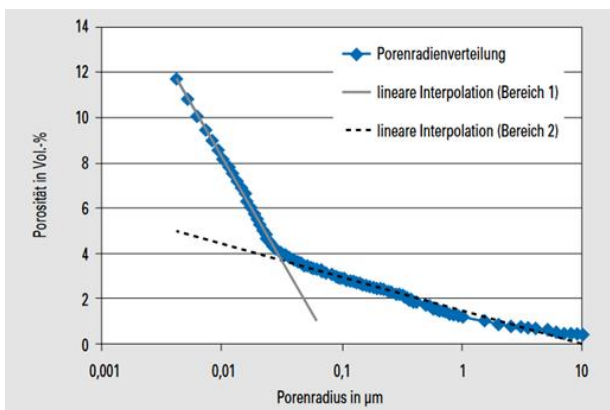


Bild 14 Linkes Bild: Bestimmung des Grenzradius gemäß *), rechtes Bild: Werte des Grenzradius bei den Versuchszementmörteln GC 7 – GC12 in Abhängigkeit der Packungsdichte der Zemente;
 *) *Information Betontechnik (2014) Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton. Verein Deutscher Zementwerke*

5.7 Untersuchungen des Hydratationsgrades

Da die CEM II/C-M Versuchszemente aus 3 Kompositen bestehen (die Sulfatträger nicht mit betrachtet), die sich chemisch und mineralogisch unterscheiden, haben diese nicht nur granulometrischen Einfluss auf die Hydratation der daraus hergestellten Zemente, sondern auch materialspezifischen Einfluss. Zudem ist für die Dauerhaftigkeit auch der Hydratationsfortschritt entscheidend [5]. Um diesen Einfluss zu untersuchen, wurde an den Proben GC 1 bis GC 12 der Hydratationsgrad bestimmt. Die Ergebnisse dazu sind in **Bild 15** dargestellt: Der Hydratationsgrad bewegt sich in einem Bereich von

ca. 65% bis 75%. Generell sind keine signifikanten Unterschiede beim Hydratationsgrad zwischen breit verteiltem und eng verteiltem Klinkermehl zu erkennen. Der höchste Hydratationsgrad wird mit feinem Hüttensand erreicht. Dabei spielt es keine Rolle, ob dieser in Mischung mit breit oder eng verteiltem Klinker vorliegt.

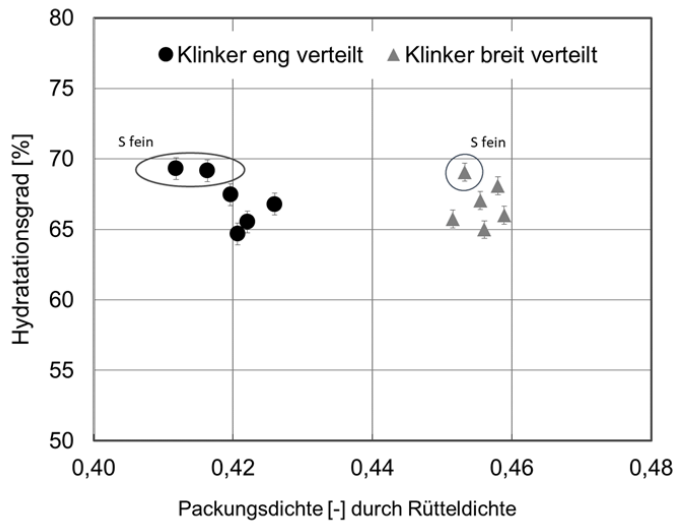


Bild 15 Einfluss der Packungsdichte auf den Hydratationsgrad des Zementleimes, S = Hüttensand

6 Eigenschaften der Versuchszemente nach gemeinsamer Vermahlung auf einer Chargen- kugelmühle

6.1 Gemeinsame Vermahlung der CEM II/C-M-Zemente mit Klinker, Hüttensand und Kalkstein

Für die Untersuchungen wurden auch gemeinsam gemahlene CEM II/C-M-Zemente hergestellt. Die Zusammensetzung dieser CEM II/C-M-Zemente ist in **Tabelle 6** dargestellt. Für die gemeinsame Vermahlung wurde der Klinker K1 in der Kugelmühle von Laarmann (FIB) bis zu einer festgelegten Mahlfineinheit vorvermahlen. Nach diesem ersten Schritt erfolgte ein Absieben bei 500 µm. Anschließend wurden Klinkermehl, Kalksteinmehl, Hüttensandmehl sowie die Sulfatträger Anhydrit und Halbhydrat auf Ihre Masseanteile für 25 kg homogenisiert und anschließend gemeinsam in der Kugelmühle vermahlen.

Tabelle 6 Zusammensetzung der Ausgangsstoffe für die gemeinsame Vermahlung des Versuchszementes CEM II/C-M (S-LL)

		Klinker	Kalkstein	Hüttensand
		K1	LL2	S1-4
Zusammensetzung	M.-%	50 (sulfatisiert)	20	30
Blaine-Wert	cm ² /g	3500	3000	4000

Während der gemeinsamen Vermahlung wurden zu festgelegten Zeitpunkten Proben entnommen, um den Mahlfortschritt anhand der spezifischen Oberfläche zu beschreiben (siehe **Bild 16**). Beim Erreichen der Zielwerte von 5000 ± 300 cm²/g und 6000 ± 300 cm²/g wurden jeweils 1 kg Probenmaterial für weiterführende Mörteluntersuchungen entnommen. Anschließend wurde die Zementmischung so lange weiter vermahlen, bis sich erste Anzeichen für ein Verklumpen zeigten.

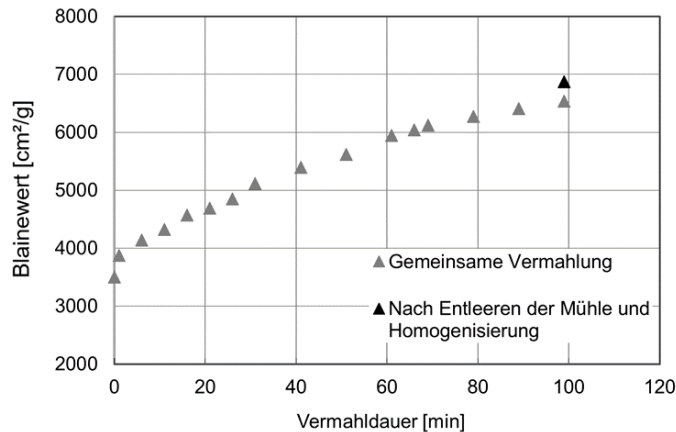


Bild 16 Mahlverlauf der gemeinsamen Vermahlung für die CEM II/C-M (S-LL)-Zemente

Durch die zunehmende Vermahlung ändert sich nicht nur die Mahlfineinheit der Zementmischung, sondern auch die Packungsdichte (siehe **Bild 17**).

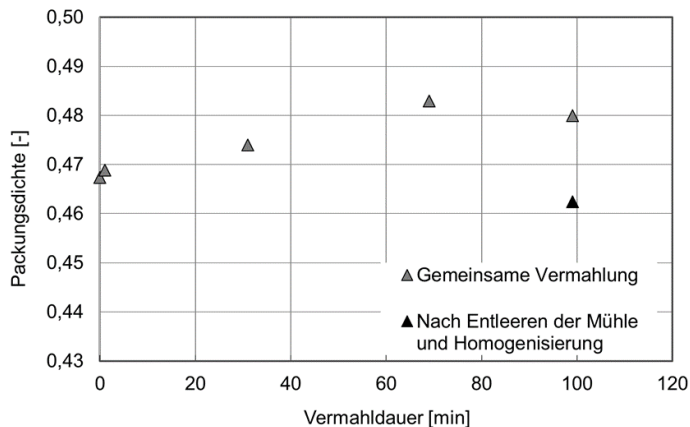


Bild 17 Veränderung der Packungsdichte der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente durch die gemeinsame Vermahlung

Mit zunehmender Vermahldauer ändert sich nicht nur die Mahlfineinheit sondern auch die Partikelgrößenverteilung. In **Bild 18** wird deutlich, wie sich durch die Vermahlung der Anteil an groben Partikeln reduziert, der Anteil an feineren Partikeln steigt und die Packungsdichte erhöht. Bei weiterer Vermahlung – über ca. 6000 cm²/g hinaus – kommt es zum ersten „Verpelzen“ d.h. zur Agglomeration der Partikel. Das kann eine Ursache für die Reduzierung der Packungsdichte darstellen und die Änderung in der Partikelgrößenverteilung begründen.

Nach der Entnahme der gesamten Menge aus der Kugelmühle und anschließender Homogenisierung reduziert sich die Packungsdichte deutlich und die Partikelgrößenverteilung verschiebt sich in Richtung feinerer Partikelgrößen (siehe **Bild 19**).

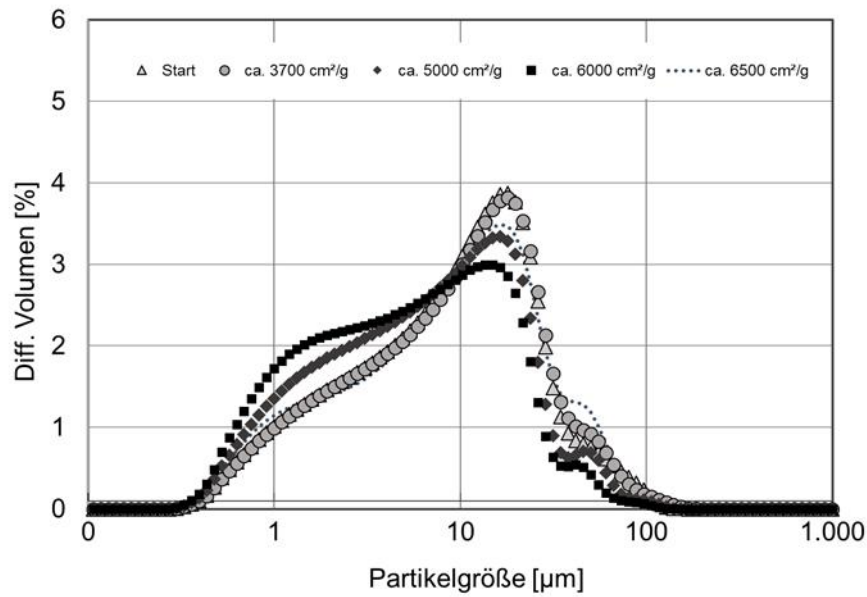


Bild 18 Veränderung in der Partikelgrößenverteilung mit zunehmender Vermahldauer der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente

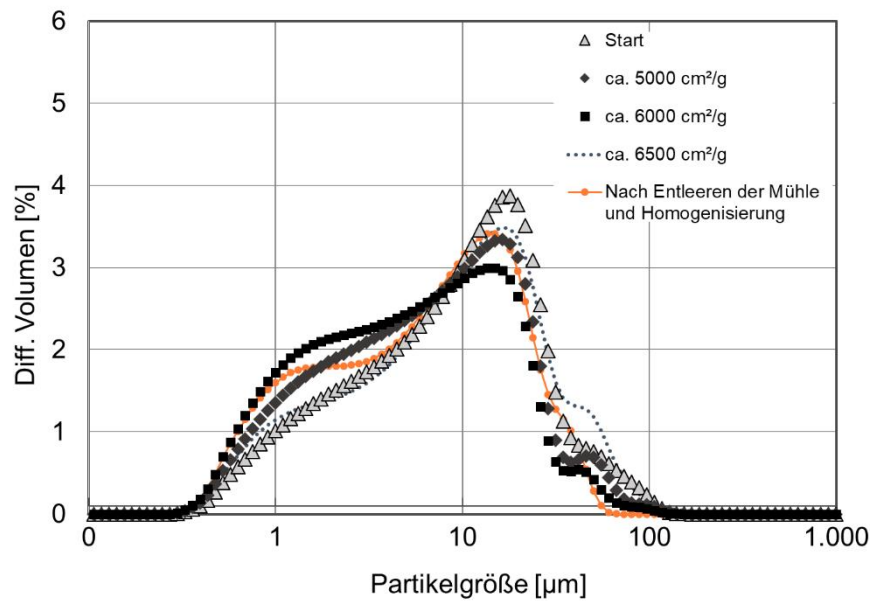


Bild 19 Veränderung in der Partikelgrößenverteilung mit zunehmender Vermahldauer der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente

Mit zunehmender Vermahlung steigen auch die Druckfestigkeiten der Mörtelprismen (siehe **Bild 20**). Einen signifikanten Unterschied sieht man allerdings erst bei den Druckfestigkeiten nach 28 Tagen.

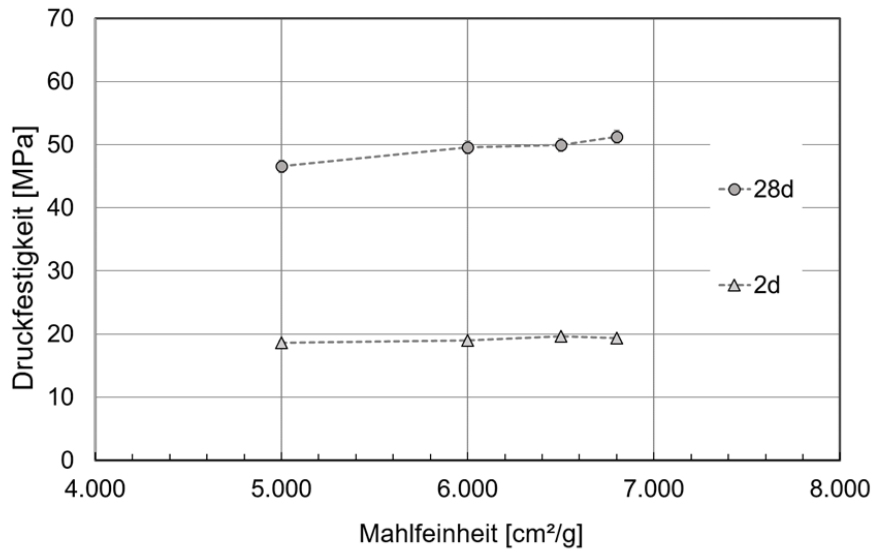


Bild 20 Einfluss der Vermahlung auf die 2 d und 28 d-Festigkeit der Mörtelprismen aus den Versuchszeimenten mit Klinker, Hüttensand und Kalksteinmehl

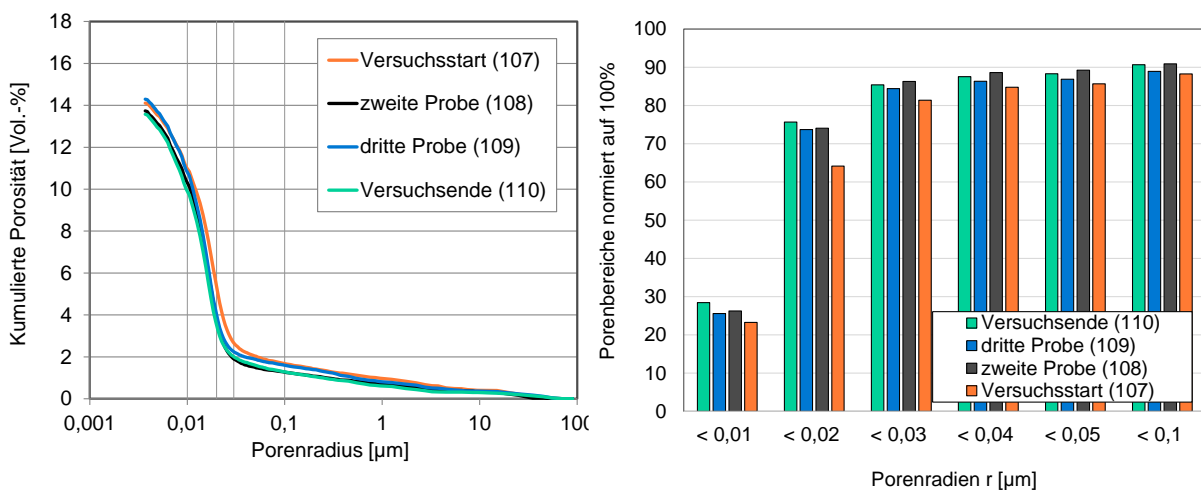


Bild 21 links: Porengrößenverteilungen an Normmörteln im Alter von 28 Tagen, Verwendung von CEM II/C-M (S-LL)-Zementen aus gemeinsamer, kontinuierlicher Mahlung von 50 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 20 M.-% Kalkstein
rechts: Anteile des Porenvolumens in den Porengrößenbereichen der auf 100% normierten Porengrößenverteilungen in %

Die gemeinsame Mahlung der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente auf der Chargenkugelmühle führte neben der Erhöhung der Mahlfeinheit sowie einer moderaten Steigerung der Druckfestigkeit im Prüfalter von 28 Tagen zu einer geringfügigen Verfeinerung des Porengefüges (vgl. **Bild 21**). Während die Gesamtporosität der Mörtel etwa 14 Vol.-% betrug, so erhöhten sich die Anteile der Gelporen < 0,01 µm auf 28,4% bzw. die Anteile < 0,02 µm auf 75,7%.

6.2 Gemeinsame Vermahlung der CEM II/C-M-Zemente mit Klinker, Ziegel und Kalkstein

Für weitere Untersuchungen zur gemeinsamen Vermahlung von CEM II/C-M-Zementen wurden auch ziegelhaltige Zemente (Zusammensetzung siehe **Tabelle 7**) vorgemischt und auf der Kugelmühle vermahlen. Für die gemeinsame Vermahlung wurde der Klinker K1 in der Kugelmühle von Laarmann

(FIB) bis zu einer festgelegten Mahlfeinheit vorvermahlen. Nach diesem ersten Schritt erfolgte ein Absieben bei 500 μm . Anschließend wurden Klinkermehl, Kalksteinmehl, Ziegelschleifstaub sowie die Sulfatträger Anhydrit und Halbhydrat homogenisiert und gemeinsam in der Kugelmühle vermahlen.

Tabelle 7 Zusammensetzung der Ausgangsstoffe für die gemeinsame Vermahlung des Versuchszementes CEM II/C-M (Q-LL)

		Klinker	Kalkstein	Ziegelschleifstaub
		K1	LL2	Q
Zusammensetzung	M.-%	50 (sulfatisiert)	20	30
Blaine-Wert	cm^2/g	3500	3000	9150

Während der gemeinsamen Vermahlung wurden zu festgelegten Zeitpunkten Proben entnommen, um den Mahlfortschritt zu beschreiben (siehe **Bild 22**). Beim Erreichen der Zielwerte von $5000 \pm 300 \text{ cm}^2/\text{g}$ und $6000 \pm 300 \text{ cm}^2/\text{g}$ wurden jeweils 1 kg Probenmaterial für weiterführende Mörteluntersuchungen entnommen. Anschließend wurde die Zementmischung so lange weiter vermahlen, bis sich erste Anzeichen für ein Verklumpen zeigten. Dies war bei den CEM II/C-M-Mischungen mit Ziegelschleifstaub bei einem Blainewert von ca. $7400 \text{ cm}^2/\text{g}$.

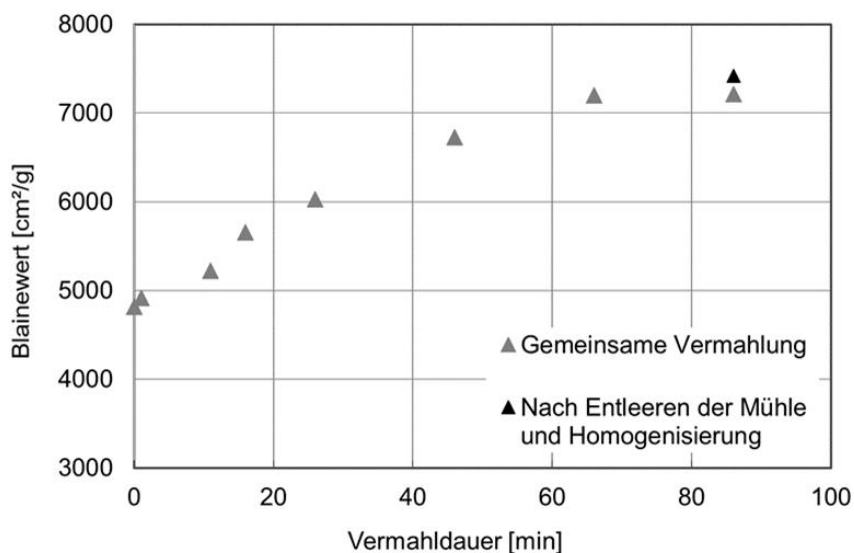


Bild 22 Mahlverlauf der gemeinsamen Vermahlung für die CEM II/C-M (Q-LL)-Zemente

Durch die Vermahlung änderte sich auch hier die Partikelgrößenverteilung. Nach einer Vermahldauer von 1 min und einen gemessenen Blainewert von ca. $4900 \text{ cm}^2/\text{g}$ änderte sich die Partikelgrößenverteilung ins feinere und die Erhöhung bei den größeren Partikeln um die $80 \mu\text{m}$ nimmt sichtlich ab (siehe **Bild 23**).

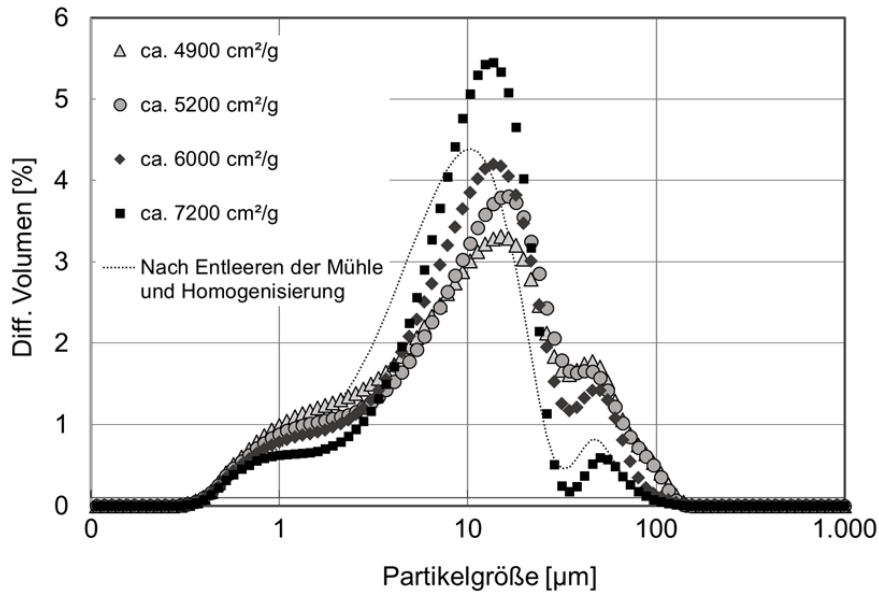


Bild 23 Veränderung in der Partikelgrößenverteilung mit zunehmender Vermahldauer der CEM II/C-M (Q-LL)-Zemente

Durch die Veränderung in der Partikelgrößenverteilung und die Abnahme der größeren Partikel wird die Verteilung enger und die Packungsdichte sinkt tendenziell (siehe **Bild 24**). Die Tatsache, dass die Packungsdichte erst wieder steigt und nach dem Abfüllen wieder sinkt, kann auch an dem anfänglichen „Verpelzen“ liegen.

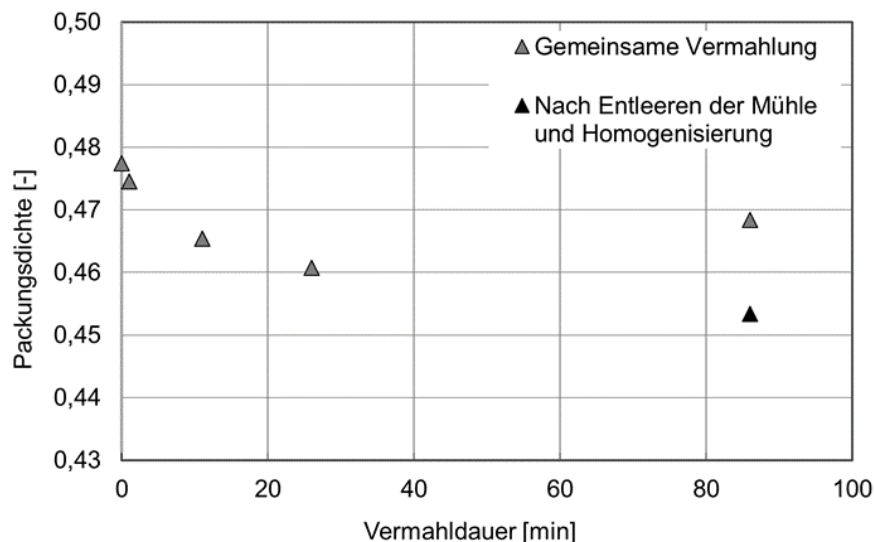


Bild 24 Veränderung der Packungsdichte der CEM II/C-M (Q-LL)-Zemente durch die gemeinsame Vermahlung

Mit zunehmender Vermahlung steigt die Druckfestigkeit der Mörtelprismen (siehe **Bild 25**). Einen signifikanten Unterschied sieht man allerdings erst bei den Druckfestigkeiten bei 28d.

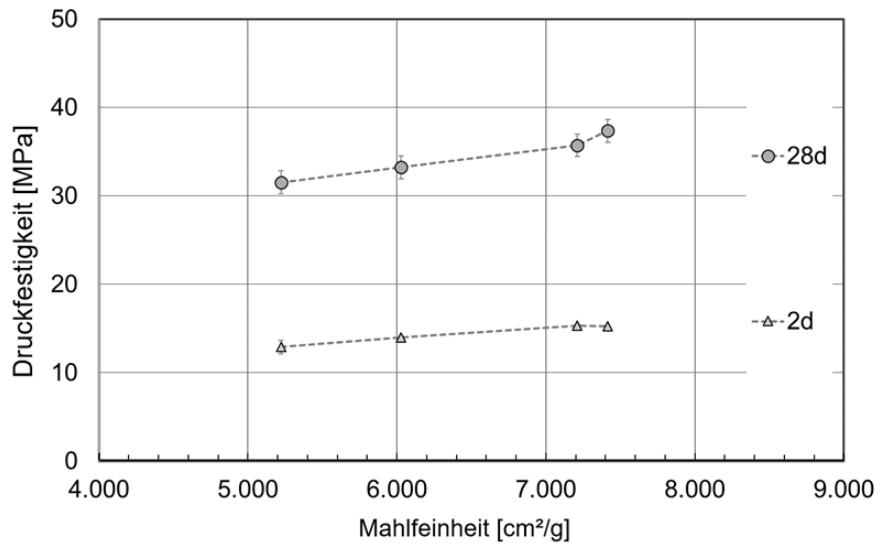


Bild 25 Einfluss der Vermahlung auf die 2 d- und 28 d-Festigkeit der Mörtelprismen aus den Versuchszeimenten mit Klinker, Ziegel und Kalkstein

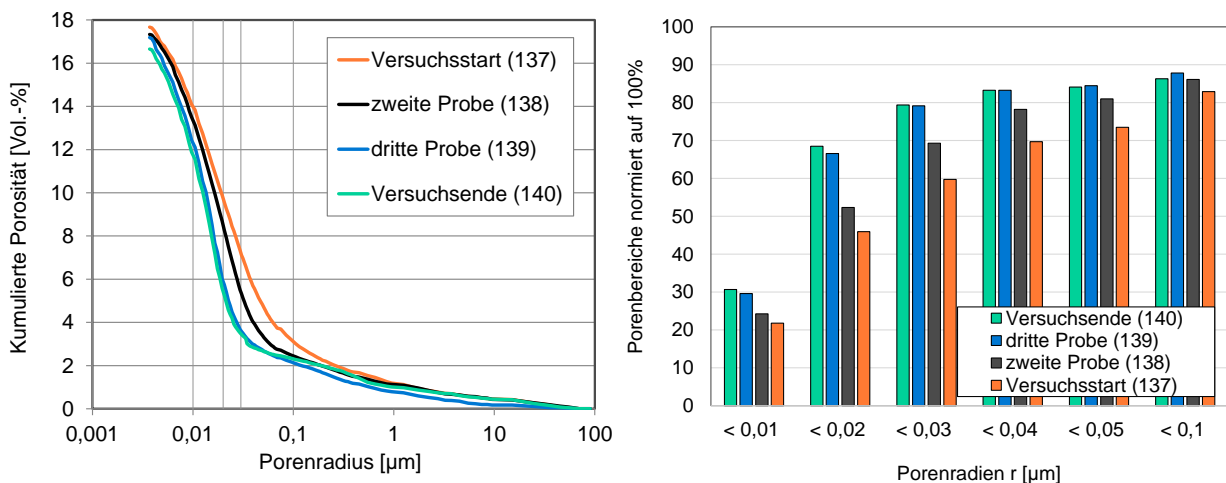


Bild 26 links: Porengrößenverteilungen an Normmörteln im Alter von 28 Tagen, Verwendung von CEM II/C-M (Q-LL)-Zementen aus gemeinsamer, kontinuierlicher Mahlung von 50 M.-% Klinker, 30 M.-% Ziegel und 20 M.-% Kalkstein
rechts: Anteile des Porenvolumens in den Porengrößenbereichen der auf 100% normierten Porengrößenverteilungen in %

Die gemeinsame Mahlung der ziegelhaltigen CEM II/C-M (Q-LL)-Zemente auf der Chargenkugelmühle führte neben der Erhöhung der Mahlfeinheit sowie einer signifikanten Steigerung der Druckfestigkeit im Prüfalalter von 28 Tagen zu einer deutlichen Veränderung der Lage sowie der Steigung der PGV-Kurven in den feinporigen Bereich. Die Verfeinerung des Porengefüges (vgl. **Bild 26**) zeigte sich insbesondere an der Zunahme der Gelporen. Während die Gesamtporosität der Mörtel von 17,7 Vol.-% auf 16,6 Vol.-% abnahm, so erhöhten sich die Anteile der Gelporen < 0,01 µm auf ca. 30% bzw. die Anteile < 0,02 µm auf ca. 68%.

7 Granulometrische Einflüsse auf den Wasseranspruch nach Puntke, den Wasseranspruch für Normsteife und das Erstarren von CEM II/C-M (S-LL)-Zementen gemäß DIN EN 196-3

Aufbauend auf den Ergebnissen und den Erkenntnissen der Vorversuche an den hüttensand- und ziegelhaltigen Zementen (vgl. Abschnitt 5 und 6) werden nachfolgend ausschließlich die Eigenschaften von CEM II/C-M (S-LL)-Zementen mit konstanter stofflicher Zusammensetzung sowie in deutlich variierenden granulometrischen Zusammensetzungen betrachtet. In die granulometrische Zusammensetzung der Versuchszemente fließen alle in **Tabelle 2** und **Tabelle 3** dargestellten Parameter ein.

Die Packungsdichte D einer Partikelschüttung (auch Raumausfüllung genannt [6] [7] [8] [9] [10] [11]), ist definiert als Verhältnis aus dem Volumen des Festraums bezogen auf das Volumen des Gesamtraums:

$$\text{Packungsdichte } D = \frac{\text{Volumen Festraum}}{\text{Volumen Gesamtraum}} \quad [-]$$

Aus der Differenz des Gesamtraums und des Festraums entsteht der Hohlraum bzw. Hohlraumgehalt. Mit der experimentellen Methode „Wasseranspruch nach Puntke“ kann der Hohlraum zwischen den Partikeln ermittelt und in Vol.-% angegeben werden. In die Bestimmung des Hohlraumvolumens fließen die von außen für Wasser zugänglichen Poren ein, es werden keine unzugänglichen Poren aus dem Inneren der Partikel berücksichtigt.

Wie z. B. aus Untersuchungen in [2] [12] hervorgeht, nahm neben dem Wasseranspruch für Normsteife gemäß DIN EN 196-3 (angegeben in M.-%) auch der Wasseranspruch nach Puntke mit zunehmender Packungsdichte eines Zements ab. Die untersuchten Zemente hatten einen Klinkerfaktor von 70% bzw. 65%. Die Anteile der Hauptbestandteile neben Klinker betragen 10 M.-% bis 35 M.-%. Die Granulometrie des Zementes sowie die granulometrischen Einflüsse auf die Zementeigenschaften wurden somit maßgeblich von der KGV des Klinkers dominiert.

Beide Untersuchungsmethoden wurden an Zementleimen mit unterschiedlichen Wasser-Zement-Verhältnissen durchgeführt und kamen nun auch an klinkerreduzierten Zementen mit einem Klinkerfaktor von 50% bzw. 35% zur Anwendung

- Wird bei einem Zementmörtel in der Normprüfung ein konstanter Wassergehalt eingestellt ($w/z = 0,50 = \text{konstant}$), der den Wasserbedarf des im Mörtel verwendeten Zements überschreitet, entsteht – bezogen auf den Zement - ein Wasserüberschuss, der sich mit einer weicheren Mörtelkonsistenz und einer erhöhten Porosität im Festmörtel darstellt.
- Wird einem Zementmörtel im Vergleich zum Wasserbedarf seines Zements weniger Wasser zugeführt, entstehen eine steifere Frischmörtelkonsistenz und eine geringere Porosität im Festmörtel.

Insbesondere Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen, und daher auch die hier untersuchten klinkerreduzierten Zemente, neigen zu diesem Verhalten, wenn sie unter Normbedingungen bei konstantem w/z -Wert und bei konstantem Wassergehalt verarbeitet werden. Hinzu kommt, dass ihre Hauptbestandteile nach Mahlung eine große spezifische Oberfläche und ggf. auch eine innere Porenstruktur (z. B. Ziegelmehl) aufweisen können, die nicht nur zu einem erhöhten Wasseranspruch der Zemente führen kann. Es kann auch Wasser aus dem Zementleim im Zementpartikel aufgenommen werden, womit eine räumlich und zeitlich begrenzte w/z -Veränderung einhergehen kann.

Der Wasseranspruch für Normsteife wurde an einigen, für die Betonversuche ausgewählten Zementen untersucht. **Bild 27** stellt den Wasseranspruch einiger CEM II/C-M (S-LL)-Zemente konstanter stofflicher Zusammensetzung in Abhängigkeit ihrer Stampfpackungsdichte dar. Außerdem wurde der Zement GC 11 mit Klinker breiter KGV als Referenz eingetragen. Die granulometrische

Zusammensetzung des Zements GC 11 - mit 50 M.-% Klinker K1 und 20 M.-% Kalkstein, jeweils aus der Chargenkugelmühle - hatte zu einer vergleichsweise hohen Packungsdichte geführt.

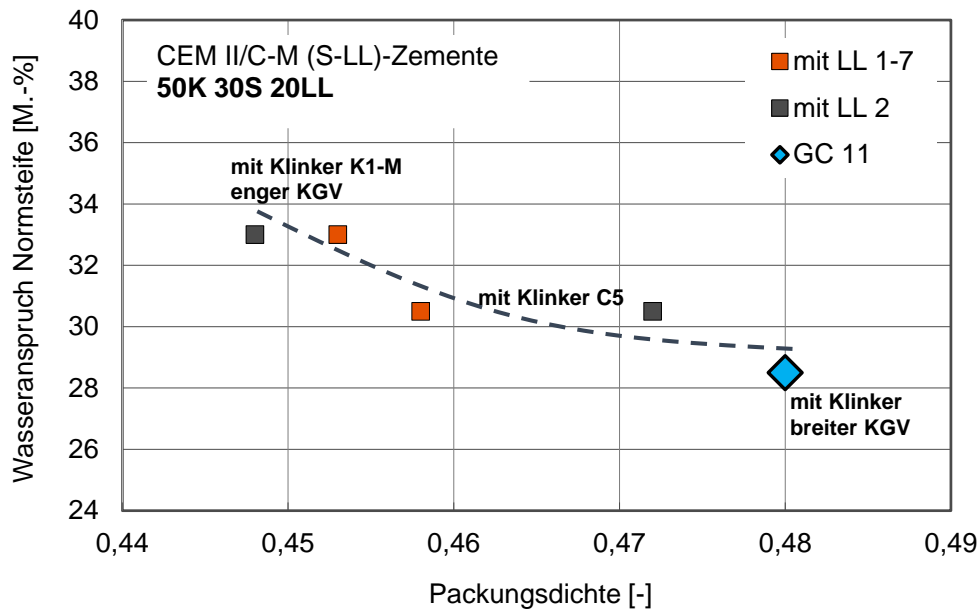


Bild 27 Wasseranspruch der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente in Abhängigkeit der Stampfpackungsdichte, grober Klinker K1-M in Kombination mit grobem Hüttensand S1-5, feiner Klinker C5 in Kombination mit feinem Hüttensand S2-6

Die Untersuchungen an den Zementen haben gezeigt, dass der Wasseranspruch zum Erreichen der Normsteife (gemäß EN 196-3) umso geringer wurde, je höher die experimentell bestimmte Packungsdichte der Zemente war.

Maßgebliche Einflussgröße – sowohl auf die Packungsdichte als auch auf den Wasseranspruch - war die Korngrößenverteilung des Klinkers. Während der Zement GC 11 auf Basis eines Klinkers mit breiter KGV (Chargenmühle) bzw. hoher Packungsdichte hergestellt wurde und einen Wasseranspruch unter 30 M.-% erreichte, wurde an Zementen unter Verwendung eines Klinkers mit enger KGV sowie geringer Packungsdichte (z. B. K1-M) ein höherer Wasseranspruch von ca. 33 M.-% ermittelt.

Außerdem geht aus dem Bild hervor, dass die Verwendung des feineren Kalksteins (20 M.-% LL 1-7) in Kombination mit 50 M.-% Klinker enger KGV (K1-M) sowie größerem Hüttensand zu einer etwas höheren Packungsdichte führte als die Verwendung des gröberen Kalksteins (20 M.-% LL 2). Wurden jedoch der Klinker C5 sowie feinerer Hüttensand verwendet, führte der feinere Kalkstein zu einer vergleichsweise geringen Packungsdichte, während der gröbere Kalkstein die Packungsdichte des Zements erhöhte. Die Veränderung der Kalksteineinheit hatte unter sonst konstanten Bedingungen einen Einfluss auf die Packungsdichte der Zemente, jedoch nicht auf die Höhe des Wasseranspruchs für Normsteife.

Auf den Wasseranspruch nach Punkte hatte die Stampfpackungsdichte der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente unter Verwendung des Klinkers C5 keinen, unter Verwendung des Klinkers K1-M einen geringfügigen Einfluss. **Bild 28** zeigt, dass die Werte der granulometrisch variabel zusammengesetzten Zemente Packungsdichten in einem Bereich zwischen ca. 0,445 und 0,485 erreichten sowie einen Wasseranspruch im Bereich zwischen 36 Vol.-% und 40 Vol.-% erzielten. Da die Zemente mit drei deutlich unterschiedlichen Hauptbestandteilen sowie mit jeweils variierenden KGV hergestellt wurden, haben sich die granulometrischen Effekte überlagert, es entstanden multikausale Einflüsse.

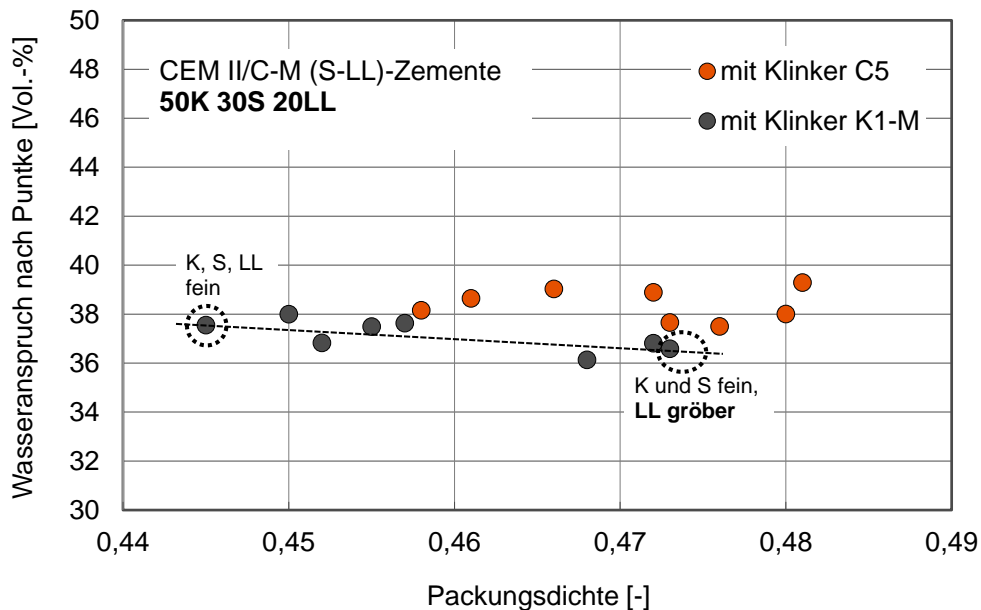


Bild 28 Wasseranspruch nach Punkte in Abhängigkeit der Stampfpackungsdichte der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente, Verwendung von gröberem Klinker K1-M sowie feinerem Klinker C5 jeweils enger KGV in Kombination mit Hüttensand und Kalkstein jeweils variierender KGV

Singulär betrachtet, führte beispielsweise die Verwendung eines feineren Kalksteins im Vergleich zur Verwendung eines gröbereren Kalksteins – jeweils in Kombination mit Klinker K1-M - zu einer deutlich geringeren Packungsdichte sowie zu einem geringfügig erhöhtem Wasseranspruch.

Außerdem hatte der mit 50 M.-% im Zement eingesetzte Klinker C5 im Vergleich zu Zementen mit 50 M.-% Klinker K1-M um etwa 1-2 Vol.-% höhere Werte im Wasseranspruch nach Punkte zur Folge.

Bei der Bestimmung der Stampfpackungsdichte wurde das Stampfvolumen der Partikelschüttung nicht komprimiert. Insofern kann davon ausgegangen werden, dass ein gewisses Luftvolumen, das sich vor allem zwischen den Partikeln besonders feiner Zemente (z. B. mit Klinker C5 bzw. mit Kalkstein LL 1-7) befinden kann, auch nach dem Stampfen in der Partikelschüttung verbleibt und die Messwerte entsprechend beeinflusst haben könnte.

An Zementen mit vergleichsweise geringer Feinheit (z. B. mit Klinker K1-M) wurden diese Einflüsse nicht festgestellt.

In der Untersuchung der komprimierten Rütteldichte wurde das Volumen der Partikelschüttung unter mechanischem Druck verringert. Dabei wurde die im Zementpulver enthaltene Luft wirksam abgeleitet und das Zementpulver verdichtet. Die aus der komprimierten Rütteldichte ermittelten Packungsdichten sowie ihr Einfluss auf den Wasseranspruch nach Punkte sind dem folgenden **Bild 29** zu entnehmen.

Aus dem Bild geht hervor, dass sich der Wasseranspruch mit zunehmender Packungsdichte der Zemente geringfügig verringerte. Je nach KGV des im Zement mit 50 M.-% eingesetzten Klinkers (K1-M oder C5) zeigte sich der entsprechende Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Wasseranspruch.

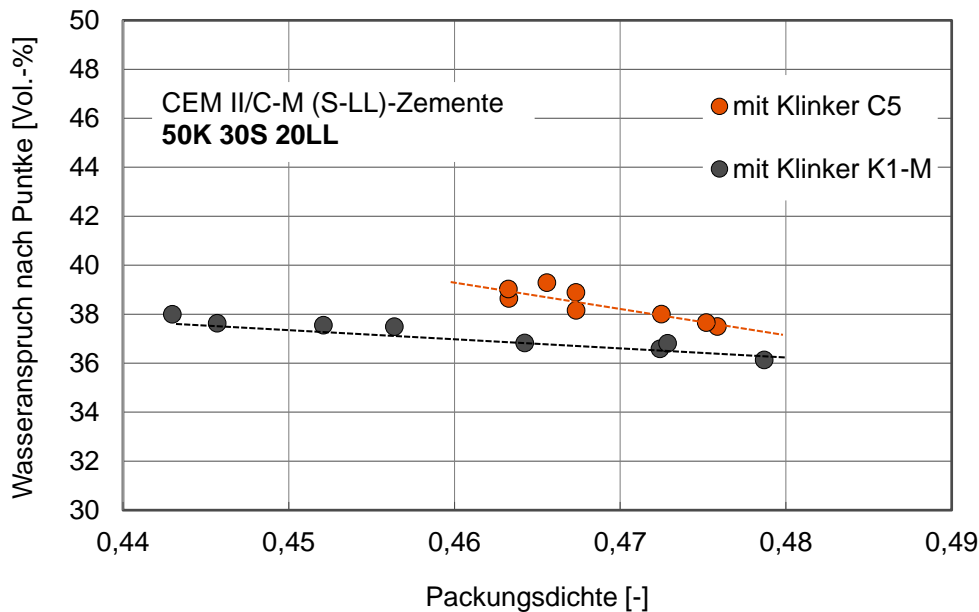


Bild 29 Wasseranspruch nach Punkte in Abhängigkeit der komprimierten Packungsdichte der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente, Verwendung von größerem Klinker K1-M sowie feinerem Klinker C5 jeweils enger KGV in Kombination mit Hüttensand und Kalkstein jeweils variierender KGV

Aus den Ergebnissen der am Feststoffpyknometer und am Stampfvolumeter durchgeführten Untersuchungen ergaben sich zum Teil ungleiche granulometrische Effekte. Die komprimierte Packungsdichte und die Stampfpackungsdichte der Versuchszemente wirkten sich insbesondere auf den Wasseranspruch nach Punkte unterschiedlich aus. Aus dem **Bild 30** gehen Ergebnisse der Packungsdichten einiger Versuchszemente hervor, die sowohl mit dem Feststoffpyknometer als auch mit dem Stampfvolumeter untersucht wurden.

Die Gegenüberstellung der in unterschiedlichen Methoden ermittelten Packungsdichten zeigt, dass einige Werte nahe der Bilddiagonalen in ähnlicher Größenordnung liegen.

Andere Werte zeigten deutliche Unterschiede, wie z. B. die Zemente mit einer komprimierten Packungsdichte $< 0,43$ bzw. mit einer Stampfpackungsdichte von etwa 0,45 (im Bild unten). In der Darstellung wird deutlich, dass diese Zemente zwei bzw. drei Hauptbestandteile mit vergleichsweise geringen Mahlfineinheiten aufwiesen. Diese Zemente bestehen demnach aus mindestens 50 M.-% größerer Bestandteile und verfügen über ein entsprechendes Hohlraumvolumen, das ggf. mit vergleichsweise feinen Partikeln oder Partikeln mittlerer Feinheit (maximal 50 M.-%) geschlossen oder „gefüllt“ werden kann. Diese Füllereffekte setzen voraus, dass die Partikel während der Prüfung (während des Stampfens) frei beweglich sind, um nach gegebener Prüfdauer an geeigneter Stelle wirksam zu werden. Eine weitere Voraussetzung sind die Volumenverhältnisse zwischen den Hohlräumen und Partikeln. Derartige Effekte können in diesem Verfahren zu höheren Packungsdichten führen.

In der Bestimmung der Packungsdichte feinerer Zemente bzw. an Zementen mit zwei oder drei Bestandteilen vergleichsweise hoher Mahlfineinheit können sich mittels Feststoffpyknometer geringfügig höhere Messwerte ergeben als im Vergleich zum Stampfvolumeter. Ohne Verdichtung weisen hochfeine Zemente (aufgrund der zwischen den feinen bzw. leichten Partikeln eingeschlossenen Luft) ein gewisses Fließverhalten auf. Die Packungsdichte fließfähiger Systeme kann im Feststoffpyknometer deutlich erhöht werden, sobald das sich das Gesamtraumvolumen verkleinern und das Hohlraumvolumen (Luft) über mechanischen Druck reduzieren lässt.

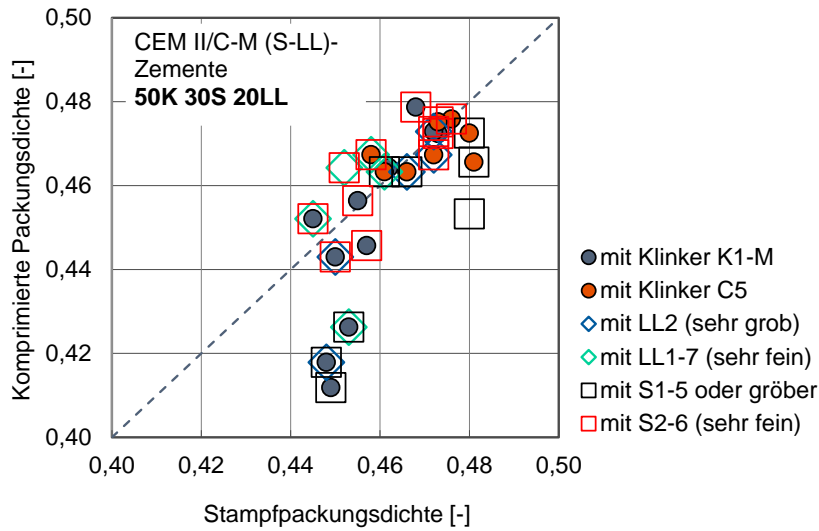


Bild 30 Bestimmung der Packungsdichte an CEM II/C-M (S-LL)-Zementen unterschiedlicher granulometrischer Zusammensetzung und Vergleich der Versuchsergebnisse, Untersuchungen mittels Feststoffpyknometer (y-Achse) und Stampfvolumeter (x-Achse)

An einigen Zementen wurde auch das Erstarrungsverhalten untersucht und in Abhängigkeit von der Stampfpackungsdichte ausgewertet. **Bild 31** verdeutlicht, dass der Erstarrungsbeginn der Zemente mit Packungsdichten < 0,45 Werte zwischen 200 min und 230 min erreichte. An den Zementen mit Packungsdichten > 0,47 wurde ein Erstarrungsbeginn auf vergleichsweise geringem Niveau zwischen 120 min und 170 min ermittelt. Insofern wurden an den CEM II/C-M-Zementen ähnliche Zusammenhänge wie an den CEM II/B-M-Zementen konstanter stofflicher Zusammensetzung [2] beobachtet. Mit zunehmender Packungsdichte der Zemente verkürzte sich der Erstarrungsbeginn. Der Einfluss des Sulfatgehaltes bzw. der Zusammensetzung entsprechenden Erstarrungsregler wurde in beiden Projekten nicht näher untersucht.

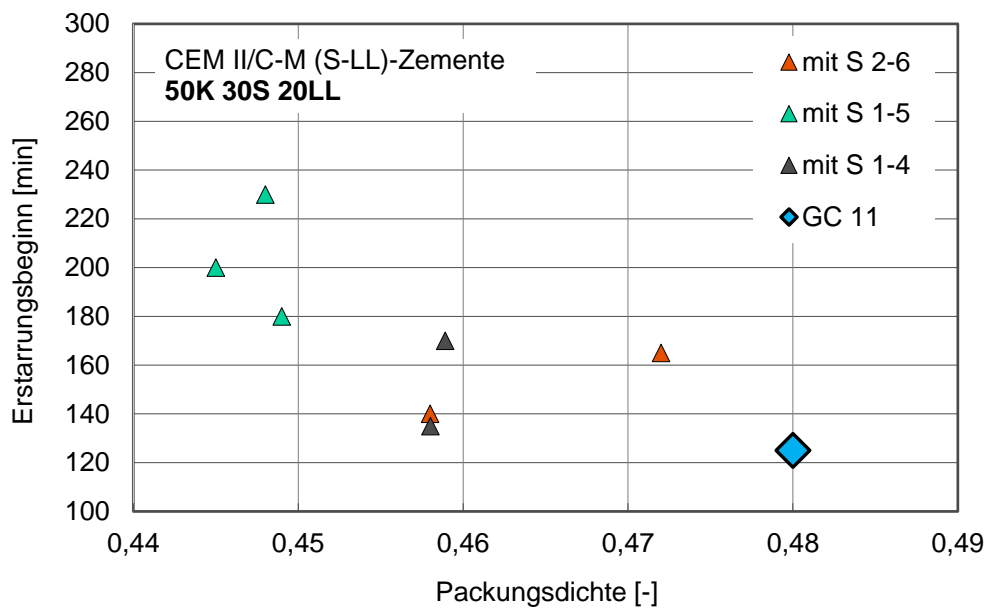


Bild 31 Erstarrungsbeginn der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente in Abhängigkeit der Stampfpackungsdichte, Verwendung von Hauptbestandteilen jeweils variierender KGV bei konstanter stofflicher Zusammensetzung

8 Optimierungsversuche - Untersuchungen an Normmörteln unter Verwendung der Versuchszemente CEM II/C-M (S-LL)

8.1 Granulometrische Einflüsse auf die Konsistenz der Normmörtel mit konstantem Wasserzementwert ($w/z = 0,50$)

Neben dem Einfluss auf Wasseranspruch und Erstarren wurde auch der Einfluss auf die Frischmörtelkonsistenz untersucht. Unter Verwendung der CEM II/C-M-Zemente wurde an den Normmörteln ($w/z = 0,50$) das Ausbreitmaß (Hägermann-Ausbreittisch) festgestellt und im folgenden Bild in Abhängigkeit der Zementpackungsdichte dargestellt.

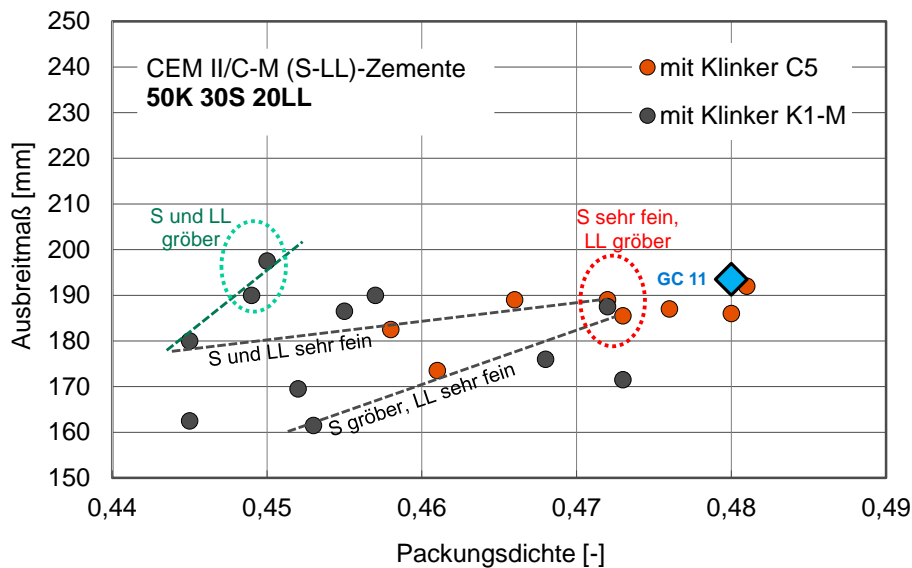


Bild 32 Ausbreitmaße der Normmörtel ($w/z = 0,50$) in Abhängigkeit der Stampfpackungsdichte der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente, Verwendung von Hauptbestandteilen jeweils variierender KGV bei konstanter stofflicher Zusammensetzung

Auf das Mörtelausbreitmaß hatte die Packungsdichte der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente keinen systematischen Einfluss. **Bild 32** zeigt, dass die Ausbreitmaße der Mörtel zwischen 160 mm und 200 mm lagen, wenn die entsprechenden Zemente (vorrangig Klinkerbasis K1-M) geringe Packungsdichten aufwiesen ($< 0,46$). Im Bereich höherer Zementpackungsdichten ($> 0,47$) wurden am Frischmörtel Ausbreitmaße zwischen 170 mm und 200 mm ermittelt. Aufgrund der Zementzusammensetzung mit Hauptbestandteilen jeweils variierender KGV haben sich (wie in der Untersuchung des Wasseranspruchs nach Punkte) auch hier die granulometrischen Effekte überlagert, es entstanden multikausale Einflüsse.

Singulär bzw. linear betrachtet, hatte z. B. der Wechsel der Klinkerkomponente von K1-M auf C5 Auswirkungen auf die Mörtelkonsistenz. Aus **Bild 32** geht anhand der grau gestrichelten Linien hervor, dass bei Kombinationen aus feinem Hüttensand und feinem Kalkstein ($a = 180$ mm) sowie bei Kombinationen aus gröberem Hüttensand und feinem Kalkstein ($a = 160$ mm) die Substitution des Klinkers K1-M durch Klinker C5 zu einer höheren Packungsdichte des Zements sowie zu einem geringfügig höherem Ausbreitmaß des Frischmörtels führte. Das Ausbreitmaß hatte sich nochmals erhöht, sobald der sehr feine Kalkstein durch einen Kalkstein deutlich geringerer Mahlfineinheit ersetzt wurde, und lag dann bei ca. 190 mm.

Wurde jedoch der Zement mit Klinker K1-M, feinem Hüttensand und feinem Kalkstein granulometrisch verändert und ein gröberer Hüttensand und/oder ein gröberer Kalkstein kamen zur Anwendung, nahm die Packungsdichte geringfügig zu, während sich das Ausbreitmaß des Mörtels von $a = 180$ mm auf $a = 200$ mm erhöhte (s. grüne gestrichelte Linien).

Die Ergebnisse der Konsistenzuntersuchungen verdeutlichen, dass die KGV der Hauptbestandteile entsprechend ihrer Anteile im Zement unterschiedliche Effekte auf die Zementpackungsdichte sowie auf das Ausbreitmaß der Frischmörtel haben können. Die granulometrischen Effekte der Hauptbestandteile, die mit 50 M.-%, 30 M.-% bzw. 20 M.-% eingesetzt wurden, können sich in ihrer Wirksamkeit verstärken oder kompensieren. Eine gezielte Einstellung der Mörtelkonsistenz bzw. des Ausbreitmaßes war bei den hier untersuchten CEM II/C-M-Zusammensetzungen anhand der Packungsdichte nicht möglich. Ein Zusammenhang zwischen Packungsdichte und Ausbreitmaß war nur dann darstellbar, wenn unter sonst konstanten Bedingungen nur einer der drei Hauptbestandteile granulometrisch verändert wurde.

Im folgenden **Bild 33** sind die Mörtelausbreitmaße sowie die am Zementleim ermittelten Werte für den Wasseranspruch nach Punkte dargestellt. Auch diese Darstellung zeigt keinen Zusammenhang zwischen granulometrischen Zementeigenschaften und der Mörtelkonsistenz. Aus dem Bild geht hervor, dass bei vergleichbarem Wasseranspruch sowie unter Verwendung von Zementen mit feinem Kalkstein (LL1-7) etwas geringere Mörtelausbreitmaße ermittelt wurden als Zementmörteln mit größerem Kalkstein (LL2).

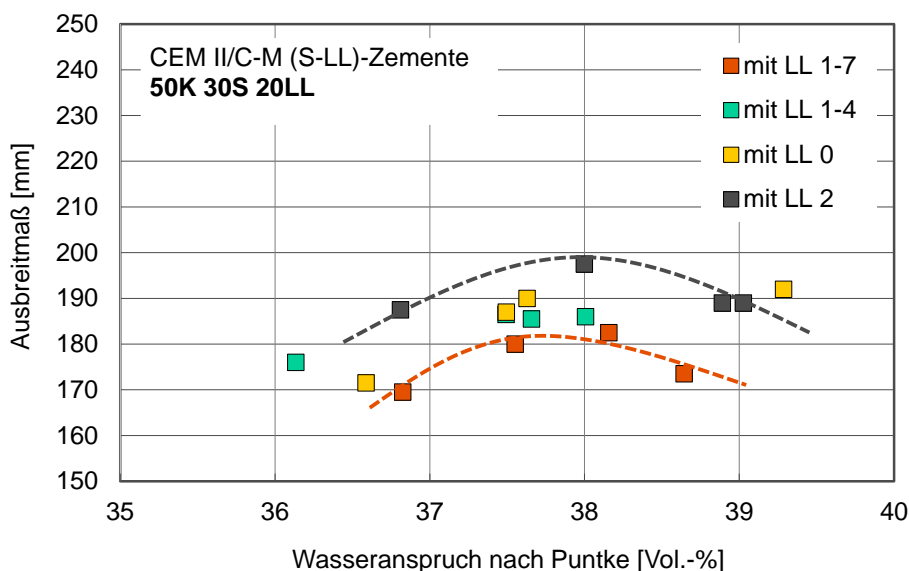


Bild 33 Ausbreitmaße der Normmörtel ($w/z = 0,50$) in Abhängigkeit des Wasseranspruchs (Punkte) der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente, Verwendung von Hauptbestandteilen jeweils variierender KGV bei konstanter stofflicher Zusammensetzung

8.2 Druckfestigkeit der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente im Alter von zwei bzw. 28 Tagen gemäß DIN EN 196-1

Die Druckfestigkeit der Versuchszemente wurde gemäß DIN EN 196-1 am Normmörtel, d. h. bei einem konstanten Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ bestimmt.

Wesentliches Ergebnis früherer Untersuchungen an CEM II/B-M-Zementen mit 65 M.-% Klinker [2] war der Einfluss der Packungsdichte auf die Druckfestigkeit der Zemente. Die von der Packungsdichte ausgehenden Effekte wurden vorrangig über die KGV des Klinkers gesteuert. Die Zementdruckfestigkeit ließ sich in jedem Prüfmörtel zum Teil um bis zu 10 MPa erhöhen, wenn unter sonst konstanten Randbedingungen (z. B. bei konstantem Wassergehalt) die Packungsdichte von ca. 0,50 auf ca. 0,44 verringert wurde. Im Vorgängerprojekt wurden die Packungsdichten (sog. komprimierte Schüttdichten) mittels Feststoffpyknometer ermittelt.

Im hier beschriebenen Folgeprojekt wurde neben dem Feststoffpyknometer auch ein Stampfvolumeter zur Bestimmung der Packungsdichte herangezogen. Die bekannten granulometrischen Methoden

sollten nunmehr zur Optimierung von Zementen mit einem deutlich geringerem Klinkergehalt zur Anwendung kommen. Deshalb wurden die CEM II/C-M-Zemente mit 50 M.-% Klinker und die CEM VI-Zemente mit 35 M.-% Klinker (vgl. Abschnitt 9) fast ausschließlich mit möglichst geringen Packungsdichten eingestellt, um die Anwendungseigenschaften dieser Zemente in zulassungsfähige Bereiche zu bringen. Es sollte untersucht werden, wie und wie weit sich die Packungsdichten klinkerreduzierter Zemente verringern lassen und welche Auswirkungen eine deutliche Verringerung der Packungsdichten bei konstanter stofflicher Zementzusammensetzung haben kann

8.2.1 Anfangsfestigkeit in Abhängigkeit der Packungsdichte

Der Zusammenhang zwischen der Packungsdichte der CEM II/C-M-Zemente sowie der Druckfestigkeit der Normmörtel im Prüfalalter von zwei Tagen ist in **Bild 34** dargestellt.

Wurden Zemente mit 50 M.-% Klinker K1-M sowie Hüttensand und Kalkstein variierender KGV hergestellt, hatte dies neben dem Einfluss auf die Packungsdichten auch Einfluss auf die Anfangsfestigkeit der Zemente. Die Druckfestigkeiten erreichten Werte von bis zu 20 MPa, wenn die Zemente 50 M.-% Klinker K1-M enthielten und mit geringer Packungsdichte ($< 0,455$) eingestellt wurden. Die Zunahme der Packungsdichten auf Werte $> 0,47$ führte unter sonst konstanten Randbedingungen zu geringeren Anfangsfestigkeiten von ca. 13 MPa.

Unter Verwendung von 50 M.-% Klinker C5 wurden durchweg Anfangsfestigkeiten von ca. 21 MPa ermittelt, unabhängig von der Granulometrie der Hauptbestandteile Hüttensand und Kalkstein sowie unabhängig von der sich im Zement einstellenden Packungsdichte.

Aus **Bild 34** lässt sich außerdem ableiten, dass vorrangig die granulometrischen Eigenschaften des Klinkers die Anfangsfestigkeiten der Zemente bestimmten. Bei Verwendung eines Klinkers hoher Feinheit und enger KGV (zum Beispiel 50 M.-% C5) wurde das Niveau der CEM II/C-M-Anfangsfestigkeit selbst dann nicht signifikant beeinflusst, wenn 50 M.-% des Zements aus weiteren Hauptbestandteilen geringerer Feinheit bzw. breitere KGV bestanden.

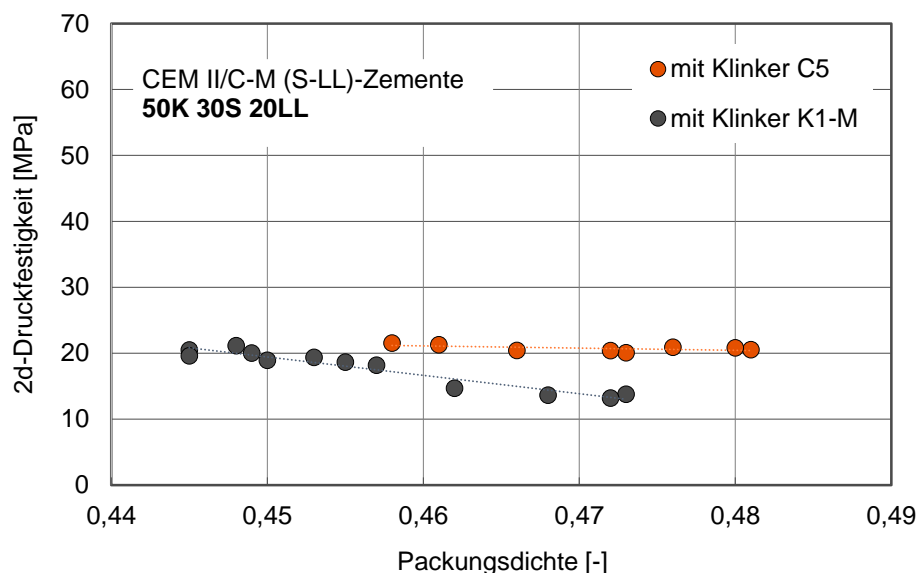


Bild 34 Druckfestigkeit der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente im Prüfalalter von zwei Tagen in Abhängigkeit ihrer Stampfpackungsdichte, Untersuchung der Anfangsfestigkeit am Normmörtel ($w/z = 0,50$), Verwendung von Hauptbestandteilen jeweils variierender KGV bei konstanter stofflicher Zusammensetzung

Die Zemente auf Basis des Klinkers K1-M reagierten hingegen nicht robust. Der Anteil von 50 M.-% anderer Zementbestandteile führte zu veränderten Packungsdichten und Anfangsfestigkeiten.

8.2.2 Normfestigkeit in Abhängigkeit der Packungsdichte

Die Ergebnisse der Festigkeitsprüfungen im Alter von 28 Tagen verdeutlichen den Einfluss der Granulometrie des verwendeten Klinkers und gleichzeitig den Einfluss der Granulometrie des Hüttensandes.

Die Zemente auf Basis des Klinkers K1-M zeigten mit abnehmender Packungsdichte keine signifikante Steigerung der Normfestigkeit (vgl. **Bild 35**). Wurden an Zementen mit höherer Packungsdichte ($> 0,46$) Druckfestigkeiten von ca. 50 MPa bis 52 MPa ermittelt, so lagen die Werte der Zemente mit geringerer Packungsdichte ($< 0,45$) zwischen 50 MPa und 55 MPa.

Wurde Klinker C5 verwendet, erreichten die Zemente – unabhängig ihrer Packungsdichte - Druckfestigkeiten von bis zu 60 MPa. Die geringsten Festigkeiten (ca. 53 MPa) wurden an den Zementen mit Packungsdichten $\geq 0,48$ ermittelt.

Die Ergebnisse zeigen, dass CEM II/C-M (S-LL)-Zemente mit konstanter stofflicher Zusammensetzung sowie mit Packungsdichten im Bereich zwischen 0,455 und 0,480 vergleichsweise hohe Druckfestigkeiten im Alter von 28 Tagen erzielen konnten. Im Packungsdichtebereich vergleichsweise geringere Werte $< 0,455$ bzw. vergleichsweise hoher Werte $> 0,480$ wurden überwiegend geringere Festigkeiten erreicht.

Aus den Ergebnissen lässt sich der von CEM II/B-M-Zementen bekannte Zusammenhang nicht pauschal ableiten. Ausgehend von höheren Packungsdichten, vgl. beispielsweise Referenz GC 11 mit einer Packungsdichte von ca. 0,48 und einer Normfestigkeit von ca. 45 MPa, führten die granulometrischen Veränderungen der Hauptbestandteile zu einer Verringerung der Zementpackungsdichten. Bis zu einer Packungsdichte von 0,458 wurde in wenigen granulometrischen Kombinationen eine Steigerung der Normfestigkeit auf ca. 60 MPa festgestellt. Nach weiterer Verringerung der Packungsdichte der CEM II/C-M-Zemente auf Werte $< 0,445$ konnte keine weitere Zunahme der 28d-Festigkeit erreicht werden.

Neben dem Klinker trägt Hüttensand maßgeblich zur Entwicklung der 28d-Druckfestigkeit bei. Insbesondere Hüttensande hoher Mahlfeinheit und enger KGV zeigen i.d.R. deutliche Effekte auf die späte Festigkeitsentwicklung hüttensandhaltiger Zemente. Der Einfluss des latent hydraulischen Hüttensandes mit einem Anteil von 30 M.-% im CEM II/C-M-Zement überlagerte den Einfluss des Klinkers (Anteil 50 M.-%) im späten Prüfalter. Die Effekte, die Hüttensande unterschiedlicher KGV (S1-5, S2-6) in Kombinationen mit unterschiedlichen KGV des Klinkers auslösen können, sind im **Bild 36** eingetragen. Das Bild zeigt, dass ein Wechsel des Hüttensandes von „grob S1-5 auf fein S2-6“ (bei konstantem Klinker) sowie ein Wechsel des Klinkers von „grob K1-M auf fein C5“ (bei konstantem Hüttensand) zu einer signifikanten Steigerung der Packungsdichte sowie zu einer Zunahme der Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen führen kann. Entlang der gestrichelten Linie wurden unter Verwendung von Klinker K1-M und Hüttensand S1-5 sowie variierenden Kalksteinfeinheiten zunächst geringe Packungsdichten ($< 0,45$) und Festigkeiten von ca. 50 MPa ermittelt. Unter Verwendung von Klinker C5 und Hüttensand S2-6 wurden im Verlauf der gestrichelten Linie höhere Packungsdichten ($> 0,47$) und Festigkeiten von ca. 60 MPa ermittelt, ebenfalls mit variierenden Kalksteinfeinheiten.

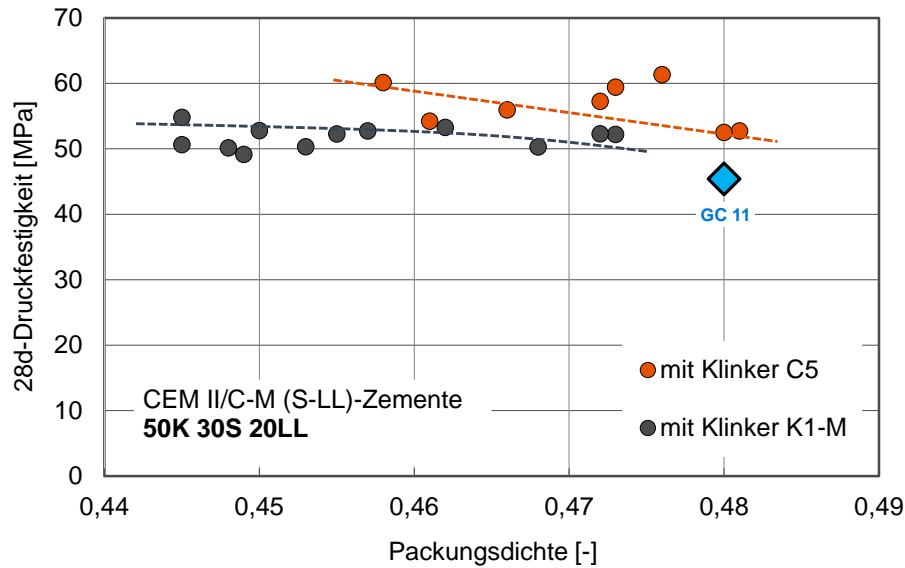


Bild 35 Druckfestigkeit der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente im Prüfalfer von 28 Tagen in Abhängigkeit ihrer Stampfpackungsdichte, Untersuchung der Normfestigkeit am Normmörtel ($w/z = 0,50$), Verwendung von Hauptbestandteilen jeweils variierender KGV bei konstanter stofflicher Zusammensetzung, Darstellung überlagernder Klinkereffekte

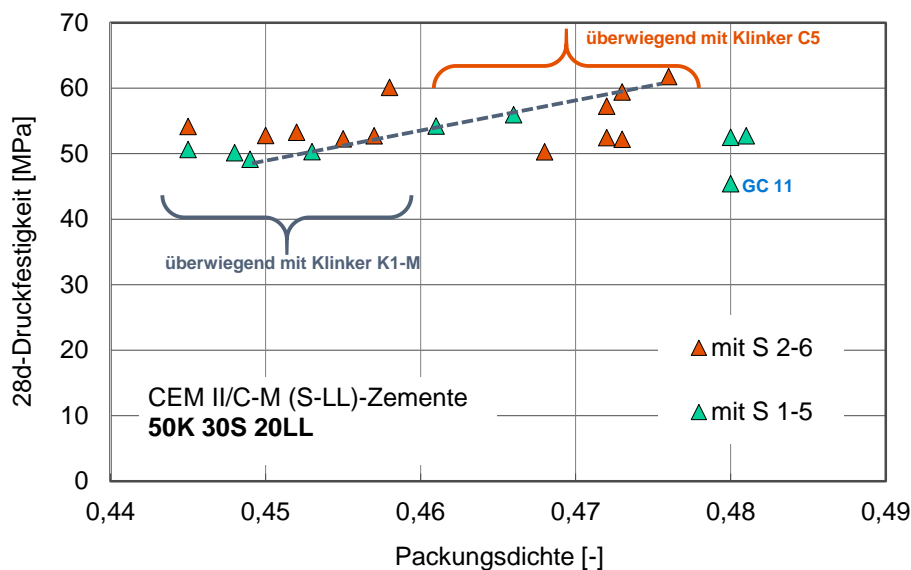


Bild 36 Druckfestigkeit der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente im Prüfalfer von 28 Tagen in Abhängigkeit ihrer Stampfpackungsdichte, Untersuchung der Normfestigkeit am Normmörtel ($w/z = 0,50$), Verwendung von Hauptbestandteilen jeweils variierender KGV bei konstanter stofflicher Zusammensetzung, Darstellung überlagernder Hüttensandeffekte

Die im **Bild 36** veranschaulichten Artefakte sind ein Produkt aus den Kombinationen von drei Hauptbestandteilen mit zum Teil deutlich unterschiedlichen Korngrößenverteilungen und Packungsdichten. Treffen geringe Anteile feiner Hauptbestandteile (z. B. Füllstoff Kalkstein) auf größere Hauptbestandteile mit enger KGV und geringer Packungsdichte (d.h. mit viel Hohlraumvolumen), kann dies zu einer Erhöhung der Zementpackungsdichte führen. Je nach Reaktivität des Partikels und je nach räumlicher Platzierung im Partikelkollektiv können derartige Effekte nicht nur die Normfestigkeit verändern,

sondern auch Auswirkungen auf die Porosität des Zementsteingefüges und die Dauerhaftigkeit von Beton haben.

Darüber hinaus ist für die Ausprägung des Packungsdichteeffekts auf die Normfestigkeit entscheidend, welche granulometrische Eigenschaft (z.B. Verteilungsbreite oder Feinheit) welcher Hauptbestandteile (K, S oder LL) vorrangig die Packungsdichte und somit die Normfestigkeit beeinflusst hat. Voraussetzung für eine Bewertung der Ergebnisse ist die konstante stoffliche Zementzusammensetzung (hier 50K 30S 20LL).

Eine Auswertung der Normfestigkeit in Abhängigkeit des Wasseranspruchs nach Puntke geht aus **Bild 37** hervor. Bei Verwendung der sehr feinen CEM II/C-M-Zemente mit Klinker C5 trat der über CEM II/B-M-Zemente bekannte Effekt nicht auf. Hier nahm die Normfestigkeit von ca. 60 MPa auf ca. 53 MPa ab, sobald diese Zemente in ihrem Wasseranspruch von ca. 37 Vol.-% auf 39 Vol.-% erhöht wurden. Auf die Festigkeit der CEM II/C-M-Zemente mit Klinker K1-M hatte der Wasseranspruch keine Auswirkungen.

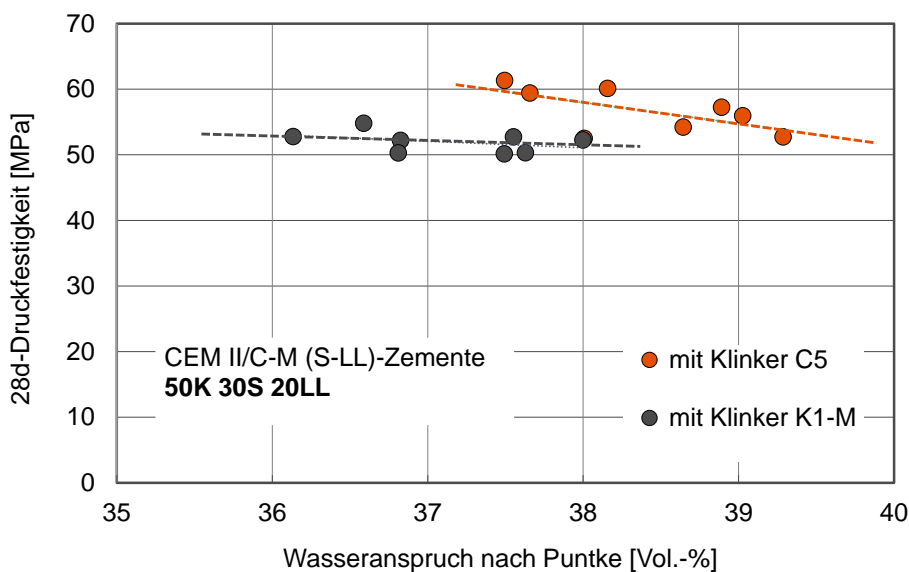


Bild 37 Druckfestigkeit der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente im Prüfalalter von 28 Tagen in Abhängigkeit des Wasseranspruchs nach Puntke, Untersuchung der Normfestigkeit am Normmörtel ($w/z = 0,50$), Verwendung von Hauptbestandteilen jeweils variierender KGV bei konstanter stofflicher Zusammensetzung

8.3 Granulometrische Einflüsse auf die Porengrößenverteilungen der CEM II/C-M (S-LL)-Zementmörtel im Alter von 28 Tagen

8.3.1 Porositätsmessungen

Zementspezifische Einflussparameter, wie z. B. die Zementzusammensetzung, können sich auf die Entstehung des Porengefüges, die Porosität und die Porengrößenverteilung (PGV) von Mörteln und Betonen auswirken. Die Porosität und die Porengrößenverteilung sind für viele dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften zementgebundener Baustoffe von grundlegender Bedeutung. Sie beschreiben das zementspezifische Porengefüge, wie es in und nach der Hydratation eines Zements entsteht. Außerdem verändert das während der Hydratation verfügbare Wasser das Porengefüge. Je nach Verteilung, Menge und Wirksamkeit des Wassers können Poren unterschiedlicher Größen entstehen, die die Lage und Steigung entsprechender Porengrößenverteilungen (PGV) zum Teil erheblich beeinflussen (vgl. z.B. [12] bzw. „Hydratation und Porengefüge bei Verwendung RC-haltiger Zemente: Eigenschaften feindisperser Stoffe aus dem Recycling mineralischer Bauabfälle und ihre Anwendung im

Zement Auswirkungen auf Wasseraufnahme, Hydratation und Porengefüge“, BBSR/BBSR, Zukunft-Bau, Az. SWD-10.08.18.7-20.04).

An den Zementmörteln wurde im Alter von 28 Tagen die Porengrößenverteilung gemessen. Die Feststellung der Porengrößenverteilung erfolgte mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie. In den Porengrößenverteilungen (PGV) wurde das kumulierte Porenvolumen in Abhängigkeit von der Porengröße aufgetragen. Für die Beurteilung von Porengrößenverteilungen werden z. B. das maximal messbare Porenvolumen oder der Volumenanteil der sog. Gelporen herangezogen.

Im Folgenden wird das maximal messbare Porenvolumen als „Gesamtporosität“ bezeichnet. Die Gesamtporosität entspricht dem gesamten, für Quecksilber zugänglichen Porenraum und wird in der kumulierten Porenradienverteilung beim kleinsten Porenradius ermittelt. Die Poren, die mit dem jeweils linken, deutlich steigenden Abschnitt einer PGV-Kurve abgebildet werden, charakterisieren den feinporigen Bereich. Poren $< 0,03 \mu\text{m}$ bzw. $< 0,01 \mu\text{m}$ charakterisieren die Gelporosität. Gelporen sind praktisch undurchlässig, sie können die Transportvorgänge von Flüssigkeiten oder Gasen behindern und insofern die Beständigkeit des Zementsteingefüges gegenüber schädigenden Umgebungsbedingungen verbessern. Die Porenanteile $< 0,01 \mu\text{m}$ und $< 0,03 \mu\text{m}$ wurden anhand der auf 100% normierten PGV-Verteilung ermittelt. Poren mit deutlich größeren Porenradien (z. B. Kapillarporen $> 0,03 \mu\text{m}$) verringern die Dichte des Zementsteingefüges und machen es gegenüber Umwelteinflüssen angreifbar.

8.3.2 Gesamtporosität der Normmörtel in Abhängigkeit von Packungsdichte und Normfestigkeit der Zemente

Zwischen der Gesamtporosität der Normmörtel im Alter von 28 Tagen und der Stampfpackungsdichte der Zemente hat sich kein Zusammenhang ergeben. Wie aus **Bild 38** hervorgeht, wurden an den Mörteln unter Verwendung von Klinker K1-M Gesamtporositäten von 12 Vol.-% bis 14 Vol.-% festgestellt. Zementmörtel auf der Basis von Klinker C5 wiesen Porositäten zwischen ca. 11 Vol.-% und 14 Vol.-% auf.

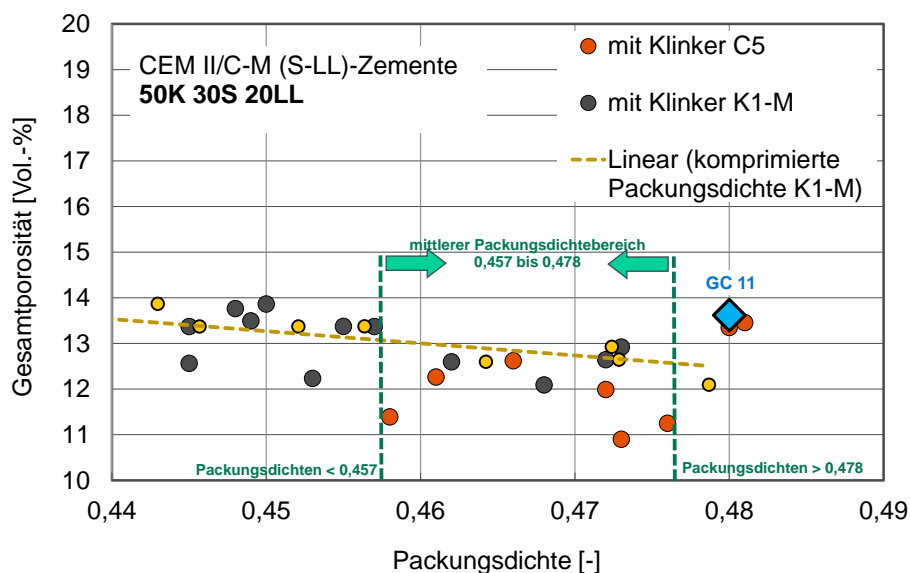


Bild 38 Gesamtporosität der CEM II/C-M (S-LL)-Normmörtel im Prüfalalter von 28 Tagen in Abhängigkeit der Stampfpackungsdichte bzw. der komprimierten Packungsdichte der Zemente (vgl. Trendlinie), Normmörtel mit $w/z = 0,50$, Verwendung von Zementhauptbestandteilen jeweils variierender KGV bei konstanter stofflicher Zusammensetzung

Geringe Gesamtporositäten bei Werten < 13 Vol.-% bzw. < 12 Vol.-% wurden im mittleren Stampfpackungsdichtebereich (im Bild zwischen 0,457 und 0,478) ermittelt. Die Mörtel unter Verwendung der Zement mit vergleichsweise höheren oder geringeren Stampfpackungsdichten wiesen Porositäten > 12 Vol.-% bzw. > 13 Vol.-% auf.

Zur Auswertung der Zemente auf Basis des Klinkers K1-M wurde außerdem die komprimierte Packungsdichte herangezogen (vgl. gelbe Trendlinie im Bild 37). Mit zunehmender komprimierter Packungsdichte der Zemente nahm die Gesamtporosität der entsprechenden Normmörtel im Alter von 28 Tagen geringfügig ab. Auch hier konnte der aus der Anwendung von CEM II/B-M-Zementen bekannte Effekt nicht bestätigt werden.

Im Bild 39 wurde die Normdruckfestigkeit in Abhängigkeit der Gesamtporosität aufgetragen. Die Werte wurden jeweils am Normmörtel im Prüfalter von 28 Tagen bestimmt. Es zeigt sich der bekannte Zusammenhang, dass mit zunehmender Gesamtporosität die Druckfestigkeit abnimmt. Unter Verwendung von Klinker C5 wurden im Vergleich zu Klinker K1-M höhere Festigkeiten bei geringeren Porositäten ermittelt.

Aus dem Bild (s. Markierung) geht ebenfalls hervor, dass eine vergleichbare Druckfestigkeit von beispielsweise 54 MPa auch dann erreicht werden konnte, wenn für die Gesamtporosität Werte zwischen 12 Vol.-% und 14 Vol.-% vorlagen. Die aufgrund der variierenden KGV der Hauptbestandteile entstandenen Festmörtel Eigenschaften verdeutlichen, dass das Erreichen einer definierten Druckfestigkeit nicht zwangsläufig die Entstehung eines dichten Mörtelgefüges mit entsprechender Gesamtporosität zur Folge haben muss. Die Druckfestigkeit alleine ist demnach kein hinreichendes Kriterium, um dauerhaftigkeitsrelevante Eigenschaften, wie z. B. eine definierte Gesamtporosität, sicher zu erreichen. Trotz unveränderter stofflicher Zementzusammensetzung können Festigkeiten und Porositäten breiten Schwankungen unterliegen, wenn das „disperse System Zement“ an einer oder an mehreren Systemgrenze granulometrisch verändert wurde.

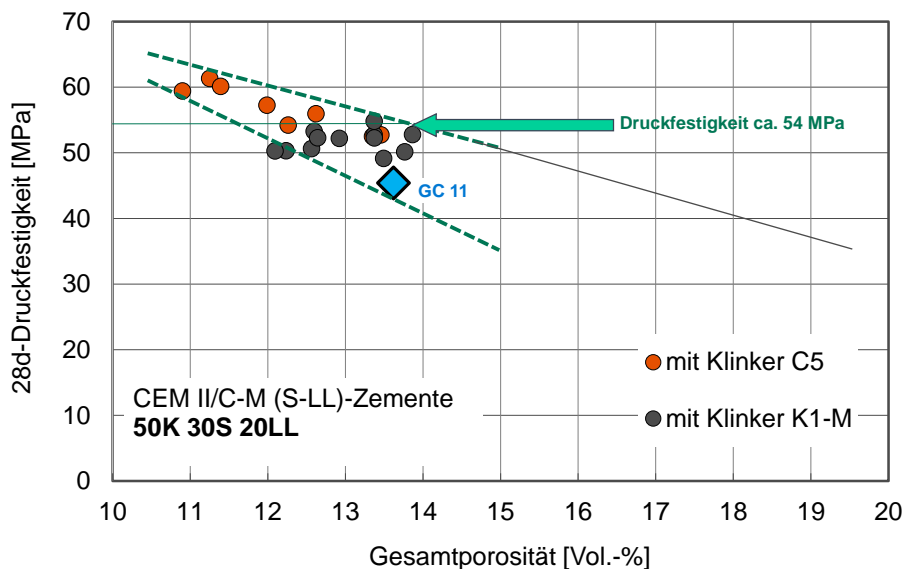


Bild 39 Normfestigkeit der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente in Abhängigkeit der Gesamtporosität, Untersuchungen am Normmörtel mit $w/z = 0,50$ im Prüfalter von 28 Tagen, Verwendung von Zementhauptbestandteilen jeweils variierender KGV bei konstanter stofflicher Zusammensetzung

8.3.3 Gelporosität der Normmörtel in Abhängigkeit von Packungsdichte und Normfestigkeit der Zemente

Bild 40 zeigt die Porenanteile $< 0,01 \mu\text{m}$ der auf 100% normierten Porengrößenverteilungen (PGV) in Abhängigkeit der Stampfpackungsdichte der Zemente. Dabei wurde das Porenvolumen der

Gesamtporosität gleich 100% gesetzt und das Porenvolumen der Gelporen < 0,01 µm prozentual ermittelt. Im Bild wurden die Zemente unter Verwendung der Hüttensande S1-5 (mit geringerer Feinheit) und S2-6 (mit höherer Feinheit) differenziert dargestellt. Aus dem Diagramm geht hervor, dass der überwiegende Teil der Zemente auf Basis des feineren Hüttensandes S2-6 Gelporenanteile von ca. 30% bis 40% aufwies (bezogen auf die jeweils normierte PGV). Dagegen wiesen die Zemente auf Basis des gröbereren Hüttensandes S1-5 überwiegend geringere Gelporenanteile von ca. 20% bis 30% auf. In Abhängigkeit der Zementpackungsdichte wurde kein Zusammenhang gefunden.

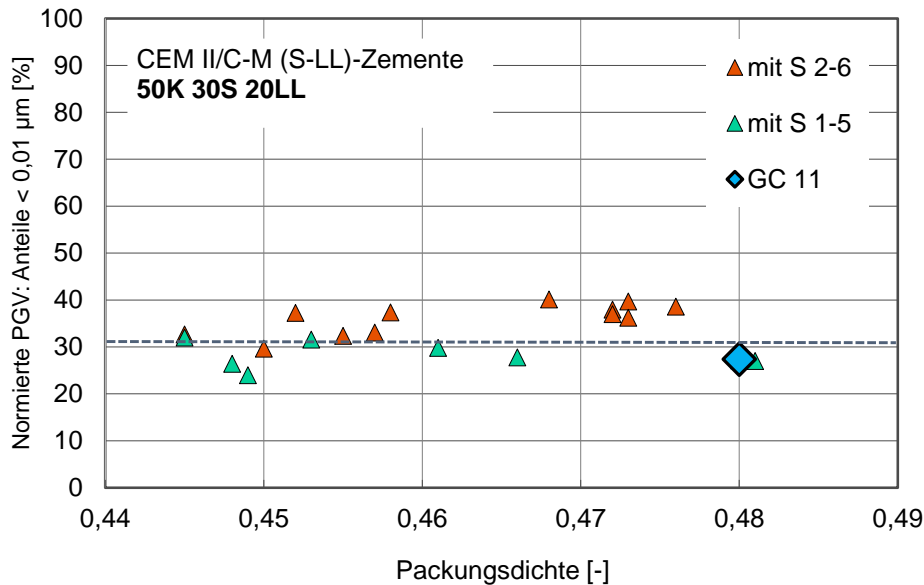


Bild 40 Gelporenanteile der CEM II/C-M (S-LL)-Normmörtel in Abhängigkeit der Stampfpackungsdichte der Zemente, Untersuchung der auf 100% normierten PGV im Prüfalter von 28 Tagen, Verwendung von Zementhauptbestandteilen jeweils variierender KGV bei konstanter stofflicher Zusammensetzung

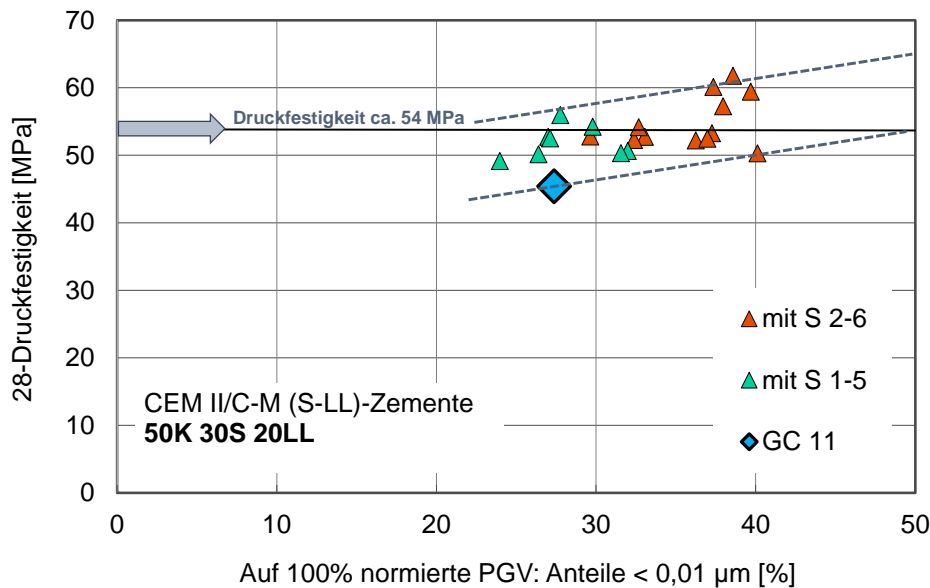


Bild 41 Normfestigkeit der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente in Abhängigkeit der Gelporenanteile, Untersuchung der auf 100% normierten PGV im Prüfalter von 28 Tagen, Verwendung von Zementhauptbestandteilen jeweils variierender KGV bei konstanter stofflicher Zusammensetzung

Wie aus **Bild 41** hervorgeht, entstanden unter Verwendung der CEM II/C-M-Zemente mit feinerem Hüttensand (S2-6) im Normmörtel höhere Anteile an Gelporen sowie höhere Druckfestigkeiten (Prüfalter 28 Tage). Dagegen wurden bei Verwendung des gröbereren Hüttensandes weniger Gelporen und geringere Festigkeiten ermittelt. Auch in dieser Darstellung wird deutlich, dass die Feinheit des Hüttensandes alleine kein hinreichendes Kriterium zum Erreichen einer definierten Zementfestigkeit oder Gelporosität sein kann. Trotz unveränderter stofflicher Zementzusammensetzung können Festigkeiten und Gelporositäten breiten Schwankungen unterliegen, wenn das „disperse System Zement“ granulometrisch verändert wurde. Das Bild zeigt beispielsweise, dass Normmörtel mit einer vergleichbaren Festigkeit von ca. 54 MPa Gelporenanteile zwischen 27% und 37% erreichen können.

9 Zusammensetzung granulometrisch optimierter CEM II/C-M (S-LL)-, CEM VI- und CEM X-Zemente sowie ressourcenschonender CEM II/C-M (Q-LL)-Zemente aus getrennter Mahlung

Die Auswertungen der Zement- und Mörtel­eigenschaften in Abhängigkeit der Stampfpackungsdichte, der komprimierten Packungsdichte sowie des Wasseranspruchs nach Punkte haben gezeigt, dass eine granulometrische Anpassung von Zementen mit CEM II/C-M (S-LL)-Zusammensetzung nur zum Teil erfolgreich war. Wiesen die im Vorgängerprojekt untersuchten Zemente mit 65 M.-% Klinker durchweg systematische Zusammenhänge in Abhängigkeit der Packungsdichte auf, so wurden an den Zementen mit 50 M.-% Klinker nur vereinzelt eine Systematik bzw. ein Zusammenhang zur Packungsdichte festgestellt. Der dominierende Einfluss der Klinker-KGV auf die Packungsdichte bzw. den Wasseranspruch der Zemente war in den hier untersuchten Zusammensetzungen nicht mehr grundsätzlich gegeben.

In den Untersuchungen konnte gezeigt werden, dass sowohl

- eine Veränderung der Steigung der KGV der Zementbestandteile als auch
- eine Veränderung der Mahlfineinheit der Zementbestandteile

Auswirkungen auf alle wesentlichen zementtechnischen Eigenschaften haben konnten. Entscheidend für die granulometrische Optimierung sind

- die Summe der Anteile der granulometrisch veränderten Zementbestandteile sowie
- die Richtung der granulometrischen Veränderung der Zementbestandteile.

Granulometrische Effekte können sich verstärken, wenn mindestens zwei Hauptbestandteile, die in der Summe einen Massenanteil > 50 M.-% des Zements einnehmen, in gleicher Weise verändert werden. Dies trifft beispielsweise zu, wenn ausschließlich sehr feine Ausgangsstoffe möglichst enger KGV kombiniert werden. In den meisten Fällen entsteht im Gemisch eine vergleichsweise geringe Packungsdichte. Auf der anderen Seite trifft es zu, wenn ausschließlich gröbere Ausgangsstoffe mit möglichst breiter KGV einen Anteil > 50 M.-% stellen. Im Gemisch entsteht somit eine vergleichsweise hohe Packungsdichte.

Einige wenige Versuchszemente mit Hauptbestandteilen möglichst enger KGV sowie möglichst hoher Mahlfineinheit wurden auf diese Weise hergestellt.

Die praktischen Untersuchungen an CEM II/C-M-Zementen unter Verwendung von Hauptbestandteilen jeweils variierender KGV haben darüber hinaus noch andere Effekte hervorgebracht. An einigen granulometrischen Kombinationen zeigte sich, dass bei konstanter stofflicher Zusammensetzung Gemische mit höheren Packungsdichten auch dann entstehen können, wenn ein geringer Anteil sehr feiner Partikel in den aus engen Korngrößenverteilungen entstehenden Hohlräumen gelangen kann. Das Hohlraumvolumen verringerte sich und die Packungsdichte nahm zu.

In den meisten Versuchszementen haben sich die granulometrischen Effekte der Zementbestandteile kompensiert. Wurden beispielsweise in dem einen Teil eines Zements (z. B. 50 M.-% Klinker) eine engere KGV sowie eine höhere Mahlfineinheit eingestellt, so hatte der andere Teil mit 30 M.-% Hüttensand und 20 M.-% Kalkstein jeweils breiterer KGV sowie geringerer Mahlfineinheit (in Summe ebenfalls 50 M.-%) i. d. R. gegenläufige Auswirkungen.

Die aus der Packungsdichte der Zemente bzw. aus der Granulometrie der Hauptbestandteile resultierenden Effekte auf zement- und betontechnische Eigenschaften können zusätzlich von der Reaktivität der Ausgangsstoffe sowie vom Wasserzementwert beeinflusst werden. Sowohl die Wirksamkeit der hydraulischen, latent hydraulischen oder puzzolanischen Reaktivitäten als auch die Robustheit gegenüber den in Mörteln bzw. Betonen einzustellenden Wasserzementwerten (Wassergehalt vs. Wasserbedarf) können über granulometrische Eigenschaften verstärkt oder kompensiert werden.

Da die granulometrische Optimierung als Werkzeug eingesetzt werden sollte, um leistungsstarke Zemente mit einem verringerten Klinkerfaktor von 50% bzw. 35% herzustellen, wurden für die Betonversuche die folgenden granulometrischen Zusammensetzungen ausgewählt:

Tabelle 8 Granulometrische Zusammensetzung klinkereffizienter CEM II/C-M (S-LL)-Zemente mit 50 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 20 M.-% Kalkstein (Feinheit: spezifische Oberfläche; Steigung: Breite der KGV)

Kurzbezeichnung Zement	50 M.-% Klinker	30 M.-% Hüttensand	20 M.-% Kalkstein
GC 11	K1-W minimale Steigung	S1-5	LL1-W minimale Steigung
GC 8	K1-M	S1-5	LL1-W minimale Steigung
G 1	K1-M	S1-5	LL0 maximale Steigung
G 17	K1-M	S1-5	LL1-7 maximale Feinheit und Steigung
G 47	C5 *) maximale Feinheit und Steigung	S2-6 maximale Feinheit und Steigung	LL2 minimale Feinheit
G 46 optimiert	C5 *) maximale Feinheit und Steigung	S2-6 maximale Feinheit und Steigung	LL1-7 maximale Feinheit und Steigung

*) Klinker C5: inklusive Sulfatträger

*Anmerkung: Ergänzend zur getrennten Mahlung wurde auch ein CEM II/C-M (S-LL) der Zusammensetzung 50 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 20 M.-% Kalkstein auf einer diskontinuierlichen Chargenkugelmühle **gemeinsam** gemahlen, vgl. Abschnitt 6.1.*

Tabelle 9 Granulometrische Zusammensetzung klinkereffizienter CEM VI (S-LL)-Zemente mit 35 M.-% Klinker, 45 M.-% Hüttensand und 20 M.-% Kalkstein (Feinheit: spezifische Oberfläche; Steigung: Breite der KGV)

Kurzbezeichnung Zement	35 M.-% Klinker	45 M.-% Hüttensand	20 M.-% Kalkstein
G 64	C5 *) maximale Feinheit und Steigung	S2-6 maximale Feinheit und Steigung	LL2 minimale Feinheit
G 66 optimiert	C5 *) maximale Feinheit und Steigung	S2-6 maximale Feinheit und Steigung	LL1-7 maximale Feinheit und Steigung

*) Klinker C5: inklusive Sulfatträger

Darüber hinaus wurden sog. CEM X-Zemente mit Zusammensetzungen außerhalb EN 197 Normenreihe hergestellt und untersucht. In den CEM X-Zementen sollte neben einem möglichst geringem Klinkerfaktor gleichzeitig ein geringer Hüttensandgehalt eingestellt werden, da die Verfügbarkeit von Hüttensand langfristig abnehmen wird. Der Kalksteingehalt wurde im Vergleich zu den o.g. CEM II/C-M-Zementen von 20 M.-% auf 30 M.-% erhöht. Somit gehen die CEM X-Zusammensetzungen über die ursprünglichen Projektziele hinaus.

Tabelle 10 Granulometrische Zusammensetzung klinkereffizienter CEM X (S-LL)-Zemente mit 30 M.-% Kalkstein (Feinheit: spezifische Oberfläche; Steigung: Breite der KGV)

Kurzbezeichnung CEM X	40 M.-% Klinker	30 M.-% Hüttensand	30 M.-% Kalkstein
G 81	C5 *) maximale Feinheit und Steigung	S2-6 maximale Feinheit und Steigung	LL1-7 maximale Feinheit und Steigung
Kurzbezeichnung CEM X	35 M.-% Klinker	30 M.-% Hüttensand	35 M.-% Kalkstein
G 83	C5 *) maximale Feinheit und Steigung	S2-6 maximale Feinheit und Steigung	LL1-7 maximale Feinheit und Steigung

*) Klinker C5: inklusive Sulfatträger

Neben der granulometrischen Optimierung der hüttensandhaltigen CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zemente (Hersteller-Seite) wurde bei einigen Anwendungen und Prüfungen im Beton auch eine gezielte Absenkung des Wasserzementwertes bzw. des Wassergehaltes in Ansatz gebracht (Anwender-Seite). Ziel beider Maßnahmen war es, unter Verwendung deutlich klinkerreduzierter Zemente wesentliche zulassungsrelevante Dauerhaftigkeitseigenschaften im Beton zu erreichen.

In diesem Projekt wurden an ziegelhaltigen Zementen mit CEM II/C-M (Q-LL)-Zusammensetzung erstmalig Erfahrungen gesammelt, puzzolanisch reaktive Recyclingbaustoffe aus der Kreislaufwirtschaft in Kombination mit Klinker und Kalkstein einzusetzen (Hersteller-Seite). Neben dem ressourcenschonenden Aspekt wurde auch der Energieverbrauch bei der Zementmahlung berücksichtigt, da für niedrig gebrannte, leicht mahlbare Ziegelsteine i.d.R. ein deutlich geringerer spezifischer Arbeitsbedarf erforderlich ist als z. B. für die Hüttensandmahlung [3]. Die folgenden Bilder symbolisieren diese Motivation:



Bild 42 Symbolbilder für weitere Optimierungsziele bei der Herstellung klinkereffizienter Zemente links: Verwendung alternativer Ressourcen aus der Kreislaufwirtschaft sowie aus dem Recycling mineralischer Bauabfälle
rechts: Verwendung von leicht(er) mahlbaren Bestandteilen bzw. Anwendung von energieeffizienten Mahlverfahren zur Verringerung des spezifischen Arbeitsbedarfs sowie des Stromverbrauchs bei der Herstellung klinkereffizienter Zemente
(Quelle: „Granulometrische Einflüsse klinkereffizienter Zemente auf den Frost- und Frost-Tausalz-widerstand von Beton“, Katrin Severins, Christoph Müller, Luise Wedekind, H.-M. Ludwig; IBAUSIL; Weimar, 13. – 15. September 2023)

Für die ziegelhaltigen Versuchszemente wurde ein Ziegelschleifstaub aus der Planziegelherstellung auf eine labortechnisch maximale Feinheit gemahlen. Im Ziegelmehl wurde ein Anteil von 27 M.-%

reaktionsfähigem SiO₂ festgestellt, was den Anforderungen an natürliche getemperte Puzzolane gemäß DIN 197-1 entspricht. Die ressourcenschonenden Zemente wurden nur in ihrer Kalksteingranulometrie verändert, eine Anpassung der Klinkergranulometrie (z. B. auf engere Klinker-KGV mit höherer Feinheit) wurde nicht untersucht, da dies zu einer deutlichen Zunahme des Energieverbrauchs bei der Klinkermahlung geführt hätte. Auch diese Zemente wurden in Betonen mit abgesenkten Wasserzementwerten bzw. Wassergehalten verarbeitet (Anwender-Seite), um Dauerhaftigkeitseigenschaften sicherzustellen.

Tabelle 11 Granulometrische Zusammensetzung klinkereffizienter CEM II/C-M (Q-LL)-Zemente mit 50 M.-% Klinker, 30 M.-% Ziegel und 20 M.-% Kalkstein (Feinheit: spezifische Oberfläche; Steigung: Breite der KGV)

Überschrift	50 M.-% Klinker	30 M.-% Ziegel	20 M.-% Kalkstein
G 43	K1-M	Q1 maximale Feinheit	LL2 minimale Feinheit
GC 9	K1-M	Q1 maximale Feinheit	LL1-W minimale Steigung
G 18	K1-M	Q1 maximale Feinheit	LL1-7 maximale Feinheit und Steigung

*Anmerkung: Ergänzend zur getrennten Mahlung wurde auch ein CEM II/C-M (Q-LL) der Zusammensetzung 50 M.-% Klinker, 30 M.-% Ziegel und 20 M.-% Kalkstein auf einer diskontinuierlichen Chargenkugelmühle **gemeinsam** gemahlen, vgl. Abschnitt 6.2.*

10 Versuchszemente CEM X aus der gemeinsamen Mahlung der Hauptbestandteile Klinker, Kalkstein und Hüttensand auf einer Vertikal-Wälzmühle

10.1 Von der diskontinuierlichen zur kontinuierlichen Mahlung: Ziele der Mahlversuche

In der gemeinsamen Mahlung von Klinker, Kalkstein und Hüttensand (vgl. Abschnitt 6.1) bzw. Klinker, Kalkstein und Ziegel (vgl. 6.2) wurden die granulometrischen Eigenschaften der Zemente überwiegend von der Mahlbarkeit der Hauptbestandteile, ihrem Anteil im Mahlgut sowie von der Mahlanlage beeinflusst. Eine gezielte Einflussnahme auf nur einen Hauptbestandteil bzw. auf seine Granulometrie war in der gemeinsamen Mahlung auf einer Chargenkugelmühle nicht möglich. [13] [14] [15] Leicht mahlbarer Kalkstein und Ziegel reicherten sich während der diskontinuierlichen Mahlung in den feinen Fraktionen an und führten damit zu breiteren, meist mehrmodalen KGV. In der kontinuierlichen Mahlung auf einer Vertikal-Wälzmühle sollten je nach Betriebsweise engere KGV erreichbar sein.

In halbtechnischen Mahlversuchen wurden Klinker, Hüttensand und Kalkstein gemeinsam auf einer kontinuierlich betriebenen Vertikal-Wälzmühle gemahlen. Die Zusammensetzung des Mahlgutes sollte der eines CEM X-Zements mit 30 M.-% Kalkstein entsprechen, sie geht aus **Tabelle 12** hervor. Es sollte untersucht werden, ob sich die Granulometrie des gemeinsam gemahlten Klinkers bzw. Hüttensandes in Richtung einer engen KGV mit geringer Packungsdichte sowie entsprechendem Hohlraumvolumen beeinflussen lässt. Schwerer mahlbare Hauptbestandteile (wie z. B. Klinker bzw. Hüttensand) weisen nach gemeinsamer, kontinuierlicher Mahlung eine engere KGV auf als leichter mahlbare Hauptbestandteile (wie z. B. Kalkstein). Außerdem liegen leichter mahlbare Bestandteile feiner vor als schwerer mahlbare Bestandteile des Mahlgutes. [13] [14] [16] [17] [18] [15] [19] (Nur in wenigen technischen Ausnahmefällen können unterschiedlich mahlbare Stoffe annähernd vergleichbare KGV nach gemeinsamer Mahlung erreichen.) Die „Grenzzusammensetzung“ des Mahlgutes wurde daher so gewählt, dass der gesamte feine Kalkstein in die aus Klinker und Hüttensand entstehenden Hohlräume gelangen sollte. Insofern sollte der Betrieb der Mahlanlage so gesteuert werden, dass die zirkulierenden Massenströme steigende bzw. maximal mögliche Umlaufzahlen erreichen, die

schließlich zu engeren KGV des Mahlgutes sowie zu geringeren Packungsdichten führen sollten. Die Feinheit des Mahlgutes war zweitrangig.

Neben den granulometrischen Zielen wurden mit den Mahlversuchen weitere verfahrenstechnische, anwendungstechnische und ökologische Ziele verfolgt:

- den spezifischen Arbeitsbedarf während der gemeinsamen Mahlung senken (im Vergleich zu getrennen Mahlverfahren mit anschließendem Mischen) und Energieeffizienz steigern,
- den erhöhten Anteil des leicht mahlbaren Kalksteins (im Vergleich zu CEM VI mit 20 M.-% LL) energetisch ausnutzen und ökobilanziell berücksichtigen,
- den auf 30 M.-% verringerten Anteil des schwer mahlbaren Hüttensandes (im Vergleich zu CEM VI mit 45 M.-%) energetisch ausnutzen, ökobilanziell berücksichtigen – auch hinsichtlich der abnehmenden Hüttensandverfügbarkeit,
- die Leistungsfähigkeit der Zemente trotz eines Klinkerfaktors von 40% auf höchst möglichem Niveau halten,
- die zulassungsrelevanten Dauerhaftigkeitskriterien entsprechender Betone einhalten, ggf. bei Ansatz einer w/z-Wertabsenkung (durch Reduzierung des Wassergehaltes).

Tabelle 12 Zusammensetzung der CEM X-Zemente aus der gemeinsamen, kontinuierlichen Mahlung (GM) von Klinker, Hüttensand und Kalkstein bei unterschiedlichen Betriebszuständen

Zementart	Mahlgut / Zementbezeichnung*)	Klinker	Kalkstein	Hüttensand
CEM X	GM 05 minimaler Umlauf	40 M.-%	30 M.-%	30 M.-%
CEM X	GM 04 zunehmender Umlauf	40 M.-%	30 M.-%	30 M.-%
CEM X	GM 03 zunehmender Umlauf	40 M.-%	30 M.-%	30 M.-%
CEM X	GM 01 maximaler Umlauf	40 M.-%	30 M.-%	30 M.-%

*) Nummerierung entspricht dem Betriebszustand bei Probenahme, GM = gemeinsame Mahlung

10.2 Untersuchung der granulometrischen Eigenschaften des Mahlgutes und der Zemente aus gemeinsamer Mahlung

Die Mahlversuche wurden ohne Sulfatträger durchgeführt. Aus jeweils stationärem Mahlbetrieb wurden insgesamt vier Proben des Siebfeingutes entnommen und untersucht. Aus dem Zerkleinerungsverhalten der drei Hauptbestandteile in den o.g. Anteilen ergaben sich während der Mahlversuche auf der Vertikal-Wälzmühle die in **Bild 43** und **Bild 44** dargestellten Korngrößenverteilungen. Während im Betriebszustand GM 05 eine vergleichsweise geringe Feinheit von ca. 4500 cm²/g (Blaine) ermittelt wurde, nahm die Feinheit des Mahlgutes bei jeder weiteren Probenahme bis hin zum Betriebszustand GM 01 zu und erreichte einen Blaine-Wert von ca. 7700 cm²/g.

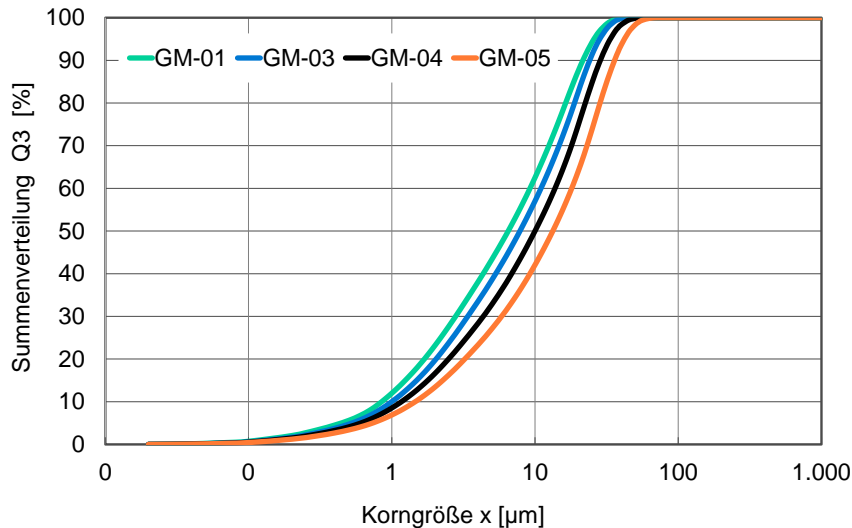


Bild 43 Korngrößenverteilungen (Summenverteilungen) des Mahlgutes aus der gemeinsamen Mahlung von 40 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 30 M.-% Kalkstein

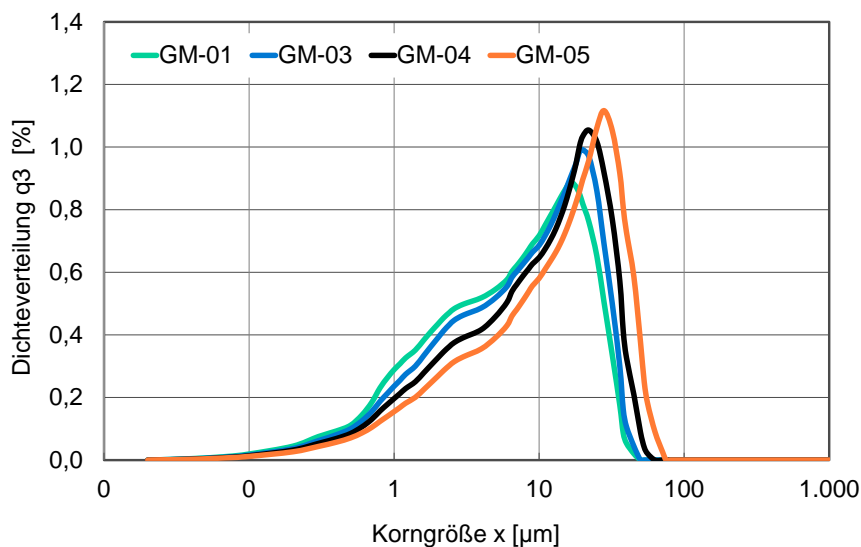


Bild 44 Korngrößenverteilungen (Dichteverteilungen) des Mahlgutes aus der gemeinsamen Mahlung von 40 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 30 M.-% Kalkstein

Aus der im **Bild 44** dargestellten Dichteverteilung geht hervor, dass die KGV des Mahlgutes von GM 05 bis GM 01 zunehmend enger wurde und weniger bzw. gar keine größeren Partikel zwischen 40 µm und 90 µm aufwies. Gleichzeitig ist festzustellen, dass sich feine Partikel zwischen 1 µm und 5 µm anreicherten und in der Dichtefunktion eine „Schulter“ bildeten. Derartige Formen von Korngrößenverteilungen lassen sich nicht mehr hinreichend gut anhand der RRSB-Verteilung beschreiben. **Bild 45** gibt einen Überblick der RRSB-Parameter. Während die Feinheitparameter bzw. RRSB-Lageparameter x' mit zunehmender Mahlfineinheit bzw. mit abnehmender Packungsdichte erwartungsgemäß verringert wurden, blieb das RRSB-Steigungsmaß der KGV im Betriebszustand GM 05, GM 04 und GM 03 bei $n = 0,93$ konstant, im Zustand GM 01 wurde ein geringeres Steigungsmaß von $n = 0,91$ ermittelt.

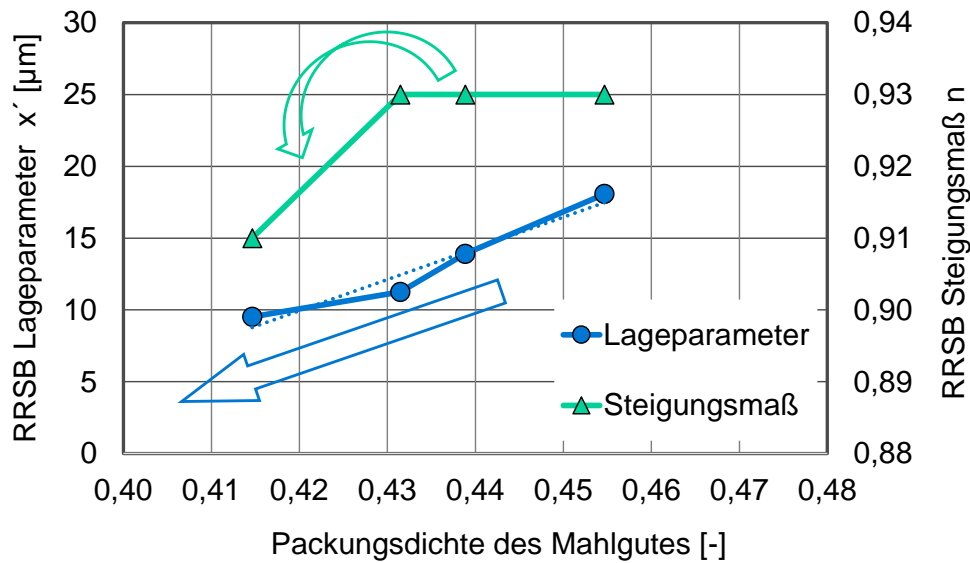


Bild 45 Auswertung der RRSB-Verteilungsfunktionen an den Mahlgutproben GM 05 bis GM 01: Lageparameter x' und Steigungsmaß n in Abhängigkeit der komprimierten Packungsdichte des Mahlgutes

Tabelle 13 Granulometrische Eigenschaften des Mahlgutes aus der gemeinsamen Mahlung (GM) und der entsprechenden CEM X-Zemente

Probe	komprimierte Packungsdichte Mahlgut [-]	Stampfpackungsdichte Zement [-]	Wasseranspruch Punkte Zement [Vol.-]
GM 01	0,415	0,498 *)	40,75 *)
GM 03	0,431	0,457	41,93 *)
GM 04	0,439	0,464	39,53
GM 05	0,455	0,500	39,82

*) Das zu sulfatisierte Mahlgut hatte eine sehr hohe Feinheit > 6600 cm²/g (Blaine).

Einige atypischen Ergebnisse aus der granulometrischen Untersuchung des Mahlgutes nach RRSB spiegeln sich auch in der Bestimmung der Packungsdichte und des Wasseranspruchs der Zemente wider (**Tabelle 13**). Für die Herstellung der Zemente GM 01 bis GM 05 wurde das Mahlgut mit den entsprechenden Sulfatträgern Anhydrit und Halbhydrat sulfatisiert.

Während das Mahlgut bis hin zum Betriebszustand GM 01 (mit maximalem Umlauf) systematisch in der Feinheit zunahm und in der Verteilungsbreite sowie in der komprimierten Packungsdichte abnahm, wurden am Zement – d.h. nach Sulfatzugabe - keine eindeutigen Ergebnisse ermittelt. Auch wenn die Zugabe des Sulfatträgers sehr gering war, kann sie bei Verwendung eines sehr feinen Mahlgutes sowie eines sehr feinen Sulfatträgers geringfügige Auswirkungen auf die am Pulver bestimmte Stampfpackungsdichte und den Wasseranspruch nach Punkte haben.

Es ist davon auszugehen, dass sich die KGV der drei gemeinsam gemahlten Hauptbestandteile entsprechend ihrer spezifischen Mahlbarkeit (je nach Mahldauer und Mahlverfahren) fortwährend, jedoch in unterschiedlichen Geschwindigkeiten veränderten. Entsprechend der Massenanteile war der Einfluss auf die granulometrischen Eigenschaften des Mahlgutes ausgeprägt. Besonders großen Einfluss auf die Erhöhung der Mahlfineheit des gemeinsamen Mahlgutes hatte der leicht mahlbare Kalkstein (Anteil 30 M.-% im CEM X). Die so herbeigeführte Modifikation der granulometrischen Mahlgutzusammensetzung wirkte sich – in Abhängigkeit der Betriebsparameter bzw. Betriebszustände - unmittelbar auf die Packungsdichte und den Wasseranspruch der entsprechenden Mahlgutproben aus.

Insofern wurde in den Versuchen zur gemeinsamen Mahlung des CEM X einerseits die Packungsdichte des Mahlgutes in Abhängigkeit der Mahlfeinheit verringert (vgl. auch Versuche zur getrennten Mahlung).

Andererseits wurden an einigen gemeinsamen Mahlgutproben (vgl. auch Mahlung mit Ziegel, Abschnitt 6.2) mit deutlichem Anstieg der Mahlfeinheit auf Werte $> 5500 \text{ cm}^2/\text{g}$ (vgl. CEM II/C-M (Q-LL) bzw. auf Werte $> 6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ (vgl. CEM X) bei gleichfalls hohen Anteilen feiner (leicht mahlbarer) Bestandteile zum Teil auch zunehmende Packungsdichten ermittelt.

10.3 Untersuchungen an Normmörteln unter Verwendung gemeinsam gemahlener Versuchszemente

Unter Verwendung der Zemente GM 01 bis GM 05 wurden Normmörtel gemäß DIN 196-1 hergestellt. Das Ausbreitmaß der Frischmörtel wurde gemäß DIN 1015-3 untersucht und zeigt erwartungsgemäß, dass mit abnehmender Packungsdichte des Mahlgutes auch die Verarbeitbarkeit der entsprechenden Zementmörtel beeinflusst wurde. Wurde mit GM 05 ein Ausbreitmaß von 173 mm ermittelt, so verringerte sich das Ausbreitmaß des Mörtels mit GM 01 deutlich und erreichte 146 mm.

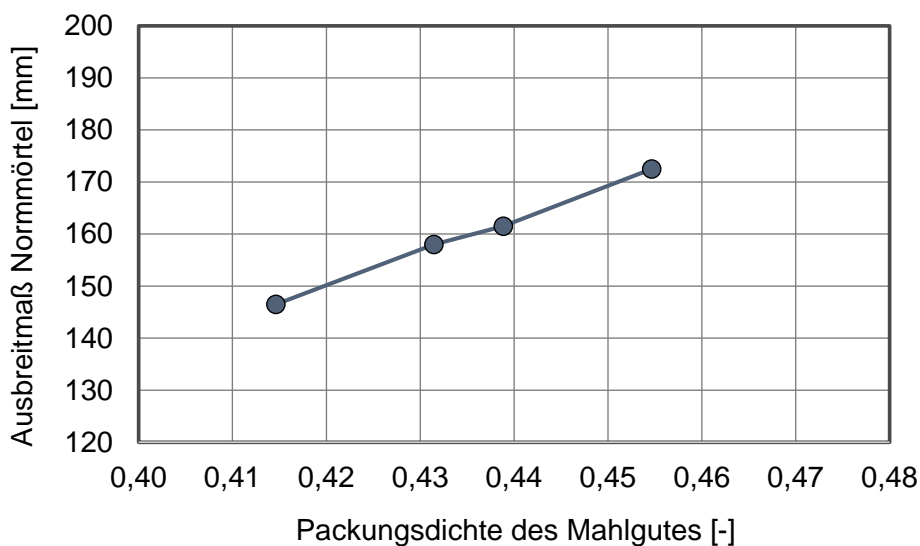


Bild 46 Ausbreitmaße der Normmörtel unter Verwendung der CEM X-Zemente mit 40 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 30 M.-% Kalkstein aus gemeinsamer Mahlung in Abhängigkeit der komprimierten Packungsdichte des Mahlgutes

Auf die Anfangs- und Normfestigkeiten hatte die Packungsdichte erheblichen Einfluss (vgl. **Bild 47**). Im Alter von zwei Tagen nahmen die Werte von ca. 9 MPa auf ca. 16 MPa zu, im Alter von 28 Tagen stiegen die Werte von ca. 34 MPa auf ca. 52 MPa. Damit erreichte der Zement GM 01 Ergebnisse entsprechend der Druckfestigkeitsklasse 42,5 N (DIN EN 197-1).

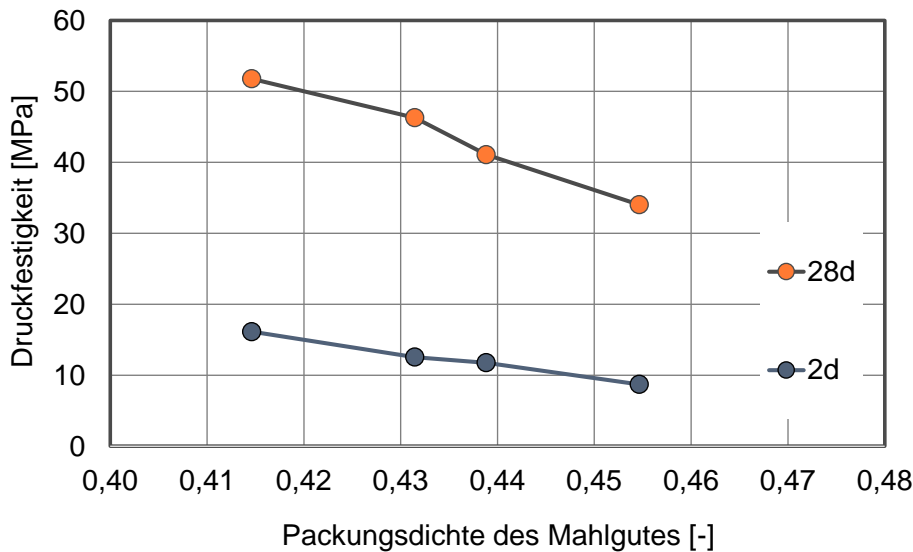


Bild 47 Anfangsfestigkeit und Normfestigkeit der CEM X-Zemente aus gemeinsamer Mahlung von 40 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 30 M.-% Kalkstein

10.4 Granulometrische Einflüsse auf die Porengrößenverteilungen der Normmörtel

Neben dem Einfluss auf die Form und die Lage der KGV zeigten sich auch Auswirkungen auf die Form und Lage der Porenradienverteilungen am Normmörtel im Alter von 28 Tagen. Wie aus den folgenden Bildern hervorgeht, verlagerte sich der linke, steigende Ast der Porenradienverteilungskurve von GM 05 auf GM 01 schrittweise in den feinporigen Bereich. Außerdem wurden entsprechend geringere Gesamtporositäten ermittelt. Die Werte nahmen von ca. 11 Vol.-% auf ca. 10 Vol.-% ab. Besonders deutlich nahm der Anteil der dauerhaftigkeitsrelevanten Gelporen < 0,01 µm und < 0,02 µm (bezogen auf die auf 100% normierte Porenverteilung) zu, wenn die Mörtelzusammensetzung von GM 05 auf GM 01 umgestellt wurde.

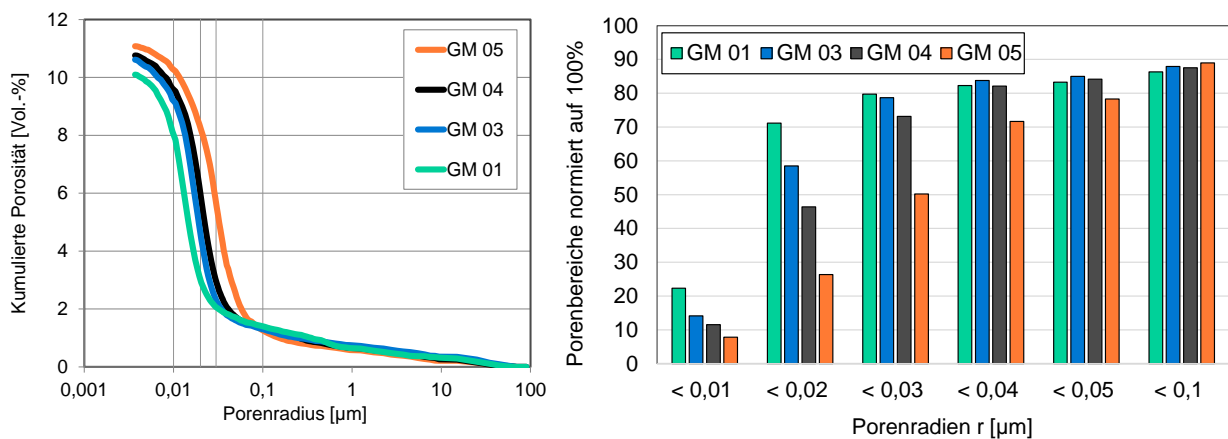


Bild 48 links: Porengrößenverteilungen an Normmörteln im Alter von 28 Tagen, Verwendung von CEM X-Zementen aus gemeinsamer, kontinuierlicher Mahlung von 40 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 30 M.-% Kalkstein
rechts: Anteile des Porenvolumens in den Porengrößenbereichen der auf 100% normierten Porengrößenverteilungen in %

Ob sich die Effekte aus Druckfestigkeit und Porengefüge auch auf den Beton auswirken können, werden weitere Untersuchungen zeigen (vgl. z.B. Abschnitte 16 bis 19).

11 Vergleich der CEM X-Zemente aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung mit CEM VI-Zementen aus getrennter Mahlung

Um die Potenziale deutlich klinkerreduzierter Zemente mit 30 M.-% bzw. 20 M.-% Kalkstein weiter auszuloten, wurden entsprechende Versuchszemente CEM X mit CEM VI verglichen. Darüber hinaus wurde die Leistungsfähigkeit einiger CEM X-Zemente aus gemeinsamer Mahlung (GM) sowie getrennter Mahlung gegenübergestellt. Die granulometrischen Zusammensetzungen sind in der folgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 14 Granulometrische Zusammensetzung klinkereffizienter CEM VI- und CEM X-Zemente aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung

Zementart	Zementbezeichnung	Klinker	Kalkstein	Hüttensand
CEM X	G 34	40 M.-% K1-M	30 M.-% LL2	30 M.-% S1-5
CEM X	G 5	40 M.-% K1-M	30 M.-% LL0	30 M.-% S1-5
CEM X	G 21	40 M.-% K1-M	30 M.-% LL1-7	30 M.-% S1-5
CEM X	G 82	40 M.-% C5	30 M.-% LL2	30 M.-% S2-6
CEM X	G 81	40 M.-% C5	30 M.-% LL1-7	30 M.-% S2-6
CEM X	GM 03 gemeinsam gemahlen	40 M.-%	30 M.-%	30 M.-%
CEM X	GM 01 gemeinsam gemahlen	40 M.-%	30 M.-%	30 M.-%
CEM VI	G 64	35 M.-% C5	20 M.-% LL2	45 M.-% S2-6
CEM VI	G 66	35 M.-% C5	20 M.-% LL1-7	45 M.-% S2-6

Bild 49 zeigt die Ergebnisse aus der Untersuchung der Stampfpackungsdichte. Da der CEM X-Zement G 81 aus jeweils feinst möglichen Hautbestandteilen besteht, ist er in seiner granulometrischen Zusammensetzung dem Zement GM 01 aus gemeinsamer Mahlung sehr ähnlich. Die Zemente wiesen mit Werten zwischen 0,49 und 0,50 die höchsten Stampfpackungsdichten auf. Die Packungsdichten der anderen Zemente lagen auf geringerem Niveau, zum Teil bei Werten < 0,46.

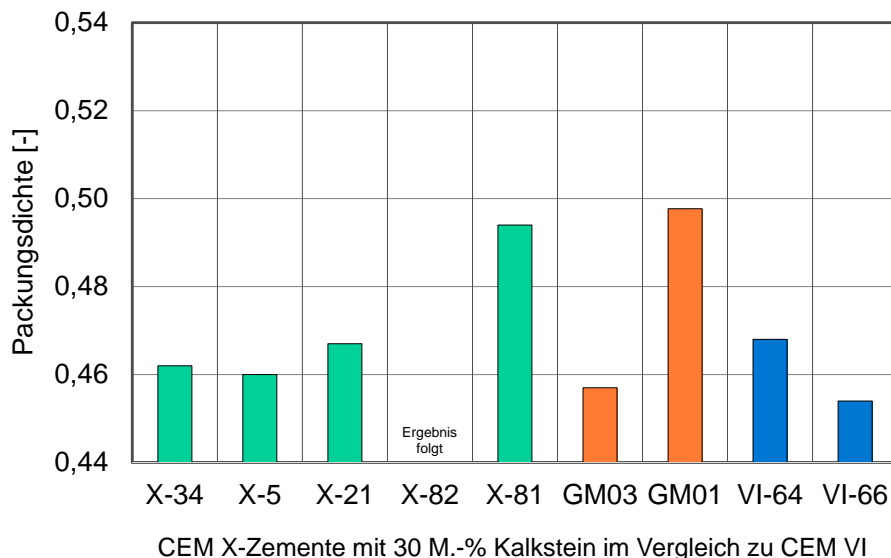


Bild 49 Stampfpackungsdichten klinkereffizienter CEM VI- und CEM X-Zemente aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung (vgl. **Tabelle 14**)

Im Wasseranspruch nach Punkte wiesen die bis dato untersuchten Zemente Werte zwischen 39 Vol.-% und 42 Vol.-% auf, was auf eine zunehmend ungünstige Verarbeitbarkeit entsprechender Normmörtel z. B. mit GM 01 und GM 03 hindeuten kann. Getrennt gemahlene Zemente lassen sich im

Normmörtel umso besser verarbeiten, wenn die Hauptbestandteile granulometrische Unterschiede aufweisen. Das geht aus **Bild 50** (Wasseranspruch Punkte) sowie aus **Bild 51** (Ausbreitmaß Frischmörtel) hervor. Die höchsten Ausbreitmaße > 170 mm wurden in den Versuchen mit CEM X G 34, mit CEM X G 82 und mit CEM VI G 64 ermittelt. Diese Zemente wurden jeweils mit grobem Kalkstein (Mahlfeinheit ca. 3000 cm²/g hergestellt).

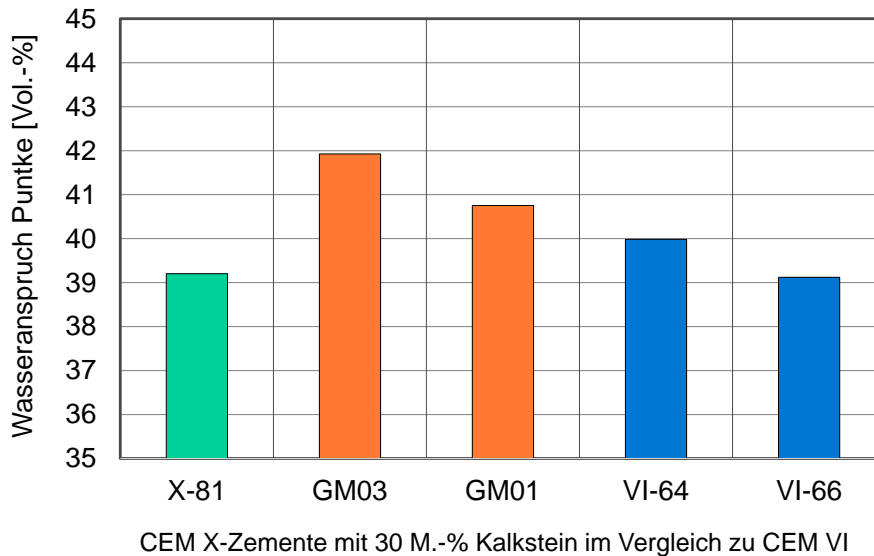


Bild 50 Wasseranspruch nach Punkte, vergleichende Untersuchungen an klinkereffizienten CEM VI- und CEM X-Zementen aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung (vgl. **Tabelle 14**)

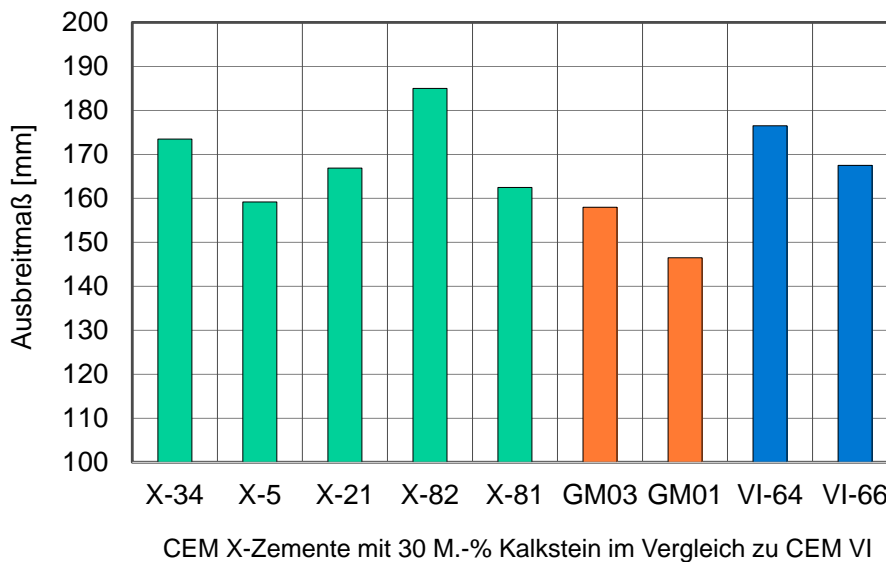


Bild 51 Ausbreitmaße der Normmörtel, vergleichende Untersuchungen unter Verwendung klinkereffizienter CEM VI- und CEM X-Zemente aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung (vgl. **Tabelle 14**)

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen fasst **Bild 52** zusammen. Während im Prüfalter von zwei Tagen der CEM X-Zement GM 01 sowie der CEM X-Zement G 21 vergleichsweise hohe Festigkeiten von ca. 15 MPa bzw. 16 MPa erzielten, lagen die Anfangsfestigkeiten der anderen Zemente (inkl. CEM VI) zwischen 11 MPa und 14 MPa. Im Alter von 28 Tagen wurden an den CEM VI-Zementen sowie an zwei CEM X-Zementen Festigkeiten ≥ 52 MPa festgestellt. Andere CEM X-Zemente wiesen Normfestigkeiten zwischen 41 MPa und 47 MPa auf.

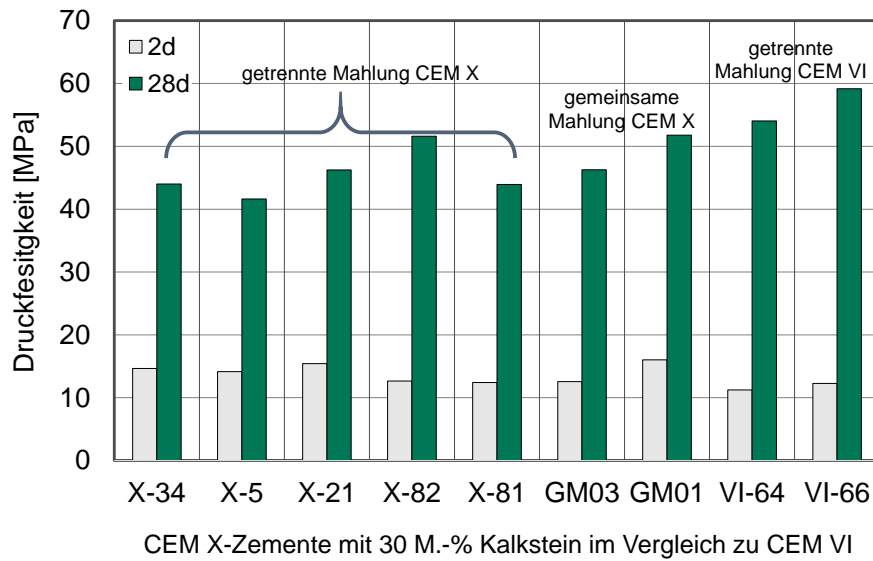


Bild 52 Anfangs und Normfestigkeiten klinkereffizienter CEM VI- und CEM X-Zemente aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung im Vergleich (vgl. **Tabelle 14**)

Aus den Untersuchungen der Porenradienverteilungen der Normmörtel im Alter von 28 Tagen (**Bild 53**, **Bild 54**) geht hervor, dass die Mörtel der CEM X-Zemente aus gemeinsamer Mahlung die geringsten Gesamtporositäten (ca. 10 Vol.-%) aufwiesen. Auch die Gesamtporosität der CEM VI-Mörtel lag mit 11 Vol.-% bzw. 12 Vol.-% auf einem geringen Niveau. Die getrennte Mahlung der anderen CEM X-Zemente führte im Normmörtel zu höheren Gesamtporositäten von bis zu 15 Vol.-%.

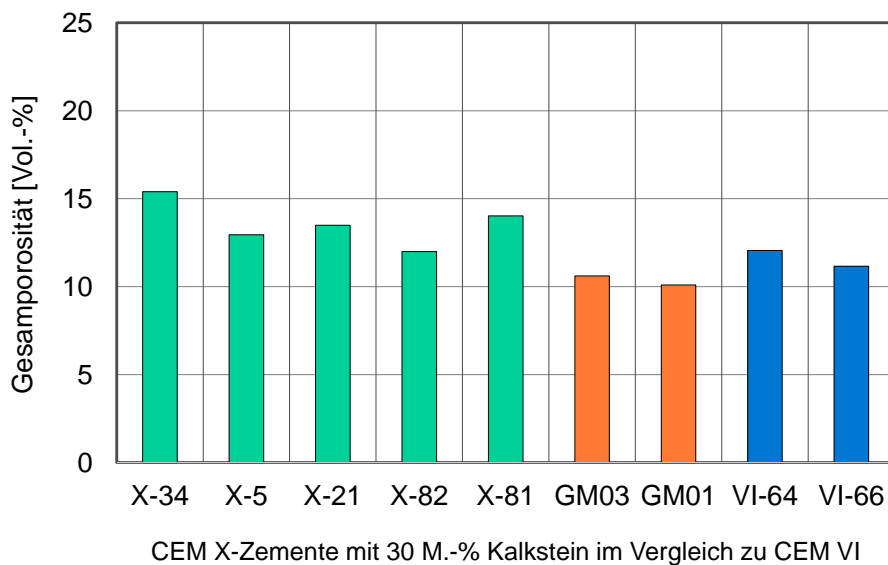


Bild 53 Gesamtporosität der Normmörtel im Prüfalalter von 28 Tagen, vergleichende Untersuchungen der Porengrößenverteilungen unter Verwendung klinkereffizienter CEM VI- und CEM X-Zemente aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung (vgl. **Tabelle 14**)

Wurden für die jeweilige Gesamtporosität 100% angesetzt, so zeigten die Porenanteile der normierten Porenradienverteilungen, dass in den CEM VI-Mörteln sowie in den CEM X-Mörteln mit G 81 und G 82 ein hoher Anteil an Gelporen (> 30%) vorlag. Die geringsten Gelporenanteile wiesen die Mörtel mit den CEM X-Zementen aus der gemeinsamen Mahlung auf.

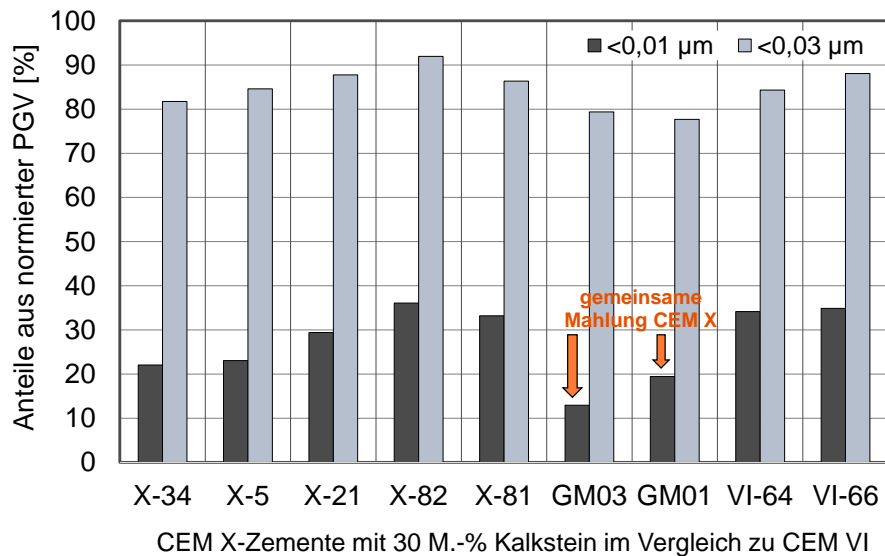


Bild 54 Gelporenanteile $< 0,01 \mu\text{m}$ und Porenanteile $< 0,03 \mu\text{m}$ der auf 100% normierten Porengrößenverteilungen der Normmörtel im Alter von 28 Tagen, vergleichende Untersuchungen unter Verwendung klinkereffizienter CEM VI- und CEM X-Zemente aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung (vgl. **Tabelle 14**)

12 Eigenschafts- und anwendungsgerechte Untersuchungsmethoden für Mörtel mit verringertem Wassergehalt bzw. abgesenktem w/z-Wert

12.1 Vom Normmörtel mit konstantem w/z-Wert zum Mörtel mit konstanter Konsistenz

Die Ermittlung der Zementeigenschaften erfolgte gemäß den Definitionen der DIN EN 197-1. Dies bedeutet z. B. für die Druckfestigkeit, dass diese bei konstantem Wasserzementwert (w/z-Wert) ermittelt wurde. Die Dauerhaftigkeitsprüfungen folgten der Logik aus Zulassungsverfahren, wonach diese in konstanten Grenzrezepturen nach DIN EN 206-1 / DIN 1045-2 durchgeführt werden.

Für Betone, die gewisse Dauerhaftigkeitsprüfungen nicht mehr bestehen konnten, weil sie z. B. unter Verwendung deutlich klinkerreduzierter Zemente mit vergleichsweise hoher Packungsdichte hergestellt wurden, kam ein alternatives Vorgehen zur Anwendung (vgl. [20]).

Neben der Normprüfung wurden Zementmörtel mit einem im Vergleich zur Zementnorm veränderten Wassergehalt bei konstantem Zementgehalt hergestellt und anschließend in Anlehnung an DIN EN 196-1 untersucht.

Zur Einstellung vergleichbarer Verarbeitungseigenschaften wurde ausschließlich der Wassergehalt variiert. Die Anpassung (Verringerung/Erhöhung) des Wasserzementwertes erfolgte – jeweils ausgehend von Normmörteln – stufenweise, sodass am Ende jeder Untersuchung ein Frischmörtel mit konstanter steifplastischer Konsistenz (kurz: SP) sowie entsprechendem w/z-Wert (w/z(SP)) vorlag.

Der w/z-Wert für eine steifplastische Mörtelkonsistenz wurde in den zulassungsrelevanten Dauerhaftigkeitsprüfungen am Beton erfolgreich angewendet (vgl. Abschnitte 16 und 17). In die Betonentwurfsrechnungen gingen sowohl die w/z-Werte (SP) als auch die entsprechend angepassten Wassergehalte ein, während die Zementgehalte der zu vergleichenden Betone stets konstant gehalten wurden.

Sowohl in den Mörtelversuchen als auch in den Betonversuchen wurden keine Zusatzmittel zur Beeinflussung der Verarbeitbarkeit bzw. zur Veränderung der Konsistenz verwendet.

12.2 Herstellung von Mörteln mit konstanter Zielkonsistenz

Zur Herstellung von Mörteln mit konstanter, steifplastischer Konsistenz (SP) wurde der Wassergehalt der Frischmörtel schrittweise so lange verändert, bis eine vergleichbare steifplastische Mörtelkonsistenz (SP) erreicht werden konnte. Die Methode und die Kriterien zur Feststellung der steifplastischen Mörtelkonsistenz (SP) sind in [20] beschrieben. Der Mehlkorngesamtgehalt der steifplastischen Mörtel blieb im Vergleich zum Normmörtel unverändert und wurde über den Zementgehalt ($z = 450 \text{ g} = \text{konstant}$) eingestellt. Aufgrund der anzupassenden Wassermenge ($w \neq 225 \text{ g}$) veränderten sich Leimgehalt und Wasserzementwert ($w/z\text{-Wert} \neq \text{konstant}$). Unter Verwendung der steifplastischen Mörtel konstanter Konsistenz wurden ebenfalls Primen hergestellt, ihre Druckfestigkeiten wurden im Alter von zwei bzw. 28 Tagen geprüft.

Die Kriterien für eine steifplastische Konsistenz (SP) sind nicht an das Erreichen eines definierten Mörtelausbreitmaßes der Frischmörtel gebunden. Vielmehr waren die Frischmörtel unmittelbar nach dem Anmischen bzw. nach der Bestimmung des Mörtelausbreitmaßes auf dem Hägermann-Ausbreittisch optisch zu beurteilen. Für das Erreichen einer steifplastischen Konsistenz (SP) nach [20] mussten die Frischmörtel-Ausbreitkuchen mindestens zwei Kriterien einer „typisch steifen Konsistenz“ und mindestens zwei Kriterien einer „typisch plastischen Konsistenz“ aufweisen.

Merkmale einer steifen Mörtelkonsistenz waren z. B.:

- die Mörteloberflächen waren rau, körnig und brüchig,
- die Außenränder der Ausbreitkuchen waren nicht glatt geschlossen,
- die größeren Gesteinskörnungen und die Form des Trichters zeichneten sich deutlich ab,
- die Ausbreitkuchen hatten keinen Zusammenhalt, bildeten Lunker und waren zum Teil zerfallen.

Merkmale einer plastischen Mörtelkonsistenz waren z. B.:

- die Mörteloberflächen waren geschlossen, wenig rau bis glatt, aber nicht glänzend,
- die Außenränder der Ausbreitkuchen waren geschlossen,
- die größeren Gesteinskörnungen waren im Mörtel eingebunden, aber noch sichtbar,
- die Ausbreitkuchen hatten ein gutes Zusammenhaltevermögen und bildeten keine Lunker,
- während des Verdichtens (Hägermann-Ausbreittisch) breiteten sich die Mörtel gleichmäßig aus.

Die Lagerung und Prüfung der Mörtel folgten DIN EN 196-1.

Die Gegenüberstellung der Norm- und SP-Mörtel und ihrer Eigenschaften erfolgte innerhalb eines „Bewertungskorridors“ [20], der zum einen

- Ergebnisse mit einem konstanten $w/z\text{-Wert} = 0,50$ (Normbedingungen gemäß DIN EN 196-1) und zum anderen
- Ergebnisse mit einer konstanten, steifplastischen Konsistenz (SP) abbildete.

Innerhalb dieser Prüfungen blieben die Zementgehalte ($z = 450 \text{ g}$) sowie die stofflichen und granulometrischen Zusammensetzungen der Zemente unverändert.

Zur Bewertung des gesamten, plastischen Konsistenzbereiches wurde an einigen Mörteln – neben dem Wasserzementwert am Übergang der plastischen in die steife Konsistenz (SP) – auch der Wasserzementwert ermittelt, der am Übergang der plastischen Konsistenz in die weiche Konsistenz einzustellen war [20].

Entsprechend der unterschiedlichen granulometrischen bzw. stofflichen Zusammensetzungen der verwendeten Zemente veränderten sich auch die Wasserzementwerte zur Einstellung der Zielkonsistenz im Mörtel. Die Wasserzementwerte für Zielkonsistenz (PS, WP) sind zementspezifisch. Auch die

Abstände zwischen den Konsistenzgrenzen „steifplastisch“ und „weichplastisch“ variieren. Die Differenz der an den Mörteln einzustellenden Wasserzementwerte ($\Delta w/z = w/z(WP) - w/z(SP)$) lag bei [20] zwischen 0,04 und 0,07 unter Verwendung von Werkzementen. In späteren Untersuchungen an Laborzementen wurden zum Teil Werte in Größenordnungen von $\Delta w/z > 0,1$ ermittelt.

Der w/z -Wert für eine weichplastische Mörtelkonsistenz wurde nicht in den Dauerhaftigkeitsprüfungen am Beton angewendet.

12.3 Wasserzementwerte für Mörtel mit Zielkonsistenz SP bzw. WP

Wie im Abschnitt 12.2 erläutert, wurden unter Verwendung ausgewählter klinkereffizienter Versuchszemente (vgl. Abschnitt 9) Mörtel mit vergleichbarer steifplastischer Konsistenz (SP) hergestellt und untersucht. Nach Anpassung der Wasserzugabe zum Erreichen der Zielkonsistenz SP wurden die entsprechenden Wasserzementwerte (w/z -Wert SP) berechnet. An einigen Versuchszementen wurde zum Vergleich auch die weichplastische Konsistenz (WP) eingestellt.

Zur Einordnung wurden die Versuchsergebnisse aus diesem DBU-Projekt sowie die Ergebnisse aus den Arbeiten von [20] [12]) gemeinsam in **Bild 55** und **Bild 56** in Abhängigkeit des Wasseranspruchs (Punkte) aufgetragen.

Das **Bild 55** zeigt, dass (ausgehend von der Normmörtelzusammensetzung mit $w/z = 0,50$) bei Verwendung der hüttensandhaltigen Zemente CEM II/C-M (S-LL), CEM VI und CEM X (im Bild „DBU-Zemente“) der Wasserzementwert zum Erreichen der steifplastischen Mörtelkonsistenz zum Teil deutlich abgesenkt werden musste. Das Wasser-Zement-Verhältnis wurde auf Werte von $w/z = 0,48$ bis auf Werte vom $w/z = 0,42$ verringert, wenn die Mörtelkonsistenz unter Verwendung der klinkereffizienten Versuchszemente steifplastisch einzustellen war. Im Vergleich zu herkömmlichen Portland- oder Hochofenzementmörteln (Beispiele CEM I, CEM III/A im Bild) wurden die Wasserzementwerte (SP) der Versuchszementmörtel überwiegend auf ein geringeres w/z -Wert-Niveau gebracht. Ebenfalls im Bild dargestellte Werkzemente CEM II/C-M (S-L) haben sich granulometrisch und stofflich von den Versuchszementen unterschieden.

Bei Verwendung der ziegelhaltigen Zemente mit der Zusammensetzung CEM II/C-M (Q-LL) lagen die Wasserzementwerte SP in vergleichsweise hohen Bereichen. Je nach granulometrischer Zementzusammensetzung wurde der Wasserzementwert (SP) auf $w/z = 0,46$ abgesenkt oder sogar auf $w/z = 0,51$ angehoben.

Anmerkung: Ziegel und Kalkstein jeweils hoher Mahlfineiten können zu einem hohen Wasseranspruch sowie zu ungünstigen Verarbeitungseigenschaften führen, sofern ihre Mengenteile vergleichsweise groß sind und der Zement darauf nicht granulometrisch abgestimmt wurde. Zur Sicherstellung verarbeitbarer Frischmörtel wäre eine entsprechende Verwendung verflüssigender Zusatzmittel notwendig, da bei Anwendung von Zementen mit hohem Wasseranspruch ein Frischmörtel ohne Zusatzmittel nicht mehr praxisgerecht verarbeitet werden kann (vgl. [12]).

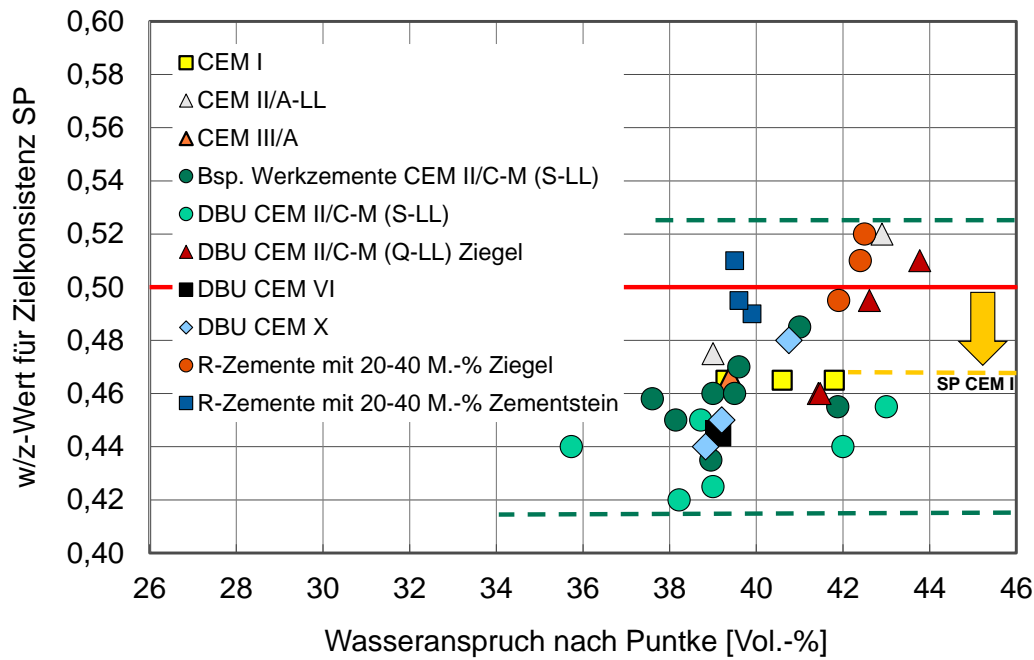


Bild 55 Wasserzementwerte für eine konstante, steifplastische Zielkonsistenz der Frischmörtel (SP) unter Verwendung von Versuchszementen (CEM II/C-M, CEM VI, CEM X), handelsüblichen Werkzementen [20] und R-Zementen [12], Darstellung der w/z-Werte (SP) in Abhängigkeit des Wasseranspruchs der Zemente

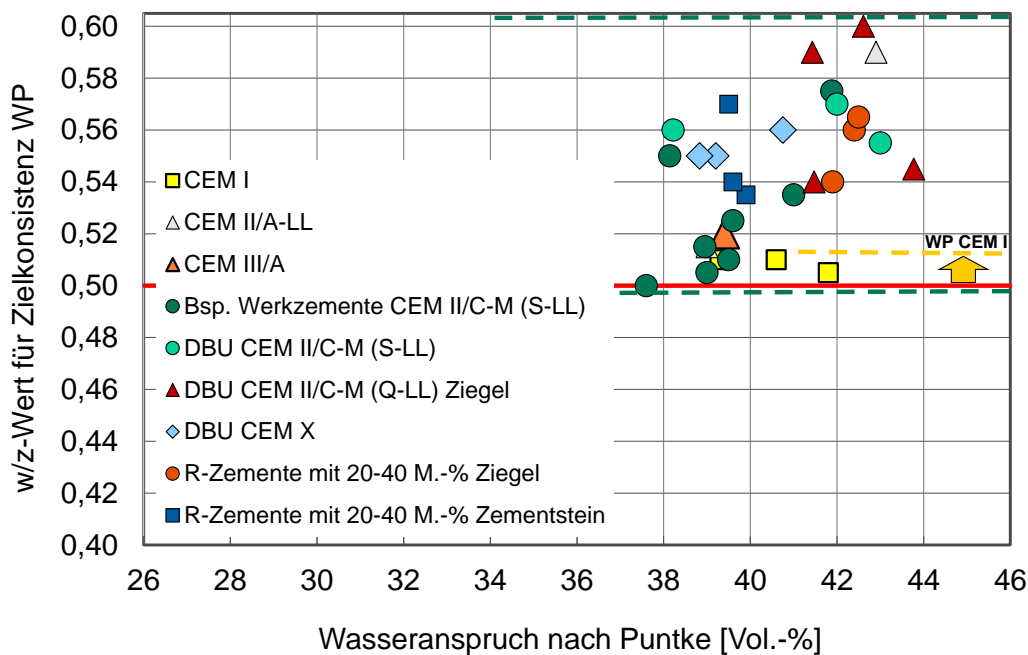


Bild 56 Wasserzementwerte für eine konstante, weichplastische Zielkonsistenz der Frischmörtel (WP) unter Verwendung von Versuchszementen (CEM II/C-M, CEM X), handelsüblichen Werkzementen [20] und R-Zementen [12], Darstellung der w/z-Werte (WP) in Abhängigkeit des Wasseranspruchs der Zemente

Aus **Bild 55** und **Bild 56** geht hervor, wie weit sich der plastische Verarbeitungsbereich der Frischmörtel erstreckt und bei welchen Wasserzementwerten die Grenzen zur steifplastischen (SP) oder weichplastischen Konsistenz (WP) zu erreichen waren. Während die Mörtel auf der Basis von CEM I oder

CEM III/A einen vergleichsweise engen plastischen Bereich aufwiesen, der etwa bei $w/z = 0,47$ (SP) begann und bei $w/z = 0,52$ (WP) endete, so wurden die weichplastischen Konsistenzen der Mörtel mit CEM II/C-M und CEM X bei deutlich höheren w/z -Werten ($> 0,55$) erreicht. Der CEM X-Mörtel auf Basis des Zements G 81 hatte beispielsweise in einem breiten Wertebereich zwischen $w/z = 0,45$ und $w/z = 0,55$ eine gut verarbeitbare, plastische Konsistenz.

Unter Verwendung einiger CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zemente, die für die Dauerhaftigkeitsprüfungen am Beton vorgesehen waren, wurden die Ausbreitmaße der steifplastisch hergestellten Mörtel (SP) untersucht und in Abhängigkeit des Wasseranspruchs (**Bild 57**) und der Stampfpackungsdichte (**Bild 58**) dargestellt. Während sich der Wasseranspruch der Zemente (Punkte) in einem weiten Bereich zwischen 35 Vol.-% und 44 Vol.-% bewegte, lagen die Ausbreitmaße der steifplastischen Mörtel in einem engen Bereich zwischen 127 mm und 142 mm.

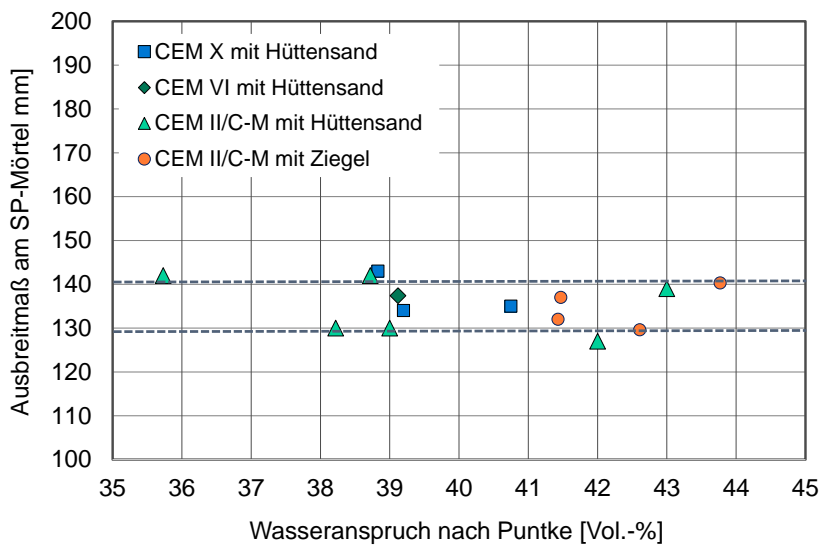


Bild 57 Ausbreitmaße der Zementmörtel mit steifplastischer Zielkonsistenz (SP) in Abhängigkeit des am Zement bestimmten Wasseranspruchs nach Puntke, Verwendung klinkereffizienter CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zemente unterschiedlicher granulometrischer Zusammensetzungen

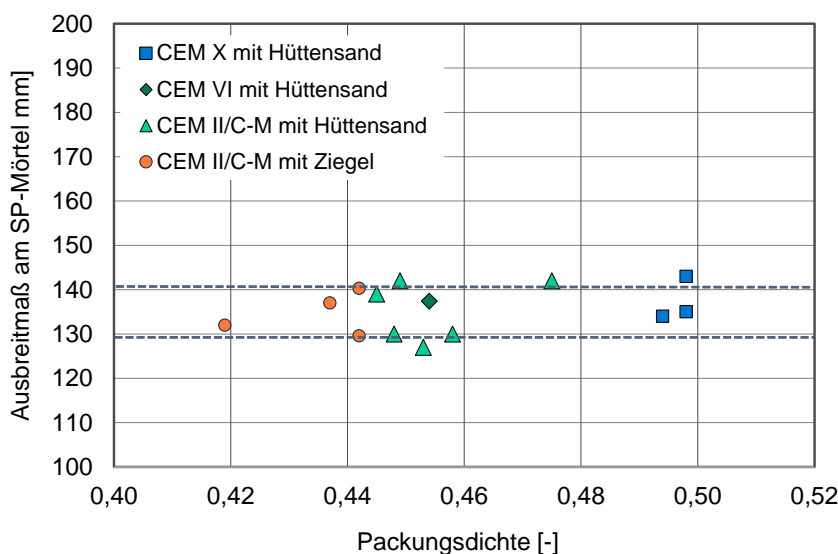


Bild 58 Ausbreitmaße der Zementmörtel mit steifplastischer Zielkonsistenz (SP) in Abhängigkeit der am Zement bestimmten Stampfpackungsdichte, Verwendung klinkereffizienter CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zemente unterschiedlicher granulometrischer Zusammensetzungen

In Abhängigkeit der Packungsdichte zeigte sich jedoch eine Differenzierung je nach Zementart. Die Anordnung der Messergebnisse verdeutlicht, dass die Zemente CEM II/C-M (Q-LL) mit 30 M.-% Ziegelmehl geringe Packungsdichten $< 0,45$ aufwiesen, während die CEM X (S-LL)-Zemente mit 30 M.-% Kalkstein höhere Packungsdichten $> 0,49$ erzielten. Im mittleren Bereich lagen die Packungsdichten der CEM II/C-M (S-LL)- und CEM VI-Zemente. Dennoch wurden keine signifikanten Unterschiede im Ausbreitmaß der SP-Mörtel ermittelt. Das bedeutet, dass die Zementmörtel – unabhängig der stofflichen und granulometrischen Zementzusammensetzung - durch Anpassung des Wassergehaltes sowie des w/z-Wertes auf eine vergleichbare Konsistenz gebracht und somit unter vergleichbaren Prüfbedingungen untersucht werden konnten.

13 Untersuchungen an Mörteln mit abgesenktem w/z-Wert (SP) im Vergleich zum Normmörtel am Beispiel hüttensandhaltiger CEM VI- und CEM X-Zemente aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung

13.1 Zusammensetzung ausgewählter Zemente für SP-Betonversuche

Klinkerreduzierte CEM VI- und CEM X-Zemente, die die üblichen Zulassungskriterien aus Dauerhaftigkeitsprüfungen am Beton (z.B. in der Frostprüfung) ggf. nicht oder nur knapp einhalten könnten, wurden vergleichend im Normmörtel ($w/z = 0,50$) sowie im SP-Mörtel ($w/z < 0,50$) untersucht. Neben der Bestimmung des Wasserzementwertes für eine steifplastische Konsistenz sollte untersucht, welche zementspezifischen Auswirkungen eine geringfügige Absenkung des w/z-Wertes auf das Mörtelgefüge und somit auf die Dauerhaftigkeit später herzustellender Betone haben könnte.

Mit dem übergeordneten Ziel, deutlich klinkerreduzierte Zemente nicht nur in eine energie- und ressourceneffiziente Herstellung, sondern auch in die betontechnische Anwendung zu bringen, wurde ein Lösungsweg gesucht, der unmittelbar an die dauerhaftigkeitsrelevanten Parameter von Mörtel und Beton anknüpft.

In die Untersuchungen gingen die Zemente aus **Tabelle 15** ein.

Tabelle 15 Granulometrische Zusammensetzung klinkereffizienter CEM VI- und CEM X-Zemente aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung für vergleichende Untersuchungen von Normmörteln und Mörteln mit Zielkonsistenz SP

Zementart	Zementbezeichnung	Klinker	Kalkstein	Hüttensand
CEM VI	G 66	35 M.-% C5	20 M.-% LL1-7	45 M.-% S2-6
CEM X	G 81	40 M.-% C5	30 M.-% LL1-7	30 M.-% S2-6
CEM X	GM 01 gemeinsam gemahlen	40 M.-%	30 M.-%	30 M.-%
CEM X	G 83	35 M.-% C5	30 M.-% LL1-7	35 M.-% S2-6

13.2 Einflüsse auf das Ausbreitmaß der Frischmörtel SP im Vergleich zum Normmörtel

Zum Erzielen einer konstanten, steifplastischen Mörtelkonsistenz wurden die Wassergehalte im Vergleich zum Normmörtel auf Werte < 225 g verringert und Wasserzementwerte zwischen $w/z = 0,44$ (CEM X G 83) und $w/z = 0,48$ eingestellt (**Tabelle 16**).

Tabelle 16 Wasserzementwerte zum Erreichen einer steifplastischen Mörtelkonsistenz SP (vgl. **Tabelle 15** und die Kriterien für SP aus Abschnitt 12)

Zementart	Zementbezeichnung	w/z-Wert für Zielkonsistenz SP
CEM VI	G 66	0,445
CEM X	G 81	0,450
CEM X	GM 01 gemeinsam gemahlen	0,480
CEM X	G 83	0,440

Erwartungsgemäß nahmen die Ausbreitmaße der Mörtel ab, sobald der Wassergehalt reduziert und die Konsistenz auf „steifplastisch“ eingestellt wurden. Nach geringer Absenkung des w/z-Wertes verringerte sich das Ausbreitmaß des CEM X-Mörtels GM 01 (gemeinsame Mahlung) nur geringfügig um ca. 10 mm. Bei Anwendung der anderen Zemente aus getrennter Mahlung nahmen die Ausbreitmaße von > 160 mm (Normmörtel) um bis zu 30 mm ab, wenn der w/z-Wert der SP-Mörtel angepasst wurde (**Bild 59**).

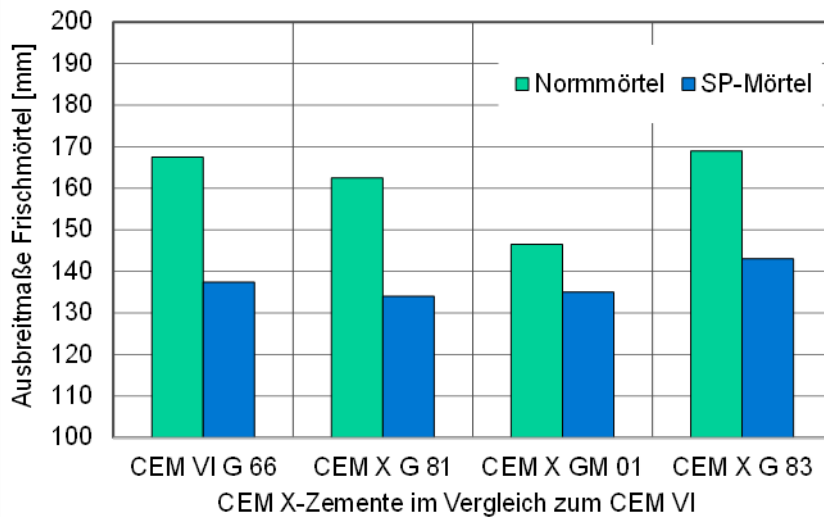


Bild 59 Ausbreitmaße der Frischmörtel im Vergleich, Normmörtel mit einem konstanten w/z-Wert = 0,50 sowie Mörtel mit konstanter steifplastischer Konsistenz SP, Verwendung klinkereffizienter CEM VI- und CEM X-Zemente aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung (vgl. **Tabelle 15** und die Kriterien für SP aus Abschnitt 12)

13.3 Einflüsse auf die Druckfestigkeit der SP-Mörtel im Alter von zwei und 28 Tagen im Vergleich zum Normmörtel

An den Normmörteln und den SP-Mörteln wurde im Prüfmörtel von zwei und 28 Tagen die Druckfestigkeit gemäß bzw. in Anlehnung an DIN EN 196-1 untersucht.

Auch auf die Druckfestigkeit der Mörtel hatte die w/z-Wert-Absenkung unterschiedlich starke Auswirkungen. Im Prüfmörtel von zwei Tagen wurde am Mörtel mit GM 01 die höchste Anfangsfestigkeit (Normmörtel), aber die geringste Erhöhung der Druckfestigkeit nach w/z-Anpassung festgestellt. Die anderen Mörtel erreichten in ihrer Druckfestigkeit nach w/z-Anpassung um ca. 4 MPa bis 5 MPa höhere Werte (vgl. **Bild 60**).

Auch in seiner 28d-Druckfestigkeit (vgl. **Bild 61**) konnte der Mörtel mit GM 01 nach w/z-Anpassung nicht wesentlich gesteigert werden (Differenz ca. 3 MPa). Ebenfalls wenig Potenzial – aber auf deutlich höherem Festigkeitsniveau bei ca. 60 MPa bzw. 64 MPa – wiesen die Mörtel mit dem CEM VI G 66 auf. Am deutlichsten wirkte sich die w/z-Anpassung auf die CEM X-Mörtel mit G 81 (40 M.-% Klinker) und G 83 (35 M.-% Klinker) aus. Sie erreichten Festigkeiten von ca. 60 MPa.

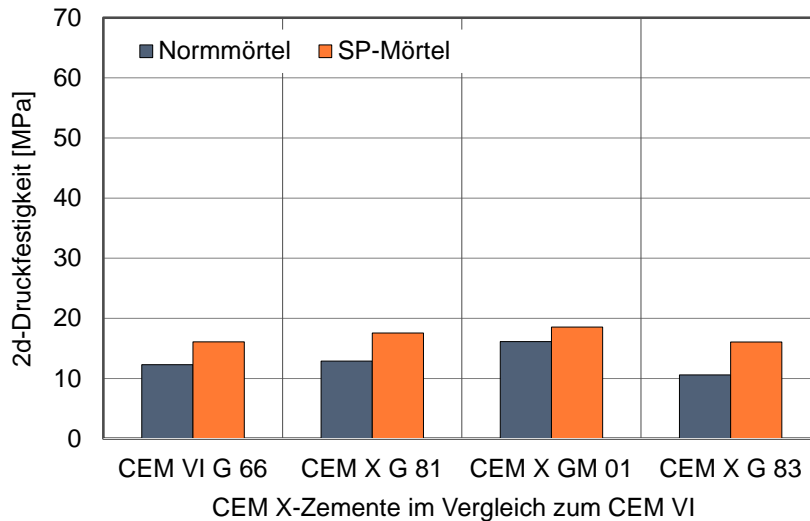


Bild 60 Druckfestigkeit der Zementmörtel im Prüfmörtel von zwei Tagen, Normmörtel im Vergleich zum SP-Mörtel, Verwendung klinkereffizienter CEM VI- und CEM X-Zemente aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung

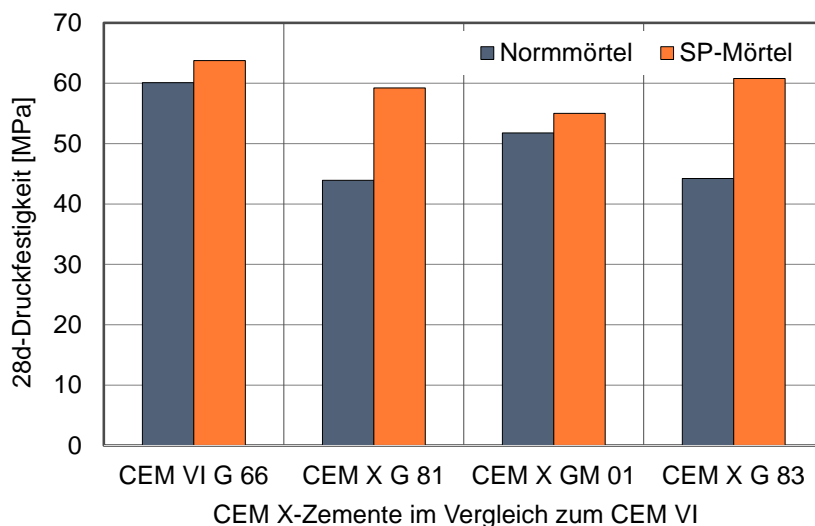


Bild 61 Druckfestigkeit der Zementmörtel im Prüfmörtel von 28 Tagen, Normmörtel im Vergleich zum SP-Mörtel, Verwendung klinkereffizienter CEM VI- und CEM X-Zemente aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung

13.4 Einflüsse auf die Porengrößenverteilungen der SP-Mörtel im Alter von 28 Tagen im Vergleich zum Normmörtel

Unter sonst vergleichbaren Versuchsbedingungen hat jede w/z-Wert-Verringerung Auswirkungen auf das entstehende Porengefüge. Die folgenden Bilder veranschaulichen die PGV-Kurven der Mörtel im Alter von 28 Tagen (links Normmörtel, rechts SP-Mörtel). Während die Gesamtporositäten der Normmörtel Werte zwischen 14 Vol.-% und 11 Vol.-% aufwiesen, lagen die Gesamtporositäten der SP-Mörtel im Bereich zwischen 11 Vol.-% und 9 Vol.-%.

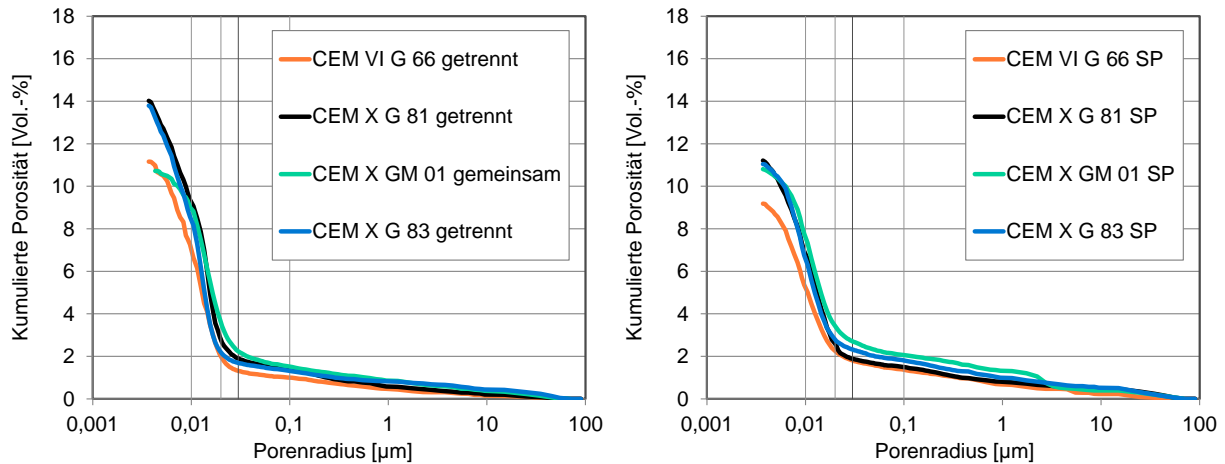


Bild 62 Porengrößenverteilungen an Normmörteln (links) und an SP-Mörteln (rechts), jeweils im Alter von 28 Tagen, Verwendung von CEM VI- und X-Zementen aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung im Vergleich

Neben der Lage und der Steigung des linken Astes der PGV-Kurve haben sich auch die Porenanteile der normierten Porenverteilung verändert, wenn nach dem Normmörtel ein SP-Mörtel hergestellt wurde. **Bild 63** verdeutlicht, dass sich insbesondere die Gelporenanteile ($< 0,01 \mu\text{m}$) der Mörtel mit G 81 und G 83 geringfügig erhöhen konnten, als die w/z -Werte entsprechend abgesenkt wurden. An den anderen Zementmörteln war der Gelporeneffekt nicht ausgeprägt.

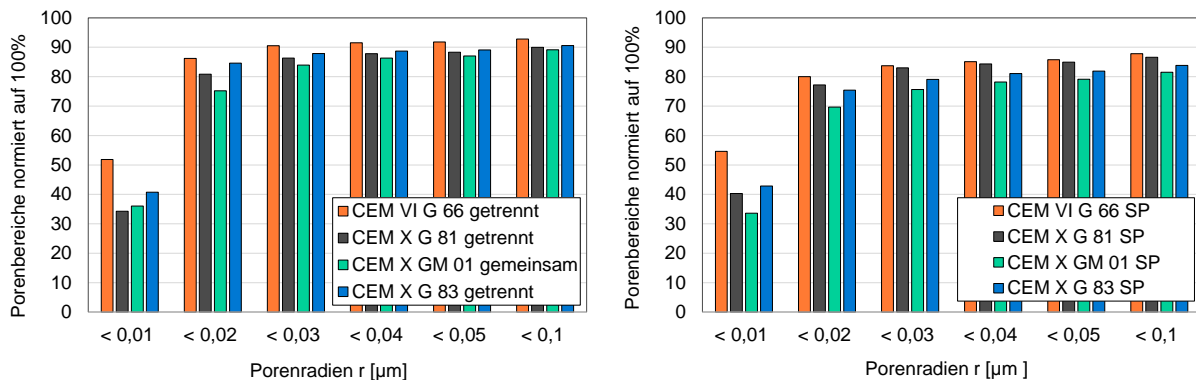


Bild 63 Auswertung der Porengrößenverteilungen an Normmörteln (links) und an SP-Mörteln (rechts), jeweils im Alter von 28 Tagen, Anteile des Porenvolumens in den Porengrößenbereichen der auf 100% normierten Porengrößenverteilungen

14 Auswertung der Untersuchungen an Mörteln mit abgesenktem w/z -Wert (SP) unter Verwendung hüttensand- und ziegelhaltiger Zemente in Vorbereitung der Betonversuche

14.1 Zusammensetzungen der Versuchszemente

Sofern in den Betonprüfungen (vgl. Abschnitte 16 und 17) die Bewertungskriterien des DIBt für den Frostwiderstand (Würfelverfahren) bzw. für den Frost-Tausalz-Widerstand (CDF-Test) nicht eingehalten wurden, kam eine w/z -Wert-Anpassung zum Ansatz. Basis für eine w/z -Wert-Absenkung im Beton waren die w/z -Werte der Mörtel für Zielkonsistenz SP (steifplastisch).

- Für spätere Untersuchungen an CDF-Betonen, die bei einem für CDF-Tests festgelegten w/z -Wert = 0,50 nicht bestanden haben, wurde der am Mörtel bestimmte w/z -Wert (SP) für den „SP-Beton“ übernommen.

Der Zementgehalt blieb bei $z = 320 \text{ kg/m}^3$ konstant.

- Für spätere Untersuchungen an Würfelfrost-Betonen, die bei einem für das Würfelverfahren festgelegten w/z -Wert = 0,60 nicht bestanden haben, wurde die am Mörtel bestimmte w/z -Wert-Differenz (w/z (Norm) – w/z (SP)) für den Beton (SP) in Ansatz gebracht. Der w/z -Wert (vormals $w/z = 0,60$) wurde um den Differenzbetrag reduziert.

Der Zementgehalt blieb bei $z = 300 \text{ kg/m}^3$ konstant.

In die Untersuchungen gingen die folgenden Zemente ein. **Tabelle 17** gibt einen Überblick über die Zusammensetzungen der Zemente und weist die am Mörtel bestimmten w/z -Werte für eine steifplastische Zielkonsistenz (SP) aus.

Tabelle 17 Zusammensetzung klinkereffizienter CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zemente aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung für vergleichende Untersuchungen von Normmörteln und Mörteln mit Zielkonsistenz SP (vgl. Abschnitt 9 sowie **Bild 55**)

Zementart	Mahlverfahren	Klinker	Kalkstein	Hüttensand	w/z -Werte (SP)
CEM II/C-M (S-LL)	getrennt	50 M.-%	20 M.-%	30 M.-%	0,425 bis 0,455
CEM II/C-M (S-LL) (110)	gemeinsam	50 M.-%	20 M.-%	30 M.-%	0,420
CEM VI (S-LL) (G66)	getrennt	35 M.-%	20 M.-%	45 M.-%	0,445
CEM X (S-LL) (G81)	getrennt	40 M.-%	30 M.-%	30 M.-%	0,450
CEM X (S-LL) (G83)	getrennt	35 M.-%	30 M.-%	35 M.-%	0,440
CEM X (S-LL) (GM01)	gemeinsam	40 M.-%	30 M.-%	30 M.-%	0,480
Zementart	Mahlverfahren	Klinker	Kalkstein	Ziegel	w/z -Werte (SP)
CEM II/C-M (Q-LL)	getrennt	50 M.-%	20 M.-%	30 M.-%	0,460 bis 0,510
CEM II/C-M (Q-LL) (144)	gemeinsam	50 M.-%	20 M.-%	30 M.-%	0,460

14.2 Untersuchung der Druckfestigkeit der SP-Mörtel in Anlehnung an DIN EN 196-1 im Vergleich zum Normmörtel

Die Druckfestigkeit der Normmörtel ($w/z = 0,50$) wurde der Druckfestigkeit der SP-Mörtel ($w/z \neq 0,50$) gegenübergestellt. Der Vergleich der Festigkeiten im Prüfalalter von zwei Tagen ist im **Bild 64** dargestellt. Zur Einordnung der Ergebnisse wurde zwischen null und 40 MPa eine Diagonale eingetragen. An allen Zementen wurden signifikante Unterschiede in der 2d-Druckfestigkeit ermittelt.

Die Normmörtel unter Verwendung hüttensandhaltiger CEM IIC-M-Zemente erreichten mit bis zu 22 MPa etwas höhere Anfangsfestigkeiten als die Normmörtel mit ziegelhaltigen CEM II/C-M-Zementen oder CEM X-Zementen (maximal 18 MPa). Alle Normmörtel erreichten mindestens eine Anfangsfestigkeit von 10 MPa.

Wurden nach zementspezifischer Anpassung der Wasserzementwerte nunmehr steifplastische Mörtel (SP) hergestellt, ergaben sich in der Prüfung im Alter von zwei Tagen durchweg höhere Druckfestigkeiten als im Vergleich zum Normmörtel. Alle SP-Mörtel erreichten eine 2d-Druckfestigkeit von mindestens 15 MPa. Die höchsten Festigkeiten erreichten die CEM II/C-M-Zemente mit bis zu 31 MPa. Außerdem wurde an den CEM II/C-M (S-LL)-Mörteln festgestellt, dass die zementspezifische Absenkung des w/z -Wertes um bis zu 12 MPa höhere Festigkeiten hervorbrachte, was einer Steigerung von etwa 62% (in Bezug auf die Normmörtel) entspricht. Bei den anderen Zementen nahmen die 2d-Festigkeiten um bis zu etwa 30% zu.

Auch die Zemente aus der gemeinsamen Mahlung auf der Chargenmühle bzw. Wälzmühle erreichten in ihrer 2d-Festigkeit nach SP-Einstellung höhere Werte als nach Normeinstellung. Dabei steigerten die hüttensandhaltigen Zemente die Druckfestigkeit um bis zu 49%, der ziegelhaltige Zement um ca. 30%.

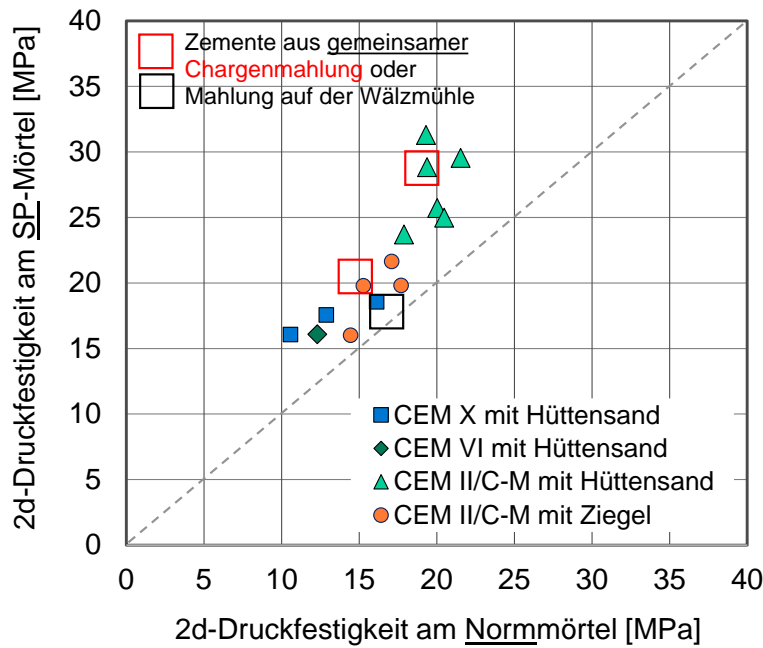


Bild 64 Druckfestigkeit der Normmörtel ($w/z = 0,50$) im Vergleich zur Druckfestigkeit der SP-Mörtel ($w/z \neq 0,50$) jeweils im Prüfalalter von zwei Tagen, Verwendung von Versuchszementen der Zusammensetzung CEM II/C-M, CEM VI und CEM X

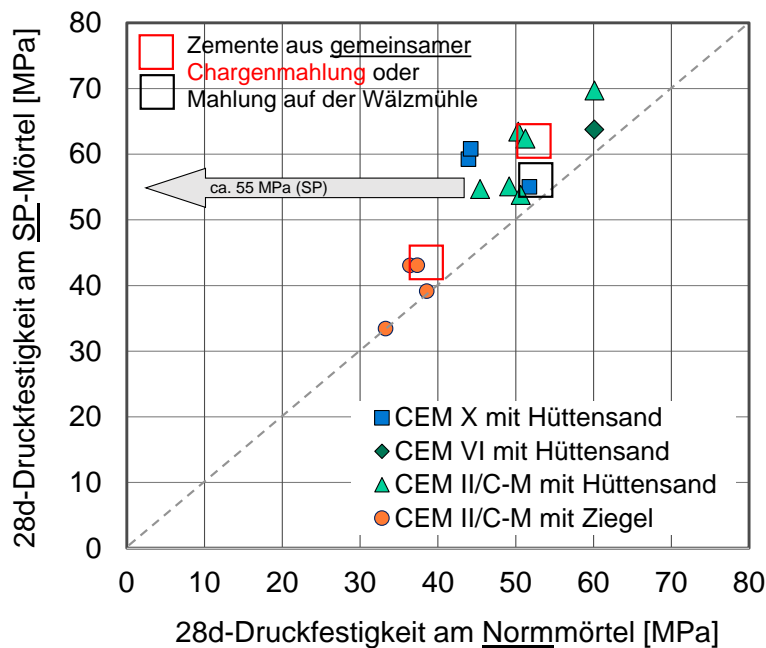


Bild 65 Druckfestigkeit der Normmörtel ($w/z = 0,50$) im Vergleich zur Druckfestigkeit der SP-Mörtel ($w/z \neq 0,50$) jeweils im Prüfalalter von 28 Tagen, Verwendung von Versuchszementen der Zusammensetzung CEM II/C-M, CEM VI und CEM X

Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen im Alter von 28 Tagen sind im **Bild 65** gegenübergestellt. An den hüttensandhaltigen SP-Mörteln ergaben sich im Vergleich zum Normmörtel durchweg höhere Druckfestigkeiten nach w/z -Wertabsenkung. Alle SP-Mörtel erreichten eine 28d-Druckfestigkeit von mindestens 53 MPa (hüttensandhaltige) bzw. 33 MPa (ziegelhaltige). In der Normprüfung lagen die Festigkeiten bei mindestens 44 MPa (hüttensandhaltige) bzw. 33 MPa (ziegelhaltige). Für die

ziegelhaltigen Zemente G 18 und G 43 wurden zementspezifische w/z-Werte (SP) von ca. 0,50 ermittelt. Dies führte zu vergleichbaren Festigkeiten der Norm- und SP-Mörtel.

Die höchsten Druckfestigkeiten (SP) erreichten die CEM II/C-M- bzw. CEM VI-Zemente mit bis zu 64 MPa bzw. 70 MPa.

Darüber hinaus zeigten einige CEM II/C-M (S-LL)-Mörtel und CEM X-Mörtel trotz deutlich unterschiedlicher Zementzusammensetzung vergleichbare Druckfestigkeiten (z. B. bei 55 MPa, s. Markierung) nach jeweils steifplastischer Einstellung.

Die zementspezifische Absenkung des w/z-Wertes hatte an den CEM X-Zementen aus der getrennten Mahlung die deutlichsten Effekte. Um etwa 16 MPa lagen die Festigkeiten der SP-Mörtel höher als die Normfestigkeiten, was einer Steigerung von etwa 35% bzw. 37% (in Bezug auf die Normmörtel) entspricht. Bei den anderen Zementen nahmen die 28d-Festigkeiten um 6% bis zu etwa 26% zu.

Die Ergebnisse der **CEM II/C-M (S-LL)-Zemente** können wie folgt zusammengefasst werden:

Je nach zementspezifischer Absenkung des w/z-Wertes auf „SP“ und je nach Granulometrie der Hauptbestandteile erreichten die Mörtel

→ eine Anfangsfestigkeit von ca. 20 MPa (Normmörtel)

→ eine 2d-Druckfestigkeit von ca. 25 MPa bis 31 MPa (SP-Mörtel)

bei konstanter stofflicher Zementzusammensetzung (→ im Beispiel: Steigerung um bis zu 55%).

→ eine Normfestigkeit von ca. 50 MPa (Normmörtel)

→ eine 28d-Druckfestigkeit von ca. 53 MPa bis 64 MPa (SP-Mörtel)

bei konstanter stofflicher Zementzusammensetzung (→ im Beispiel: Steigerung um bis zu 28%).

14.3 Untersuchung der Porengrößenverteilungen der SP-Mörtel in Anlehnung an DIN EN 196-1 im Vergleich zum Normmörtel

Die an den Festmörteln im Prüfalter von 28 Tagen ermittelten Porengrößenverteilung (PGV) wurden ebenfalls gegenübergestellt. Aus **Bild 66** geht der Vergleich der Gesamtporosität am Normmörtel bzw. am SP-Mörtel hervor. Zur Einordnung wurde auch hier eine Diagonale zwischen 0 und 25 Vol.-% eingetragen.

Das Bild zeigt, dass bei einem Teil der Zementmörtel eine etwas höhere Gesamtporosität unter Normbedingungen festgestellt wurde als am entsprechenden Mörtel, der mit steifplastischer Konsistenz (SP) hergestellt wurde. Bei diesen SP-Mörteln hatte die Absenkung des w/z-Wertes erwartungsgemäß zu einer zum Teil deutlichen Verringerung der Gesamtporosität geführt. Beispielsweise nahm die Gesamtporosität unter Verwendung des CEM II/C-M (S-LL) G 46 von ca. 11 Vol.-% auf etwa 8 Vol.-% (SP) ab. Am ziegelhaltigen Mörtel GC 9 nahm die Porosität von ca. 17 Vol.-% auf 12 Vol.-% ab.

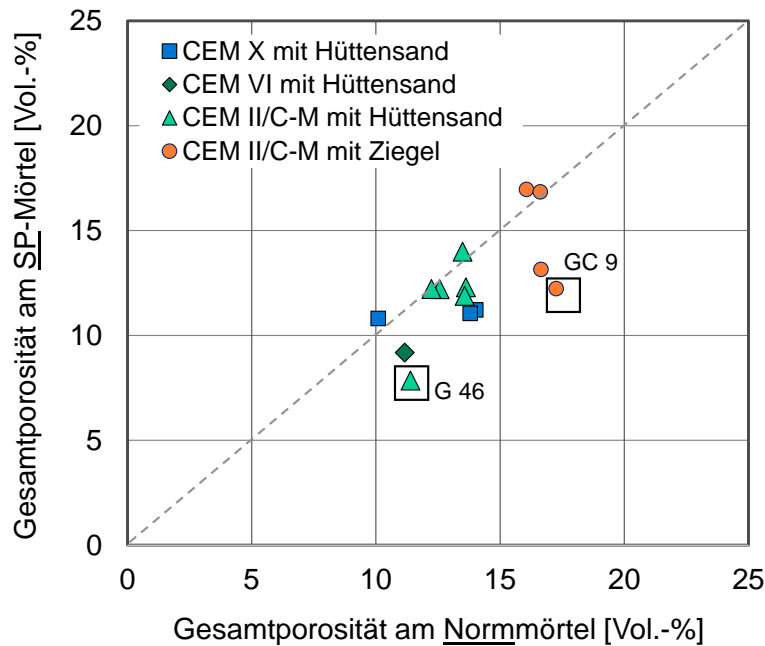


Bild 66 Gesamtporosität der Normmörtel ($w/z = 0,50$) im Vergleich zur Gesamtporosität der SP-Mörtel ($w/z \neq 0,50$) jeweils im Prüfalalter von 28 Tagen, Verwendung von Versuchszementen der Zusammensetzung CEM II/C-M, CEM VI und CEM X

Bei Anwendung einiger Zemente wurde der w/z -Wert nur geringfügig angepasst, um eine steifplastische Konsistenz zu erzielen. Die Gesamtporositäten der Normmörtel und der SP-Mörtel lagen nahe bei einander und sind im Bild längs der Diagonalen erkennbar.

Die Untersuchungen der Porengrößenverteilungen der Mörtel im Alter von 28 Tagen haben ergeben, dass mehr als 50% aller messbaren Poren Radien $< 0,03 \mu\text{m}$ aufwiesen. Auf die Entstehung des Porengefüges und die Lage bzw. Steigung der Porenradienverteilung können sich granulometrische Effekte [2] und Effekte aus der Wasserzugabe erheblich auswirken. Neben den Gelporen ($< 0,01 \mu\text{m}$) haben auch die Poren $< 0,03 \mu\text{m}$ Einfluss auf die Druckfestigkeit sowie auf dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften eines Zementsteingefüges.

Bild 67 stellt die Porenanteile $< 0,03 \mu\text{m}$ der jeweils auf 100% normierten Porengrößenverteilungen gegenüber. Es geht daraus hervor, dass der Großteil der am Normmörtel ermittelten Porenverteilungen höhere Anteile an Poren $< 0,03 \mu\text{m}$ aufwies als die Porenverteilungen der entsprechenden SP-Mörtel. Am CEM VI- und am CEM X-Mörtel (G 66, G 83) war der Unterschied besonders deutlich ausgeprägt. Die Absenkung des w/z -Wertes hatte unter Verwendung dieser beiden Zemente mit einem Klinkerfaktor von 35% nicht nur die Gesamtporosität (von Normmörtel zu SP-Mörtel) reduziert, sondern insbesondere auch die Anteile der Poren $< 0,03 \mu\text{m}$.

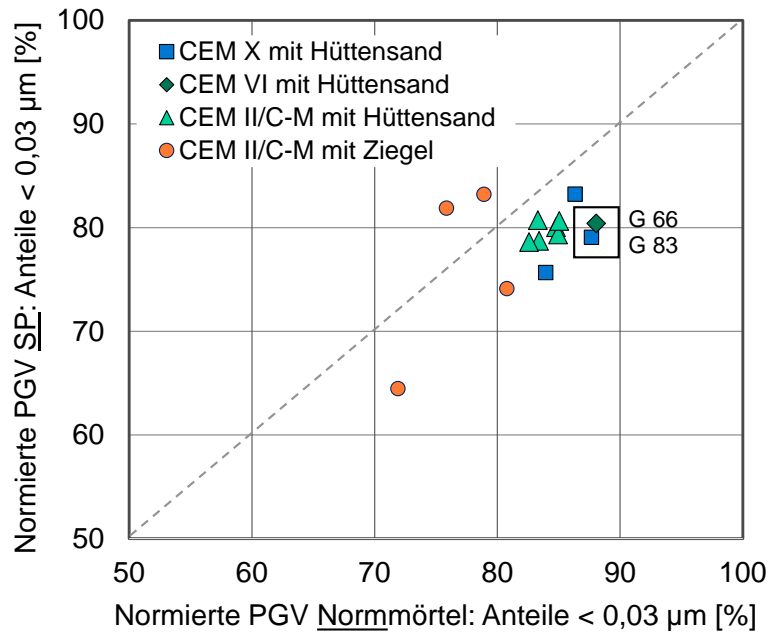


Bild 67 Porenanteile $< 0,03 \mu\text{m}$ am Normmörtel ($w/z = 0,50$) im Vergleich zu den Porenanteilen $< 0,03 \mu\text{m}$ der SP-Mörtel ($w/z \neq 0,50$) jeweils im Prüfalalter von 28 Tagen, Auswertung der jeweils auf 100% normierten Porengrößenverteilungen, Verwendung von Versuchszementen der Zusammensetzung CEM II/C-M, CEM VI und CEM X

Die für nahezu alle dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften wesentlichen Poren sind die Gelporen $< 0,01 \mu\text{m}$. Die Gelporenanteile der jeweils auf 100% normierten Porengrößenverteilungen wurden im **Bild 68** gegenübergestellt und für Normmörtel bzw. SP-Mörtel eingeordnet.

Wie im Bild dargestellt, hatte die w/z -Wert-Absenkung nicht in jedem Falle eine unmittelbare Erhöhung der Gelporenanteile zur Folge. An deutlichsten erhöhten sich die Gelporenanteile am SP-Mörtel mit dem CEM II/C-M aus der gemeinsamen Mahlung (Chargenmühle). Aber auch an zwei CEM X-Zementmörteln, an einem ziegelhaltigen CEM II/C-M-Mörtel sowie am CEM VI-Mörtel wurden im Vergleich zum Normmörtel deutlich höhere Gelporenanteile in den entsprechenden SP-Mörteln nachgewiesen.

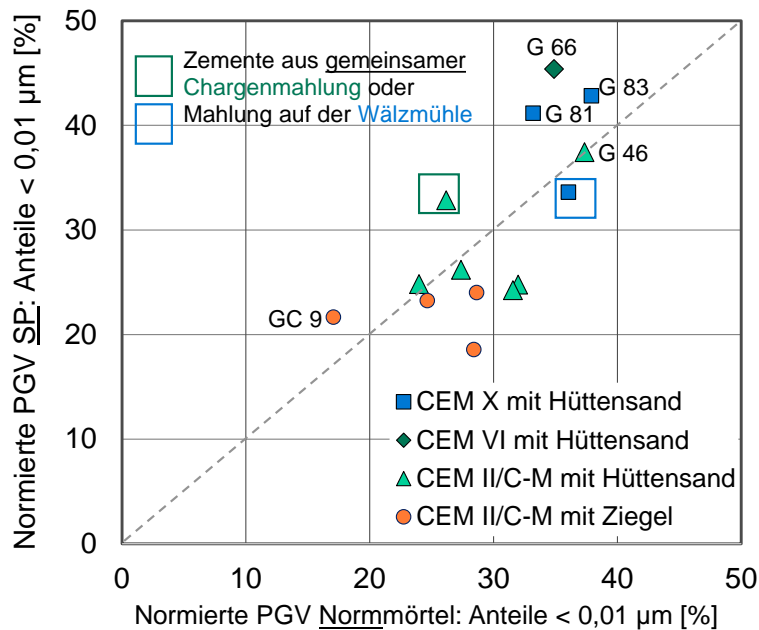


Bild 68 Porenanteile < 0,01 µm am Normmörtel ($w/z = 0,50$) im Vergleich zu den Porenanteilen < 0,01 µm der SP-Mörtel ($w/z \neq 0,50$) jeweils im Prüflalter von 28 Tagen, Auswertung der jeweils auf 100% normierten Porengrößenverteilungen, Verwendung von Versuchszementen der Zusammensetzung CEM II/C-M, CEM VI und CEM X

Weitere Untersuchungen an Feinbetonen und Betonen unter Verwendung granulometrisch optimierter Zemente – ggf. ebenfalls mit abgesenktem w/z -Wert – werden zeigen, inwieweit sich die am Mörtel nachgewiesene Porencharakteristik auf die Dauerhaftigkeit eines Betongefüges auswirken kann.

14.4 Gesamt- und Gelporosität der SP-Mörtel im Vergleich zu ihrer Druckfestigkeit

Die folgenden Bilder zeigen Ergebnisse aus den Untersuchungen des Zusammenhangs zwischen dem Porengefüge und der Druckfestigkeit. Im **Bild 69** wurde die Druckfestigkeit der SP-Mörtel über der Gesamtporosität der SP-Mörtel aufgetragen. Beide Parameter wurden im Prüflalter von 28 Tagen ermittelt.

Aus dem Bild geht hervor, dass die Druckfestigkeit der Mörtel mit zunehmender Porosität abnimmt. Außerdem wird deutlich, dass bei nahezu gleicher Gesamtporosität der Mörtel (z. B. bei ca. 12 Vol.-%) deutlich unterschiedliche Druckfestigkeiten erreichbar waren. Die Druckfestigkeiten der ziegelhaltigen Zementmörtel (SP) lagen mit ca. 43 MPa auf einem geringeren Niveau als die Druckfestigkeiten der hüttensandhaltigen Zementmörtel (SP) zwischen 54 MPa und 64 MPa.

Bild 70 zeigt die Druckfestigkeit der SP-Mörtel in Abhängigkeit der Gelporenanteile < 0,01 µm (normierte PGV) jeweils im Alter von 28 Tagen. Es geht daraus hervor, dass ein zunehmender Anteil der für die Dauerhaftigkeit relevanten Gelporen zu einer Steigerung der Druckfestigkeit führte. Im Bild wurde der Zusammenhang für die CEM II/C-M (S-LL)-Zemente mit 50 M.-% Klinker (obere Linie) sowie für die CEM VI-, die CEM X- und die ziegelhaltigen CEM II/C-M-Zemente mit 50 M.-% bis zu 35 M.-% Klinker (untere Linie) eingetragen. Bei jeweils vergleichbaren Gelporenanteilen der SP-Mörtel wurde zwischen diesen beiden „Zementgruppen“ durchweg ein Festigkeitsunterschied von ca. 10 MPa festgestellt.

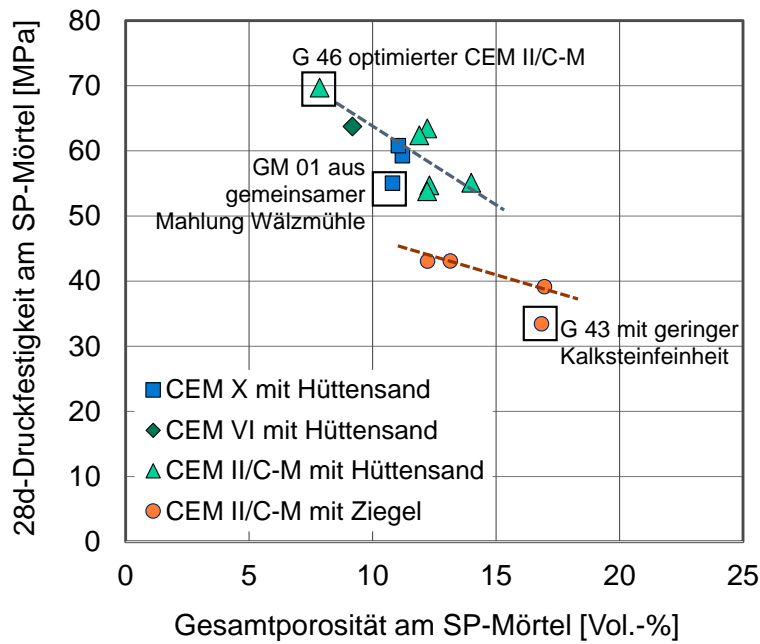


Bild 69 Druckfestigkeit der SP-Zementmörtel in Abhängigkeit der Gesamtporosität der SP-Zementmörtel, Untersuchungen im Prüffalter von 28 Tagen, Verwendung von Versuchszementen der Zusammensetzung CEM II/C-M, CEM VI und CEM X

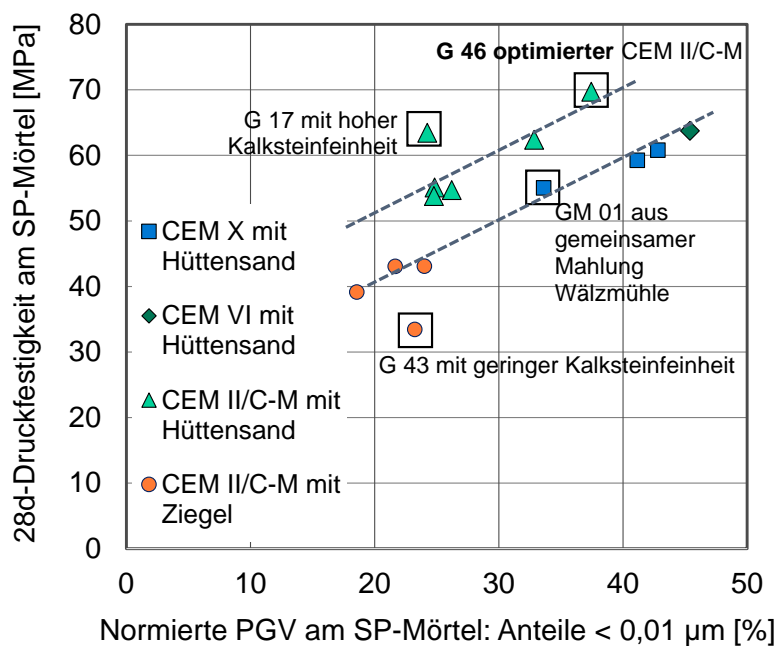


Bild 70 Druckfestigkeit der SP-Zementmörtel in Abhängigkeit der Gelporenanteile < 0,01 µm (aus der normierten PGV der SP-Zementmörtel ermittelt), Untersuchungen im Prüffalter von 28 Tagen, Verwendung von Versuchszementen der Zusammensetzung CEM II/C-M, CEM VI und CEM X

15 Herstellung der Betone und Frischbetoneigenschaften

In den Betonversuchen wurde die Eignung der Versuchszemente für Anwendungsgebiete nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 anhand von Dauerhaftigkeitsuntersuchungen überprüft. **Tabelle 18** gibt einen Überblick der Betonzusammensetzungen sowie der Betonprüfungen zur Bestimmung der Frischbetoneigenschaften und der dauerhaftigkeitsrelevanten Betoneigenschaften.

Tabelle 18 Versuchsprogramm Beton - Betonzusammensetzung, Eigenschaften und Prüfverfahren

Beton	z	w/z	Betoneigenschaften und Prüfverfahren
	kg/m ³	-	
B1	300	0,60	Frischbetoneigenschaften, 28d-Druckfestigkeit, Frostwiderstand nach dem Würfelverfahren (DIN CEN/TS 12390-9) [21] B1 SP - in Anlehnung an das Würfelverfahren
B1-SP	300	< 0,60	
B2	320	0,50	Frischbetoneigenschaften, 28d-Druckfestigkeit, Chlorideindringwiderstand im Schnellverfahren (BAW-Merkblatt „Chloridmigration“ [22], MDCC)
B3 *)	320	0,50	Frischbetoneigenschaften, 28d-Druckfestigkeit, Frost-Tausalz-Widerstand nach dem CDF-Verfahren (DIN CEN/TS 12390-9) [21] B3 SP - in Anlehnung an das CDF-Verfahren
B3-SP *)	320	< 0,50	
FB	(vgl. Abschnitt 19)	0,50	Feinbetone mit Sieblinie A8/B8 in Anlehnung an DIN EN 196-1 Prüfung gemäß Zulassungsverfahren des DIBt Druckfestigkeit und Carbonatisierungstiefe an Feinbetonprismen

*) - Luftporengehalt im Frischbeton 4,5 – 5,5 Vol.-%

Anmerkung: Mit Ausnahme eines Luftporenbildners für die Herstellung von CDF-Betonen wurden in alle Betone (inkl. SP-Betone) und Feinbetone ohne Verwendung von Betonzusatzmitteln hergestellt.

Die Mischungszusammensetzungen der Betone orientierten sich an den Grenzwerten für die Zusammensetzung und Eigenschaften von Betonen nach DIN EN 206 und DIN 1045-2 in Abhängigkeit der Umwelteinwirkungen (Expositionsklassen). Hieraus ergaben sich drei charakteristische Betonrezepturen für die Betonversuche. Für die Herstellung der Betone wurden Gesteinskörnungen (Rheinsand und Rheinkies, VDZ bzw. Sand und Kies aus der Region Thüringer Becken und Ostthüringen, FIB) aus den Beständen der Forschungsstellen mit der Kornzusammensetzung A16/B16 bzw. B32/C32 nach DIN 1045-2, Anhang L verwendet.

An allen Betonen wurden die Frischbetontemperatur und die Frischbetonrohddichte nach DIN EN 12350-6 sowie der Luftgehalt mittels Druckausgleichsverfahren im Luftporentopf nach DIN EN 12350-7 gemessen. 10 Minuten nach Mischende wurde das Ausbreitmaß des Frischbetons mit dem Ausbreitversuch nach DIN EN 12350-5 ermittelt. In den Fällen, bei denen das Ausbreitmaß zur Bestimmung der Konsistenz nicht geeignet war, wurde zu diesem Zeitpunkt das Verdichtungsmaß mit dem Verdichtungskasten nach DIN EN 12350-4 bestimmt. Eine Übersicht wesentlicher Ergebnisse ist im Anhang **Tabelle A-3** dargestellt.

15.1 Konsistenz der Frischbetone B1 und B1-SP für das Würfelverfahren

Die standardmäßig hergestellten Betone B1 zeigten in Abhängigkeit der im Zement bestimmten Packungsdichte keinen Zusammenhang zur Konsistenz bzw. zum Ausbreitmaß. Alle B1-Frischbetone

hatten eine plastische Konsistenz (F2), unabhängig von der Zementart. An den im **Bild 71** eingetragenen Ausbreitmaßen der B1-SP-Betone mit w/z-Wert-Absenkung ($w/z < 0,60$) ist eine geringfügige Tendenz sichtbar, die auf höhere Ausbreitmaße mit zunehmender Packungsdichte hindeutet

Auch in Abhängigkeit des Wasseranspruchs nach Punkte (am Zement bestimmt) zeigt sich eine Tendenz an den Frischbetonen B1-SP mit abgesenktem w/z-Wert. Je höher der Wasseranspruch, desto geringer das Ausbreitmaß und umso ungünstiger die Verarbeitbarkeit (vgl. **Bild 72**).

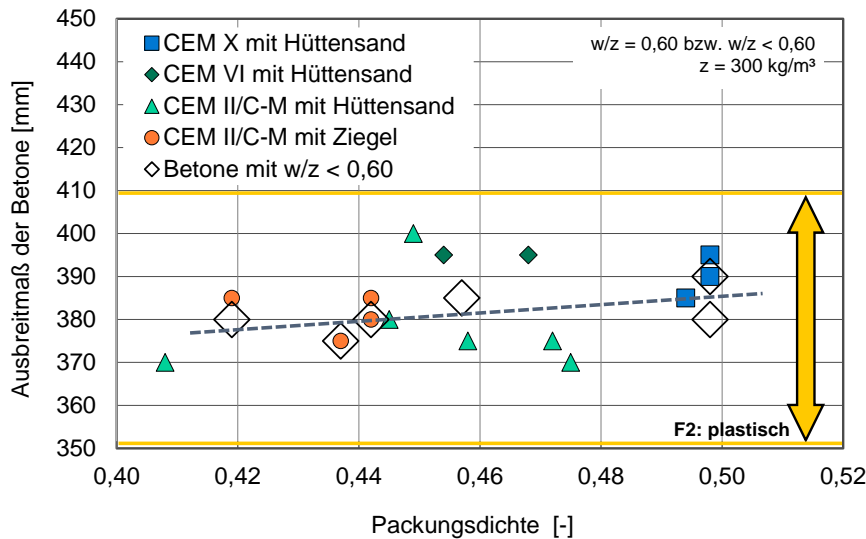


Bild 71 Ausbreitmaße der Frischbetone B1 und B1-SP mit $z = 300 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,60$ bzw. w/z (SP) $< 0,60$ in Abhängigkeit der Stampfpackungsdichte der Zemente, Verwendung von Versuchszementen der Zusammensetzung CEM II/C-M, CEM VI und CEM X

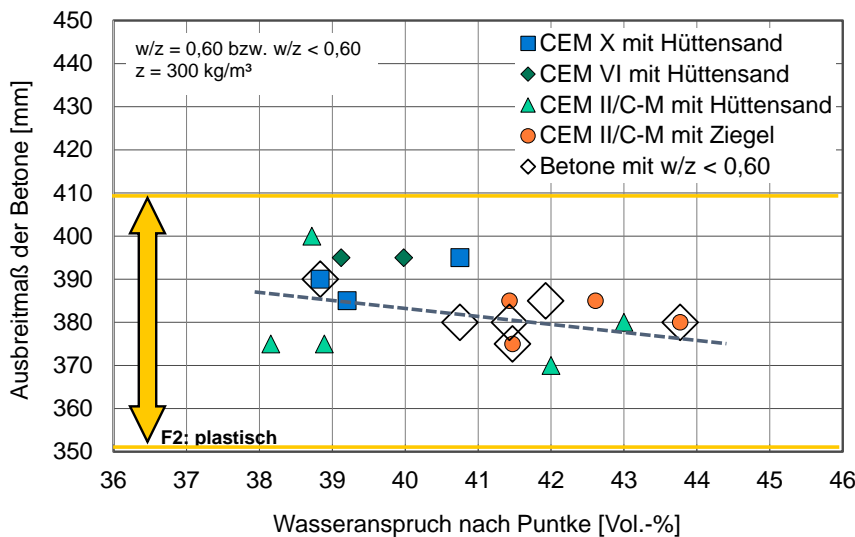


Bild 72 Ausbreitmaße der Frischbetone B1 und B1-SP mit $z = 300 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,60$ bzw. w/z (SP) $< 0,60$ in Abhängigkeit des am Zement bestimmten Wasseranspruchs nach Punkte, Verwendung von Versuchszementen der Zusammensetzung CEM II/C-M, CEM VI und CEM X

15.2 Konsistenz der Frischbetone B3 und B3-SP für das CDF-Verfahren

Die Luftporenbetone B3 und B3-SP wurden mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ oder $w/z < 0,50$ hergestellt. Im Vergleich zum Beton B1 mit $w/z = 0,60$ war im Beton B 3 mit $w/z = 0,50$ eine deutlich steifere Konsistenz zu erwarten. Ein Zusammenhang zur Packungsdichte des Zementes oder

zum Wasseranspruch nach Punkte war für die vorwiegend steifen Frischbetone (F1) nicht erkennbar. Im **Bild 73** und **Bild 74** wurden die Messwerte eingetragen. Im plastischen Bereich (F2) zeigten sich mit zunehmender Packungsdichte bzw. mit abnehmendem Wasseranspruch geringfügig höhere Ausbreitmaße am Frischbeton. Einige Konsistenzen wurden anhand des Verdichtungsmaßes bestimmt, die Ergebnisse sind im Anhang, **Tabelle A-3** aufgeführt.)

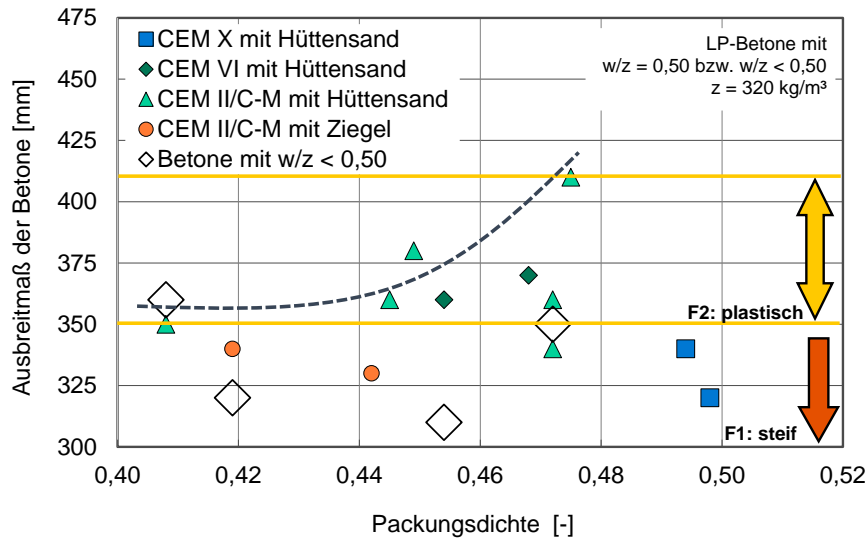


Bild 73 Ausbreitmaße der Frischbetone B3 und B3-SP mit $z = 320 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,50$ bzw. $w/z \text{ (SP)} < 0,50$ in Abhängigkeit der Stampfpackungsdichte der Zemente, Verwendung von Versuchszementen der Zusammensetzung CEM II/C-M, CEM VI und CEM X

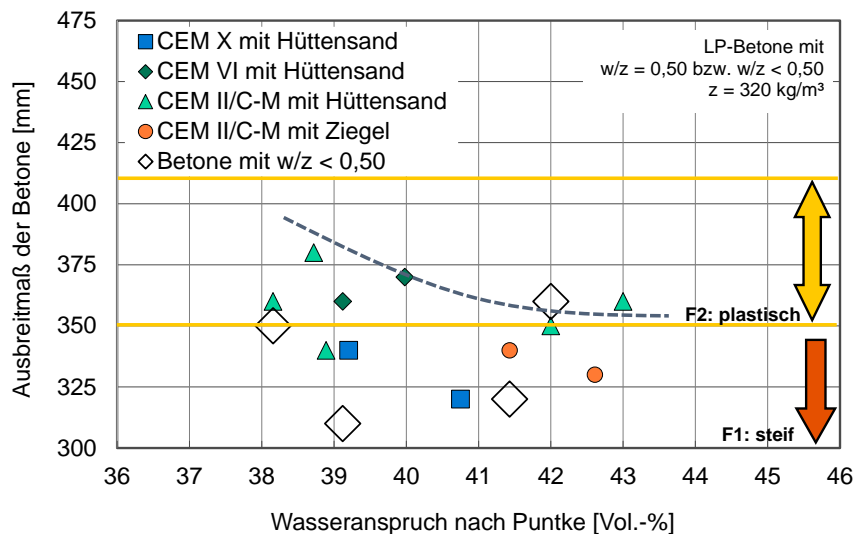


Bild 74 Ausbreitmaße der Frischbetone B3 und B3-SP mit $z = 320 \text{ kg/m}^3$ und $w/z = 0,50$ bzw. $w/z \text{ (SP)} < 0,50$ in Abhängigkeit des am Zement bestimmten Wasseranspruchs nach Punkte, Verwendung von Versuchszementen der Zusammensetzung CEM II/C-M, CEM VI und CEM X

16 Frostwiderstand der Betone im Würfelverfahren

An allen Betonen B1 und B1-SP wurde im Alter von 28 Tagen die Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 und die Rohdichte nach DIN EN 12390-7 an Würfeln mit der Kantenlänge 150 mm bestimmt. Die Lagerung der Probekörper erfolgte nach DIN EN 12390-2:2001-06, Anhang NA. Die Druckfestigkeiten (Mittelwerte) der Betone sind im Anhang **Tabelle A-3** zusammengefasst.

Die Prüfung des Frostwiderstandes nach dem Würfelverfahren entspricht den Maßstäben, die bisher bei der Zulassung von Zementen durch das Deutsche Institut für Bautechnik (DIBt) angelegt wurden. Die Prüfung der Betone mit dem Würfelverfahren erfolgte bis zu 100 Frost-Tau-Wechseln, im Projekt abweichend mit zwei Wechseln pro Tag.

16.1 Betondruckfestigkeit ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$ sowie w/z für SP)

Die folgenden Bilder (Bild 75 bis Bild 78) stellen die Betondruckfestigkeiten (B1, B1-SP) in Abhängigkeit der Packungsdichte des Zements, des Wasseranspruchs des Zements, der Druckfestigkeit der Mörtel (Prüfalter 28d) sowie der Gesamtporosität der Mörtel (Prüfalter 28d) dar.

Beim Vergleich konstanter Zementzusammensetzungen haben die Packungsdichte und der Wasseranspruch keinen Einfluss auf die Betonfestigkeit.

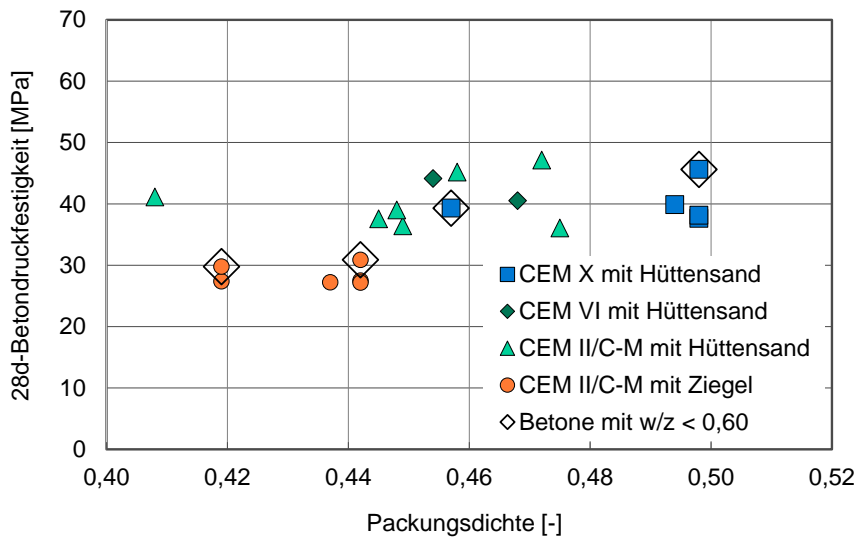


Bild 75 Druckfestigkeit der Betone B1 und B1-SP ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$ bzw. w/z (SP) < 0,60) im Prüfalter von 28 Tagen in Abhängigkeit der am Zement bestimmten Stampfpackungsdichte, Verwendung von Versuchszementen der Zusammensetzung CEM II/C-M, CEM VI und CEM X

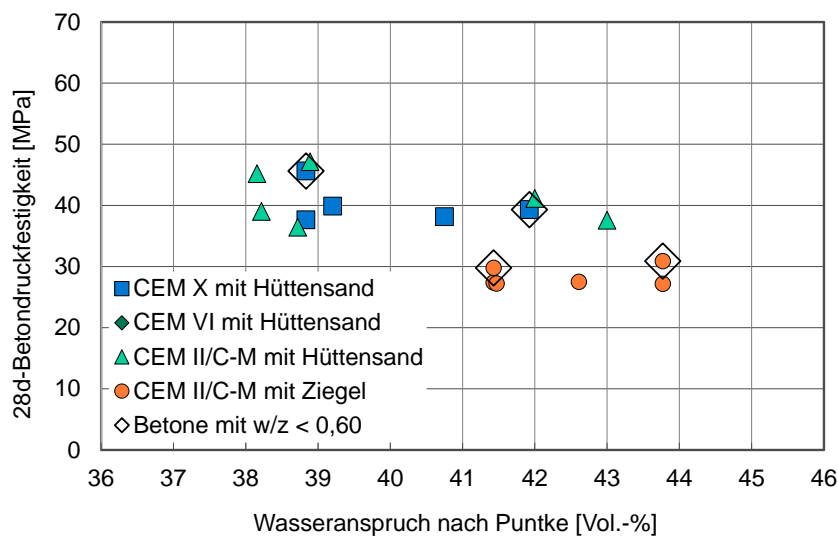


Bild 76 Druckfestigkeit der Betone B1 und B1-SP ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$ bzw. w/z (SP) < 0,60) im Prüfalter von 28 Tagen in Abhängigkeit des am Zement bestimmten Wasseranspruchs (Puntke), Verwendung von Versuchszementen der Zusammensetzung CEM II/C-M, CEM VI und CEM X

Die Festigkeitsunterschiede von bis zu etwa 20 MPa sind auf die Unterschiede in der stofflichen Zementzusammensetzung sowie auf die Art der Hauptbestandteile zurückzuführen.

In Bezug auf die Mörtelfestigkeit sowie auf die Mörtelporosität zeigten die Betonfestigkeiten den jeweils bekannten Zusammenhang. Mit abnehmender Gesamtporosität sowie mit zunehmender Druckfestigkeit der Mörtel (Normmörtel, SP-Mörtel) wurden auch steigende Betondruckfestigkeiten ermittelt.

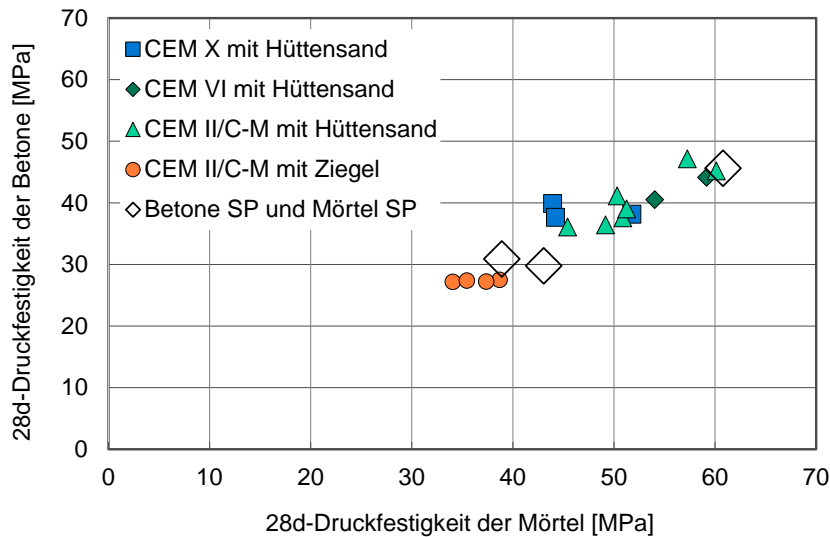


Bild 77 Druckfestigkeit der Betone B1 und B1-SP ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$ bzw. $w/z \text{ (SP)} < 0,60$) im Prüfalter von 28 Tagen in Abhängigkeit der am Zement bestimmten Druckfestigkeit (Normmörtel, SP-Mörtel, Prüfalter 28 Tage), Verwendung von Versuchszementen der Zusammensetzung CEM II/C-M, CEM VI und CEM X

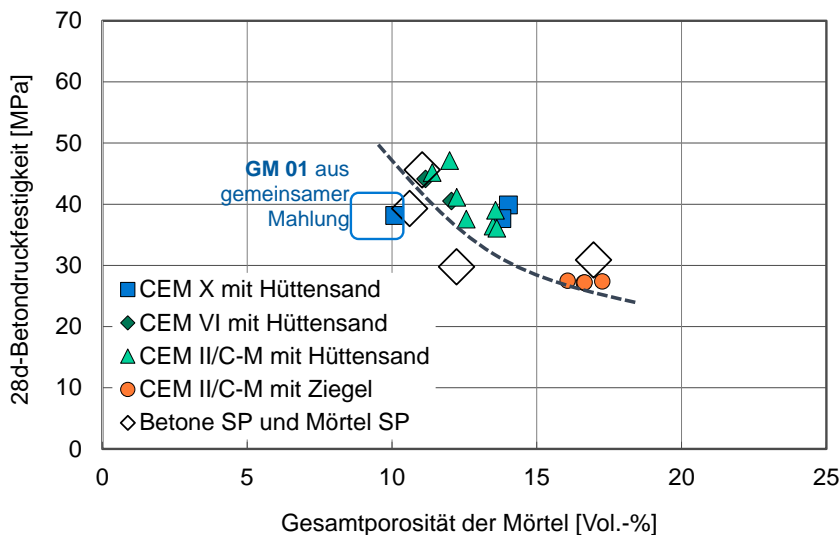


Bild 78 Druckfestigkeit der Betone B1 und B1-SP ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$ bzw. $w/z \text{ (SP)} < 0,60$) im Prüfalter von 28 Tagen in Abhängigkeit der am Mörtel bestimmten Gesamtporosität (Normmörtel, SP-Mörtel, Prüfalter 28 Tage), Verwendung von Versuchszementen der Zusammensetzung CEM II/C-M, CEM VI und CEM X

16.2 Frostwiderstand: Abwitterungen

Die folgenden Bilder werten die Untersuchungen des Frostwiderstandes aus und zeigen die Abwitterungen der Betone B1 und B1-SP in Anhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel.

Bild 79 ist zu entnehmen, dass bei Anwendung der CEM II/C-M (S-LL)-Zemente aus getrennter Mahlung Abwitterungen von maximal 6 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln ermittelt wurden. Der in den Zulassungsprüfungen des DIBt verwendete Grenzwert für Abwitterungen von 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln wurde von diesen Betonen B1 mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,60$ durchweg eingehalten.

Diese Betone haben somit auch das Kriterium für die Anwendung in der Expositionsklasse XF3 (einschließlich XF1) erfüllt und die Frostprüfung gemäß der Zulassungsverfahren des DIBt bestanden.

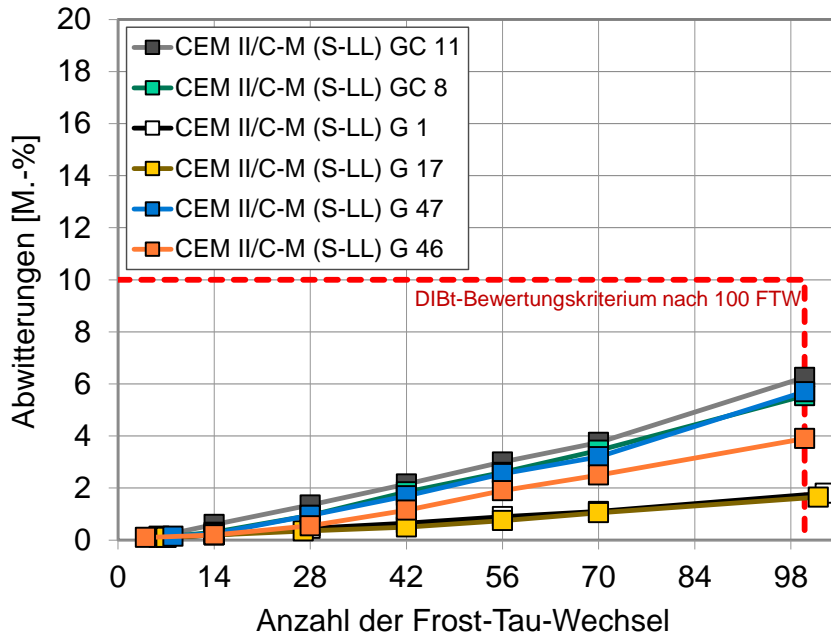


Bild 79 Untersuchungen der Betone B1 im Würfelverfahren ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$), Abwitterungen der Betone in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, Verwendung von CEM II/C-M (S-LL)-Zementen mit 50 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand, 20 M.-% Kalkstein

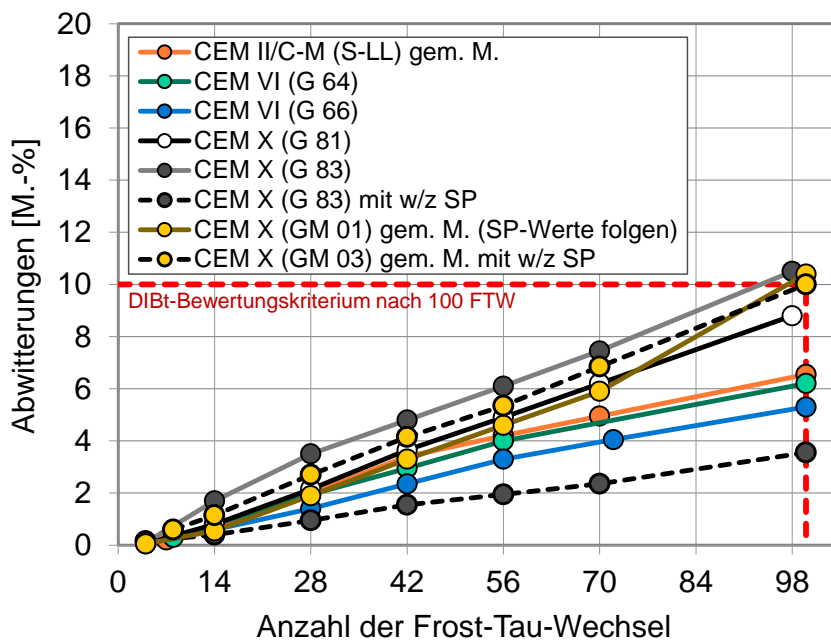


Bild 80 Untersuchungen der Betone B1 und B1-SP im Würfelverfahren ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$ bzw. $w/z \text{ (SP)} < 0,60$), Abwitterungen der Betone in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, Verwendung von hüttensandhaltigen CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

Auch bei Anwendung

- des CEM II/C-M (S-LL)-Zements aus gemeinsamer Mahlung auf der Chargenmühle (im Bild: gem. M., identische Zusammensetzung: 50K 30S 20LL) sowie
- der CEM VI-Zemente (Zusammensetzung: 35K 45S 20LL) und
- des CEM X-Zements G 81 (Zusammensetzung: 40K 30S 30LL) aus getrennter Mahlung

wurden an den Betonen B1 ($w/z = 0,60$) Abwitterungen < 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln ermittelt (vgl. **Bild 80**). Auch diese Betone haben das Kriterium für die Anwendung in der Expositions-klasse XF3 (einschließlich XF1) erfüllt und die Frostprüfung gemäß der Zulassungsverfahren des DIBt bestanden.

An einigen CEM X-Betonen (B1 mit $w/z = 0,60$) wurden in der Frostprüfung nach 100 Frost-Tau-Wechseln Abwitterungen ≥ 10 M.-% ermittelt (vgl. **Bild 80**). In diesem Falle wurde die Prüfung (Würfelverfahren) bei Ansatz eines abgesenkten w/z -Wertes an einem Beton B1-SP (wie im Abschnitt 14.1 beschrieben) wiederholt.

Anmerkung: Auch in der Herstellung der SP-Betone wurden durchweg keine verflüssigenden Zusatzmittel angewendet.

So wurden z. B. unter Verwendung des CEM X G 83 (35 M.-% Klinker, 35 M.-% Hüttensand, 30 M.-% Kalkstein) im Beton B1-SP mit abgesenktem w/z -Wert ($w/z = 0,54$) nach 100 Frost-Tau Wechseln im Würfelverfahren Abwitterungen < 4 M.-% ermittelt.

Anmerkung: Nach praktischem Abgleich mit Betonen von Kühltürmen hat Siebel 1992 [Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton, Beurteilung mittels Würfelverfahren [23] folgende Kriterien für die Bewertung von Betonen mit beliebigen (d. h. auch abgesenkten) w/z -Werten im Würfelverfahren vorgeschlagen:

Expositionsklasse XF3: nach 100 Frost-Tau-Wechseln (FTW) maximal **5 M.-%** Abwitterungen

Expositionsklasse XF1: nach 100 Frost-Tau-Wechseln (FTW) maximal **10 M.-%** Abwitterungen

Insofern könnte der o.g. CEM X-Beton B1-SP-G83 mit < 4 M.-% Abwitterungen im Würfelverfahren in die Expositions-klasse XF3 nach [23] eingeordnet werden.

Außerdem hat der Beton B1-SP-G83 mit Abwitterungen < 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln sehr gute Voraussetzungen, auch das DIBt-Kriterium für die Anwendung in der Expositions-klasse XF1 (gemäß aktueller Zulassungsverfahren für Betone mit abgesenktem w/z -Wert = 0,55 im Würfelverfahren) einzuhalten.

Bild 81 stellt die Auswertung der Frostversuche unter Verwendung der ziegelhaltigen Zemente CEM II/C-M (Q-LL) mit Zusammensetzung 50K 30Q 20LL dar. Dem Diagramm ist zu entnehmen, dass an den Betonen B1 mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,60$ Abwitterungen ≥ 10 M.-% nach 100 Frost-Tau-Wechseln ermittelt wurden. Der in den Zulassungsprüfungen des DIBt verwendete Grenzwert für Abwitterungen (10 M.-% nach 100 FTW) wurde von den Betonen B1 ($w/z = 0,60$) nicht eingehalten. Diese Betone haben somit auch das Kriterium für die Anwendung in der Expositions-klasse XF3 nicht erfüllt und die Frostprüfung gemäß der Zulassungsverfahren des DIBt nicht bestanden.

Auch bei Anwendung einiger ziegelhaltigen Zemente wurde nach der Prüfung der B1-Betone im Würfelverfahren eine w/z -Wert-Absenkung im Beton B1-SP vorgenommen:

- B1-SP mit Zement GC 9: w/z (SP) = 0,56; Abwitterungen nach 100 FTW: 7,4 M.-%
- B1-SP mit Zement G 18: w/z (SP) = 0,58; Abwitterungen nach 100 FTW: 5,7 M.-%.

Das **Bild 81** zeigt, dass die B1-SP-Betone auf Basis der Zemente GC 9 und G 18 nach 100 Frost-Tau-Wechseln Abwitterungen < 10 M.-% aufwiesen. Die Ergebnisse dieser Frostprüfungen erfüllen nach [23] das Kriterium für die Expositionsklasse XF1.

Für den gemeinsam gemahlenen Zement identischer Zusammensetzung (im Bild: gem. M., Chargenmühle) wurden die Partikelgrößenverteilungen der Mahlgutbestandteile aufgrund der vergleichsweise geringen Mahlbarkeit von Kalkstein und Ziegel erheblich beeinflusst und haben in der diskontinuierlichen Mahlung zu einer vergleichsweise geringen Packungsdichte sowie zu einer hohen spezifischen Oberfläche des Zementes geführt. Zur Entstehung eines dichten Zementsteingefüges bei Anwendung von CEM II/C-M (Q-LL)-Zementen dieser Zusammensetzung (50K 30Q 20LL) leistet insbesondere die Granulometrie des Klinkers einen erheblichen Beitrag. Sie kann jedoch nur in getrennten Mahlverfahren gezielt verändert werden und zur Erhöhung von Druckfestigkeit, Dichtheit und Dauerhaftigkeit beitragen (vgl. Abschnitt 6.2) Die Prüfungen des ziegelhaltigen Zements CEM II/C-M (Q-LL) aus gemeinsamer Mahlung wurden im Würfelverfahren - sowohl mit Beton B1 ($w/z = 0,60$) als auch mit Beton B1-SP ($w/z < 0,60$) - nicht bestanden, da nach 100 FTW Abwitterungen ≥ 10 M.-% ermittelt wurden.

Eine gemeinsame Mahlung von 50 M.-% Klinker, 30 M.-% Ziegel und 20 M.-% Kalkstein in einem kontinuierlichen Mahlverfahren war nicht Gegenstand der Untersuchungen.

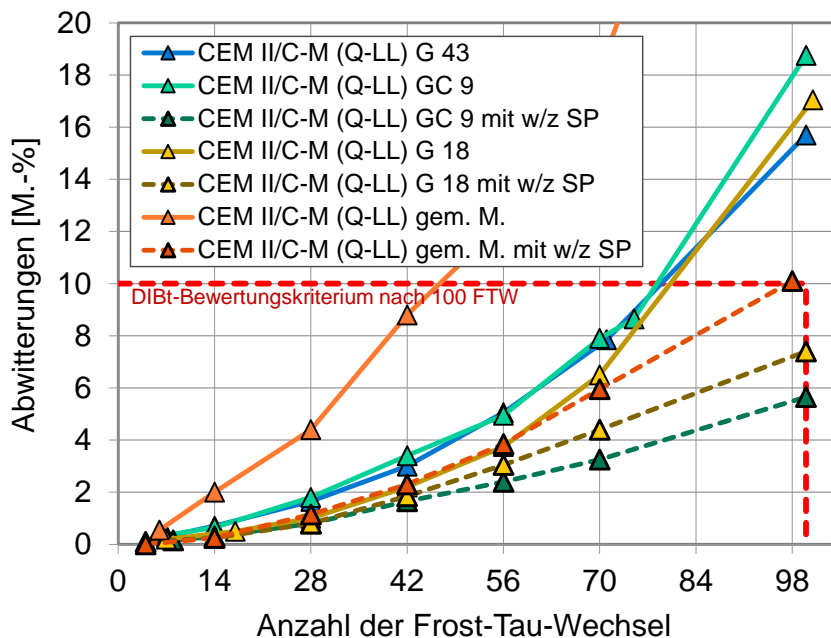


Bild 81 Untersuchungen der Betone B1 und B1-SP im Würfelverfahren ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$ bzw. w/z (SP) $< 0,60$), Abwitterungen der Betone in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, Verwendung von ziegelhaltigen CEM II/C-M (Q-LL)-Zementen aus getrennter bzw. gemeinsamer Mahlung

Anmerkung: In diesem Projekt wurden erstmalig ressourcenschonende „R-Zemente“ der Zusammensetzung CEM II/C-M (Q-LL) auf der Basis ziegelreicher Recyclingprodukte hergestellt. Dabei sollte untersucht werden, ob der puzzolanisch wirksame RC-Ziegel aus der Kreislaufwirtschaft

a) technisch geeignet und in entsprechenden Stoffströmen verfügbar ist,

b) die Steinkohlenflugasche als Hauptbestandteil klinkereffizienter CEM II/C-M-Zemente ersetzen kann,

c) die Verarbeitbarkeit entsprechender Mörtel und Betone nicht ungünstig beeinflusst und

d) der Entstehung eines dichten und dauerhaften Zementstein-/ Betongefüges in Kombination mit dem weiteren Hauptbestandteil Kalkstein nicht entgegenwirkt.

Aus diesem Grunde wurde die vergleichsweise einfache Methode der w/z-Wert-Absenkung vor die aufwendigere Methode der granulometrischen Optimierung gestellt. Bei dieser Entscheidung wurde berücksichtigt, dass eine weitere granulometrische Veränderung dieser Zemente ggf. zu einem noch höheren Wasseranspruch (Wasserbedarf) führt. Dies könnte für die Einstellung einer steifplastischen Mörtelkonsistenz (SP) keine w/z-Wert-Absenkung, sondern eine w/z-Wert-Erhöhung auf w/z-Werte > 0,50 zur Folge haben (vgl. R-Zemente im **Bild 55**).

Die folgenden Bilder stellen die Abwitterungen der Betone B1 und B1-SP nach 100 Frost-Tau-Wechseln in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit, der Gesamtporosität und der Gelporenanteile der entsprechenden Mörtel, des Wasseranspruchs und der Packungsdichte der verwendeten Zemente dar.

Bild 82 verdeutlicht, dass die Betone B1 (w/z = 0,60) mit hüttensandhaltigen CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen sowie mit einer Druckfestigkeit von mindestens 40 MPa die Zulassungsprüfung im Würfelverfahren bestanden haben und mit Abwitterungen < 10 M.-% nach 100 FTW das Kriterium für die Anwendung in der Expositionsklasse XF3 (inkl. XF1) erfüllen.

Auch B1-Betone (w/z = 0,60) mit CEM II/C-M (S-LL) sowie Festigkeiten zwischen 35 MPa und 40 MPa haben mit Abwitterungen < 10 M.-% die Frostprüfung für XF3 (XF1) bestanden.

Die B1-Betone (w/z = 0,60) unter Verwendung des CEM X-Zements aus gemeinsamer Mahlung (GM01) sowie des CEM X G83 aus getrennter Mahlung erreichten Festigkeiten von ca. 38 MPa. Nach 100 FTW wurden Abwitterungen von 10,2 M.-% bzw. 10,7 M.-% festgestellt. Damit wurde das DIBt-Bewertungskriterium nicht erfüllt. Nach w/z-Wert-Absenkung (w/z (SP) < 0,60) erreichte der Beton B1-SP-G83 eine Festigkeit von 46 MPa und könnte lt. [23] aufgrund geringer Abwitterungen < 5 M.-% nach 100 FTW in die Expositionsklasse XF3 eingeordnet werden.

Die Betone B1 und B1-SP mit ziegelhaltigen Zementen wiesen noch geringere Festigkeiten auf. Dennoch haben einige Betone B1-SP nach w/z-Wert-Absenkung (w/z (SP) < 0,60) Abwitterungen < 10 M.-% nach 100 FTW erzielt und könnten in ihrer Anwendung der Expositionsklasse XF1 zugeordnet werden, wenngleich die Festigkeiten der Betone B1-SP auf vergleichsweise geringem Niveau bei ca. 30 MPa lagen.

Dem gegenüber wurden im **Bild 83** zum Vergleich die Abwitterungen zahlreicher Betone nach 100 FTW im Würfelfrostverfahren in Abhängigkeit der 28d-Betondruckfestigkeit dargestellt. Das Bild zeigt Prüfergebnisse des VDZ aus [24], die an Betonen mit unterschiedlichen Wasserzementwerten sowie unter Verwendung verschiedener Zementarten ermittelt wurden. Die Ergebnisse des Forschungsprojektes können anhand des Bildes wie folgt eingeordnet werden:

- Alle **CEM II/C-M (S-LL)-Betone** und alle **CEM VI-Betone** haben unabhängig ihrer Druckfestigkeit das DIBt-Bewertungskriterium mit < 10 M.-% Abwitterungen nach 100 FTW für die Expositionsklasse XF3 (inkl. XF1) eingehalten. Im Vergleich zur Gesamtübersicht können die Betone B1 mit w/z = 0,60 z. B. bei CEM I bis CEM III/B mit w/z = 0,60 (schwarze Markierungen) sowie bei CEM II/C-M mit w/z = 0,60 (Dreieck Markierungen) eingeordnet werden.
- Nicht alle **CEM X-Betone** (sowohl ohne als auch mit w/z-Wert-Absenkung) haben das DIBt-Bewertungskriterium mit < 10 M.-% Abwitterungen nach 100 FTW eingehalten. Die Ergebnisse lassen sich in der Gesamtübersicht bei CEM II/C-M, CEM VI und CEM II/B-LL, jeweils mit w/z = 0,60, einordnen. Der CEM X-Beton G 83 erreichte nach w/z-Wert-Anpassung (B1-SP) eine Druckfestigkeit ≥ 45 MPa sowie Abwitterungen < 5 M.-%, was der Expositionsklasse XF3 nach [23] entspricht.
- Unter Verwendung der ziegelhaltigen, getrennt gemahlten R-Zemente der Zusammensetzung CEM II/C-M (Q-LL) mit 50 M.-% Klinker wurden in der Frostprüfung nach dem Würfelverfahren nur nach w/z-Wert-Absenkung (Betone B1-SP) Abwitterungen < 10 M.-% nach 100 FTW erreicht. Die Ergebnisse der **CEM II/C-M (Q-LL)-Betone** lassen sich in der Gesamtübersicht bei CEM II/C-

M ($w/z = 0,60$) oder bei CEM I bis CEM III ($w/z \geq 0,61$ bzw. $> 0,65$) einordnen. Die Ergebnisse der Betone B1-SP mit Abwitterungen < 10 M.-% entsprechen der Expositionsklasse XF 1.

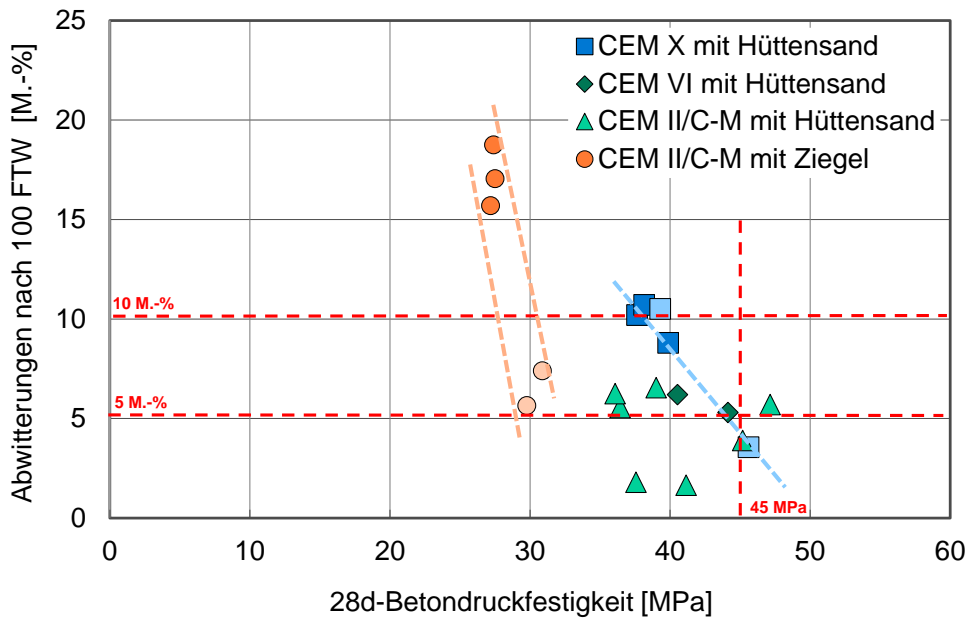


Bild 82 Untersuchungen der Betone B1 und B1-SP im Würfelverfahren ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$ bzw. w/z (SP) $< 0,60$), Abwitterungen der Betone (100 FTW) in Abhängigkeit ihrer Druckfestigkeit im Prüfalalter von 28 Tagen, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen mit maximal 50 M.-% Klinker und mindestens 20 M.-% Kalkstein

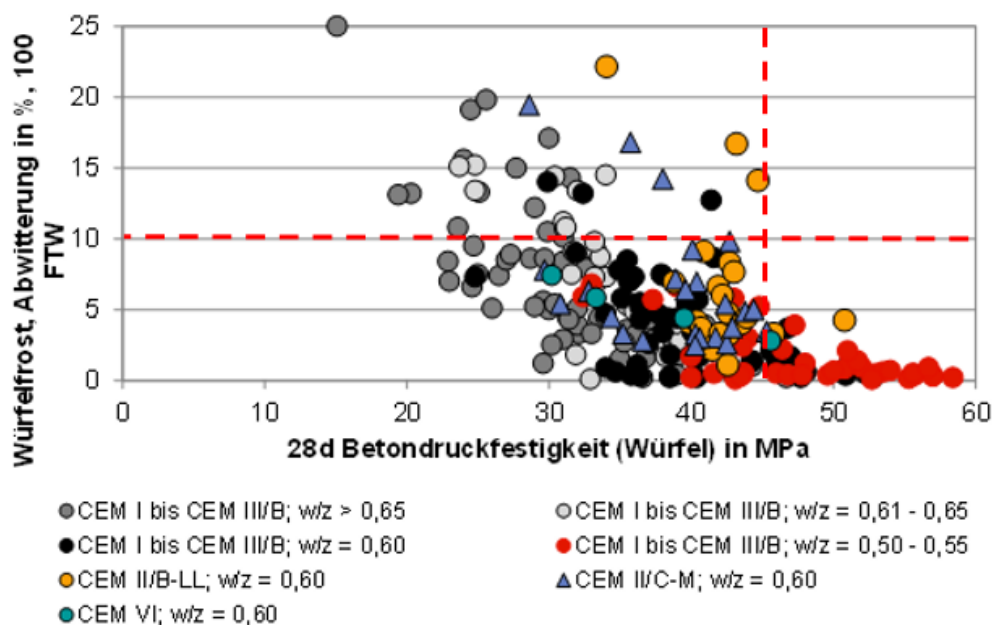


Bild 83 Zusammenhang zwischen Wasserzementwert, Druckfestigkeit und Abwitterungen im Würfelverfahren nach 100 Frost-Tau-Wechseln, *) Quelle: Martin Schneider: The cement industry on the way to a low-carbon future, Cement and Concrete Research 124 (2019), Fig. 12. Relation between water/cement ratio, compressive strength and scaling in the cube test method after 100 freeze thaw cycles according to CEN/TS 12390-9 (XF1-criterion: 10% mass loss) (data collected by VDZ)

Bild 84 stellt die Abwitterungen der Betone der Gesamtporosität der Mörtel gegenüber. Es geht daraus hervor, dass unter Verwendung der meisten Zemente aus getrennter Mahlung, die im entsprechenden Mörtel eine Gesamtporosität von maximal 14 Vol.-% aufwiesen, in der Frostprüfung der Betone B1 oder B1-SP im Würfelverfahren Abwitterungen < 10 M.-% nach 100 FTW ermittelt wurden. Die Betone mit CEM X und CEM II/C-M (Q-LL) jeweils aus gemeinsamer Mahlung wiesen dagegen Abwitterungen > 10 M.-% auf.

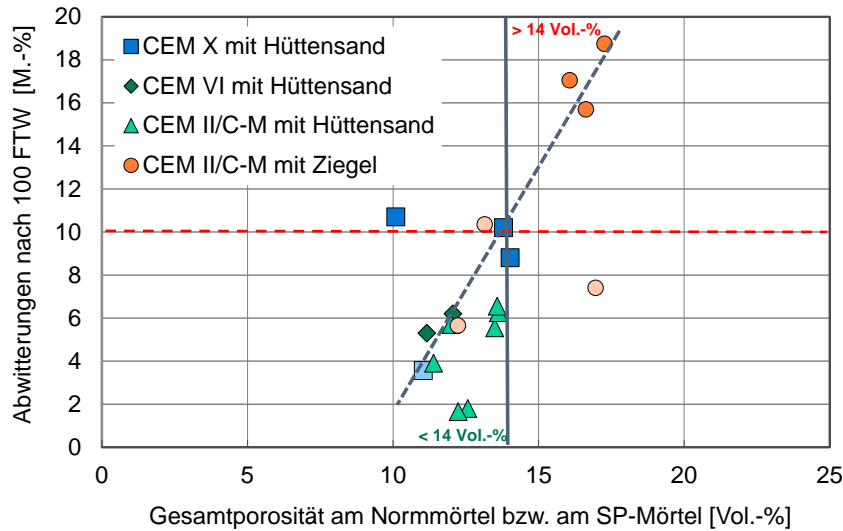


Bild 84 Untersuchungen der Betone B1 und B1-SP im Würfelverfahren ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$ bzw. $w/z \text{ (SP)} < 0,60$), Abwitterungen der Betone (100 FTW) in Abhängigkeit der Gesamtporosität entsprechender Normmörtel bzw. SP-Mörtel im Prüfmörtel von 28 Tagen, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

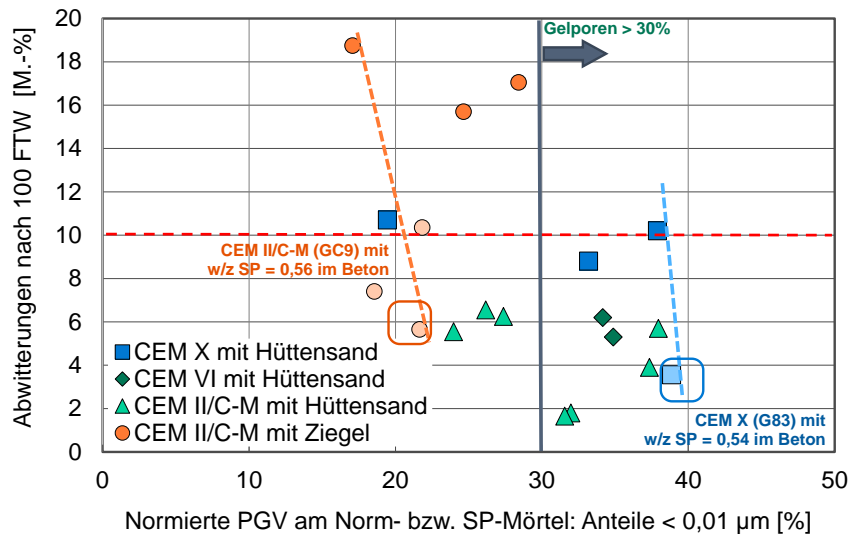


Bild 85 Untersuchungen der Betone B1 und B1-SP im Würfelverfahren ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$ bzw. $w/z \text{ (SP)} < 0,60$), Abwitterungen der Betone (100 FTW) in Abhängigkeit der Gelporenanteile der normierten Porengrößenverteilung entsprechender Normmörtel bzw. SP-Mörtel im Prüfmörtel von 28 Tagen, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

In Bezug auf die Gelporenanteile der Mörtel (vgl. **Bild 85**) ist kein grundsätzlicher Zusammenhang für alle Zementarten erkennbar. Aus den Ergebnissen der CEM II/C-M- und CEM VI-Zemente (mit jeweils 20 M.-% Kalkstein) lässt sich ableiten, dass bei einem Gelporenanteil im Mörtel von mindestens 30% in der Frostprüfung am entsprechenden Beton B1 mit $w/z = 0,60$ das DIBt-Bewertungskriterium mit < 10 M.-% Abwitterungen nach 100 FTW sicher eingehalten wurde.

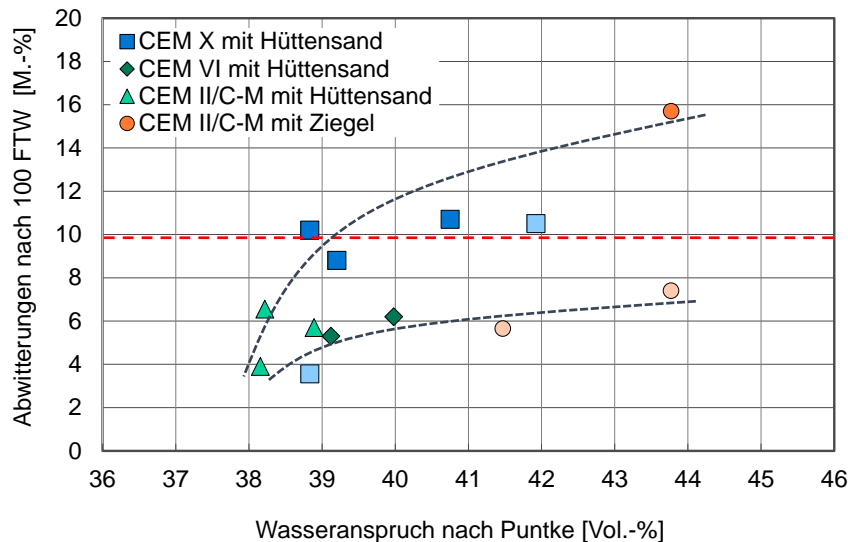


Bild 86 Untersuchungen der Betone B1 und B1-SP im Würfelverfahren ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$ bzw. w/z (SP) $< 0,60$), Abwitterungen der Betone (100 FTW) in Abhängigkeit des am Zement ermittelten Wasseranspruchs (Punkte), Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

In der Darstellung der Abwitterungen der Betone B1 und B1-SP in Abhängigkeit des am Zement ermittelten Wasseranspruchs (Punkte) wird folgende Tendenz deutlich (vgl. **Bild 86**). Nahm der Wasseranspruch der Zemente zu und wurden an den Zementen die Betone B1 mit $w/z = 0,60$ geprüft, so nahmen auch die Abwitterungen nach 100 Frost-Tau-Wechseln zu. Zemente mit vergleichsweise hohem Wasseranspruch haben mit Abwitterungen > 10 M.-% die Prüfung unter Standardbedingungen nicht bestanden.

Wurde für die Anwendung dieser (getrennt gemahlene) Zemente ein B1-SP-Beton mit abgesenktem w/z -Wert hergestellt, so lagen die Abwitterungen im Bereich < 5 M.-% bzw. < 10 M.-% und erfüllten damit die Kriterien der Expositionsklassen XF3 bzw. XF1 nach [23].

Bild 87 stellt den Zusammenhang zur Stampfpackungsdichte der verwendeten Zemente dar. Die Untersuchung der Standardbetone B1 ($w/z = 0,60$) hat mit zunehmender Packungsdichte der hüttensandhaltigen Zemente eine Zunahme der Abwitterungen der Betone nach 100 Frost-Tau-Wechseln ergeben. Damit folgen die Ergebnisse den Erkenntnissen aus dem Vorgängerprojekt [2] [1] [25].

Die ziegelhaltigen Zemente zeigen jedoch andere granulometrische Eigenschaften und Effekte als die hüttensandhaltigen Zemente. Ziegelhaltige Zemente mit geringem Klinkerfaktor sowie 20 M.-% Kalkstein weisen aufgrund ihrer stofflichen Zusammensetzung eine zum Teil deutlich geringere Packungsdichte sowie einen zum Teil deutlich höheren Wasseranspruch als hüttensandhaltige Zemente auf. Dennoch wurden unter Verwendung dieser Zemente im Frostversuch nach dem Würfelverfahren nur dann Abwitterungen < 10 M.-% nach 100 FTW festgestellt, wenn in die Prüfung ein Beton B1-SP mit abgesenktem w/z -Wert einging.

Anmerkung: Als Ursache für das abweichende Verhalten könnte die im Vergleich zum Klinker oder zum Hüttensand deutlich kleinere Dichte des Ziegelmaterials angesehen werden, die bei konstantem bzw. mit Hüttensand vergleichbarem Massenanteil im Zement (hier 30 M.-%) zu einem größeren Stoffraumvolumen führen kann.

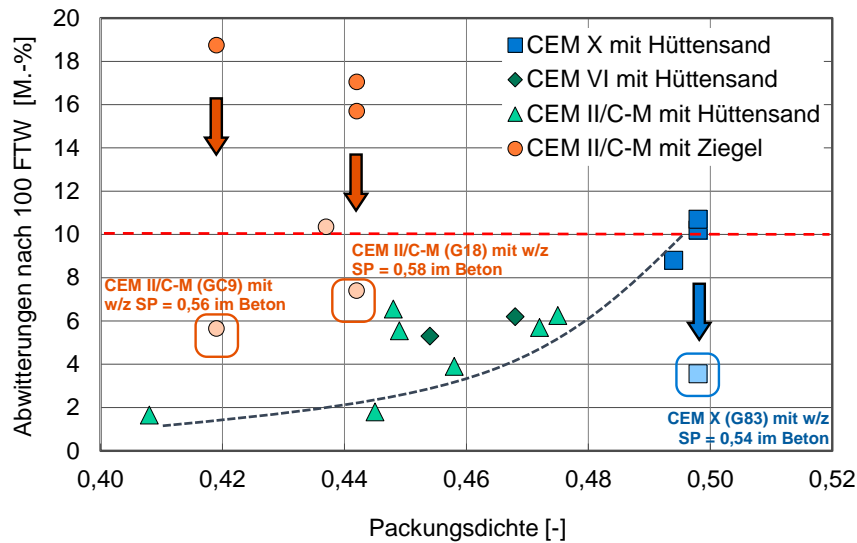


Bild 87 Untersuchungen der Betone B1 und B1-SP im Würfelverfahren ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$ bzw. w/z (SP) $< 0,60$), Abwitterungen der Betone (100 FTW) in Abhängigkeit der am Zement ermittelten Stampfpackungsdichte, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

17 Frost-Tausalz-Widerstand der Betone im CDF-Verfahren

An allen Betonen B3 und B3-SP wurde im Alter von 28 Tagen die Druckfestigkeit nach DIN EN 12390-3 und die Rohdichte nach DIN EN 12390-7 an Würfeln mit der Kantenlänge 150 mm bestimmt. Die Lagerung der Probekörper erfolgte nach DIN EN 12390-2:2001-06, Anhang NA. Die Druckfestigkeiten (Mittelwerte) der Betone sind im Anhang **Tabelle A-3** zusammengefasst.

Mit dem CDF-Test wurde der Widerstand gegenüber einer Frost-Tauwechsel-Beanspruchung bei gleichzeitiger Taumittelbelastung geprüft. Bei der Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands von Betonen B3 bzw. B3-SP mit künstlichen Luftporen ist die Oberflächenabwitterung dominant und für die Beurteilung vorrangig. Die CDF-Betone B3 und B3-SP wurden im FIB Weimar hergestellt und untersucht. Die Betone wurden mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,50$ bzw. $w/z < 0,50$ (SP) sowie einem Zementgehalt von $z = 320 \text{ kg/m}^3$ hergestellt.

17.1 Druckfestigkeit der Luftporenbetone ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$ sowie w/z für SP)

Die folgenden Bilder (**Bild 88** bis **Bild 91**) stellen die Druckfestigkeiten der Luftporenbetone in Abhängigkeit der Packungsdichte des Zements, des Wasseranspruchs des Zements, der Druckfestigkeit der Mörtel (Prüfalter 28d) sowie der Gesamtporosität der Mörtel (Prüfalter 28d) dar.

Beim Vergleich konstanter stofflicher Zementzusammensetzungen hatte die Packungsdichte keinen Einfluss auf die Betonfestigkeit.

In Abhängigkeit des Wasseranspruchs (Punkte) kann aus einigen wenigen Ergebnissen abgeleitet werden, dass mit zunehmendem Wasseranspruch eine geringfügige Abnahme der Betonfestigkeit möglich ist. Die Festigkeitsunterschiede sind überwiegend auf die Unterschiede in der stofflichen Zementzusammensetzung sowie auf die Art der Hauptbestandteile zurückzuführen.

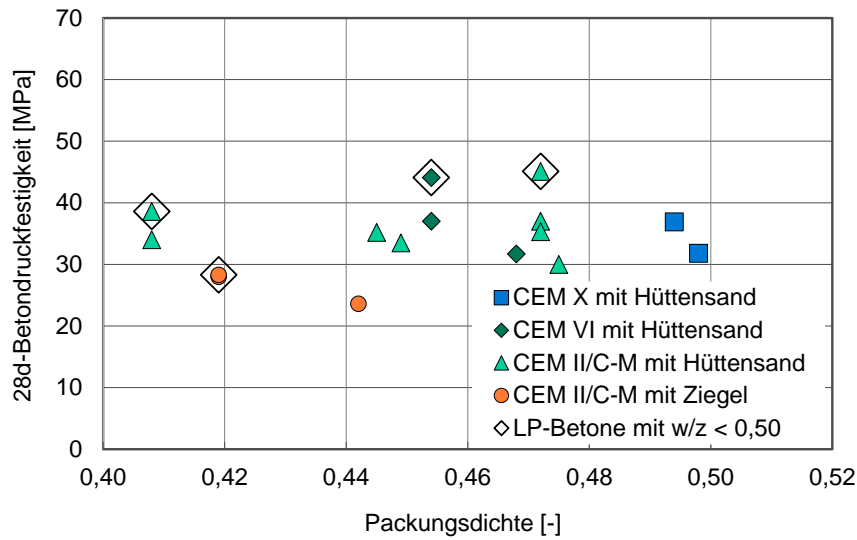


Bild 88 Druckfestigkeit der Luftporenbetone B3 und B3-SP ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$ bzw. w/z (SP) < 0,50) im Prüfalalter von 28 Tagen in Abhängigkeit der am Zement bestimmten Stampfpackungsdichte, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

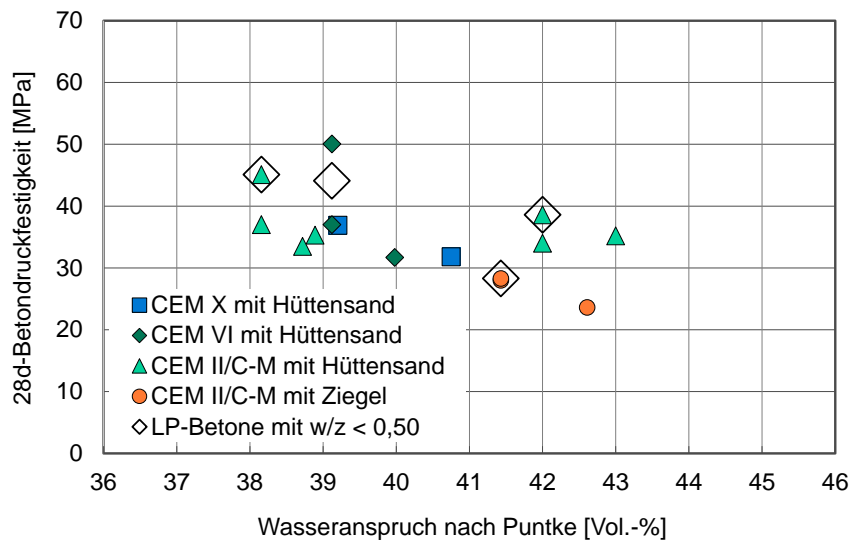


Bild 89 Druckfestigkeit der Luftporenbetone B3 und B3-SP ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$ bzw. w/z (SP) < 0,50) im Prüfalalter von 28 Tagen in Abhängigkeit des am Zement bestimmten Wasseranspruchs (Puntke), Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

In Bezug auf die Mörtelfestigkeit sowie auf die Mörtelporosität zeigten die Festigkeiten der Luftporenbetone B3 und B3-SP den jeweils bekannten Zusammenhang. Mit abnehmender Gesamtporosität sowie mit zunehmender Druckfestigkeit der Mörtel (Normmörtel, SP-Mörtel) wurden auch steigende Betondruckfestigkeiten ermittelt.

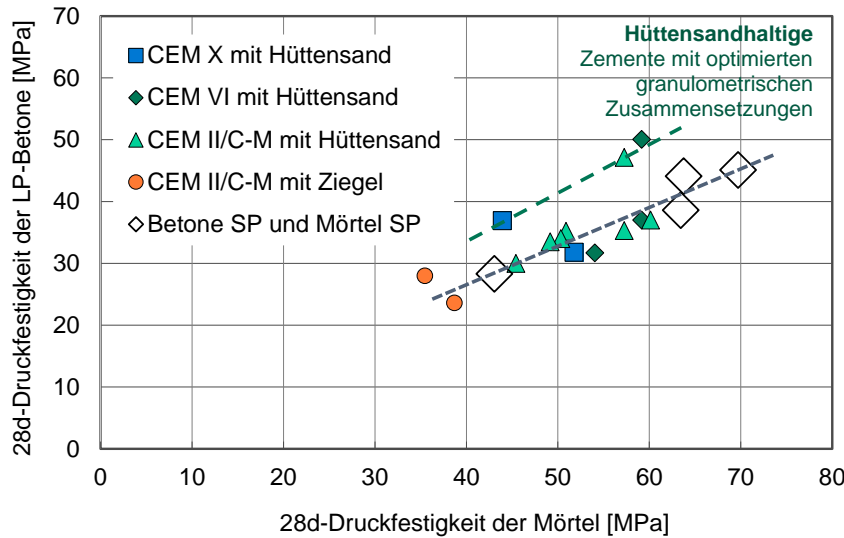


Bild 90 Druckfestigkeit der Luftporenbetone B3 und B3-SP ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$ bzw. $w/z \text{ (SP)} < 0,50$) im Prüfalalter von 28 Tagen in Abhängigkeit der am Zement bestimmten Druckfestigkeit (Normmörtel, SP-Mörtel, Prüfalalter 28 Tage), Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

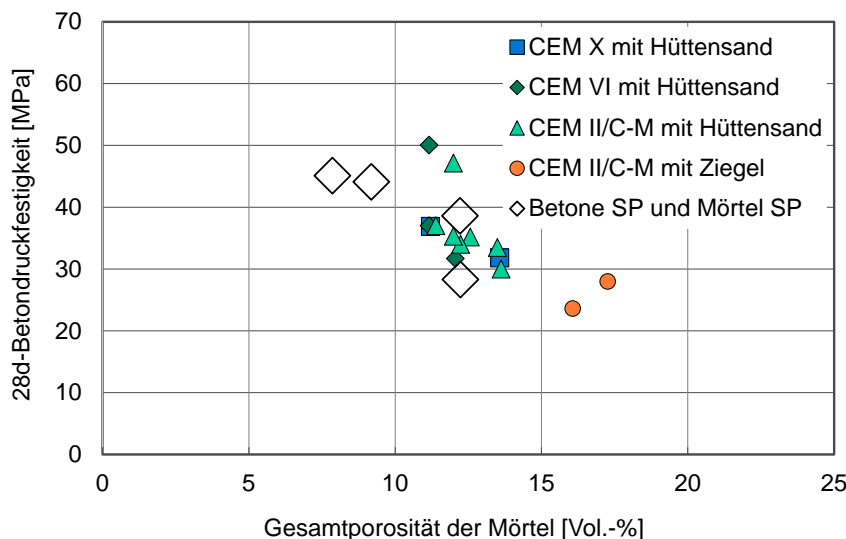


Bild 91 Druckfestigkeit der Luftporenbetone B3 und B3-SP ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$ bzw. $w/z \text{ (SP)} < 0,50$) im Prüfalalter von 28 Tagen in Abhängigkeit der am Mörtel bestimmten Gesamtporosität (Normmörtel, SP-Mörtel, Prüfalalter 28 Tage), Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

17.2 Frost-Tausalz-Widerstand: Abwitterungen

Die Diagramme in **Bild 92** bis **Bild 94** zeigen die Abwitterungen der LP-Betone B3 und B3-SP in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel. Aus den Bildern geht hervor, dass der überwiegende Teil der hier untersuchten hüttensandhaltigen und ziegelhaltigen Zemente die Anwendungsprüfung im CDF-Test nicht bestanden hat.

Das im BAW-Merkblatt „Frostprüfung von Beton“ angegebene Kriterium von maximal $1,50 \text{ kg/m}^2$ nach 28 Frost-Tau-Wechseln wurde nur in wenigen Fällen eingehalten. Auch in den DIBt-Zulassungsprüfungen ist dieses Bewertungskriterium für die Anwendung klinkereffizienter Zemente in der Expositi- onsklasse XF4 relevant (vgl. [26]).

Unter Verwendung des granulometrisch optimierten CEM II/C-M (S-LL)-Zements G 46 wurde die CDF-Prüfung am Standard-LP-Beton mit einem w/z-Wert von 0,50 knapp bestanden.

Für die Anwendung des CEM II/C-M (S-LL)-Zements G 17 (hier mit größerem Klinker bzw. Hütensand) wurde ein Luftporenbeton B3-SP mit abgesenktem w/z-Wert hergestellt und untersucht. Der w/z-Wert wurde wie im Abschnitt 14.1 beschrieben verringert. Nach 28 Frost-Tau-Wechseln wurden nunmehr ca. 1,3 kg/m² Abwitterungen ermittelt. So konnte der LP-Beton B3-SP mit Zement G 17 und einem w/z-Wert von 0,44 die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstandes im CDF-Test bestehen.

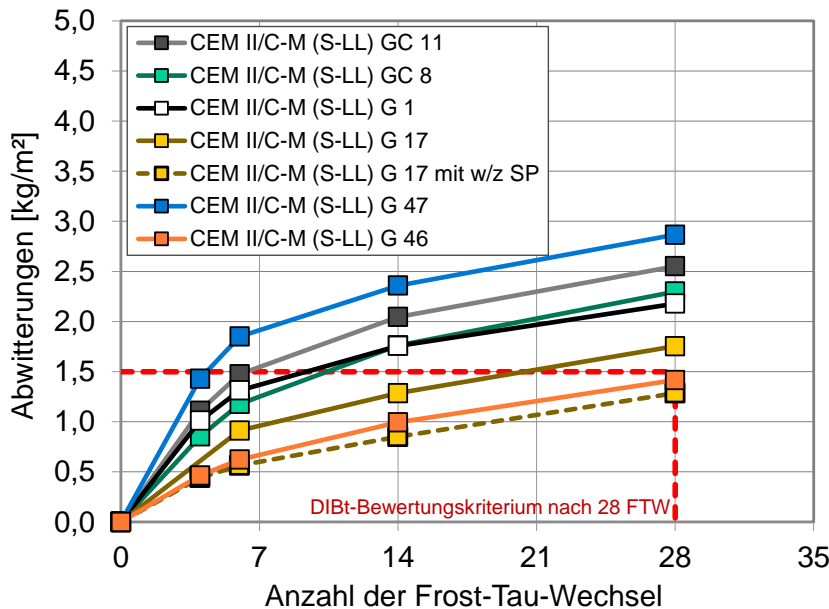


Bild 92 Untersuchungen der Luftporenbetone B3 und B3-SP im CDF-Verfahren ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$ bzw. $w/z \text{ (SP)} < 0,50$), Abwitterungen der LP-Betone in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, Verwendung von CEM II/C-M (S-LL)-Zementen mit 50 M.-% Klinker, 30 M.-% Hütensand, 20 M.-% Kalkstein

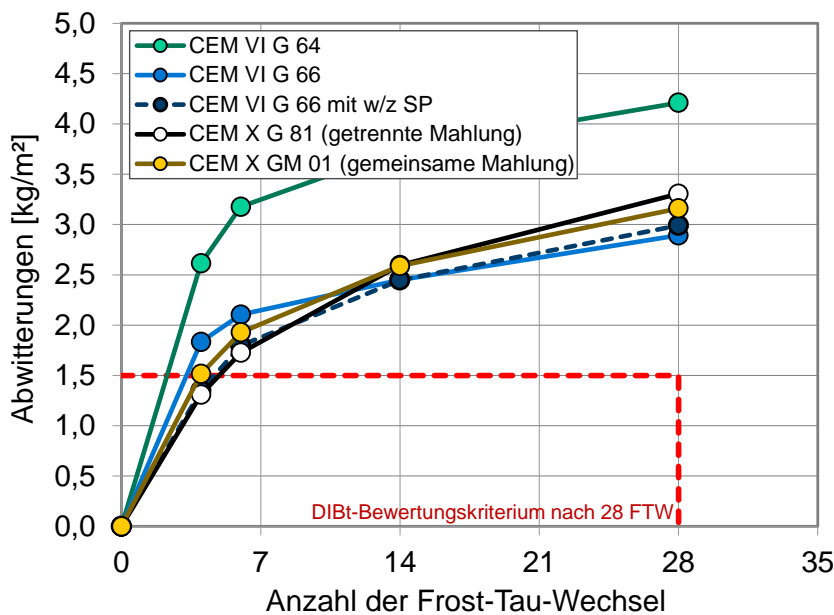


Bild 93 Untersuchungen der Luftporenbetone B3 und B3-SP im CDF-Verfahren ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$ bzw. $w/z \text{ (SP)} < 0,50$), Abwitterungen der LP-Betone in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, Verwendung von CEM VI- und CEM X (S-LL)-Zementen

Die Einstellung des w/z-Wertes für B3-SP-Betone hat in der Anwendung des CEM VI-Zements G 66 nicht zum Erreichen des Frost-Tausalz-Widerstandes geführt (vgl. **Bild 93**). In der Herstellung der LP-Betone mit abgesenktem w/z-Wert (SP) ist es zwingend erforderlich, den LP-Gehalt im Frischbeton auf einen Wert einzustellen, der mindestens dem LP-Gehalt des CDF-Standardbetons entspricht.

Bild 94 zeigt, dass die Absenkung des w/z-Wertes auch bei Anwendung ziegelhaltiger Zemente in CDF-Betonen B3-SP erfolgreich angewendet werden konnte. Mit ca. 1,2 kg/m² lagen die Abwitterungen des LP-Betons B3-SP-GC9 nach 28 FTW unterhalb des Bewertungskriteriums.

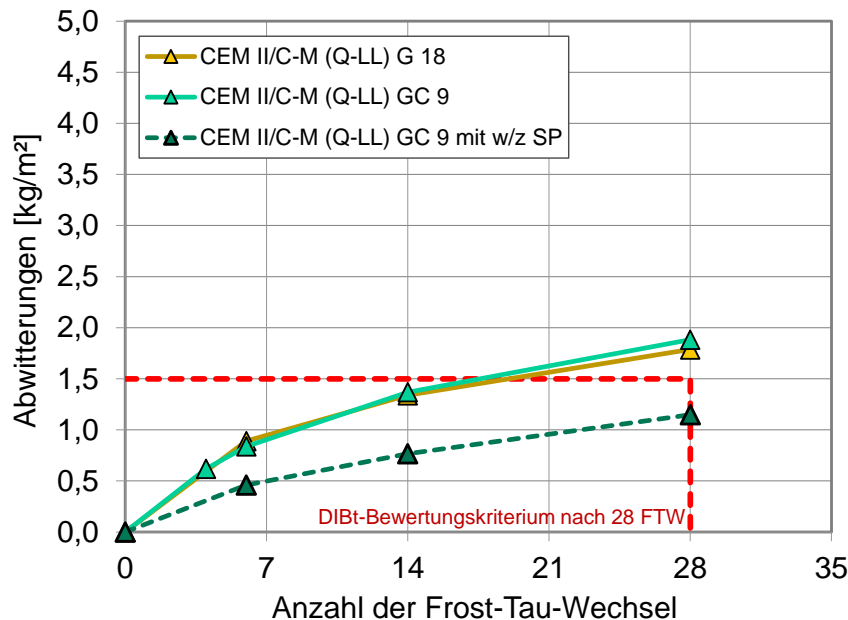


Bild 94 Untersuchungen der Luftporenbetone B3 und B3-SP im CDF-Verfahren ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$ bzw. $w/z \text{ (SP)} < 0,50$), Abwitterungen der LP-Betone in Abhängigkeit der Anzahl der Frost-Tau-Wechsel, Verwendung von ziegelhaltigen CEM II/C-M (Q-LL)-Zementen

Aus dem Vergleich zur Datenbasis in [26] aus 2019 lässt sich ableiten, dass dort nur relativ wenige klinkereffiziente Zemente mit geringst möglichem Klinkerfaktor (gemäß EN 197-5: 50 M.-% K) bei maximalem Kalksteingehalt (gemäß EN 197-5: 20 M.-% LL) hergestellt und im CDF-Verfahren mit $w/z = 0,50$ und $z = 320 \text{ kg/m}^3$ untersucht wurden. Aus [26] lässt sich hervorgehen, dass ein Beton den CDF-Test sicher bestanden hat. Nach 28 FTW wurden Abwitterungen von $1,0 \text{ kg/m}^2$ festgestellt. An zwei weiteren Betonen wurden nach 28 FTW $1,5 \text{ kg/m}^2$ bzw. $1,6 \text{ kg/m}^2$ Abwitterungen ermittelt und somit die CDF-Prüfungen nicht bestanden. Der Großteil der CEM II/C-M-Zemente, die auch im CDF-Test untersucht wurden, wies sowohl einen höheren Klinker- bzw. Hüttensandgehalt und/oder einen geringeren Kalksteingehalt auf.

Sowohl in der Datenbasis als auch in den Untersuchungen dieses Projektes konnte gezeigt werden, dass ein CDF-Test unter Verwendung eines CEM II/C-M (S-LL)-Zements der Zusammensetzung 50K 30S 20LL bestanden werden kann. In der Zwischenzeit wurden zudem acht allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen für CEM II/C-Zemente einschließlich XF4 erteilt.

Die Option einer w/z-Wert-Absenkung (z. B. für LP-Betone B3-SP) kann unter der Voraussetzung eines angemessenen LP-Gehaltes im Frischbeton das Ergebnis des CDF-Tests positiv beeinflussen und nach 28 FTW zu Abwitterungen $< 1,5 \text{ kg/m}^2$ führen. Dieser Weg wird nun auch in ersten Zulassungen mit $w/z = 0,45$ und CEM II/C besprochen.

Bild B-12 und **Bild B-13** im Anhang fassen die Ergebnisse der Abwitterungen der Luftporenbetone B3 und B3-SP nach 28 Frost-Tau-Wechseln, die Betondruckfestigkeit an B3 und B3-SP im Prüfalalter von 28 Tagen sowie die am Zement ermittelten Werte für den Wasseranspruch nach Punkte zusammen. Ein Zusammenhang zwischen den Abwitterungen und der Druckfestigkeit kann nicht hergeleitet werden. Mit steigendem Wasseranspruch der hüttensandhaltigen Zemente aus getrennter Mahlung wurden im CDF-Test am Beton zunehmende Abwitterungen $> 1,5 \text{ kg/m}^2$ ermittelt.

In Abhängigkeit der Packungsdichte der Zemente (vgl. **Bild 95**) ist der aus dem Würfelverfahren bekannte Zusammenhang erkennbar. Mit zunehmender Packungsdichte der Zemente nehmen die Abwitterungen der CDF-Betone B3 auf einem vergleichsweise hohen Niveau zu. Nach Absenkung des w/z-Wertes liegen die Abwitterungen der Betone B3-SP auf einem geringeren Niveau, zum Teil $< 1,5 \text{ kg/m}^2$, sie folgen dennoch dem o.g. Trend.

Das Bestehen des CDF-Tests ist für klinkereffiziente CEM II/C-M-Zemente unter drei Voraussetzung möglich:

- der Zement hat eine geringe Packungsdichte,
- der LP-Beton kann mit einem hinreichendem Luftporenvolumen hergestellt werden,
- für den Wasserzementwert darf ggf. eine SP-Anpassung vorgenommen werden.

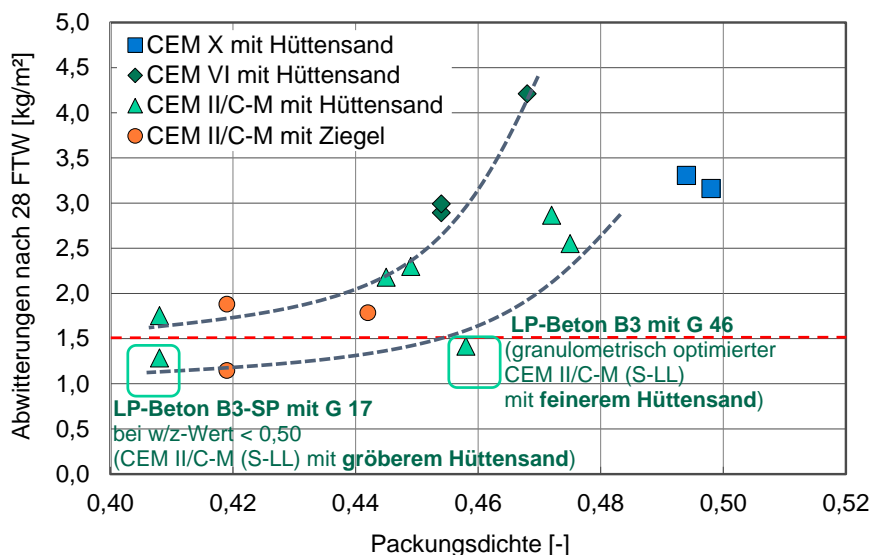


Bild 95 Untersuchungen der LP-Betone B3 und B3-SP im CDF-Verfahren ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$ bzw. w/z (SP) $< 0,50$), Darstellung der Abwitterungen der Betone nach 28 Frost-Tau-Wechseln sowie der am Zement ermittelten Stampfpackungsdichten, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen mit maximal 50 M.-% Klinker und mindestens 20 M.-% Kalkstein

18 Chlorideindringwiderstand der Betone im Migrationsschnelltest

Der Widerstand der Betone B2 gegenüber eindringenden Chloriden wurde mit Hilfe des Migrations-tests nach BAW-Merkblatt (Schnelltest) untersucht. Die Prüfkörper wurden bis zum Prüfalalter von 35 bzw. 98 Tagen wassergelagert. Der Chlorideindringwiderstand wurde vorrangig an den Betonen der CEM VI- und der CEM X-Zemente sowie an den Betonen der ziegelhaltigen Zemente untersucht.

18.1 Betondruckfestigkeit ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$)

Die folgenden Bilder sowie **Bild B-14** und **Bild B-15** im Anhang stellen die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfung der Betone B2 den Packungsdichten der Zemente, den Ergebnissen des

Wasseranspruchs der Zemente, den Druckfestigkeiten der Mörtel (Prüfalter 28d) sowie den Gesamtporositäten der Normmörtel (Prüfalter 28d) gegenüber.

Beim Vergleich konstanter Zementzusammensetzungen haben die Packungsdichte und der Wasseranspruch keinen Einfluss auf die 28d-Druckfestigkeit der Betone B2. Die Festigkeitsunterschiede von bis zu etwa 20 MPa sind auf die Unterschiede in der stofflichen Zementzusammensetzung sowie auf die Art der Hauptbestandteile zurückzuführen.

In Bezug auf die Mörtelfestigkeit sowie auf die Mörtelporosität zeigten die Festigkeiten den jeweils bekannten Zusammenhang. Mit abnehmender Gesamtporosität sowie mit zunehmender Druckfestigkeit der Mörtel unter Verwendung der CEM II/C-M- und CEM VI-Zemente (mit jeweils 20 M.-% Kalkstein) wurden steigende Betondruckfestigkeiten ermittelt. CEM X-Mörtel und CEM X-Betone ließen sich nicht zuordnen (Kalksteinsteingehalt im CEM X 30 M.-%).

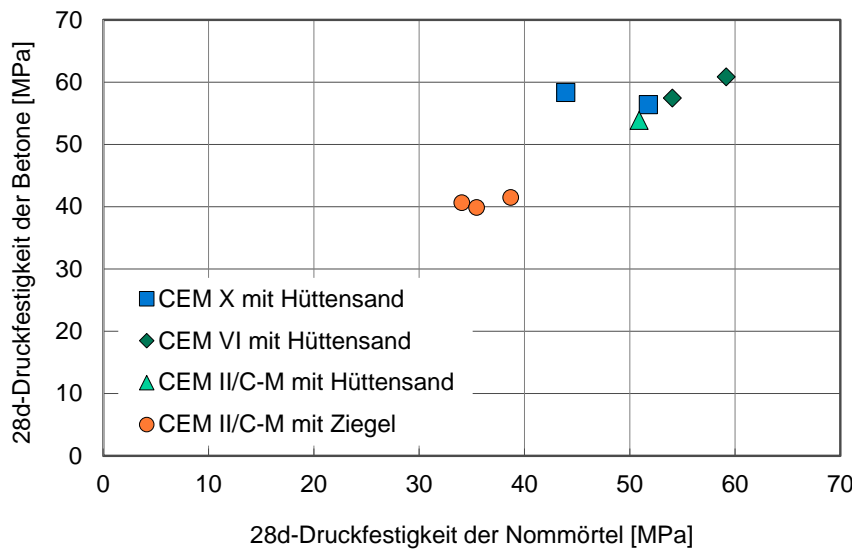


Bild 96 Druckfestigkeit der Betone B2 ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$) im Prüfmörtel von 28 Tagen in Abhängigkeit der am Mörtel bestimmten Normfestigkeit (Prüfmörtel 28 Tage), Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

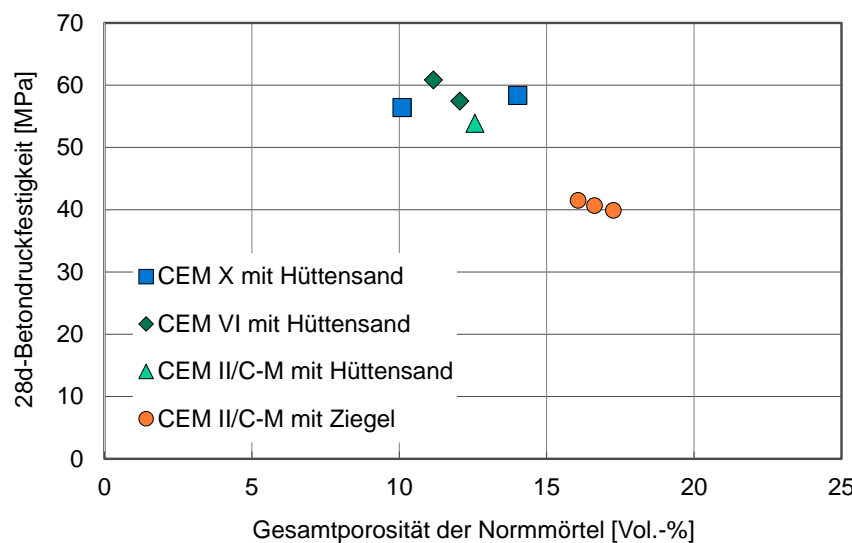


Bild 97 Druckfestigkeit der Betone B2 ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$) im Prüfmörtel von 28 Tagen in Abhängigkeit der am Mörtel bestimmten Gesamtporosität (Prüfmörtel 28 Tage), Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

18.2 Chlorideindringwiderstand: Migrationskoeffizient

Die Ergebnisse aus der Untersuchung des Chlorideindringwiderstandes der Betone B2 sind im **Bild 98** und im **Bild 99** zusammengefasst. Das in den Zulassungsverfahren des DIBt herangezogene Beurteilungskriterium für den Chloridmigrationskoeffizienten von $25 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ im Prüfalalter von 35 Tagen wurde in allen Versuchen eingehalten.

Die Betone unter Verwendung der hüttensandhaltigen und ziegelhaltigen Zemente mit 20 bzw. 30 M.-% Kalkstein wiesen im Prüfalalter von 35 Tagen mit ca. 2 bis $7 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (mit Hüttensand) bzw. mit ca. 13 bis $18 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (mit Ziegel) Werte zum Teil deutlich unterhalb des DIBt Beurteilungskriteriums für den Chloridmigrationskoeffizienten auf.

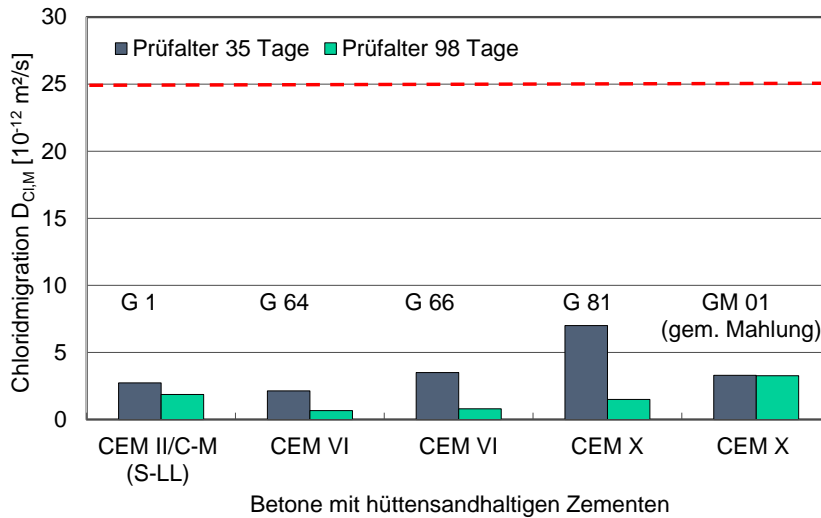


Bild 98 Chloridmigrationskoeffizienten der Betone B2 ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$) im Migrationsschnelltest, Prüfalalter 35 Tage und 98 Tage, Verwendung von hüttensandhaltigen CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen mit mindestens 20 M.-% Kalkstein

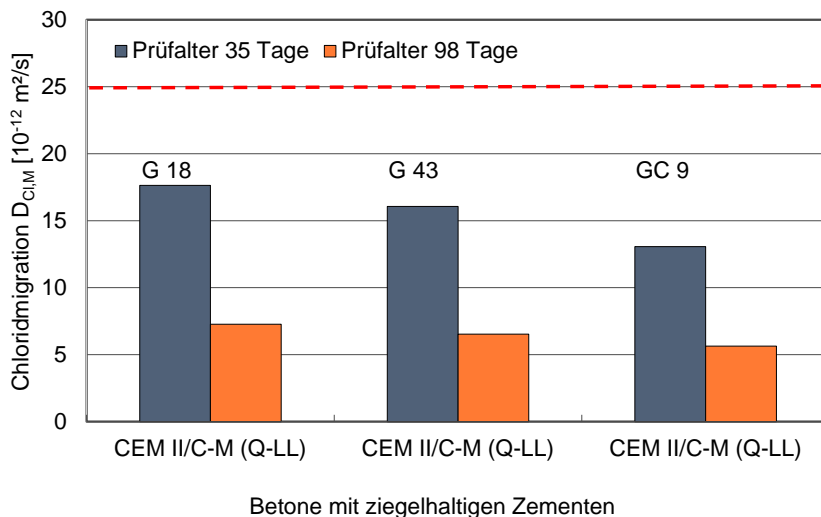


Bild 99 Chloridmigrationskoeffizienten der Betone B2 ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$) im Migrationsschnelltest, Prüfalalter 35 Tage und 98 Tage, Verwendung von ziegelhaltigen CEM II/C-M (Q-LL)-Zementen mit 20 M.-% Kalkstein

Aus **Bild 98** geht ebenfalls hervor, dass an den hüttensandhaltigen Betonen Migrationskoeffizienten ermittelt wurden, die die Anforderungen an den Chlorideindringwiderstand für Anwendungen im Wasserbau ($\leq 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ für die Exposition XS1-2, XD1-2) erfüllen. Die BAW-Anforderungen an die Expositionsklasse XS3 bzw. XD3 mit $\leq 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ wurden von den Betonen mit CEM II/C-M (S-LL) (G 1), CEM VI (G 64, G 66) sowie CEX aus gemeinsamer Mahlung (GM 01) eingehalten.

Die folgenden Bilder stellen die Chloridmigrationskoeffizienten der Betone B2 im Alter von 35 Tagen in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit, der Porenanteile $< 0,03 \mu\text{m}$ der normierten PGV am Normmörtel und der Packungsdichte der Zemente dar.

Bild 100 zeigt, dass die Betone der ziegelhaltigen Zemente deutlich geringere Druckfestigkeiten sowie höhere Migrationskoeffizienten aufweisen als die Betone der hüttensandhaltigen Zemente.

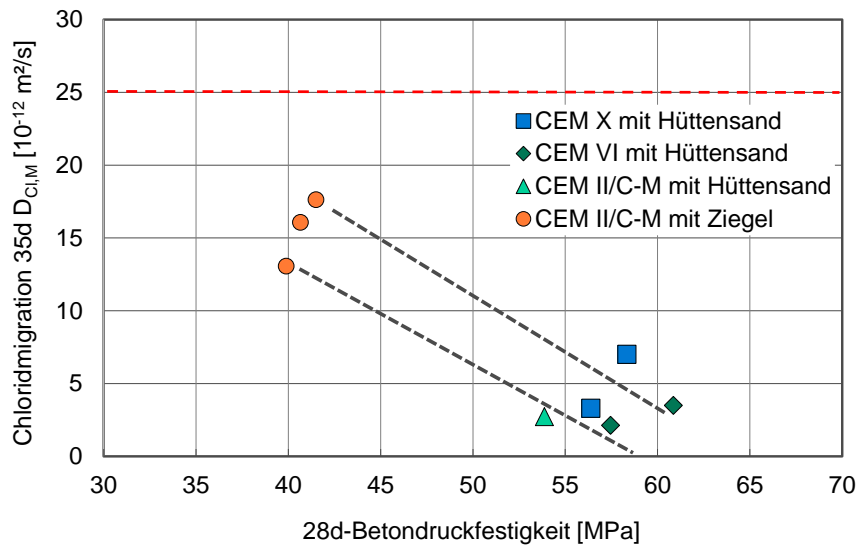


Bild 100 Chloridmigrationskoeffizienten (Migrationsschnelltest) der Betone B2 im Prüfalalter 35 Tagen in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit im Prüfalalter von 28 Tagen, Betone mit $w/z = 0,50$ und $z = 320 \text{ kg/m}^3$, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen mit mindestens 20 M.-% Kalkstein

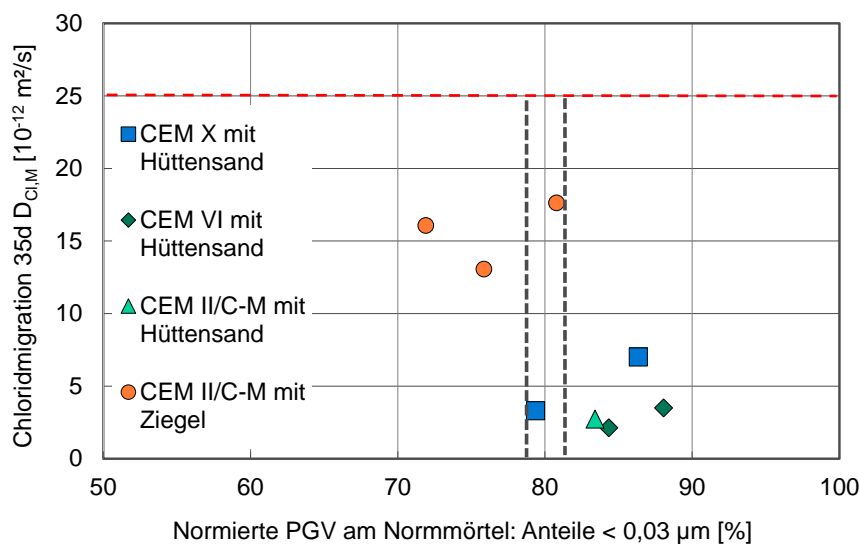


Bild 101 Chloridmigrationskoeffizienten (Migrationsschnelltest) der Betone B2 im Prüfalalter 35 Tagen in Abhängigkeit der am entsprechenden Normmörtel ermittelten Porenanteile $< 0,03 \mu\text{m}$ (bezogen auf die normierte PGV im Alter von 28 Tagen), Betone mit $w/z = 0,50$ und $z = 320 \text{ kg/m}^3$, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen mit mindestens 20 M.-% Kalkstein

Im **Bild 101** wurden die Migrationskoeffizienten der Betone und die Porenanteile der Normmörtel (normierte PGV: Poren < 0,03 μm) eingetragen. Aus dem Bild geht hervor, dass bei Verwendung von Zementen, die im Mörtel mehr als 81% Poren < 0,03 μm (s. Markierung) aufweisen, an den entsprechenden Betonen Migrationskoeffizienten < $10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ messbar waren. Bei weniger als 79% Poren < 0,03 μm (s. Markierung) wurden zum Teil höhere Koeffizienten ermittelt.

Aus **Bild 102** geht hervor, dass mit zunehmender Packungsdichte der hüttensandhaltigen Zemente keine Effekte auf den Chlorideindringwiderstand erfasst wurden. Wurde jedoch die Packungsdichte auf Werte < 0,445 verringert, indem ein CEM II/C-M-Zement anstelle des Hüttensandes nunmehr mit Ziegelmehl hergestellt wurde, so erhöhten sich die Chloridmigrationskoeffizienten.

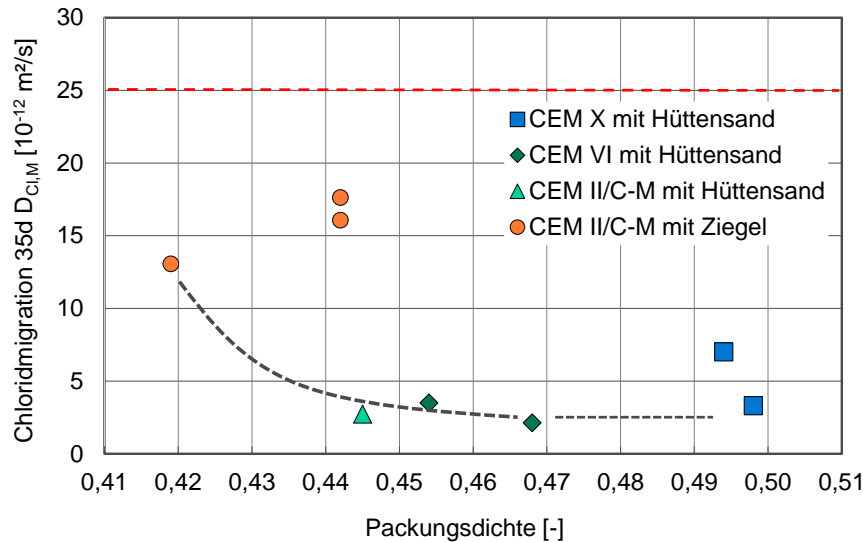


Bild 102 Chloridmigrationskoeffizienten (Migrationsschnelltest) der Betone B2 im Prüfalalter 35 Tagen in Abhängigkeit der am Zement ermittelten Stampfpackungsdichten, Betone mit $w/z = 0,50$ und $z = 320 \text{ kg/m}^3$, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen mit mindestens 20 M.-% Kalkstein

19 Carbonatisierungswiderstand an Feinbetonen gemäß DIBt-Prüfplan

Das Carbonatisierungsverhalten wurde in Anlehnung an die Zulassungsversuche des DIBt ermittelt. Die Versuche wurden an Feinbetonprismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm mit Rheinkies und Rheinsand nach DIN EN 12620 aus Beständen des VDZ der Kornzusammensetzung A8/B8 durchgeführt. Folgende Mischungszusammensetzung des Feinbetons wurde verwendet:

Zement:	450 g
deionisiertes Wasser:	225 g
Wasserzementwert w/z :	0,50
Gesteinskörnung:	1350 g

Die Feinbetone wurden sieben Tage bzw. 28 Tage vorgelagert (VL 7d, VL 28d).

19.1 Druckfestigkeit der Feinbetone ($w/z = 0,50$)

Bild 103 sowie **Bild B-16** und **Bild B-17** im Anhang stellen die Druckfestigkeiten der Feinbetone im Alter von 28 Tagen nach einer Vorlagerung von 28 Tagen in Abhängigkeit der Packungsdichte des Zements, des Wasseranspruchs des Zements sowie der Druckfestigkeit der Normmörtel (Prüfalter 28d) dar.

Beim Vergleich konstanter stofflicher Zementzusammensetzungen hat die Packungsdichte keinen systematischen Einfluss auf die Feinbetonfestigkeit. Die Festigkeitsunterschiede sind auf die Unterschiede in der stofflichen Zementzusammensetzung sowie auf die Art der Hauptbestandteile zurückzuführen. In Abhängigkeit des Wasseranspruchs (Punkte) kann in einigen wenigen Ergebnissen an hüttensandhaltigen Zementen festgestellt werden, dass mit zunehmendem Wasseranspruch eine geringfügige Abnahme der Feinbetonfestigkeit einhergehen kann.

In Bezug auf die Normmörtelfestigkeit der CEM II/C-M- und CEM VI-Zemente mit jeweils 20 M.-% Kalkstein zeigten die Festigkeiten der Feinbetone den jeweils bekannten Zusammenhang. Die CEM X-Mörtel und CEM X-Feinbetone ließen sich nicht zuordnen (Kalksteinsteingehalt im CEM X 30 M.-%).

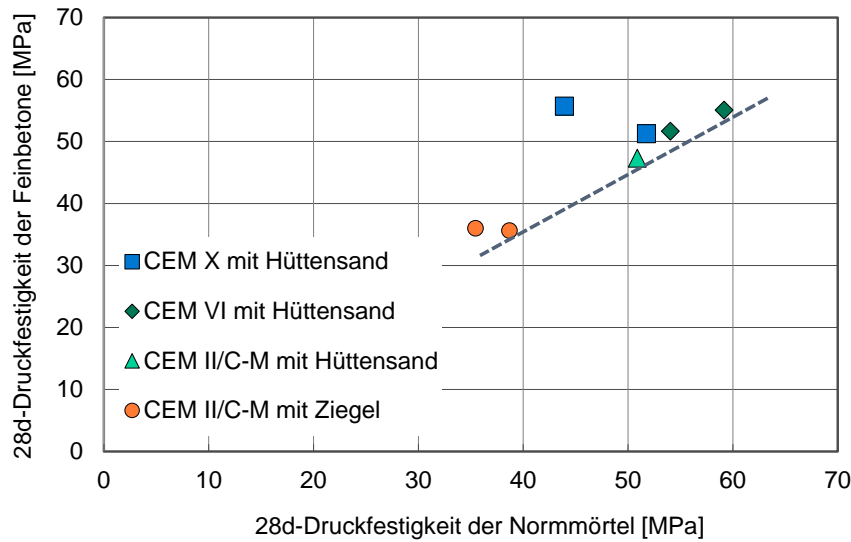


Bild 103 Druckfestigkeit der Feinbetone FB ($w/z = 0,50$, Vorlagerung 28 Tage) im Prüfalalter von 28 Tagen in Abhängigkeit der Normfestigkeit der Zemente (Prüfalalter 28 Tage), Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

19.2 Carbonatisierungswiderstand: Carbonatisierungstiefe

In Bezug auf die Druckfestigkeit der Feinbetone im Prüfalalter von sieben Tagen bzw. 28 Tagen (jeweils nach Vorlagerung) wurden die Carbonatisierungstiefen nach 140 Tagen Hauptlagerung (HL) ausgewertet und anhand des DIBt-Bewertungshintergrundes eingeordnet.

Aus dem **Bild 104** gehen die Carbonatisierungstiefen der Feinbetone nach einer Vorlagerung von sieben Tagen sowie im Prüfalalter von 140 Tagen bei Hauptlagerung hervor. Alle Feinbetone liegen im Bereich des DIBt-Bewertungshintergrundes.

Die zeitliche Veränderung der Carbonatisierungstiefe im **Bild 105** zeigt, dass die Carbonatisierung der ziegelhaltigen Feinbetone GC 9 und G 18 bei einer Vorlagerung von sieben Tagen schneller verläuft als bei den hüttensandhaltigen Feinbetonen. Die ziegelhaltigen Feinbetone weisen im Prüfalalter von einem Jahr Carbonatisierungstiefen zwischen 5 mm und 8 mm auf.

(Anmerkung: Fehlende Untersuchungsergebnisse im Prüfalalter von einem Jahr werden zu gegebener Zeit nachgetragen.)

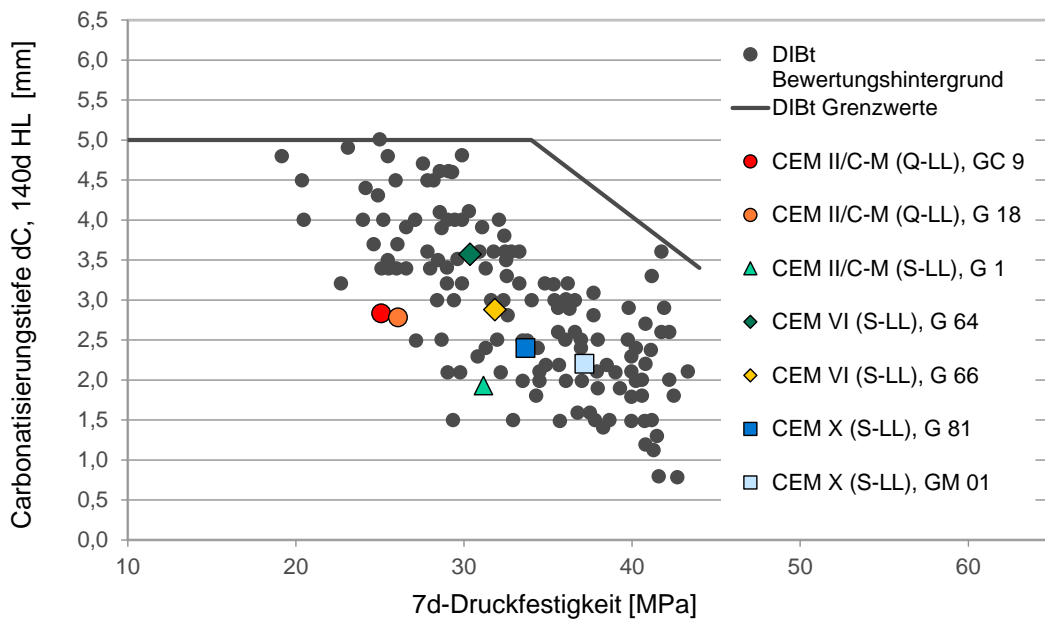


Bild 104 Carbonatisierungstiefe der Feinbetone FB ($w/z = 0,50$, Vorlagerung sieben Tage) nach einer Hauptlagerung von 140 Tagen in Abhängigkeit der Druckfestigkeit der Feinbetone (Prüfalter nach einer Vorlagerung von sieben Tagen), Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

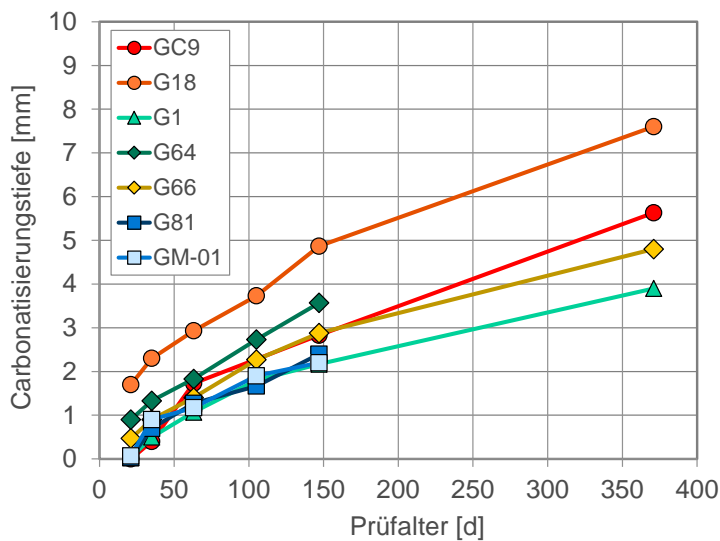


Bild 105 Carbonatisierungstiefe der Feinbetone FB ($w/z = 0,50$, Vorlagerung sieben Tage) in Abhängigkeit vom Prüfalter der Feinbetone, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

Aus **Bild 106** gehen die Carbonatisierungstiefen der Feinbetone nach einer Vorlagerung von 28 Tagen sowie im Prüfalter von 140 Tagen bei Hauptlagerung hervor. Fast alle Feinbetone liegen im Bereich des DIBt-Bewertungshintergrundes. Nach 28 Tagen Vorlagerung wurde mit dem Feinbeton unter Verwendung des CEM VI-Zements G 66 eine Druckfestigkeit außerhalb des DIBt-Grenzwertes ermittelt, während die Carbonatisierungstiefe vergleichbare Werte zeigte.

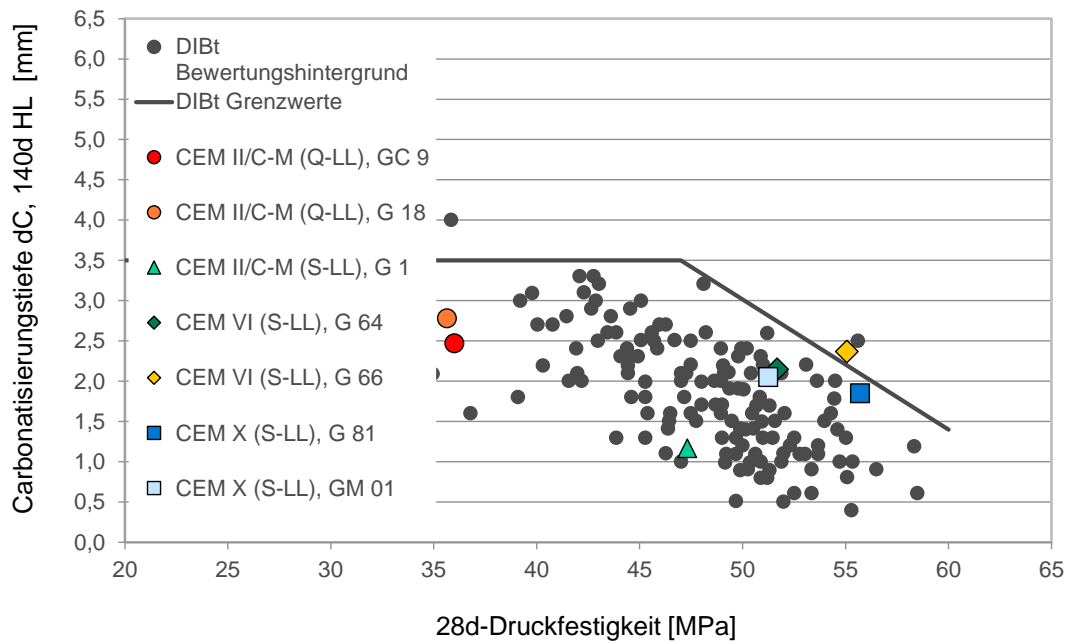


Bild 106 Carbonatisierungstiefe der Feinbetone FB ($w/z = 0,50$, Vorlagerung 28 Tage) nach einer Hauptlagerung von 140 Tagen in Abhängigkeit der Druckfestigkeit der Feinbetone (Prüfalter nach einer Vorlagerung von 28 Tagen), Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

Die zeitliche Veränderung der Carbonatisierungstiefe im folgenden Bild zeigt, dass die Carbonatisierung der ziegelhaltigen Feinbetone GC 9 und G 18 sowie des CEM VI-Feinbetons bei einer Vorlagerung von 28 Tagen etwas schneller verläuft als bei dem Feinbeton mit CEM II/C-M (S-LL) G1. Im Prüfalter von einem Jahr wurden an den Feinbetonen Carbonatisierungstiefen zwischen 2 mm und 5 mm festgestellt.

(Anmerkung: Fehlende Untersuchungsergebnisse im Prüfalter von einem Jahr werden zu gegebener Zeit nachgetragen.)

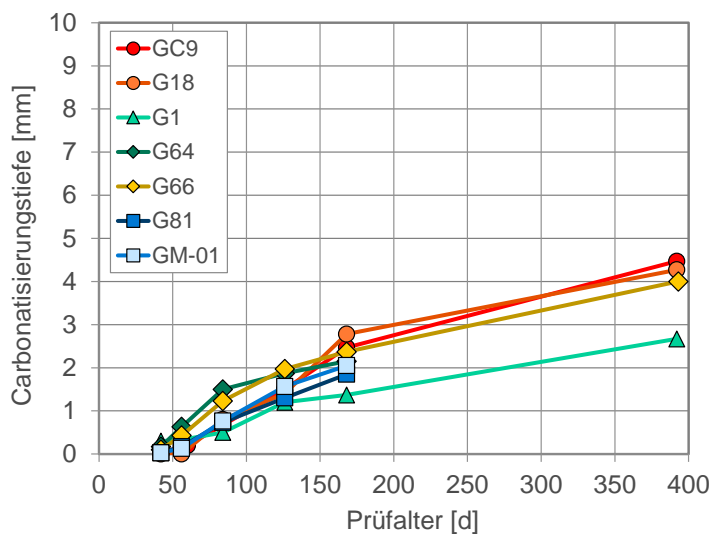


Bild 107 Carbonatisierungstiefe der Feinbetone FB ($w/z = 0,50$, Vorlagerung 28 Tage) in Abhängigkeit vom Prüfalter der Feinbetone, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

20 Treibhauspotenziale granulometrisch optimierter, klinkereffizienter Zemente

Seit dem 10. Juli 2023 liegt eine verifizierte EPD für einen Zement CEM II/C-M (S-LL) mit 50 M% Klinker, 30% Hüttensand und 20% Kalkstein vor. Diese Umwelt-Produktdeklaration nach ISO 14025 und EN 15804+A2 wurde vom Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) herausgegeben. Deklarationsinhaber ist der Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Deklarationsnummer EPD-VDZ-20230234-IAG1-DE). Grundlage der Berechnungen waren Daten von VDZ-Mitgliedsunternehmen aus dem Jahr 2020.

Basierend auf den in der o.g. EPD vorliegenden Ergebnissen und Erkenntnissen wurden nunmehr die Treibhauspotenziale folgender klinkereffizienter Versuchszemente errechnet und gegenübergestellt:

Tabelle 19 Zusammensetzung klinkereffizienter Versuchszemente (zur Berechnung der Treibhauspotenziale)

Zement	Klinker	Hüttensand Ziegel	Kalkstein	Anmerkungen Besonderheiten
CEM II/C-M (S-LL) z. B. G 46	50 M.-% K	30 M.-% S	20 M.-% LL	Basis-Zement
CEM II/C-M (Q-LL) z. B. GC 9, G 18	50 M.-% K	30 M.-% Q	20 M.-% LL	kalksteinhaltiger R-Zement mit leicht mahlbarem Recyclingziegel aus der Kreislaufwirtschaft als Hauptbestandteil “Q” (vgl. DIN 197-1 sowie Abschnitt 9 dieses Berichtes, in DIBt-Zulassungsverfahren sind neben dem Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand der Betone auch der Chlorideindringwiderstand und der Carbonatisierungswiderstand nachzuweisen)
CEM VI (S-LL) z. B. G 66	35 M.-% K	45 M.-% S	20 M.-% LL	kalksteinhaltiger Zement mit geringst möglichem Klinkerfaktor (vgl. DIN 197-5), in DIBt-Zulassungsverfahren sind neben dem Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand der Betone auch der Chlorideindringwiderstand und der Carbonatisierungswiderstand nachzuweisen
CEM X (S-LL) z. B. GM 01	40 M.-% K	30 M.-% S	30 M.-% LL	gemeinsames Mahlen der Hauptbestandteile in einem kontinuierlichen, energieeffizienten Mahlverfahren (Vertikal-Wälzmühle), Mahlgut in „Grenzzusammensetzung“ mit 30 M.-% leicht mahlbarem Kalkstein, maximaler Hüttensandgehalt 30 M.-% , Ausloten einer w/z-Wert-Absenkung im Beton
CEM X (S-LL) z. B. G 81	40 M.-% K	30 M.-% S	30 M.-% LL	getrenntes Mahlen und anschließendes Mischen der Hauptbestandteile im Labor, 30 M.-% Kalkstein wurden in Anlehnung an die gemeinsame Mahlung mit hoher Mahlfeinheit eingesetzt, maximaler Hüttensandgehalt: 30 M.-% , Ausloten einer w/z-Wert-Absenkung im Beton

Die Ökobilanzierungen wurden anhand der Regeln der Norm

- EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021 (Sustainability of construction works - Environmental product declarations - Core rules for the product category of construction products), in Zusammenhang mit CEN/TR 16970:2016 (Sustainability of construction works - Guidance for the implementation of EN 15804)

sowie der Norm

- EN 16908:2017+A1:2022 - Cement and building lime - Environmental product declarations - Product category rules complementary to EN 15804

durchgeführt.

Aus den ökobilanziellen Berechnungen sind folgende Ergebnisse (vgl. **Tabelle 20**) hervorgegangen:

Tabelle 20 Ergebnisse der ökobilanziellen Berechnungen an klinkereffizienten Versuchszementen

Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	CEM II/C-M (S-LL) Basis-Zement	CEM II/C-M (Q-LL) mit RC-Ziegel aus der Kreislaufwirtschaft	CEM VI (S-LL) mit Klinker- faktor 35%	CEM X (S-LL) mit 30% Kalkstein, gemeinsame Mahlung	CEM X (S-LL) mit 30 M.-% Kalk- stein, getrennte Mahlung
GWP total	400 kg CO₂ -Äq/t Zement	349 kg CO₂ -Äq/t Zement	322 kg CO₂ -Äq/t Zement	322 kg CO₂ -Äq/t Zement	332 kg CO₂ -Äq/t Zement
GWP fossil ¹⁾	400 kg CO ₂ -Äq/t Zement	349 kg CO ₂ -Äq/t Zement	322 kg CO ₂ -Äq/t Zement	322 kg CO ₂ -Äq/t Zement	332 kg CO ₂ -Äq/t Zement
GWP biogen ¹⁾	6,52E-1 kg CO ₂ -Äq/t Zement	4,61E-1 kg CO ₂ -Äq/t Zement	6,13E-1 kg CO ₂ -Äq/t Zement	4,47E-1 kg CO ₂ -Äq/t Zement	5,76E-1 kg CO ₂ -Äq/t Zement
GWP luluc	3,90E-2 kg CO ₂ -Äq/t Zement	2,99E-2 kg CO ₂ -Äq/t Zement	3,90E-2 kg CO ₂ -Äq/t Zement	3,29E-2 kg CO ₂ -Äq/t Zement	3,62E-2 kg CO ₂ -Äq/t Zement

¹⁾ Gem. dem "polluter pays principle" (EN 15804) Nettowerte, die die Emissionen aus der Verbrennung von Abfällen nicht mit einschließen.

Das umweltrelevante Projektziel wurde erreicht. Als Treibhauspotenziale der klinkereffizienten Zemente (s. **Tabelle 20**) wurden durchweg Werte ≤ 400 kg CO₂ -Äq/t (zzgl. Verbrennung von Sekundärbrennstoffen) ermittelt. Das deutlichste Minderungspotenzial hat sich in der Herstellung des CEM VI mit einem Klinkerfaktor von 35% sowie in der gemeinsamen Mahlung eines CEM X mit 30% Kalkstein ergeben.

21 Aspekte der Klinker-, Ressourcen- und Energieeffizienz, der Dauerhaftigkeit und der Nachhaltigkeit im Überblick

Das Erreichen eines deutlich verringerten Treibhauspotenzials in der Herstellung von Zement ist vorrangig an die Verringerung des Klinkerfaktors geknüpft. Einer signifikanten Veränderung des Klinkerfaktors folgt der Einsatz anderer Zementhauptbestandteile oder alternativer Bestandteile z. B. aus der Kreislaufwirtschaft – jeweils in entsprechenden Anteilen sowie bei entsprechender Reaktivität. Es handelt sich um eine Aufgabe, bei der in der granulometrischen Optimierung der Versuchszemente eine gleichzeitige bzw. gleichmäßige Bezugnahme aller Aspekte (Klinker-, Ressourcen-, Energieeffizienz, Dauerhaftigkeit, Nachhaltigkeit) nicht möglich war. So wurden für jede Zementart - neben dem **Hauptziel, den Klinkerfaktor im Zement auf 50%, 40% oder 35% zu senken** – bis zu zwei weitere Schwerpunkte betrachtet.

Tabelle 21

CEM II/C-M (S-LL)-Zemente mit Hüttensand – Schwerpunkt: Dauerhaftigkeit

Tabelle 22

CEM II/C-M (Q-LL)-Zemente mit RC-Ziegel – Schwerpunkt: Ressourcen- und Energieeffizienz

Tabelle 23

CEM VI (S-LL)-Zemente mit 35 M.-% Klinker – Schwerpunkt: Klinkereffizienz und Nachhaltigkeit

Tabelle 24

CEM X (S-LL)-Zement mit 30 M.-% Kalkstein – Schwerpunkt: Energieeffizienz u. Nachhaltigkeit

Tabelle 25

CEM X (S-LL)-Zement – Schwerpunkt: Klinker- und Ressourceneffizienz

Stoffliche und granulometrische Zusammensetzung neuer klinkerreduzierter Zemente können Auswirkungen auf die Anwendung dieser Zemente im Beton haben. Je nach Anwendungsgebiet bilden dauerhaftigkeitsrelevante Betoneigenschaften eine wichtige Säule in ganzheitlichen Nachhaltigkeitsbetrachtungen an zementgebundenen Baustoffsystemen. Ein CO₂-reduzierter Beton ist „nachhaltig“, wenn er in der entsprechenden Anwendung „dauerhaft“ ist. Während in Innenbauteilen eine Fokussierung auf die Verarbeitungs- und die mechanischen Eigenschaften ausreichend ist, kommt im Außenbauteil bei metallischer Bewehrung mindestens die Carbonatisierung hinzu.

Eine teilweise Substitution des im Zement enthaltenen Hauptbestandteils Klinker durch andere Hauptbestandteile (z. B. Kalkstein) oder alternative Bestandteile (z. B. RC-Ziegel) kann je nach Substitutionsgrad zu einer deutlichen Verringerung von Prozessemissionen beitragen. Durch die Verringerung des Klinkeranteils wurden jedoch in einigen Fällen die geforderten technischen Eigenschaften der klinkereffizienten Zemente und der mit ihnen hergestellten Betone (z. B. Dauerhaftigkeit) ungünstig beeinflusst. Granulometrische Optimierungsmaßnahmen können dazu beitragen, derartige negative Effekte zum Teil zu kompensieren.

Die granulometrische Optimierung kann – unter der Voraussetzung eines festgelegten, geringen Klinkerfaktors sowie einer festgelegten stofflichen Zementzusammensetzung - an Grenzen stoßen. Einerseits sind die betrieblichen bzw. verfahrenstechnischen Voraussetzungen eines Zementwerks (z. B. in Mahlanlagen) nicht immer vollständig geeignet, jede Korngrößenverteilung (KGV) an jedem Zementbestandteil bzw. an jedem Zement einzustellen. Zudem müssen der dafür erforderliche Energieaufwand und die daraus folgende Durchsatzleistung in einem angemessenen Verhältnis zur Wirtschaftlichkeit der Zementproduktion stehen. Neben dem veränderten Klinkerfaktor können auch veränderte Anteile der anderen Bestandteile (z. B. aufgrund von wechselnden Verfügbarkeiten) oder veränderte Mahlbarkeiten (z. B. aufgrund variierender Zusammensetzungen von Ausgangsstoffen) Auswirkungen auf die o. g. produktionsbedingten Parameter haben.

Konnten klinkerreduzierte Zemente trotz umfänglicher granulometrischer Optimierung die geforderten technischen Eigenschaften in den mit ihnen hergestellten Betonen (z. B. im LP-Beton, im CDF-Test) nicht oder nur teilweise erreichen, wurde optional eine w/z-Wert-Anpassung im Beton in Ansatz gebracht. Das Verfahren hatte das Ziel, in zulassungsrelevanten Dauerhaftigkeitsprüfungen die technische Eignung dieser CO₂-reduzierten Betone nachzuweisen. Dabei wurde weder der Zementgehalt der Betone, noch der Klinkerfaktor der Zemente erhöht.

Die folgenden Tabellen fassen die wesentlichen Aspekte zusammen, die in die Nachhaltigkeitsbetrachtungen der klinkereffizienten Zemente und ihrer Anwendung im Beton einfließen können. Jede Tabelle beschreibt Zemente konstanter stofflicher Zusammensetzung sowie variabler granulometrischer Zusammensetzung. In der Spalte „Dauerhaftigkeit der Betone und Feinbetone“ weisen folgende Farbmarkierungen auf die Ergebnisse der zulassungsrelevanten Prüfungen (vgl. Kriterien des DIBt und der BAW) hin, die sich je nach Zementgranulometrie unterscheiden können:

- grün:** Kriterien unter Standard-Prüfbedingungen eingehalten,
- gelb:** Kriterien unter veränderten Prüfbedingungen (z. B. w/z-Wert-Absenkung) eingehalten,
- orange:** Kriterien unter Standard-Prüfbedingungen nicht eingehalten,
- blau:** Versuche an optimierten Zementen oder unter veränderten Prüfbedingungen stehen noch aus.

Erläuterungen am Beispiel Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand:

Im Projekt wurden Zemente konstanter stofflicher Zusammensetzung untersucht, die die ...

D	DIBt-Kriterien für die Expositionsclassen XF1, XF3 oder XF4 einhalten
S	Kriterien für Abwitterungen im Würfel- oder CDF-Verfahren mit w/z (SP) einhalten
S	Kriterien für Abwitterungen wurden auch mit w/z (SP) nicht einhalten
D	DIBt-Kriterien nicht einhalten

Erläuterungen am Beispiel Chlorideindringwiderstand:

Im Projekt wurden Zemente konstanter stofflicher Zusammensetzung untersucht, die die ...

D	DIBt-Kriterien mit $< 25 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ im Prüfalter von 35 Tagen einhalten
B	BAW-Kriterien für XS3, XD3 mit $< 10 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ einhalten
B	BAW-Kriterien für XS3, XD3 mit $< 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ einhalten

Tabelle 21 CEM II/C-M (S-LL)-Zemente mit Hüttensand – Schwerpunkt: **Dauerhaftigkeit**

Zement (Beispiele)	Klinkerfaktor, Substitution	Zusammensetzung	Energieaufwand und Verfügbarkeit	Natürliche und alternative Ressourcen	Dauerhaftigkeit der Betone und Feinbetone	Treibhauspotenziale (Einspar- und Verbesserungspotenziale)	
CEM II/C-M (S-LL) z. B. G 46 (G 1, G 17)	90	50 M.-% Klinker			Frostwiderstand Würfelverfahren XF1, XF3	D	
	80				Frost-Tausalz-Widerstand XF4	D	
	70	30 M.-% Hüttensand			CDF mit w/z (SP)	S	
	60	20 M.-% Kalkstein			Chlorideindringwiderstand DIBt; BAW: XS3, XD3	D	
	50				Carbonatisierungswiderstand DIBt	D	
40	granulometrisch optimiert	getrennte Mahlung, Hüttensand ist schwerer mahlbar als Klinker, Hüttensandverfügbarkeit nimmt ab, Qualität verändert sich aufgrund neuer Klimatechnologien	Potenziale der Kreislaufwirtschaft sind ausbaufähig (z. B. natürlichen Kalkstein „LL“ durch „F“ aus dem RC ersetzen)	- ggf. Klinker nicht so fein/eng aufmahlen (Energieeffizienz), - ggf. den w/z-Wert des Betons auf SP absenken, - ggf. den Klinkerfaktor weiter auf < 50% senken (Nachhaltigkeit)			

Tabelle 22 CEM II/C-M (Q-LL)-Zemente mit RC-Ziegel – Schwerpunkt: Ressourcen- und Energieeffizienz

Zement (Beispiele)	Klinkerfaktor, Substitution	Zusammensetzung	Energieaufwand und Verfügbarkeit	Natürliche und alternative Ressourcen	Dauerhaftigkeit der Betone und Feinbetone	Treibhauspotenziale (Einspar- und Verbesserungspotenziale)	
CEM II/C-M (Q-LL) z. B. GC 9 (G 18)	90	50 M.-% Klinker	getrennte Mahlung, Ziegel ist leichter mahlbar als Klinker (ähnlich Kalkstein), Verfügbarkeit von reaktivem Recyclingziegel ist begrenzt, puzzolanische Reaktivität der RC-Ziegel kann schwanken	Potenziale der Kreislaufwirtschaft wurden voll genutzt (Schleifstaub sieben und Rückstand selektiv mahlen ist energetisch noch günstiger und aktiviert die Oberflächen)	Frostwiderstand Wüfelverfahren	S	GWP 349 kg CO ₂ -Äq. - ggf. Klinker feiner/enger aufmahlen, um die Festigkeit/ Dauerhaftigkeit zu steigern, - ggf. den w/z-Wert des Betons auf SP absenken
	80				30 M.-% Ziegelschleifstaub	XF1 mit w/z (SP)	
	70	Frost-Tausalz-Widerstand				S	
	60	CDF mit w/z (SP)				D	
	50	20 M.-% Kalkstein			K + LL granulometrisch optimiert	Chlorideindringwiderstand DIBt	
40	Carbonatisierungswiderstand DIBt		D				

Tabelle 23 CEM VI (S-LL)-Zemente mit 35 M.-% Klinker – Schwerpunkt: Klinkereffizienz und Nachhaltigkeit

Zement (Beispiele)	Klinkerfaktor, Substitution	Zusammensetzung	Energieaufwand und Verfügbarkeit	Natürliche und alternative Ressourcen	Dauerhaftigkeit der Betone und Feinbetone	Treibhauspotenziale (Einspar- und Verbesserungspotenziale)			
CEM VI (S-LL) z. B. G 66 (G 64)	95	35 M.-% Klinker	getrennte Mahlung, höherer Anteil an schwerer mahlbarem, Hüttensand (vgl. CEM II/C-M), Hüttensandverfügbarkeit nimmt ab, Qualität verändert sich aufgrund neuer Klimatechnologien	Potenziale der Kreislaufwirtschaft sind ausbaufähig (z. B. natürlichen Kalkstein „LL“ durch „F“ aus dem Beton-RC oder Hüttensand „S“ teilweise durch puzzolanisch reaktiven Ziegelbruch „Q“ ersetzen)	Frostwiderstand Wüfelverfahren XF1, XF3	D	GWP 322 kg CO ₂ -Äq. - ggf. den w/z-Wert des Betons auf SP oder weiter absenken, - ggf. neben LP-Mittel auch verflüssigende Zusatzmittel im CDF verwenden, - ggf. Kalksteinanteil erhöhen (-> CEM X, Energieeffizienz)		
	85				45 M.-% Hüttensand	Frost-Tausalz-Widerstand, CDF ggf. mit w/z (SP) + Mindest-LP *		D	
	75	20 M.-% Kalkstein				granulometrisch optimiert		Chlorideindringwiderstand DIBt; BAW: XS3, XD3	B
	65							Carbonatisierungswiderstand DIBt	D
	55								

* abschließende Ergebnisse folgen

Tabelle 24 CEM X (S-LL)-Zement mit 30 M.-% Kalkstein – Schwerpunkt: **Energieeffizienz u. Nachhaltigkeit**

Zement (Beispiele)	Klinkerfaktor, Substitution	Zusammensetzung	Energieaufwand und Verfügbarkeit	Natürliche und alternative Ressourcen	Dauerhaftigkeit der Betone und Feinbetone	Treibhauspotenziale (Einspar- und Verbesserungspotenziale)	
CEM X (S-LL) z. B. GM 01 (GM 03)	90	40 M.-% Klinker	gemeinsame Mahlung auf der VRM bei hohem Umlauf, deutlich geringerer Arbeitsbedarf im Vgl. zur getrennten Mahlung, mehr leicht mahlbarer Kalkstein + weniger Hütten sand im Vgl. zum CEM VI	Potenziale der Kreislaufwirtschaft sind ausbaufähig (z. B. natürlichen Kalkstein „LL“ durch „F“ aus dem Beton-RC ersetzen oder z. B. Klinker, Hütten sand und Betonbruch gemeinsam mahlen)	Frostwiderstand Wüfelverfahren	D	- ggf. den w/z-Wert des Betons auf SP oder weiter absenken, - ggf. neben LP-Mittel auch verflüssigende Zusatzmittel im CDF verwenden, - ggf. Umlaufzahl und Feinheit reduzieren
	80				30 M.-% Hütten sand	XF1 mit w/z (SP) *	
	70	30 M.-% Kalkstein				Frost-Tausalz-Widerstand, CDF ggf. mit w/z (SP) + Mindest-LP *	
	60				Chlorideindringwiderstand DIBt;	B	
50			Carbonatisierungswiderstand DIBt	B			
40					D		
30							
20							

* abschließende Ergebnisse folgen

Tabelle 25 CEM X (S-LL)-Zement – Schwerpunkt: **Klinker- und Ressourceneffizienz**

Zement (Beispiele)	Klinkerfaktor, Substitution	Zusammensetzung	Energieaufwand und Verfügbarkeit	Natürliche und alternative Ressourcen	Dauerhaftigkeit der Betone und Feinbetone	Treibhauspotenziale (Einspar- und Verbesserungspotenziale)	
CEM X (S-LL) z. B. G 81 (vgl. GM 01) z. B. G 83	90	40 M.-% bzw. 35 M.-% Klinker	getrennte Mahlung, mehr leicht mahlbarer Kalkstein + weniger Hütten sand im Vgl. zum CEM VI, im Vgl. zur gemeinsamen Mahlung sind die Bestandteile granulometrisch optimierbar	Potenziale der Kreislaufwirtschaft sind ausbaufähig (z. B. natürlichen Kalkstein „LL“ durch „F“ aus dem Beton-RC ersetzen)	Frostwiderstand Wüfelverfahren G 81: XF1, XF3 G 83: XF1 mit w/z (SP)	D	- ggf. den w/z-Wert des Betons auf SP oder weiter absenken, - ggf. neben LP-Mittel auch verflüssigende Zusatzmittel im CDF verwenden
	80				30 M.-% Hütten sand	Frost-Tausalz-Widerstand CDF ggf. mit w/z (SP) + Mindest-LP *	
	70	30 M.-% Kalkstein				Chlorideindringwiderstand z.B. G 81: DIBt; BAW: XS1-2, XD1-2	
	60						
50					D		
40							
30							
20							

* abschließende Ergebnisse folgen

22 Zusammenfassung

Die VDZ Technology gGmbH und das F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde haben klinkereffiziente Zemente unter Verwendung von Kalkstein in Kombination mit Hüttensand hergestellt und ihre Eigenschaften ermittelt. Der Klinkerfaktor lag bei 50% bzw. bei 35%. Weiterhin kam ziegelreiches Recyclingmaterial aus der Planziegelproduktion als alternativer, puzzolanischer Zementbestandteil zur Anwendung. Einige Zemente wiesen bei einem Kalksteinanteil von 30 M.-% und einem Klinkeranteil von 40 M.-% Zusammensetzungen außerhalb der Zementnorm auf (sog. CEM X (S-LL)-Zemente). Durch die Verwendung eines solchen Zementes verringert sich das Treibhauspotential eines entsprechenden durchschnittlichen Betons vergleichbarer Festigkeit bzw. Dauerhaftigkeit um etwa 35 bzw. 25 %.

In dem von der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) geförderten Projekt wurden die granulometrischen Eigenschaften der Zemente und ihre Effekte auf dauerhaftigkeitsrelevante Betoneigenschaften untersucht. Darüber hinaus wurde untersucht, wie granulometrisch optimierte Zemente eigenschafts- und anwendungsgerecht geprüft werden können.

Die aus [2] und [27] bekannten Ergebnisse an CEM II/B-M-Zementen mit 65 M.-% Klinker sollten nunmehr an CEM II/C-M-Zementen mit 50 M.-% Klinker überprüft werden. Insbesondere Zemente mit geringer Packungsdichte hatten in [2] die Kriterien relevanter Zulassungsprüfungen am Beton eingehalten. Es wurde nunmehr untersucht, ob und wie klinkereffiziente Zemente mit möglichst geringer Packungsdichte sowie die mit ihnen hergestellten Mörtel und Betone die in Zulassungsverfahren des DIBt geforderten technischen Eigenschaften (z. B. an die Dauerhaftigkeit) erreichen können.

Die klinkereffizienten Zemente bzw. ihre Hauptbestandteile wurden auf vergleichsweise hohe Mahlfeinheiten bzw. auf enge Korngrößenverteilungen (KGV) mit entsprechend großer Steigung gebracht. Damit verbunden war die Erwartung, dass dies zum Erreichen zulassungsrelevanter Dauerhaftigkeitseigenschaften beiträgt. Beide granulometrischen Parameter beeinflussen die Packungsdichte der Zemente und ihren Wasseranspruch. Je nach granulometrischer Zementzusammensetzung bzw. Anteilen im Zement haben sich die Effekte der Hauptbestandteile im Zement verstärkt (z. B. wenn alle Bestandteile ähnlich hohe Feinheiten hatten) oder kompensiert (wenn grobe und feine Bestandteile kombiniert wurden). Die beispielsweise mittels Stampfvolumeter ermittelten Packungsdichten der Zemente lagen aufgrund variierender KGV der Hauptbestandteile in einem weiten Bereich zwischen geringen Werten (z.B. 0,41) und vergleichsweise hohen Werten (z.B. 0,50).

Der Großteil der Versuchszemente wurde durch getrenntes Mahlen mit anschließendem Mischen hergestellt. In der getrennten Mahlung wurden die granulometrischen Einflüsse auf die Zementeigenschaften bis zu einem gewissen Grad gesteuert. Wurden beispielsweise an allen drei Hauptbestandteilen enge KGV (z. B. RRSB: $n = 1,0$) und hohe Mahlfeinheiten (Blainewert $> 5000 \text{ cm}^2/\text{g}$) eingestellt, führte dies im Zement zu vergleichsweise geringen Packungsdichten und einem hohen Wasseranspruch $> 30 \text{ M.-%}$ (für Normsteife) bzw. $> 38 \text{ Vol.-%}$ (nach Puntke).

In der gemeinsamen Mahlung von Klinker, Kalkstein und Hüttensand bzw. Ziegel wurden die granulometrischen Eigenschaften der Zemente überwiegend von der Mahlbarkeit der Hauptbestandteile, ihrem Anteil im Mahlgut sowie von der Mahlanlage beeinflusst. Eine gezielte Einflussnahme auf nur einen Hauptbestandteil bzw. auf seine Granulometrie war in der gemeinsamen Mahlung erwartungsgemäß nicht möglich.

Leicht mahlbarer Kalkstein und Ziegel reicherten sich während der diskontinuierlichen Mahlung (Chargenkugelmühle) in den feinen Fraktionen an und führten damit zu breiteren, meist mehrmodalen KGV. In der kontinuierlichen Mahlung auf einer Vertikalwälmühle waren je nach Betriebsweise engere KGV erreichbar.

Aufgrund des Kalksteinanteils von 20 M.-% im CEM II/C-M bzw. 30 M.-% im CEM X wurden nach gemeinsamer Mahlung hohe Feinheiten zwischen $6500 \text{ cm}^2/\text{g}$ und $7700 \text{ cm}^2/\text{g}$ (Blaine) ermittelt. Es ist davon auszugehen, dass sich die KGV der drei gemeinsam gemahlten Hauptbestandteile entsprechend ihrer Mahlbarkeit (je nach Mahldauer und Mahlverfahren) fortwährend, jedoch in

unterschiedlichen Geschwindigkeiten veränderten. Die so herbeigeführte Modifikation der granulometrischen Mahlgutzusammensetzung wirkte sich unmittelbar auf die Packungsdichte der Mahlgutproben aus. In den Versuchen zur gemeinsamen Mahlung wurde einerseits die Packungsdichte des Mahlgutes in Abhängigkeit der Mahlfeinheit verringert (vgl. getrennte Mahlung). Andererseits wurden an einigen Mahlgutproben mit deutlichem Anstieg der Mahlfeinheit auf Werte $> 5500 \text{ cm}^2/\text{g}$ bzw. $> 6000 \text{ cm}^2/\text{g}$ bei gleichfalls hohen Anteilen feiner (leicht mahlbarer) Bestandteile zum Teil auch zunehmende Packungsdichten ermittelt. Der Wasseranspruch der gemeinsam gemahlten Zemente lag auf hohem Niveau zwischen 38 Vol.-% und 42 Vol.-%.

Im Vergleich zu CEM II/B-M-Zementen mit 65 M.-% Klinker und deutlich geringeren Anteilen an Hütensand und Kalkstein (vgl. [2]) haben sich die granulometrischen Einflüsse der CEM II/C-M- und CEM VI-Hauptbestandteile aus getrennter Mahlung häufig überlagert und entsprechende Auswirkungen kompensiert. Bei Anteilen der Hauptbestandteile (K, S, LL) von 50 M.-%, 45 M.-%, 40 M.-%, 35 M.-%, 30 M.-% bzw. 20 M.-% waren Effekte der Packungsdichte auf den Wasseranspruch und das Erstarren der Zemente, auf das Ausbreitmaß der Normmörtel sowie auf die Druckfestigkeit im Alter von zwei und 28 Tagen kaum bzw. geringfügig ausgeprägt.

Bei konstanter stofflicher Zementzusammensetzung wurden z. B. an CEM II/C-M (S-LL)-Zementen (mit 50 M.-% Klinker K1-M) Anfangsfestigkeiten zwischen 13 MPa und 20 MPa ermittelt. Sofern die Packungsdichte der Zemente ausgehend vom Wertebereich $> 0,47$ auf Werte $< 0,45$ verringert wurde, nahm die Druckfestigkeit im Alter von zwei Tagen um 7 MPa zu. Zemente auf Basis des Klinkers C5 zeigten hingegen keinen Einfluss der Packungsdichte, es wurden durchweg Anfangsfestigkeiten von ca. 20 MPa bestimmt. Die Normfestigkeiten dieser Zemente lagen unabhängig der Packungsdichte in einem Bereich zwischen 50 MPa und 60 MPa. Außerdem nahm die Druckfestigkeit der Normmörtel mit abnehmender Gesamtporosität (Prüfalter 28 Tage) tendenziell zu. Die Ergebnisse der Mörtel mit hoher Gesamtporosität (z. B. $> 12 \text{ Vol.-%}$) und geringer Druckfestigkeit (z. B. $< 55 \text{ MPa}$) streuten im Vergleich zu Mörteln mit hohen Druckfestigkeiten und geringen Porositäten erheblich.

Nach der kontinuierlichen, gemeinsamen Mahlung der CEM X-Zemente wurden mit zunehmender Mahlfeinheit bzw. mit zunehmender Steigung der KGV des Mahlgutes verringerte Mörtelausbreitmaße ermittelt. Die Ausbreitmaße der Normmörtel nahmen von 173 mm auf 146 mm ab, die Anfangsfestigkeiten stiegen von 9 MPa auf 16 MPa, die Normfestigkeiten von 34 MPa auf 52 MPa.

Je nach Mahlgutzusammensetzung und Mahlverfahren hatte die gemeinsame Mahlung der CEM II/C-M- und CEM X-Zemente auch Auswirkungen auf die Gesamtporosität der Normmörtel sowie auf die Lage und Steigung der Porengrößenverteilung (PGV). Mit zunehmendem Mahlfortschritt nahm die Gesamtporosität der entsprechenden Normmörtel (Prüfalter 28 Tage) ab und die PGV-Kurve rückte schrittweise in den feinporigen Bereich, was zu einer Erhöhung des dauerhaftigkeitsrelevanten Gelporenanteils (Poren $< 0,01 \mu\text{m}$) führte.

In vergleichenden Untersuchungen an Mörteln mit variiertem Wassergehalt und konstant steifplastischer Konsistenz (SP) waren bei Anwendung ausgewählter CEM II/C-M-Zemente (S-LL, Q-LL), CEM VI- und CEM X-Zemente der Wassergehalt und somit der w/z -Wert auf Werte $w/z < 0,50$ zu verringern. Die Ausbreitmaße der Frischmörtel lagen somit unabhängig der Zementzusammensetzung und des Zementmahlverfahrens, in einem engen Bereich zwischen 130 mm und 140 mm.

Alle Versuche an Frischmörteln und Frischbetonen wurden ohne Verwendung verflüssigender Zusatzmittel durchgeführt, um die granulometrischen Effekte auf Konsistenz und Verarbeitbarkeit einzuordnen.

Die Druckfestigkeit der Normmörtel ($w/z = 0,50$) wurde der Druckfestigkeit der sog. SP-Mörtel ($w/z \neq 0,50$) gegenübergestellt. An allen Zementen wurden signifikante Unterschiede in der 2d-Druckfestigkeit ermittelt. Die SP-Mörtel erreichten eine 2d-Druckfestigkeit von mindestens 15 MPa. Die höchsten Festigkeiten erreichten die CEM II/C-M-Zemente mit bis zu 31 MPa.

An den CEM II/C-M (S-LL)-Mörteln wurde nach zementspezifischer Absenkung des w/z-Wertes auf SP festgestellt, dass beispielsweise und je nach Granulometrie

- einer Anfangsfestigkeit von ca. 20 MPa (Normmörtel)
- 2d-Druckfestigkeiten von ca. 25 MPa bis 31 MPa (SP-Mörtel)

bei konstanter stofflicher Zementzusammensetzung gegenüberstehen können (im Beispiel: Steigerung um bis zu 55%).

Auch im Alter von 28 Tagen ergaben sich an den SP-Mörteln im Vergleich zum Normmörtel höhere Druckfestigkeiten nach w/z-Wertabsenkung. Alle SP-Mörtel erreichten eine 28d-Druckfestigkeit von mindestens 53 MPa (hüttensandhaltige) bzw. 33 MPa (ziegelhaltige).

An den CEM II/C-M (S-LL)-Mörteln wurde nach zementspezifischer Absenkung des w/z-Wertes auf SP festgestellt, dass beispielsweise und je nach Granulometrie

- einer Normfestigkeit von ca. 50 MPa (Normmörtel)
- 28d-Druckfestigkeiten von ca. 53 MPa bis 64 MPa (SP-Mörtel)

bei konstanter stofflicher Zementzusammensetzung gegenüberstehen können (im Beispiel: Steigerung um bis zu 28%).

Mit der Absenkung der w/z-Werte und der Zunahme der Druckfestigkeiten ging eine Verringerung der Gesamtporositäten einher. Die Gesamtporosität der Normmörtel war überwiegend größer als die Gesamtporosität der SP-Mörtel.

Sofern in den entsprechenden SP-Mörteln steigende Anteile an Gelporen ($< 0,01 \mu\text{m}$) bei abnehmenden Gesamtporositäten feststellbar waren, nahmen die 28d-Druckfestigkeiten der hüttensandhaltigen Zemente etwas deutlicher zu als die Festigkeiten der ziegelhaltigen Zemente.

Die Eigenschaften der Normmörtel und SP-Mörtel lassen auf Betoneigenschaften ohne und mit w/z-Wert-Absenkung schließen. Betone (B1) der Zusammensetzung $z = 300 \text{ kg/m}^3$ bei $w/z = 0,60$ bzw. Luftporenbetone (B3) mit $z = 320 \text{ kg/m}^3$ bei $w/z = 0,50$ sowie SP-Betone mit verringerten Wassergehalten bzw. w/z-Werten nahmen in ihrer 28d-Betondruckfestigkeit gleichermaßen zu, wenn die entsprechenden 28d-Mörteldruckfestigkeiten anstiegen.

Im Würfelverfahren wurde an den Betonen (B1) unter Verwendung von CEM II/C-M (S-LL) und CEM VI der in den Zulassungsverfahren des DIBt geforderte Frostwiderstand durchweg nachgewiesen (\rightarrow Expositionsklassen XF1, XF3). Die Abwitterungen nach 100 Frost-Tau-Wechseln (FTW) lagen unter dem Bewertungskriterium von 10 M.-%. Einige Betone (B1-SP) unter Verwendung von CEM II/C-M (Q-LL) und CEM X haben die Frostprüfung bei abgesenktem w/z-Wert bestanden (\rightarrow Expositionsklasse XF1).

Die Druckfestigkeiten der Betone (B1 + B1-SP) lagen in einem weiten Bereich zwischen etwa 27 MPa und 47 MPa.

Im CDF-Test an den Luftporenbetonen (B3) wurde nur unter Verwendung eines granulometrisch optimierten CEM II/C-M (S-LL)-Zements der in den Zulassungsverfahren des DIBt geforderte Frost-Tausalz-Widerstand nachgewiesen (\rightarrow Expositionsklasse XF4). Die Abwitterungen nach 28 Frost-Tau-Wechseln (FTW) lagen unter dem Bewertungskriterium von $1,5 \text{ kg/m}^2$. Einige Betone (B3-SP) unter Verwendung von CEM II/C-M (S-LL) bzw. (Q-LL) haben den CDF-Test nur bei abgesenktem w/z-Wert bestanden. (Weitere CDF-Versuche an granulometrisch optimierten CEM VI- und CEM X-Zementen, jeweils bei Ansatz eines abgesenkten w/z-Wertes (SP) stehen noch aus.)

Die Druckfestigkeiten der Betone (B3 + B3-SP) lagen in einem weiten Bereich zwischen etwa 23 MPa und 45 MPa.

Der Chlorideindringwiderstand wurde an Betonen (B2) der Zusammensetzung $w/z = 0,50$ und $z = 320 \text{ kg/m}^3$ (ohne w/z -Wert-Absenkung) untersucht. Das in den Zulassungsverfahren des DIBt herangezogene Beurteilungskriterium für den Chloridmigrationskoeffizienten von $25 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ (Migrations-schnelltest im Prüfalter von 35 Tagen) wurde in allen Versuchen, unabhängig der Zementart eingehalten. Gemäß der BAW-Kriterien können die Zemente CEM II/C-M (S-LL) und CEM VI sowie der CEM X aus gemeinsamer Mahlung den Expositionsklassen XS3 und XD3 zugeordnet werden, da die Betone mit Migrationskoeffizienten $\leq 5 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ einen hinreichend hohen Chlorideindringwiderstand aufwiesen.

Die Druckfestigkeiten der Betone (B2) lagen in einem weiten Bereich zwischen etwa 39 MPa und 61 MPa.

Das Carbonatisierungsverhalten wurde in Anlehnung an die Zulassungsversuche des DIBt an Feinbetonen (FB) ermittelt. Die Feinbetone wurden sieben Tage bzw. 28 Tage vorgelagert (VL 7d, VL 28d). Anhand der Carbonatisierungstiefe nach 140 Tagen Hauptlagerung sowie der Druckfestigkeit nach Vorlagerung wurden die Ergebnisse vor dem DIBt-Bewertungshintergrund eingeordnet. Alle Feinbetone mit VL 7d liegen im Bereich des DIBt-Bewertungshintergrundes. Nach einer Vorlagerung von 28 Tagen liegen fast alle Feinbetone im Bereich des DIBt-Bewertungshintergrundes. Mit einem CEM VI-Feinbeton wurde eine Druckfestigkeit außerhalb des DIBt-Grenzwertes ermittelt, während die Carbonatisierungstiefe vergleichbare Werte zeigte. Somit erreichen alle Feinbetone, unabhängig der Zementart, die in Zulassungsverfahren geforderten Eigenschaften für die Expositionsklassen XC1 bis XC4.

Die 7d-Druckfestigkeiten der Feinbetone (FB bei VL 7d) lagen in einem Bereich zwischen etwa 26 MPa und 37 MPa. Die 28d-Druckfestigkeiten der Feinbetone (FB bei VL 28d) lagen in einem Bereich zwischen etwa 35 MPa und 56 MPa.

Das umweltrelevante Projektziel wurde erreicht. Als Treibhauspotenziale der klinkereffizienten Zemente wurden durchweg Werte $\leq 400 \text{ kg CO}_2\text{-Äq/t}$ (zzgl. Verbrennung von Sekundärbrennstoffen) ermittelt. Das deutlichste Minderungspotenzial hat sich in der Herstellung des CEM VI mit einem Klinkerfaktor von 35% sowie in der gemeinsamen Mahlung eines CEM X mit 30% Kalkstein ergeben.

A Anhang: Tabellen**Tabelle A-1** Zement- und Mörtleigenschaften (Teil 1)

Zement	Packungs- dichte kom- primiert [-]	Stamfpä- ckungs- dichte [-]	Wasseran- spruch Punkte [Vol.-%]	Wasseran- spruch Normsteife [M.-%]	Erstar- rungsbe- ginn [min]	Erstar- rungsende [min]	Ausbreit- maß Norm- mörtel [mm]
CEM II/C-M (S-LL) getrennt gemahlen							
GC 8	0,412	0,449	38,72	29,50	180	240	190,00
GC 11	0,453	0,475	35,73	27,00	125	170	193,50
G 1		0,445	43,00	32,00	200	250	162,20
G 17	0,426	0,408	42,00	33,00			161,50
G 46	0,467	0,458	38,16	30,50	140	180	182,50
G 47	0,467	0,472	38,89	30,50	165	205	189,00
CEM II/C-M (S-LL) gemeinsam gemahlen							
Pr. 110	0,462	0,448	38,22				172,00
CEM VI getrennt gemahlen							
G 64		0,468	39,98				176,50
G 66		0,454	39,12	30,00	150	185	167,50
CEM X getrennt gemahlen							
G 81		0,494	39,20				162,50
G 83		0,498	38,83				169,00
CEM X gemeinsam gemahlen							
GM 01	0,415	0,498	40,75				146,50
GM 03		0,457	41,93				158,00
GM 04		0,464	39,53				161,50
GM 05		0,500	39,82				172,50
CEM II/C-M (Q-LL) getrennt gemahlen							
GC 9	0,421	0,419	41,43	31,50	175	235	159,00
G 18	0,433	0,442	42,61	34,00			148,30
G 43		0,442	43,77				133,50
CEM II/C-M (Q-LL) gemeinsam gemahlen							
Pr. 140	0,453	0,437	41,47				152,50

Tabelle A-2 Zement- und Mörtleigenschaften (Teil 2)

Zement	2d-Druck- festigkeit Normmörtel [MPa]	28d-Druck- festigkeit Normmörtel [MPa]	28d-Druck- festigkeit SP-Mörtel [MPa]	Gesamtpo- rosität Normmörtel 28d [Vol.-%]	Gesamtpo- rosität SP- Mörtel 28d [Vol.-%]	Porenan- teile < 0,01 µm Norm- mörtel 28d [%]	Porenan- teile < 0,03 µm Norm- mörtel 28d [%]
CEM II/C-M (S-LL) getrennt gemahlen							
GC 8	11,88	49,16	55,01	13,49	13,99	23,97	84,78
GC 11	20,02	45,41	54,70	13,62	12,30	27,37	83,31
G 1	20,48	50,89		12,56		31,99	83,40
G 17	19,37	50,32	63,44	12,23	12,21	31,56	84,94
G 46	21,54	60,13	69,71	11,39	7,85	37,35	82,58
G 47	20,39	57,26		11,99		37,96	84,62
CEM II/C-M (S-LL) gemeinsam gemahlen							
Pr. 110	19,37	51,25	62,38	13,57	11,89	28,42	85,41
CEM VI getrennt gemahlen							
G 64	11,24	54,04		12,06		34,16	84,34
G 66	12,27	59,16	63,75	11,16	9,18	34,88	88,06
CEM X getrennt gemahlen							
G 81	12,41	43,93	59,23	14,02	11,21	33,19	86,35

Zement	2d-Druckfestigkeit Normmörtel [MPa]	28d-Druckfestigkeit Normmörtel [MPa]	28d-Druckfestigkeit SP-Mörtel [MPa]	Gesamtporosität Normmörtel 28d [Vol.-%]	Gesamtporosität SP-Mörtel 28d [Vol.-%]	Porenanteile < 0,01 µm Normmörtel 28d [%]	Porenanteile < 0,03 µm Normmörtel 28d [%]
G 83	10,58	44,22	60,79	13,80	11,05	37,90	87,67
CEM X gemeinsam gemahlen							
GM 01	15,94	51,77	55,02	10,09	10,80	19,45	79,37
GM 03	12,56	46,27		10,61	10,61	12,97	77,69
GM 04	11,76	41,07		10,76		10,59	71,74
GM 05	8,71	34,02		11,08		7,03	47,51
CEM II/C-M (Q-LL) getrennt gemahlen							
GC 9	17,07	35,45	43,05	17,26	12,23	17,07	75,85
G 18	17,67	38,69	38,90	16,06	16,96	28,41	80,79
G 43	14,62	34,05	33,12	16,62	16,84	24,65	71,90
CEM II/C-M (Q-LL) gemeinsam gemahlen							
Pr. 140	15,27	37,36	43,09	16,65	13,15	30,67	79,36

Tabelle A-3 Frischbetoneigenschaften und Betondruckfestigkeiten

Beton	Zement	Frischbetonroh-dichte [kg/m³]	Luftporen-gehalt [Vol.-%]	Ausbreit-maß [mm]	Verdich-tungsmaß [-]	28d-Druck-festigkeit [MPa]	28d-Druck-festigkeit SP [MPa]
Betone B1 und B1 SP: z = 300 kg/m³, w/z = 0,60 oder w/z (SP) < 0,60							
B1	G 1	2,3	2,7	380		37,57	
B1	G 17	2,31	2,8	370		41,14	
B1	G 18	2,32	2,7	385		27,50	
B1	G 43	2,33	2,4	380		27,19	
B1	G 46	2,3	2,9	375		45,19	
B1	G 47	2,3	2,9	375		47,15	
B1	G 64	2,32	2,3	395		40,53	
B1	G 66	2,32	2,6	395		44,14	
B1	G 81	2,27	5,4	385		39,87	
B1	G 83	2,31	2,4	390		37,65	
B1	GC 11	2,34	2,3	370		36,08	
B1	GC 8	2,33	2,2	400		36,44	
B1	GC 9	2,31	2,8	385	1,2	27,39	
B1	GM 01	2,32	2,4	395		38,16	
B1	Pr. 110	2,3	2,5	340		39,01	
B1	Pr. 140	2,32	2,6	375		27,22	
B1-SP	G 18	2,32	2,9	380			30,89
B1-SP	G 83	2,36	2,0	390			45,62
B1-SP	GC 9	2,33	2,6	380			29,78
B1-SP	GM 01	2,33	2,4	380	1,3		
B1-SP	GM 03	2,34	2,4	385			39,31
B1-SP	Pr.140			375			
Betone B2: z = 320 kg/m³, w/z = 0,50							
B2	GC 9	2,34	2,4		1,3	39,89	
B2	GM 01	2,36	2,1	370	1,2	53,87	
B2	G 18	2,36	2,2	375	1,4	41,50	
B2	G 64	2,38	1,7	410		57,45	
B2	G 43	2,36	2,3	405	1,4	40,66	
B2	G 66	2,38	1,9	405	1,3	60,85	

Beton	Zement	Frischbetonroh-dichte [kg/m ³]	Luftporen-gehalt [Vol.-%]	Ausbreit-maß [mm]	Verdich-tungsmaß [-]	28d-Druck-festigkeit [MPa]	28d-Druck-festigkeit SP [MPa]
B2	G 81	2,33	2,2		1,3	58,35	
B2	GM 01	2,37	1,8		1,4	56,39	
Luftporenbetone B3 und B3 SP: z = 320 kg/m ³ , w/z = 0,50 oder w/z (SP) < 0,50							
B3 (2)	G 66	2,29	4,9	360		50,06	
B3 (2)	G 47	2,33	5,4	370		43,99	
B3	G 1	2,26	5,1	360		35,2	
B3	G 17	1,26	4,9	350		34,0	
B3-SP	G 17	2,28	4,9	360			38,6
B3	G18	2,24	5,1	330		23,6	
B3	G46	2,26	4,9	360		37,0	
B3-SP	G46	2,28	4,7	350			45,1
B3	G47	2,24	5,1	340		35,3	
B3	G64	2,23	5,4	370		31,7	
B3	G66	2,25	4,9	360		37,0	
B3-SP	G66	2,28	4,6	310			44,1
B3	G81	2,27	4,5	340		36,9	
B3	GC11	2,27	5,1	410		30,0	
B3	GC8	2,28	4,7	380		33,5	
B3	GC9	2,00	4,5	340		28,0	
B3-SP	GC9	2,25	4,8	320			28,3
B3	GM01	2,26	4,6	320		31,8	
Vorversuche FIB mit B2: z = 320 kg/m ³ , w/z = 0,50							
B2	GC 7					40,0 ± 1,54	
B2	GC 8					47,3 ± 0,75	
B2	GC 9					34,6 ± 0,74	
B2	GC 10					42,0 ± 0,64	
B2	GC 11					45,6 ± 1,13	
B2	GC 12					34,6 ± 0,48	

Tabelle A-4 Druckfestigkeiten der Feinbetone (FB)

Feinbeton	7d-Druckfestigkeit (VL 7d) [MPa]	35d-Druckfestigkeit (VL 7d) [MPa]	28d-Druckfestigkeit (VL 28d) [MPa]	35d-Druckfestigkeit (VL 28d) [MPa]
G 1	31,16	50,45	47,31	54,02
G 18	26,08	40,72	35,64	41,60
G 64	30,36	56,27	51,68	61,62
G 66	31,84	55,85	55,06	59,23
G 81	33,66	56,98	55,71	59,35
GC9	25,08	40,44	36,00	40,58
GM-01	37,17	55,15	51,25	57,82

B Anhang: Bilder

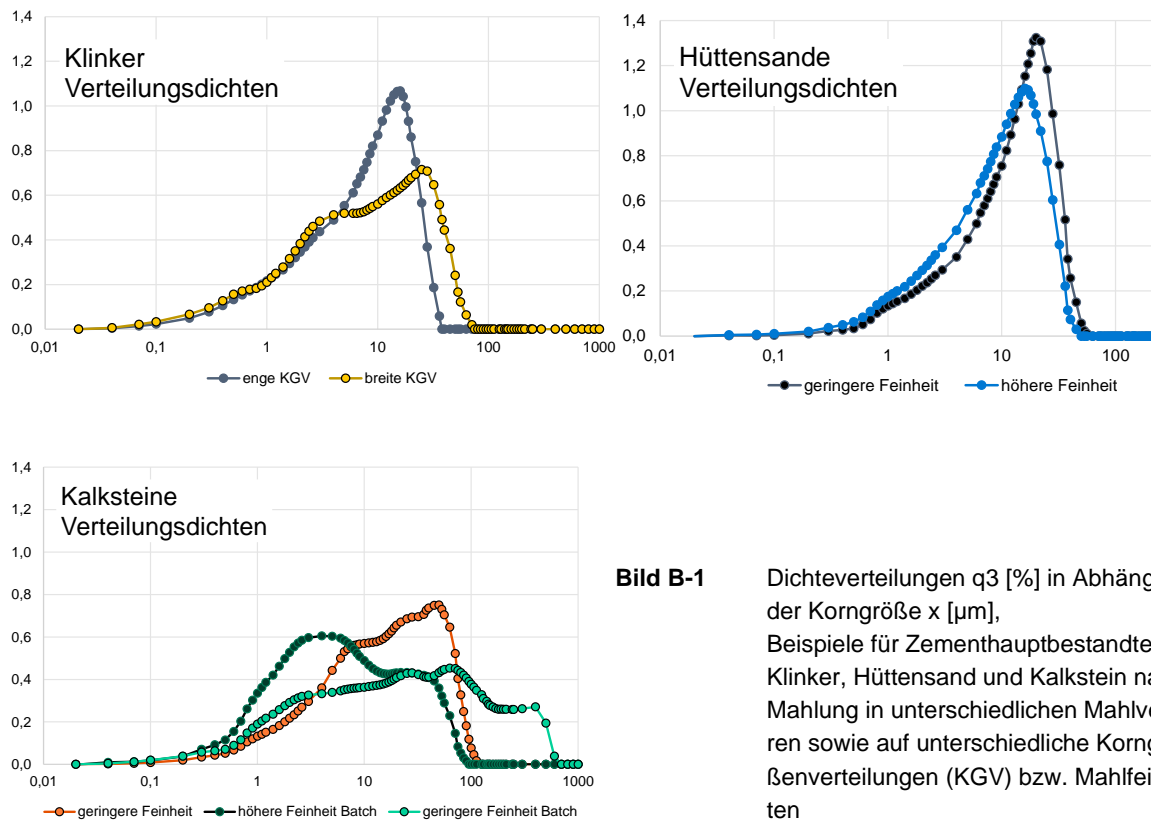


Bild B-1 Dichteverteilungen q3 [%] in Abhängigkeit der Korngröße x [μm], Beispiele für Zementhauptbestandteile Klinker, Hüttensand und Kalkstein nach der Mahlung in unterschiedlichen Mahlverfahren sowie auf unterschiedliche Korngrößenverteilungen (KGV) bzw. Mahlfeinheiten

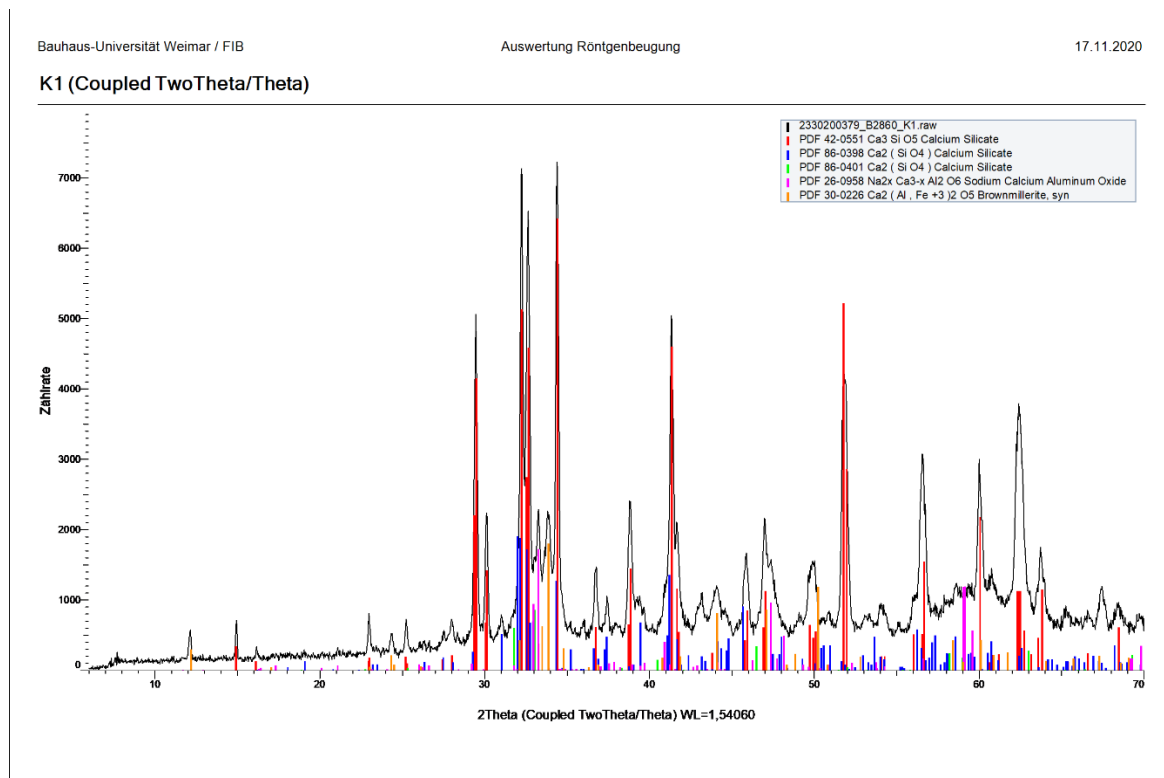
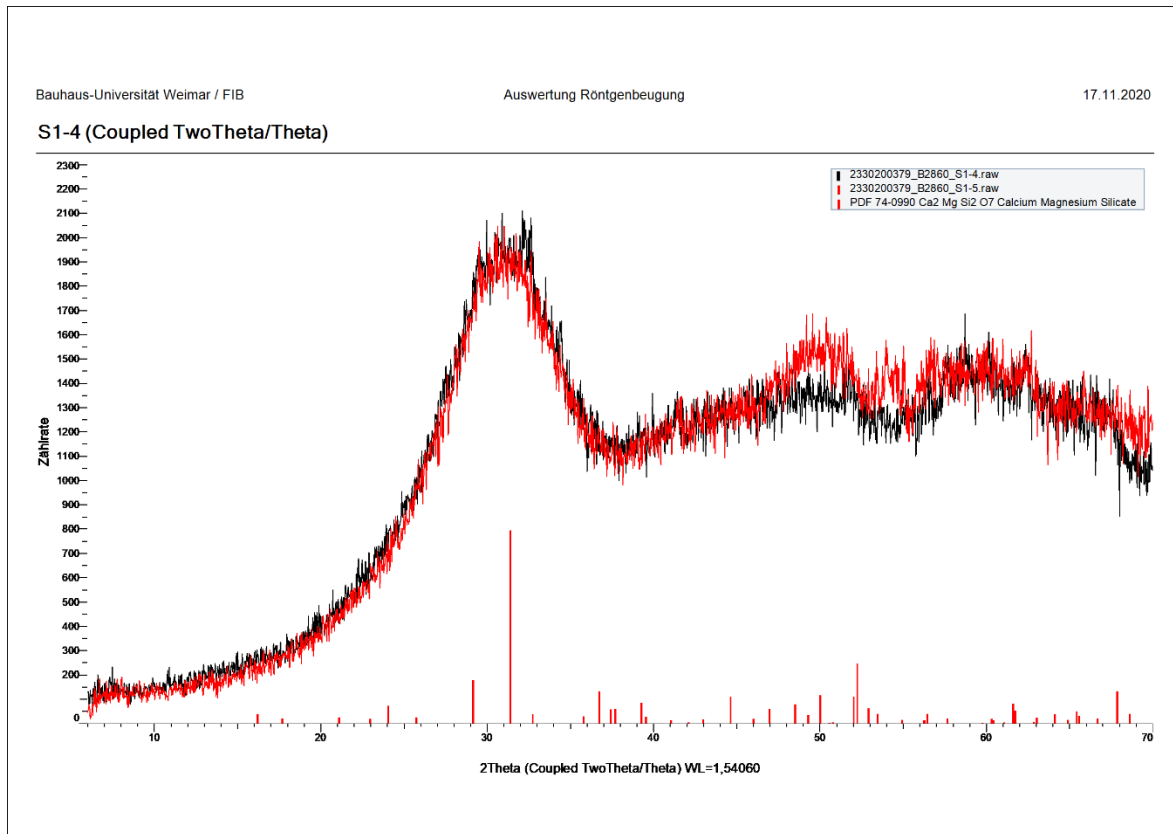
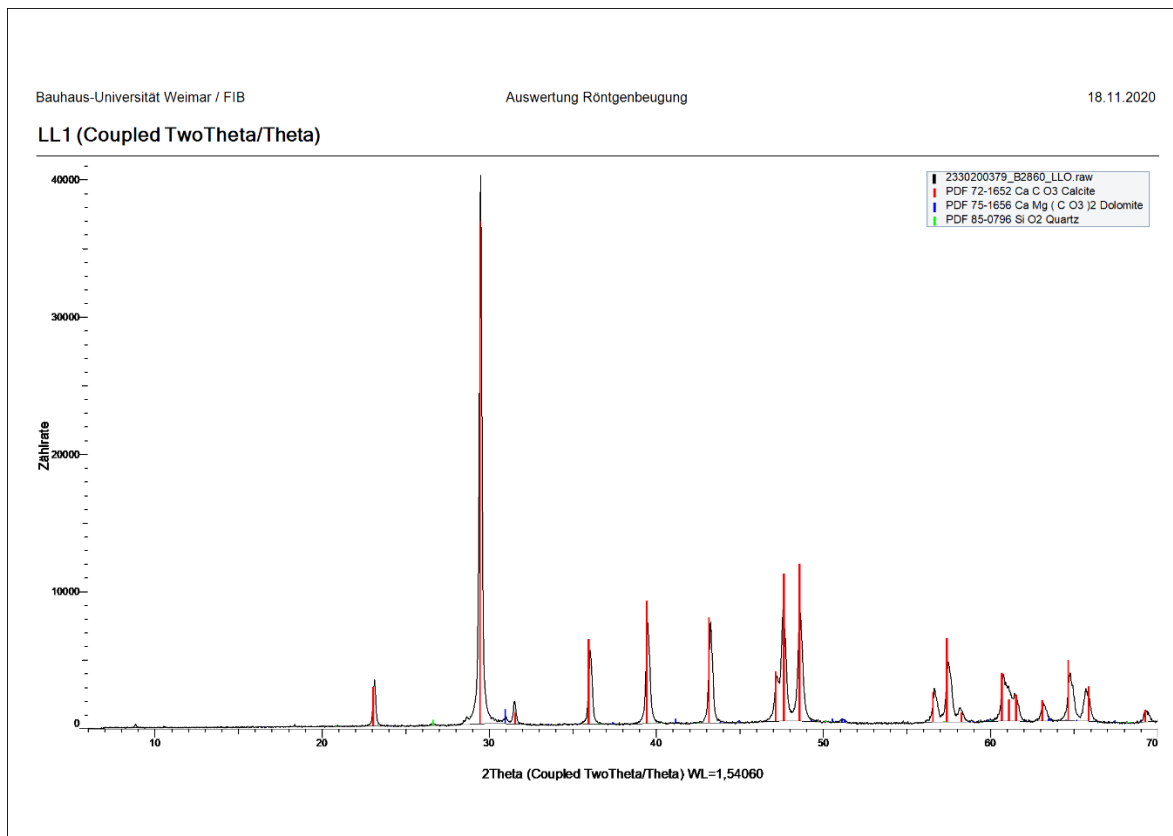


Bild B-2 Mineralogische Untersuchungen (Röntgenbeugung) der Ausgangsrohstoffe, Klinker K1

**Bild B-3** Mineralogische Untersuchungen (Röntgenbeugung) der Ausgangsrohstoffe, Hüttensand S1**Bild B-4** Mineralogische Untersuchungen (Röntgenbeugung) der Ausgangsrohstoffe, Kalkstein LL0

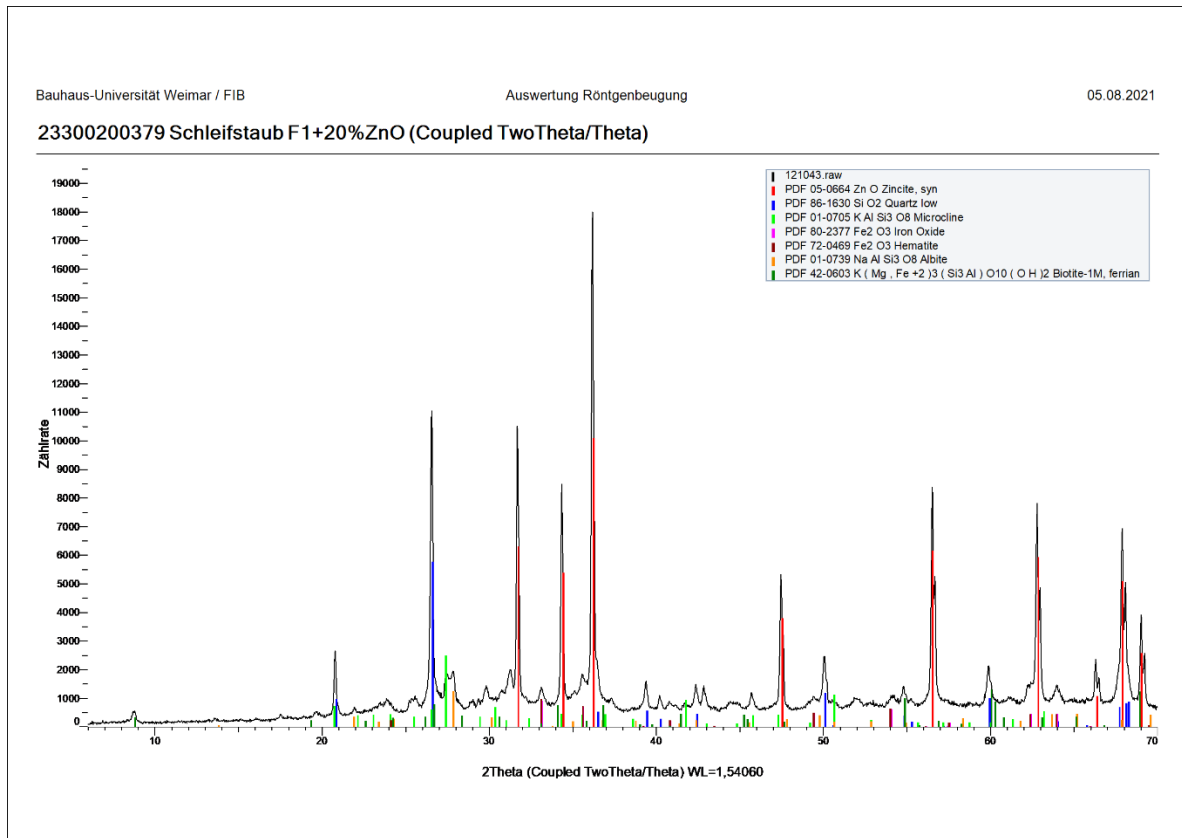


Bild B-5 Mineralogische Untersuchungen (Röntgenbeugung) der Ausgangsrohstoffe, Ziegelschleifstaub Q

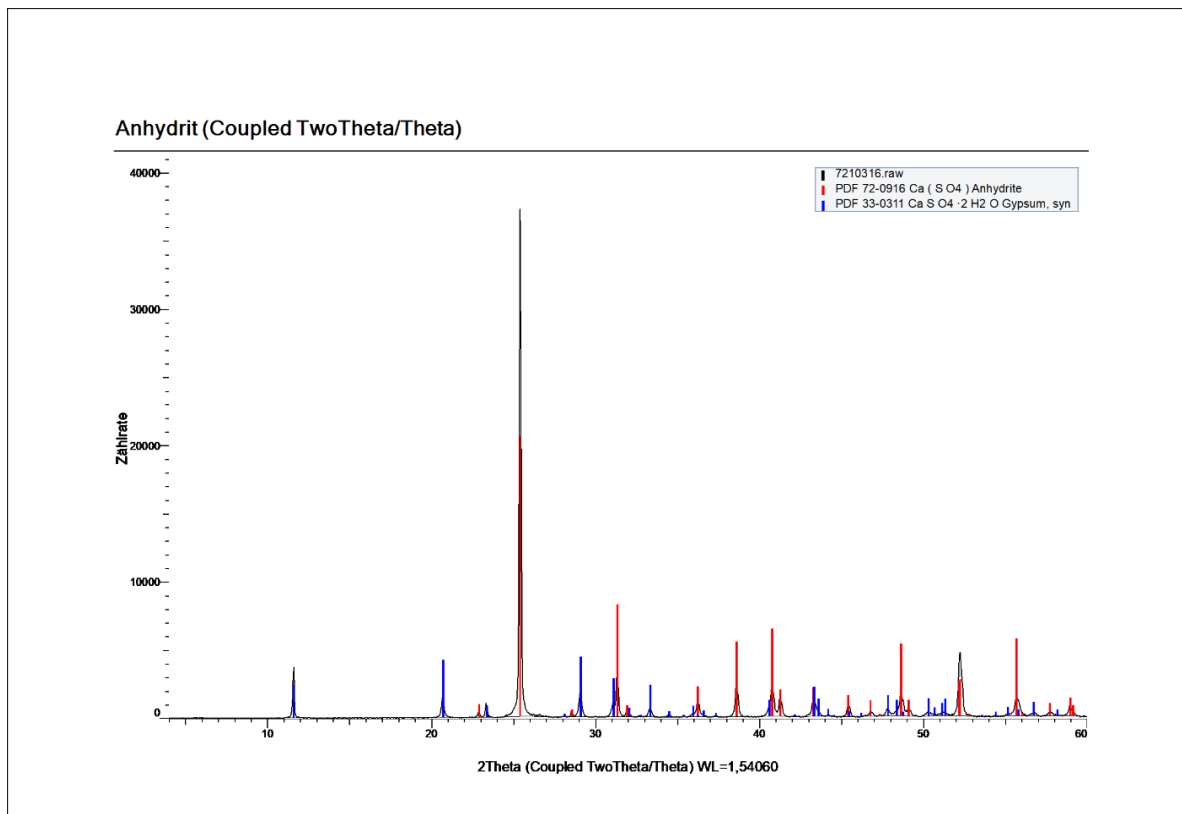


Bild B-6 Mineralogische Untersuchungen (Röntgenbeugung) der Ausgangsrohstoffe, Anhydrit AH

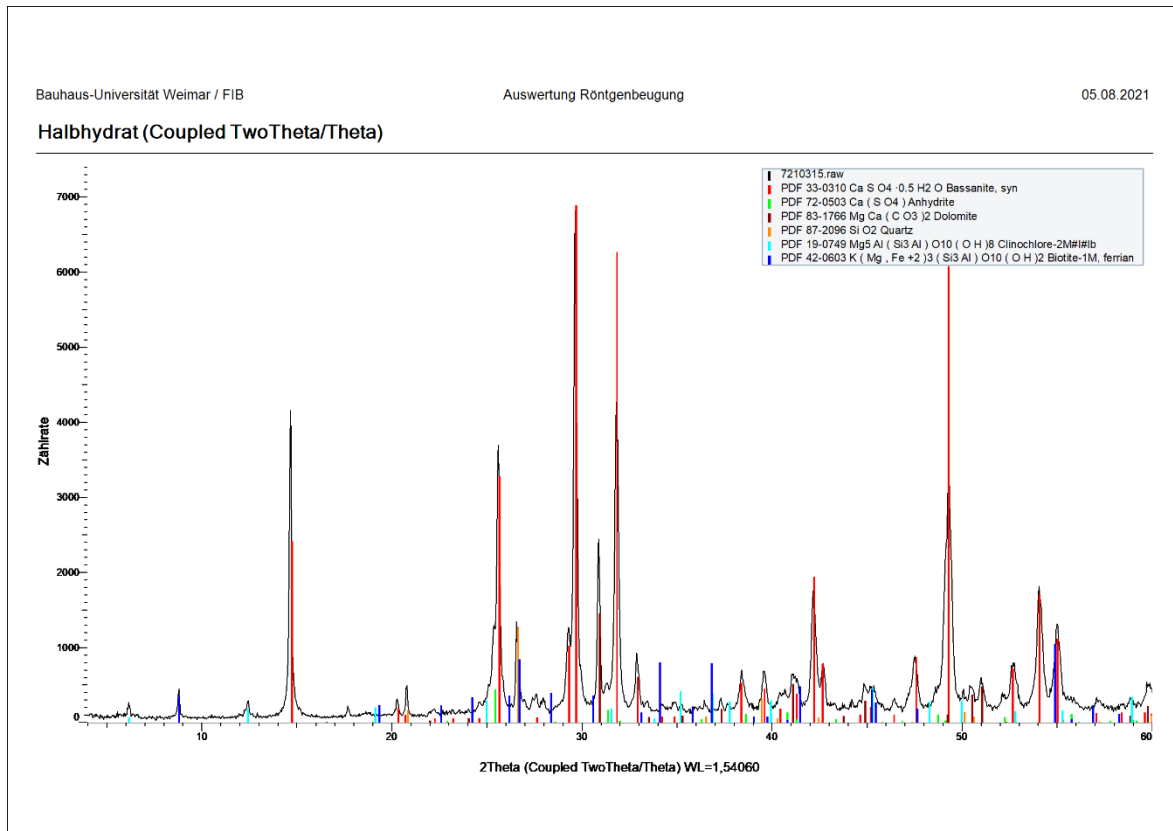


Bild B-7 Mineralogische Untersuchungen (Röntgenbeugung) der Ausgangsrohstoffe, Halbhydrat HH

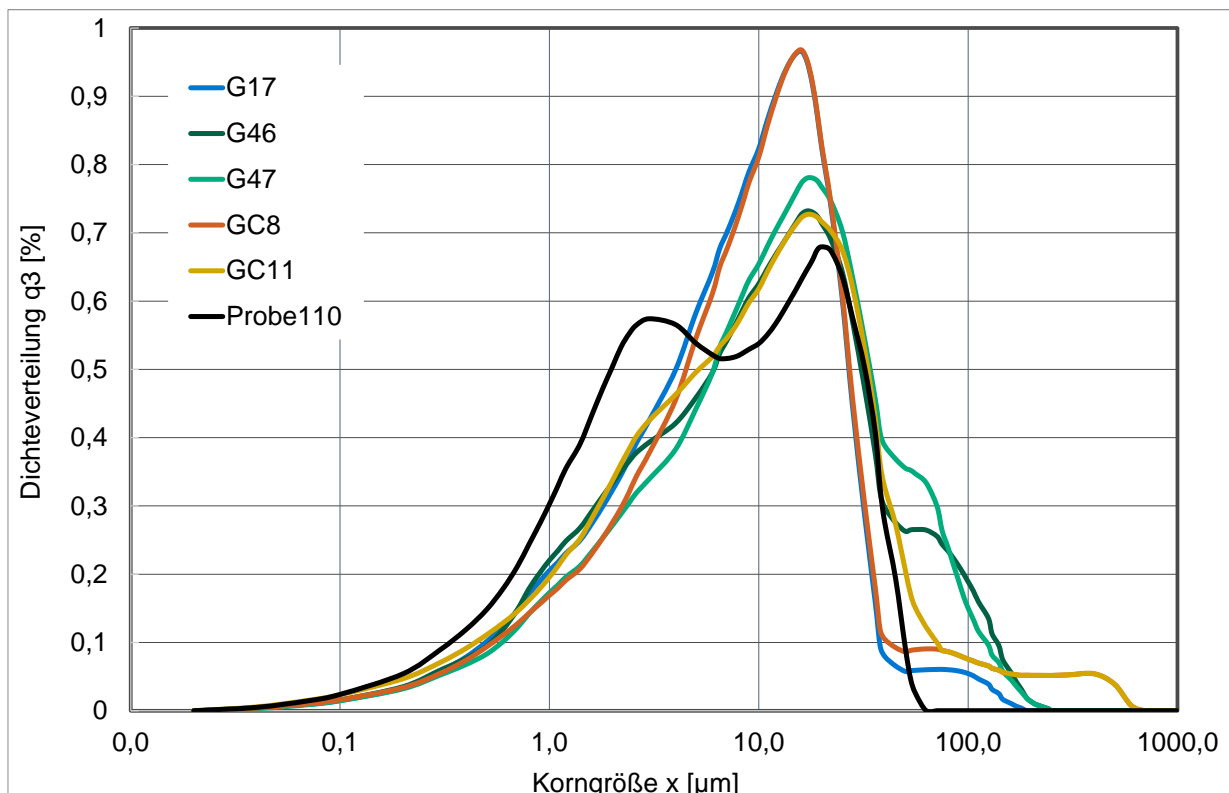


Bild B-8 Korngrößenverteilungen als modellierte Dichteverteilungen der im Beton untersuchten CEM II/C-M (S-LL)-Zemente mit 50 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 20 M.-% Kalkstein

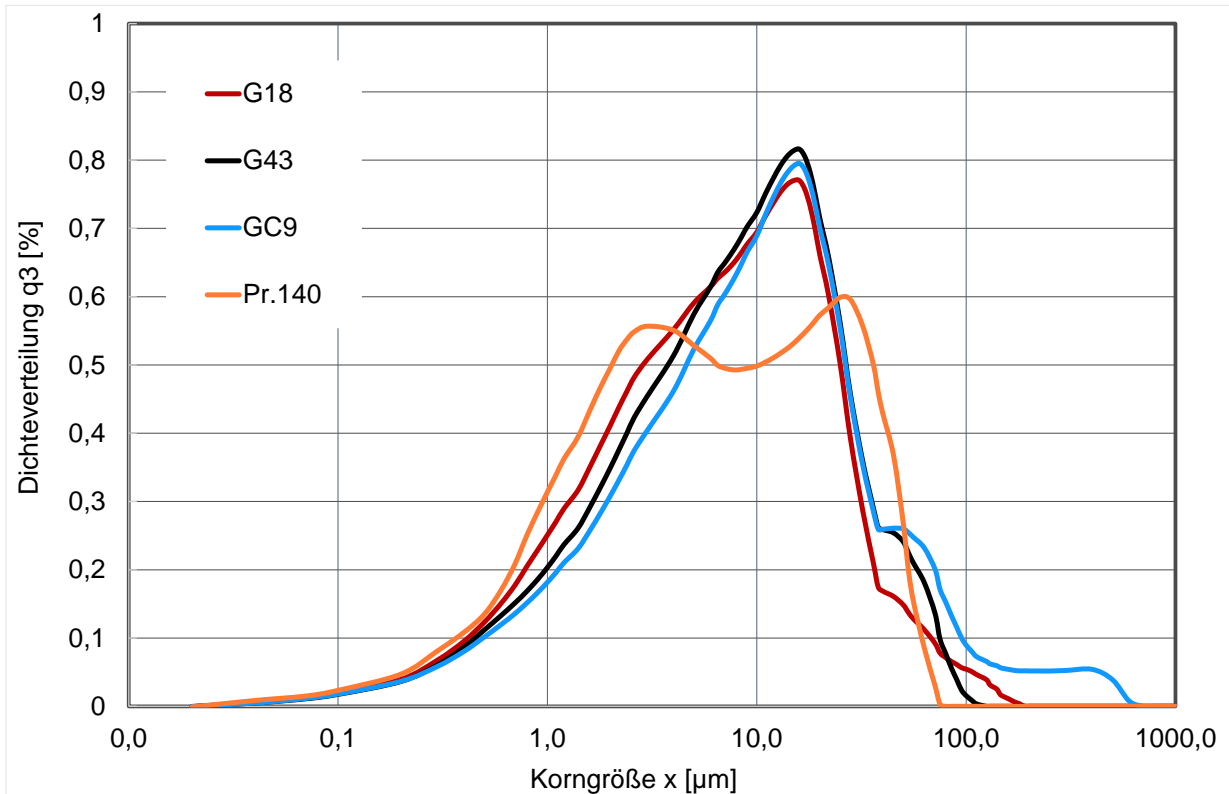


Bild B-9 Korngrößenverteilungen als modellierte Dichteverteilungen der im Beton untersuchten CEM II/C-M (Q-LL)-Zemente mit 50 M.-% Klinker, 30 M.-% Ziegel und 20 M.-% Kalkstein

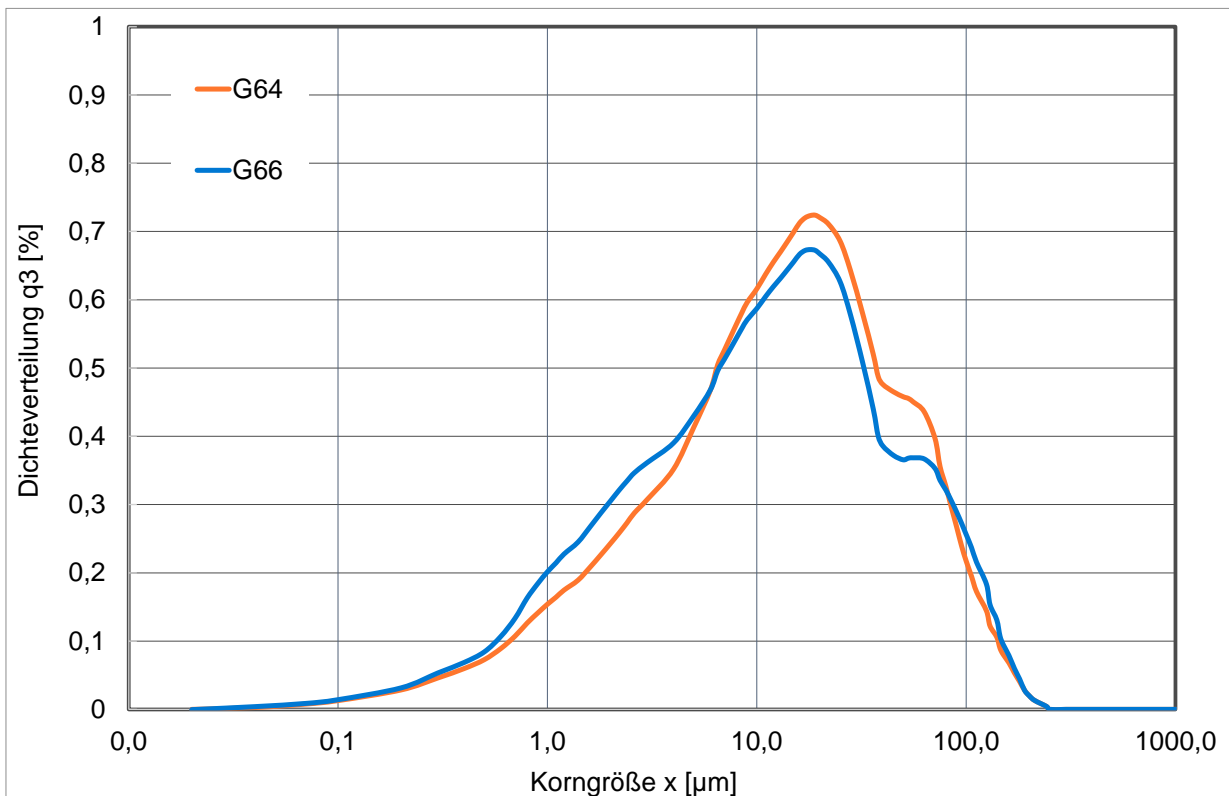


Bild B-10 Korngrößenverteilungen als modellierte Dichteverteilungen der im Beton untersuchten CEM VI (S-LL)-Zemente mit 35 M.-% Klinker, 45 M.-% Hüttensand und 20 M.-% Kalkstein

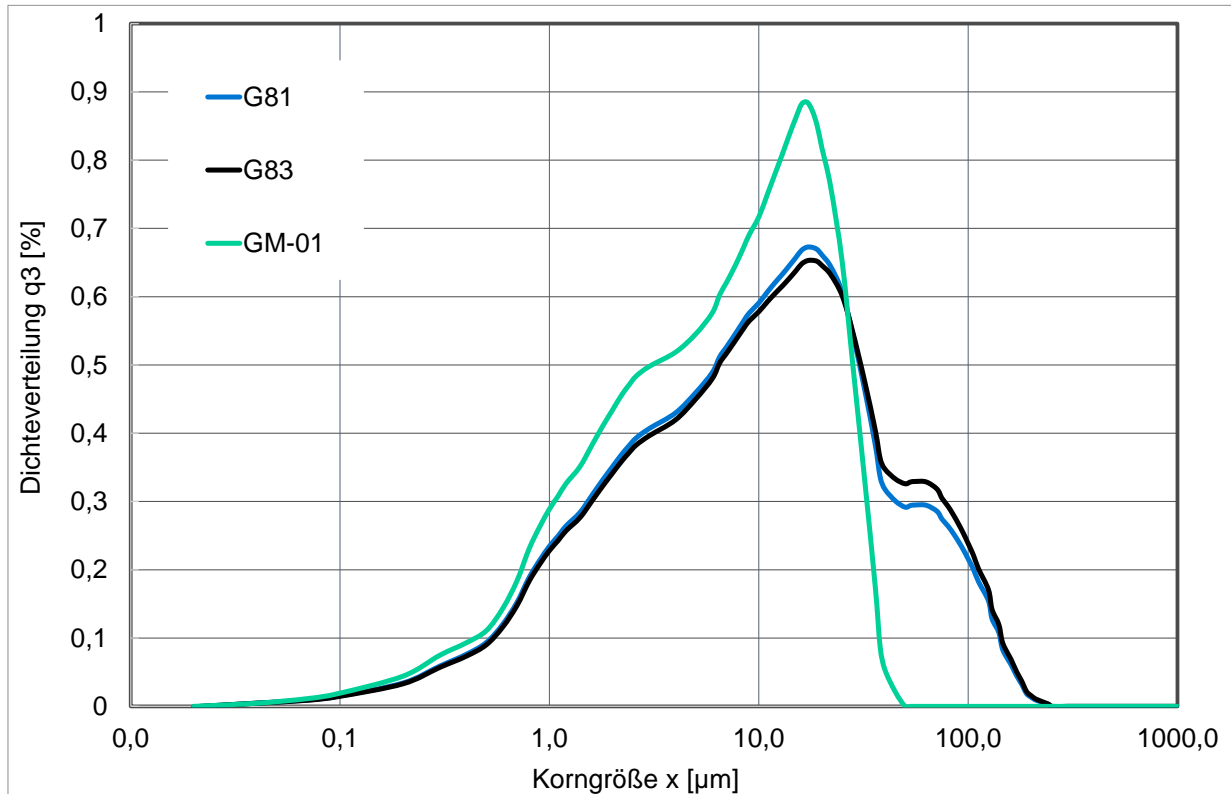


Bild B-11 Korngrößenverteilungen als modellierte Dichteverteilungen der im Beton untersuchten CEM X (S-LL)-Zemente mit 30 M.-% Kalkstein

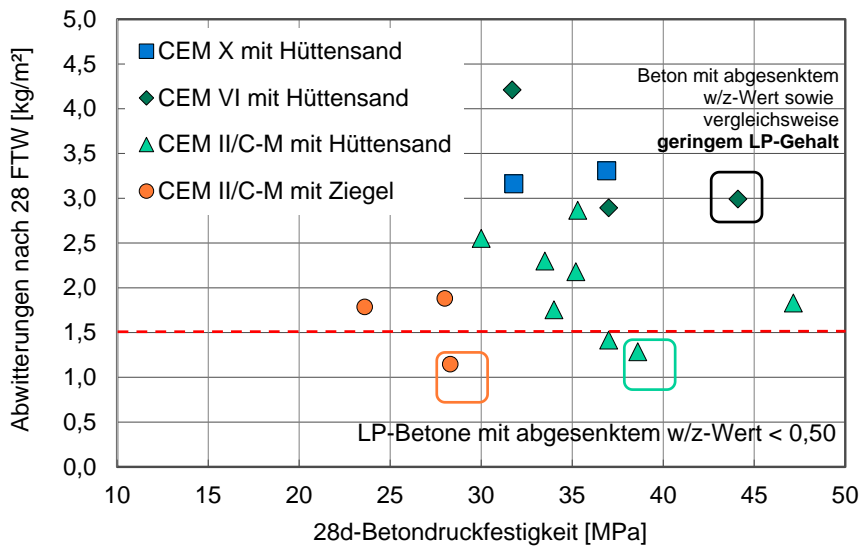


Bild B-12 Untersuchungen der LP-Betone B3 und B3-SP im CDF-Verfahren ($\rho = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$ bzw. w/z (SP) $< 0,50$), Darstellung der Abwitterungen der Betone (28 FTW) sowie ihrer Druckfestigkeit im Prüfalalter von 28 Tagen, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen mit maximal 50 M.-% Klinker und mindestens 20 M.-% Kalkstein

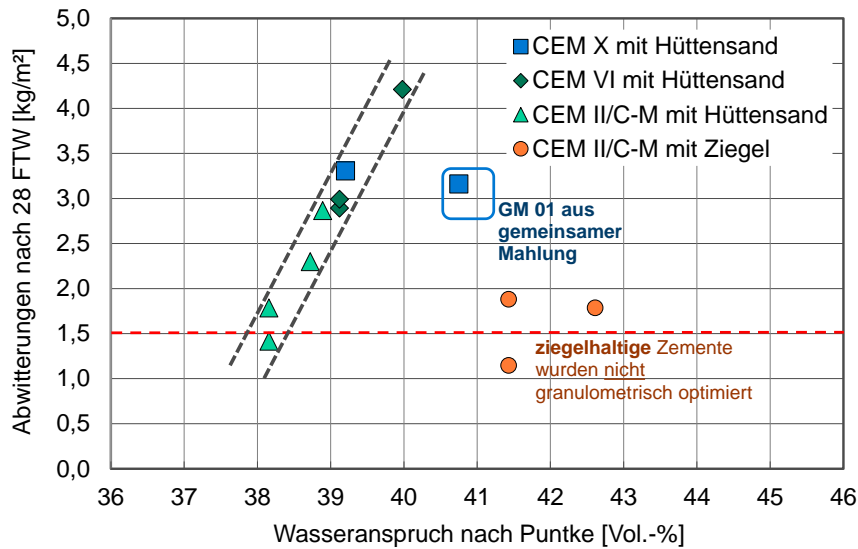


Bild B-13 Untersuchungen der LP-Betone B3 und B3-SP im CDF-Verfahren ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$ bzw. $w/z \text{ (SP)} < 0,50$), Darstellung der Abwitterungen der Betone (28 FTW) sowie des am Zement ermittelten Wasseranspruchs nach Punkte, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen mit maximal 50 M.-% Klinker und mindestens 20 M.-% Kalkstein

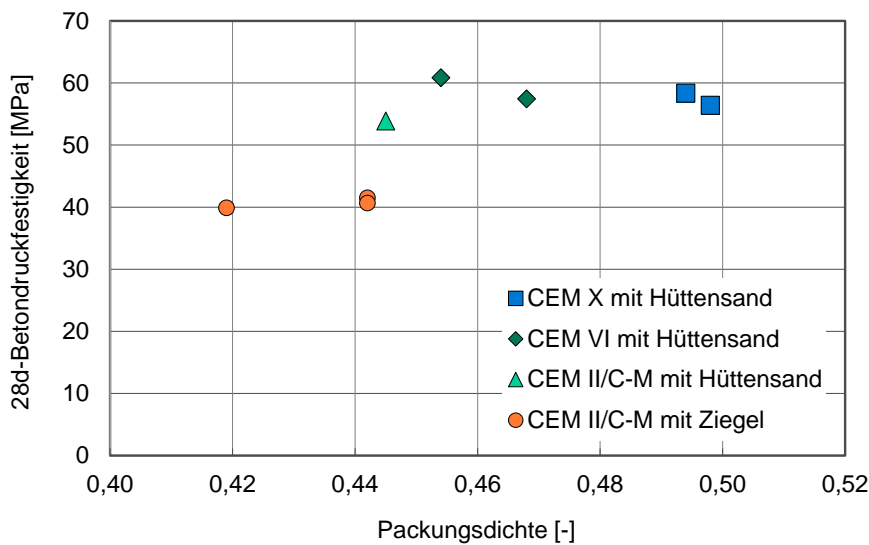


Bild B-14 Druckfestigkeit der Betone B2 ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$) im Prüfalalter von 28 Tagen in Abhängigkeit der am Zement bestimmten Stampfpackungsdichte, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

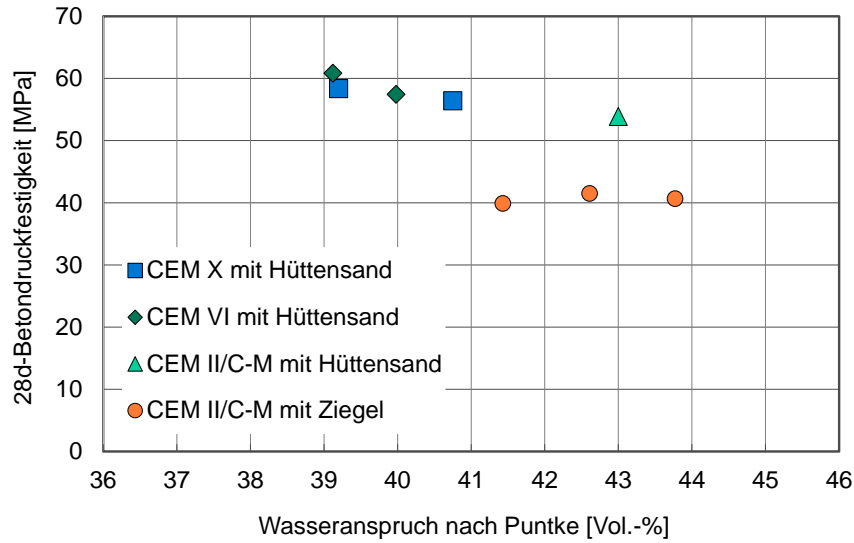


Bild B-15 Druckfestigkeit der Betone B2 ($z = 320 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,50$) im Prüfalfer von 28 Tagen in Abhängigkeit des am Zement bestimmten Wasseranspruchs nach Puntke, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

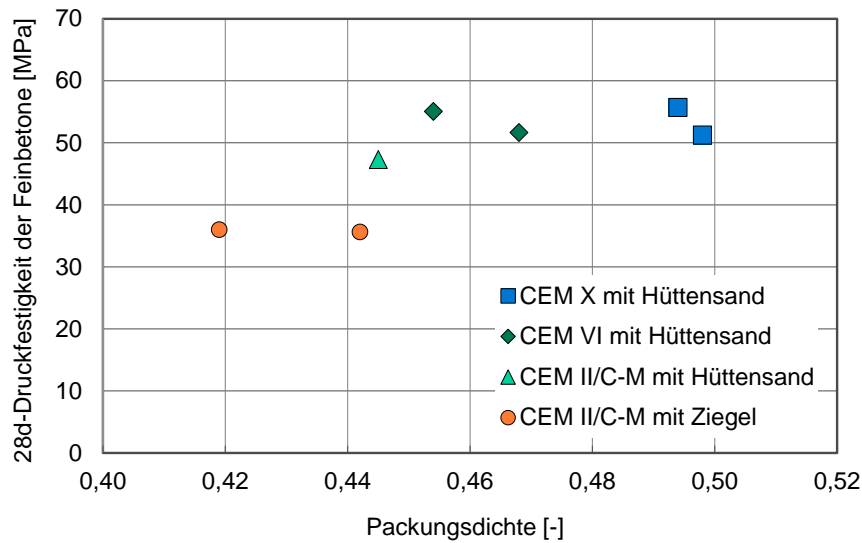


Bild B-16 Druckfestigkeit der Feinbetone FB ($w/z = 0,50$, Vorlagerung 28 Tage) im Prüfalfer von 28 Tagen in Abhängigkeit der am Zement bestimmten Stampfpackungsdichten, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

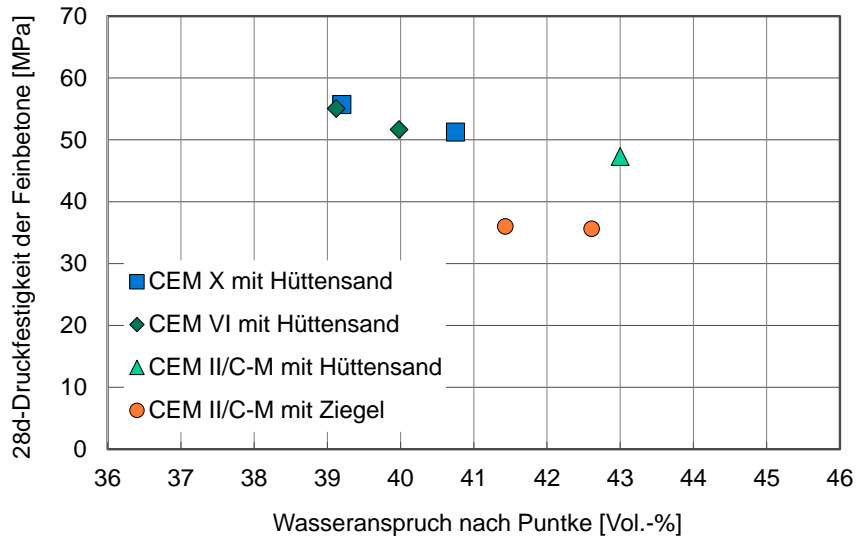


Bild B-17 Druckfestigkeit der Feinbetone FB ($w/z = 0,50$, Vorlagerung 28 Tage) im Prüfalalter von 28 Tagen in Abhängigkeit des am Zement bestimmten Wasseranspruchs nach Punkte, Verwendung von CEM II/C-M-, CEM VI- und CEM X-Zementen

23 Literaturverzeichnis

- [1] Severins, K.; Müller, Ch.; Reformat, M.; Ludwig, H.-M.. *Granulometrische Einflüsse von Zementen auf die Dauerhaftigkeit von Beton: 20-15*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung, ibausil (Weimar 12.-14.09.2018). Weimar, 2018 2018, S. 1132-1137
- [2] *Granulometrie der Zementhauptbestandteile - Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit von Betonen mit kalksteinhaltigen Zementen*. Schlussbericht zu IGF-Nr. 17853 BG, Zeitraum 01.12.2013 - 30.11.2016; FIZ Düsseldorf 2017
- [3] Institut für Ziegelforschung, IZF; VDZ gGmbH. *Verbesserung der Energieeffizienz und Reaktivität durch separate Mahlung von Ziegelbrechsand für den Einsatz in Portlandpuzzolanzementen: Schlussbericht IGF-Vorhaben 20920 N; Bewilligungszeitraum: 01.01.2020 - 30.06.2022*. Essen, 2022
- [4] Severins, Katrin; Müller, Christoph. *Brechsand als Hauptbestandteil im Zement*. Beton 2017, S. 323-326
- [5] Wedekind, Luise; Ludwig, Horst-Michael; Severins, Katrin; Müller, Christoph. *Einfluss der Granulometrie von klinkereffizienten Zementen auf die Hydratation: Vortrag ibausil 2023*. ce/papers 2023 6(6), S. 40-47
- [6] Wolter, Albrecht; Unseld, Johannes; Bohne, Thomas. *Portland based multi-constituent cements - By-products in cement manufacturing, Materials and technologies for the future ; The Future of Cement: 200 years after Louis Vicat, 6-8 JUNE 2017, UNESCO, Paris*. 2017
- [7] Geisenhanslüke, Carsten. *Einfluß der Granulometrie von Feinstoffen auf die Rheologie von Feinstoffleimen: Influence of the granulometry of fine particles on the rheology of pastes*. Kassel: Kassel university press 2009
- [8] Palm, Sebastian. *Optimierung der Raumauffüllung und der Komponentenverteilung von Multikompositzementen*. Clausthal-Zellerfeld: Papierflieger 2009
- [9] Reschke, Thorsten. *Der Einfluss der Granulometrie der Feinstoffe auf die Gefügeentwicklung und die Festigkeit von Beton*. Düsseldorf: 2001
- [10] Unseld, J.; Wolter, A.. *New analytical method for investigating the "internal" particle size distributions of multi-composite cements*. Cement International 2016, S. 60-66
- [11] Teichmann, Thomas. *Einfluss der Granulometrie und des Wassergehalts auf die Festigkeit und Gefügedichtigkeit von Zementstein: Influence of the granulometry and the water content on the strength and density of cement stone*. Kassel: Kassel university press 2008
- [12] Laschet, Pierre. *Randbedingungen für die Anwendung von Recyclingmehlen in ressourceneffizienten, zementgebundenen Baustoffen*. Aachen, FH, Masterarbeit, 2023. Aachen, 2023
- [13] Ehrenberg, Andreas. *Zur Optimierung der Korngrößenverteilung von hüttensandhaltigen Zementen*. Duisburg: 2001
- [14] *Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen; Untersuchungen zur Optimierung von Herstellung und Eigenschaften: Schlussbericht für den Zeitraum: 01.01.2002-31.12.2003 ; AiF-Nr. 13198 N*. Düsseldorf: Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ 2004

- [15] Müller-Pfeiffer, Michael. *Herstellung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen durch gemeinsames oder getrenntes Mahlen und Mischen*. Düsseldorf: 2000
- [16] *Ökologisch und technisch optimierte Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen: Laboruntersuchungen und Betriebsversuche: Schlussbericht zum Forschungsvorhaben "ÖkotoxZement" ; Förderkennzeichen 01LK0502 ; Schlussbericht zu Nr. 3.2 - Teil I und Teil II*. Düsseldorf: Forschungsinstitut der Zementindustrie, FIZ o.J.
- [17] Ghiasvand, E.; Ramezaniapour, A.A.; Ramezaniapour, A.M.. *Influence of grinding method and particle size distribution on the properties of Portland-limestone cements*. Materials and Structures/Materiaux et Constructions 2015, S. 1273-1283
- [18] Ludwig, H.-M.. *Influence of the process technology on the manufacture of market-oriented cements*. Cement International 2003, S. 76-85, 74-88
- [19] Woywadt, C.; Henrich, B.. *Indian cements produced in MVR- and MPS-mills - impact of composite material properties*. Cement International 2018, S. 42-47
- [20] Dobala, Elena. *Randbedingungen zur Herstellung von Mörteln mit plastischer Konsistenz unter Verwendung ressourceneffizienter Zemente*. Bochum, Univ., Masterarbeit, 2022. Bochum, 2022
- [21] DIN CEN/TS Vornorm 12390-9 2006-08. *Prüfung von Festbeton, Teil 9: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand - Abwitterung ; Deutsche Fassung CEN/TS 12390-9:2006*
- [22] Bundesanstalt für Wasserbau, BAW. *Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC) - BAW-Merkblatt*. Karlsruhe, 2019
- [23] Siebel, Eberhard. *Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton: Beurteilung mittels Würfelverfahren*. Beton 1992, 42(9), S. 496-501
- [24] Schneider, Martin. *The cement industry on the way to a low-carbon future*. Cement and Concrete Research 2019, 124, 105792
- [25] Reformat, M.; Severins, Katrin; Müller, Christoph. *Granulometrische Einflüsse von Zementen auf die Dauerhaftigkeit von Beton: Auswirkungen des w/z-Wertes, P 2.09*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung, ibausil (Weimar 12.-14.09.2018). Weimar, 2018 2018
- [26] Müller, Christoph; Palm, Sebastian; Hermerschmidt, Wibke. *Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit CEM II/C-M (S-LL)- und CEM II/B-LL-Zementen: Auswertung vorhandener Studien*. Beton 2019, 69(10), S. 362-371
- [27] Müller, Christoph; Severins, Katrin. *Granulometrie der Zementhauptbestandteile – Auswirkungen auf die Dauerhaftigkeit von Betonen mit kalksteinhaltigen Zementen: Kurzfassung Schlussbericht zu IGF-Vorhaben Nr. 17853 BG ; Berichtszeitraum: 01.12.2013 bis 30.11.2016*. Düsseldorf: 2016
- [28] Setzer, M.J.. *CDF-Test-Prüfverfahren des Frost-Tau-Widerstands von Beton Prüfung mit Taumittel-Lösung (CDF): RILEM Recommendation*. Betonwerk und Fertigteil-Technik 1997, S. 100-106

- [29] — . *CIF-Test - Prüfverfahren des Frostwiderstands von Beton*. Betonwerk und Fertigteil-Technik 1998, S. 94-105
- [30] Geisenhanslücke, C.; Schmidt, M.. *Zusammenhang zwischen der Granulometrie von Feinstoffen und Rheologie von Feinstoffleimen für moderne Betone*. Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung : Tagungsbericht (Weimar 23.-26.09.2009). Weimar, 2009 2009, S. 1-1159-1-1164
- [31] Beuntner, Nancy. *Zur Eignung und Wirkungsweise calcinierter Tone als reaktive Bindemittelkomponente im Zement*. München: 2017
- [32] Severins, Katrin; Palm, Sebastian. *Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen - Bekannte Stoffe - Neue Konzepte*, . 2011
- [33] DIN EN Entwurf 197-6 2022-06. *Zement - Teil 6: Zement mit rezyklierten Baustoffen/; Deutsche und Englische Fassung prEN 197-6:2022*
- [34] DIN EN 197-5 2021-07. *Zement - Teil 5: Portlandkompositzement CEM II/C-M und Kompositzement CEM VI; Deutsche und Englische Fassung EN 197-5:2021*
- [35] VDZ. *Zahlen und Daten 2023: Zementindustrie in Deutschland ; Stand Oktober 2023*. Berlin, 2023
- [36] Müller, Christoph; Severins, Katrin. *Verwendung von feinen RC-Gesteinskörnungen bei der Zementherstellung*. Knappe, Florian; Reinhardt, Joachim; Theis, Stefanie; Kresser, Stephan; Scheidt, Julia; Breit, Wolfgang; Sachsenhauser, Bernhard K.; Lorenz, Klaus; Müller, Christop; Severins, Katri; Haufe, Johannes; Vollpracht, Anya. *Schlußberichte zum BMBF-Verbundforschungsvorhaben "R-Beton - Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation" - Schwerpunkt 1: Konzeption der neuen Werkstoffe* . Berlin, 2022 (DAfStb: Schriftenreihe 639) 2022, S. 127-182
- [37] Norm DIN CEN-TR 16563 2014-04. *Verfahrensgrundsätze zum Nachweis gleichwertiger Dauerhaftigkeit, Englische Fassung CEN/TR 16563:2013*
- [38] Gladitz, Friederike. *Untersuchungen zur Zementhydratation von CEM II/C-M (S-LL) sowie CEM II/C-M (Q-LL) Zementen in Abhängigkeit der granulometrischen Eigenschaften*. Weimar, Bauhausuniv., Bachelor-Arb., 2023
- [39] Platthaus, Rieke. *Untersuchungen zur Zementhydratation von CEM II /C-M (S-LL) Zementen sowie CEM II /C-M (Q-LL) Zementen in Abhängigkeit der granulometrischen Eigenschaften*. Weimar, Bauhausuniv., Studienarb., 2023
- [40] Bohne, T.; Wolter, A.. *Untersuchungen zur „ inneren“ Kornverteilung von Multikompositzementen*. Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg): 19.Internationale Baustofftagung Tagungsbericht (Weimar 16.-18.09.2015). Weimar,2015 2015
- [41] VDZ. *Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2022 - Environmental data of the German cement industry 2022*. Düsseldorf, 2023
- [42] Grabojs, T.M.; Cordeiro, G.C.; Filho, R.D. Toledo. *The Influence of Recycled Concrete and Clay Brick Particles on the Strength and Porosity of Cement-Based Pastes*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. *Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of*

- the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017). Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 189-194
- [43] Favier, Aurélie; Zunino, Franco; Katrantzis, Ioannis; Scrivener, Karen. *The Effect of Limestone on the Performance of Ternary Blended Cement LC3: Limestone, Calcined Clays and Cement*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017). Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 170-175
- [44] *Tätigkeitsbericht 2007-2009*. Düsseldorf: Verlag Bau u. Technik 2009
- [45] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ. *Tätigkeitsbericht 2005-2007*. Verlag Bau u. Technik 2007
- [46] Tretau, Anne; Linß, Elske; Walz, Jurij; Severins, Katrin; Gula, Nikita. *Sutracrete - ressourcenschonender, nachvollziehbarer Beton: Vortrag ibausil 2023*. ce/papers 2023, 6(6), S. 1576-1580
- [47] Tsivilis, S.; Benetatou, A.; Haniotakis E.. *Study on the contribution of the fineness on cement strength*. Zement-Kalk-Gips 1990, S. 26-29
- [48] Palm, Sebastian; Wolter, Albrecht. *Strength development of multi-composite cements with optimized void filling*. Cement International 2011, S. 56-64
- [49] Kordts, Stefan; Grube, Horst. *Steuerung der Verarbeitbarkeitseigenschaften von Selbstverdichtendem Beton als Transportbeton*. Beton 2002, S. 217-223
- [50] Knappe, Florian; Reinhardt, Joachim; Theis, Stefanie; Kresser, Stephan; Scheidt, Julia; Breit, Wolfgang; Sachsenhauser, Bernhard K.; Lorenz, Klaus; Müller, Christoph; Severins, Katrin; Haufe, Johannes; Vollpracht, Anya. *Schlussberichte zum BMBF-Verbundforschungsvorhaben "R-Beton - Ressourcenschonender Beton - Werkstoff der nächsten Generation" - Schwerpunkt 1: Konzeption der neuen Werkstoffe*. Berlin, 2022
- [51] Weil, Marcel. *Ressourcenschonung und Umweltentlastung bei der Betonherstellung durch Nutzung von Bau- und Abbruchabfällen (Schriftenreihe WAR 160)*. Zugl.: Darmstadt, TU, Diss., 2004
- [52] Müller, Anette. *Recycling von Mauerwerkbruch: Stand und neue Verwertungswege*. Ziegelindustrie 2003, S. 17-25, 42-46, 51-59
- [53] Severins, Katrin; Müller, Christoph. *R-Beton - Ressourcen schonender Beton (Teil 2): Verwendung von Brechsanden in der Zementherstellung, 37-01*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung ; Tagungsband (Weimar 12. - 14. September 2018). Weimar, 2018 2018
- [54] Bolte, G.; Zajac, M.; Ben Haha, M.. *Production optimization of composite cements with low environmental footprint: 12-03*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung; Tagungsband (Weimar 12.-14.09.2018). Weimar, 2018 2018, S. 675-684
- [55] Ludwig, Horst-Michael. *Production and properties of composite cements*. Verein Deutscher Zementwerke, VDZ (Hrsg): Process Technology of Cement Manufacturing : 6th International VDZ Congress 2009

- (Düsseldorf 30.09.-02.10.2009). - Düsseldorf : Verl. Bau und Technik, 2009 2009, S. 89-95
- [56] Maraghechi, Hamed; Avet, François; Wong, Hong; Kamyab, Hadi; Scrivener, Karen. *Performance of Limestone Calcined Clay Cement (LC3) with various kaolinite contents with respect to chloride transport*. Materials and Structures 2018, S. 17
- [57] Thienel, Karl-Christian; Beuntner, Nancy; Chucholowski, Carola; Scherb, Sebastian. *Performance of calcined clays in mineral construction materials: HV 10*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung; Tagungsband (Weimar 12.-14.09.2018). Weimar, 2018 2018, S. 175-192
- [58] Briki, Yosra; Scrivener, Karen; BenHaha, Mohsen. *Optimization of limestone addition in Portland cement: 12-04*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung; Tagungsband (Weimar 12.-14.09.2018). Weimar, 2018 2018, S. 685-693
- [59] Rickert, Jörg; Pierkes, Roland. *Optimierung von Zementen mit getemperten Tonen als Hauptbestandteil u. Dauerhaftigkeit damit hergestellter Betone: Schlussbericht ; IGF-Vorhaben 17930 N*. Düsseldorf: VDZ gGmbH 2016
- [60] Müller, Christoph; Severins, Katrin. *ÖkotoxZement: ökologisch und technisch optimierte Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen*. Klimaschutz und Anpassung an die Klimafolgen : Strategieebn, Maßnahmen und Anwendungsbeispiele / Hrsg.: Mahammadzadeh, Mahammad; Biebler, Hendrik; Bardt, Hubertus. - Köln: Institut der deutschen Wirtschaft Köln Medien GmbH, 2009. - ISBN 978-3-602-14847-9 2009, S. 68-74
- [61] Schulze, Simone. *Nutzung von natürlichen getemperten Tonen als Zementhauptbestandteil: Schlussbericht zu dem geförderten Vorhaben: 16566 N*. Düsseldorf: VDZ gGmbH 2012
- [62] Bornefeld, M.; Kluge, W.. *New way of evaluation of composite cements*. Cement International 2017, S. 62-65
- [63] Müller, Christoph; Severins, Katrin; Hauer, Bruno. *Neue Erkenntnisse zur Leistungsfähigkeit von Zementen mit den Hauptbestandteilen Kalkstein, Hüttsand und Flugasche: Teil 1, Teil 2*. Beton 2009, 59(10;11), S. 469-478, 531-537
- [64] Hermerschmidt, Wibke. *Modelle zur Beschreibung der thermomechanischen Materialeigenschaften jungen Betons (Institut für Baustoffe, Massivbau und Brandschutz: Schriftenreihe 230)*. Braunschweig, Techn. Univ., Diss., 2016
- [65] Dhandapani, Yuvaraj; Sakthivel, T.; Santhanam, Manu; Gettu, Ravindra; Pillai, Radhakrishna G.. *Mechanical properties and durability performance of concretes with Limestone Calcined Clay Cement (LC3)*. Cement and Concrete Research 2018, S. 136-151
- [66] Beuntner, Nancy. *Leistungsfähigkeit großtechnisch calcinierter Tone und deren Wirksamkeit in zementaren Systemen*. Breitenbücher, Rolf; Mark, Peter (Hrsg.): Beiträge zur 1. Jahrestagung mit 54. Forschungskolloquium : 7./8. November 2013 Ruhr-Universität Bochum (Bochum 07.-08.11.2013). Bochum: Ruhr-Universität Bochum, 2013

- (DAfStb-Forschungskolloquium ; DAfStb-Jahrestagung 54 ; 1) 2013, S. 239-244
- [67] Scrivener, Karen. *LC3 - Limestone and calcined clay concrete*. VDZ, Ed. 8th International VDZ Congress 2018; Proceedings (Duesseldorf 26–28 September 2018). Duesseldorf, 2018 2018, S. 469-502
- [68] Scrivener, Karen; Zunino, Franco; Avet, François; Hangpongpun, Wilasinee; Dekeukelaere, Anne; Grimmeissen, Laurent. *LC3 - a promising alternative*. International Cement Review 2018, S. 69-71
- [69] Kuhlmann, Karl; Ellerbrock, Hans-Georg; Sprung, Siegbert. *Korngrößenverteilung und Eigenschaften von Zement: Teil 1: Festigkeit von Portlandzement, Teil 2: Wasseranspruch von Portlandzement, Teil 3: Einflüsse des Mahlprozesses*. Zement-Kalk-Gips 1985, S. 169-178, 528-534, 13-19
- [70] VDZ. *Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton (Information Betontechnik 2014-04)*. Düsseldorf, 2014
- [71] Avet, François; Scrivener, Karen. *Investigation of the calcined kaolinite content on the hydration of Limestone Calcined Clay Cement (LC3)*. Cement and Concrete Research 2018, S. 124-135
- [72] Cavalcante, Daiana Goes; Marques, Maria Gorett dos Santos; Melo Filho, João de Almeida; Vasconcelos, Raimundo Pereira de. *Influence of the levels of replacement of portland cement by metakaolin and silica extracted from rice husk ash in the physical and mechanical characteristics of cement pastes*. Cement and Concrete Composites 2018, S. 296-306
- [73] Ferreira, S.; Herfort, D.; Damtoft, J.S.. *Influence of Clay Type on Performance of Calcined Clay – Limestone Portland Cements*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017). Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 176-182
- [74] Perez, A.; Favier, A.; Scrivener, K.; Martirena, F.. *Influence Grinding Procedure, Limestone Content and PSD of Components on Properties of Clinker-Calcined Clay-Limestone Cements Produced by Intergrinding*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017). Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 358-365
- [75] Müller, Christoph; Palm, Sebastian; Wolter, Albrecht; Bohne, Thomas. *Hydratationsgrad basierte Kennwerte zur Vorhersage der Dauerhaftigkeit von Beton: Betontechnische Berichte*. Beton 2014, 33(07-08), S. 305-309
- [76] Ludwig, H.-M.. *Herstellung und Anwendung von CO2-armen Zementen*. Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung : Tagungsbericht (Weimar 23.-26.09.2009). Weimar, 2009 2009, S. 1-0057-1-0068
- [77] Trenkwalder, J.; Ludwig, H.-M.. *Herstellung hüttensandhaltiger Zemente durch getrenntes Mahlen und Mischen im Zementwerk Karlstadt*. Zement-Kalk-Gips 2001, S. 480-491

- [78] Trümer, A.; Ludwig, H.-M.. *Herstellung frostsicherer Betone unter Verwendung calcinierter Tone als Zementhauptbestandteil: HV 50*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung; Tagungsband (Weimar 12.-14.09.2018). Weimar, 2018 2018, S. 516-522
- [79] Ehrenberg, A.. *Grindability and reactivity of stored blast furnace slag: A practical trial*. Cement International 2018, S. 48-63
- [80] Bohne,Thomas. *Granulometrische Simulation und Optimierung von Portlandkalksteinzementen*. Clausthal: Papierflieger 2016
- [81] VDZ gGmbH. *Granulometrische Optimierung klinkereffizienter Zemente - Effekte auf die Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit von Beton (DBU-Forschungsprojekt AZ 34647/01)*. Düsseldorf: 2023
- [82] Knappe, Florian; Reiners, Jochen; Vollpracht, Anja. *Ganzheitliche Bewertung von R-Beton: Ökobilanzen, Lebenszyklusbetrachtung, Umwelt*. Bauhaus-Universität Weimar, Hrsg. 20. Internationale Baustofftagung; Tagungsband (Weimar 12.-14.09.2018). Weimar, 2018 2018, S. 1651-1658
- [83] Bundesanstalt für Wasserbau, BAW. *Frostprüfung von Beton (MFB) - BAW-Merkblatt*. Karlsruhe, 2012
- [84] VDZ. *European Construction in Service of Society (ECOServe) Cluster 2 - Production and Application of Blended Cements - 5. Periodic Report: ECOServe - Cluster 2 - R(esearch), from 01.10.2003 to 30.09.2005*. Düsseldorf, 2005
- [85] Neufert, Winfried; Reuken, Ines; Weber, Georg; Müller, Christoph; Palm, Sebastian; Severins, Katrin; Graubner, Carl-Alexander. *Erforschung des Dreistoffgemisches Klinker, Hüttensand und Kalksteinmehl mit dem Ziel der Absenkung des Klinkeranteils im Zement zur Verminderung der CO₂-Emissionen in der Zementproduktion: Abschlussbericht zum DBU-Forschungsvorhaben 28790/02*. 2016
- [86] Müller-Pfeiffer, Michael; Ellerbrock, Hans-Georg; Sprung, Siegbert. *Einflüsse auf die Eigenschaften von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen*. Zement-Kalk-Gips 2000, 53(5), S. 241-250
- [87] Müller-Pfeiffer, Michael; Ellerbrock, Hans-Georg; Sprung, Siegbert. *Einflüsse auf die Eigenschaften von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen*. Zement-Kalk-Gips 2000, S. 241-250
- [88] Krüsemann,Magdalena. *Einfluss von Granulometrie und w/z-Wert auf die Eigenschaften von Zementmörteln“* . Bochum: 2017
- [89] Reschke, Thorsten; Siebel, Eberhard; Thielen, Gerd. *Einfluß der Granulometrie und Reaktivität von Zement und Zusatzstoffen auf die Festigkeits- und Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton*. Beton 1999, S. 719-724, 47-50
- [90] Teichmann, T.; Schmidt, M.. *Einfluss der Granulometrie und des Wassergehalts auf die Festigkeit und die Gefügedichtigkeit von Zementstein*. Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.): 17. Internationale Baustofftagung : Tagungsbericht (Weimar 23.-26.09.2009). Weimar, 2009 2009, S. 1-1211-1-1216
- [91] Thielen, Gerd; Reschke, Thorsten. *Einfluß der Granulometrie der Feinstoffe auf die Festigkeits- und Gefügeentwicklung von Mörtel und Beton*. 14. Internationale Baustofftagung : 20.-23. September 2000

- Weimar ; Tagungsbericht Band 1 (ibausil:14 Weimar 20.-23.09.2000) / Bauhaus-Universität Weimar (Hrsg.). - Weimar : Bauhaus-Univ. Weimar, 2000 2000, S. 289-299
- [92] VDZ. *Einfluss der chemisch-mineralogischen Zusammensetzung von Kalkstein als Zementhauptbestandteil auf die Eigenschaften von Zementen und die Dauerhaftigkeit damit hergestellter Betone: Bewilligungszeitraum: 01.07.2011-30.06.2014 ; Schlussbericht.* Düsseldorf, 2014
- [93] Moon, Gyu Don; Oh, Sungwoo; Jung, Sang Hwa; Choi, Young Cheol. *Effects of the fineness of limestone powder and cement on the hydration and strength development of PLC concrete .* Construction and Building Materials 2017, S. 129-136
- [94] Ge, Zhi; Wu, Xinsheng; Sun, Renjuan; Guan, Ynagua. *Effect of clay-brick-powder on properties of concrete.* China Building Materials Academy (Hrsg.): 14th International congress on the chemistry of cement, ICCC (Beijing 13.-16.10.2015). Beijing, 2015 2015
- [95] Pierkes, Roland; Schulze, Simone E.; Rickert, Jörg. *Durability of Concretes Made with Calcined Clay Composite Cements.* Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017). Heidelberg, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 366-371
- [96] Pierkes, Roland; Schulze, Simone E.; Rickert, Jörg. *Durability of composite cements with calcined clay.* International Cement Review 2018, S. 34-36
- [97] Bundesverband Baustoffe, Steine und Erden, BBS. *Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2040 in Deutschland.* Berlin, 2022
- [98] Dhandapani, Yuvaraj; Vignesh, K.; Raja, Thangadurai; Santhanam, Manu. *Development of the Microstructure in LC3 Systems and Its Effect on Concrete Properties.* Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017). Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 131-140
- [99] Arvaniti, Eleni C.; Juenger, Maria C.; Bernal, Susan A.; Duchesne, Josée; Courard, Luc; Leroy, Sophie; Provis, John L.; Klemm, Agnieszka; De Belie, Nele. *Determination of particle size, surface area, and shape of supplementary cementitious materials by different techniques.* Materials and Structures/Materiaux et Constructions 2015, S. 3687-3701
- [100] Müller, Christoph; Ehrenberg, Andreas. *Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit hüttensand- und flugaschereichen Zementen: Schlussbericht IGF-Vorhabens 18228 N.* Düsseldorf: 2017
- [101] Müller, C.; Severins, K.. *Dauerhaftigkeit von Betonen mit flugaschereichen Zementen.* Beton 2007/3, S. 119
- [102] Müller, Christoph; Lang, Eberhard. *Dauerhaftigkeit von Beton mit Portlandkalkstein- und Portlandkompositzementen CEM II-M (S-LL).* Beton 2005, 55(3/4/5), S. 131-138, 197-202, 266-269

- [103] Proske, Tilo; Rezvani, Moien; Palm, Sebastian; Müller, Christoph; Graubner, Carl-Alexander. *Concretes made of efficient multi-composite cements with slag and limestone*. Cement and Concrete Composites 2018, 89, S. 107-119
- [104] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ. *CEM II- und CEM III/A-Zemente im Betonbau: Nachhaltige Lösungen für das Bauen mit Beton*. Düsseldorf: Verl. Bau und Technik 2008
- [105] Khan, M.S.H.; Nguyen, Q.D.; Castel, A.. *Carbonation of Limestone Calcined Clay Cement Concrete*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. *Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017)*. Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 238-243
- [106] European Organisation for Technical Approvals, EOTA. *Calcium sulfoaluminate based cement (EAD 150001-00-0301)*. Brüssel, 2017
- [107] Kalb, Christian. *Calcined Clays – Performance as Composite Material*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. *Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017)*. Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 226-231
- [108] Flacher, A.. *Benefits and potentials of cement grinding with vertical roller mills*. Cement International 2015, S. 38-43
- [109] Yoncaci, Selin. *Assessment of the compressive strength test methods on blended cements*. Cimento ve Beton Dünyasi = Cement and Concrete World 2018, S. 59-66
- [110] Trümer, A.; Ludwig, H.-M.. *Assessment of Calcined Clays According to the Main Criteria of Concrete Durability*. Martirena, Fernando; Scrivener, Karen; Favier, Aurélie, Hrsg. *Calcined clays for sustainable concrete : Proceedings of the 2nd international conference on calcined clays for sustainable concrete (Havana City 05.-07.12.2017)*. Heidelberg: Springer, 2018 (RILEM Bookseries 16) 2018, S. 475-481

24 Präsentationen und Öffentlichkeitsarbeit

24.1 Präsentationen in VDZ-Gremien, in VDZ-Medien, im Rahmen von projektbegleitenden Meetings mit den Projektpartnern sowie von wissenschaftlichen Konferenzen (Baustoffforschung für die Praxis)

- „Granulometrische Optimierung klinkereffizienter Zemente - Effekte auf die Dauerhaftigkeit und Nachhaltigkeit von Beton“ (DBU) – z. B. mit dem VDZ, dem FIB, der Firma Loesche GmbH und der Firma Spenner GmbH & Co. KG
- „R-ZIEMENT, Ziegelhaltige Recyclingbaustoffe als Rohstoff für ressourceneffiziente Zemente in dauerhaften Betonen“ (BMBF, PTJ, FONA, FKZ: 033R263A) – z. B. bei der ReMin-Stauskonferenz 2023 in Clausthal
- „Hydratation und Porengefüge bei Verwendung RC-haltiger Zemente: Eigenschaften feindisperser Stoffe aus dem Recycling mineralischer Bauabfälle und ihre Anwendung im Zement Auswirkungen auf Wasseraufnahme, Hydratation und Porengefüge“ (BBSR/BBSR, ZukunftBau, Az. SWD-10.08.18.7-20.04) – z. B. bei den ZukunftBau-Projekttagen 2022 und 2023
- Veröffentlichung von Forschungsergebnissen in den VDZ-Mitteilungen, bei LinkIn und auf der VDZ-Homepage
- Veröffentlichung von Forschungsergebnissen in Masterarbeiten an der Ruhruniversität Bochum bzw. an der FH Aachen [20] [12]
- Präsentation „Herstellung und Anwendung klinkereffizienter R-Zemente“, Kolloquium „Nachhaltig effizient - Ressourcen des zukünftigen Bauens“ ber der BAM, Berlin, 18.01.2024

24.2 Präsentationen und wissenschaftliche Arbeiten am FIB sowie im Rahmen von projektbegleitenden Meetings mit den Projektpartnern

- Posterwettbewerb und Elevator Pitch zum DBU-Forschungsprojekt am FIB: Luise Wedekind (2021) Die Mischung macht`s. Wie die Faszination für ein "staubtrockenes Thema" dazu beiträgt, die globale Erwärmung aufzuhalten. Wissenschaftstag der Bauhaus-Universität Weimar. Gesamtpreis der Jury für die beste Wissenschaftskommunikation.
- Bachelorarbeit am FIB: Grüneberg, E. (2021) Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit von CEM II /C-M (S-LL) Zementen sowie CEM II /C-M (Q-LL) Zementen in Mörteln und Betonen. Bauhaus-Universität Weimar. Untersuchungen über das eigentliche
- Wissenschaftliche Arbeiten am FIB: Hoffmann, C. (2022) Lasergranulometrische und elektroakustische Untersuchung Klinkereffizienten Zementen in organischen Lösemitteln [Wissenschaftliches Kolleg]. Bauhaus-Universität Weimar.

24.3 Beiträge zur IBAUSIL September 2023

- Wedekind, L.; Ludwig, H.-M.; Severins, K.; Müller, C. (2023) Einfluss der Granulometrie von klinkereffizienten Zementen auf die Hydratation. Internationale Baustofftagung in Weimar. (<http://dx.doi.org/10.1002/cepa.2899>) [5]
- Severins, K.; Müller, C.; Wedekind, L; Ludwig, H.-M.. (2023) Granulometrische Einflüsse klinkereffizienter Zemente auf den Frost- und Frost-Tausalz widerstand von Beton. Internationale Baustofftagung in Weimar.

25 **Unterschriften**

VDZ Technology gGmbH
Postfach 30 10 63, 40410 Düsseldorf
Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf



Prof. Dr.-Ing. Christoph Müller

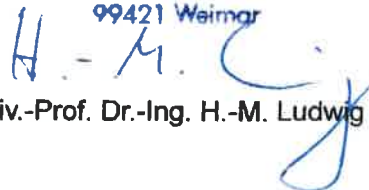
Düsseldorf, 29.02.2024

Ort, Datum

Rechtsverbindliche Unterschrift des Leiters
und Stempelabdruck der Forschungsstelle

VDZ Technology gGmbH

Bauhaus-Universität-Weimar
F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde
Coudraystraße 11
99421 Weimar



Univ.-Prof. Dr.-Ing. H.-M. Ludwig

Weimar, 29.02.2024

Ort, Datum

Rechtsverbindliche Unterschrift des Leiters
und Stempelabdruck der Forschungsstelle

Bauhaus-Universität Weimar
F.A. Finger-Institut für Baustoffkunde