

Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Erforschung des Dreistoffgemisches Klinker, Hüttensand und Kalksteinmehl mit dem Ziel der Absenkung des Klinkeranteils im Zement zur Verminderung der CO₂-Emissionen in der Zementproduktion

mit dem Aktenzeichen 28790/02

gefördert von der **Deutschen Bundesstiftung Umwelt**

Spenner Zement GmbH & Co. KG

Winfried Neufert, Ines Reuken, Georg Weber

VDZ gGmbH - Abteilung Betontechnik

Christoph Müller, Sebastian Palm, Katrin Severins

TU Darmstadt - Fachgebiet Massivbau

Carl-Alexander Graubner, Tilo Proske, Moien Rezvani

vom 31.8.2016

Inhaltsverzeichnis

1	Verzeichnis von Bildern und Tabellen	4
1.1	Bilder	4
1.2	Tabellen	6
2	Abkürzungsverzeichnis	7
3	Zusammenfassung	8
4	Einleitung	9
5	Versuche und Ergebnisse - Allgemein	11
5.1	Ausgangsstoffe	11
5.1.1	Zemente und Zementhauptbestandteile	11
5.1.2	Gesteinskörnung	11
5.1.3	Chemisch mineralogische Zusammensetzung	12
5.1.4	Granulometrie	12
6	Versuche und Ergebnisse – VDZ gGmbH	12
6.1	Mörteleigenschaften	12
6.2	Betonversuche	15
6.2.1	Allgemeines	15
6.2.2	Frischbetoneigenschaften	16
6.2.3	Betondruckfestigkeit	16
6.2.4	Chlorideindringwiderstand	18
6.2.5	Karbonatisierung	19
6.2.6	Frostwiderstand	21
6.2.7	Frost-Tausalzwiderstand	25
7	Versuche und Ergebnisse – TU Darmstadt	26
7.1	Allgemeines	26
7.2	Vorversuche an Feinbetonen und Betonen aus Laborzementen	26
7.2.1	Versuche an Feinbeton	26
7.2.2	Versuche an Beton	29
7.2.3	Diskussion der Ergebnisse	32
7.3	Prüfungen an Betonen mit Werkszementen	32
7.3.1	Allgemeines	32
7.3.2	Frischbetoneigenschaften	33
7.3.3	Druckfestigkeitsentwicklung und Arbeitslinie	34
7.3.4	Spaltzugfestigkeit und Elastizitätsmodul	35
7.3.5	Kriechen und Schwinden	36
7.3.6	Karbonatisierungswiderstand	37
7.3.7	Robustheit	38
7.4	Traglastversuche an Bauteilen	40
8	Vergleich der Ergebnisse	41
8.1	Vergleich zwischen den Forschungsstellen	41
8.2	Vergleich zwischen Labor- und Werkszementen	42
9	Ökobilanzierung	43

9.1	Grundlagen Nachhaltigkeitsbewertung	43
9.1.1	Die Methodik der Ökobilanzierung	44
9.1.2	Phasen einer Ökobilanz	44
9.2	Durchgeführte Ökobilanzierung	45
9.2.1	Allgemein	45
9.2.2	Bilanzierung der Zemente	46
9.2.3	Bilanzierung der Betone	47
10	Technische Bewertung der Ergebnisse	49
11	Ökobilanzielle Bewertung der Ergebnisse	50
12	Ökonomische Bewertung der Ergebnisse	51
13	Umsetzung der Ergebnisse bei der Firma Spenner Zement	52
14	Literatur	53
15	Unterschriften	55

1 Verzeichnis von Bildern und Tabellen

1.1 Bilder

Bild 1	Verfügbarkeit von Hüttensand in Deutschland [2], [3]	9
Bild 2	Verfügbarkeit von Steinkohlen-flugasche in Deutschland [4], [5]	9
Bild 3	Untersuchungsrahmen, dargestellt im Dreistoffsystem des Zementes, zusammengesetzt aus Portlandzementklinker (K), Hüttensand (S) und Kalkstein (LL)	10
Bild 4	Sieblinien (ist-Werte)	11
Bild 5	Festigkeitsentwicklung von Mörteln mit w/z = 0,50	14
Bild 6	Festigkeitsentwicklung von Mörteln mit w/z = 0,40 (Referenzen mit w/z = 0,50)	14
Bild 7	Festigkeitsentwicklung von Mörteln mit w/z = 0,35 (Referenzen mit w/z = 0,50)	15
Bild 8	Ausbreitmaße	16
Bild 9	Luftgehalte	16
Bild 10	Druckfestigkeitsentwicklung der Betone B1 bis B3	17
Bild 11	Druckfestigkeit der Betone B4	17
Bild 12	Chlorideindringwiderstand der Betone B1 bis B3	18
Bild 13	Karbonatisierungstiefen von Feinbetonen mit w/z = 0,50 (7d VL)	19
Bild 14	Karbonatisierungstiefen von Feinbetonen mit w/z = 0,40 (7d VL)	19
Bild 15	Karbonatisierungstiefen von Feinbetonen mit w/z = 0,35 (7d VL)	19
Bild 16	Karbonatisierungstiefen von Feinbetonen mit w/z = 0,50 (28d VL)	20
Bild 17	Karbonatisierungstiefen von Feinbetonen mit w/z = 0,40 (28d VL)	20
Bild 18	Karbonatisierungstiefen von Feinbetonen mit w/z = 0,35 (28d VL)	20
Bild 19	Karbonatisierungstiefen von Feinbetonen nach 140d Hauptlagerung	20
Bild 20	Druckfestigkeit von Feinbetonen nach 7d bzw. 28d Vorlagerung	21
Bild 21	Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten w/z = 0,50; 28d Vorlagerung	22
Bild 22	Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten w/z = 0,40 (Referenzen mit w/z = 0,50); 28d Vorlagerung	22
Bild 23	Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten w/z = 0,35 (Referenzen mit w/z = 0,50); 28d Vorlagerung	23
Bild 24	Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten w/z = 0,50; 90d Vorlagerung	23
Bild 25	Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten w/z = 0,40 (Referenzen mit w/z = 0,50); 90d Vorlagerung	24
Bild 26	Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten w/z = 0,35 (Referenzen mit w/z = 0,50); 90d Vorlagerung	24
Bild 27	Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen im CDF-Versuch	25
Bild 28	Ausbreitmaße der Feinbetone mit Hüttensand S1	27
Bild 29	7- und 28d-Druckfestigkeit der Feinbetone mit Hüttensand S1	28

Bild 30	7- und 28d-Druckfestigkeit der Feinbetone mit Hüttensanden S1, S2 und S3	28
Bild 31	Karbonatisierungstiefe der Feinbetone mit Hüttensand S1	29
Bild 32	Karbonatisierungstiefe der Feinbetone mit Hüttensanden S1, S2 und S3	29
Bild 33	Ausbreitmaß und Fließmittelbedarf der Betone mit Hüttensand S1	30
Bild 34	Plastische Viskosität der Frischbetone mit Hüttensand S1	31
Bild 35	Druckfestigkeitsentwicklung der Betone B1 und B3	31
Bild 36	Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und dem Karbonatisierungswiderstand der untersuchten Feinbetone	32
Bild 37	Vergleich der gemessenen Karbonatisierungswiderstände mit dem Bewertungshintergrund aus [11]	32
Bild 38	Ausbreitmaß und Luftporengehalt der untersuchten Betone mit Werkszementen	34
Bild 39	Plastische Viskosität und Fließmittelbedarf der untersuchten Betone mit Werkszementen	34
Bild 40	Druckfestigkeit und Luftporengehalt der Betone mit Werkszementen	35
Bild 41	Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Betonzylinderproben	35
Bild 42	Darstellung des E-Moduls	35
Bild 43	Darstellung der Spaltzugfestigkeit	35
Bild 44	Verlauf der Schwindverformungen der Referenzbetone und der Betone mit klinkereffizienten Zementen	37
Bild 45	Kriechverformungen der Referenzbetone und der Betone mit klinkereffizienten Zementen	37
Bild 46	Mittlere Karbonatisierungstiefen	37
Bild 47	Ausbreitmaß und plastische Viskosität in Abhängigkeit des Wassergehaltes	39
Bild 48	Druckfestigkeit und Luftporengehalt in Abhängigkeit des Wassergehaltes	39
Bild 49	Karbonatisierungstiefe in Abhängigkeit des Wassergehaltes	39
Bild 50	Ausbreitmaß und plastische Viskosität in Abhängigkeit der Frischbetontemperatur	39
Bild 51	Druckfestigkeit und Luftporengehalt in Abhängigkeit der Frischbetontemperatur	39
Bild 52	Karbonatisierungstiefe in Abhängigkeit der Frischbetontemperatur	40
Bild 53	Rissbildung und Versagensart der untersuchten bewehrten Balken	41
Bild 54	Vergleich der Betondruckfestigkeiten TUDA / VDZ	42
Bild 55	Vergleich der Druckfestigkeiten Laborzemente / Werkszemente	43
Bild 56	Definition „Nachhaltiges Bauen“ des DGNB [15]	43
Bild 57	Vorgehensweise bei einer Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040 und 14044 [16, 17]	45
Bild 58	Treibhauspotential und Gesamtenergiebedarf der analysierten Zemente mit und ohne Allokation	46
Bild 59	Gegenüberstellung der Umweltwirkungen der Referenz- und Laborzemente aus K-S-LL bezogen auf Durchschnittszement für Deutschland	47
Bild 60	Treibhauspotential der untersuchten Betone aus Werkszementen	48

Bild 61	Gesamtenergiebedarf der untersuchten Betone aus Werkszementen	48
----------------	---	----

1.2 Tabellen

Tabelle 1	Abkürzungsverzeichnis	7
Tabelle 2	Fließmittelbedarf und Ausbreitmaß	13
Tabelle 3	Betonrezepturen	15
Tabelle 4	Feinbetonrezepturen	27
Tabelle 5	Betonrezepturen	30
Tabelle 6	Mischungsentwürfe der Betone mit Werkszementen für die Prüfung der bemessungsrelevanten Betoneigenschaften	33
Tabelle 7	Gegenüberstellung der gemessenen und rechnerischen Traglasten	41

2 Abkürzungsverzeichnis

Tabelle 1 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
1	2
Bezeichnungen der Zemente und Zementhauptbestandteile	
CEM I 52,5 R	Portlandzement der Firma Spenner Zement GmbH
CEM I 42,5 N	Portlandzement der Firma Spenner Zement GmbH
CEM III/A 42,5 N	Hochofenzement der Firma Spenner Zement GmbH
LL / LL 4200	Kalkstein aus dem Vorkommen Brilon (ca. 4200 cm ² /g nach Blaine)
LL 4800	Kalkstein aus dem Vorkommen Brilon (ca. 4800 cm ² /g nach Blaine)
S1	Hüttensand für Laborzemente mit einer Feinheit von ca. 4800 cm ² /g nach Blaine
S2	Hüttensand für Laborzemente mit einer Feinheit von ca. 3750 cm ² /g nach Blaine
S3	Hüttensand für Laborzemente mit einer Feinheit von ca. 6000 cm ² /g nach Blaine
SW	Hüttensand für Werkszemente mit einer Feinheit von ca. 5000 cm ² /g nach Blaine
Zementbezeichnungen	
CEM (50K,30S1,20LL)	Zement mit 50 M.-% CEM I, 30 M.-% Hüttensand S1, 20 M.-% Kalkstein LL 4200
Betonbezeichnungen, VDZ und TU Darmstadt	
B1	Beton mit einem Wasserzementwert von 0,50
B2	Beton mit einem Wasserzementwert von 0,40
B3	Beton mit einem Wasserzementwert von 0,35
B4	Beton mit künstlichen Luftporen und Wasserzementwerten zwischen 0,50 und 0,35
FB	Feinbeton mit einem Größtkorn von 8 mm, ansonsten Zusammensetzung wie Mörtel

3 Zusammenfassung

Die Zementproduktion verursacht etwa 5 % der weltweiten von Menschen verursachten CO₂-Emissionen. Eine weitere Reduzierung dieser CO₂-Emissionen kann ggf. durch die Verwendung neuer Zemente unter ressourcenschonendem Einsatz von Portlandzementklinker in Kombination mit weiteren Zementhauptbestandteilen erreicht werden.

Eine Möglichkeit, den Klinkergehalt im Zement unter 50 M.-% zu senken (neben den heute bereits gängigen Zementen mit Klinkergehalten in dieser Größenordnung und niedriger – z. B. CEM III/A bzw. CEM III/B), wird in der Kombination der drei Hauptbestandteile Klinker, Kalkstein und Hüttensand sowie einer auf diese Zemente abgestimmten Betontechnologie gesehen. Das Untersuchungsfeld dieses Forschungsvorhabens ist durch einen Klinkergehalt von 20-65 M.-%, Kalksteingehalte von 20-50 M.-% und Hüttensandgehalte zwischen 5 und 45 M.-% gekennzeichnet.

Es wurden Versuche zur Verarbeitbarkeit, zu mechanischen Eigenschaften und Dauerhaftigkeitskennwerten von Betonen mit Labor- und Werkszementen mit unterschiedlichen Kalkstein- und Hüttensandqualitäten und -gehalten durchgeführt. Es konnte gezeigt werden, dass Zemente im Grenzbereich der derzeit vorgesehenen Erweiterung der DIN EN 197-1 vergleichbare Frischbetoneigenschaften, gute mechanische Eigenschaften und, mit Ausnahme des Frost-Tausalz-Widerstandes, sehr gute Dauerhaftigkeitseigenschaften im Rahmen üblicher Betontechnologie aufweisen. Für Zemente deutlich jenseits des Rahmens der derzeit vorgesehenen Erweiterung der DIN EN 197-1 gelten prinzipiell die Erkenntnisse des vorangegangenen Forschungsvorhabens zu Zementen im Zweistoffsystem K-LL: Diese K-S-LL-Zemente sind ebenfalls für die Herstellung von Konstruktionsbeton geeignet, wenn anspruchsvolle verfahrenstechnische Maßnahmen im Zementwerk und ebenso anspruchsvolle betontechnologische Maßnahmen (wasserarmer Beton mit entsprechenden Zusatzmitteldosierungen) in der Betonherstellung beachtet werden. Die Robustheit derartiger Systeme im Baubetrieb bedarf weiterhin einer zusätzlichen Absicherung. Werden die genannten Bedingungen eingehalten, kann die im vorangegangenen Forschungsvorhaben definierte Grenze von 50 M.-% Klinker im Zement weiter gesenkt werden. Damit sinken auch das Treibhauspotential sowie der Gesamtenergiebedarf für Herstellung einer m³ Beton:

Die Umweltwirkungen der untersuchten Betone konnten durch Substitution des Portlandzementklinkers mit Hüttensand und Kalkstein weiter verbessert werden. Das Treibhauspotential des Betons mit einem Zement im Grenzbereich der derzeit vorgesehenen Erweiterung der DIN EN 197-1 liegt bei konventionellen betontechnologischen Randbedingungen 30% unter dem Treibhauspotential eines Betons mit EPD Durchschnittszementes. Für Zemente deutlich jenseits des Rahmens der derzeit vorgesehenen Erweiterung der DIN EN 197-1 könnte eine weitere Reduzierung der CO₂-Emission erreicht werden: Bei angepassten betontechnologischen Maßnahmen beträgt die Reduzierung des Treibhauspotentials von Betonen mit Zementen mit 35 – 20 M.-% Klinker bis zu 55% gegenüber dem EPD: Durchschnittszement.

4 Einleitung

Die wesentliche Ursache der globalen Erwärmung und der daraus resultierenden nicht abzuschätzenden Folgen liegt nach dem gegenwärtigen wissenschaftlichen Verständnis in der Verstärkung des natürlichen Treibhauseffektes durch menschliches Einwirken. Insbesondere die Anreicherung des Treibhausgases Kohlendioxid (CO_2) in der Atmosphäre sorgt dafür, dass weniger Wärmestrahlung von der Erdoberfläche in das Weltall abgestrahlt werden kann. Neben der globalen Erwärmung zählt die Versauerung der Meere zu den Hauptfolgen der menschlichen Emissionen des Treibhausgases Kohlendioxid.

Die Zementproduktion verursacht etwa 5 % der weltweiten von Menschen verursachten CO_2 -Emissionen. Zur Gesamtbetonproduktion in Deutschland gibt es keine statistischen Erhebungen. Die Betonproduktion Deutschlands kann aber beispielsweise aus dem Zementverbrauch (27 Mio. t in 2014) und dem durchschnittlichen Zementgehalt pro m^3 Transportbeton (294 kg/m^3) zu rd. 92 Mio. m^3 pro Jahr oder aus dem Absatz der Transportbetonindustrie (46,8 Mio. m^3 in 2014) und dem Anteil Transportbeton an der Gesamtbetonproduktion (rd. 58%) zu 81 Mio. m^3 abgeschätzt werden. Unter der Annahme eines mit der Herstellung des Betons verbundenen durchschnittlichen Treibhauspotentials (GWP) von ca. $200 \text{ kg CO}_2\text{-Äq./m}^3$ entspricht dies einer Umweltwirkung von 17 Mio. t $\text{CO}_2\text{-Äq.}$ pro Jahr. Bei einer Reduzierung des Treibhauspotentials um beispielsweise 20 % ergäbe sich eine Minderung von 3,4 Mio. t $\text{CO}_2\text{-Äq.}$ pro Jahr allein in Deutschland. Eine Reduzierung der Umweltwirkung von Beton in dieser Größenordnung kann nur durch den Einsatz neuer Zemente unter gezieltem bzw. ressourcenschonendem Einsatz von Portlandzementklinker in Kombination mit weiteren Zementhauptbestandteilen erreicht werden. Wie in [1] gezeigt wurde, sind die reaktiven Hauptbestandteile Hüttensand und Flugasche nur begrenzt verfügbar und werden bereits zum überwiegenden Teil verwendet (**Bild 1, Bild 2**).

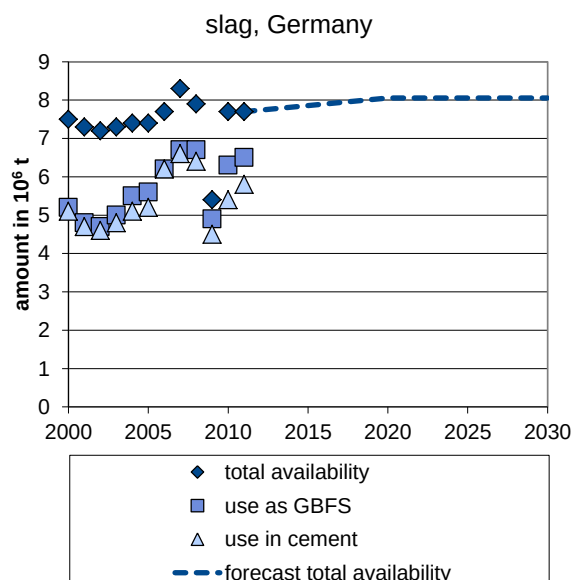


Bild 1 Verfügbarkeit von Hüttensand in Deutschland [2], [3]

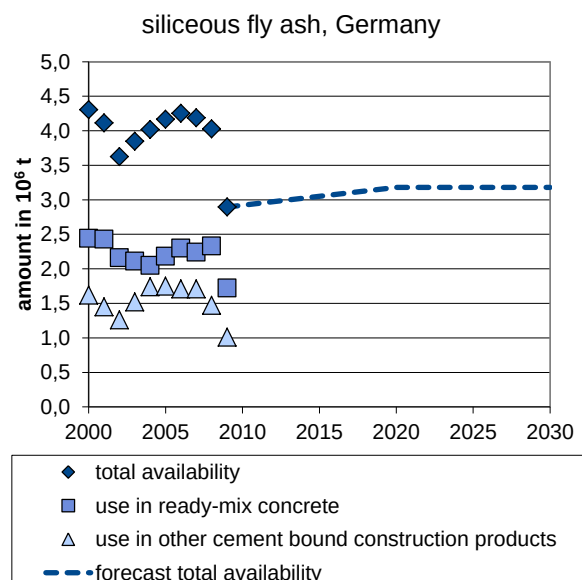


Bild 2 Verfügbarkeit von Steinkohlenflugasche in Deutschland [4], [5]

Eine weitere deutliche Reduzierung des Klinkergehalts im Zement und eine damit verbundene CO_2 -Minderung könnte ggf. über die Verwendung von Kalkstein als nahezu unbegrenzt

verfügbarem aber inertem Hauptbestandteil erfolgen. Wie im vorangegangenen Forschungsvorhaben [6] gezeigt, ist der Einsatz von Kalkstein selbst bei Verwendung einer angepassten Betontechnologie begrenzt. Eine Möglichkeit, den Klinkergehalt im Zement unter 50 M.-% zu senken, wird in der Kombination der drei Hauptbestandteile Klinker, Kalkstein und Hüttensand sowie einer auf solche Zemente abgestimmten Betontechnologie gesehen. Untersuchungen an Kompositzementen aus Klinker-Hüttensand-Kalkstein mit $S > 30\%$ wurden bereits im Rahmen des ECOserve Projektes durchgeführt [7, 8]. Die Betontechnologie wurde allerdings nicht angepasst.

Das Untersuchungsfeld dieses Forschungsvorhabens ist durch einen Klinkergehalt von 20-65 M.-%, Kalksteingehalte von 20-50 M.-% und Hüttensandgehalte zwischen 5 und 45 M.-% gekennzeichnet (vgl. **Bild 3**). Mit diesen Zementen könnte eine weitere Absenkung der CO_2 -Emission im Beton um bis zu 60% gegenüber einem Beton mit dem deutschen EPD-Durchschnittszement erreicht werden.

◆ mittlere Zusammensetzung in Deutschland
2010 (Hauptbestandteile außer K und LL als S
gerechnet)

◉ Werkzemente

◆ Laborzemente

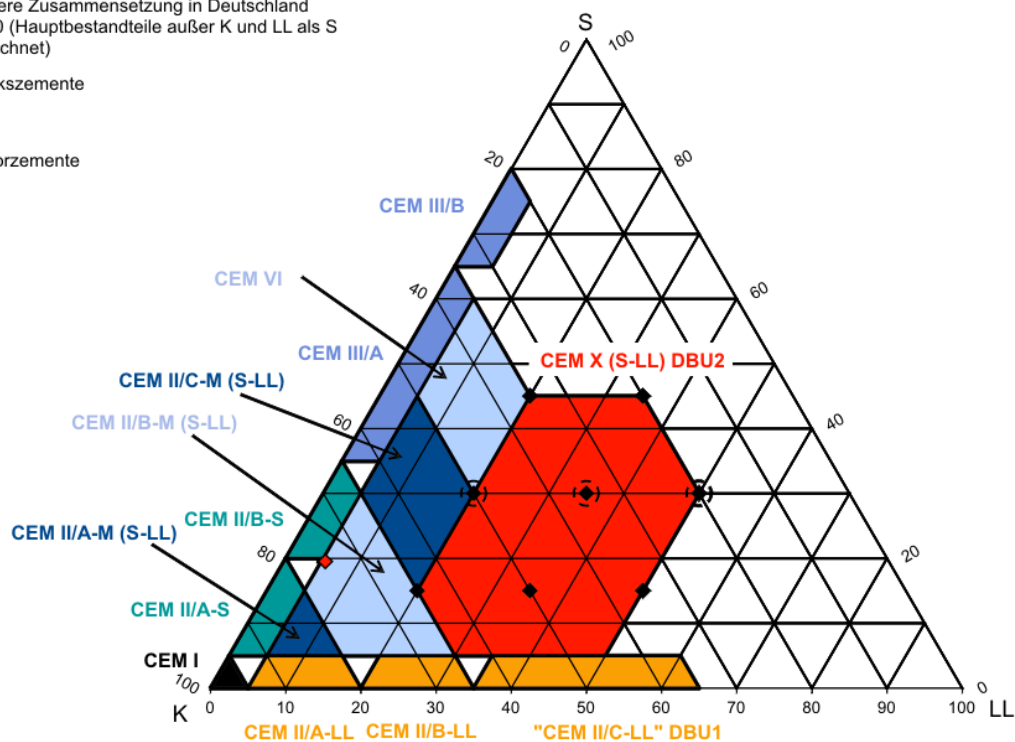


Bild 3 Untersuchungsrahmen, dargestellt im Dreistoffsystem des Zementes, zusammengesetzt aus Portlandzementklinker (K), Hüttensand (S) und Kalkstein (LL)

Die Ergebnisse werden, wie in [6], ökobilanziell bewertet.

5 Versuche und Ergebnisse - Allgemein

5.1 Ausgangsstoffe

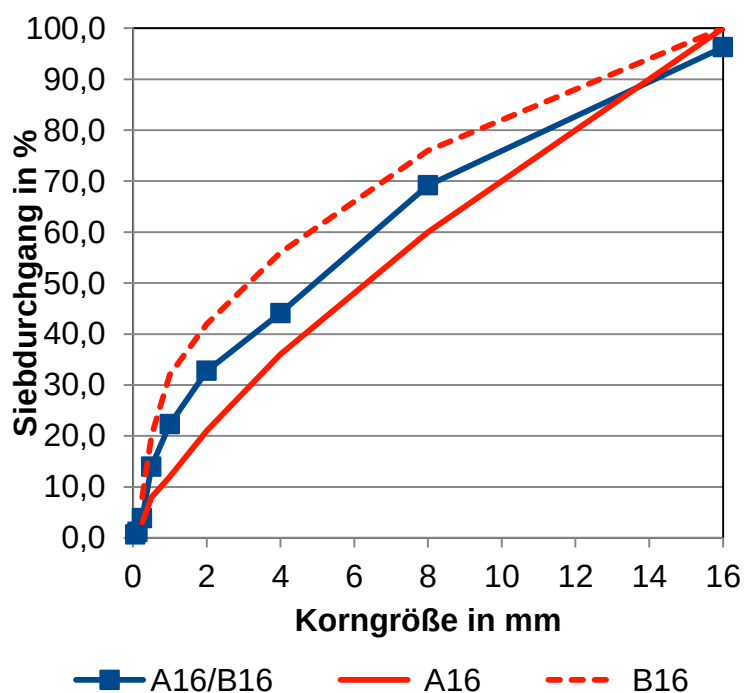
5.1.1 Zemente und Zementhauptbestandteile

Es wurden je ein CEM I 52,5 R, ein CEM I 42,5 N und ein CEM III/A 42,5 N als Referenzzemente verwendet. Die Prü fzemente wurden durch getrennte Mahlung und anschließendes Mischen des CEM I 52,5 R mit verschiedenen Hüttensanden sowie Kalkstein hergestellt. Für die Mörtelversuche erfolgte das Mischen der Komponenten im Labor. Die Versuche wurden zunächst mit dem Hüttensand S1 durchgeführt. Ausgewählte Zemente wurden, um die Auswirkungen unterschiedlicher Hüttensandqualitäten zu beurteilen, mit den Hüttensanden S2 und S3 durchgeführt.

Für die Betonversuche wurden werkseitig produzierte Zemente verwendet.

5.1.2 Gesteinskörnung

Für die Mörtelversuche wurde CEN-Normsand mit maximaler Korngröße von 2,0 mm verwendet. Die Betonversuche erfolgten mit praxisüblicher Gesteinskörnung. Neben Rheinsand und Rheinkies kam Quarzmehl (W3) zum Einsatz, um die Verarbeitbarkeit des Frischbetons zu verbessern. Die Sieblinien können **Bild 4** entnommen werden. Die Wasseraufnahme der Gesteinskörnungen wurde bei der Festlegung der der Zugabewassermenge berücksichtigt.



Siebweite in mm	A16/B16
1	2
0,063	0,7
0,125	1,2
0,25	3,9
0,5	14,0
1	22,3
2	32,8
4	44,1
8	69,2
16	96,3
32	100,0

Bild 4 Sieblinien (ist-Werte)

5.1.3 Chemisch mineralogische Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung der Referenzzemente, der Hüttensande, der Kalksteine sowie der werkseitig produzierten Prüfzemente wurde mit der Röntgenfluoreszenzanalyse, einem Alternativverfahren nach DIN EN 196-2, bestimmt. Die Zementzusammensetzungen sind bezogen auf den sulfatträgerhaltigen Zement angegeben. Der Gesamtgehalt an organischem Kohlenstoff (TOC-Gehalt) des Kalksteins wurde gemäß DIN EN 13639 ermittelt. Der Tongehalt des Kalksteins wurde mit dem Methylenblauverfahren nach DIN EN 933-9 bestimmt.

Die Abweichung zwischen der Sollzusammensetzung und der tatsächlichen Zusammensetzung der Werkszemente lag bei rd. 1 M.-%.

5.1.4 Granulometrie

Die Korngrößenverteilungen der Zementhauptbestandteile und der Zemente wurden mittels Lasergranulometrie (CILAS 1064) bestimmt.

6 Versuche und Ergebnisse – VDZ gGmbH

6.1 Mörtелеigenschaften

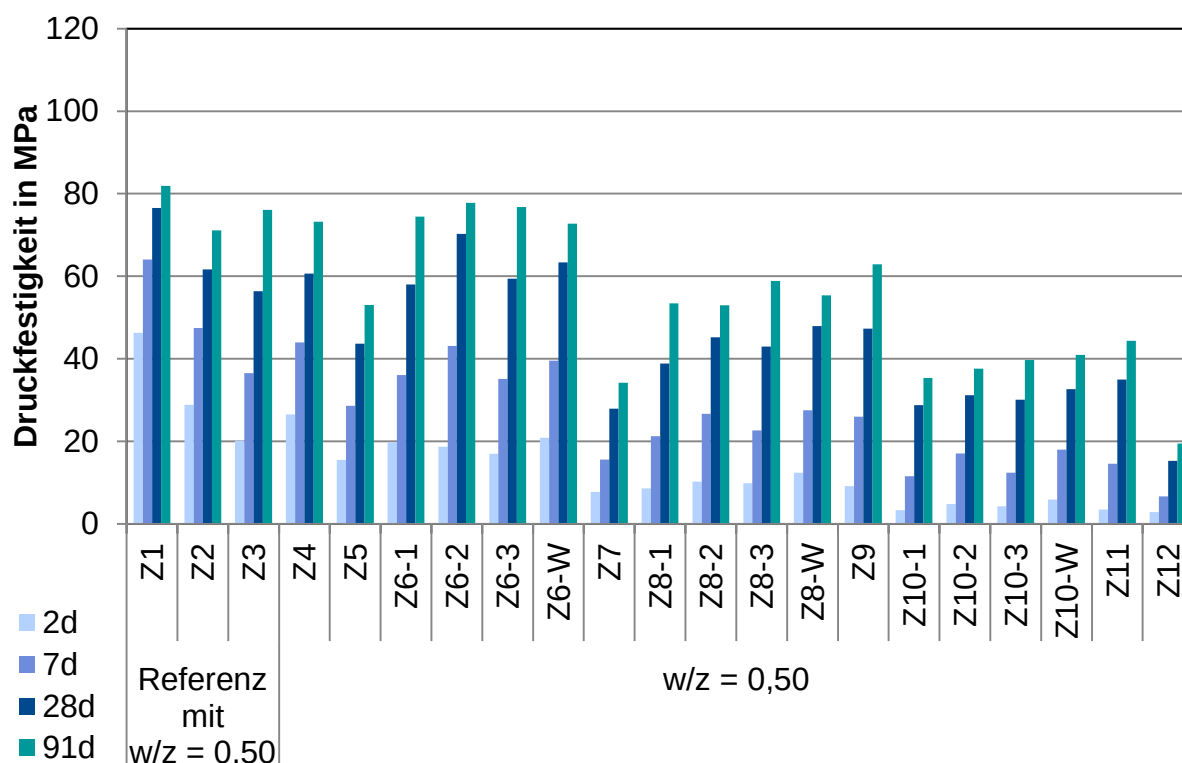
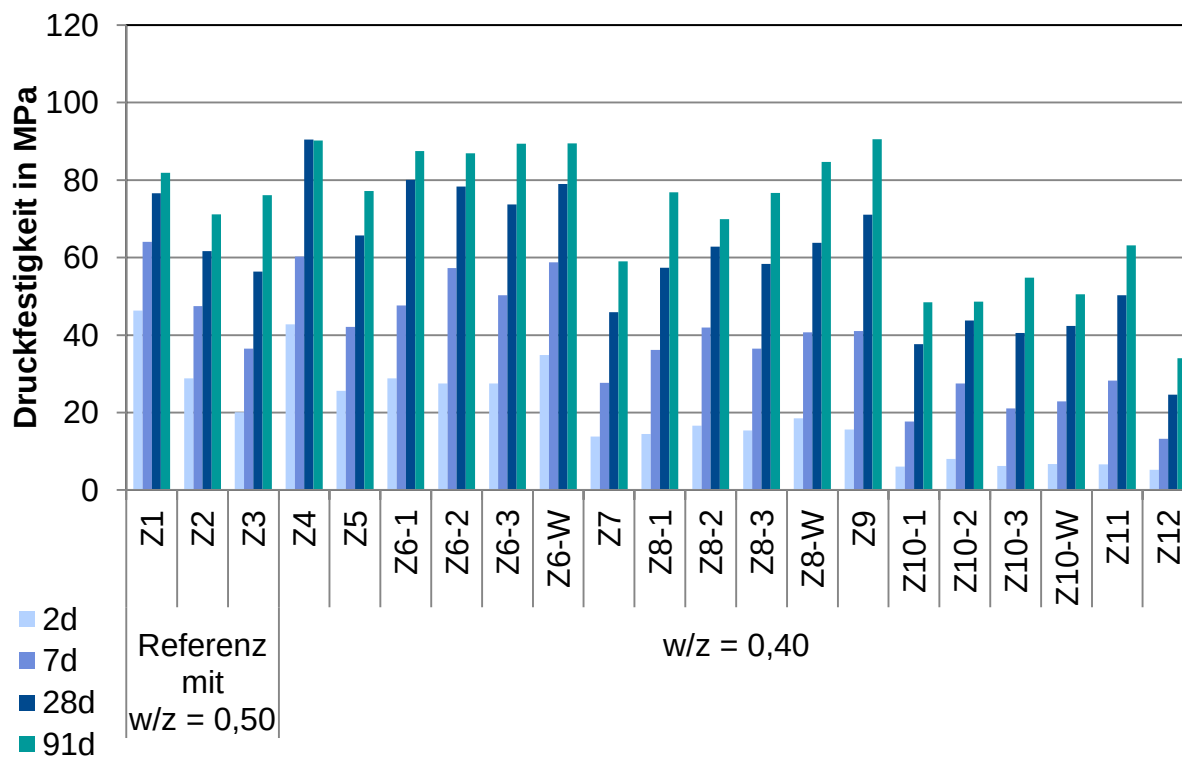
Die Druckfestigkeit sowohl von Normmörteln als auch von Mörteln mit abweichenden Zementgehalten und Wasserzementwerten wurde nach 2, 7, 28 und 91 Tagen gemäß DIN EN 196-1 an Prismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm geprüft. Normmörtel mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ wurden gemäß DIN EN 196-1 prinzipiell ohne die Verwendung von Fließmitteln mit einem Zementgehalt von 450 g je Mischung hergestellt. Mörtel mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,40$ wurden, um einen konstanten Leimgehalt von rd. 420 l/m³ beizubehalten, mit einem Zementgehalt von 500 g je Mischung hergestellt, Mörtel mit $w/z = 0,35$ mit 535 g je Mischung. Ein PCE-basiertes Fließmittel wurde verwendet, um ein konstantes Ausbreitmaß von 160 ± 10 mm zu erzielen. Den Fließmittelbedarf und die zugehörigen Ausbreitmaße zeigt **Tabelle 2**.

Tabelle 2 Fließmittelbedarf und Ausbreitmaß

Zement	Kürzel	Fließmittelbedarf in % v. Z.			Ausbreitmaß in mm		
		w/z = 0,50	w/z = 0,40	w/z = 0,35	w/z = 0,50	w/z = 0,40	w/z = 0,35
1	2	3	4	5	6	7	8
CEM I 52,5 R	Z1	0,00	nicht hergestellt		134,5	nicht hergestellt	
CEM I 42,5 N	Z2	0,00			143,0		
CEM III/A 42,5 N	Z3	0,00			160,1		
CEM (65K,15S1,20LL)	Z4	0,00	0,30	0,53	158,5	160,0	168,5
CEM (50K,15S1,35LL)	Z5	0,00	0,25	0,41	160,5	163,0	164,0
CEM (50K,30S1,20LL)	Z6-1	0,00	0,25	0,41	169,4	158,5	163,0
CEM (50K,30S2,20LL)	Z6-2	0,00	0,21	0,43	170,5	164,5	168,5
CEM (50K,30S3,20LL)	Z6-3	0,00	0,23	0,41	159,5	170,0	163,0
CEM (50K,30SW,20LL)	Z6-W	0,00	0,24	0,40	164,5	161,5	168,0
CEM (35K,15S1,50LL)	Z7	0,00	0,25	0,33	165,8	160,0	163,5
CEM (35K,30S1,35LL)	Z8-1	0,00	0,25	0,36	169,5	168,5	169,0
CEM (35K,30S2,35LL)	Z8-2	0,00	0,21	0,35	157,5	164,5	155,3
CEM (35K,30S3,35LL)	Z8-3	0,00	0,23	0,33	164,5	170,0	171,0
CEM (35K,30SW,35LL)	Z8-W	0,00	0,20	0,28	165,5	186,5	169,5
CEM (35K,45S1,20LL)	Z9	0,00	0,25	0,35	166,5	168,0	161,5
CEM (20K,30S1,50LL)	Z10-1	0,00	0,17	0,26	164,5	167,0	166,0
CEM (20K,30S2,50LL)	Z10-2	0,00	0,18	0,27	166,5	164,0	169,5
CEM (20K,30S3,50LL)	Z10-3	0,00	0,18	0,25	156,0	162,0	165,0
CEM (20K,30SW,50LL)	Z10-W	0,00	0,18	0,25	173,0	166,0	168,0
CEM (20K,45S1,35LL)	Z11	0,00	0,20	0,26	177,5	169,5	166,0
CEM (20K,15S1,65LL)	Z12	0,00	0,17	0,26	167,0	163,5	164,5

Die Mörteldruckfestigkeiten sind in **Bild 5** bis **Bild 7** dargestellt. Die Festlegung der Zemente, die mit verschiedenen Hüttensandqualitäten hergestellt wurden, erfolgte anhand folgender Kriterien:

- Z6 zeigte in einem Normmörtel mit w/z = 0,50 vergleichbare Festigkeiten wie die Referenzzemente Z2 und Z3 im Normmörtel mit w/z = 0,50. Darüber hinaus stellt Z6 die „Grenzzusammensetzung“ zwischen den zukünftig in DIN EN 197-1 genormten Zementen CEM II/C-M (S-LL) und CEM VI sowie dem in **Bild 3** rot dargestelltem neuen Zusammensetzungsfeld dar.
- Z8 zeigte in einem Mörtel mit w/z = 0,40 vergleichbare Festigkeiten wie die Referenzzemente Z2 und Z3 im Normmörtel mit w/z = 0,50.
- Z10 weist mit einem Kalksteingehalt von 50 M.-% den in [6] ermittelten maximalen Kalksteingehalt für Zemente auf, die mit angepasster Betontechnologie dauerhafte Betone ergeben können.

Bild 5 Festigkeitsentwicklung von Mörteln mit $w/z = 0,50$ Bild 6 Festigkeitsentwicklung von Mörteln mit $w/z = 0,40$ (Referenzen mit $w/z = 0,50$)

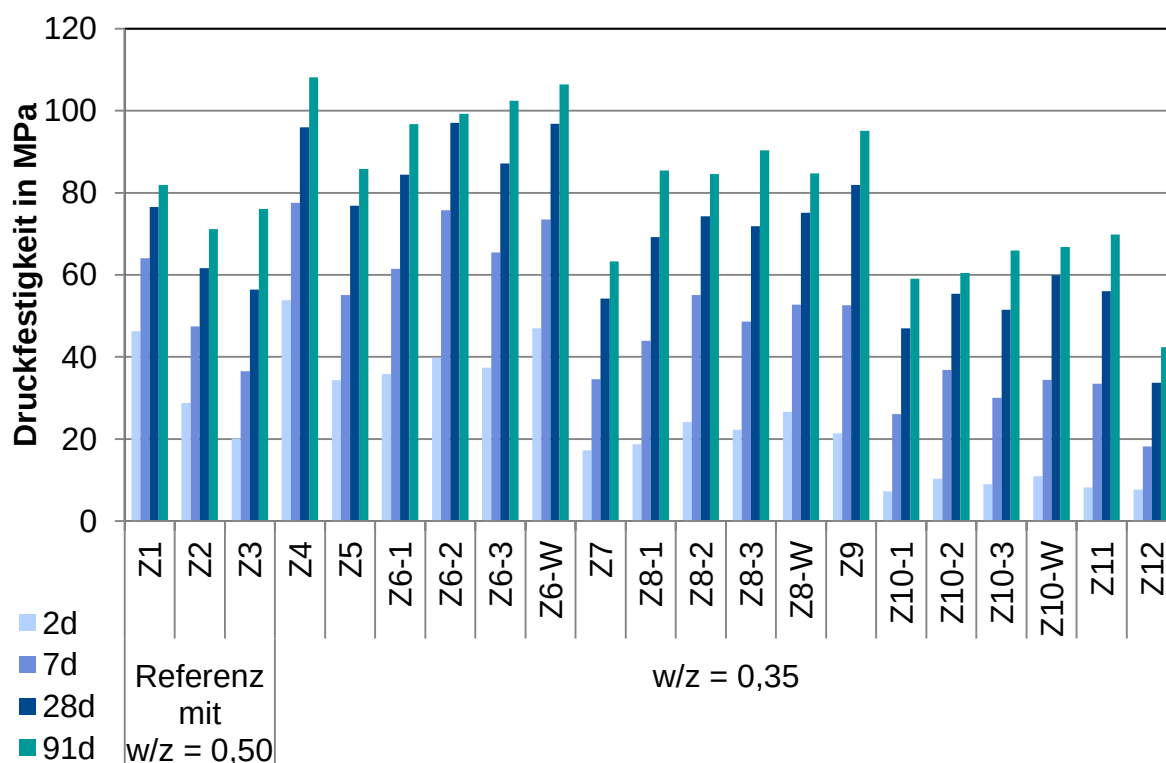


Bild 7 Festigkeitsentwicklung von Mörteln mit w/z = 0,35 (Referenzen mit w/z = 0,50)

6.2 Betonversuche

6.2.1 Allgemeines

Für die Betonversuche im VDZ wurden die industriell hergestellten Werkszemente CEM (50K,30S,20LL), CEM (35K,30S,35LL) und CEM (20K,30S,50LL) verwendet. Die Betone wurden nach dem gleichen Prinzip wie die Mörtel hergestellt: Zunächst wurden Referenzbetone entsprechend Tabelle F2.1 bzw. F2.2 der DIN 1045-2 zusammengesetzt. Für die Betone mit den Prüfszementen wurde der Wasserzementwert unter Beibehaltung des Leimgehalts gesenkt und durch die Verwendung von Fließmitteln ein konstantes Ausbreitmaß eingestellt. Bei den Betonen B4 wurde eine niedrigere Konsistenzklasse gewählt, um ein zu starkes Entlüften der künstlich eingebrachten Luftporen zu verhindern. **Tabelle 3** zeigt die Betonrezepturen.

Tabelle 3 Betonrezepturen

	Beton B1	Beton B2	Beton B3	Beton B4
1	2	3	4	5
Zementgehalt in kg/m ³	320	365	390	320 – 390
Wasserzementwert	0,50	0,40	0,35	0,50 – 0,35
Gehalt an Luftporen in %	keine Vorgabe			4,5 ± 0,5
Leimgehalt inkl. Gesteinskörnungsanteil <125µm in l/m ³	290 ± 5	290 ± 5	290 ± 5	290 ± 5
Konsistenzklasse	F3 - F4	F3 - F4	F3 - F4	F2 - F3

Beton B4 wurde mit den Referenzzementen sowie CEM (50K,30S,20LL) mit einem Wasserzementwert $w/z = 0,50$ und einem Zementgehalt von 320 kg/m^3 hergestellt. Für den Beton B4 mit CEM (35K,30S,35LL) wurden 365 kg/m^3 Zement und ein Wasserzementwert $w/z = 0,40$ verwendet. Für den Beton B4 mit CEM (20K,30S,50LL) wurden 390 kg/m^3 Zement und ein Wasserzementwert $w/z = 0,35$ verwendet.

6.2.2 Frischbetoneigenschaften

Direkt nach Mischende wurde die Frischbetontemperatur T_f gemessen. Direkt bzw. 10 Minuten nach Mischende wurden die Konsistenz des Frischbetons anhand des Ausbreitmaßes a nach DIN EN 12350-5, der Luftgehalt LP mittels Druckausgleichsverfahren im Luftporentopf nach DIN EN 12350-7 und die Frischbetonrohddichte ρ_f nach DIN EN 12350-6 bestimmt. Die Ergebnisse zeigen **Bild 8** und **Bild 9**.

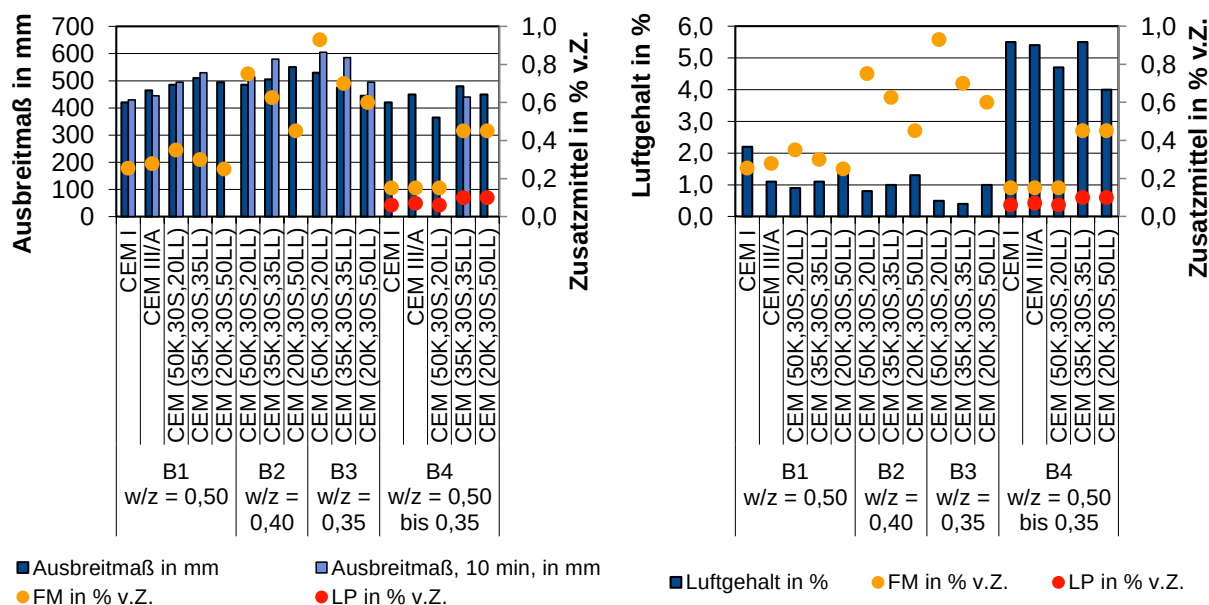


Bild 8 Ausbreitmaße

Bild 9 Luftgehalte

Bei allen Betonen konnten mindestens die Zielkonsistenzen erreicht werden. Mit sinkendem Wasserzementwert sowie steigendem Klinkergehalt der Versuchszemente stieg der Fließmittelbedarf.

6.2.3 Betondruckfestigkeit

Die Betondruckfestigkeit der Betone B1 bis B3 wurde nach DIN EN 12390-3 im Alter von 1, 7, 28 und 91 Tagen an Würfeln mit der Kantenlänge 150 mm bestimmt. Die Betondruckfestigkeit der Betone B4 wurde im Alter von 28 Tagen bestimmt. Die Probekörper wurden entsprechend DIN EN 12390-2:2001-06, Anhang NA zunächst 24 Stunden in den Formen vor Zugluft und Austrocknung geschützt bei einer Lufttemperatur von $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ gelagert. Nach 24 Stunden wurden die Probekörper entformt und 6 Tage in einem Wasserbad mit $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ gelagert. Im Alter von 7 Tagen wurden die Probekörper aus dem Wasserbad ent-

nommen und bis zur Prüfung bei einer Temperatur von $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $(65 \pm 5) \%$ gelagert. Die Ergebnisse zeigen **Bild 10** und **Bild 11**.

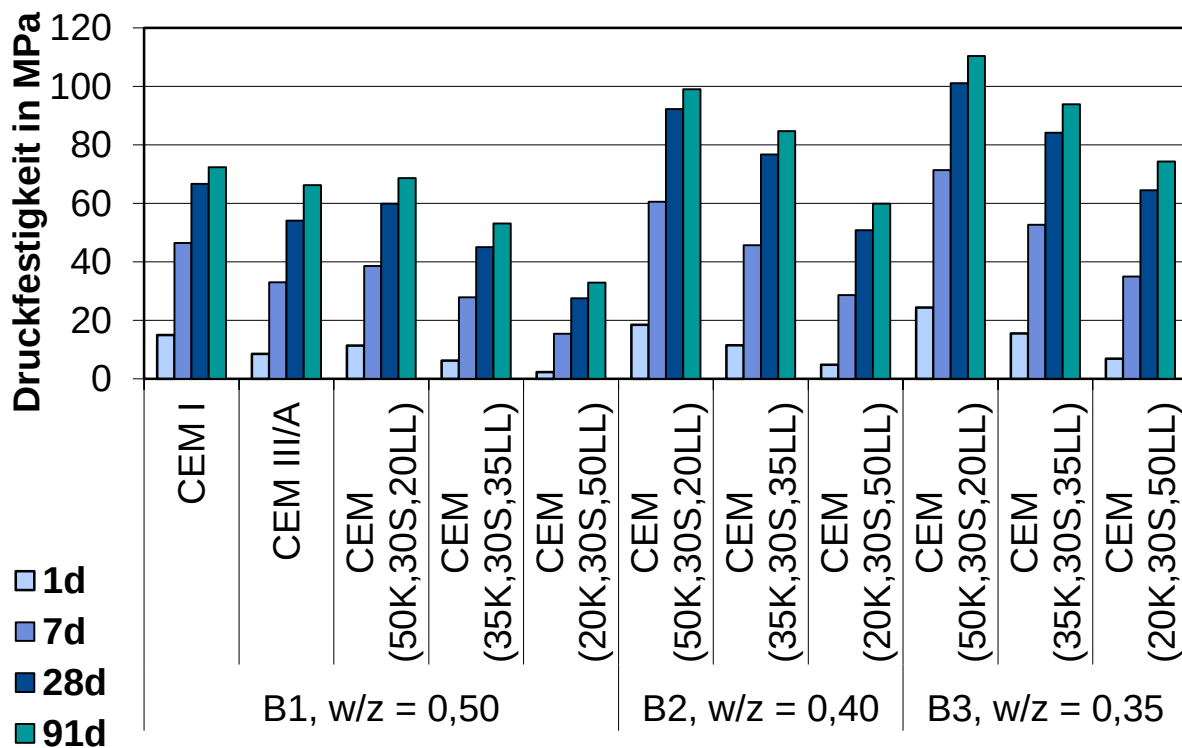


Bild 10 Druckfestigkeitsentwicklung der Betone B1 bis B3

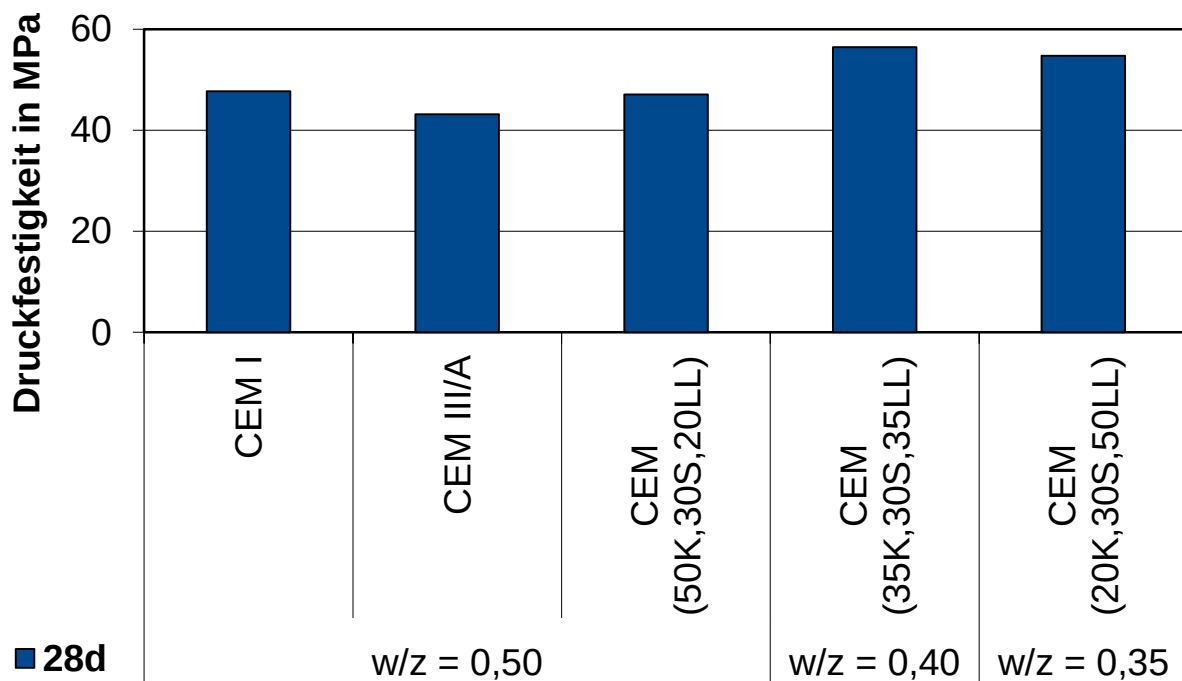


Bild 11 Druckfestigkeit der Betone B4

Der Beton B1 mit CEM (50K,30S,20LL) zeigt vergleichbare Festigkeiten wie die Betone B1 mit Referenzzementen. Mit weiter abnehmendem Klinkergehalt sinkt die Festigkeit zu allen Prüfzeitpunkten erwartungsgemäß.

Der Beton B2 mit CEM (35K,30S,35LL) bzw. der Beton B3 mit CEM (20K,30S,50LL) weisen etwas höhere Festigkeiten auf als die Referenzbetone. Die Festigkeit eines Betons ist jedoch kein hinreichendes Merkmal für die Dauerhaftigkeit.

6.2.4 Chlorideindringwiderstand

Der Widerstand des Betons gegenüber eindringenden Chloriden wurde mit Hilfe eines Schnellverfahrens (Migrationstest: [9], [10]) ermittelt.

Der Chlorideindringwiderstand wurde an den Betonen B1 bis B3 geprüft. Die Probekörper (Würfel 150 mm) zur Bestimmung des Migrationskoeffizienten wurden 1 d abgedeckt in der Schalung und anschließend bis zur Prüfung bei einer Temperatur von $(20 \pm 1)^\circ\text{C}$ unter Wasser gelagert. Im Alter von 28 bzw. 91 Tagen wurde jeweils aus der Mitte eines Würfels ein Zylinder mit einem Durchmesser von 100 mm herausgebohrt. Aus jedem Zylinder wurde ein Prüfkörper mit einer Höhe von 50 mm herausgesägt. Die Prüfkörper wurden weiter unter Wasser gelagert. Die Prüfergebnisse im Alter von 35 Tagen bzw. 98 Tagen zeigt **Bild 12**.

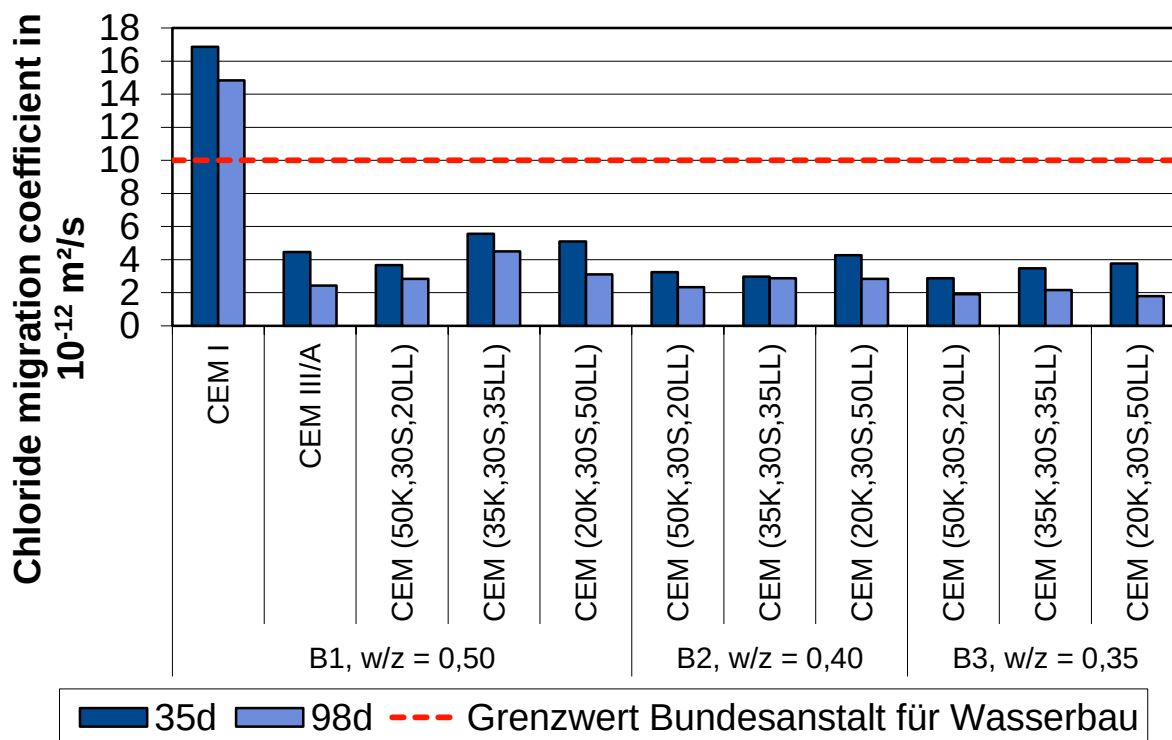


Bild 12 Chlorideindringwiderstand der Betone B1 bis B3

Alle Betone mit Prüfzementen weisen unabhängig vom Wasserzementwert sehr niedrige Chloridmigrationskoeffizienten – d.h. sehr hohe Widerstände gegen das Eindringen von Chloriden – auf. Damit konnte eine wesentliche Schwäche der in [6] untersuchten Zemente, die ausschließlich Kalkstein als weiteren Hauptbestandteil enthielten, beseitigt werden.

30 M.-% Hüttensand waren bei den im Forschungsvorhaben untersuchten Zementen, unabhängig vom Verhältnis Klinker zu Kalkstein, ausreichend, um einen hohen Chlorideindringwiderstand für Anwendungen z. B. im Wasserbau sicherstellen zu können.

6.2.5 Karbonatisierung

Die Karbonatisierungstiefe wurde an Feinbetonprismen mit den Abmessungen 40 mm x 40 mm x 160 mm und einer Sieblinie A8/B8 durchgeführt. Dies entspricht den Randbedingungen in Zulassungsverfahren des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) für Zemente. Mörtel mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,50$ wurden ohne die Verwendung von Fließmitteln mit einem Zementgehalt von 450 g je Mischung hergestellt. Mörtel mit einem Wasserzementwert von $w/z = 0,40$ wurden, um einen konstanten Leimgehalt beizubehalten, mit einem Zementgehalt von 500 g je Mischung hergestellt, Mörtel mit $w/z = 0,35$ mit 535 g je Mischung. Jeweils die Hälfte der Prismen wurde 7 Tage in Wasser mit einer Temperatur von $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ vorgelagert, die andere Hälfte lagerte 28 Tage in Wasser mit einer Temperatur von $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Anschließend lagerten die Probekörper bei einer Temperatur von $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ und einer relativen Feuchte von $(65 \pm 5) \%$. Die Karbonatisierungstiefen nach 140 Tagen Lagerung dienen der Einordnung in die Ergebnisse früherer Zulassungsprüfungen, die in [11] veröffentlicht wurden (vgl. Bild 37).

Zur Prüfung der Karbonatisierungstiefe wurden von jeweils drei Probekörpern ca. 30 - 50 mm lange Stücke abgespalten und mit Phenolphthaleinlösung besprüht. Nach rd. 24 Stunden wurden die Karbonatisierungstiefen jeder Seite der abgespalteten Stücke gemäß DIN EN 14630 ermittelt und die mittlere Karbonatisierungstiefe wurde berechnet. Die Eckbereiche blieben unberücksichtigt.

Des Weiteren wurde jeweils nach der Wasserlagerung die Druckfestigkeit gemäß DIN EN 196-1 bestimmt.

Die Ergebnisse sind in Bild 13 bis Bild 20 dargestellt.

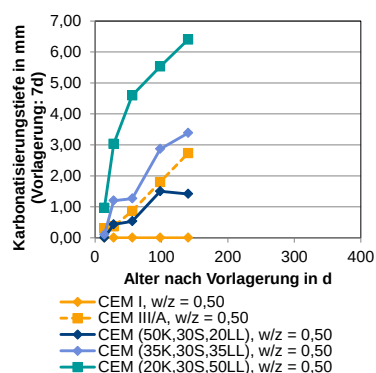


Bild 13 Karbonatisierungstiefen von Feinbetonen mit $w/z = 0,50$ (7d VL)

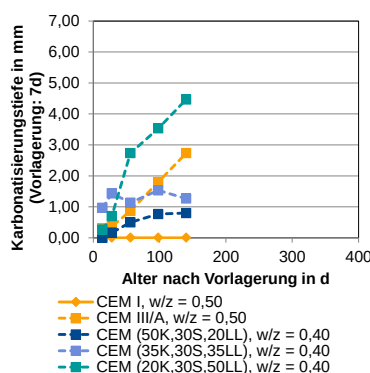


Bild 14 Karbonatisierungstiefen von Feinbetonen mit $w/z = 0,40$ (7d VL)

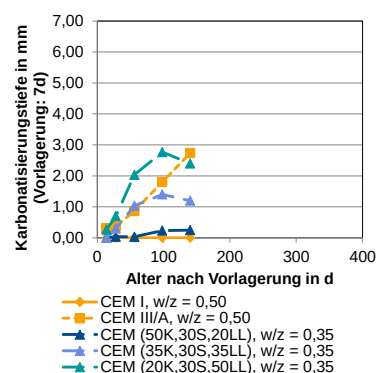


Bild 15 Karbonatisierungstiefen von Feinbetonen mit $w/z = 0,35$ (7d VL)

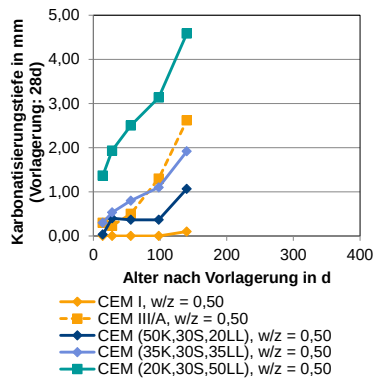


Bild 16 Karbonatisierungstiefen von Feinbetonen mit $w/z = 0,50$ (28d VL)

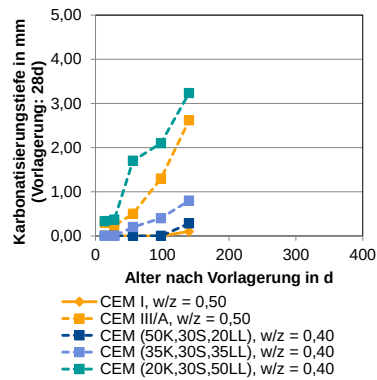


Bild 17 Karbonatisierungstiefen von Feinbetonen mit $w/z = 0,40$ (28d VL)

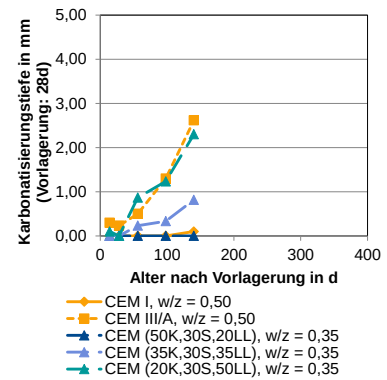


Bild 18 Karbonatisierungstiefen von Feinbetonen mit $w/z = 0,35$ (28d VL)

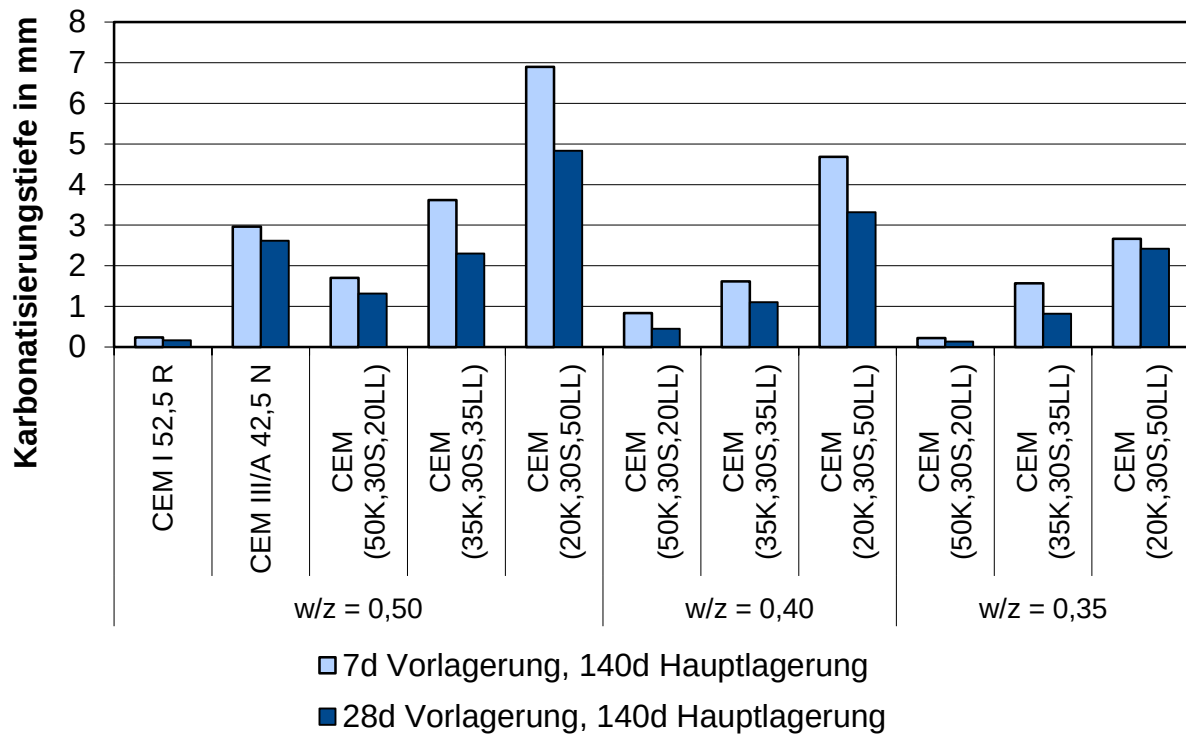


Bild 19 Karbonatisierungstiefen von Feinbetonen nach 140d Hauptlagerung

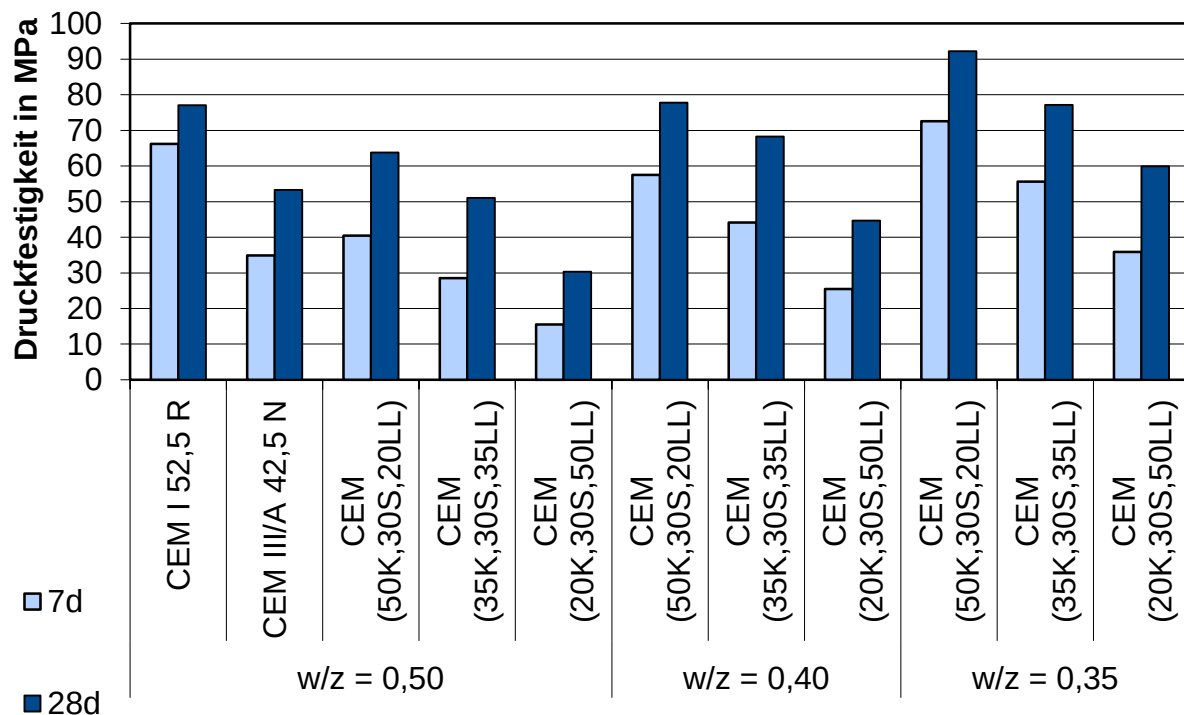


Bild 20 Druckfestigkeit von Feinbetonen nach 7d bzw. 28d Vorlagerung

Der Feinbeton mit CEM (50K,30S,20LL) zeigt vergleichbare Festigkeiten und Karbonisierungstiefen wie die Feinbetone mit Referenzzementen. Mit weiter abnehmendem Klinkergehalt sinken die Festigkeit und der Karbonatisierungswiderstand zu allen Prüfzeitpunkten erwartungsgemäß.

Der Feinbeton mit CEM (35K,30S,35LL) und einem Wasserzementwert von $w/z = 0,40$ bzw. der Feinbeton mit CEM (20K,30S,50LL) und einem Wasserzementwert von $w/z = 0,35$ weisen etwas höhere Festigkeiten aber vergleichbare Karbonatisierungswiderstände auf wie die Referenzbetone.

6.2.6 Frostwiderstand

Der Frostwiderstand von Betonen wurde mittels des CIF-Verfahrens gemäß CEN/TR 15177 bestimmt. Für die Untersuchungen zum Frostwiderstand wurden je Beton 10 Probekörper mit den Abmessungen 150 mm x 110 mm x 70 mm hergestellt. Je 5 Probekörper wurden 24 Stunden in den Formen vor Zugluft und Austrocknung geschützt bei einer Lufttemperatur von $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$, 6 Tage unter Wasser bei $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ (Vorlagerung) und anschließend 21 Tage bei einer Temperatur von $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ und einer relativen Feuchte von $(65 \pm 5) \%$ gelagert. 2 bis 7 Tage vor Beendigung dieser Trockenlagerung wurden die Seitenflächen der Probekörper mit Aluminiumfolie mit Butylklebung abgedichtet. Im Alter von 28 Tagen begann das 7tägige kapillare Saugen der Probekörper.

Je 5 weitere Probekörper wurden 24 Stunden in den Formen vor Zugluft und Austrocknung geschützt bei einer Lufttemperatur von $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ gelagert, 27 Tage unter Wasser bei $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ (Vorlagerung) und anschließend 63 Tage bei einer Temperatur von $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$

und einer relativen Feuchte von $(65 \pm 5) \%$ gelagert. 2 bis 7 Tage vor Beendigung dieser Trockenlagerung wurden die Seitenflächen der Probekörper mit Aluminiumfolie mit Butylklebung abgedichtet. Im Alter von 90 Tagen begann das 7tägige kapillare Saugen der Probekörper.

Im Anschluss an das kapillare Saugen wurden 56 Frost-Tauwechsel durchgeführt. Die Abwitterung und der relative dynamische E-Modul wurden bestimmt. Die Ergebnisse zeigen **Bild 21** bis **Bild 26** als Mittelwerte von je 5 Prüfkörpern.

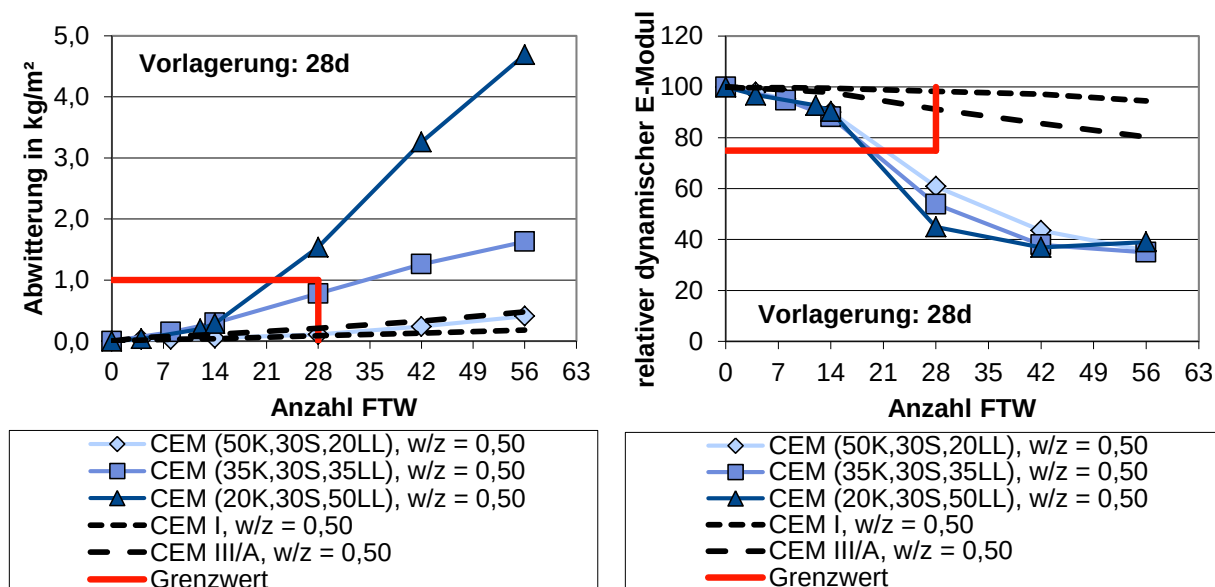


Bild 21 Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten $w/z = 0,50$; 28d Vorlagerung

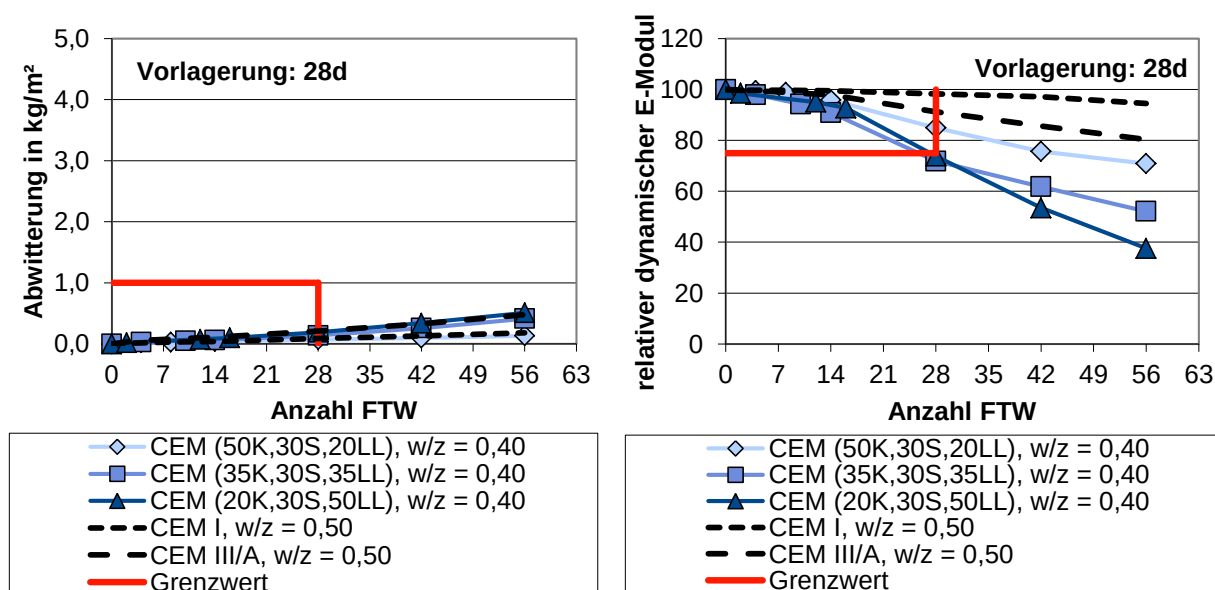


Bild 22 Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten $w/z = 0,40$ (Referenzen mit $w/z = 0,50$); 28d Vorlagerung

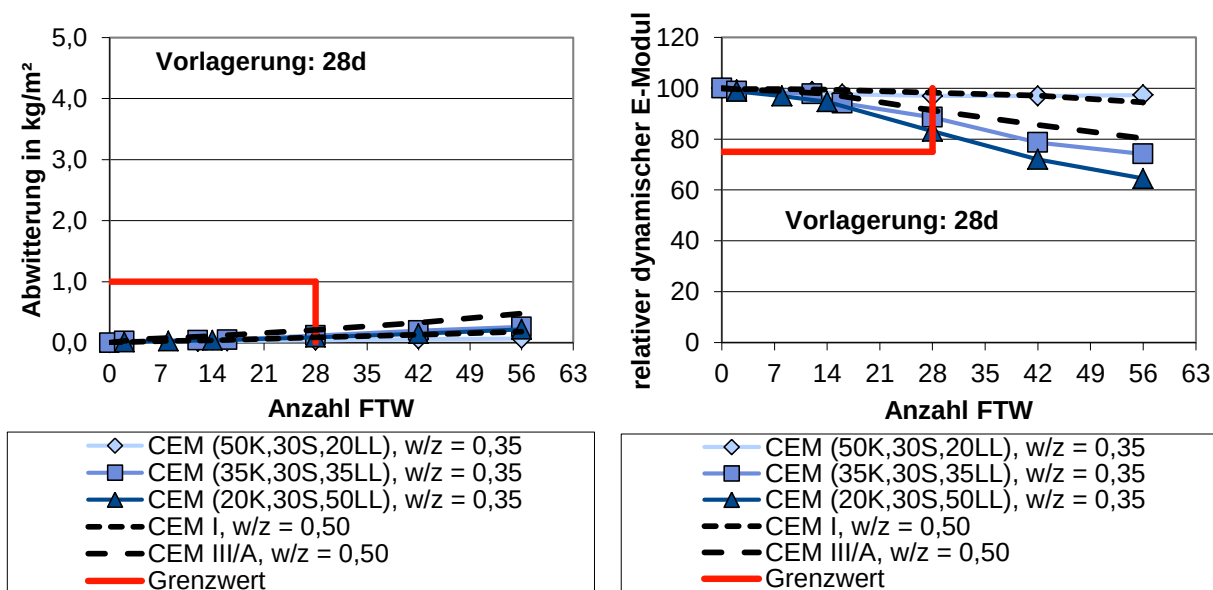


Bild 23 Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten $w/z = 0,35$ (Referenzen mit $w/z = 0,50$); 28d Vorlagerung

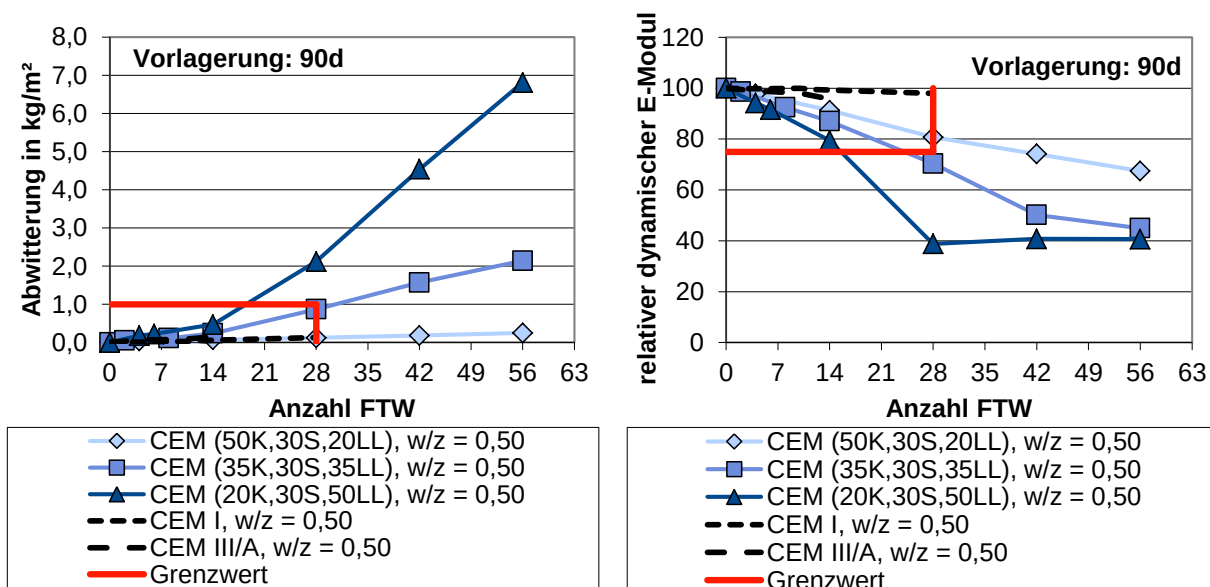


Bild 24 Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten $w/z = 0,50$; 90d Vorlagerung

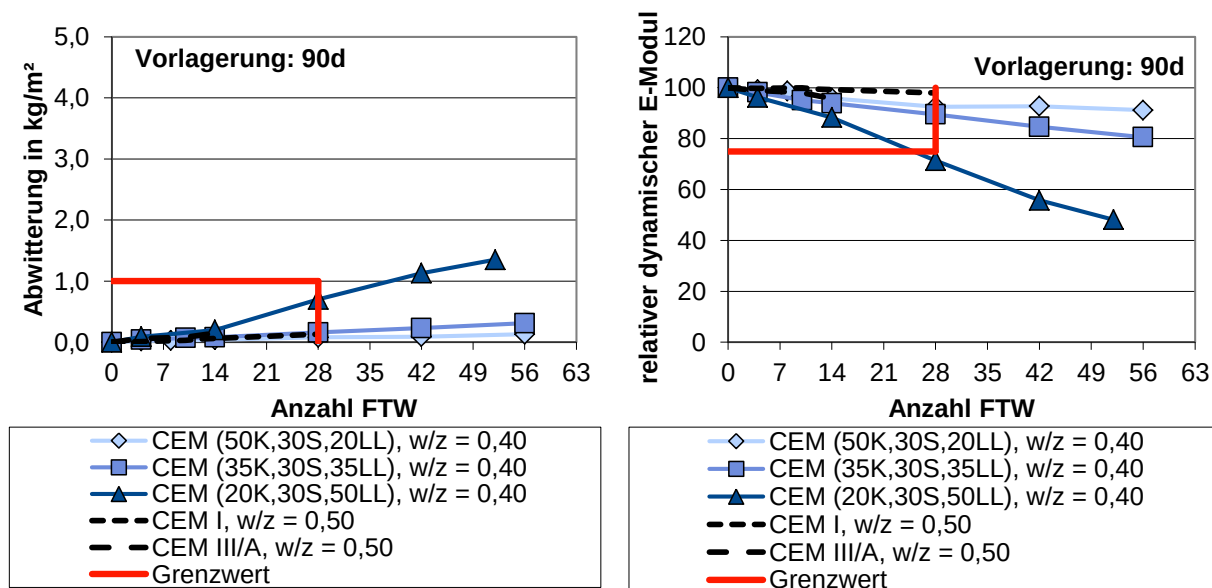


Bild 25 Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten $w/z = 0,40$ (Referenzen mit $w/z = 0,50$); 90d Vorlagerung

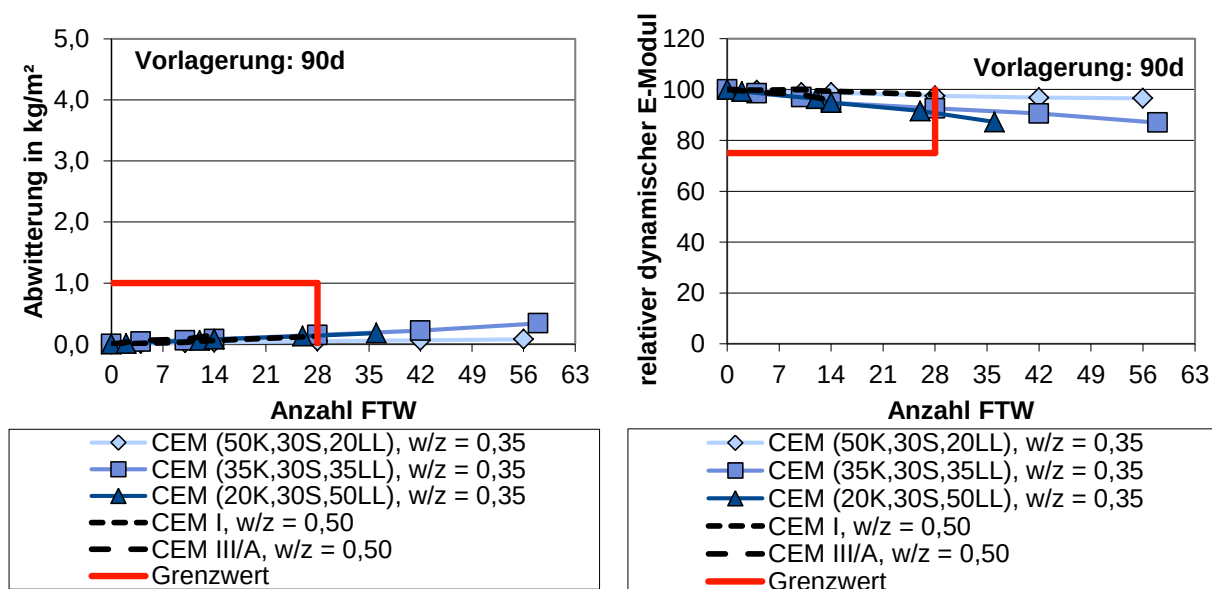


Bild 26 Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen mit Wasserzementwerten $w/z = 0,35$ (Referenzen mit $w/z = 0,50$); 90d Vorlagerung

Beim Frostangriff ohne Einwirkung von Taumitteln ist bei nicht geeigneten Ausgangsstoffen bzw. nicht geeigneter Betonzusammensetzung i. d. R. hauptsächlich mit einer inneren Gefügeschädigung zu rechnen. Diese kann gemäß [10] durch den relativen dynamischen E-Modul beschrieben werden.

Bild 21 zeigt, dass die Prüfzemente bei Verwendung im Beton B1 keinen ausreichenden Frostwiderstand aufwiesen. Eine Absenkung des Wasserzementwertes auf $w/z = 0,40$ führte zu einer deutlich geringeren Abnahme des relativen dynamischen E-Moduls. Der Beton mit CEM (50K,30S,20LL) liegt unterhalb des Grenzwertes. Bei einer weiteren Absenkung des

Wassermenge auf $w/z = 0,35$ liegen auch die Betone mit CEM (35K,30S,35LL) und CEM (20K,30S,50LL) unterhalb des Grenzwertes.

Eine Verlängerung der Vorlagerungszeit kann durch die Erhöhung der Hydratationsgrades und damit des dichteren Gefüges zu einer Verbesserung des Frostwiderstandes beitragen (vgl. **Bild 21** bis **Bild 23** mit **Bild 24** bis **Bild 26**).

6.2.7 Frost-Tausalzstand

Der Frost-Tausalzstand von Betonen wurde mittels des CDF-Verfahrens gemäß DIN EN 12390-9 bestimmt. Für die Untersuchungen zum Frostwiderstand wurden je Beton 5 Probekörper mit den Abmessungen 150 mm x 110 mm x 70 mm hergestellt. Die Probekörper wurden 24 Stunden in den Formen vor Zugluft und Austrocknung geschützt bei einer Lufttemperatur von $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ gelagert, 6 Tage unter Wasser bei $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$ (Vorlagerung) und anschließend 21 Tage bei einer Temperatur von $(20 \pm 2) ^\circ\text{C}$ und einer relativen Feuchte von $(65 \pm 5) \%$ gelagert. 2 bis 7 Tage vor Beendigung dieser Trockenlagerung wurden die Seitenflächen der Probekörper mit Aluminiumfolie mit Butylklebung abgedichtet. Im Alter von 28 Tagen begann das 7tägige kapillare Saugen der Probekörper in 3 %iger Natriumchlorid-Lösung.

Im Anschluss an das kapillare Saugen wurden 28 Frost-Tauwechsel in 3 %iger Natriumchlorid-Lösung durchgeführt. Die Abwitterung und der relative dynamische E-Modul wurden bestimmt. Die Ergebnisse zeigen **Bild 27** als Mittelwerte von je 5.

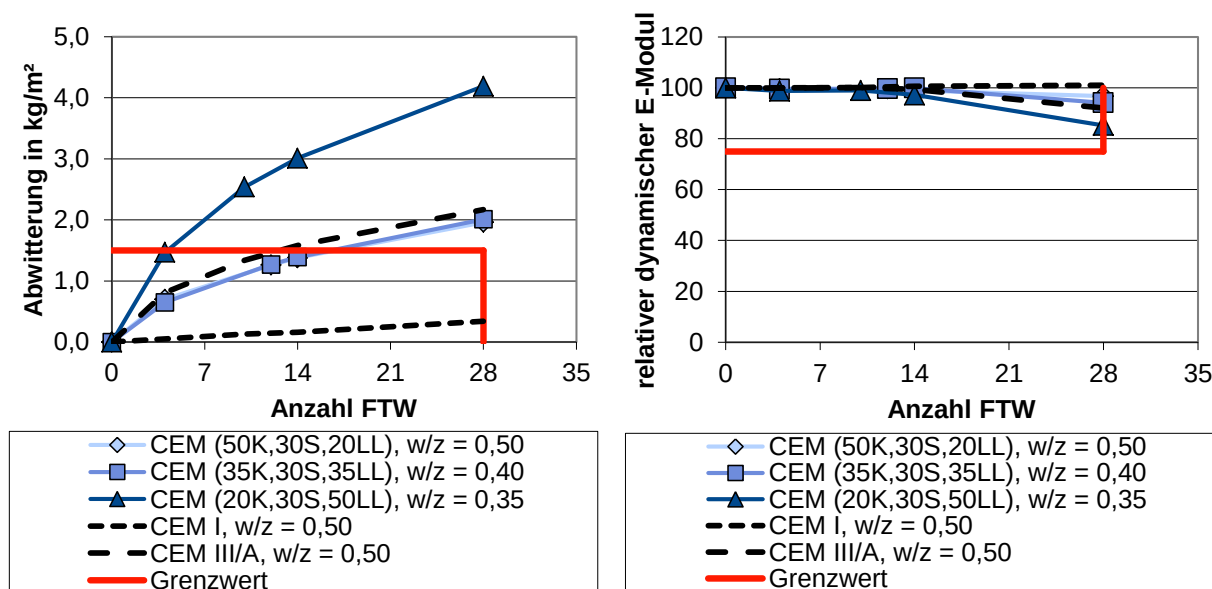


Bild 27 Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen im CDF-Versuch

Beim Frost-Tausalzangriff ist bei nicht geeigneten Ausgangsstoffen bzw. nicht geeigneter Betonzusammensetzung i. d. R. hauptsächlich mit Abwitterung zu rechnen.

Bild 27 zeigt, dass die Prüfmischungen in den gewählten Betonrezepturen keinen ausreichenden Frost-Tausalz-Widerstand aufwiesen. Der verwendete Referenzzement CEM III/A 42,5 N zeigte jedoch einen ähnlichen Abwitterungsverlauf. Durch eine Verlängerung der Vorlage-

rung, ggf. nicht unter Wasser sondern in Folie eingeschweißt, um den Sättigungsgrad nicht zu erhöhen, könnte zur Verbesserung des Frost-Tausalz-Widerstandes beitragen.

7 Versuche und Ergebnisse – TU Darmstadt

7.1 Allgemeines

Um mehrere Laborzemente mit unterschiedlichen K-S-LL- und w/z-Wert-Kombinationen zu untersuchen, wurden zunächst im Rahmen der Vorversuche verschiedene Feinbetone (Größtkorn 8 mm) und Normalbetone (Größtkorn 16 mm) systematisch analysiert. Verarbeitbarkeit, Druckfestigkeit und die Dauerhaftigkeit hinsichtlich Karbonatisierung wurden untersucht (Abschnitt 7.2).

In Abschnitt 7.3 werden die Ergebnisse zu umfangreichen Prüfungen an Betonen aus drei Werkszementen mit unterschiedlichen K-S-LL-Verhältnissen und zwei Referenzzementen (CEM I 52,5 R und CEM III/A 42,5 N) dargestellt. Die Betone mit den neuen Werkszementen sollten mit den Betonen mit Referenzzementen vergleichbare Frisch- und Festbetoneigenschaften aufweisen. Im Abschnitt 7.4 wird das Tragverhalten von Bauteilen mit den ausgewählten Betonen dargestellt.

7.2 Vorversuche an Feinbetonen und Betonen aus Laborzementen

7.2.1 Versuche an Feinbeton

Ausbreitmaß, Druckfestigkeit (nach 7 und 28 Tagen) und Karbonatisierungswiderstand (nach 140 Tagen und 1 Jahr) wurden an Feinbetonproben aus Laborzementen untersucht. An jedem Prüftermin wurden zwei jeweils $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ Prismen geprüft. Die Proben wurden nach einem Tag ausgeschalt und danach 6 Tage im Wasser gelagert. Anschließend wurden die Proben bis zum Prüftermin im Klimaraum bei $20 \pm 1 \text{ °C}$ und einer rel. F. von 65% gelagert. Die CO_2 -Konzentration des Klimaraums betrug 0,04 Vol.-%. Abweichend von EN 196-1 enthalten die Proben Gesteinskörnungen mit einem Größtkorndurchmesser von 8 mm und weisen Wasserzementwerte von $w/z = 0,50$, $w/z = 0,40$ bzw. $w/z = 0,35$ auf. Der Leimgehalt der Proben wurde dabei konstant gehalten. Der Zementgehalt als Summe aller Hauptbestandteile wurde entsprechend von 450 g auf 500 g ($w/z = 0,40$) bzw. 535 g ($w/z = 0,35$) erhöht. Als Gesteinskörnungen wurden je Mischung 675 g Rheinsand 0/2 mm und 675 g Rheinkies 2/8 mm verwendet. **Tabelle 4** zeigt die Mischungszusammensetzung und die Randbedingung der hergestellten Feinbetone.

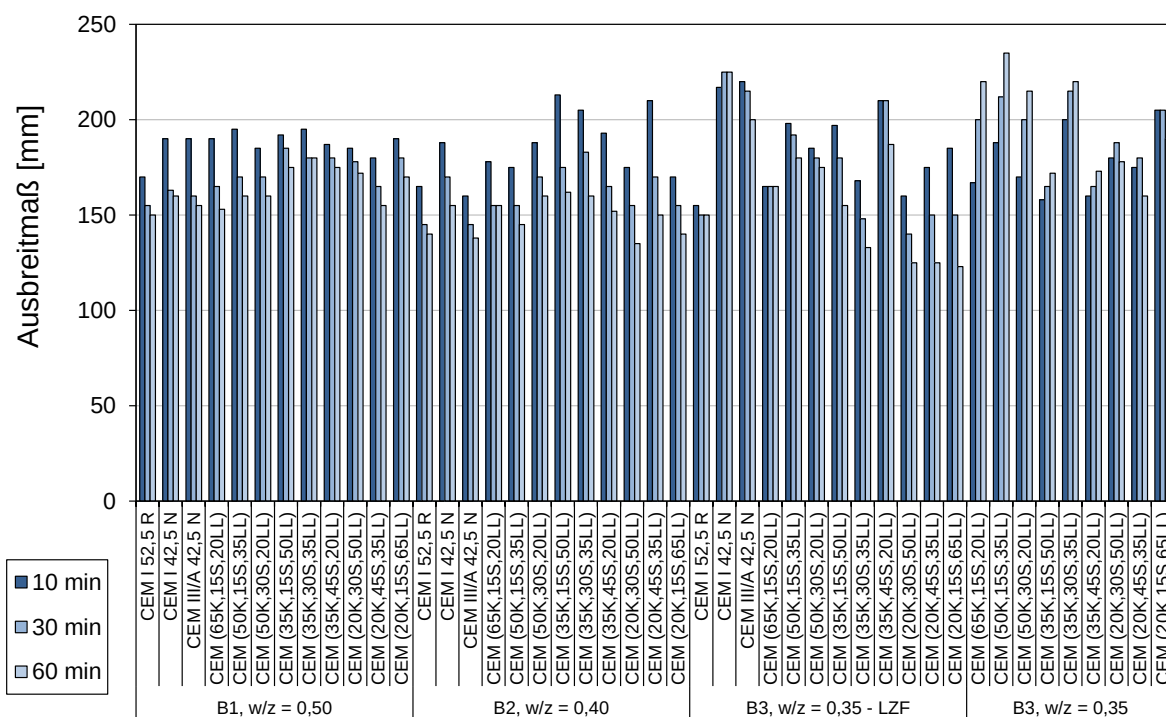
Nachfolgend werden ausgewählte Ergebnisse dargestellt.

Tabelle 4 Feinbetonrezepturen

Feinbeton	FB1	FB2	FB3
1	2	3	4
Zementgehalt [g]	450	500	535
Wasserzementwert [-]	0,50	0,40	0,35
Zugabewasser [g]	225	200	187
Leimgehalt inkl. Gesteinskörnungsanteil <125µm [ml]	375 ± 10		
Sand 0-2/Kies 2-8 mm [g]	675/675		
Ausbreitmaß nach DIN EN 1015-3 [mm]	170 ± 20 mm		

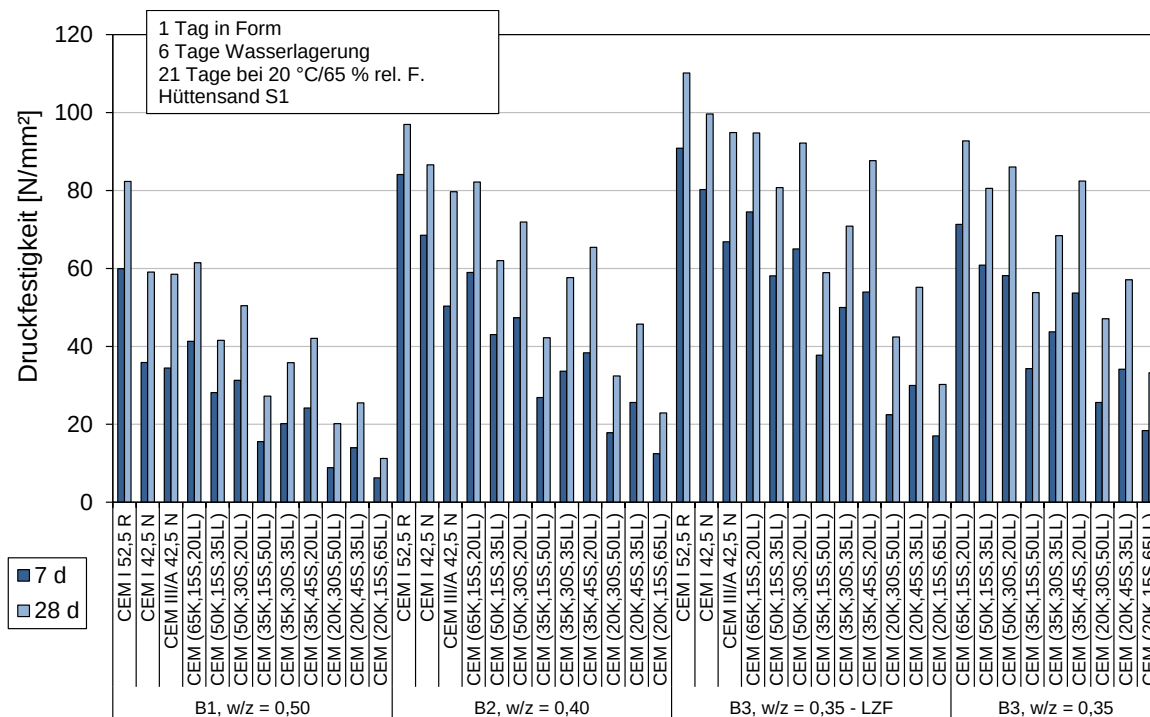
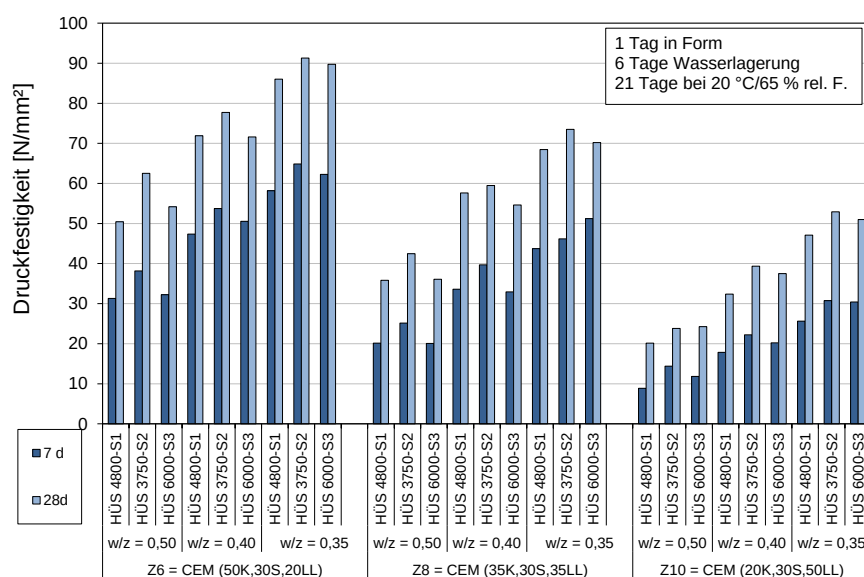
7.2.1.1 Ausbreitmaß der Feinbetone

Für die Feinbetonproben mit $w/z = 0,40$ und $w/z = 0,35$ wurden zur Einstellung eines konstanten Ausbreitmaßes zwei PCE-basierte Fließmittel (LZF und ACE 391) eingesetzt. Die zeitabhängigen Ausbreitmaße (nach 10, 30 und 60 min) gemäß DIN EN 1015-3 sind in **Bild 28** dargestellt.

**Bild 28** Ausbreitmaße der Feinbetone mit Hüttensand S1

7.2.1.2 Druckfestigkeit der Feinbetone

Bild 29 zeigt die Druckfestigkeiten der Feinbetone aus verschiedenen Laborzementen mit Hüttensand S1 nach 7 und 28 Tagen. Die Ergebnisse der 7- und 28d-Druckfestigkeit der Feinbetone aus ausgewählten Laborzementen (Z6, Z8 und Z10) mit unterschiedlichen Hüttensanden (S1, S2 und S3) sind in **Bild 30** abgebildet.

**Bild 29** 7- und 28d-Druckfestigkeit der Feinbetone mit Hüttensand S1**Bild 30** 7- und 28d-Druckfestigkeit der Feinbetone mit Hüttensanden S1, S2 und S3

7.2.1.3 Karbonatisierungswiderstand der Feinbetone

Die Messung zur Karbonatisierungstiefe erfolgte nach 140 Tagen sowie nach einem Jahr Auslagerungsdauer mit Hilfe des Phenolphthalein-Indikators. Die Karbonatisierungstiefen der Feinbetone mit Hüttensand S1 sowie der Referenzfeinbetone sind in **Bild 31** dargestellt. Die Ergebnisse zu den Karbonatisierungstiefen der Feinbetone mit ausgewählten Laborzementen (Z6, Z8 und Z10) mit unterschiedlichen Hüttensanden S1, S2 und S3 nach 140 d und 1 a sind in **Bild 32** abgebildet.

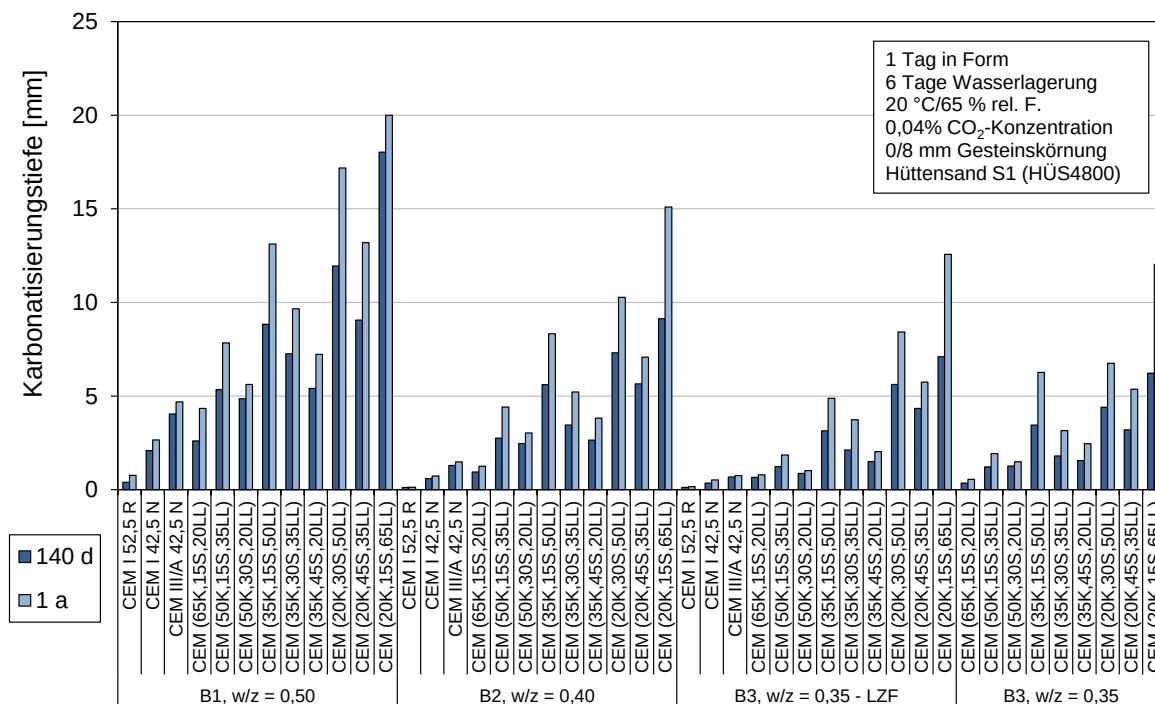


Bild 31 Karbonatisierungstiefe der Feinbetone mit Hüttensand S1

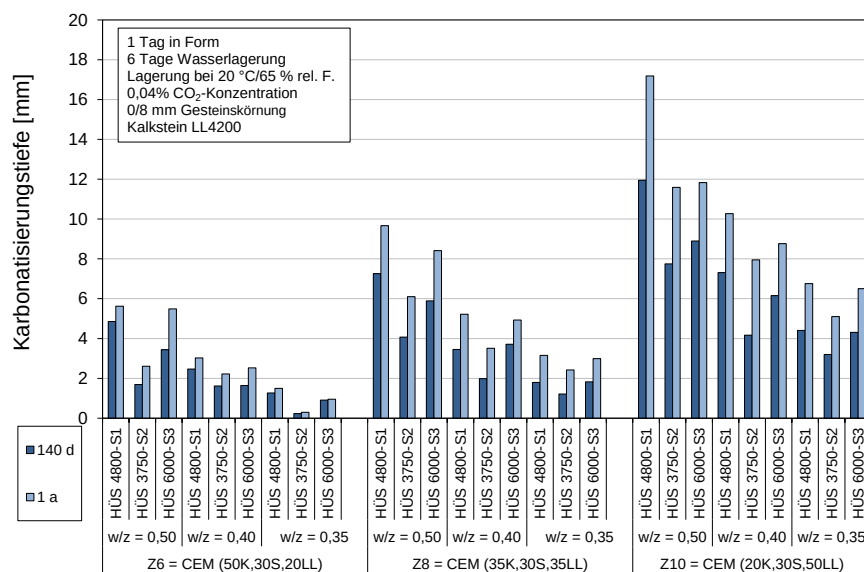


Bild 32 Karbonatisierungstiefe der Feinbetone mit Hüttensanden S1, S2 und S3

7.2.2 Versuche an Beton

7.2.2.1 Frischbetoneigenschaften

Betone mit der Betonrezeptur B1 ($w/z = 0,50$) und den Referenzzementen (CEM I 52,5 R, CEM I 42,5 N und CEM III/A 42,5 N) sowie Betone der Betonrezeptur B3 mit $w/z = 0,35$ und allen Laborzementen Z1 bis Z12 (inkl. Beton B2 mit Zement Z8) wurden hergestellt. Die Feinheit des Kalksteins (Kalkstein 4200 und 4800), die Hüttensandqualität (S1-S3) sowie Art

des Fließmittels (ACE 391, LZF und BT3) wurden variiert. **Tabelle 5** zeigt die Mischungszusammensetzung und die Randbedingung der hergestellten Betone.

Tabelle 5 Betonrezepturen

Beton	B1	B2	B3
1	2	3	4
Zementgehalt [kg/m ³]	320	365	390
Wasserzementwert [-]	0,50	0,40	0,35
Leimgehalt inkl. Gesteinskörnungsanteil <125µm [l/m ³]	290 ± 5	290 ± 5	290 ± 5
Quarzsand W3 [kg/m ³]	67		
Rheinsand 0-2/Kies 2-8/Kies 8/16 mm [kg/m ³]	513/475/836		
Ausbreitmaß nach DIN EN 12350-5 [mm]	450 bis 550		

Die zeitabhängigen Ausbreitmaße wurden, in Anlehnung an DIN EN 12350-5, in Zeitabständen von 15, 30 und 60 min nach Wasserzugabe geprüft und die Frischbetontemperatur aufgezeichnet. Die plastische Viskosität des Frischbetons wurde 15 Minuten nach der Wasserzugabe mittels ICAR-Betonrheometer analysiert. Für die Betone mit den Prüfzementen wurde der Wasserzementwert bei konstantem Leimgehalt gesenkt und durch die Verwendung von drei PCE-basierten Fließmitteln (LZF, ACE 391 und BT3) ein konstantes Ausbreitmaß 550 ± 30 mm eingestellt. Die Mahlfeinheit des Kalksteinmehls (Kalkstein LL 4200 und LL 4800) sowie die Hüttensandqualität (S1, S2 und S3) wurden variiert. Die Ergebnisse zum Ausbreitmaß und Fließmittelbedarf sowie zur plastischen Viskosität der Betone B1 und B3 mit Fließmittel ACE 391 und Kalkstein LL 4200 sind in **Bild 33** bzw. **Bild 34** dargestellt und mit der Verarbeitbarkeitsgrenze aus [12] verglichen.

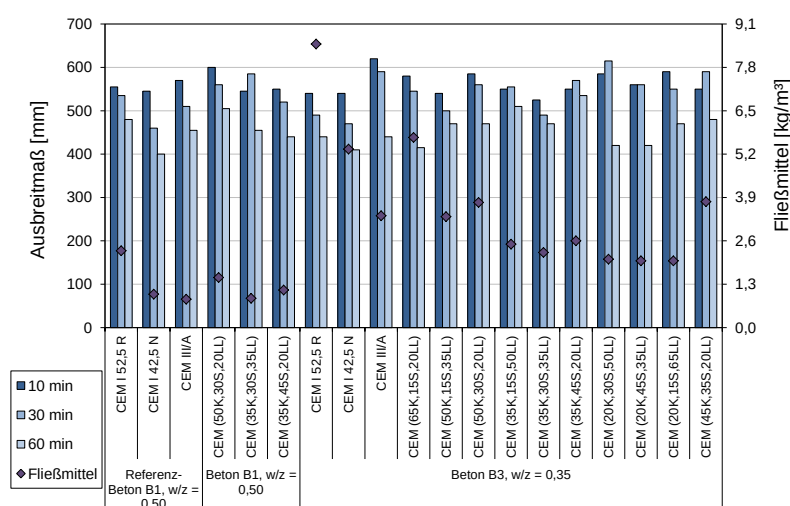


Bild 33 Ausbreitmaß und Fließmittelbedarf der Betone mit Hüttensand S1

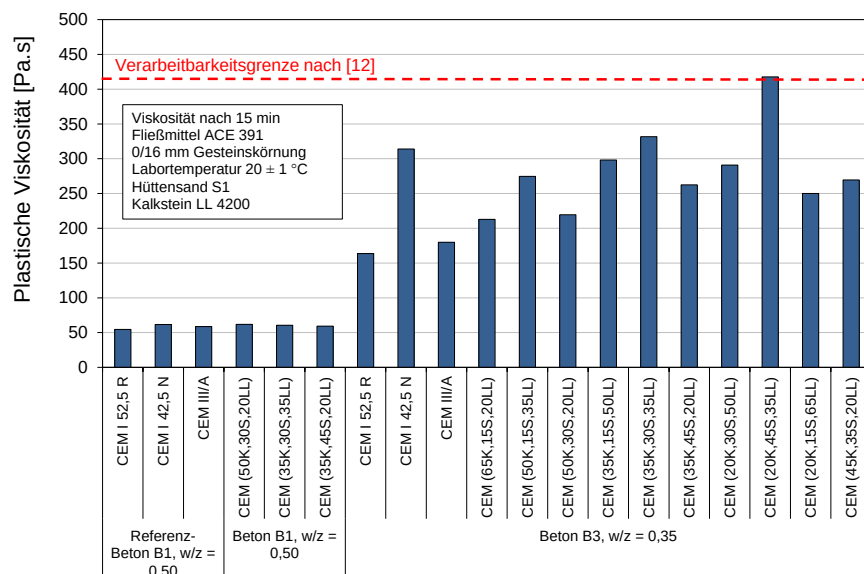


Bild 34 Plastische Viskosität der Frischbetone mit Hüttensand S1

7.2.2.2 Betondruckfestigkeit

Die Druckfestigkeit der Betone B1, B2 und B3 mit unterschiedlichen Zementzusammensetzungen mit Hüttensand S1 wurden nach 2, 7 und 28 Tagen geprüft. Exemplarisch wurde der Einfluss der Hüttensandqualität für drei verschiedene Zemente (Z6, Z8 und Z10) mit w/z-Werten von 0,50, 0,40 bzw. 0,35 analysiert. Bild 35 zeigt die gemittelten Ergebnisse (je drei $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}^3$ Würfel).

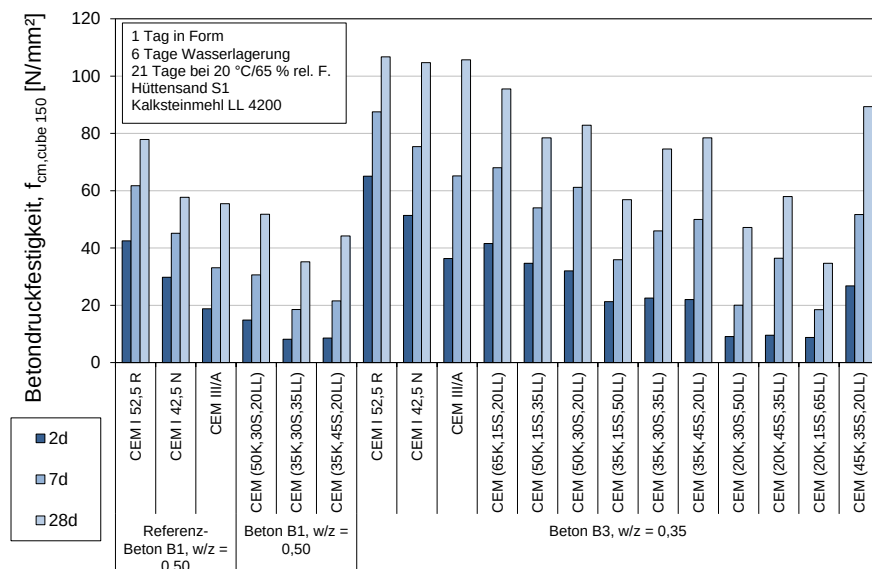


Bild 35 Druckfestigkeitsentwicklung der Betone B1 und B3

7.2.3 Diskussion der Ergebnisse

Bild 36 stellt die Ergebnisse der Druckfestigkeit und des Karbonatisierungswiderstandes der Feinbetone gegenüber. Erkennbar ist, dass der Karbonatisierungswiderstand bei steigender Druckfestigkeit zunimmt. Bei gleichbleibender Druckfestigkeit zeigen jedoch die Feinbetone mit Portlandzement kleinere Karbonatisierungstiefen, als die Proben mit hüttensand- und kalksteinhaltigen Zementen.

Die Ergebnisse aus den Abschnitten 7.2.1 und 7.2.2 zeigen, dass die Frischbetoneigenschaften, die Druckfestigkeit und der Karbonatisierungswiderstand des Betons mit Z6 (CEM (50K, 30S, 20LL)) mit einem w/z-Wert von 0,50 alle Anforderungen erfüllen bzw. einem Referenzbeton aus CEM III/A gleichwertig sind. Dieser Zement wird in die zukünftige Zementnorm EN 197-1 mit aufgenommen [13]. Es ist festzulegen, dass eine weitere Abminderung des Klinkergehalts (als ein Ziel des Vorhabens) nur bei gleichzeitiger Absenkung des w/z-Wertes möglich ist. Mit reduzierten w/z-Werten von 0,40 bzw. 0,35 zeigen die Zemente Z8 und Z10 (K = 35% bzw. 20% v. Z.) eine ausreichende Leistungsfähigkeit (hier hinsichtlich plastischer Viskosität, Druckfestigkeit und Karbonatisierungswiderstand (vgl. **Bild 37**).

Die Druckfestigkeit der (Fein-)betone mit im Werk produzierten Zementen war deutlich höher als die der (Fein-)betone mit Laborzementen gleicher Zusammensetzung (siehe **Bild 55**). Da Druckfestigkeit und Karbonatisierungswiderstand beide von der Gefügedichtigkeit abhängen, ist auch der Karbonatisierungswiderstand von (Fein-)betonen mit Werkzementen höher.

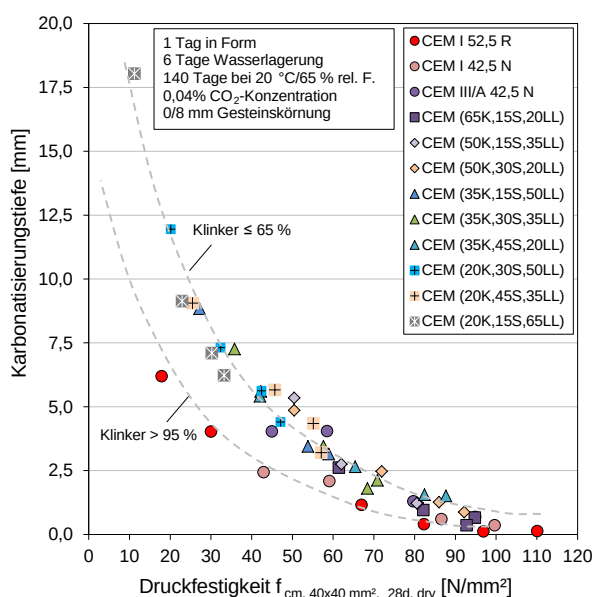


Bild 36 Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und dem Karbonatisierungswiderstand der untersuchten Feinbetone

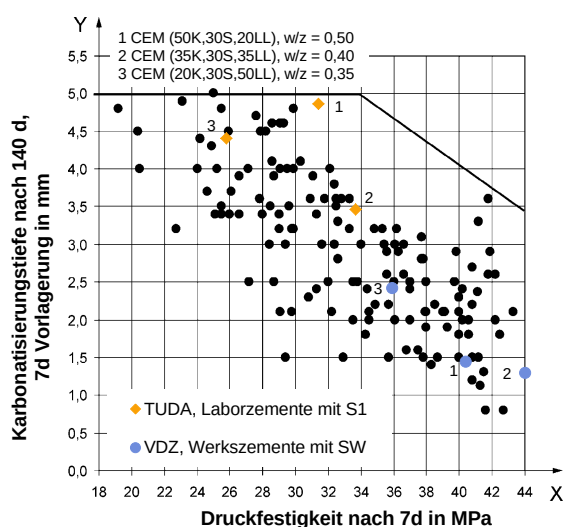


Bild 37 Vergleich der gemessenen Karbonatisierungswiderstände mit dem Bewertungshintergrund aus [11]

7.3 Prüfungen an Betonen mit Werkzementen

7.3.1 Allgemeines

Auf Grundlage der Vorversuche mit Laborzementen wurden Betone mit drei verschiedenen Werkzementen und unterschiedlichen Klinkergehalten (50%, 35% und 20% v. Z.) herge-

stellt und deren Eigenschaften geprüft. Die Wassermischungsverhältnisse betrugen 0,50, 0,40 bzw. 0,35. Um die Betoneigenschaften bewerten zu können, wurden auch Referenzbetone mit CEM I 52,5 R und CEM III/A 42,5 N jeweils mit Wassermischungsverhältnissen von 0,50 untersucht. Eine detaillierte Mischungszusammensetzung der Betone für die Hauptversuche ist in **Tabelle 6** dargestellt.

Tabelle 6 Mischungsentwürfe der Betone mit Werkszementen für die Prüfung der bemessungsrelevanten Betoneigenschaften

Mischung		Beton B1			Beton B2	Beton B3
		B050-CEM I 52,5 R	B050-CEM III/A 42,5 N	B050-CEM (50K,30S,20LL)-W	B040-CEM (35K,30S,35LL)-W	B035-CEM (20K,30S,50LL)-W
1		2	3	4	5	6
Zement	Art	CEM I 52,5 R	CEM III/A 42,5 N	CEM (50/20/30)	CEM (35/35/30)	CEM (20/50/30)
	Gesamtgehalt [kg/m³]	320	320	320	365	390
	Klinker [kg/m³]	320	160	160	128	78
	Kalkstein [kg/m³]	0	0	64	128	195
	Hüttensand [kg/m³]	-	160	96	110	117
w/z-Wert [-]		0,50	0,50	0,50	0,40	0,35
Wassergehalt [kg/m³]		160	160	160	146	136,5
Fließmittel ACE391 [kg/m³]		1,76	0,82	0,58	1,20	1,44
Zementleim [l/m³]		270 ± 5				
Quarzsand W3 [kg/m³]		67				
Rheinsand [kg/m³]		513				
Rheinkies 2/8 [kg/m³]		475				
Rheinkies 8/16 [kg/m³]		836				

7.3.2 Frischbetoneigenschaften

Die Konsistenz des Betons wurde 10, 30 und 60 Minuten nach der Wasserzugabe mittels Ausbreitversuch nach DIN EN 12350-5:2009 bestimmt. Die Ergebnisse zum Ausbreitmaß und zum Luftporengehalt sind in **Bild 38** abgebildet.

Erkennbar ist, dass die Mischungen mit $w/z > 0,35$, ausgehen von einem Ausbreitmaß $a_{15} > 450$ mm Ausbreitmaße von mehr als 300 mm nach 60 min erreichen konnten. Für den Beton B3 mit $w/z = 0,35$ wurde ein signifikanter Abfall des Ausbreitmaßes bis auf 250 mm beobachtet.

Bild 39 zeigt die Ergebnisse zur plastischen Viskosität und Fließmitteldosierung der untersuchten Betone mit Werkszementen. Aus **Bild 39** wird ersichtlich, dass mit abnehmendem Wassermischungsverhältnis eine Erhöhung der plastischen Viskosität einhergeht. Festgestellt wurde eine hohe plastische Viskosität von Beton B3 mit $w/z = 0,35$, knapp über der Verarbeitbarkeitsgrenze. Alle anderen Betone mit klinkereffizienten Zementen besitzen eine akzeptable plastische Viskosität im Vergleich zu den Referenzbetonen.

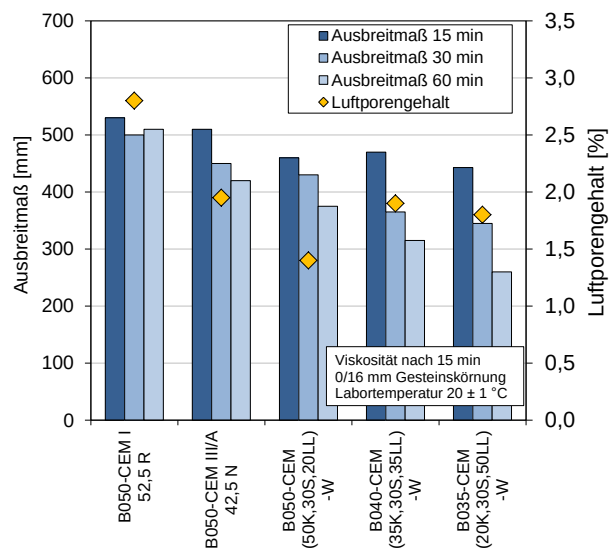


Bild 38 Ausbreitmaß und Luftporengehalt der untersuchten Betone mit Werkzementen

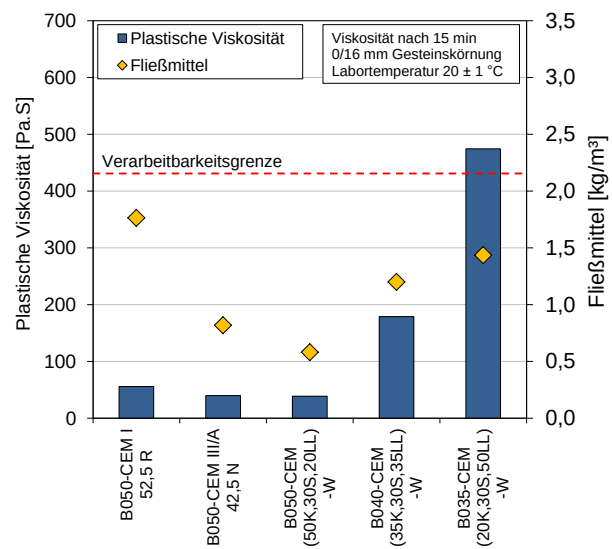


Bild 39 Plastische Viskosität und Fließmittelbedarf der untersuchten Betone mit Werkzementen

7.3.3 Druckfestigkeitsentwicklung und Arbeitslinie

Die Druckfestigkeit der Betone wurde im Alter von 2, 7, 28 und 91 Tagen geprüft. Es wurden für jeden Prüftermin 3 Würfel mit 150 mm Kantenlänge nach DIN EN 12390-3 hergestellt (bzw. 6 Probekörper für die Bestimmung der 28 Tage Druckfestigkeit). Die Würfel wurden entsprechend DIN EN 12390-2 einen Tag in der Form belassen, bis zum 7. Tag unter Wasser gelagert und anschließend bis zum jeweiligen Prüftermin bei einer Temperatur von etwa 20 °C und 65 % r. F. gelagert.

Die Untersuchung zur Bestimmung der Spannungs-Dehnungs-Linie erfolgte 28 Tage nach der Probenherstellung. Es wurden je Betonmischung 3 Betonzylinder mit einem Durchmesser von 150 mm und einer Höhe von 300 mm geprüft. Die Belastungsgeschwindigkeit betrug 0,075 mm/min.

Der Beton mit CEM I hat die höchste 28 Tage Festigkeit und weist zudem eine hohe Frühfestigkeit auf. Durch den latent hydraulischen Hüttensand verlangsamt sich die Festigkeitsentwicklung der Betone. Die Betone mit kalksteinhaltigen Zementen haben bei abgestimmten Wasserzementwert ähnliche Festigkeitswerte. Der geringere Klinkergehalt des Zements wird durch den verringerten w/z-Wert kompensiert. Alle Betone mit klinkereffizienten Zementen und abgestimmten Wasserzementwerten haben eine vergleichbare Festigkeitsentwicklung sowie Spannungs-Dehnungs-Beziehung im Vergleich zum Referenzbeton mit CEM III/A.

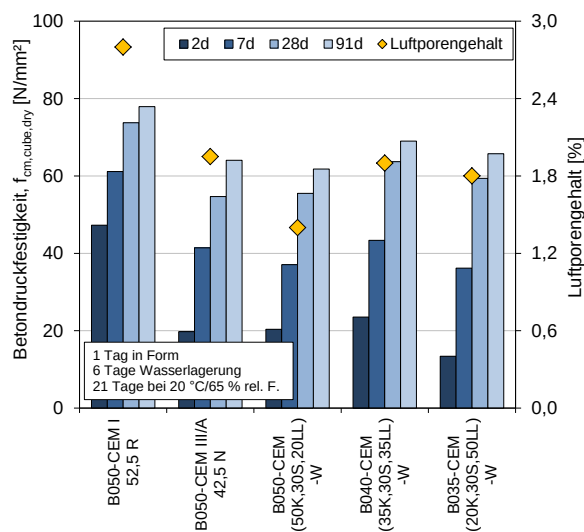


Bild 40 Druckfestigkeit und Luftporengehalt der Betone mit Werkzementen

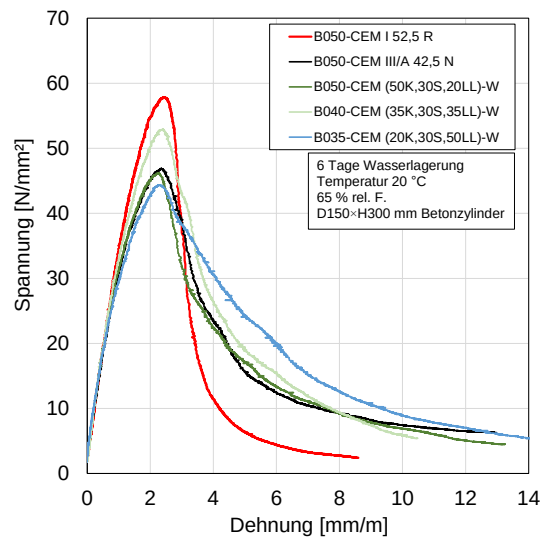


Bild 41 Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Betonzylinderproben

7.3.4 Spaltzugfestigkeit und Elastizitätsmodul

Ergebnisse zur Prüfung des E-Moduls nach DIN 1048-5:1991-06 und zur Spaltzugfestigkeit nach DIN EN 12390-5:2009-07 sind in **Bild 42** und **Bild 43** dargestellt. Die Prüfungen erfolgten im Betonalter von 28 Tagen. Der E-Modul und die Spaltzugfestigkeit der Betone lagen im zu erwartenden Bereich.

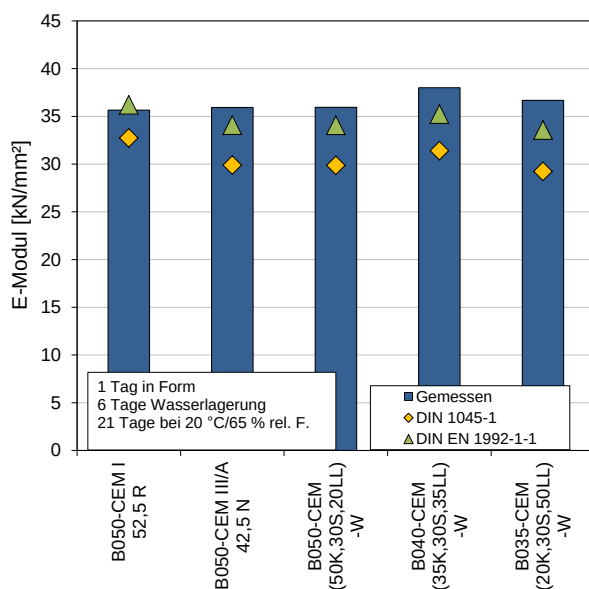


Bild 42 Darstellung des E-Moduls

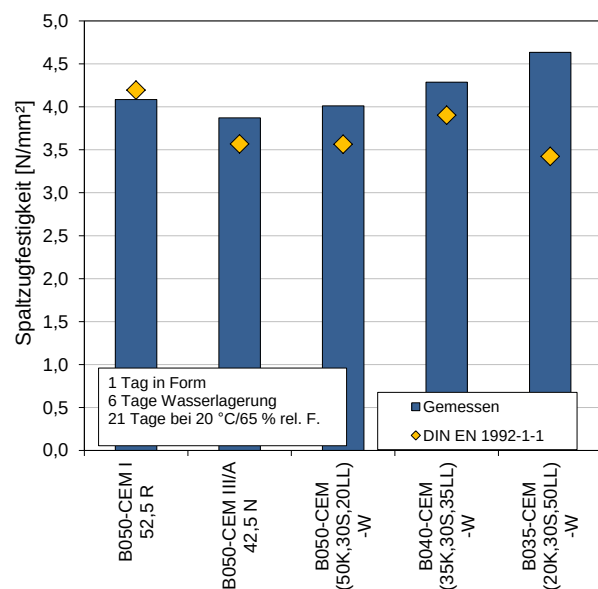


Bild 43 Darstellung der Spaltzugfestigkeit

7.3.5 Kriechen und Schwinden

Die Schwind- und Kriechmessungen an Zylindern mit den Abmessungen $\varnothing = 158 \text{ mm}$, $h = 300 \text{ mm}$ wurden in Anlehnung an DAfStb-Heft 422, Abschnitt 2.6 [14] an je 2 Zylindern durchgeführt. Die Probekörper wurden nach dem Betonieren einen Tag in der Schalung belassen, danach bis zum 7. Tag unter Wasser und anschließend bei einer Temperatur von 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von $(65 \pm 2) \%$ gelagert. Die Schwindmessungen wurden nach 6 Tagen Wasserlagerung, sowie 1, 3, 7, 14, 28, 56, 84, 112, 140 und 168 Tagen nach Auslagerung durchgeführt. Die Kriechmessungen erfolgten unmittelbar nach der Belastung, 2 Stunden sowie 1, 2, 7, 14, 28, 51, 56, 83, 111 und 140 Tage nach Belastung.

Für die Verformungsmessungen wurden auf der Mantelfläche der Zylinder mittig vier 150 mm lange Messstrecken auf jeweils um 90° gegeneinander versetzten Mantellinien angeordnet. Die verwendeten Probekörper inklusive der Messstellen, das Messverfahren sowie die Lagerungsbedingungen entsprechen denen der Schwindversuche. Die Kriechspannung von $\sigma_u = 1/3 f_{c,cyl}$ (aus **Bild 41**) wurde im Alter von 28 Tagen aufgebracht.

Die gemessenen Schwinddehnungsverläufe sind in Bild 44 dargestellt. Man erkennt ein ausgeprägtes Quellen des Betons mit Hochofenzement während der Wasserlagerung. Da der Beton mit CEM I das größte Schwindmaß hat, ist davon auszugehen, dass sich Kalkstein und Hüttensand positiv auf das Schwindverhalten auswirken. Da das Schwindmaß des Betons B050-CEM (50K,30S,20LL)-W bei gleichem w/z-Wert größer ist als das Schwindmaß des B050-CEM III/A, ist davon auszugehen, dass Hüttensand sich auf das Schwindverhalten günstiger auswirken kann als Kalkstein. Bei Anpassung des w/z-Wertes auf 0,35 entspricht der Beton mit CEM (20K,30S,50LL)-W dem Referenzbeton mit CEM III/A.

Die gemessenen Kriechdehnungsverläufe sind in **Bild 45** dargestellt. Es handelt sich um die reinen Kriechverkürzungen - elastischen Verkürzungen und Schwindverkürzungen sind nicht enthalten. Die Verkürzungen beziehen sich auf die Erstmessung unmittelbar nach dem Belastungsbeginn. Da der Beton mit CEM I das größte Kriechmaß hat, ist davon auszugehen, dass sich Kalkstein und Hüttensand positiv auf das Kriechverhalten auswirken. Beim Vergleich von B050-CEM III/A und B050-CEM (50K,30S,20LL)-W kann aufgrund des gleichen w/z-Wertes festgestellt werden, dass sich Hüttensand etwas günstiger auf das Kriechverhalten auswirkt als Kalkstein. Bei Anpassung des w/z-Wertes auf 0,40 bzw. 0,35 wirkt Kalkstein wie Hüttensand.

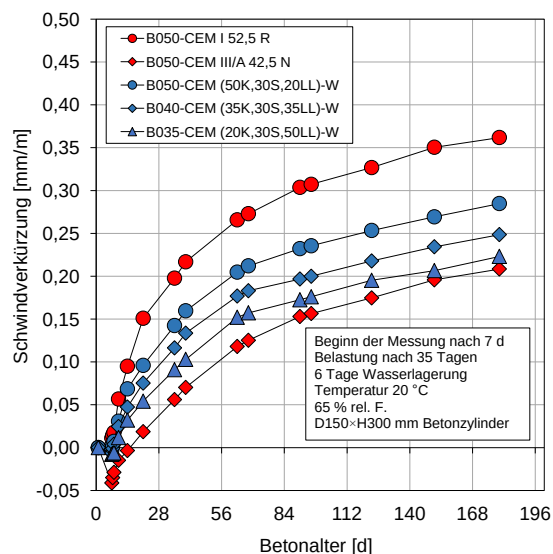


Bild 44 Verlauf der Schwindverformungen der Referenzbetone und der Betone mit klinkereffizienten Zementen

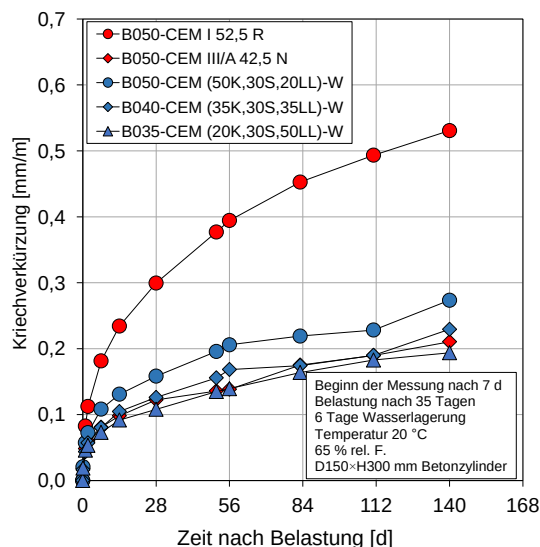


Bild 45 Kriechverformungen der Referenzbetone und der Betone mit klinkereffizienten Zementen

7.3.6 Karbonatisierungswiderstand

Die mittleren Karbonatisierungstiefen nach 28 und 56 Tagen Lagerung bei erhöhter CO_2 -Konzentration von 2 Vol.-% sowie die zugehörigen Druckfestigkeiten sind im **Bild 46** dargestellt. Der Beton B1 mit CEM I weist mit Abstand die niedrigsten Karbonatisierungstiefen auf und hat somit den größten Karbonatisierungswiderstand. Die Karbonatisierungswiderstände des Hochofenzementes sowie die der Betonmischung B050-CEM (50K,30S,20LL)-W befinden sich auf einem ähnlichen Niveau.

Eine kleinere Karbonatisierungstiefe im Vergleich zu anderen Betonen mit klinkereffizienten Zementen wurde bei Beton B040-CEM (35K,30S,35LL)-W festgestellt. Bei dem Beton mit dem geringsten Klinkergehalt (B035-CEM (20K,30S,50LL)-W) ist die Karbonatisierungstiefe am Größten.

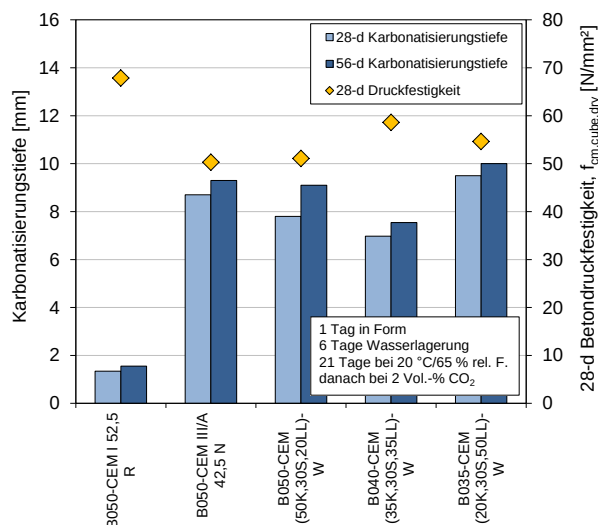


Bild 46 Mittlere Karbonatisierungstiefen

7.3.7 Robustheit

Anhand experimenteller Untersuchungen sollte quantifiziert werden, inwieweit sich die Variation des Wassergehaltes ($\Delta w = -10, 0, +10$ und $+20 \text{ l/m}^3$) und der Frischbetontemperatur ($T = 10, 20$ und 30 °C) auf den Fließmittelbedarf, die Verarbeitbarkeit, die Druckfestigkeit und den Karbonatisierungswiderstand auswirken. Dabei wurden die Untersuchungen sowohl an Betonen mit zwei klinkereffizienten Zementen als auch am Referenzbeton mit CEM III/A 42,5 N durchgeführt. Bei der Variation des Wassergehaltes wurde durch angepasste Fließmitteldosierung ein Ausbreitmaß von ca. 500 mm eingestellt.

In der Versuchsreihe mit variiertem Frischbetontemperatur wurden alle Ausgangsstoffe inkl. Zugabewasser in einer Klimakammer bei jeweiliger Zieltemperatur gelagert. Die Proben wurden nach der Betonherstellung (mit temperierten Ausgangsstoffen) 24 Stunden in der Klimakammer bei vorgegebener Solltemperatur gelagert. Anschließend wurden die Proben ausgeschalt und bei 20 °C bis zur Prüfung in Wasser gelagert.

Der Einfluss auf die Druckfestigkeit wurde durch die Prüfung der 2- und 28-Tage-Druckfestigkeit an Würfeln mit 150 mm Kantenlänge untersucht. Zur Beurteilung der Verarbeitbarkeit wurde die zur Einstellung des Ausbreitmaßes benötigte Menge an Fließmittel, das zeitabhängige Ausbreitmaß und die plastische Viskosität herangezogen. Der Einfluss auf die Dauerhaftigkeit gegenüber karbonatisierungsinduzierter Bewehrungskorrosion wurde durch die Messung der Karbonatisierungstiefe (Lagerung bei 20 °C , rel. F von 65 % und erhöhter CO_2 -Konzentration von 2 Vol.-%) quantifiziert.

Die Ergebnisse zum Ausbreitmaß, zur plastischen Viskosität, zur Druckfestigkeit und zum Karbonatisierungswiderstand sind in Abhängigkeit des Wassergehaltes in **Bild 47** bis **Bild 49** zusammengestellt. Den Einfluss der Betontemperatur verdeutlichen **Bild 50** bis **Bild 52**. Es kann beobachtet werden, dass die Druckfestigkeit der Betone mit kalksteinhaltigen Zementen sensibler auf die Änderung des Wassergehaltes reagieren, als die Druckfestigkeit des Referenzbetons mit CEM III/A. Gleiches gilt für die Karbonatisierungstiefe. Im Gegensatz zur Änderung des Wassergehaltes beeinflusst die Variation der Frischbetontemperatur den Fließmittelbedarf nur in geringem Maße. Der Einfluss der Frischbetontemperatur auf die Konsistenzhaltung und plastische Viskosität war ebenfalls gering. Die Ursache für die geringe 28-d Druckfestigkeit des Betons B050-CEM-(50K,30S,20,LL) bei 30 °C ist unklar.

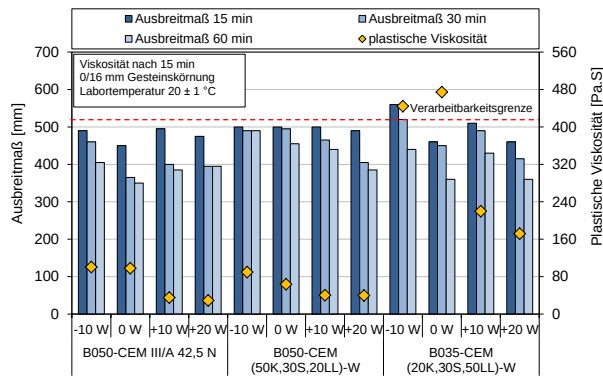


Bild 47 Ausbreitmaß und plastische Viskosität in Abhängigkeit des Wassergehaltes

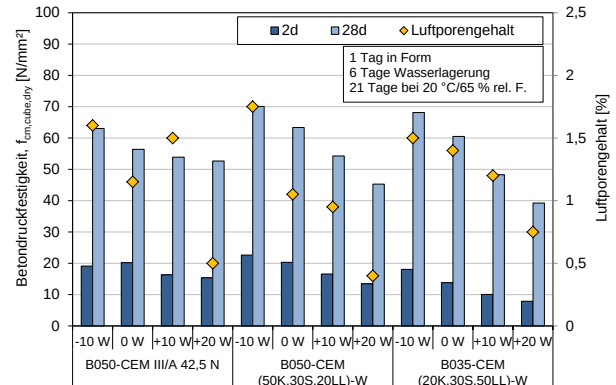


Bild 48 Druckfestigkeit und Luftporengehalt in Abhängigkeit des Wassergehaltes

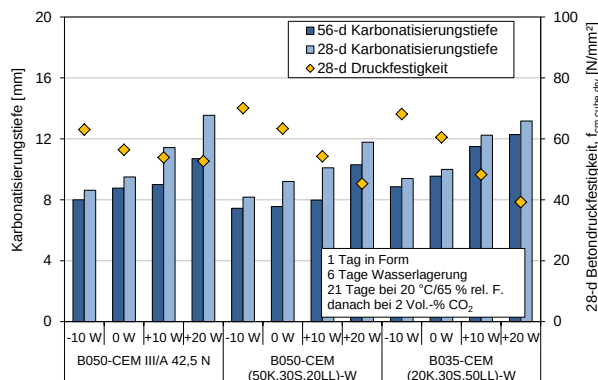


Bild 49 Karbonatisierungstiefe in Abhängigkeit des Wassergehaltes

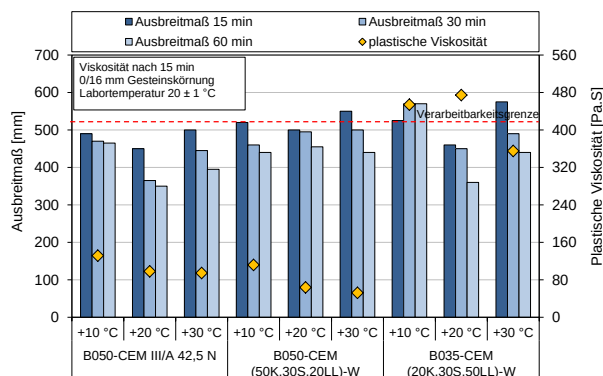


Bild 50 Ausbreitmaß und plastische Viskosität in Abhängigkeit der Frischbetontemperatur

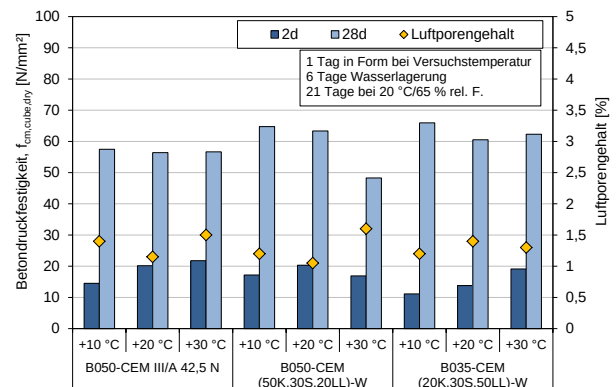


Bild 51 Druckfestigkeit und Luftporengehalt in Abhängigkeit der Frischbetontemperatur

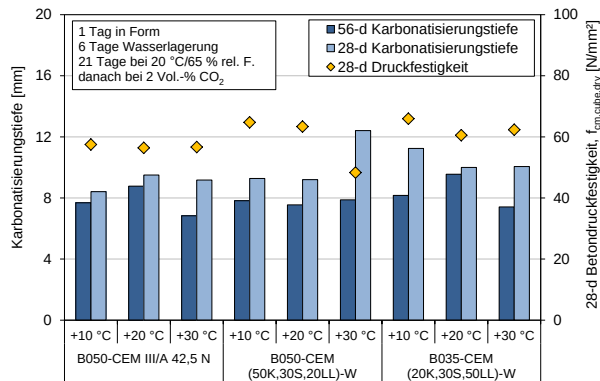


Bild 52 Karbonatisierungstiefe in Abhängigkeit der Frischbetontemperatur

7.4 Traglastversuche an Bauteilen

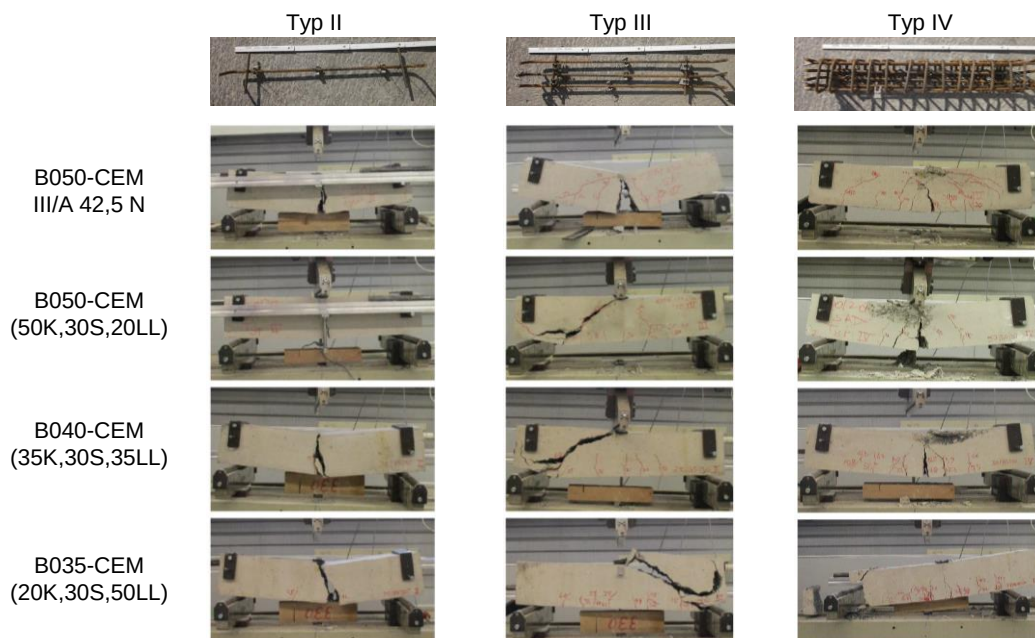
Nach der Ermittlung der bemessungsrelevanten Festbetoneigenschaften wurde auch das Verhalten bewehrter Betonprobekörper untersucht. Aus der Referenzmischung B050-CEM III/A und den Mischungen mit klinkereffizienten Zementen B050-CEM (50K,30S,20LL)-W, B040-CEM (35K,30S,35LL)-W und B035-CEM (20K,30S,50LL)-W wurden bewehrte und unbewehrte Betonbalken mit den Maßen 150 x 150 x 700 mm³ hergestellt. Zweck der unterschiedlichen Bewehrungsführung war es, für jede Betonmischung alle relevanten Versagensmechanismen zu erzeugen. Die Balken vom Typ II wurden mit einer schwachen Längsbewehrung versehen, die Balken vom Typ III mit einer starken Längsbewehrung. Typ IV wurde mit einer starken Längsbewehrung und einer Bügelbewehrung hergestellt.

Mit den Mittelwerten der Materialparameter und der einwirkenden Kraft wurden die Bauteilversuche nach DIN EN 1992-1-1 nachgerechnet. Die Messwerte der Bauteilprüfungen und die berechneten Versagenslasten sind in **Tabelle 7** gegenübergestellt. Die Rechenwerte für die Bauteile aus Referenzbeton und den Betonen aus den entwickelten klinkereffizienten Zementen stimmen gut mit den gemessenen Werten überein. Allerdings wiesen die Bauteile des Typ III eine unerwartete hohe Tragfähigkeit aus. Weiterhin zeigten die geprüften Bauteile das erwartete Versagensverhalten (außer Bauteil Typ III aus CEM III/A). Die Rissbildung und die Versagensart der untersuchten bewehrten Balken sind im **Bild 53** zu sehen.

Tabelle 7 Gegenüberstellung der gemessenen und rechnerischen Traglasten

Beton	Typ	gemessene Maximallast		Rechnerische Traglast für		Ausnutzungsgrad	
		Biegung [kN]	Querkraft [kN]	Biegung [kN]	Querkraft [kN]	Biegung [%]	Querkraft [%]
1	2	3	4	5	6	7	8
B050-CEM III/A 42,5 N	III	25	13	24	22	104	57
B050-CEM (50K,30S,20LL)-W		26	13	24	23	105	57
B040-CEM (35K,30S,35LL)-W		26	13	24	23	105	57
B035-CEM (20K,30S,50LL)-W		25	13	24	21	104	59
B050-CEM III/A 42,5 N	III	74	37	71	28	104	132
B050-CEM (50K,30S,20LL)-W		67	33	71	28	94	118
B040-CEM (35K,30S,35LL)-W		68	34	71	28	96	121
B035-CEM (20K,30S,50LL)-W		72	36	71	27	102	133
B050-CEM III/A 42,5 N	IV	154	77	131	184	118	42
B050-CEM (50K,30S,20LL)-W		146	73	131	187	112	39
B040-CEM (35K,30S,35LL)-W		146	73	131	187	112	39
B035-CEM (20K,30S,50LL)-W		141	71	131	187	108	38

Fett: Ausnutzungsgrad bei maßgebendem Versagenskriterium

**Bild 53** Rissbildung und Versagensart der untersuchten bewehrten Balken

8 Vergleich der Ergebnisse

8.1 Vergleich zwischen den Forschungsstellen

Die Versuche im Forschungsvorhaben wurden so auf die Forschungsstellen verteilt, dass möglichst wenige Prüfungen doppelt durchgeführt werden mussten. So wurden mit den Laborzementen im VDZ im Wesentlichen Mörtel gemäß bzw. in Anlehnung an DIN EN 196-1 (Größtkorn 2 mm) geprüft, während an der TUDA Feinbetone mit einem Größtkorn von 8 mm bzw. Betone mit einem Größtkorn von 16 mm geprüft wurden.

Mit den drei Werkzementen wurden beim VDZ Betone mit jeweils Wasserzementwerten geprüft, während an der TUDA als Ergänzung zu den umfangreichen Untersuchungen an Betonen mit Laborzementen lediglich 3 Werkzement – Wasserzementwert – Kombinationen untersucht. In diesem Arbeitspaket sind entsprechend Prüfungen zur Betondruckfestigkeit

vorhanden, die an beiden Prüfstellen durchgeführt wurden. **Bild 54** zeigt, dass die Druckfestigkeiten zu späteren Prüfzeitpunkten beim VDZ bis zu 20 % höher sind als bei der TUDA. Gründe dafür können in den unterschiedlichen Gesteinskörnungen bzw. in deren Verwendung liegen: Beim VDZ werden Gesteinskörnungen kernfeucht und oberflächentrocken eingesetzt. Die TUDA verwendet ofentrockene Gesteinskörnungen und gibt die dem Wasseranspruch der Gesteinskörnung entsprechende Wassermenge dem Zugabewasser hinzu.

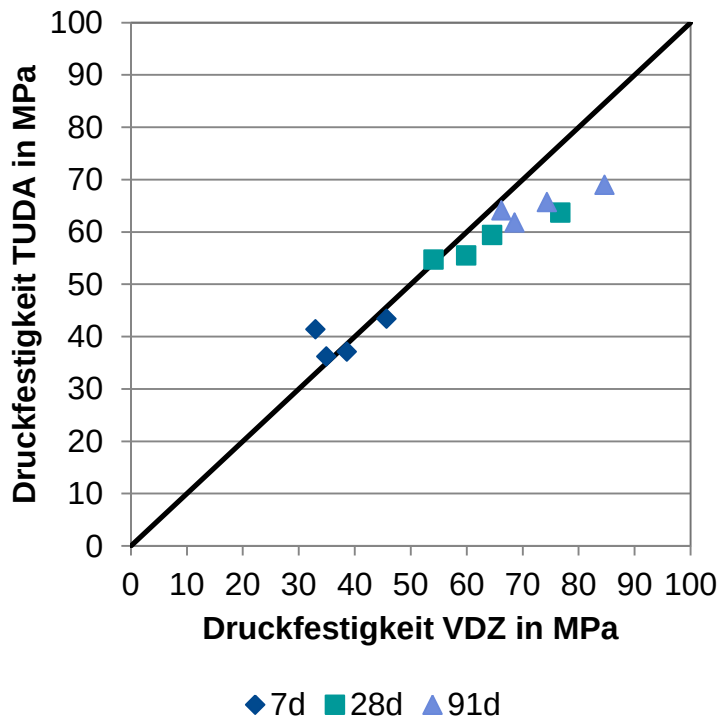
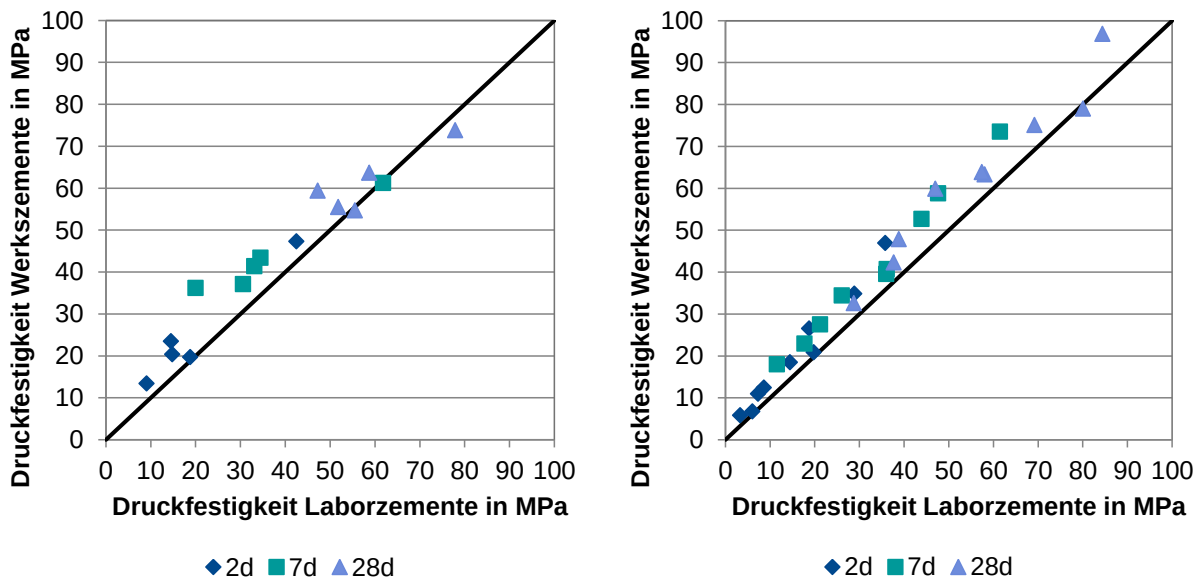


Bild 54 Vergleich der Betondruckfestigkeiten TUDA / VDZ

8.2 Vergleich zwischen Labor- und Werkszementen

Die Betonversuche der TUDA bzw. die Mörtelversuche des VDZ ermöglichen einen direkten Vergleich zwischen der Leistungsfähigkeit der Labor- und der Werkszemente. **Bild 55** zeigt, dass bei Verwendung eines Hüttensandes vergleichbarer Feinheit (S1 und Sw) die Mörtel und Betone mit Werkszementen im Mittel um rd. 23 -25 % höhere Festigkeiten aufweisen.



Betonversuche TUDA

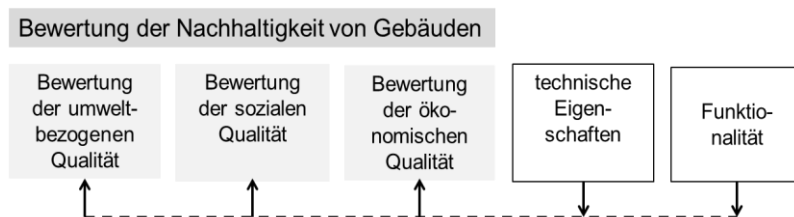
Mörtelversuche VDZ

Bild 55 Vergleich der Druckfestigkeiten Laborzemente / Werkzemente

9 Ökobilanzierung

9.1 Grundlagen Nachhaltigkeitsbewertung

Eine Nachhaltigkeitsbewertung von Gebäuden beinhaltet nach den in CEN/TC 350 („Sustainability of Construction Works“) entwickelten europäischen Normen eine Bewertung der umweltbezogenen, der sozialen und der ökonomische Qualität. Die technische und funktionale Qualität steht in einer Wechselbeziehung zu der umweltbezogenen, sozialen und ökonomischen Qualität und wird daher für eine Bewertung der Nachhaltigkeit eines Gebäudes ebenfalls berücksichtigt (vgl. **Bild 56**, in Anlehnung an [15])

**Bild 56** Definition „Nachhaltiges Bauen“ des DGNB [15]

In Deutschland wurde in einer zweijährigen kooperativen Zusammenarbeit des Bundesministeriums für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) mit der Deutschen Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen e. V. (DGNB) ein System zur ganzheitlichen Betrachtung und Bewertung von Nachhaltigkeitsaspekten für Gebäude entwickelt. Hieraus entwickelten sich zwei Zertifizierungssysteme, das Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen für Bundesgebäude (BNB) sowie das Zertifizierungssystem der DGNB. Beide Systeme berücksichtigen ökologische, ökonomische, soziale und technische Kriterien.

9.1.1 Die Methodik der Ökobilanzierung

Die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und 14044 [16, 17] , die als Untersuchungsmethode für das vorliegende Forschungsvorhaben herangezogen wurde, dient der Abschätzung der mit einem Produkt verbundenen Umweltaspekte und produktspezifischen potenziellen Umweltwirkungen.

Ein Produkt kann hierbei eine Ware (wie z. B. ein Fertigteil oder eine Betonsorte), ein verfahrenstechnisches Hilfsmittel (wie z. B. Schalöl oder das Thermoöl für die Wärmebehandlung) oder eine Dienstleistung (wie z. B. ein Transportprozess) sein.

Die Methode der Ökobilanz besteht nach DIN EN ISO 14040 bzw. DIN EN ISO 14044 aus den nachfolgenden Arbeitsschritten, die in **Bild 57** dargestellt sind:

- Festlegung des Ziels der Ökobilanz und des Untersuchungsrahmens
- Sachbilanz
- Wirkungsabschätzung
- Auswertung

Die einzelnen Schritte beeinflussen sich gegenseitig und können nicht getrennt voneinander betrachtet werden. Im Folgenden werden die einzelnen Bestandteile bzw. Phasen einer Ökobilanz detailliert erläutert.

9.1.2 Phasen einer Ökobilanz

Der erste Arbeitsschritt der Ökobilanz besteht nach DIN EN ISO 14040 aus den zwei Teilabschnitten „Festlegung des Ziels“ und „Festlegung des Untersuchungsrahmens“. Die „Festlegung des Ziels“ umfasst hierbei Angaben zu den Gründen der Durchführung der Ökobilanz sowie eine Definition des Adressaten der Untersuchung. Der ebenfalls festgelegte Untersuchungsrahmen besteht aus Angaben zur Systemgrenze, der funktionellen Einheit und Informationen zur Datenqualität. Die Systemgrenze definiert sich hierbei als der technische und geografische Erfassungsraum der Daten, sowie der Zeitraum über den die Ökobilanz erstellt wird. Idealerweise ist die Systemgrenze so gewählt, dass an ihren Grenzen nur noch Elementarflüsse als Input oder Output auftreten. Die Sicherstellung der Vergleichbarkeit von zwei oder mehreren Ökobilanzen erfordert die Festlegung einer funktionellen Einheit. Sie ist die Größe auf die alle Input- und Outputströme bezogen werden. Vergleichbar sind zwei Ökobilanzen, wenn sie die gleiche Funktion erfüllen oder denselben Nutzen erzeugen und die identische Systemgrenze haben.

In der im zweiten Arbeitsschritt der Ökobilanz zu erstellenden Sachbilanz werden die Daten der Input- und Outputströme des Produktsystems gesammelt und quantifiziert. In ihr wird ein Bezug zwischen den Energie- sowie Stoffverbräuchen und der funktionellen Einheit hergestellt. Die Sachbilanz stellt die Grundlage für die spätere Wirkungsabschätzung dar.

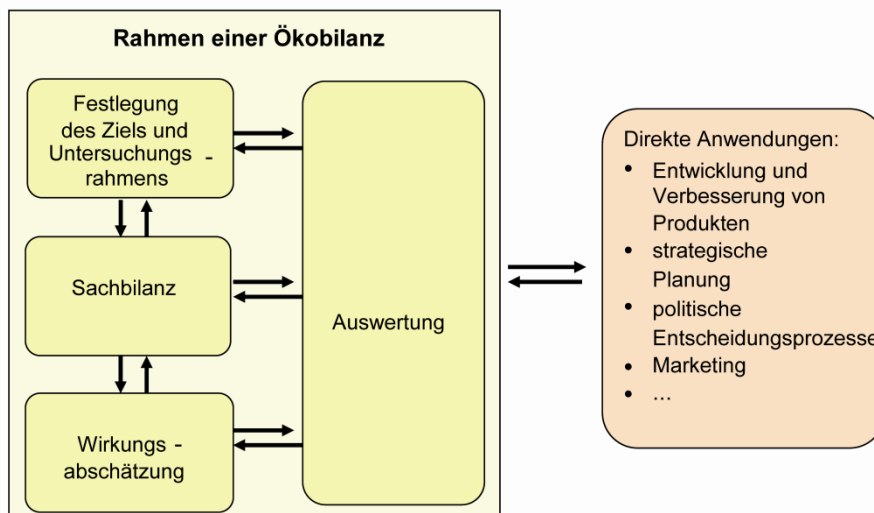


Bild 57 Vorgehensweise bei einer Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040 und 14044 [16, 17]

Im Arbeitsschritt „Wirkungsabschätzung“ werden aus den in der Sachbilanz zusammengetragenen Daten potentielle Umweltauswirkungen abgeleitet. Hierzu werden die einzelnen aus der Sachbilanz resultierenden Stoff- und Energieströme spezifischen, für die Untersuchung ausgewählten Kriterien zugeordnet (Klassifizierung) und gemäß ihres Beitrags zur mit dem Kriterium verbundenen Umweltwirkung gewichtet (Charakterisierung). Mögliche Kriterien einer Ökobilanz sind im folgenden Abschnitt dargestellt.

In dem die Ökobilanz abschließenden Arbeitsschritt „Auswertung“ werden die Ergebnisse der Studie dargestellt. Zudem erfolgt eine Beurteilung der Güte der Ökobilanz durch die Prüfung auf Vollständigkeit, Sensitivität und Konsistenz. Kontrolliert wird zudem die Übereinstimmung der Ergebnisse mit dem in Arbeitsschritt 1 definierten Ziel, sowie dem Untersuchungsrahmen der Ökobilanz. Der Arbeitsschritt enthält zudem Schlussfolgerungen, Erläuterungen von Einschränkungen und Empfehlungen für das weitere Vorgehen.

Um die Umweltwirkungen eines Baustoffs bzw. Bauwerks beschreiben und quantifizieren zu können, werden im Rahmen der Ökobilanz verschiedene ökologischen Kriterien herangezogen. Die genaue Definition der üblichen Kriterien, beispielsweise Treibhauspotential oder Primärenergiebedarf, können beispielsweise in [6] nachgelesen werden.

9.2 Durchgeführte Ökobilanzierung

9.2.1 Allgemein

Im folgendem Kapitel werden die Umweltwirkungen der im Forschungsprojekt entwickelten Zemente und Betone berechnet und grafisch dargestellt. Für die Berechnungen wurde auf die Basisdaten der Software GaBi 5 des Netzwerks Lebenszykluskosten (Datenprojekt Zement) [18] und die EPD für den deutschen Durchschnittszement (VDZ) zugegriffen [19]. Für die Bewertung der Zemente und Betone wurden die Transportwege vom Werk zum Abnehmer vernachlässigt.

9.2.2 Bilanzierung der Zemente

In den folgenden Diagrammen sind das Treibhauspotential, der Gesamtenergiebedarf (Primärenergie (erneuerbar und nicht erneuerbar) zuzüglich Energie aus Sekundärbrennstoffen) und Relativwerte weiterer Wirkungskategorien für übliche Portlandzemente und Zemente mit verschiedenen hohen Kalkstein- und Hüttensandgehalten dargestellt (**Bild 58** und **Bild 59**). Diese Betrachtung erfolgte unabhängig von der Zementleistungsfähigkeit. Es wird deutlich, dass die Werte aller Wirkungskategorien bei einer Substitution des Zementklinkers durch Kalkstein und Hüttensand signifikant reduziert werden können. Der Unterschied im Gesamtenergiebedarf (**Bild 58**) zwischen dem deutschen Durchschnittszement und den GaBi-Daten resultiert aus der aktuelleren Datenerhebung des EPD- Zements. In der Zeit zwischen der Erhebung der beiden Datensätze haben sich sowohl die Einsatzmengen an Sekundärbrennstoffen in der Zementindustrie, als auch der durchschnittliche Energiemix in Deutschland signifikant verändert. Bei der Ökobilanzierung des Hüttensands wurde eine ökonomische Allokation (0,114 kg CO₂-äquiv./kg Hüttensand) nach [20] berücksichtigt.

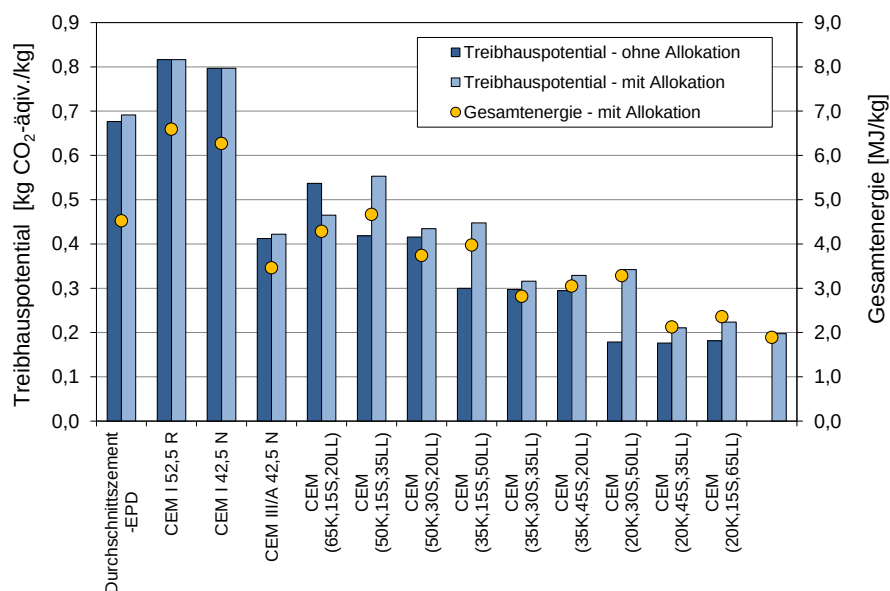


Bild 58 Treibhauspotential und Gesamtenergiebedarf der analysierten Zemente mit und ohne Allokation

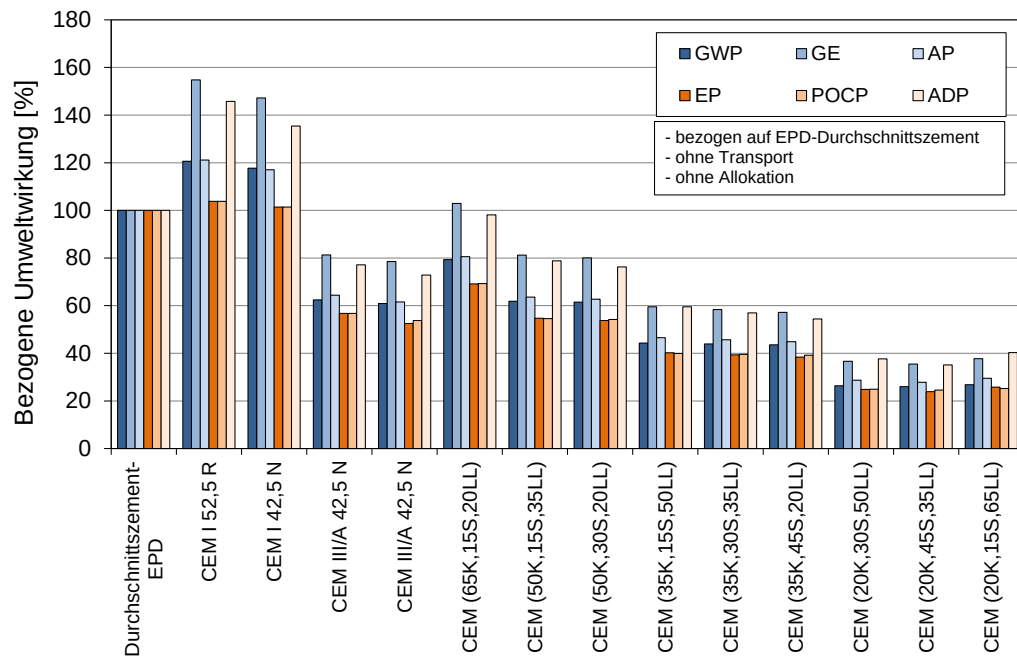


Bild 59 Gegenüberstellung der Umweltwirkungen der Referenz- und Laborzemente aus K-S-LL bezogen auf Durchschnittszement für Deutschland

9.2.3 Bilanzierung der Betone

Im Gegensatz zur Bewertung der Zemente wurde bei der Betonbewertung die jeweilige Leistungsfähigkeit (Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit) berücksichtigt. Betone (mit ähnlicher Druckfestigkeit und Leistungsfähigkeit) mit klinkereffizienten Zementen wurden mit Referenzbetonen sowie einem im vorangegangenen Forschungsvorhaben entwickelten Beton mit kalksteinreichem Zement (B035-CEM (50K,0S,LL50)) verglichen. In **Bild 60** und **Bild 61** sind die Ergebnisse zur Ökobilanzierung der Betone mit vergleichbarer Leistungsfähigkeit bezüglich Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit dargestellt. Vergleichbare Ergebnisse gegenüber den Referenzbetonen hinsichtlich ihres Chlorideindringwiderstandes zeigten die Betone B050 CEM (50K,30S,20LL)-W, B040 CEM (35K,30S,35LL)-W und B035 CEM (20K,30S,50LL)-W (vgl. Kapitel 7.2 und 7.2.3).

Die 28 Tage Betondruckfestigkeiten der analysierten Betone betragen 65 ± 10 N/mm.

Im Vergleich mit dem Beton mit EPD Durchschnittszement ergibt sich eine Minderung des GWP von ca. 35% bei Verwendung des Betons B050-CEM (50K,30S,20LL)-W. Größere Einsparungen bis zu 40% und 55% können bei der Verwendung der Betone B040-CEM (35K,30S,35LL)-W und B035-CEM (20K,30S,50LL)-W erreicht werden. Gegenüber dem Referenzbeton mit CEM I 42,5 R wurde eine maximale Verringerung des GWP um bis zu 61% beim Beton B035-CEM (20K,30S,50LL)-W erreicht. Allerdings erreichen die Verarbeitbarkeit (plastische Viskosität) und die Dauerhaftigkeit hinsichtlich Karbonatisierungswiderstand nicht die zuvor definierten Anforderungen.

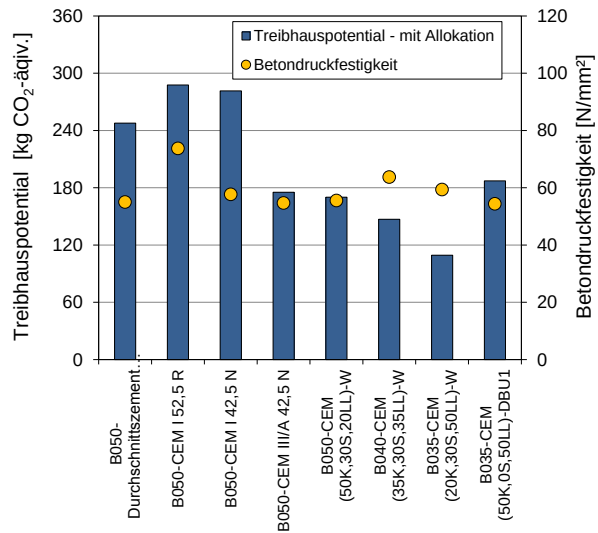


Bild 60 Treibhauspotential der untersuchten Betone aus Werkzementen

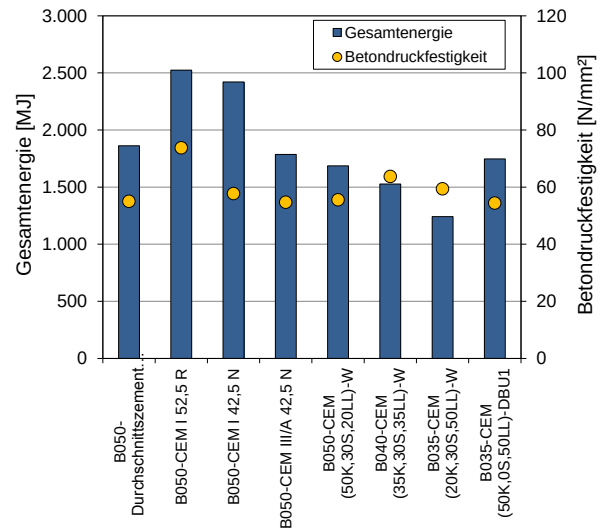


Bild 61 Gesamtenergiebedarf der untersuchten Betone aus Werkzementen

10 Technische Bewertung der Ergebnisse

Die Versuche haben gezeigt, dass sich Zemente aus dem in **Bild 3** gezeigten Bereich neuer K-S-LL – Zemente prinzipiell zur Herstellung von Konstruktionsbetonen eignen.

Zemente im Grenzbereich der derzeit vorgesehenen Erweiterung der DIN EN 197-1 sind dabei für Zementhersteller von besonderem Interesse: Diese Zemente weisen im Vergleich zu bisher im Markt etablierten Zementen vergleichbare Frischbetoneigenschaften, gute mechanische Eigenschaften und, mit Ausnahme des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstandes, sehr gute Dauerhaftigkeitseigenschaften im Rahmen üblicher Betontechnologie auf. Werden solche Zemente unter Beachtung einer chemisch-mineralogischen sowie granulometrischen Optimierung und der im Zementwerk sichergestellten Qualitätsüberwachung produziert, könnten sie vergleichsweise einfach im Markt platziert werden. Ein Hindernis stellt der in weiteren Optimierungsschritten sicherzustellende Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand dar.

Für Zemente deutlich jenseits des Bereichs der derzeit vorgesehenen Erweiterung der DIN EN 197-1 gelten prinzipiell die Erkenntnisse des vorangegangenen Forschungsvorhaben zu Zementen im Zweistoffsystem K-LL: Diese K-S-LL - Zemente sind ebenfalls für die Herstellung von Konstruktionsbeton geeignet, wenn anspruchsvolle verfahrenstechnische Maßnahmen im Zementwerk und ebenso anspruchsvolle betontechnologische Maßnahmen (wasserarmer Beton mit entsprechenden Zusatzmitteldosierungen) in der Betonherstellung beachtet werden. Die Robustheit derartiger Systeme im Baubetrieb bedarf weiterhin einer zusätzlichen Absicherung. Werden die genannten Bedingungen eingehalten, kann die im vorangegangenen Forschungsvorhaben definierte Grenze von 50 M.-% Klinker im Zement weiter gesenkt werden. Damit sinken auch das Treibhauspotential sowie der Gesamtenergiebedarf für Herstellung eines Kubikmeters Beton (vgl. **Bild 60** und **Bild 61**).

11 Ökobilanzielle Bewertung der Ergebnisse

Die hergestellten Betone mit den neu entwickelten Zementen weisen mit den Referenzbetonen vergleichbare Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie Dauerhaftigkeitskennwerte auf bzw. erfüllen die definierten Grenzwerte. Eine Ausnahme bilden der Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand. Aufgrund der begrenzten Verfügbarkeit des Hüttensandes wurde dessen Maximalgehalt in den Werkszementen auf 30 M.-% festgelegt.

Die Umweltwirkungen der untersuchten Betone konnten durch Substitution des Portlandzementklinkers mit Hüttensand (reaktive Komponente) und Kalksteinmehl (inerte Komponente) signifikant abgesenkt werden. Das Treibhauspotential des Betons mit CEM (50K,30S,20LL) liegt bei konventionellen betontechnologischen Randbedingungen 30% unter dem Wert des Betons mit EPD Durchschnittszement.

Bei angepassten betontechnologischen Maßnahmen (granulometrische Optimierung der Zementkomponenten sowie Absenkung des w/z-Wertes) könnte eine weitere Reduzierung der CO₂-Emmision erreicht werden; bei B035-CEM (20K,30S,50LL) bis zu 55% gegenüber dem EPD-Durchschnittszement (vgl. **Bild 60**). Die gleiche Tendenz (aber in geringerer Größenordnung aufgrund des Energiebedarfs zur Mahlung des Hüttensandes) gilt für den Gesamtenergiebedarf (vgl. **Bild 61**). Der Beton B040-CEM (35K,30S,35LL) wies sowohl eine hohe Leistungsfähigkeit in allen technischen Kriterien als auch eine günstige Umweltwirkung auf. Das Treibhauspotential (mit Allokation) reduzierte sich hier auf 147 kgCO₂-äquiv./m³.

Insgesamt wurden die im Projektantrag formulierten Ziele zur Verringerung der relevanten Umweltwirkungen (Treibhauspotential, siehe Abbildung 12 im Antrag) erreicht.

12 Ökonomische Bewertung der Ergebnisse

Für die Fa. Spenner Zement ergeben sich durch das Forschungsvorhaben ökonomische Vorteile sowohl durch eine kurzfristige Umsetzung der Erkenntnisse im Rahmen der Herstellung bisher praxisüblicher Zemente als auch ggf. mittelfristig weitere Vorteile durch die Einführung neuer Zemente auf Basis veränderter Betontechnologie.

Der CEM (50K, 30S, 20LL) liegt im Grenzbereich der derzeit vorgesehenen Erweiterung der DIN EN 197-1 zwischen CEM II/C-M (S-LL) und CEM VI. Dieser Zement hat sich als sehr leistungsstark erwiesen. Sowohl die Verarbeitungseigenschaften, als auch die Festigkeitsentwicklung und die Dauerhaftigkeit mit Ausnahme der Versuche zum Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand entsprechen den Eigenschaften bisher marktüblicher Zemente. Dabei weist dieser Zement einen geringen Klinkergehalt, einen moderaten Hüttensandgehalt und den nach der derzeit vorgesehenen Erweiterung der DIN EN 197-1 maximalen Kalksteingehalt auf. Der Zement müsste hinsichtlich des Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand werksseitig noch optimiert werden, beispielsweise durch eine geringfügige Anhebung des Klinkeranteils bzw. eine Erhöhung der Mahlfineinheit des Klinkers bzw. des Hüttensandes. Der Zement könnte dann – nach Vorliegen entsprechender bauordnungsrechtlicher Nachweise (allgemeine bauaufsichtliche Anwendungszulassung oder Europäische Technische Bewertung) – in das Produktportfolio der Firma Spenner Zement aufgenommen werden.

Durch eine Erhöhung des Anteils an weiteren Hauptbestandteilen kann pro produzierter Tonne Klinker mehr Zement hergestellt werden. Da die Zuteilung von CO₂ – Zertifikaten für ein Zementwerk auf Basis der Klinkerproduktion erfolgt, ergeben sich weitere wirtschaftliche Vorteile durch die Markteinführung neuer, leistungsfähiger Zemente mit geringeren Klinkergehalten.

13 Umsetzung der Ergebnisse bei der Firma Spenner Zement

Die Firma Spenner Zement ist bestrebt, den Klinkerfaktor des Produktportfolios möglichst gering zu halten. Derzeit werden – neben Portlandzement – Zemente mit Hüttensand oder Kalkstein als weiterem Hauptbestandteil produziert. Die Firma Spenner Zement hat durch das Mahlwerk in Duisburg Zugriff auf bisher ausreichende Mengen an Hüttensand, um diese Strategie zu verfolgen. Es ist jedoch nicht abzusehen, wie sich die Verfügbarkeit von Hüttensand sowohl in der benötigten Menge als auch der benötigten Qualität zukünftig in Deutschland entwickeln wird: So sind die Betreiber von Hochöfen beispielsweise bestrebt, ihren Rohstoffen einen definierten Anteil an Titandioxid zuzugeben, um die Hochofenreise (Betriebsdauer eines Hochofens zwischen zwei Neuzustellungen oder Wartungszyklen) zu verlängern. Dieser Titandioxidgehalt findet sich im Hüttensand wieder und senkt üblicherweise die Leistungsfähigkeit des Hüttensands bzw. damit hergestellter Zemente.

Die Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens versetzen Spenner Zement in die Lage, auf zukünftige Entwicklungen in der deutschen Stahlindustrie zu reagieren: CEM II/B-M (S-LL), CEM II/C-M (S-LL) oder CEM VI-Zemente können auf Basis der Erkenntnisse des Forschungsvorhabens mit im Vergleich zu CEM III Zementen geringeren Hüttensandgehalten produziert werden. Durch die Kombination mit Kalkstein kann der Klinkerfaktor des Produktportfolios konstant gehalten oder sogar gesenkt werden.

Das Forschungsvorhaben hat des Weiteren zu Erkenntnissen geführt, welche Parameter relevant sind, um geeignete Klinker für Zemente im Dreistoffsystem K-S-LL zu produzieren. Der Klinker, der derzeit bei Spenner Zement für einen CEM I 52,5 R verwendet wird, ist hierfür geeignet. Ggf. müssen zur Sicherstellung des Frostwiderstandes von klinkereffizienten CEM II/C-M (S-LL) oder CEM VI-Zementen noch einige Optimierungen vorgenommen werden.

Die Firma Spenner Zement überlegt – auch auf Basis der Ergebnisse dieses und des vorangegangenen Forschungsvorhabens – das gesamte Mühlenkonzept zu überarbeiten. Derzeit laufen Technikumsversuche zur Produktion von Portlandzement bzw. der Klinkerkomponente für Kalkstein- oder Hochofenzemente in einer Vertikalmühle, die momentan ausschließlich für die Produktion von Hüttensand verwendet wird.

Generell hat das Forschungsvorhaben gezeigt (**Bild 55**), dass Zemente im Zementwerk mit besserer Leistungsfähigkeit bei gleicher Zementzusammensetzung produziert werden können als im Labor. Grund dafür sind im vorliegenden Fall die genaue Kenntnis über die chemisch-mineralogischen sowie granulometrischen Eigenschaften der Zementbestandteile in Verbindung mit einer optimierten Mischtechnik sowie ein hohes Maß an Qualitätssicherung als begleitende Maßnahme.

14 Literatur

- [1] V. Hoenig, K. Koring, P. Fleiger, C. Müller und S. Palm, „Energieeffizienz bei der Zementherstellung – Teil 1,“ *Cement International*, 2013 (in Vorbereitung).
- [2] Institut für Baustoff-Forschung e.V. (FEhS), „Report,“ Duisburg, 2011, 18. Jahrgang, Nr.1.
- [3] Institut für Baustoff-Forschung e.V. (FEhS), *persönliche Mitteilung*, Juli 2012.
- [4] Backes, H.-P., Brandenburger, D., Meißner, M., „Flugasche - Verfügbarkeit, Logistik, Potential,“ 2011.
- [5] VGB Powertech e.V., *persönliche Mitteilung*, Juli 2012.
- [6] W. Neufert, S. Palm, T. Proske, S. Hainer, M. Rezvani, I. Reuken, K. Severins, G. Weber, C. Müller und C.-A. Graubner, „Reduzierung der Umweltwirkung der Betonbauweise durch neuartige Zemente und daraus hergestellter Betone unter Verwendung hinreichend verfügbarer Ausgangsstoffe, vorläufiger Abschlussbericht,“ Deutsche Bundesstiftung Umwelt, 2013.
- [7] E. C. i. S. o. S. E. NETWORK, „Cluster 2: Production and application of blended cements“.
- [8] ECOserve NETWORK , Blended cements-The sustainable solution for the cement and concrete industry in Europe.
- [9] L. Tang, Chloride Transport in Concrete – Measurement and Prediction, Göteborg, Chalmers University of Technology: Diss., 1996.
- [10] Bundesanstalt für Wasserbau, Chlorideindringwiderstand von Beton, BAW-Merkblatt "Chlorideindringwiderstand", 2004.
- [11] CEN/TC 104, „CEN/TR 16563:2013: Principles of the equivalent durability procedure (Verfahrensgrundsätze zum Nachweis gleichwertiger Dauerhaftigkeit),“ 2013.
- [12] T. Proske, M. Rezvani, S. Hainer und C.-A. Graubner, „Highly workable eco-friendly concretes – Influence of constituents on the rheological properties,“ *In: Proceedings of the 1st International RILEM Conference on Rheology and Processing of Construction Materials and the 7th RILEM Conference on Self-Compacting Concrete, Paris, France, 2013.*
- [13] „DIN EN 197-1: Zement – Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement; Deutsche Fassung prEN 197-1:2014,“ 2014.
- [14] D. A. f. Stahlbeton, „Prüfung von Beton, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048-Heft 422,“ 1991.

- [15] DIN EN 15643-1: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 1: Allgemeine Rahmenbedingungen, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2010.
- [16] „DIN EN ISO 14040: 2006-10; Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen,“ Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [17] „DIN EN ISO 14044: 2006-10; Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen,“ Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [18] S. Nemuth und J. Kreißig, „Datenprojekt Zement im Netzwerk Lebenszykluskosten,“ PE International, 2007.
- [19] Verein Deutscher Zementwerke e.V, Institut Bauen und Umwelt e.V., *Umwelt Produktdeklaration des Vereins Deutscher Zementwerke e.V.– Zement*, März 2012.
- [20] C. Chen, G. Habert, Y. Bouzidi, A. Jullien und A. Ventura, „LCA allocation procedure used as an incitative method for waste recycling: An application to mineral additions in concrete,“ *Resources, Conservation and Recycling*, Bd. 54, pp. 1231-1240, 2010.
- [21] Verein Deutscher Zementwerke e.V., „Zement-Taschenbuch,“ 2008.
- [22] M. Rezvani, P. Ramge, T. Proske und C.-A. Graubner, „Rheology of water reduced Eco-friendly concretes – Rheologie wasserreduzierter Ökobetone,“ in *Tagungsband der 22. Workshop und Kolloquium Rheologische Messungen an Baustoffen*, Regensburg, 2013.
- [23] „Fib-Bulletin 55: Model Code 2010, Final Draft – Volume 1,“ 2010.
- [24] DIN EN 1992 - Eurocode 2: Design of concrete structures, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2011.
- [25] „Fib Bulletin 34: Model Code for Service Life Design,“ February, 2006.
- [26] H. Weigler und S. Karl, *Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbeton – Beton – Arten, Herstellung, Eigenschaften*, Ernst & Sohn Verlag, 1989.
- [27] S. Hainer, T. Proske und C.-A. Graubner, „Vorhersagemodell für die Carbonatisierung von zementreduzierten Ökobetonen,“ in *18. Internationale Baustofftagung (ibautil)*, Bauhaus-Universität Weimar, 2012.
- [28] DIN EN 15643-2: Nachhaltigkeit von Bauwerken – Bewertung der Nachhaltigkeit von Gebäuden – Teil 2: Rahmenbedingungen für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2010.
- [29] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, „Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton-Heft 572,“ Beuth Verlag, Berlin, 2007.

15

Unterschriften

Erwitte, 11.09.2016

Ort, Datum

Spenner Zement

GmbH & Co. KG

Postfach 1126

59592 Erwitte

Rechtsverbindliche Unterschrift und Stempelabdruck

Spenner Zement GmbH & Co. KG

Düsseldorf, 02.09.2016

Ort, Datum

VDZ gGmbH

Tannenstraße 3, 40476 Düsseldorf

Postfach 30 10 63, 40410 Düsseldorf

Rechtsverbindliche Unterschrift des Leiters
und Stempelabdruck der Forschungsstelle

VDZ gGmbH

Darmstadt, den 5.9.16

Ort, Datum

Univ.-Prof. Dr.-Ing. C.-A. Graubner

Institut für Massivbau

Technische Universität Darmstadt

Franziska-Braun-Straße 3

64287 Darmstadt

Rechtsverbindliche Unterschrift des Leiters
und Stempelabdruck der Forschungsstelle

Technische Universität Darmstadt