

vorläufiger Abschlussbericht zum Forschungsvorhaben

Reduzierung der Umweltwirkung der Betonbauweise durch neuartige Zemente und daraus hergestellter Betone unter Verwendung hinreichend verfügbarer Ausgangsstoffe

mit dem Aktenzeichen 28790

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, Stefan Hainer, Moien Rezvani

vom 13. August 2013

Inhaltsverzeichnis

1	Abkürzungsverzeichnis	4
2	Zusammenfassung	5
3	Einleitung	6
4	Versuche und Ergebnisse - Allgemein	8
4.1	Ausgangsstoffe	8
4.1.1	Zemente und Zementhauptbestandteile	8
4.1.2	Gesteinskörnung	8
4.1.3	Chemisch mineralogische Zusammensetzung	8
4.1.4	Granulometrie	9
4.1.5	Wasseranspruch und Erstarrungsbeginn	9
4.1.6	Betonzusatzmittel	9
5	Versuche und Ergebnisse – VDZ gGmbH	9
5.1	Mörteleigenschaften	9
5.2	Betonversuche	13
5.2.1	Allgemeines	13
5.2.2	Frischbetoneigenschaften	13
5.2.3	Betondruckfestigkeit	14
5.2.4	Chlorideindringwiderstand	15
5.2.5	Karbonatisierung	16
5.2.6	Frostwiderstand	18
6	Versuche und Ergebnisse – TUD	21
6.1	Vorversuche	21
6.1.1	Mischungszusammensetzung	21
6.1.2	Prüfungen an Mörtel und Beton	21
6.2	Hauptversuche	25
6.2.1	Mischungsauswahl	25
6.2.2	Frischbetoneigenschaften	25
6.2.3	Mechanische Eigenschaften	26
6.2.4	Kriechen und Schwinden	27
6.2.5	Karbonatisierung	31
6.2.6	Traglastversuch	32
6.3	Robustheit	33
7	Werksversuch Transportbeton	36
8	Ökobilanzierung	39
8.1	Grundlagen Nachhaltigkeitsbewertung	39
8.1.1	Die Methodik der Ökobilanzierung	39
8.1.2	Phasen einer Ökobilanz	40
8.1.3	Kriterien für die Ökobilanzierung	41
8.2	Durchgeführte Ökobilanzierung	43
8.2.1	Allgemein	43
8.2.2	Bilanzierung der Zemente	43
8.2.3	Bilanzierung der Betone	44

9	Technische Bewertung der Ergebnisse	47
10	Ökobilanzielle Bewertung der Ergebnisse	47
11	Ökonomische Bewertung der Ergebnisse	48
12	Literatur	49
13	Unterschriften	50
14	Anhang	51

1 Abkürzungsverzeichnis

Tabelle 1 Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
1	2
Kalksteinbezeichnungen	
LL SH	Hochfeiner Kalkstein (ca. 16000 cm ² /g nach Blaine) der Fa. Schäfer Kalk
LL RK	Kalkstein aus dem Vorkommen Brilon (ca. 4200 cm ² /g nach Blaine)
LL DD	Kalkstein, zur Verfügung gestellt durch den assoziierten Projektpartner Dyckerhoff (ca. 4200 cm ² /g nach Blaine)
LL SE	Kalkstein aus dem Vorkommen Erwitte, 1. Mahlung (ca. 8000 cm ² /g nach Blaine)
LL SE2	Kalkstein aus dem Vorkommen Erwitte, 2. Mahlung (ca. 5000 cm ² /g nach Blaine)
LL SE3	Kalkstein aus dem Vorkommen Erwitte, 3. Mahlung (ca. 10000 cm ² /g nach Blaine)
LL SE4	Kalkstein aus dem Vorkommen Erwitte, 4. Mahlung (ca. 4600 cm ² /g nach Blaine)
LL SE5	Kalkstein aus dem Vorkommen Erwitte, 5. Mahlung (ca. 2700 cm ² /g nach Blaine)
Zementbezeichnungen	
z.B. CEM (50LL RK)	Laborzement mit 50 M.-% Kalkstein RK
z.B. CEM (50LL RK)-W	Werkzement mit 50 M.-% Kalkstein RK
Betonbezeichnungen, VDZ	
B1	Referenzbeton mit einem Wasserzementwert von 0,60; vgl. Tabelle 4
B3	Referenzbeton mit einem Wasserzementwert von 0,50; vgl. Tabelle 4
B4	Prüfbeton mit Wasserzementwert von 0,45; vgl. Tabelle 4
B5	Prüfbeton mit Wasserzementwert von 0,35; vgl. Tabelle 4
FB	Feinbeton mit einem Größtkorn von 8 mm, ansonsten Zusammensetzung wie Mörtel; vgl. Kapitel 5.1
Betonbezeichnungen, TUD	
z.B. B035-CEM (50 LL RK)-W	B[w/z-Wert]-[Zement]: Beton mit einem Wasserzementwert von 0,35 und einem Werkzement mit 50 M.-% Kalkstein RK

2 Zusammenfassung

Ziel des Forschungsvorhabens war die labor- und werkseitige Herstellung und Prüfung von Zementen mit Kalksteingehalten jenseits der in DIN EN 197-1 beschriebenen Maximalgehalte. Es wurden Kalksteingehalte zwischen 35 M.-% und 70 M.-%, bezogen auf den sulfatträgerhaltigen Zement, verwendet. Die eingesetzten Kalksteine erfüllten die Anforderungen der DIN EN 197-1 an den TOC-Gehalt und den Methylenblauwert. Die CaCO_3 -Gehalte lagen zwischen 74 M.-% und 98 M.-%. Die Auswirkung der Klinkerreduzierung im Zement in Abhängigkeit der Eigenschaften des Kalksteins als weiterem Hauptbestandteil auf die Festigkeitsentwicklung und die Dauerhaftigkeit von Beton wurde untersucht. Im Zentrum stand die Frage, in wieweit den Auswirkungen der Klinkersubstitution im Zement durch Optimierung der Korngrößen- und Komponentenverteilung sowie der Anpassung der Betontechnologie unter Laborbedingungen und unter praxisnahen Bedingungen begegnet werden kann.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für die Herstellung und Verwendung kalksteinreicher Zemente (bis 50 M.-% LL) anspruchsvolle verfahrenstechnische Maßnahmen im Zementwerk und ebenso anspruchsvolle betontechnologische Maßnahmen (wasserarmer Beton mit entsprechenden Zusatzmitteldosierungen) in der Betonherstellung erforderlich wären. Werden diese Maßnahmen unter Praxisbedingungen beherrscht, können zulassungsfähige Dauerhaftigkeitskennwerte am Beton erzielt werden. Die Robustheit derartiger Systeme im Baubetrieb bedarf einer weiteren Absicherung.

Durch eine Substitution des Portlandzementklinkers durch Kalkstein im Zement können die Werte aller Wirkungskategorien einer Ökobilanz verbessert werden. Bei der Bilanzierung von Betonen mit niedrigeren Wasserzementwerten mit den kalksteinreichen Zementen kann bei gleicher Leistungsfähigkeit (Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit im Labor) eine Reduzierung der wichtigsten ökobilanziellen Wirkungskategorien erreicht werden. Das Treibhauspotential eines Betons aus einem Zement mit 50 M.-% Kalkstein liegt mehr als 30 % unter dem Treibhauspotential eines Betons mit CEM I bzw. rd. 25 % unter dem Treibhauspotential eines Betons mit CEM II/A-LL bzw. dem Durchschnittszement der VDZ-EPD.

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

3 Einleitung

Die Zementindustrie setzt weltweit ca. 5 % der vom Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen frei. Etwa die Hälfte davon geht auf die Entsäuerung des Kalksteines bei der Klinkerherstellung zurück, 40 % auf die Brennstoffe beim Brennen des Zementklinkers und je 5 % auf elektrische Energie und Transport. Der Brennprozess zur Herstellung des Portlandzementklinkers ist bereits weitgehend optimiert (**Bild 1**). Der Energieverbrauch liegt nahe am theoretischen Wert, so dass hier kein wesentliches Einsparpotential gesehen werden kann.

Ein Weg, den CO₂-Ausstoß bei der Herstellung von Zement und Beton zu begrenzen, wird in der zunehmenden Herstellung und Anwendung von Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen gesehen. Mit abnehmendem Klinkeranteil im Zement, d.h. mit einer in **Bild 2** beispielhaft dargestellten Zunahme des Gehaltes an Hüttensand, sinken die Gesamtemissionen von CO₂ pro Tonne Zement deutlich.

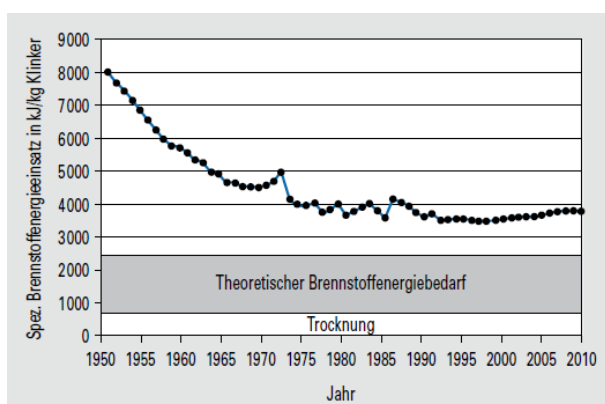


Bild 1 Zeitliche Entwicklung des Energieverbrauchs pro Tonne Portlandzementklinker [1]

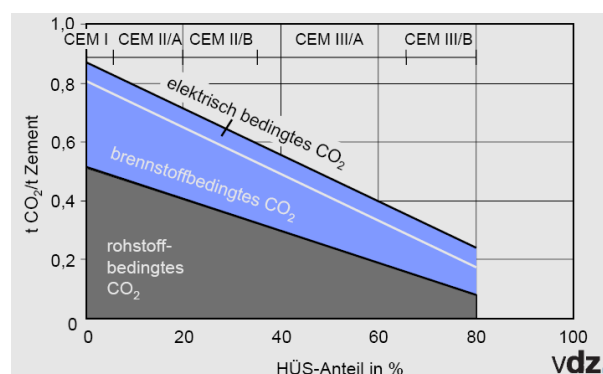


Bild 2 CO₂-Emission bei der Herstellung von Zement

Ein Problem besteht darin, dass die Hauptbestandteile Hüttensand und Steinkohlenflugasche nur in begrenztem Maße vorhanden sind und bereits jetzt in Deutschland praktisch eine vollständige Verwertung dieser Stoffe erfolgt. Daher ist auf dem Wege der Erhöhung des Anteils an CEM III, bzw. an CEM II-S und CEM II-V Zementen zukünftig keine weitere signifikante Verbesserung der Umweltwirkung eines Kubikmeters Beton mehr möglich. Lediglich Gesteinsmehle, insbesondere Kalkstein, können sowohl in nahezu beliebiger Menge als auch kostengünstig bereitgestellt werden. Darüber hinaus ist Kalkstein der Hauptrohstoff des Portlandzementklinkers. Das Material liegt entsprechend an jedem Standort eines Zementwerkes mit Klinkerproduktion vor, so dass bei seiner Verwendung als Zementhauptbestandteil Transportkosten sowie mit dem Transport verbundene Emissionen entfallen. Kalkstein ist wesentlich leichter mahlbar als zum Beispiel Hüttensand, so dass auch hier Energie und damit CO₂-Emissionen eingespart werden können. Allerdings handelt es sich um ein Inertmaterial. Eine deutliche Erhöhung seines Anteils im Zement ist entsprechend aufgrund der normativ festgelegten Randbedingungen verbunden mit dem derzeit unzureichenden Kenntnisstand nicht ohne weiteres möglich.

Aus einer Auswertung von Literaturergebnissen und eigenen Untersuchungsergebnissen ging der in **Bild 3** dargestellte Zusammenhang zwischen dem auf die Betondruckfestigkeit bezogenen Klinkergehalt und der Betondruckfestigkeit hervor. Der spezifische, in diesem Fall

auf das Leistungsmerkmal Betondruckfestigkeit bezogene Klinkergehalt nimmt mit steigender Druckfestigkeit ab. Bezogen auf die Druckfestigkeit wird der Klinker in den dargestellten Fällen damit effektiver eingesetzt, wenn die Druckfestigkeit höher ist. Die betontechnischen Gründe für diesen Zusammenhang sind bekannt: Reduzierung des effektiven Wasserzementwerts, Optimierung der Granulometrie der Feinstoffe sowie Einsatz wirksamer Betonzusatzmittel.

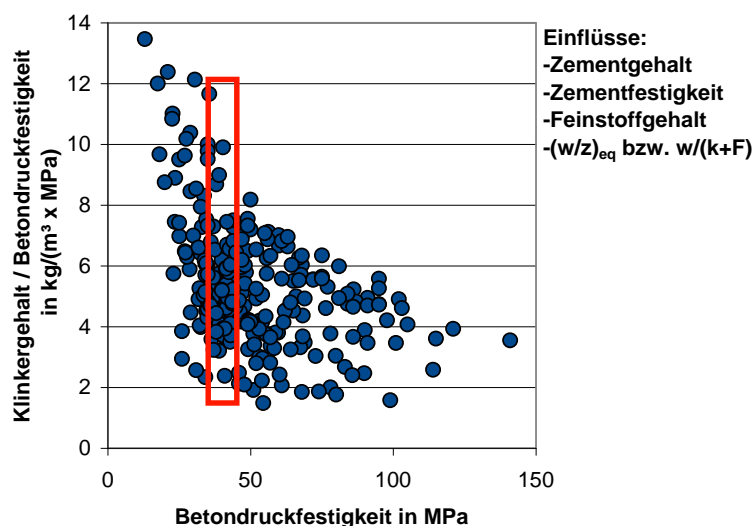


Bild 3 Betondruckfestigkeit bezogener Klinkergehalt gegen Betondruckfestigkeit, Rot: Betone mit einer Druckfestigkeit von $40 \pm 5 \text{ N/mm}^2$

Im Forschungsvorhaben wurde die Herstellung von Betonen mit signifikant günstigerer Umweltwirkung gegenüber bisher üblicherweise ausgeführten Betonen durch die Entwicklung von Zementen mit deutlich reduziertem Anteil an Portlandzementklinker angestrebt. Die portlandzementklinkerreduzierten Zemente sollen für die Produktion üblicher Konstruktionsbetone mit mittlerer Festigkeit (roter Rahmen in **Bild 3**) Verwendung finden, welche den mengenmäßig größten Anteil der Betonproduktion ausmachen. Dabei wurden sowohl Innenbauteile (Expositionsklasse XC1, XC2) als auch Außenbauteile (Expositionsklasse XC4, XF1) einbezogen. Die grundlegende Idee war die Übertragung der Erkenntnisse aus dem Bereich der hochfesten und ultrahochfesten Betone auf konventionelle Konstruktionsbetone. Dabei wurde durch eine Modifikation der derzeit üblichen betontechnologischen Randbedingungen, insbesondere durch die Verringerung des Wasser-Zement-Wertes, das Verhältnis von Klinker zu Kalkstein im Zement signifikant reduziert. Dies ermöglichte die Herstellung von Betonen mit günstigerer Ökobilanz bei gleicher Leistungsfähigkeit hinsichtlich Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit in Laborversuchen.

Die Vorkonfektionierung aller Mehlkornkomponenten (wie z. B. dem Kalkstein) im Zement ermöglicht - gegenüber der Zugabe einzelner Mehlkornkomponenten bei der Betonherstellung - eine hohe Qualitätssicherung und eine bessere Umsetzung und Akzeptanz des klinkerreduzierten Betons in der Baupraxis. Eine Zugabe von Betonzusatzstoffen bei der Betonherstellung im Betonwerk wird obsolet. Es entfällt damit auch die oftmals schwierige Abstimmung von Zement, Betonzusatzstoff und Betonzusatzmittel (Betonverflüssiger). Außerdem sind keine zusätzlichen Silokapazitäten notwendig bzw. es werden Silokapazitäten frei.

4 Versuche und Ergebnisse - Allgemein

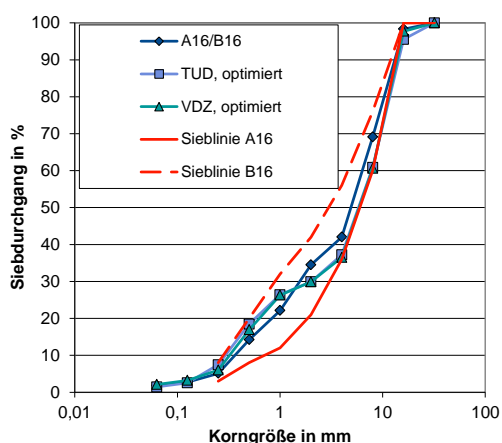
4.1 Ausgangsstoffe

4.1.1 Zemente und Zementhauptbestandteile

Es wurden je ein CEM I 42,5 N, CEM I 52,5 R, CEM II/A-LL 32,5 R und CEM II/B-LL 32,5 R als Referenzzemente verwendet (**Tabelle 15** im Anhang). Die Prüfzemente wurden durch getrennte Mahlung und anschließendes Mischen eines CEM I 52,5 R und verschiedenen Kalksteinqualitäten hergestellt. Für die Mörtelversuche erfolgte das Mischen der Komponenten im Labor. Für die Betonversuche wurden werkseitig produzierte Zemente verwendet.

4.1.2 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 Bestimmung des Zugabewassers berücksichtigt.



Siebweite in mm	A16/B16	TUD, optimiert	VDZ, optimiert
1	2	3	4
0,063	1,8	1,5	2,1
0,125	2,7	2,5	3,2
0,25	5,1	7,5	6,0
0,5	14,2	18,5	16,9
1	22,1	26,4	26,3
2	34,5	29,9	29,9
4	42,0	37,2	36,5
8	69,1	60,9	60,6
16	98,3	95,5	97,7
32	100,0	100,0	100,0

Bild 4 Sieblinien

4.1.3 Chemisch mineralogische Zusammensetzung

Die chemische Zusammensetzung der Referenzzemente, der Kalksteine sowie der werkseitig produzierten Prüfzemente wurde mit der Röntgenfluoreszenzanalyse, einem Alternativverfahren nach DIN EN 196-2, bestimmt. Die Kalksteingehalte sind bezogen auf den sulfat-trägerhaltigen 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 Ergebnisse sind in **Tabelle 11** bis **Tabelle 14** im Anhang zusammengestellt. Der tatsächliche Kalksteingehalt des CEM (50 LL SE3) – W weist mit etwa 42 % Kalkstein einen deutlich geringeren als den angestrebten Anteil auf. Grund dafür ist vermutlich eine Ungenauigkeit während der Produktion. Dies ist bei der Bewertung der Festigkeitsentwicklung und der Dauerhaftigkeitskenngrößen der Betone mit diesem Zement zu berücksichtigen.

4.1.4 Granulometrie

Die Korngrößenverteilungen der Zementhauptbestandteile und der Zemente wurden mittels Lasergranulometrie (CILAS 1064) bestimmt. **Tabelle 15** sowie **Bild 58** bis **Bild 60** im Anhang zeigen die Ergebnisse.

4.1.5 Wasseranspruch und Erstarrungsbeginn

Der Wasseranspruch und der Erstarrungsbeginn der verwendeten Referenz-, Labor- und Werkszemente wurde nach DIN EN 196-3 bestimmt. Das Ausbreitmaß dient als Maß für die Verarbeitbarkeit der Mörtel. Es wurde gemäß DIN 1015-3 geprüft. Die Ergebnisse zeigt **Tabelle 16** im Anhang.

4.1.6 Betonzusatzmittel

Um die gewünschte Verarbeitbarkeit der Mörtel und Betone sicherzustellen, kamen sechs verschiedene Fließmittel zum Einsatz (siehe **Tabelle 2**). Die Anzahl der verwendeten Fließmittel ist darin begründet, dass zunächst die Wechselwirkung zwischen Zement und Fließmittel hinsichtlich Verflüssigungswirkung, Konsistenzhaltung und Bluten untersucht werden musste. In Vorversuchen hat sich das Fließmittel 3 als besonders geeignet erweisen. Der Verbrauch bezogen auf den Zementgehalt je m³ Beton war zwar z.T. größer als bei den anderen Fließmittel, dafür waren Betone mit Zementen mit hohen Gehalten an LL RK in Kombination mit Fließmittel 3 besonders robust. Das heißt, dass geringe Überdosierungen nicht zu Bluten oder anderen Entmischungserscheinungen führten, wie es bei den gleichen Betonen mit anderen Fließmitteln vorkommen konnte.

Tabelle 2 Verwendete Betonzusatzmittel auf PCE Basis

Bezeichnung	empfohlener Dosierbereich [M.- % v. Z.]	Dichte bei 20 °C [g/cm ³]	Feststoff-gehalt [M.- %]	Maximaler Chloridgehalt [M.-%]
1	2	3	4	5
1	0,2 - 3,0	1,07	23	< 0,1
2	0,3 - 3,0	1,07	30	
3	0,2- 1,5	1,06	33	
4	0,2 - 1,5	1,07	22	
5	0,2 - 1,5	1,06	27	
6	0,2 - 1,5	1,06	28	

5 Versuche und Ergebnisse – VDZ gGmbH

5.1 Mörtel Eigenschaften

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 beizubehalten, mit einem Zementgehalt von 490 g je Mischung hergestellt, Mörtel mit

w/z = 0,30 mit 560 g je Mischung. Das Fließmittel „3“ (siehe **Tabelle 2**) wurde verwendet, um ein konstantes Ausbreitmaß von 130 ± 5 mm zu erzielen. Den Fließmittelbedarf und die zugehörigen Ausbreitmaße zeigt Tabelle 3.

Tabelle 3 Fließmittelbedarf und Ausbreitmaß

Zement	Fließmittelbedarf in % v. Z.			Ausbreitmaß in mm		
	w/z = 0,50	w/z = 0,40	w/z = 0,30	w/z = 0,50	w/z = 0,40	w/z = 0,30
1	2	3	4	5	6	7
CEM I 52,5 R	0,00	-	-	132,0	-	-
CEM I 42,5 N	0,00	-	-	128,0	-	-
CEM II/A-LL 32,5 R	0,00	-	-	123,0	-	-
CEM II/B-LL 32,5 R	0,00	-	-	141,0	-	-
CEM (50% LL RK)	0,00	0,15	0,50	149,0	127,5	133,0
CEM (50% LL DD)	0,00	0,50	0,95	129,0	128,0	126,0
CEM (50% LL SE)	0,00	0,45	0,85	105,0	127,0	126,5
CEM (50% LL SE2)	0,00	0,56	0,60	-	125,0	126,5
CEM (60% LL RK)	0,00	0,15	0,40	162,0	131,5	127,5
CEM (60% LL DD)	0,00	0,55	0,92	123,0	124,0	128,0
CEM (60% LL SE2)	0,00	0,62	1,00	-	125,0	129,5
CEM (70% LL RK)	0,00	0,10	0,34	144,0	129,5	132,5
CEM (70% LL DD)	0,00	0,62	0,96	120,0	130,5	130,5
CEM (70% LL SE2)	0,00	0,68	1,00	-	131,0	124,5
CEM (35% LL RK)-W	0,00	0,20	0,65	-	126,5	136,0
CEM (50% LL RK)-W	0,00	0,20	0,50	146,0	128,0	127,5
CEM (65% LL RK)-W	0,00	0,15	0,45	-	128,5	137,5
CEM (50% LL SE3)-W	0,00	0,54	0,84	132,0	127,0	129,0
CEM (50% LL SE5)-W	0,00	0,57	1,34	120,0	135,0	126,5

Die Mörteldruckfestigkeiten sind in Bild 5 und Bild 6 sowie in Bild 61 und Bild 62 im Anhang dargestellt.

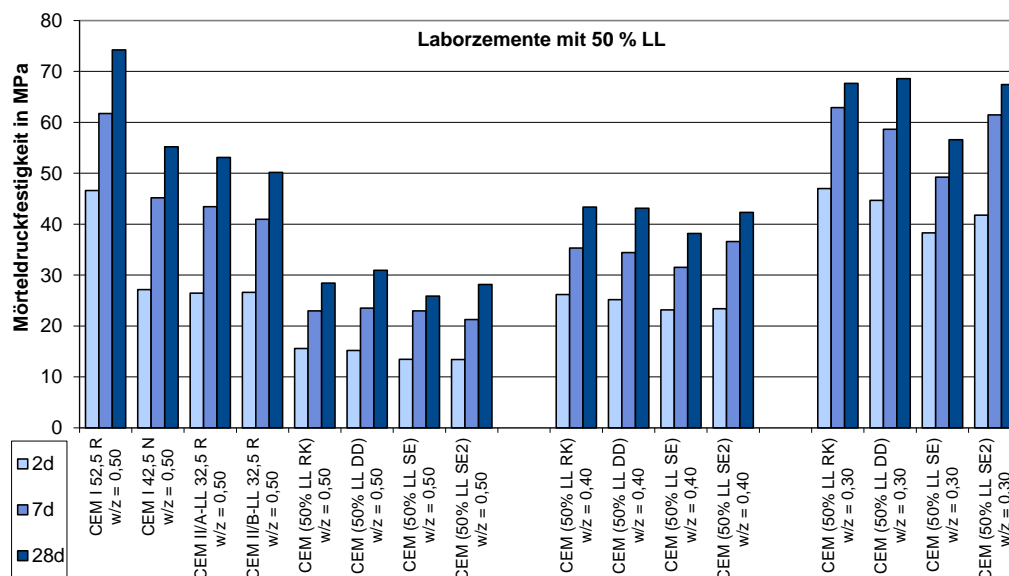


Bild 5 Festigkeitsentwicklung von Mörteln mit Laborzementen mit 50 % LL

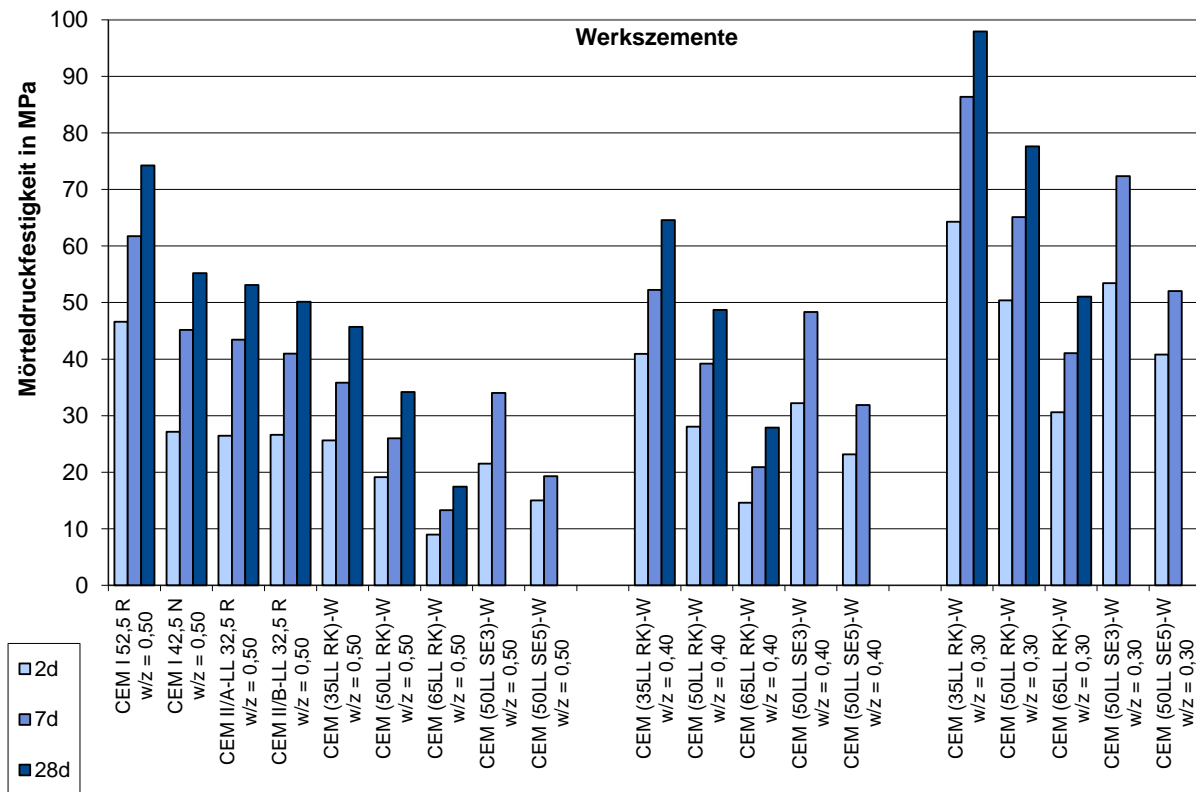


Bild 6 Festigkeitsentwicklung von Mörteln mit Werkszementen

In Bild 5 (sowie in Bild 61 und Bild 62 im Anhang) ist zu erkennen, dass der Laborzement mit Kalkstein LL SE2 ähnliche Druckfestigkeiten wie die Zemente mit den Kalksteinen LL RK und LL DD und damit deutlich höhere Festigkeiten als der Zement mit LL SE (Bild 5) aufweist. Bei den Kalksteinen SE und SE2 handelte es sich um den gleichen Kalkstein in veränderter Granulometrie. Die Festigkeitsentwicklung bei Verwendung hoher Kalksteingehalte außerhalb der in DIN EN 197-1 festgelegten Maximalgehalte hing hier also weniger von der chemischen Zusammensetzung des Kalksteins, sondern vielmehr von den Korngrößen- und Komponentenverteilungen der Zementhauptbestandteile ab. Eine beispielhafte Korngrößenabhängige Komponentenverteilung zeigt Bild 7. Es wurde für beide Zemente jeweils die gleiche Klinkerkomponente verwendet. Auf der y-Achse ist der Anteil der Zementhauptbestandteile Klinker und Kalkstein der Zemente mit 50 M.-% Kalkstein LL SE bzw. LL SE2 in Abhängigkeit der Korngröße dargestellt. Den mittleren Volumenanteil der Komponenten bezogen auf den gesamten Zement zeigen die Geraden bei 46 Vol.-% Klinker bzw. 54 Vol.-% Kalkstein. Bis zu einer Korngröße von etwa 30 µm liegt der Klinkeranteil des Zementes mit LL SE2 deutlich über den im Gesamtsystem enthaltenen 46 Vol.-%, während der Klinker im Zement mit LL SE in diesem Korngrößenbereich etwa im Bereich des genannten Mittelwertes liegt. Insbesondere auch im Bereich bis 10 µm, der maßgeblich für die Entwicklung der Frühfestigkeit ist, weist der Zement mit LL SE2 deutlich höhere Klinkeranteile bis etwa 70 Vol.-% auf. Die Vernetzung der Hydratationsprodukte in den Korngrößenbereichen bis 10 µm bzw. bis 30 µm wird bei Verwendung des Kalksteins LL SE2 deutlich weniger durch Inertpartikel gestört. Somit kann sich bei ansonsten gleichen Ausgangsbedingungen eine deutlich höhere Festigkeit zu allen Prüfterminen entwickeln. Es ist also von entscheidender Bedeu-

zung, die Korngrößenverteilung aller Hauptbestandteile im Zementwerk gezielt auf einander abzustimmen.

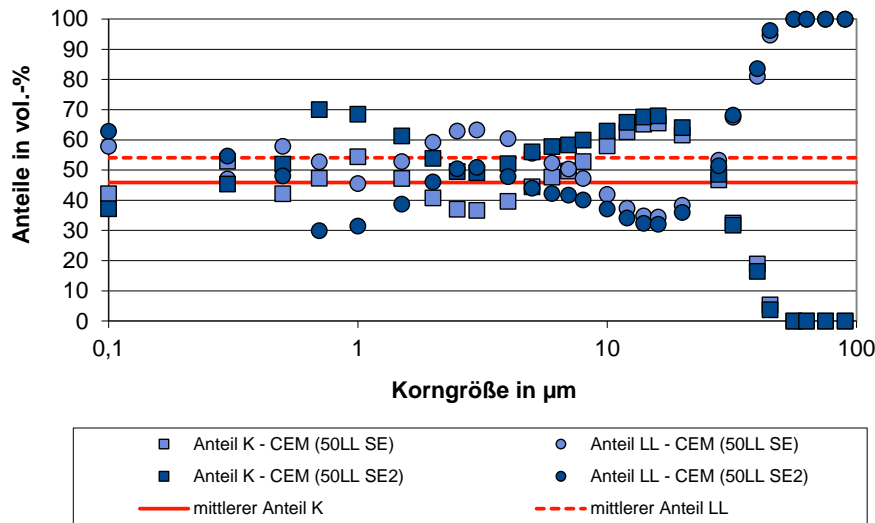


Bild 7 Kombinierte Korngrößen- und Komponentenverteilung

LL SE und LL SE3 weisen identische Korngrößenverteilungen auf (**Bild 58** im Anhang). Entsprechend wurde erwartet, dass der Werkszement mit LL SE3 in seiner kombinierten Korngrößenverteilung dem Laborzement mit LL SE entspricht (**Bild 8**). Werden aber die tatsächlichen Kalksteingehalte (**Bild 9**) zugrunde gelegt, ergibt sich für den Zement mit 42 M.-% (nominiell 50 M.-%) eine kombinierte Korngrößenverteilung, die mit den Zementen mit LL SE2 und LL SE5 vergleichbar ist. Aus den tatsächlichen kombinierten Korngrößen- und Komponentenverteilungen resultieren die in den folgenden Kapiteln ermittelten Festbetoneigenschaften.

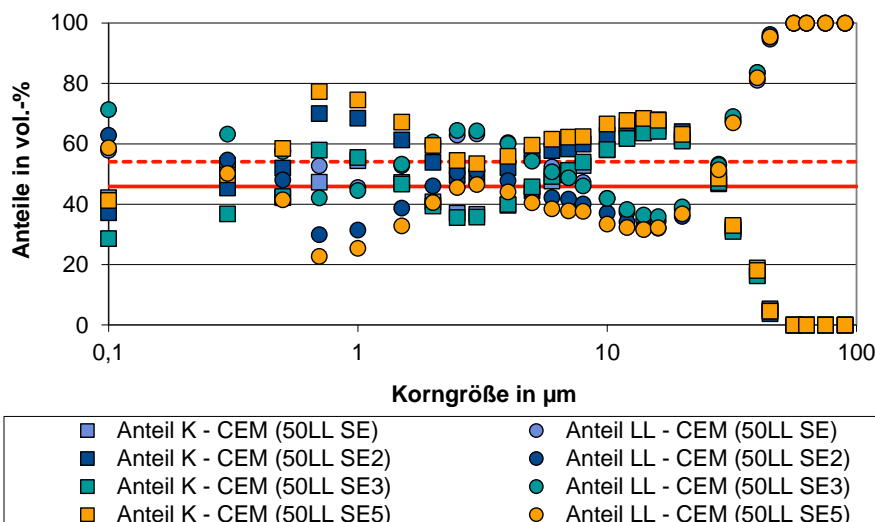


Bild 8 Kombinierte Korngrößen- und Komponentenverteilung von Werkzementen mit LL SE3 und LL SE 5, nominelle LL-Gehalte

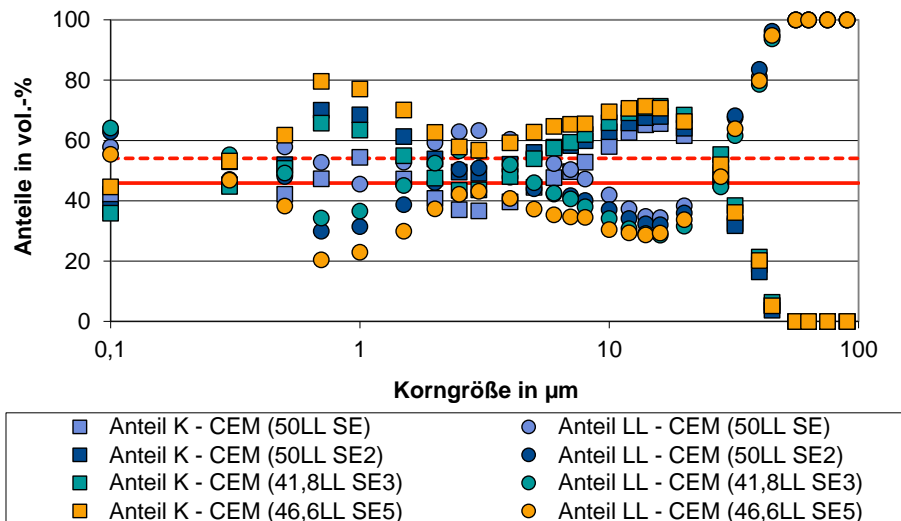


Bild 9 Kombinierte Korngrößen- und Komponentenverteilung von Werkzementen mit LL SE3 und LL SE 5, tatsächliche LL-Gehalte

5.2 Betonversuche

5.2.1 Allgemeines

Für die Betonversuche im VDZ wurden die industriell hergestellten Werkzemente 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 Prüfzementen wurde die Sieblinie der Gesteinskörnung optimiert, der Wasserzementwert unter Beibehaltung des Leimgehalts gesenkt und durch die Verwendung von Fließmitteln ein konstantes Ausbreitmaß (Konsistenz F4) eingestellt. Die Betonrezepturen zeigt **Tabelle 4**.

Tabelle 4 Betonrezepturen

	Beton B1	Beton B3	Beton B4	Beton B5
1	2	3	4	5
Zementgehalt in kg/m ³	280	320	335	380
Wasserzementwert	0,60	0,50	0,45	0,35
Leimgehalt inkl. Gesteinskörnungsanteil <125µm in l/m ³	290 ± 5	290 ± 5	290 ± 5	290 ± 5

Für die Referenzbetone B1 und B3 wurde eine VDZ Standardsieblinie A16/B16 verwendet. Für die Betone B4 und B5 wurde die Sieblinie gemeinsam mit dem Projektpartner TUD optimiert (siehe **Bild 4**).

5.2.2 Frischbetoneigenschaften

Direkt nach Mischende wurde die Frischbetontemperatur T_f gemessen. 10 Minuten nach Mischende wurden die Konsistenz des Frischbetons anhand des Ausbreitmaßes (a_{10}) nach DIN EN 12350-5 bzw. des Verdichtungsmaßes (v_{10}) nach DIN EN 12350-4, der Luftgehalt LP_{10} mittels Druckausgleichsverfahren im Luftporentopf nach DIN EN 12350-7 und die Frischbetonrohddichte ρ_f nach DIN EN 12350-6 bestimmt. Die Ergebnisse zeigt **Tabelle 17** im

Anhang. Zwischen dem Fließmittel 3 und den Zementen mit dem Kalkstein SE5 ergaben sich Wechselwirkungen, die zu einem erhöhten Luftporengehalt führten. Auf diese wird im Folgenden näher eingegangen.

5.2.3 Betondruckfestigkeit

Die Betondruckfestigkeit wurde nach DIN EN 12390-3 im Alter von 7, 28 und 91 Tagen an Würfeln mit der Kantenlänge 150 mm 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 $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ gelagert. Nach 24 Stunden wurden die Probekörper entformt und 6 Tage in einem Wasserbad mit Leitungswasser von $(20 \pm 1) \text{ }^\circ\text{C}$ gelagert. Im Alter von 7 Tagen wurden die Probekörper aus dem Wasserbad entnommen und bis zur Prüfung bei einer Temperatur von $(20 \pm 2) \text{ }^\circ\text{C}$ und einer relativen Luftfeuchtigkeit von $(65 \pm 5) \%$ gelagert. Die Ergebnisse zeigen **Bild 10**, **Bild 11** sowie **Tabelle 18** im Anhang.

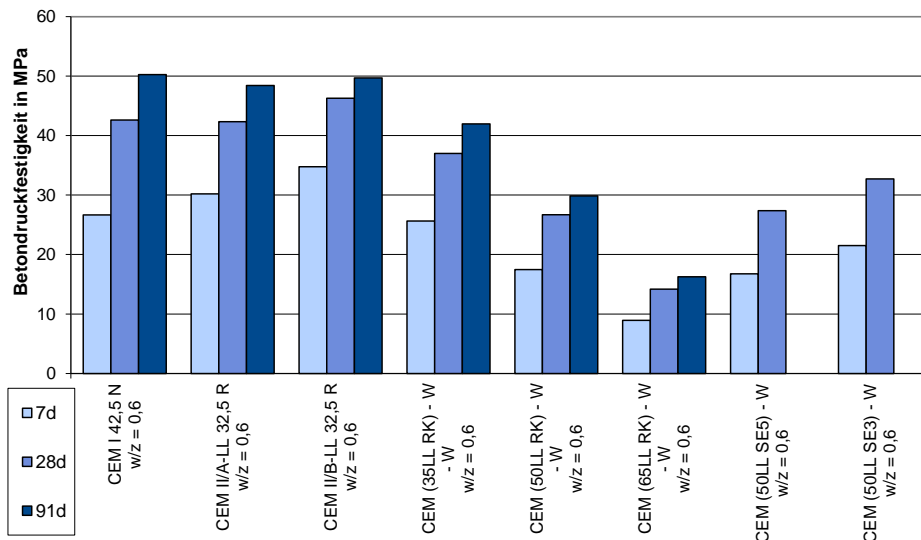


Bild 10 Druckfestigkeitsentwicklung der untersuchten Betone B1

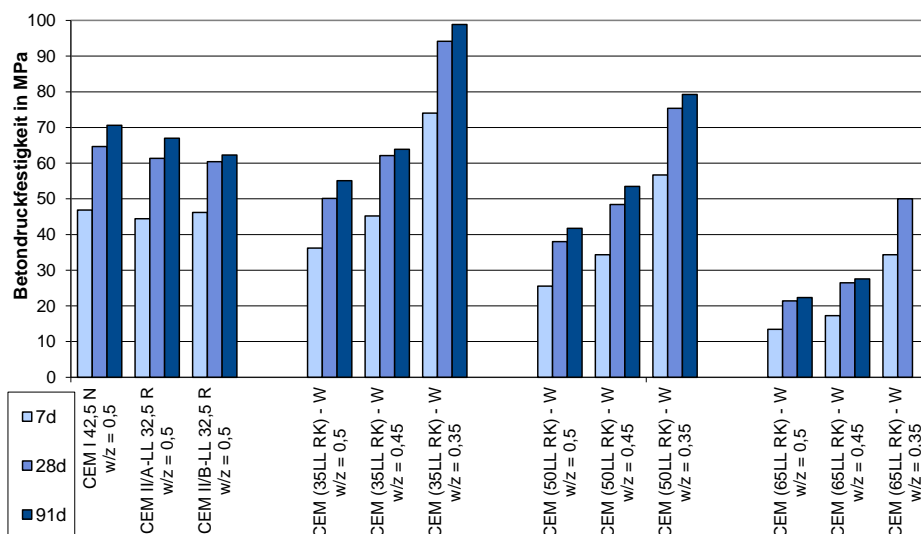


Bild 11 Druckfestigkeitsentwicklung der untersuchten Betone B3 bis B5 mit LL RK

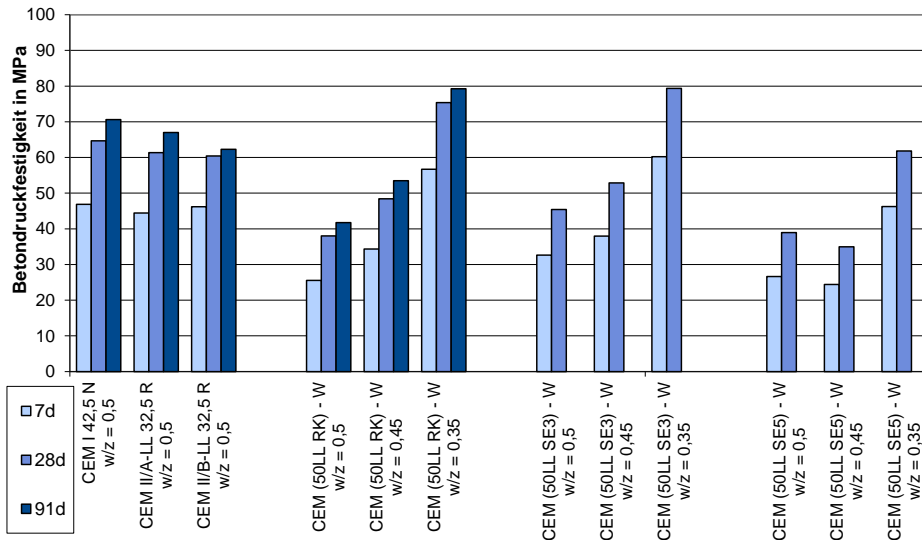


Bild 12 Druckfestigkeitsentwicklung der untersuchten Betone B3 bis B5 mit 50 M.-% LL

Die Betone mit CEM (50LL SE3) weisen etwas höhere Festigkeiten auf als Betone mit CEM (50LL RK). Grund dafür ist der höhere tatsächliche Klinkeranteil im Zement (vgl. **Tabelle 14**). Betone mit CEM (50LL SE5) und Wasserzementwerten $w/z = 0,45$ bzw. $w/z = 0,35$ zeigen deutlich niedrigere Festigkeiten als die vergleichbaren Betone mit CEM (50LL RK) bzw. CEM (50LL SE3). Grund dafür ist der reproduzierbar höhere Luftgehalt dieser Betone (vgl. **Tabelle 17**, markierte Felder). Das Fließmittel 3 scheint mit dieser Kalksteinqualität zur Luftporenbildung zu neigen. Ein solches Verhalten ist selten, wird aber gelegentlich im Labor beobachtet. Die Gründe sind bisher nicht bekannt.

5.2.4 Chlorideindringwiderstand

Der Widerstand des Betons gegenüber eindringenden Chloriden wurde mit Hilfe eines Schnellverfahrens (Migrationstest: [2], [3]) ermittelt.

Der Chlorideindringwiderstand wurde an den Betonen B3, B4 und B5 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 zeigen **Bild 13** sowie **Tabelle 19** im Anhang.

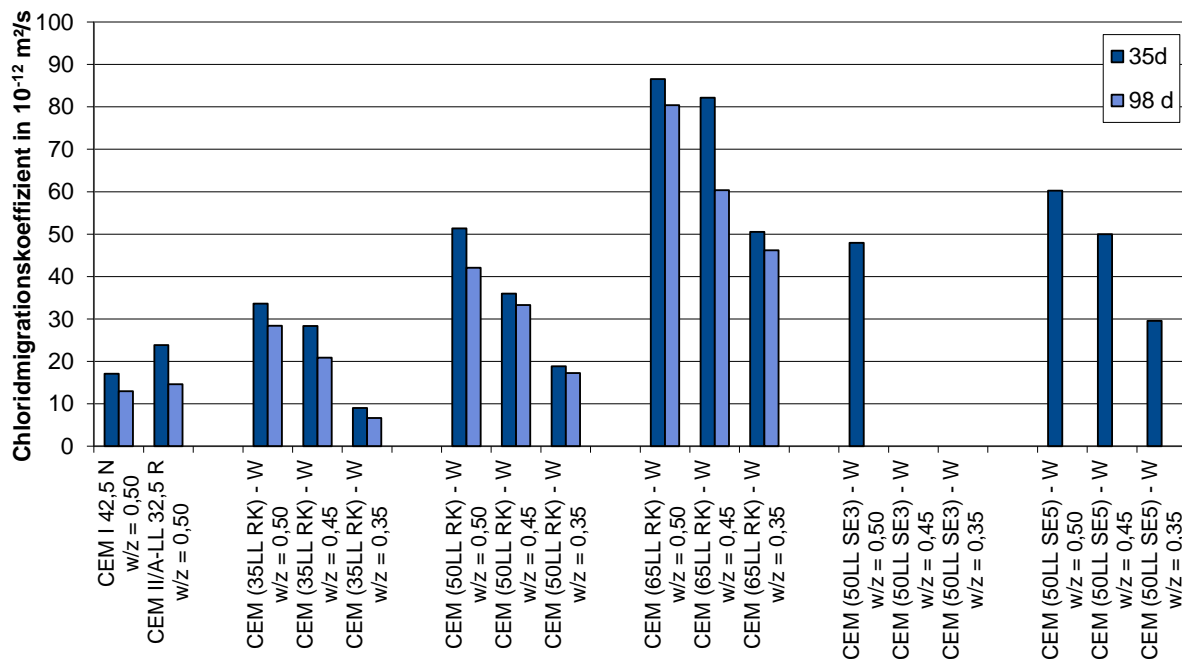


Bild 13 Chlorideindringwiderstand der Betone B3 bis B5

Bild 13 zeigt, dass der Chloridmigrationskoeffizient von Betonen mit Zementen mit 50 M.-% Kalkstein gegenüber Betonen mit praxisüblichen Zementen gleichwertig sein können. Der w/z-Wert ist dazu ebenfalls auf 0,35 zu verringern. Bei Verwendung der Zemente mit 65 M.-% Kalkstein führt auch die Absenkung des w/z-Wertes nicht mehr zu praxisgerechten Chloridmigrationskoeffizienten. Der erhöhte Luftgehalt des Betons mit CEM (50LL SE5) (vgl. Kapitel 5.2.3) führt zu deutlich höheren Chloridmigrationskoeffizienten, die nicht mehr im Bereich der Referenzbetone liegen. Einschränkend ist anzumerken, dass die Leistungsfähigkeit der Referenzbetone bezüglich ihres Widerstands gegenüber eindringenden Chloriden bereits als „grenzwertig“ anzusehen ist.

5.2.5 Karbonatisierung

Die Karbonatisierungsversuche wurden zum einen an Prüfkörpern der Abmessungen 100 mm x 100 mm x 500 mm der Betone B1, B4 und B5 durchgeführt. Die Prüfkörper wurden 7 Tage in Wasser mit einer Temperatur von (20 ± 1) °C und anschließend bei einer Temperatur von (20 ± 2) °C und einer relativen Feuchte von (65 ± 5) % gelagert.

Zusätzlich wurde die Karbonatisierungstiefe 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 = 0,45 wurden, um einen konstanten Leimgehalt beizubehalten, mit einem Zementgehalt von 470 g je Mischung hergestellt, Mörtel mit w/z = 0,35 mit 525 g je Mischung. Jeweils die Hälfte der Prismen wurde 7 Tage in Wasser mit einer Temperatur von (20 ± 1) °C vorgelagert, die andere Hälfte lagerte 28 Tage in Wasser mit einer Temperatur von (20 ± 1) °C. Anschließend lagerten die Probekörper bei einer Temperatur von (20 ± 2) °C und einer relativen Feuchte von (65 ± 5) %. Die Karbonatisierungstiefen nach 140 Tagen La-

gerung dienen einerseits dem Vergleich mit den Ergebnissen des Projektpartners TUD sowie der Einordnung in die Ergebnisse früherer Zulassungsprüfungen, der in [4] veröffentlicht wurde.

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. Die Ergebnisse sind in **Bild 14** bis **Bild 19** sowie in **Tabelle 21** und **Tabelle 22** im Anhang dargestellt. Zum Vergleich sind jeweils die Ergebnisse mit den Referenzbetonen mit CEM I 42,5 N, CEM II/A-LL 32,5 R und CEM II/B-LL 32,5 R dargestellt.

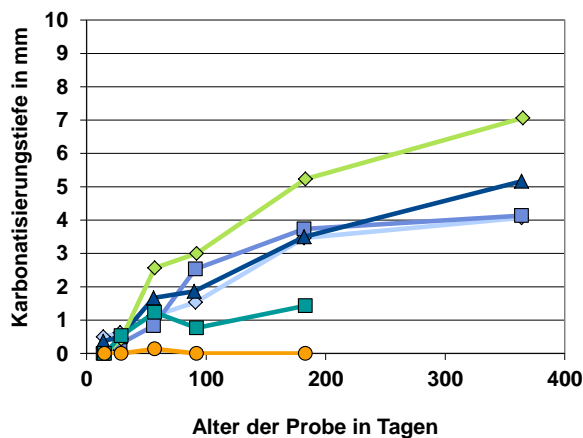


Bild 14 Karbonatisierungstiefen von Betonen B1, B4 und B5 mit Zementen mit 35 M.-% LL RK

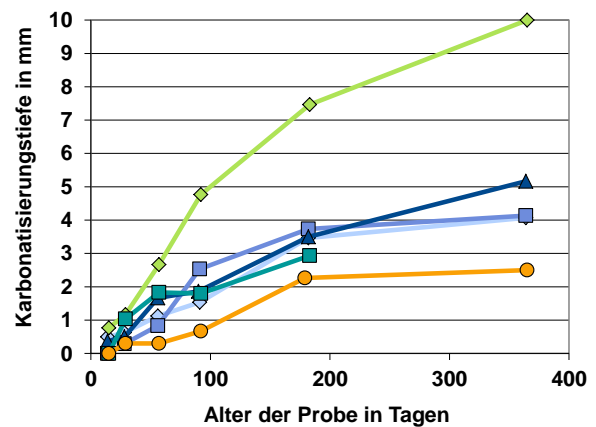


Bild 15 Karbonatisierungstiefen von Betonen B1, B4 und B5 mit Zementen mit 50 M.-% LL RK

Bild 14 Karbonatisierungstiefen von Betonen B1, B4 und B5 mit Zementen mit 35 M.-% LL RK

Bild 15 Karbonatisierungstiefen von Betonen B1, B4 und B5 mit Zementen mit 50 M.-% LL RK

Platzhalter, Ergebnisse folgen im endgültigen Abschlussbericht

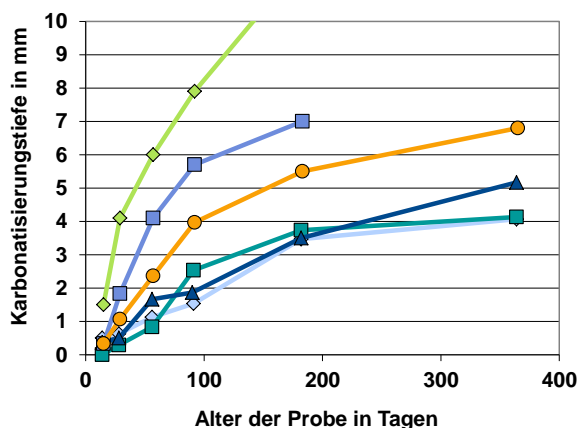


Bild 16 Karbonatisierungstiefen von Betonen B1, B4 und B5 mit Zementen mit 65 M.-% LL RK

Bild 17 Karbonatisierungstiefen von Betonen B1, B4 und B5 mit Zementen mit 65 M.-% LL RK

B1, B4 und B5 mit Zementen mit
65 M.- % LL RK
Platzhalter, Ergebnisse folgen im endgültigen
Abschlussbericht

50 M.-% LL SE3

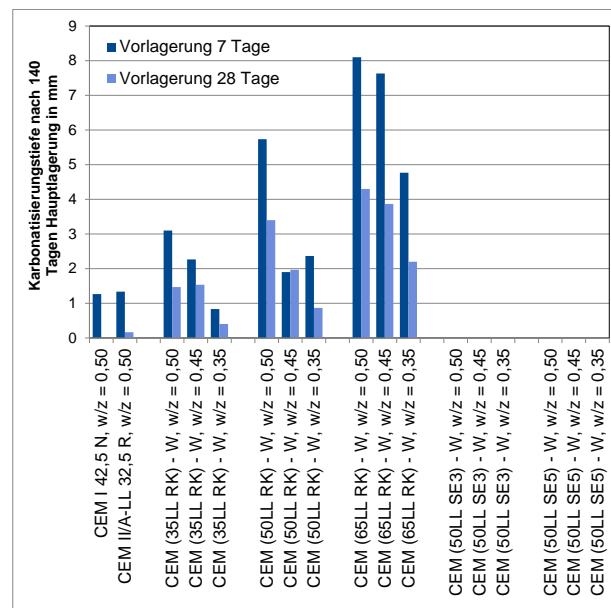


Bild 18 Karbonisierungstiefen von Betonen B1, B4 und B5 mit Zementen mit 50 % LL SE5

Bild 19 Karbonisierungstiefen nach 140 Tagen von Feinbetonen (7 bzw. 28 Tage Vorlagerung)

Bild 15 zeigt, dass der Karbonatisierungswiderstand von Betonen mit Zementen mit 50 M.-% Kalkstein RK gegenüber Betonen mit praxisüblichen Zementen und $w/z = 0,50$ gleichwertig sein kann, wenn der w/z -Wert des Betons unter Verwendung des Zements mit 50 M.-% Kalkstein RK auf 0,35 verringert wird. Die Feinbetone mit Werkszementen, die einen Kalksteingehalt von ≥ 50 M.-% haben (**Bild 19**), weisen nach beiden Lagerungsarten höhere Karbonisierungstiefen als die Feinbetone mit den Referenzementen auf. Wenn der Kalksteingehalt maximal 50 M.-% bei gleichzeitiger Absenkung des Wasserzementwertes auf $w/z = 0,35$ beträgt, liegen die Feinbetone jedoch innerhalb der Grenzen, die in Zulassungsverfahren für normativ ($w/z = 0,50$) zusammengesetzte Feinbetone als akzeptabel gelten.

Die Ergebnisse mit CEM (50LL SE3) und CEM (50LL SE5) liegen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht vollständig vor.

5.2.6 Frostwiderstand

Der Frostwiderstand von Betonen wurde mittels des CIF-Verfahrens gemäß CEN/TR 15177 bestimmt. Für die Untersuchungen zum Frostwiderstand wurden je Beton 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 ± 2) °C gelagert, 6 Tage unter Wasser bei (20 ± 1) °C (Vorlagerung) und anschließend 21 Tage bei einer Temperatur von (20 ± 2) °C und einer relativen Feuchte von (65 ± 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. Im Anschluss wurden 56 Frost-Tauwechsel durchgeführt. Die Abwitterung und der relative dynamische E-Modul wurden bestimmt. Die

Ergebnisse zeigen **Bild 20** bis **Bild 22** sowie **Tabelle 20** im Anhang als Mittelwerte von je 5 Prüfkörpern. Zum Vergleich sind jeweils die Ergebnisse mit den Referenzbetonen mit CEM I 42,5 N, CEM II/A-LL 32,5 R und CEM II/B-LL 32,5 R dargestellt.

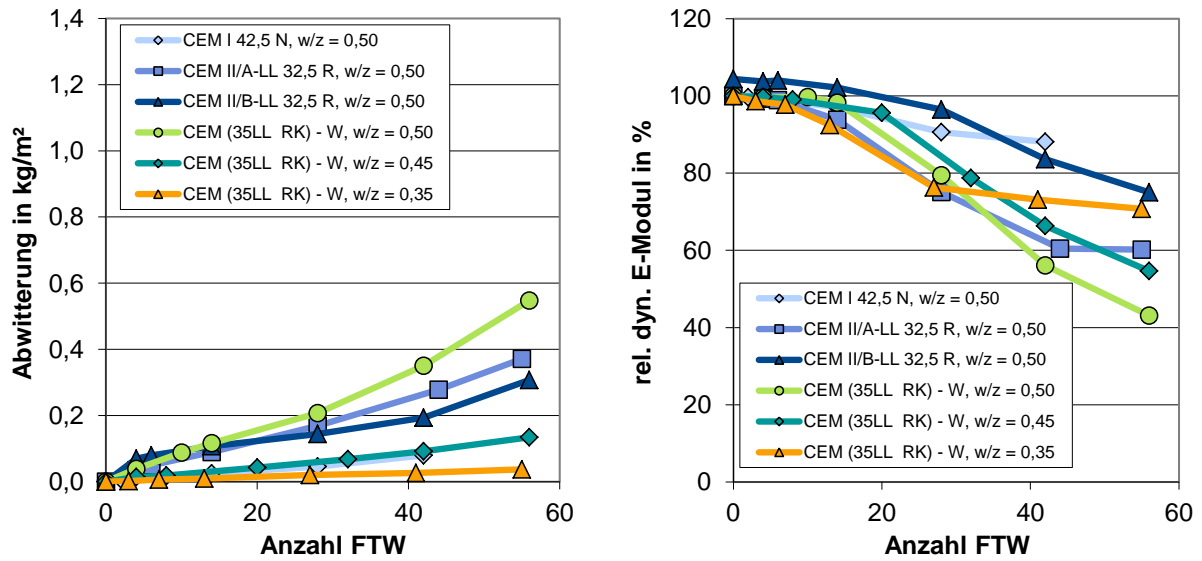


Bild 20 Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen B3, B4 und B5 mit Zementen mit 35 M.-% LL RK

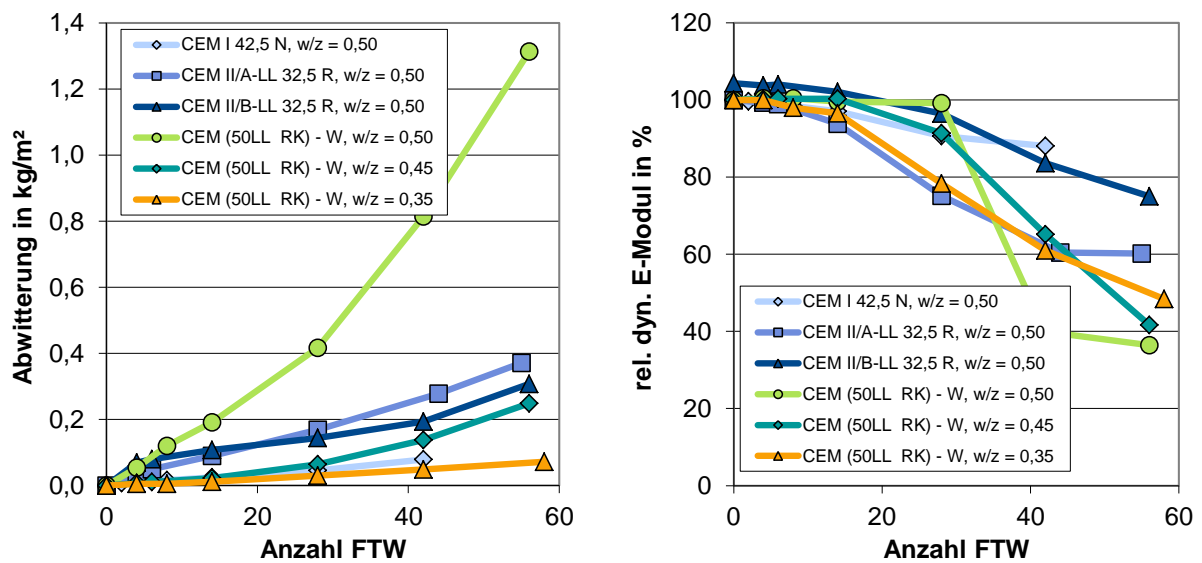


Bild 21 Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen B3, B4 und B5 mit Zementen mit 50 M.-% LL RK

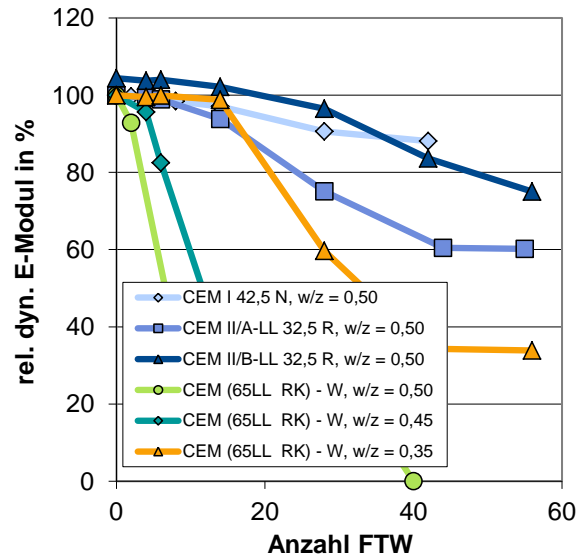
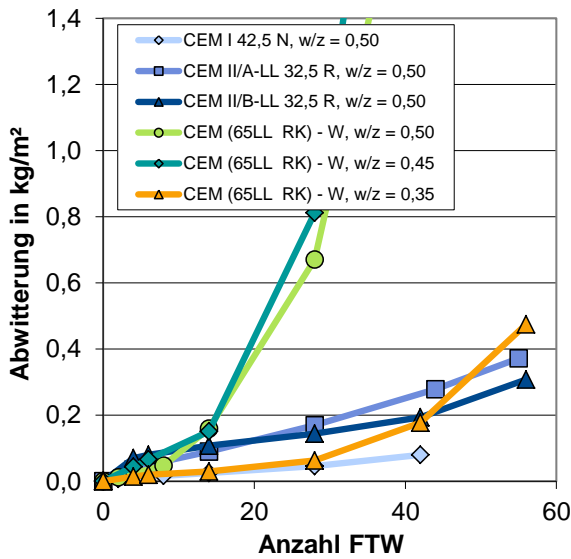


Bild 22 Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen B3, B4 und B5 mit Zementen mit 65 M.-% LL RK

Platzhalter, Ergebnisse folgen im endgültigen Abschlussbericht

Platzhalter, Ergebnisse folgen im endgültigen Abschlussbericht

Bild 23 Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen B3, B4 und B5 mit Zementen mit 50 M.-% LL SE3

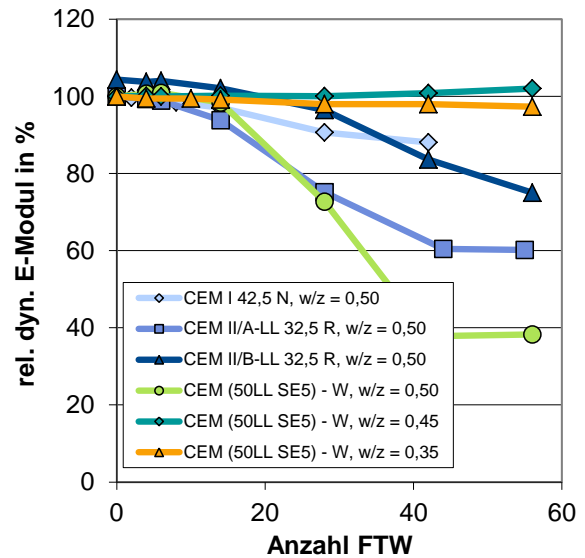
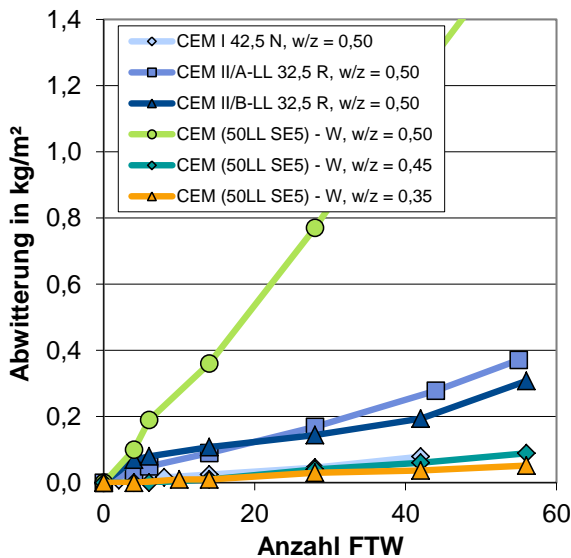


Bild 24 Abwitterung und rel. dyn. E-Modul von Betonen B3, B4 und B5 mit Zementen mit 50 M.-% LL SE5

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 [3] durch den relativen dynamischen E-Modul

beschreiben werden. **Bild 21** zeigt, dass der Frost-Widerstand von Betonen mit Zementen mit 50 M.-% Kalkstein gegenüber Betonen mit praxisüblichen Zementen gleichwertig sein kann. Der w/z-Wert ist dazu mindestens auf 0,45 zu verringern. Künstliche Luftporen können den Frost-Widerstand signifikant verbessern. Wie oben beschreiben, führte eine Wechselwirkung zwischen Kalkstein LL SE5 und dem Fließmittel 3 zur Bildung von Luftporen. Entsprechend zeigen die Betone mit CEM (50LL SE5) und Fließmitteleinsatz ($w/z = 0,45$ und $w/z = 0,35$) zwar einen geringen Abfall des relativen dynamischen E-Moduls (**Bild 24**), sind aber auf Grund der enthaltenen Luftporen nicht direkt mit den übrigen Betonen vergleichbar.

6 Versuche und Ergebnisse – TUD

6.1 Vorversuche

6.1.1 Mischungszusammensetzung

In ersten Versuchsreihen wurden Mörtel und Betone aus laborseitig gemischten Zementen mit unterschiedlichen Klinker- und Kalksteingehalten hergestellt. Als Basis diente ein CEM I 52,5 R. Variiert wurde der Wasserzementwert bei konstantem Leimvolumen von 270 l/m^3 . Der Kalksteinanteil der Laborzemente wurde in den Vorversuchen schrittweise auf 75 M.-% erhöht. Die Zemente CEM II/A-LL 32,5 R und CEM II/B-LL 32,5 R fanden für die Herstellung von Referenzmörteln und Referenzbetonen Verwendung. Eine Übersicht der Mischungszusammensetzungen aller Mörtel- und Betonversuche enthalten **Tabelle 23** und **Tabelle 24** im Anhang. Im Rahmen der Betonversuche wurde auch der Einfluss der Sieblinie (nach DIN 1045-2:2008-08) der Gesteinskörnung auf die Frischbetoneigenschaften analysiert.

6.1.2 Prüfungen an Mörtel und Beton

6.1.2.1 Frischbeton und Frischmörtel

Die rheologischen Eigenschaften der Mörtel und Betone wurden zu verschiedenen Zeitpunkten mittels des Ausbreitversuches nach DIN EN 1015-3:2007-05 bzw. DIN EN 12350-5:2009-08 und des BT2 Rheometers überprüft. Die Ergebnisse sind in **Tabelle 25** und **Tabelle 26** im Anhang und in Bild 25 dargestellt. Die Bestimmung des Ausbreitmaßes a am Mörtel erfolgte jeweils 5, 30 und 60 Minuten nach der Wasserzugabe und am Beton jeweils nach 10, 30 und 60 Minuten nach der Wasserzugabe. Die Neigung zum Entmischen wurde visuell beurteilt. Ebenfalls erfolgte eine Einschätzung der Viskosität der Betone während der Verarbeitung im Labor. Die Messungen mit dem Rheometer BT2 wurden 10 Minuten nach Wasserzugabe durchgeführt.

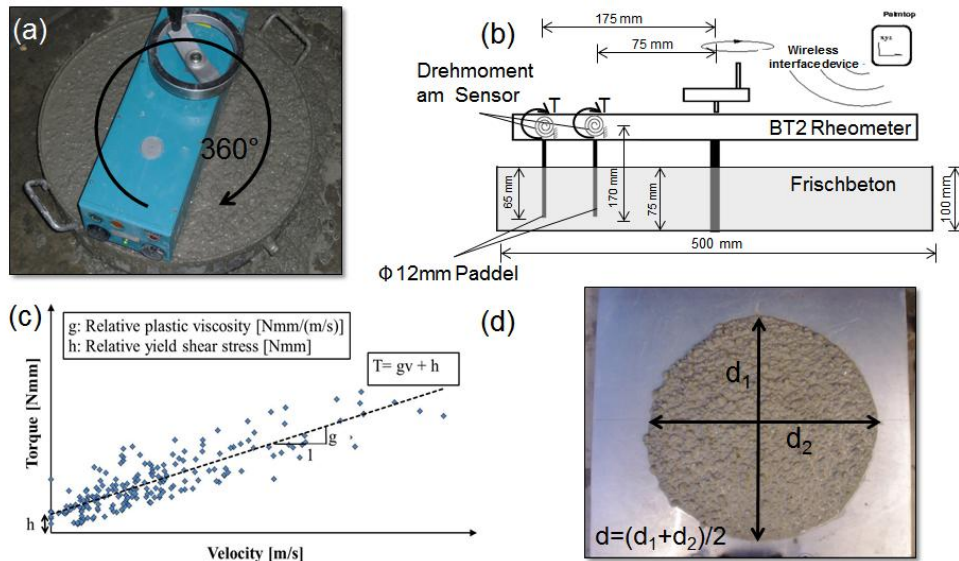


Bild 25 a) und b) Schleibinger BT2 Rheometer; c) Messwerte mit Regressionsgerade und d) Ausbreitmaß

Aus Bild 26 wird ersichtlich, dass mit abnehmendem Wasserzementwert eine Erhöhung der plastischen Viskosität einhergeht. Eine bezogene Viskosität unter 50.000 Nmm/(m/s) kann für eine praktische Anwendung als akzeptabel erachtet werden. Dieser Grenzwert beruht auf Erfahrungen aus der Anwendung wasserarmer Betone im Transportbetonbereich und wurde gemeinsam mit Betonherstellern abgeleitet [5]. Wird diese Grenze überschritten, kann der Frischbeton sehr zäh werden und Verarbeitbarkeit bzw. Pumpbarkeit sind ggf. nicht mehr gegeben. Diese Viskositätsgrenze wurde bei einem Wasserzementwert unter $w/z = 0,35$ überschritten. Als günstig erwies sich die Verwendung geringer Anteile sehr feinen Kalksteinmehls. Dadurch ergaben sich auch bei Wasserzementwerten von unter 0,35 geringe bzw. akzeptable Viskositäten. Hinsichtlich der Verarbeitbarkeitsdauer und der Blutneigung erwies sich das Fließmittel 3 bei Verwendung des Kalksteins RK im Zement als besonderes gut geeignet. Nachteilig ist lediglich die vergleichsweise hohe benötigte Dosiermenge.

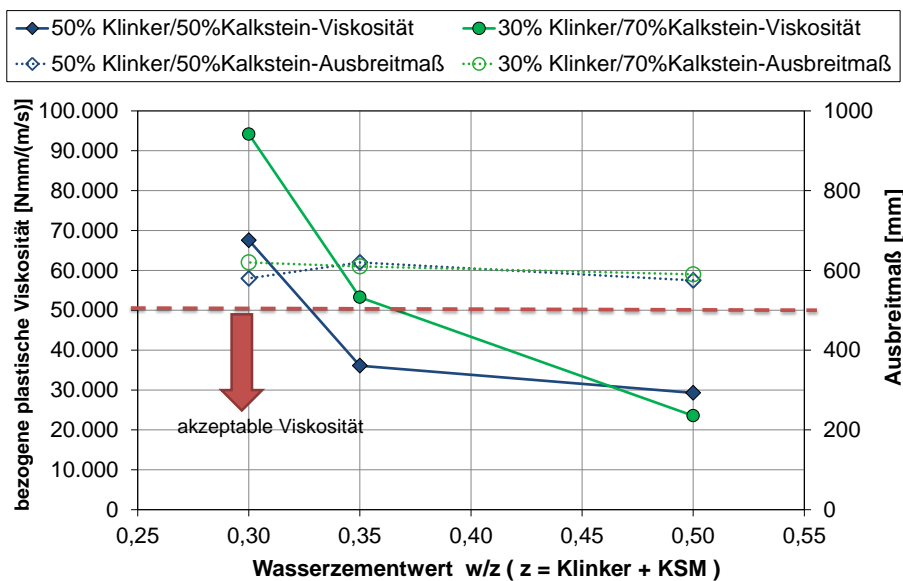


Bild 26 Versuchsergebnisse zur bezogenen plastischen Viskosität von Beton aus klinkerreduzierten Zementen mit einem Größtkorndurchmesser von 16 mm ermittelt mit dem BT2 Rheometer (Klinker = Portlandzementklinker + Sulfatträger + ggf. Nebenbestandteile)

6.1.2.2 Druckfestigkeit

Die Mörteldruckfestigkeit nach 1 Tag und 28 Tagen wurde nach DIN EN 196-1 ermittelt. Die Betondruckfestigkeit wurde nach 1 und 28 Tagen (nach DIN EN 12390-3; Wasserlagerung bis zum 7. Tag) an 150 mm-Würfeln bestimmt. Die Ergebnisse der Druckfestigkeitsprüfungen an Mörteln und Beton mit verschiedenen Wasserzementwerten sind in **Tabelle 25** und **Tabelle 26** im Anhang zusammengefasst.

Bild 27 zeigt den Zusammenhang zwischen Wasserzementwert, Klinkergehalt des Laborzementes und der Mörtel- bzw. Betondruckfestigkeit im Alter von 28 Tagen. Es wird deutlich, dass die Druckfestigkeit bei zunehmendem Kalksteingehalt und zunehmenden Wasserzementwert stark abnimmt. Durch eine Verringerung des Wasserzementwerts kann aber die Druckfestigkeit auch bei sehr niedrigen Klinkergehalten deutlich gesteigert werden. Praxisübliche Festigkeiten (30 – 50 N/mm²) können somit mit Zementen aus 40 M.-% bzw. 50 M.-% Klinker erreicht werden, wenn der Wasserzementwert zwischen 0,35 und 0,45 liegt.

Mörtel und Betone aus Zementen mit einem Klinkergehalt von nur 30 M.-% erreichen bei einem Wasserzementwert von 0,30 eine Druckfestigkeit von 40 N/mm², obwohl das Wasser/Klinker-Verhältnis bei 1,0 liegt.

Verglichen mit Mörteln oder Betonen mit CEM I ergeben sich bei gleichem w/k – Wert und Verwendung von Kalkstein um bis zu 10 N/mm² höhere Festigkeiten (vgl. **Bild 28**).

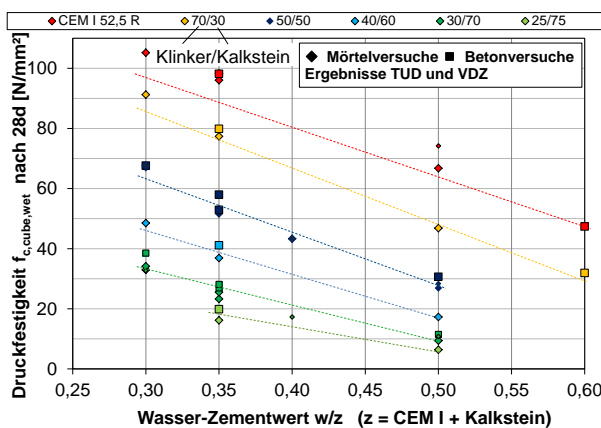


Bild 27 Ergebnisse von Voruntersuchungen zur Druckfestigkeit von Betonen aus klinkerreduzierten Zementen bei Variation des Wasserzementwertes

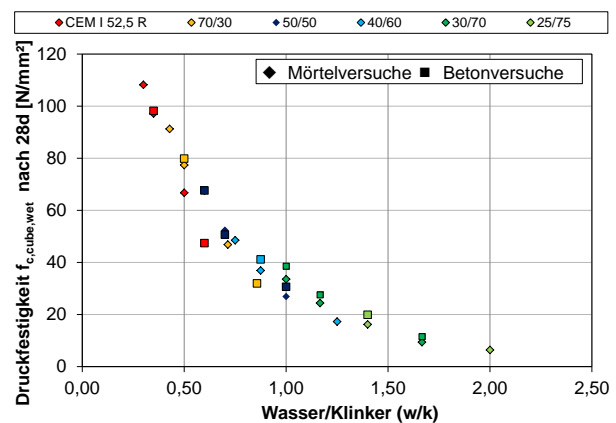


Bild 28 Druckfestigkeit versus Wasser/Klinker-Verhältnis

6.1.2.3 Karbonatisierung

Die Karbonatisierungsprüfungen wurden an Mörtelprismen nach DIN 196-1 und an Betonprismen 100×100×500 mm³ (Wasserlagerung bis zum 7. Tag) durchgeführt. Die Karbonatisierungstiefe wurde nach 133 Tagen Lagerung im Normklima (20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte) im Alter von 140 Tagen bestimmt. Als Indikatorlösung kam Phenolphthalein zum Einsatz. Die Ergebnisse zur Karbonatisierungstiefe an Mörtel- und Betonproben sind in **Tabelle 25** und **Tabelle 26** im Anhang dargestellt.

Bild 29 (vgl. auch Bild 31) zeigt den Zusammenhang zwischen Wasserzementwert, Klinkergehalt des Laborzementes und der gemessenen Karbonatisierungstiefe. Es wird deutlich,

dass die Karbonatisierungstiefe bei zunehmendem Kalksteingehalt und zunehmenden Wasserzementwert stark zunimmt.

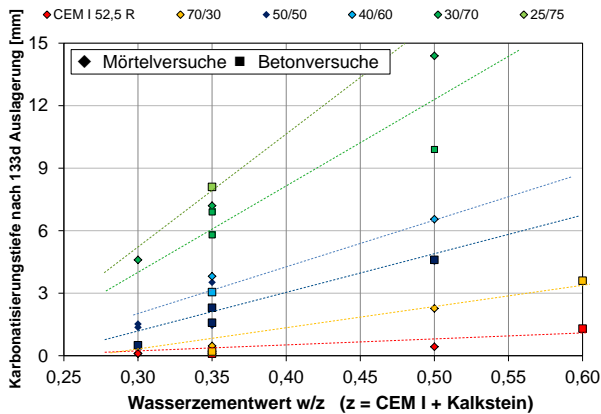


Bild 29 Ergebnisse von Voruntersuchungen zur Karbonatisierungstiefe von Betonen aus klinkerreduzierten Zementen

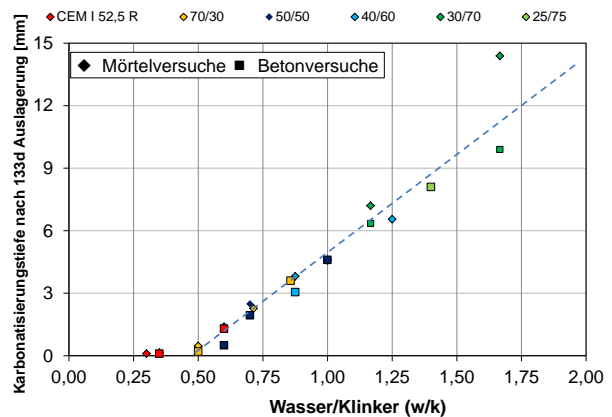


Bild 30 Karbonatisierungstiefe versus Wasser/Klinker-Werte für Mörtel und Betone mit LL RK

Bild 30 zeigt, dass zwischen der gemessene Karbonatisierungstiefe und dem Verhältnis Wasser / Klinker (w/k – Wert) eine gute Korrelation besteht.

Um eine zu den Referenzproben gleichwertige Karbonatisierungstiefe zu erzielen, ist der Wasserzementwert bei klinkerreduzierten Zementen mit Kalkstein als weiterem Hauptbestandteil deutlich zu reduzieren. Bei Zementen mit 50 bzw. 60 M.-% Kalkstein ergeben sich bei Wasserzementwerten von $w/z = 0,35$ bzw. $w/z = 0,30$ Karbonatisierungstiefen wie bei Feinbetonen mit CEM I, CEM II/A bzw. CEM II/B und $w/z = 0,50$. (siehe Bild 31).

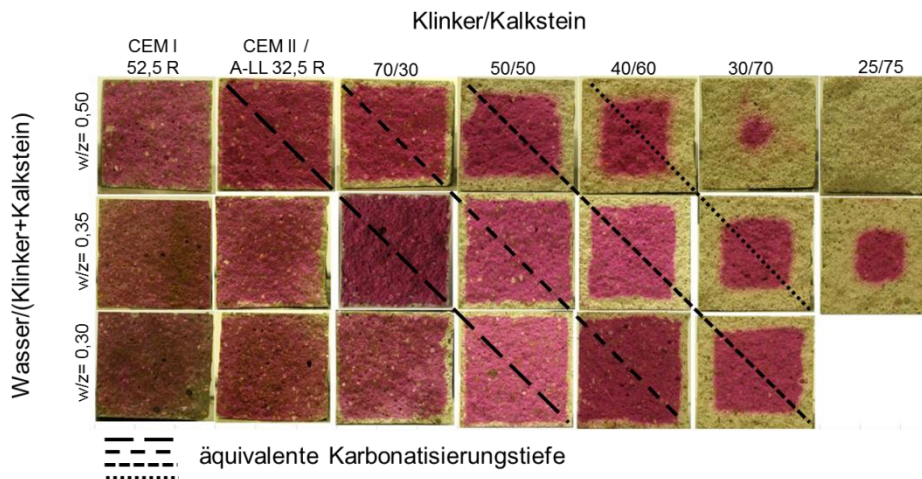


Bild 31 Karbonatisierung der Mörtelproben im Alter von 140 d

6.2 Hauptversuche

6.2.1 Mischungsauswahl

Auf Grundlage der Vorversuche mit Laborzementen wurden Betone mit vier verschiedenen Werkzementen und unterschiedlichen Kalksteingehalten (35, 50¹ und 65 M.-%) hergestellt und deren Eigenschaften geprüft. Die Wassermenge betrug jeweils 0,35 bzw. 0,35 und 0,45 bei CEM (50 % LL). Um die Betoneigenschaften einordnen zu können, wurden die Referenzbetone mit CEM II/A-LL 32,5 R mit Wassermengewerten von 0,50 bzw. 0,60 herangezogen.

Tabelle 5 Mischungsentwürfe für die Prüfung der bemessungsrelevanten Betoneigenschaften

Mischung	B060-CEM II/A-LL	B050-CEM II/A-LL	B035-CEM (35 LL RK)-W	B035-CEM (50 LL RK)-W	B035-CEM (50 LL SE3)-W	B035-CEM (50 LL SE4)-W	B035-CEM (50 LL SE5)-W	B045-CEM (50 LL RK)-W	B035-CEM (65 LL RK)-W
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Zement	CEM II/A-LL 32,5 R	CEM II/A-LL 32,5 R	CEM (35 LL RK)-W	CEM (50 LL RK)-W	CEM (50 LL SE3)-W	CEM (50 LL SE4)-W	CEM (50 LL SE5)-W	CEM (50 LL RK)-W	CEM (65 LL RK)-W
Zementmenge [kg/m ³]	280	323	375	380	380	380	380	332	384
Portlandzementklinker inkl. Sulfat-träger und Nebenbestandteilen [kg/m ³]	238	267	244	190	190	190	190	166	134,4
Kalkstein [kg/m ³]	RK	42	47	131	190	-	-	166	250
	SE3	-	-	-	-	190	-	-	-
	SE4	-	-	-	-	-	190	-	-
	SE5	-	-	-	-	-	-	190	-
Wasser [kg/m ³]	174	166	136	137	137	137	137	153	138
Fließmittel 3 [kg/m ³]	0,2	1,5	2,4	2,3	6,1	9,2	9,9	0,9	1,7
Zementleim [l/m ³]	270								
Quarzsand W3 [kg/m ³]	67								
Gesteinskörnung 0/16 [kg/m ³]	1807								

6.2.2 Frischbetoneigenschaften

Die Fließfähigkeit des Betons wurde 10, 30 und 60 Minuten nach der Wasserzugabe mittels Ausbreitversuch nach DIN EN 12350-5:2009-08 bestimmt. Der Zielwert des Ausbreitmaßes nach Mischzeitende war 500 mm. Die Ergebnisse zum Ausbreitmaß, der erforderlichen Fließmitteldosierung und dem Luftgehalt sind in Bild 32 zusammengestellt. Die Fließmittelmenge bei Verwendung der Zemente mit 35 und 50 M.-% Klinker ist deutlich geringer als bei 65 M.-% Klinker. Festgestellt wurde eine gute Konsistenzhaltung der Betone mit kalksteinreichen Zementen. Auf Grund des Tongehalts (vgl. **Tabelle 11** und **Tabelle 12** im Anhang) ist ein vergleichsweise hoher Fließmittelgehalt bei Verwendung der Kalksteine SE3, SE4 und SE5 erforderlich. Darüber hinaus stellten sich bei Verwendung der Kalksteine SE4 und SE5 in Verbindung mit dem Fließmittel 3 – wie bereits beschrieben - erhöhte Luftgehalte ein.

¹ Für drei verschiedene Kalksteinqualitäten

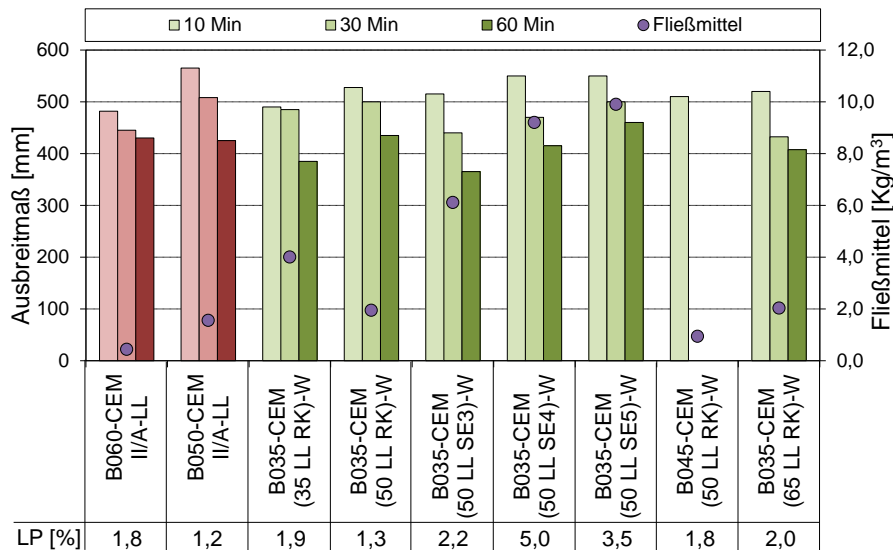


Bild 32 Ausbreitmaß, Fließmittelbedarf und Luftporengehalt der ausgewählten Betone

6.2.3 Mechanische Eigenschaften

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, für 28 Tage 6 Probekörper. 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 Druckfestigkeit wurde zusätzlich im Alter von 28 Tagen an jeweils 3 Zylindern mit einem Durchmesser von 158 mm und einer Länge von 300 mm im Rahmen der Bestimmung der Spannungs-Dehnungs-Beziehung ermittelt. Die Zylinder wurden nach einem Tag ausgeschalt und anschließend bis zum 7. Tag unter Wasser gelagert. Die anschließende Lagerung bis zum Prüfzeitpunkt erfolgte im Klimaraum bei einer relativen Luftfeuchte von ca. 65 % und einer Temperatur von 20 °C. Die Festigkeitsentwicklung der Betone mit werksmäßig hergestellten Zementen ist in Bild 33 dargestellt. Ersichtlich ist die vergleichsweise hohe Frühfestigkeit der Betone mit kalksteinreichen Zementen und abgesenkten Wasserzementwerten. Weiterhin wird deutlich, dass der Zement mit Kalkstein RK zu etwas größeren Festigkeiten führt als der Zement mit Kalkstein SE3 und SE5. Grund dafür ist der Eintrag von festigkeitsmindernden Luftporen durch die oben beschriebene Wechselwirkung mit dem Fließmittel 3 bei den Kalksteinen SE3 und SE5.

Bild 34 zeigt die Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Betone gemessen an Zylindern. Insgesamt ähnelt das Verformungsverhalten der Betone mit Zementen mit 50 M.-% Kalkstein und $w/z = 0,35$ dem Verhalten von Beton mit CEM II/A-LL und $w/z = 0,50$.

Ergebnisse zur ebenfalls durchgeführten Prüfung des E-Moduls (nach DIN 1048-5:1991-06) und Spaltzugfestigkeit (nach DIN EN 12390-5:2009-07) sind in Bild 71 und Bild 72 im Anhang dargestellt. Die Prüfungen erfolgten im Betonalter von 28 Tagen. Der E-Modul der Betone lag im zu erwartenden Bereich. Lediglich der Zement mit Kalkstein SE4 und SE5 bewirkte eine signifikante Verringerung des E-Moduls gegenüber den angestrebten Werten. Diese Verringerung ist ebenfalls auf die oben beschriebene Wechselwirkung mit dem Fließmittel 3 und den hierdurch hervorgerufenen erhöhten Luftgehalt zurückzuführen.

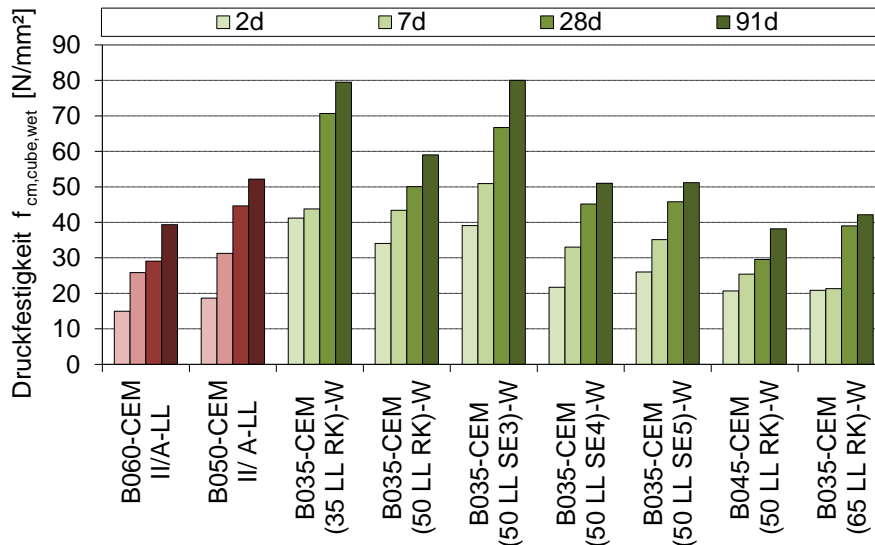


Bild 33 Druckfestigkeit der Betone aus Werkszementen

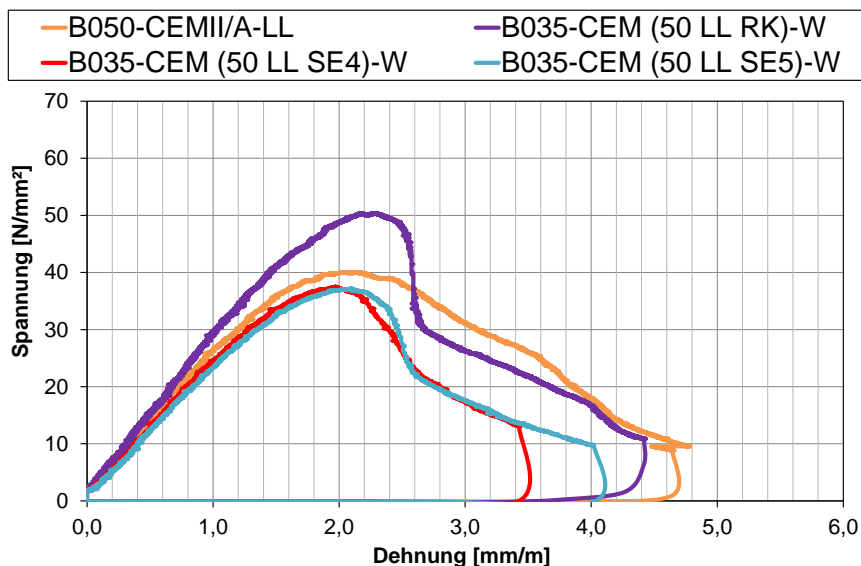


Bild 34 Spannungs-Dehnungs-Beziehung der Betone

6.2.4 Kriechen und Schwinden

Die Schwindmessungen an Zylindern mit den Abmessungen $\varnothing = 158 \text{ mm}$, $l = 300 \text{ mm}$ wurden in Anlehnung an DAfStb-Heft 422, Abschnitt 2.6 [6] 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 Stirnseiten der Schwindkörper wurden diffusionsdicht abgeklebt, um die Lagerungsbedingungen der Kriechstände zu simulieren (vgl. Bild 35). Für die Verformungsmessungen wurden auf der Mantelfläche der Zylinder mittig vier 150 mm lange Messstrecken auf jeweils um 90° gegeneinander versetzten Mantellinien angeordnet. Die Messungen erfolgten mittels eines mechanischen Setzungsdehnungsmessers. Zu jedem Messzeitpunkt wurde die Länge einer konstanten Vergleichsstrecke (Invarstab) gemessen. Veränderungen dieses Messwertes wurden bei der Auswertung der Längenmessungen berücksichtigt. Die Probezylinder wurden nach einem Tag ausgeschalt. Die Mess-

punkte wurden angeklebt und es erfolgte die erste Messung. Die Zylinder wurden anschließend bis zum 7. Tag nach Herstellung unter Wasser gelagert. Die folgenden Messungen wurden nach 7 Tagen Wasserlagerung, sowie 1, 3, 6, 7, 13, 20, 27, 47, 86, 76, 104, 136 und 196 Tage nach der Auslagerung durchgeführt.

Die Prüfungen zur Ermittlung der Kriechverformungen wurden nach DAfStb-Heft 422, Abschnitt 2.7 [6] an je 2 Zylindern durchgeführt (vgl. Bild 35). Die verwendeten Probekörper inklusive der Messstellen, das Messverfahren sowie die Lagerungsbedingungen entsprechen denen der Schwindversuche. Die Kriechspannung von $\sigma_u = 1/3 f_{c,cyl}$ wurde im Alter von 28 Tagen aufgebracht. Die Werte sind in **Tabelle 6** zusammengestellt. Kurz vor der Belastung der Prüfkörper erfolgte die Nullmessung. Weitere Ablesungen wurden unmittelbar nach der Belastung, 1 und 6 Stunden sowie 1, 2, 7, 14, 28, 56, 84, 112 und 168 Tage nach Belastung durchgeführt.



Bild 35 Aufgebrachte Kriechspannungen und Versuchsaufbau zum Kriechverhalten (links) Schwindmessung (rechts unten)

Tabelle 6 Aufgebrachte kriecherzeugende Spannungen

Bezeichnung	$f_{c,cyl}$ [N/mm ²]	$f_{c,cube}$ [N/mm ²]	Kriechspannung [N/mm ²]
1	2	3	4
B060-CEM II/A-LL	26,3	31,6	9,1
B050-CEM II/A-LL	38,6	48,5	13,0
B035-CEM (35 LL RK)-W	64,9	76,8	22,1
B035-CEM (50 LL RK)-W	49,1	54,4	16,5
B035-CEM (50 LL SE3)-W	Ergebnisse folgen		
B035-CEM (50 LL SE4)-W	35,7	49,1	12,2
B035-CEM (50 LL SE5)-W	36,7	49,8	12,2
B045-CEM (50 LL RK)-W	26,6	32,1	9,1
B035-CEM (65 LL RK)-W	35,9	42,4	12,2

Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Schwindverkürzung sind in Bild 36 zusammengestellt. Der Beton mit klinkerreduziertem Zement mit Kalkstein RK (B035-CEM (65 LL RK)-W) weist ein deutlich geringeres Schwinden auf als der Referenzbeton mit gleicher Festigkeit.

Die Schwindverformungen der weiteren Betone mit hohem RK-Kalksteingehalt entsprechen in etwa denen des Referenzbetons. Festzustellen ist weiterhin, dass die Verwendung der Zemente mit Kalkstein SE4 und SE5 zu signifikant höheren Schwindwerten führen. Ursächlich hierfür ist der bereits erwähnte Luftporeneintrag durch das Fließmittel 3 in Kombination mit diesen Kalksteinen.

Ein Vergleich der Messwerte mit den rechnerischen Schwindverformungen (siehe Bild 37) zeigt, dass die gemessenen Schwindverformungen aller Betone deutlich geringer sind als nach Eurocode 2. Gegenüber dem Model Code 2010 weisen die Betone mit einem Klinkeranteil von 35 und 50 M.-% im Zement dann signifikant geringere Schwinddehnungen auf, wenn der Klinkeranteil rechnerisch wie ein CEM I 52,5 R angesetzt wird und der Kalkstein als Betonzusatzstoff (mittlerer, oranger Balken). Wird bei der Berechnung nach Model Code 2010 von einem kalksteinhaltigen Zement der entsprechenden Festigkeit ausgegangen (rechter weißer Balken), besteht eine gute Übereinstimmung von Versuch und Rechnung.

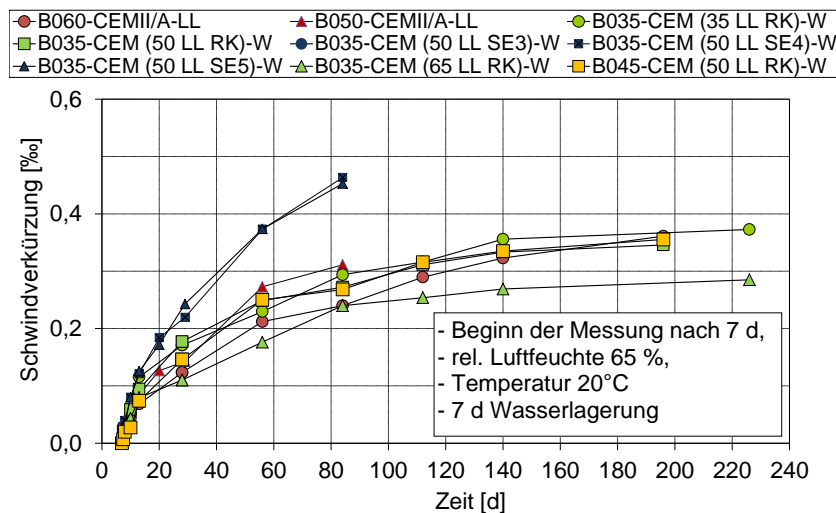


Bild 36 Verlauf der Schwindverformungen der Referenzbetone und der Betone aus klinkerreduziertem Zement

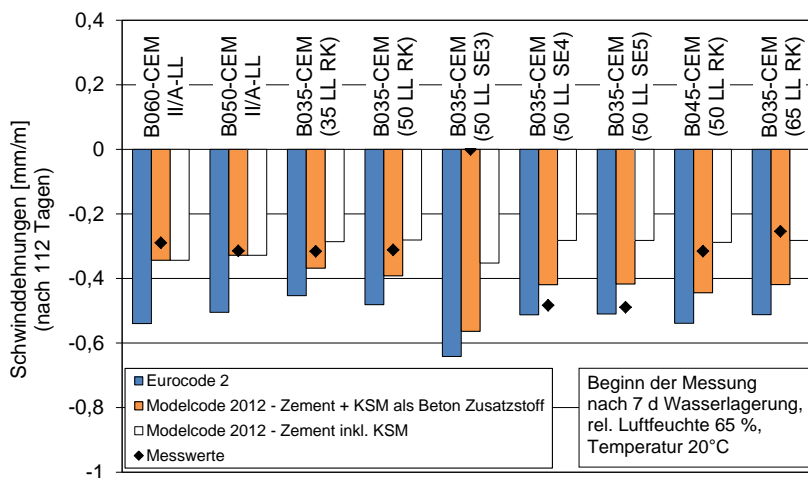


Bild 37 Vergleich der Messergebnisse zum Schwinden mit den Ansätzen nach Model Code 2010 und Eurocode 2 [7, 8]

Die Betone mit klinkerreduzierten Zementen und Kalkstein LL RK weisen ein ähnliches Schwindverhalten (**Bild 36**) wie der Referenzbeton auf. Bei Verwendung der Kalksteine LL SE4 und LL SE5 zeigen sich deutlich höhere Schwindverformungen. Ursächlich hierfür ist der bereits erwähnte Lufteintrag durch das Fließmittel 3 in Kombination mit diesen Kalksteinen.

Die Schwindverformungen waren geringer als die nach Model Code 2010 und Eurocode 2 [7, 8] berechneten Werte. Dieses Verhalten ist mit dem deutlich geringeren Wassergehalt der Betone mit klinkerreduzierten Zementen gegenüber dem Referenzbeton begründbar.

Die Ergebnisse zum Kriechen sind in Bild 38 zusammengestellt. Betone gleicher Festigkeitsklasse weisen ungefähr die gleiche bezogene Kriechverformung auf. Eine Ausnahme bilden wie beim Schwinden die Betone mit Zementen mit Kalkstein SE4 und SE5 mit deutlich erhöhten Kriechverformungen.

Bild 39 zeigt eine gute Übereinstimmung von Messwert und Kriechzahl nach Eurocode 2 [8]. Demgegenüber sind die Messwerte der Betone mit niedriger Festigkeit deutlich geringer als die Rechenwerte nach Model Code 2010.

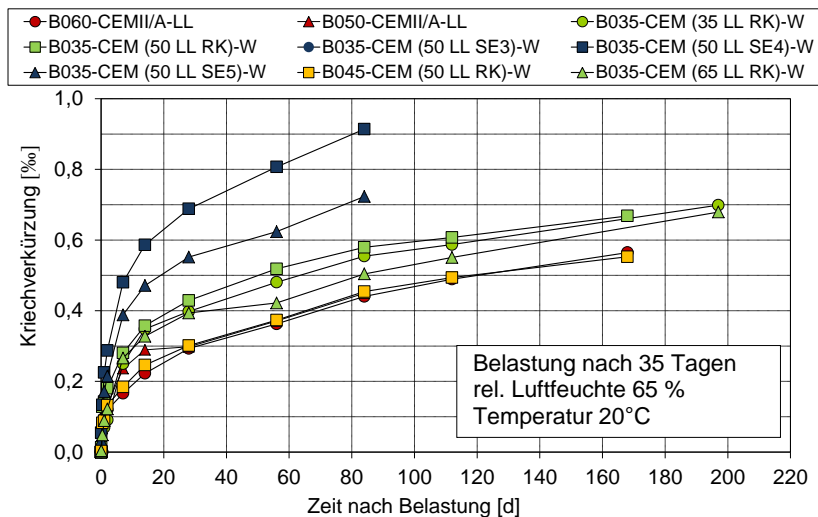


Bild 38 Bezogene Kriechverformungen der Referenzbetone und der zementreduzierten Betone

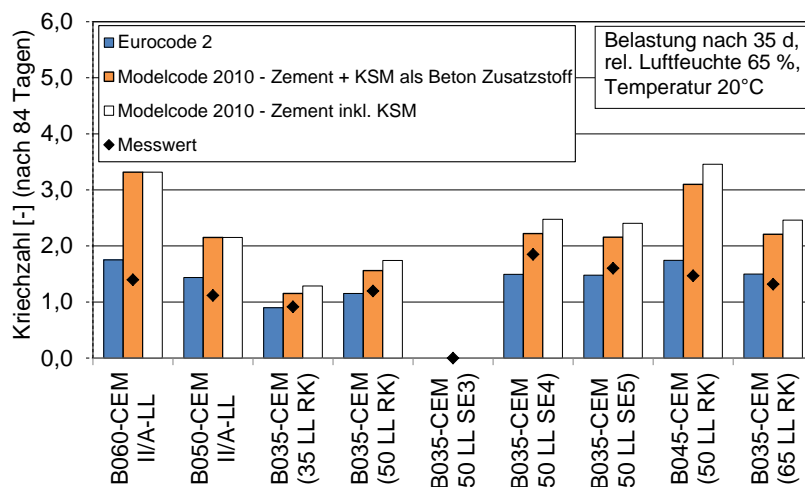


Bild 39 Vergleich der ermittelten Kriechzahl mit den Ansätzen nach Model Code 2010 und Eurocode 2 [7, 8]

6.2.5 Karbonatisierung

Die im Schnelltest [9] ermittelten Karbonatisierungstiefen nach 28 und 56-tägiger Lagerung in einer erhöhten CO₂-Konzentration von 2,0 % sind in Bild 40 dargestellt. Es zeigt sich tendenziell, dass die Karbonatisierungstiefe bei höheren Druckfestigkeiten geringer ist. Ein allgemeingültiger Zusammenhang zwischen Karbonatisierungstiefe und Druckfestigkeit war jedoch nicht festzustellen. Demgegenüber zeigte sich der bereits in den Vorversuchen festgestellte Zusammenhang zwischen der Karbonatisierungstiefe und dem Wasser/Klinker-Verhältnis. Dieses Verhalten entspricht in etwa dem in [10] und [11] vorgestellten Ansatz zum Zusammenhang von Karbonatisierungstiefe, Zementgehalt und Wasserzementwert bzw. Druckfestigkeit.

Bild 41 zeigt, dass die Karbonatisierungstiefe der klinkerreduzierten Betone durch eine Minderung des Wasserzementwertes auf 0,35 bzw. 0,45 begrenzt werden kann, und somit die Werte des Referenzbetons zu erreichen sind.

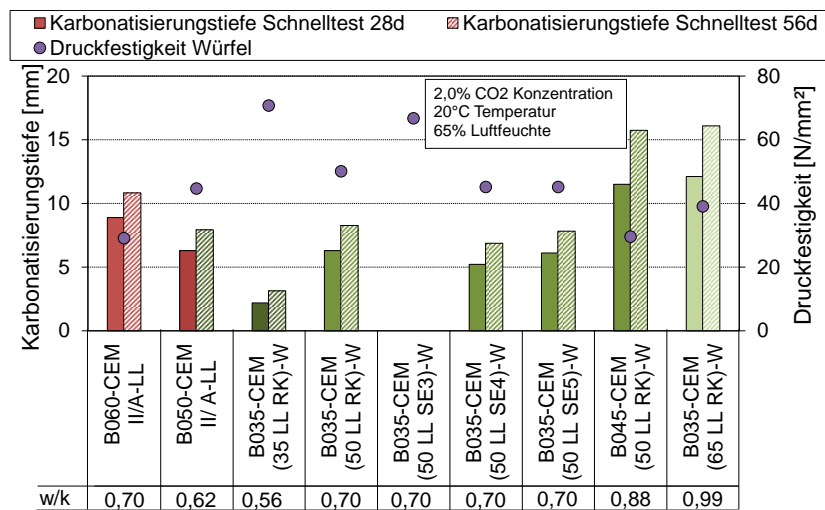


Bild 40 Karbonatisierungstiefen von Betonproben nach 28 und 56-tägiger Lagerung bei einem CO₂-Gehalt von 2 %

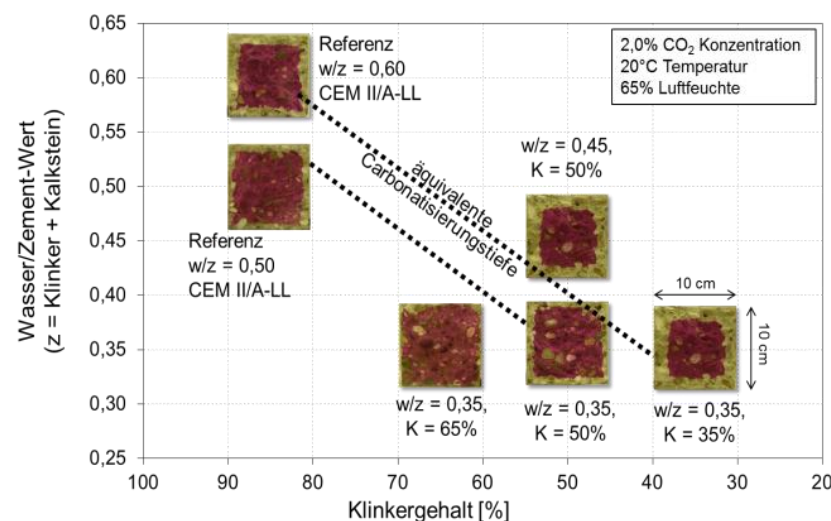


Bild 41 Karbonatisierungstiefe in Abhängigkeit von Klinkergehalt und w/z-Wert

6.2.6 Traglastversuch

Nach der Ermittlung der bemessungsrelevanten Festbetoneigenschaften wurde auch das Verhalten bewehrter Stahlbetonprobekörper untersucht. Aus diesem Grund wurden aus der Referenzmischung B060-CEM II/A-LL und den Mischungen mit klinkerreduzierten Zementen B035-CEM (35 LL RK)-W, B035-CEM (50 LL RK)-W und B035-CEM (65 LL RK)-W bewehrte und unbewehrte Stahlbetonbalken mit den Maßen 150 x 150 x 700 mm³ hergestellt. Die Bewehrungspläne der Balken sind im Anhang dargestellt (Bild 75 bis Bild 78). 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 1045-1:2008 nachgerechnet. Die Messwerte der Bauteilprüfungen und die berechneten Versagenslasten sind in Tabelle 7 gegenübergestellt. Die Rechenwerte stimmen gut mit den gemessenen Werten überein. Lediglich das Schubversagen der Balken des Typs III wird im Versuch deutlich später erreicht als berechnet. Ein Grund hierfür sind Modellsicherheiten des Fachwerkmodells für die Querkrafttragfähigkeit.

Tabelle 7 Gegenüberstellung von Mess- und Rechenwerten der Bauteilversuche

Beton	Typ	Messwert	Rechnerische Traglast für		Ausnutzung ¹⁾	
		Maximallast [kN]	Biegung [kN]	Querkraft [kN]	Biegung [%]	Querkraft [%]
1	2	3	4	5	6	7
B060-CEM II/A-LL	II	26	25	31	105	84
B035-CEM (35 LL RK)-W	II	27	26	41	102	65
B035-CEM (50 LL RK)-W	II	27	25	36	105	73
B045-CEM (50 LL RK)-W	II	26	25	30	104	85
B035-CEM (65 LL RK)-W	II	27	25	33	107	81
B060-CEM II/A-LL	III	52	71	45	73	117
B035-CEM (35 LL RK)-W	III	77	74	59	105	131
B035-CEM (50 LL RK)-W	III	61	73	53	84	117
B045-CEM (50 LL RK)-W	III	71	71	44	100	162
B035-CEM (65 LL RK)-W	III	69	72	48	95	144
B060-CEM II/A-LL	IV	140	127	182	110	77
B035-CEM (35 LL RK)-W	IV	180	142	194	126	93
B035-CEM (50 LL RK)-W	IV	145	138	193	105	75
B045-CEM (50 LL RK)-W	IV	128	126	175	102	73
B035-CEM (65 LL RK)-W	IV	151	132	189	114	80

¹⁾ Fett \triangleq Ausnutzungsgrad bei maßgebendem Versagenkriterium.

6.3 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 Betontemperatur ($T = 10, 20$ und $30 \text{ }^\circ\text{C}$) auf den Fließmittelbedarf, die Verarbeitbarkeit, die Druckfestigkeit und das Karbonatisierungsverhalten auswirken. Dabei wurden die Untersuchungen sowohl an Betonen mit klinkerreduzierten Zementen als auch an Referenzbetonen mit CEM II/A-LL 32,5 R durchgeführt. Bei der Variation des Wassergehaltes wurde durch angepasste Fließmitteldosierung ein Ausbreitmaß von ca. 500 mm eingestellt. In der Versuchsreihe mit variiertem Frischbetontemperatur wurde der Beton nach der Betonherstellung (mit temperierten Ausgangsstoffen) 24 Stunden in der Klimakammer bei vorgegebener Solltemperatur gelagert. Danach wurden die Proben ausgeschalt und bei 20°C bis zur Prüfung in Wasser gelagert.

Der Einfluss auf die Druckfestigkeit wurde durch die Prüfung der 24-Stunden- 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 herangezogen. Der Einfluss auf die Dauerhaftigkeit gegenüber karbonatisierungsinduzierter Bewehrungskorrosion wurde durch die Messung der Karbonatisierungstiefe quantifiziert.

Die Ergebnisse zu Fließmittelbedarf, Verarbeitbarkeit, Druckfestigkeit und zum Karbonatisierungswiderstand in Abhängigkeit des Wassergehaltes sind in Bild 42 bis Bild 44 zusammengestellt. Den Einfluss der Betontemperatur verdeutlichen Bild 45 bis Bild 47.

Es kann beobachtet werden, dass die Druckfestigkeit der Betone mit Zementen hoher Kalksteingehalte sensibler auf Änderungen des Wassergehaltes reagiert als die Druckfestigkeit der Betonmischung B060-CEM II/A-LL. Gleiches gilt bezüglich des Fließmittelbedarfs und der Karbonatisierungstiefe. Die Verringerung der Druckfestigkeit des Referenzbetons bei Reduzierung des Wassergehaltes um 10 l resultiert aus dem höheren Luftporengehalt des Frischbetons.

Im Gegensatz zur Änderung des Wassergehaltes beeinflusste die Variation der Frischbetontemperatur den Fließmittelbedarf nur in geringem Maße, wobei bei 20°C die geringste Dosiermenge festgestellt wurde. Der Einfluss der Frischbetontemperatur auf die Konsistenzhaltung war ebenfalls gering. Im Gegensatz dazu zeigte sich eine signifikante Reduzierung der Betondruckfestigkeit mit abnehmender Temperatur. Dabei wiesen die Betone mit kalksteinreichen Zementen eine vergleichsweise hohe Frühfestigkeit auf. Es ist zu beachten, dass infolge des Mischvorgangs die tatsächliche Frischbetontemperatur von der Solltemperatur abweicht. Zu erklären sind damit möglicherweise die Auswirkungen der Frischbetontemperatur auf die 28-Tage-Betondruckfestigkeit, die zunächst widersprüchlich erscheinen. Bei den Betonen mit kalksteinreichen Zementen ist die Festigkeit bei hoher und niedriger Frischbetontemperatur höher als bei 20°C . Der Wert bei hohen Temperaturen ist mit der beschleunigten Wirkung (Reife) zu erklären.

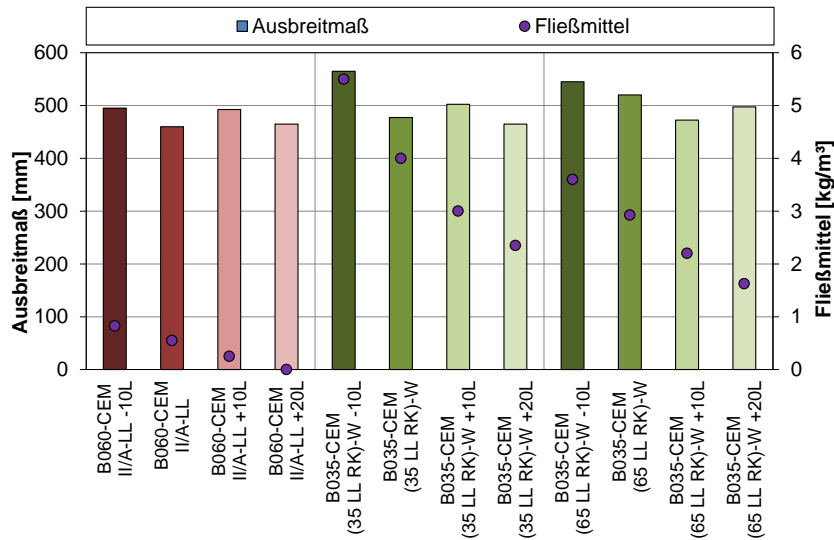


Bild 42 Fließmittelbedarf in Abhängigkeit der Änderung des **Wassergehaltes** und zugehöriges Ausbreitmaß

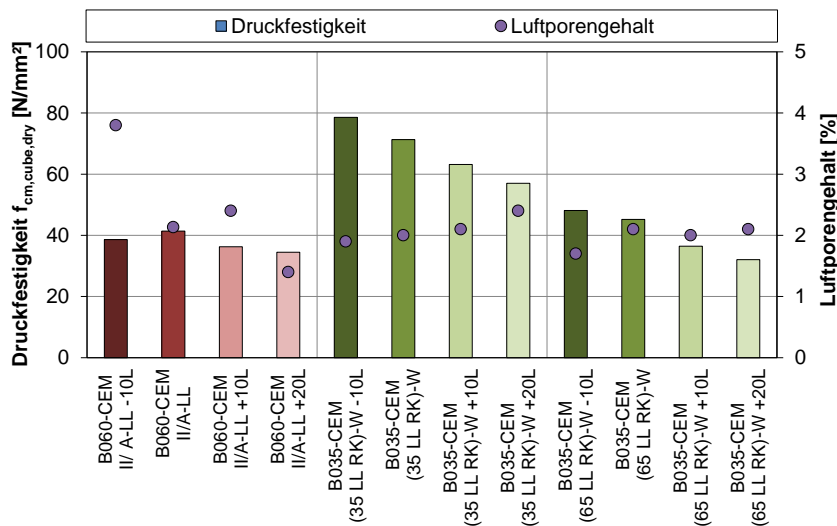


Bild 43 Druckfestigkeiten und Luftporengehalt in Abhängigkeit des **Wassergehaltes**

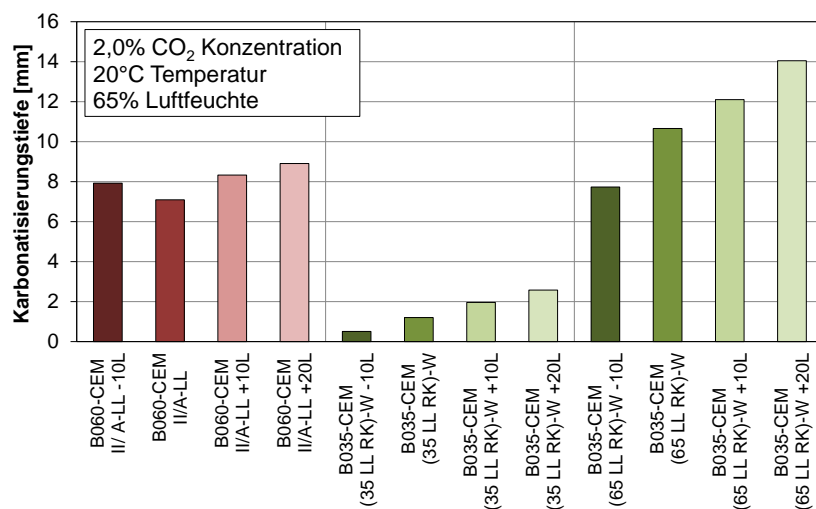


Bild 44 Karbonatisierungswiderstand des Referenzbetons und von Betonen mit klinkerreduziertem Zement in Abhängigkeit der Änderung des **Wassergehaltes** (28 Tage Lagerung in 2% CO₂)

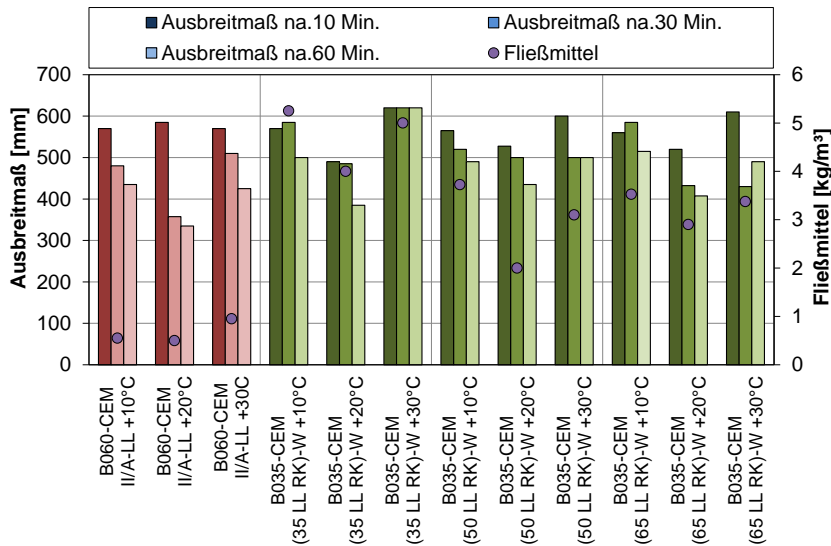


Bild 45 Fließmittelbedarf und Ausbreitmaß in Abhängigkeit der Frischbetontemperatur

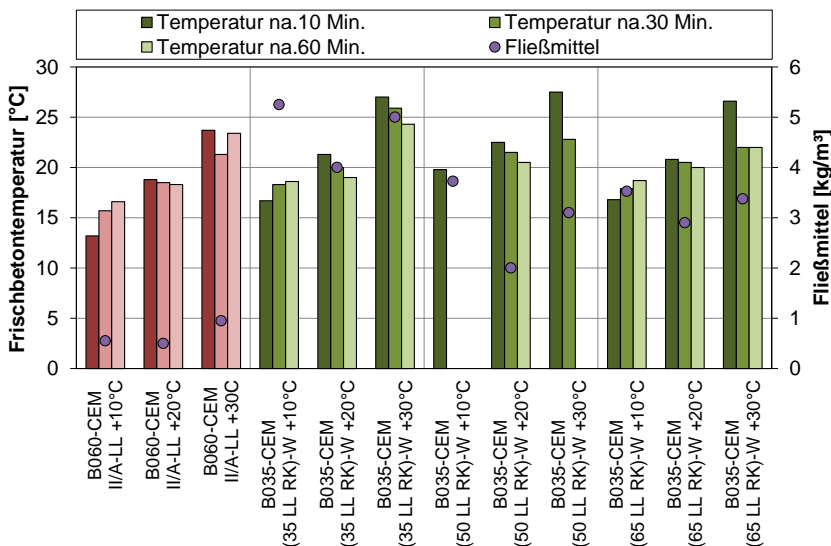


Bild 46 Frischbetontemperatur

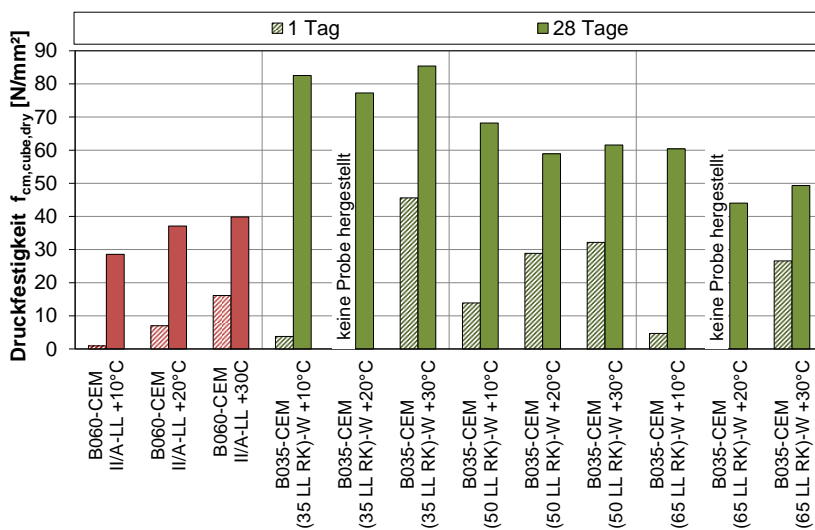


Bild 47 28 Tage Druckfestigkeit des Referenzbetons und von Betonen aus klinkerreduziertem Zement in Abhängigkeit der Betontemperatur

7 Werksversuch Transportbeton

Um die Eignung der im Labormaßstab untersuchten Betone für die Baupraxis zu untersuchen, wurden am 03.07.2013 Versuche im Transportbetonwerk Niederkassel der Firma Herkules Transportbeton GmbH & Co. KG durchgeführt.

Zur Vorbereitung der Versuche wurde der Zement CEM (50LL RK) - W im Zementwerk Spenner großtechnisch produziert und eines der Zementsilos am Standort Niederkassel damit befüllt. Auf dem Gelände des Werks Niederkassel wurde eine Schalung für eine unbewehrte Wand errichtet, um die Verarbeitbarkeit des Betons unter Praxisbedingungen sowie die Entwicklung seiner Festbetoneigenschaften ggf. langfristig beobachten zu können. Die Schalung bestand aus zwei zu einander im rechten Winkel stehenden Teilstücken (Bild 48) mit einer Länge von jeweils 3,5 m, einer Höhe von 1,5 m und einer Breite von 0,2 m.



Bild 48 Schalung auf dem Gelände des Transportbetonwerks Niederkassel

Es wurden drei Betone in Chargen von 2 m³ bzw. 3 m³ hergestellt (Tabelle 8). Das Fließmittel 3 wurde dem Betonmischer (Doppelwellenmischer) über eine Zusatzmittelpumpe zugegeben.

Tabelle 8 Betonrezepturen

	Einheit	M1	M2	M3
1	2	3	4	5
Chargenvolumen	m ³	2	2	3
CEM (50LL RK)	kg/m ³	426	407	407
Sand 0-2 mm	kg/m ³	535	555	713
Kies 2-8 mm	kg/m ³	475	500	487
Kies 8-16 mm	kg/m ³	825	850	697
Wasser ¹⁾	kg/m ³	145	138,5	138
Fließmittel 3	kg/m ³	2,0	1,8	1,9
w/z-Wert	-	0,34	0,34	0,34

¹⁾ Frischwasser + Gesteinskörnungsfeuchte

Die Feuchte des Sandes wurde kontinuierlich mit Hilfe einer Ultraschallsonde gemessen und konnte so in der Berechnung der benötigten Frischwassermenge berücksichtigt werden. Die

Feuchte der gröbereren Gesteinskörnung wurde zunächst (M1) zu 1 M.-% angenommen. Da es sich beim 03.07.2013 um einen sehr regnerischen Tag handelte (ca. 11 l/m² zwischen 8:00 und 16:00 gemäß Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW), wurden diese Werte für die Rezepturen M2 und M3 manuell auf 2 M.-% (Kies 2-8 mm) bzw. 1,6 M.-% (Kies 8-16 mm) korrigiert. Die Lufttemperatur während der Versuche betrug ca. 20 °C.

Für die Mischung M1 wurden Gesteinskörnung, Zement, Wasser und Fließmittel zeitgleich in den Doppelwellenmischer gegeben und 2 Minuten gemischt. Der Beton wurde in ein Transportbetonfahrzeug umgefüllt, dort einige Minuten gemischt und dann beprobt. Die Frischbetontemperatur, das Ausbreitmaß (DIN EN 12350-5) sowie der Luftgehalt (DIN EN 12350-7) wurden bestimmt (Tabelle 9).

Tabelle 9 Frisch- und Festbetoneigenschaften

Betonprüfung	Einheit	M1	M2	M3
1	2	3	4	5
Frischbetontemperatur	°C	21,5	22,4	21,9
LP-Gehalt	%	nicht ermittelt, da verworfen	1,3	2,2
Ausbreitmaß, sofort	mm		555	520
Ausbreitmaß, 45 min	mm		510	500
Ausbreitmaß, 90 min	mm		460	470
Dichte	kg/dm ³		2,39	2,36
Druckfestigkeit nach 1 Tage ¹⁾	MPa		21,3	22,5
Druckfestigkeit nach 2 Tagen ²⁾	MPa		31,4	32,2
Druckfestigkeit nach 28 Tagen ³⁾	MPa		53,7	52,9
visuelle Inspektion	-		niedrige Viskosität, geringes Bluten, Sedimentation der Gesteinskörnung	niedrige Viskosität, geringe Sedimentation bei Beprobung, Sedimentation beim Betonieren

¹⁾ 1 Würfel, ²⁾ Mittelwert aus 2 Würfeln, ³⁾ Mittelwert aus 3 Würfeln

Die Rezeptur M1 enthielt auf Grund der zu niedrig angenommenen Feuchte der Gesteinskörnung zu viel Wasser und neigte deutlich zum Entmischen (Absetzen des Leims). Zusätzlich wurde nicht aufgeschlossener Zement in Agglomeraten mit bis zu 7 cm Durchmesser gefunden. Ursächlich dafür waren die zu kurze Mischzeit sowie die zeitgleiche Zugabe aller Komponenten in den Mischer. Die M1 Mischung wurde verworfen.

Das Mischregime für M2 wurde verändert: Die Gesteinskörnungsfeuchte wurde angepasst und der Leim- und damit der Zementgehalt leicht abgesenkt. Der Zement und die Gesteinskörnung wurden kurz trocken vorhomogenisiert, nach Wasserzugabe wurde 1 min gemischt, im Anschluss daran das Fließmittel zugegeben und weitere 2 min gemischt. Bei der Bestimmung der Frischbetoneigenschaften neigte der Beton nicht mehr zum Entmischen. Entsprechend wurde der Beton zur Füllung der unteren Hälfte der Probeschalung verwendet. In der Schalung zeigte sich, dass der Beton zum Entmischen neigte und sich die grobe Gesteinskörnung absetzte. Der Beton wurde im Eckpunkt der Schalung eingefüllt (Bild 48) und mit der Rüttelflasche verdichtet. Das ausschließliche Einfüllen des Betons an einer Stelle stellt einen sehr ungünstigen Betonierverlauf dar, da normalerweise an mehreren Stellen der Schalung Beton eingefüllt wird. Der Beton setzte sich mit grober Gesteinskörnung in die eine Richtung, eher feinteiliger Beton in die andere Richtung ab. Um diesen Effekt zu vermeiden, wurde die Sieblinie für M3 angepasst. Der Sandanteil wurde erhöht, der Anteil Kies 8-16 mm wurde ge-

senkt (vgl. Tabelle 8). Mit diesem Beton wurde die obere Hälfte der Schalung gefüllt. Der Beton zeigte weder während der Prüfung der Frischbetoneigenschaften noch während der Betonage Entmischungserscheinungen.

Von den Mischungen M2 und M3 wurden jeweils 6 Würfel mit der Kantenlänge 150 mm zur Bestimmung der Druckfestigkeitsentwicklung hergestellt (Tabelle 9). Die Bestimmung der Betondruckfestigkeit erfolgte nach 1, 2 und 28 Tagen nach DIN EN 12390-3 (Wasserlagerung bis zum 7. Tag, danach 20°C und 65% rel. Feuchte). Die an den Probewürfeln ermittelten Druckfestigkeiten beider Mischungen liegen nach 1 Tag bei ca. 22 N/mm², nach 28 Tagen bei etwa 50 MPa und damit deutlich unterhalb der in den Laborversuchen ermittelten Werte (>60 MPa nach 28 Tagen). Grund dafür könnten beispielsweise die Wetterbedingungen an diesem Tag gewesen sein. Ggf. wurde über die Gesteinskörnung mehr Feuchte eingetragen als angenommen. Ein dadurch erhöhter Wasserzementwert würde zur beobachteten Absenkung der Betondruckfestigkeiten passen (vgl. Kapitel 6.3). Bei der Umsetzung von Laborergebnissen in die Praxis muss also bei Zementen mit hohen Kalksteingehalten ein besonderes Augenmerk auf die Herstellbedingungen gerichtet werden. Alternativ wären größere Vorhaltemaße (höhere Zementgehalte bzw. weiter als theoretisch nötig abgesenkte Wasserzementwerte) denkbar.

Die Betonwand wurde nach 5 Tagen ausgeschalt. Am unteren Teil der Wand, welcher mit dem grobkörnigen Beton M2 hergestellt wurde, sind im Fußbereich einige Kiesnester festzustellen (Bild 49), die auf die beim Betonieren beobachteten Entmischungserscheinungen zurückzuführen sind. Demgegenüber weist der obere Teil der Wand, der mit der feinkörnigeren Beton M3 ausgeführt wurde, eine gute Oberflächenqualität auf.



Bild 49 Ansicht der ausgeschalteten Wand

Es ist geplant, auch nach dem offiziellen Abschluss des Forschungsvorhabens weitere Beprobungen an der Versuchswand durchzuführen: Es sollen Bohrkern aus der Mitte der Wand, aus dem rechten sowie dem linken Teilstück sowohl aus den Bereichen mit der Charge M2 und der Charge M3 gezogen werden. An diesen Bohrkernen sollen die Festigkeit sowie der Verlauf der Karbonatisierung bestimmt werden.

8 Ökobilanzierung

8.1 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 50, in Anlehnung an [12])

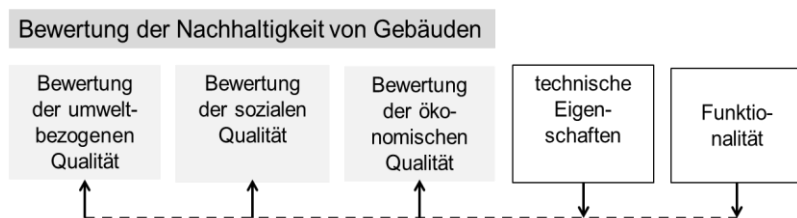


Bild 50 Definition „Nachhaltiges Bauen“ des DGNB [12]

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.

8.1.1 Die Methodik der Ökobilanzierung

Die Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und 14044 [13, 14], 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 51** dargestellt sind:

- Festlegung des Zieles 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.

8.1.2 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.

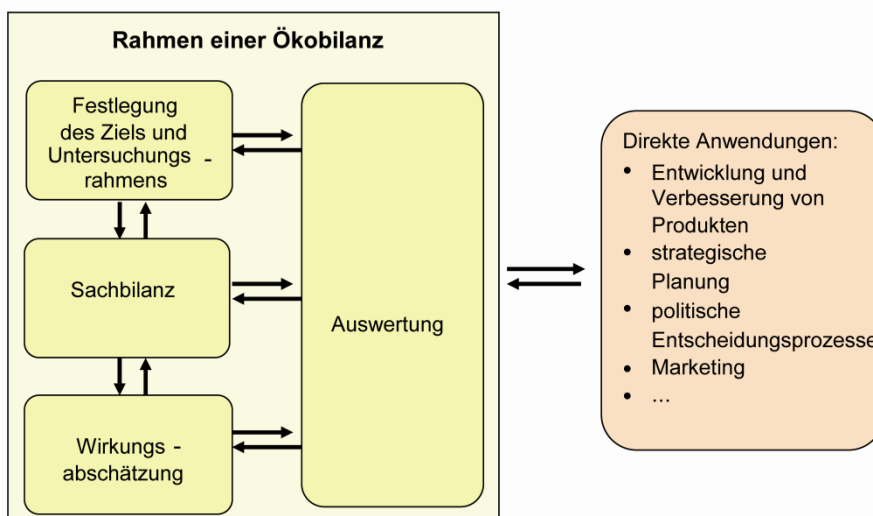


Bild 51 Vorgehensweise bei einer Ökobilanzierung nach DIN EN ISO 14040 und 14044 [13, 14]

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.

8.1.3 Kriterien für die Ökobilanzierung

8.1.3.1 Allgemein

Um die Umweltwirkungen eines Baustoffs bzw. Bauwerks beschreiben und quantifizieren zu können, werden im Rahmen der Ökobilanz verschiedene ökologischen Kriterien herangezogen zugeordnet. Bei der Auswahl der Kriterien ist hierbei der Zweck der Studie bzw. die im Vorfeld festgelegten Ziele der Untersuchung zu berücksichtigen. Im Folgenden ist eine Auswahl ökologischer Kriterien dargestellt. Diese Kriterien stellen einen Teil der in CEN/TC 350 festgelegten Indikatoren für die Bewertung der umweltbezogenen Qualität von Gebäuden dar [15]. Zudem sind sie Bestandteil der Hauptkriteriengruppe „Ökologische Qualität“ der beiden in Deutschland verwendeten Zertifizierungssysteme.

Zudem sind sie Bestandteil der Hauptkriteriengruppe der „Ökologischen Qualität“ im Rahmen des vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) eingeführten „Deutschen Gütesiegel Nachhaltiges Bauen“ (DGNB) [16].

8.1.3.2 Primärenergiebedarf nicht regenerierbar

Der nicht regenerierbare bzw. nicht erneuerbare Primärenergiebedarf (PE_{nem}) [in MJ] eines Produktes ist Summe aller nicht erneuerbaren primärenergetischen Aufwendungen, die im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines ökonomischen Gutes (Produkt oder Dienstleistung) entstehen bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden. Ein niedriger PE_{nem} -Wert weist auf ein Produkt hin, für dessen Herstellung, Nutzung und Entsorgung nur wenig nicht erneuerbare Energie verbraucht wurde. Zu den nicht erneuerbaren Primärenergiequellen zählen u. a. Steinkohle, Braunkohle, Erdöl, Erdgas und Uran.

8.1.3.3 Primärenergiebedarf regenerierbar

Der regenerierbare oder erneuerbare Primärenergiebedarf (PE_{ern}) [in MJ] eines Produktes ist Summe aller primärenergetischen Aufwendungen aus erneuerbaren Quellen (wie z. B. Biomasse, Sonnenstrahlung, Erdwärme, Wasser- und Windkraft), die im Zusammenhang mit der Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines ökonomischen Gutes (Produkt oder Dienstleistung) entstehen bzw. diesem ursächlich zugewiesen werden. Ein niedriger PE_{ern} -Wert deutet auf ein Produkt hin, für dessen Herstellung, Nutzung und Entsorgung nur wenig erneuerbare Energie verbraucht wurde. Der Primärenergiebedarf erneuerbar sollte immer in Zusammenhang mit dem Gesamtprimärenergiebedarf, d.h. der Summe der erneuerbaren und nicht erneuerbaren Primärenergiewerte gesehen werden.

8.1.3.4 Treibhauspotential

Das Treibhauspotential (Global Warming Potential, GWP), gemessen in kg CO_2 -Äquivalent, ist das massebezogene Äquivalent der Treibhauswirkung von Gasen. Ein Produkt mit einem niedrigen GWP-Wert verursacht nur geringe Emissionen an Gasen, die zum Treibhauseffekt

beitragen. An dieser Stelle zu nennen sind z.B. CO₂, CH₄ und N₂O sowie SF₆, PFC und HFC. Ihre Werte werden in Relation zur Treibhauswirkung von Kohlendioxid als CO₂-Äquivalent angegeben. Das Treibhauspotential ist aufgrund der Wirkungscharakteristik von Treibhausgasen und deren unterschiedlicher atmosphärischer Verweildauern ein zeitliches Integral für einen bestimmten Zeitraum. Daher ist bei der Kategorie Treibhauspotential stets der Bezugszeitraum – 25, 100 oder 500 Jahre – anzugeben. Für die vorliegende Studie beträgt der Bezugszeitraum 100 Jahre (GWP100).

8.1.3.5 Ozonschichtzerstörungspotential

Das Ozonschichtzerstörungspotential (ODP), gemessen in R11- Äquivalent bildet die ozonschichtzerstörende Wirkung von Gasen ab. Aufgabe der Ozonschicht ist die Abschirmung von UV-Strahlung und damit die Verhinderung einer zu starken Erwärmung der Erdoberfläche. Zu den Folgen der Zerstörung der Ozonschicht gehören u. a. Tumorbildungen bei Mensch und Tier, sowie Störungen der Photosynthese.

8.1.3.6 Photochemisches Oxidantienbildungspotential

Das Photochemische Oxidantienbildungs- oder Sommersmogpotential (POCP), gemessen in kg C₂H₄ - Äquivalent ist das massebezogene Äquivalent schädlicher Spurengase, wie z.B. Stickoxide und Kohlenwasserstoffe, die in Verbindung mit UV-Strahlung zur Bildung von bodennahem (troposphärischem) Ozon beitragen. Die dadurch entstehende human- und ökotoxische Verunreinigung der bodennahen Luftschichten wird als Sommersmog bezeichnet. Dieser greift die Atmungsorgane an und schädigt Pflanzen und Tiere. Die Konzentration von bodennahem Ozon wird regelmäßig durch Luft-Messstationen ermittelt, in Belastungskarten dargestellt und veröffentlicht.

8.1.3.7 Überdüngungspotential

Überdüngung (Eutrophierung, EP) [in kg PO₄-Äqu.] bezeichnet den Übergang von Gewässern und Böden von einem nährstoffarmen (oligotrophen) in einen nährstoffreichen (eutrophen) Zustand. Sie wird verursacht durch die Zufuhr von Nährstoffen, insbesondere durch Phosphor- und Stickstoffverbindungen. Diese können z. B. bei der Herstellung von Bauprodukten vor allem aber durch Auswaschungen von Verbrennungsemissionen in die Umwelt gelangen. Die resultierende Änderung der Verfügbarkeit von Nährstoffen wirkt sich z. B. in Gewässern durch eine vermehrte Algenbildung aus, die unter anderem das Sterben von Fischen zur Folge haben kann.

8.1.3.8 Versauerungspotential

Das Versauerungspotential (Acidification Potential, AP) [in kg SO₂-Äqu.] beschreibt die Wirkung versauernder Emissionen und ist damit ein Maß für die Umweltwirkung der Versauerung von Böden und Gewässern. Je höher der AP-Wert, umso höher die Gefahr von saurem Regen und den damit verbundenen Umweltschädigungen. Referenzstoff für die Berechnung des Versauerungspotentials ist SO₂ (Schwefeldioxid), auf das die Wirkung der anderen ver-

sauernd wirkenden Luftemissionen (wie z. B. NO_x , H_2S), ausgedrückt in massebezogenen SO_2 -Äquivalenten, bezogen wird.

8.2 Durchgeführte Ökobilanzierung

8.2.1 Allgemein

Im folgenden 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) [17] und die EPD für den deutschen Durchschnittszement (VDZ) zurückgegriffen [18]. Für die Bewertung der Zemente und Betone wurden die Transportwege vom Werk zum Abnehmer vernachlässigt.

8.2.2 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 Kalksteingehalten dargestellt (**Bild 52** bis **Bild 54**). Diese Betrachtung erfolgte unabhängig von der Zementleistungsfähigkeit. Es wird deutlich, dass die Werte aller Wirkungskategorien bei einer Substitution des Zementklinkers durch Kalkstein signifikant reduziert werden können. Der Unterschied im Gesamtenergiebedarf (**Bild 53**) zwischen dem EPD-Zement 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.

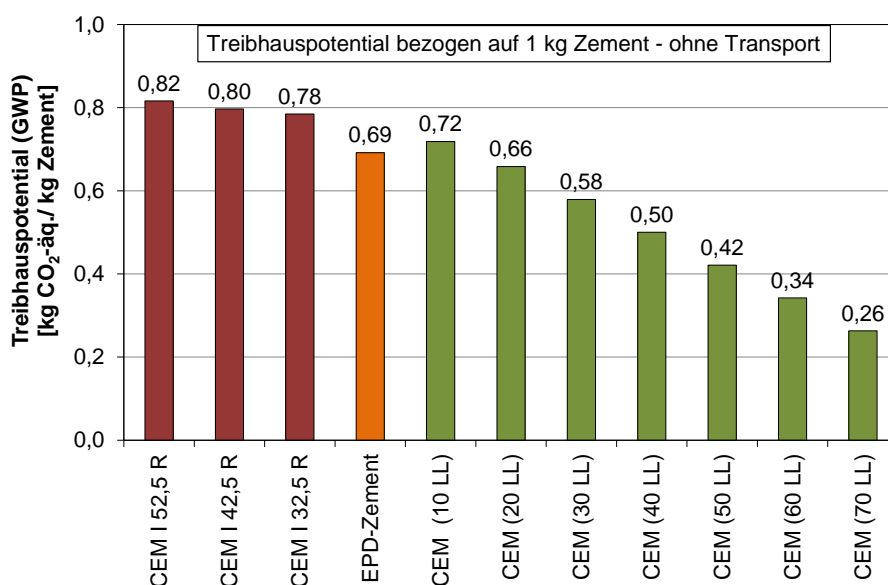


Bild 52 Treibhauspotential Zement

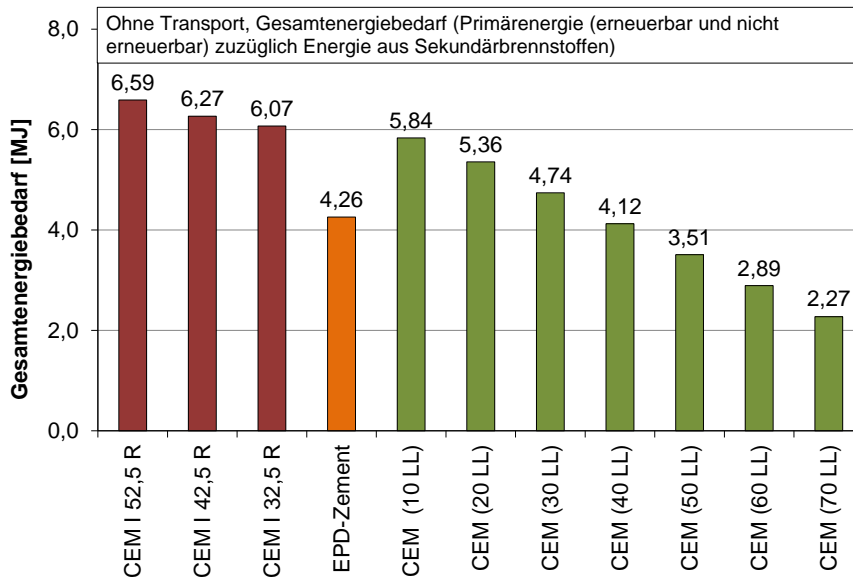


Bild 53 Gesamtenergiebedarf Zement

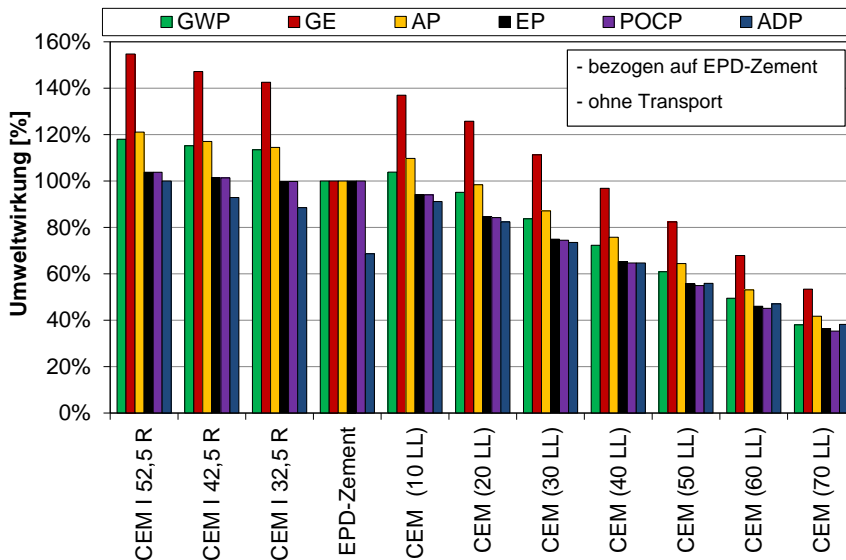


Bild 54 Umweltwirkung Zement bezogen auf den VDZ-EPD-Zement

8.2.3 Bilanzierung der Betone

Im Gegensatz zu der Bewertung der Zemente wurde bei der Bewertung der Betone die jeweilige Leistungsfähigkeit (Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit) berücksichtigt. Um bei konstantem Leimgehalt die gewünschte Betonleistungsfähigkeit in Abhängigkeit der Expositionsklasse zu erreichen, weisen die Referenzbetone unterschiedliche Zementgehalte auf (vgl. Tabelle 10). Für den VDZ-Durchschnittszement wurde eine Festigkeitsklasse von 42,5 angenommen. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde ebenfalls für den CEM II/A-LL eine Festigkeitsklasse von 42,5 R festgelegt.

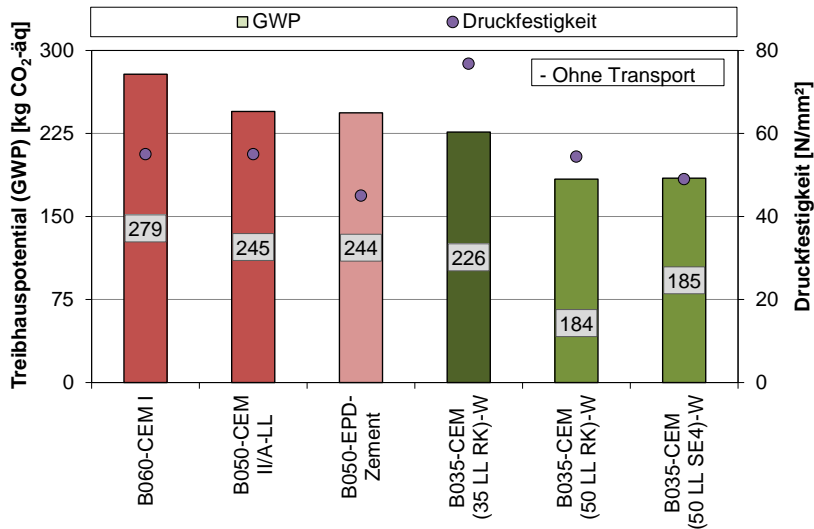


Bild 55 Treibhauspotential von Betonen mit einer Druckfestigkeit von mind. 50 MPa und vergleichbarem Karbonatisierungswiderstand

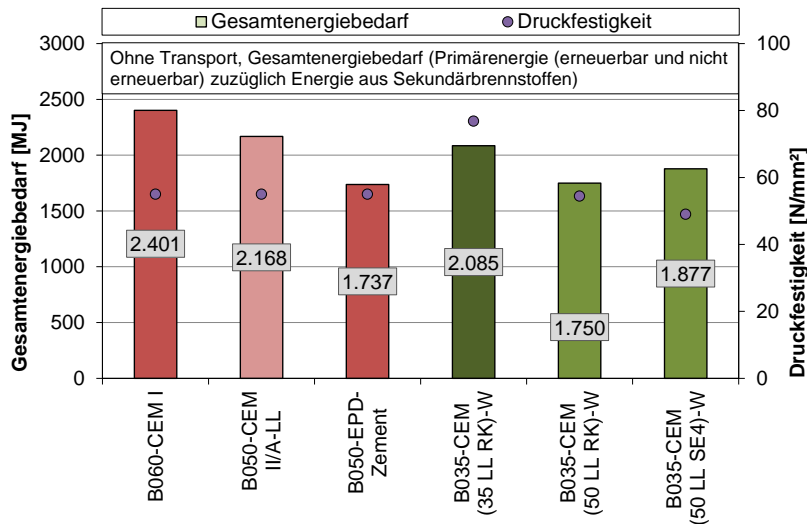


Bild 56 Gesamtenergiebedarf von Betonen mit einer Druckfestigkeit von mind. 50 MPa und vergleichbarem Karbonatisierungswiderstand

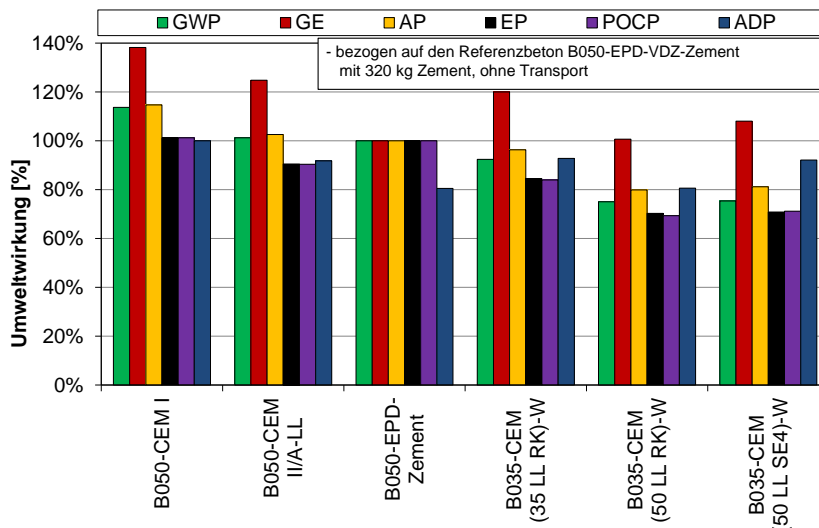


Bild 57 Umweltwirkungen von Betonen mit einer Druckfestigkeit von mind. 50 MPa

In Bild 55 bis Bild 57 bzw. Bild 79 bis Bild 81 im Anhang sind jeweils Betone vergleichbarer Leistungsfähigkeit bezüglich Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit dargestellt. Die gewünschte Leistungsfähigkeit bezüglich Karbonatisierung wird rechnerisch durch einen Beton B040 CEM (50 LL) (Interpolation zwischen B035 CEM (50 LL) und B045 CEM (50 LL)) sichergestellt (vgl. **Bild 41**). Den Referenzbetonen vergleichbare Ergebnisse in den Dauerhaftigkeitsprüfungen bezüglich Chlorideindringwiderstand und Frostwiderstand zeigt dagegen der Beton B035 CEM (50 LL) (vgl. Kapitel 5.2.6).

Im Vergleich mit den Betonen aus VDZ-Durchschnittszement und CEM II/A-LL 42,5 R ergibt sich eine Minderung des GWP von ca. 25 % bei gleicher Betonleistungsfähigkeit. Gegenüber dem Referenzbeton mit CEM I wurde eine Verringerung des GWP um ca. 35% erreicht.

Der niedrige Gesamtenergiebedarf der Betone aus dem EPD-Durchschnittszement resultiert aus dem im EPD-Datensatz angegebenen Sekundärbrennstoffeinsatzes des deutschen Durchschnittszementes. Im Gegensatz dazu ergeben sich infolge inkonsistenter Datensätze (zu Grunde liegender Strommix der Datenbank Gabi) beim ODP deutlich höhere Werte für den VDZ-Zement. Die den bilanzierten Betonmischungen zugrundeliegenden Rezepturen sind in Tabelle 10 dargestellt. Die verwendeten Basisdaten sind in Tabelle 28 im Anhang dargestellt.

Insgesamt ist festzustellen, dass die im Projekt angestrebte Zielstellung einer 25prozentigen Reduzierung der reaktiven Bestandteile (Zementklinker) und Umweltwirkungen gegenüber Betonen unter Verwendung des VDZ-Durchschnittszementes erreicht werden kann. Dies ist ein Ergebnis der Optimierung der Zementzusammensetzung bei laborseitiger Anpassung der Betontechnologie.

Tabelle 10 Mischungsrezepturen der bilanzierten Betone

Mischung	Zement		Kalkstein	Wasser	W3 Quarzmehl	Rheinsand	Rheinkies		Fließmittel ¹⁾
	Art	Menge					2/8	8/16	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
B050-CEM I	CEM I 42,5	320	-	160	67	522	477	826	1,00
B050-CEM II/A-LL	CEM II/A-LL 42,5 R	320	-	160	67	522	477	826	1,00
B050-EPD-VDZ-Zement	Durchschnittszement BRD (42,5)	320	-	160	67	522	477	826	1,00
B060-CEM II/A-LL	CEM II/A-LL 42,5 R	280	-	174	67	522	477	826	0,15
B060-EPD-VDZ-Zement	Durchschnittszement BRD (42,5)	280	-	174	67	522	477	826	0,15
B050-CEM II/A-LL	CEM I 52,5 R Spenner	280	-	174	67	522	477	826	0,15
B035-CEM (35 LL RK)-W	CEM I 52,5 R Spenner	244	131	136	67	504	477	826	2,43
B035-CEM (50 LL RK)-W	CEM I 52,5 R Spenner	190	190	137	67	504	477	826	2,20
B035-CEM (50 LL SE4)-W	CEM I 52,5 R Spenner	190	190	137	67	504	477	826	9,20
B035-CEM (50 LL SE5)-W	CEM I 52,5 R Spenner	190	190	137	67	504	477	826	9,90
B045-CEM (50 LL RK)-W	CEM I 52,5 R Spenner	166	166	153	67	504	477	826	0,94
B035-CEM (65 LL RK)-W	CEM I 52,5 R Spenner	134	250	138	67	504	477	826	1,68

¹⁾ Fließmittel 3

9 Technische Bewertung der Ergebnisse

Eine abschließende technische Bewertung erfolgt nach Abschluss der Laborversuche mit den Zementen CEM (50LL SE3), CEM (50LL SE4) und CEM (50LL SE5).

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass sich der Zement mit 50 M.-% Kalkstein RK grundsätzlich zur Herstellung von Konstruktionsbetonen eignen würde, wenn die Betontechnologie angepasst würde. Der werksmäßige Betonversuch zeigte, dass der Beton bei sorgfältiger Einstellung des Wassergehaltes, der Fließmitteldosierung und der Sieblinie der Gesteinskörnung auf der Baustelle gut verarbeitet werden könnte. Die Festigkeitsentwicklung blieb in diesem Fall hinter den Erwartungen zurück, was vermutlich auf die Wetterbedingungen am Versuchstag und den damit erhöhten Wasserzementwert zurückzuführen war. Bei der Umsetzung von Laborergebnissen in die Praxis muss also bei Zementen mit hohen Kalksteingehalten ein besonderes Augenmerk auf die Herstellbedingungen gerichtet werden. Alternativ wären größere Vorhaltemaße (höhere Zementgehalte bzw. weiter als theoretisch nötig abgesenkte Wasserzementwerte) denkbar.

Die bisherigen Laborversuche mit den Zementen CEM (50LL SE4) und CEM (50LL SE5) zeigen, dass nicht nur auf die Abstimmung der Zementhauptbestandteile unter einander sondern auch besonders auf die Wechselwirkungen mit Zusatzmitteln zu achten ist. Ein ungeplanter Eintrag von Luftporen über ein Fließmittel kann deutlich negative Auswirkungen auf die Entwicklung der Festigkeit sowie auf den Widerstand gegen das Eindringen von Chloriden und die Karbonatisierung haben.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für die Herstellung und Verwendung kalksteinreicher Zemente bis 50 M.-% LL anspruchsvolle verfahrenstechnische Maßnahmen im Zementwerk und ebenso anspruchsvolle betontechnologische Maßnahmen (wasserarmer Beton mit entsprechenden Zusatzmitteldosierungen) in der Betonherstellung erforderlich wären. Werden diese Maßnahmen unter Praxisbedingungen beherrscht, können zulassungsfähige Dauerhaftigkeitskennwerte am Beton erzielt werden. Die Robustheit derartiger Systeme im Baubetrieb bedarf einer weiteren Absicherung.

10 Ökobilanzielle Bewertung der Ergebnisse

Durch eine Substitution des Portlandzementklinkers durch Kalkstein im Zement können die Werte aller Wirkungskategorien signifikant reduziert werden. Auch bei der Bilanzierung von Betonen mit niedrigeren Wasserzementwerten aus den kalksteinreichen Zementen kann bei gleicher Leistungsfähigkeit (Druckfestigkeit und Dauerhaftigkeit im Labor) eine Reduzierung der wichtigsten ökobilanziellen Wirkungskategorien erreicht werden. Das Treibhauspotential eines Betons aus einem Zement mit 50% Kalkstein liegt mehr als 30 % unter dem Treibhauspotential eines Betons mit CEM I bzw. ca. 25 % unter dem Treibhauspotential eines Betons mit CEM II/A-LL oder dem VDZ-Durchschnittszement (vgl. **Bild 57**).

11 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.

Es konnte gezeigt werden, dass grob gemahlener Kalkstein ($d'(RRSB)$ mind. $18 \mu\text{m}$) in Kombination mit einem gegebenen Klinker bzw. Portlandzement tendenziell höhere Festigkeiten aufweist als ein feingemahlener Kalkstein ($d'(RRSB)$ ca. $10 \mu\text{m}$) in Kombination mit dem selben Klinker bzw. Portlandzement. Dadurch kann bei getrennter Mahlung der Zementhauptbestandteile Mahlergie eingespart werden. Dieser Vorteil kommt umso mehr zum Tragen, je höher der Kalksteinanteil des Zementes ist.

Die Zuteilung von CO_2 – Zertifikaten für ein Zementwerk erfolgt auf Basis der Klinkerproduktion. Durch eine Erhöhung des Anteils an weiteren Hauptbestandteilen kann pro produzierter Tonne Klinker mehr Zement hergestellt werden. Daraus ergeben sich ebenfalls wirtschaftliche Vorteile.

Nach bauaufsichtlicher Zulassung und Markteinführung eines „ökologisch und technisch optimiert Zements“ aus gut verfügbaren Ausgangsstoffen erhielt die Fa. Spenner Zement ein neues Produkt mit Alleinstellungsmerkmal. Durch entsprechendes Marketing könnten sowohl Umsatz als auch Ertrag gesteigert werden.

12 Literatur

- [1] Verein Deutscher Zementwerke e.V., „Zement-Taschenbuch,“ 2008.
- [2] L. Tang, Chloride Transport in Concrete – Measurement and Prediction, Göteborg, Chalmers University of Technology: Diss., 1996.
- [3] Bundesanstalt für Wasserbau, Chlorideindringwiderstand von Beton, BAW-Merkblatt "Chlorideindringwiderstand", 2004.
- [4] CEN/TC 104, „CEN/TR 16563:2013: Principles of the equivalent durability procedure (Verfahrensgrundsätze zum Nachweis gleichwertiger Dauerhaftigkeit),“ 2013.
- [5] 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.
- [6] D. A. f. Stahlbeton, „Prüfung von Beton, Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048-Heft 422,“ 1991.
- [7] „Fib-Bulletin 55: Model Code 2010, Final Draft – Volume 1,“ 2010.
- [8] DIN EN 1992 - Eurocode 2: Design of concrete structures, Berlin: DIN Deutsches Institut für Normung e. V., 2011.
- [9] „Fib Bulletin 34: Model Code for Service Life Design,“ February, 2006.
- [10] H. Weigler und S. Karl, Handbuch für Beton-, Stahlbeton- und Spannbeton – Beton – Arten, Herstellung, Eigenschaften, Ernst & Sohn Verlag, 1989.
- [11] S. Hainer, T. Proske und C.-A. Graubner, „Vorhersagemodell für die Carbonatisierung von zementreduzierten Ökobetonen,“ in *18. Internationale Baustofftagung (ibausil)*, Bauhaus-Universität Weimar, 2012.
- [12] 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.
- [13] „DIN EN ISO 14040: 2006-10; Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen,“ Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [14] „DIN EN ISO 14044: 2006-10; Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen,“ Beuth Verlag, Berlin, 2006.
- [15] 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.
- [16] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, „Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundvorhabens „Nachhaltig Bauen mit Beton-Heft 572,“ Beuth Verlag, Berlin, 2007.
- [17] S. Nemuth und J. Kreißig, „Datenprojekt Zement im Netzwerk Lebenszykluskosten,“ PE International, 2007.
- [18] Verein Deutscher Zementwerke e.V, Institut Bauen und Umwelt e.V., *Umwelt Produktdeklaration des Vereins Deutscher Zementwerke e.V.–Zement*, März 2012.

13 Unterschriften

15. August 2013

gez. Winfried Neufert, gez. Ines Reuken

Ort, Datum

Unterschriften

Spenner Zement GmbH & Co. KG

15. August 2013

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'i.A. S. Palm', is written over a horizontal line. The signature is stylized and somewhat illegible.

Ort, Datum

Unterschriften der Forschungsstelle

VDZ gGmbH

15. August 2013

gez. Carl-Alexander Graubner, gez. Tilo Proske

Ort, Datum

Unterschriften der Forschungsstelle

Technische Universität Darmstadt

14 Anhang

Tabelle 11 Chemisch-mineralogische Zusammensetzung

	Einheit	sh-Feinkalk	Kalkstein RK	Kalkstein SE	Kalkstein DD	Kalkstein SE2
1	2	3	4	5	6	7
Silizium(IV)-oxid	%	0,29	0,44	14,7	6,28	15,7
Aluminiumoxid	%	0,11	0,18	2,49	2,24	2,47
Titandioxid	%	0,01	0,01	0,12	0,10	0,12
Phosphor(V)-oxid	%	0,02	0,05	0,10	0,02	0,10
Eisen(III)-oxid	%	0,13	0,12	0,83	0,85	0,84
Mangan(III)-oxid	%	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02
Magnesiumoxid	%	0,20	0,41	0,34	0,86	0,41
Calciumoxid	%	55,1	54,1	44,9	49,7	43,1
Sulfat als SO ₃	%	0,04	0,02	0,15	0,12	0,17
Kaliumoxid	%	0,00	0,01	0,46	0,71	0,47
Natriumoxid	%	0,01	0,00	0,06	0,05	0,11
Natriumäquivalent	%	0,01	0,01	0,36	0,52	0,42
Kohlendioxid, 950°C; IR	%	43,0	43,7	34,8	38,5	34,9
Wasser, 950°C; IR	%	0,30	0,07	1,08	0,54	1,72
Glühverlust	%	43,3	43,8	35,9	39,0	36,8
TOC	%	0,07	0,02	0,09	0,05	0,11
Methylenblauwert	g/100g	0,07	0,03	0,63	0,53	0,40
CaCO ₃	%	98,1	97,8	79,6	88,1	78,0

Tabelle 12 Chemisch-mineralogische Zusammensetzung

	Einheit	Kalkstein SE3	Kalkstein SE4	Kalkstein SE5
1	2	3	4	5
Silizium(IV)-oxid	%	17,90	18,25	17,81
Aluminiumoxid	%	2,81	2,89	2,80
Titandioxid	%	0,15	0,15	0,15
Phosphor(V)-oxid	%	0,11	0,11	0,10
Eisen(III)-oxid	%	1,10	1,13	1,11
Mangan(III)-oxid	%	0,03	0,03	0,03
Magnesiumoxid	%	0,45	0,49	0,47
Calciumoxid	%	42,18	42,17	41,65
Sulfat als SO ₃	%	0,25	0,30	0,26
Kaliumoxid	%	0,57	0,59	0,58
Natriumoxid	%	0,08	0,12	0,12
Natriumäquivalent	%	0,46	0,51	0,50
Kohlendioxid, 950°C; IR	%	31,95	32,60	32,88
Wasser, 950°C; IR	%	1,82	1,56	1,58
Glühverlust	%	33,93	34,28	34,58
TOC	%	0,14	0,12	0,12
Methylenblauwert	g/100g	0,77	0,37	0,33
CaCO ₃	%	74,13	74,77	74,53

Tabelle 13 Chemisch-mineralogische Zusammensetzung

	Einheit	CEM I 52,5 R	CEM I 42,5 N	CEM II/A-LL 32,5 R	CEM II/B-LL 32,5 R	CEM (35 LL RK) - W
1	2	3	4	5	6	7
Silizium(IV)-oxid	%	21,3	20,7	17,6	17,1	15,0
Aluminiumoxid	%	4,21	4,15	3,48	3,28	2,90
Titandioxid	%	0,22	0,24	0,17	0,15	0,14
Phosphor(V)-oxid	%	0,12	0,12	0,12	0,03	0,10
Eisen(III)-oxid	%	2,67	2,70	2,32	2,14	1,96
Mangan(III)-oxid	%	0,07	0,07	0,07	0,03	0,06
Magnesiumoxid	%	0,96	0,95	0,77	1,25	0,75
Calciumoxid	%	64,6	64,1	63,2	60,4	61,6
Sulfat als SO3	%	3,69	3,22	2,88	2,24	2,31
Kaliumoxid	%	0,57	0,57	0,46	0,86	0,42
Natriumoxid	%	0,19	0,18	0,15	0,12	0,16
Natriumäquivalent	%	0,57	0,55	0,45	0,69	0,43
Kohlendioxid, 950°C; IR	%	0,42	2,17	7,66	11,8	14,0
Wasser, 950°C; IR	%	0,34	0,46	0,87	0,61	0,41
Glühverlust	%	0,76	2,63	8,53	12,4	14,4
analysierter LL-Gehalt	%	-	-	-	-	32,5

Tabelle 14 Chemisch-mineralogische Zusammensetzung

	Einheit	CEM (50 LL RK) - W	CEM (65 LL RK) - W	CEM (50 LL SE3) - W	CEM (50 LL SE4) - W	CEM (50 LL SE5) - W
1	2	3	4	5	6	7
Silizium(IV)-oxid	%	12,6	8,82	19,76	20,42	20,31
Aluminiumoxid	%	2,59	1,73	3,52	3,56	3,59
Titandioxid	%	0,15	0,09	0,19	0,19	0,19
Phosphor(V)-oxid	%	0,09	0,07	0,13	0,12	0,12
Eisen(III)-oxid	%	1,53	1,15	2,05	2,03	2,05
Mangan(III)-oxid	%	0,07	0,04	0,05	0,05	0,05
Magnesiumoxid	%	0,89	0,61	0,72	0,78	0,79
Calciumoxid	%	59,7	59,2	55,99	53,86	53,71
Sulfat als SO3	%	2,03	1,32	2,20	2,21	2,15
Kaliumoxid	%	0,33	0,24	0,54	0,56	0,57
Natriumoxid	%	0,11	0,09	0,17	0,21	0,20
Natriumäquivalent	%	0,33	0,25	0,52	0,58	0,57
Kohlendioxid, 950°C; IR	%	19,9	24,8	13,65	15,00	15,26
Wasser, 950°C; IR	%	0,33	0,27	0,87	0,91	0,94
Glühverlust	%	20,2	26,5	14,52	15,91	16,20
analysierter LL-Gehalt	%	46,2	60,9	41,8	45,6	46,6

Tabelle 15 Dichte, spezifische Oberfläche, RRSB Parameter

Hauptbestandteil bzw. Zement	Dichte in g/cm ³	RRSB Steigungsmaß n	RRSB Lageparameter d' in µm	Oberfläche nach Blaine in cm ² /g	BET Oberfläche in cm ² /g
1	2	3	4	5	6
sh-Feinkalk	2,70	1,78	2,27	16050	-
Kalkstein RK	2,71	0,80	20,1	4205	8394
Kalkstein DD	2,71	0,91	19,0	4190	48127
Kalkstein SE	2,68	0,70	10,7	7960	55390
Kalkstein SE2	2,68	0,66	23,9	4830	53776
Kalkstein SE3	2,69	0,71	9,91	10440	62113
Kalkstein SE4	2,69	0,75	19,87	4600	-
Kalkstein SE5	2,68	0,64	39,10	2700	-
CEM I 52,5 R	3,16	0,86	9,04	5508	-
CEM I 42,5 N	3,13	0,85	24,4	3032	-
CEM II/A-LL 32,5 R	3,05	0,84	19,1	3654	-
CEM II/B-LL 32,5 R	2,99	0,95	9,74	5145	-
CEM (35 LL RK)-W	2,96	0,96	12,9	-	-
CEM (50 LL RK)-W	2,94	0,78	13,6	-	-
CEM (65 LL RK)-W	2,85	0,92	16,4	-	-
CEM (50 LL SE3)-W	2,94	0,78	9,96	6440	-
CEM (50 LL SE4)-W	2,93	0,77	13,06	4920	-
CEM (50 LL SE5)-W	2,90	0,73	13,75	4530	-

Tabelle 16 Wasseranspruch und Erstarrungsbeginn

Zement	Wasseranspruch in %	Erstarrungsbeginn in min
1	2	3
Referenz CEM I 52,5 R	31,0	115
Referenz CEM I 42,5 N	27,5	165
Referenz CEM II/A-LL 32,5 R	27,0	175
Referenz CEM II/B-LL 32,5 R	32,5	155
50/50 LL RK Laborzement	27,0	115
50/50 LL DD Laborzement	30,5	160
50/50 LL SE Laborzement	31,0	155
50/50 LL SE2 Laborzement	28,0	155
CEM (50 LL RK)-W	29,0	145
CEM (35 LL RK)-W	28,0	135
CEM (35 LL RK)-W	30,5	120
CEM (50 LL SE3)-W	31,5	175
CEM (50 LL SE4)-W	31,5	190
CEM (50 LL SE5)-W	30,5	215

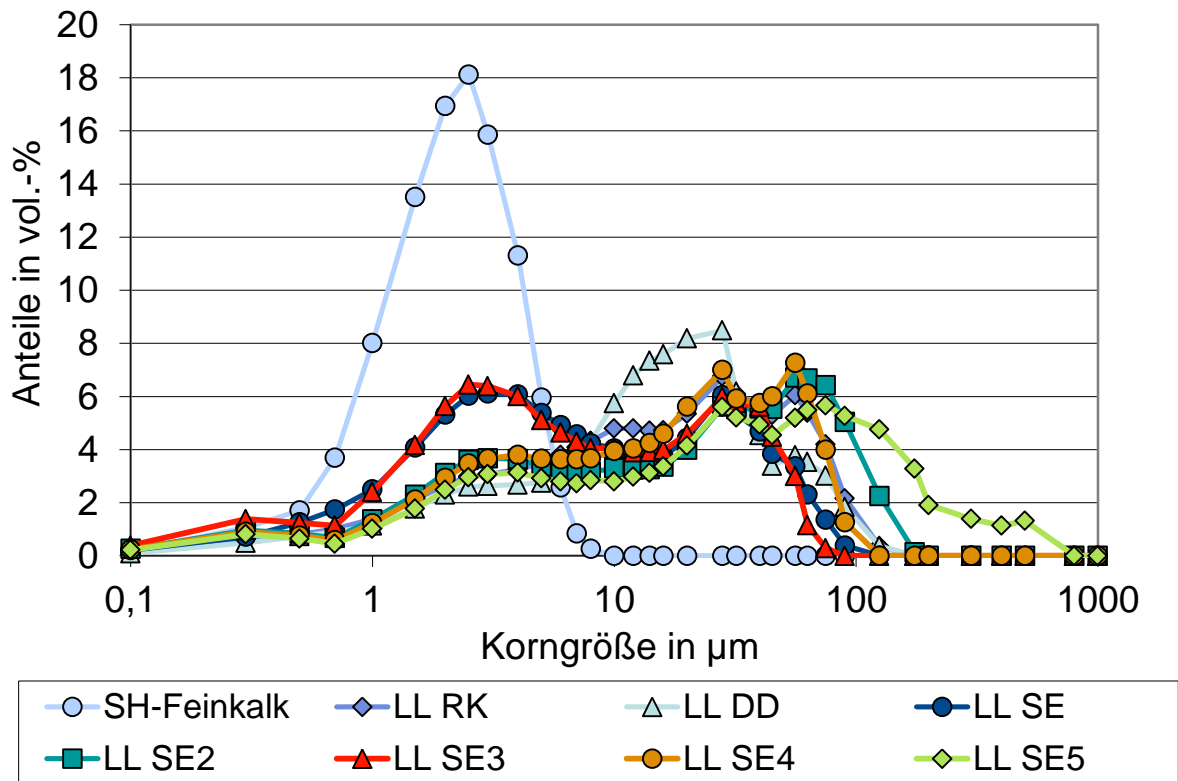


Bild 58 Korngrößenverteilungen der verwendeten Kalksteine

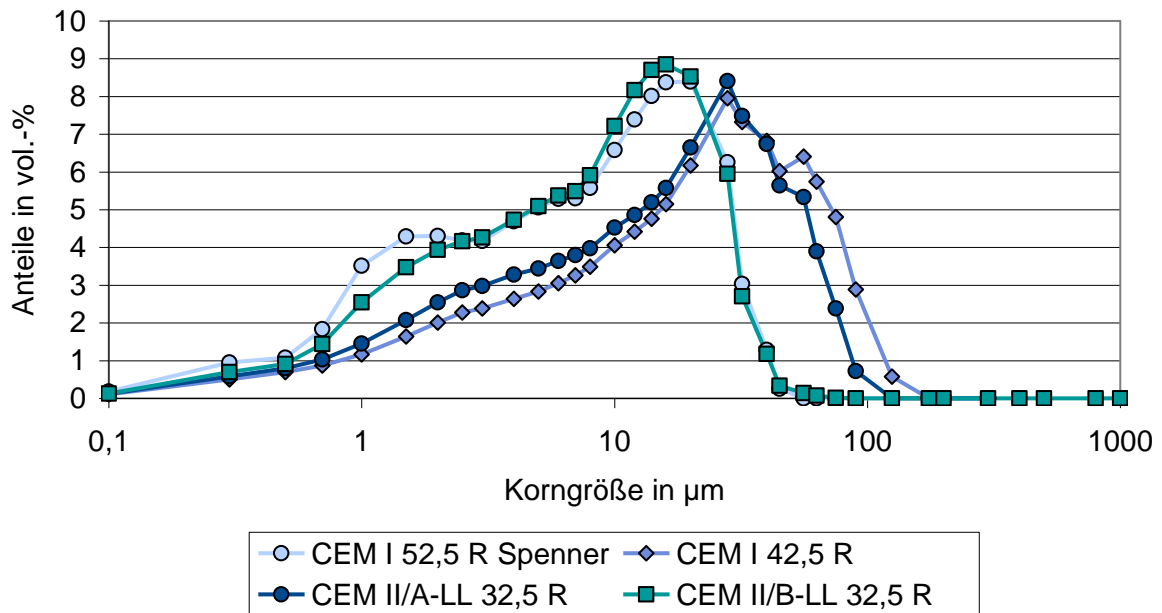


Bild 59 Korngrößenverteilungen der verwendeten Referenzzemente

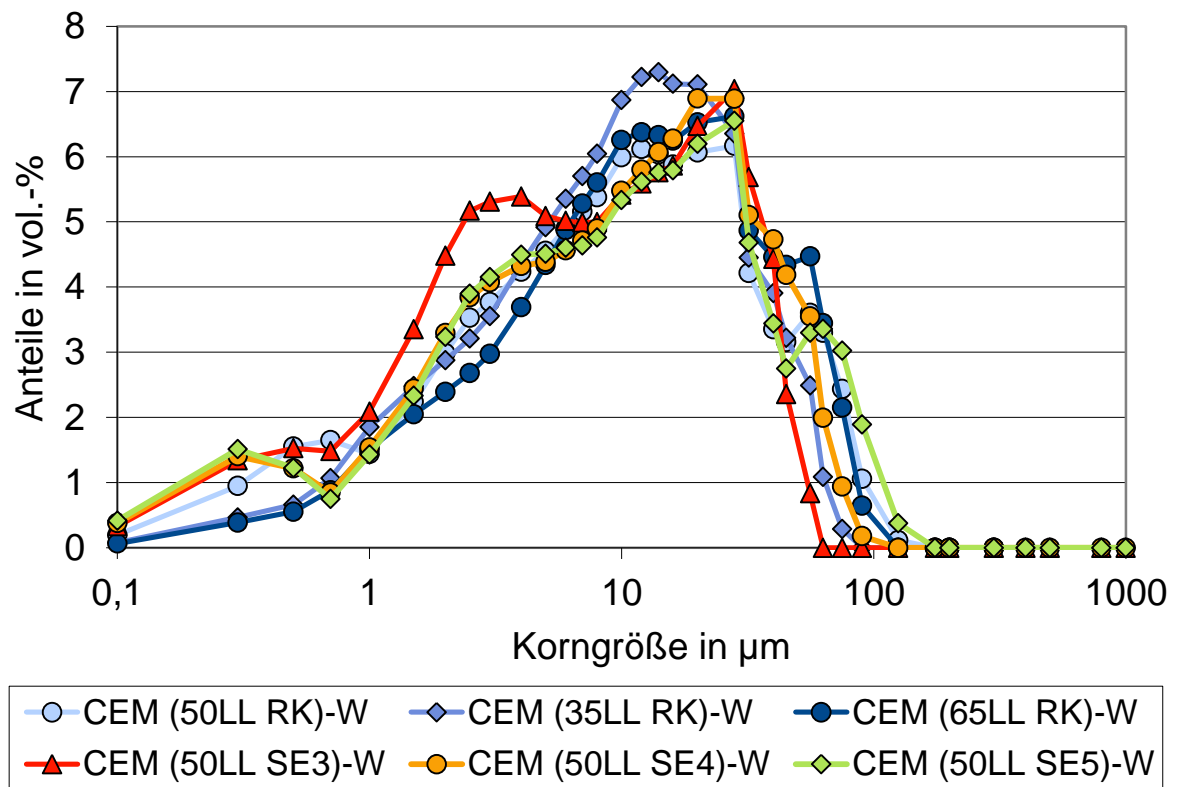


Bild 60 Korngrößenverteilungen der verwendeten Werkszemente

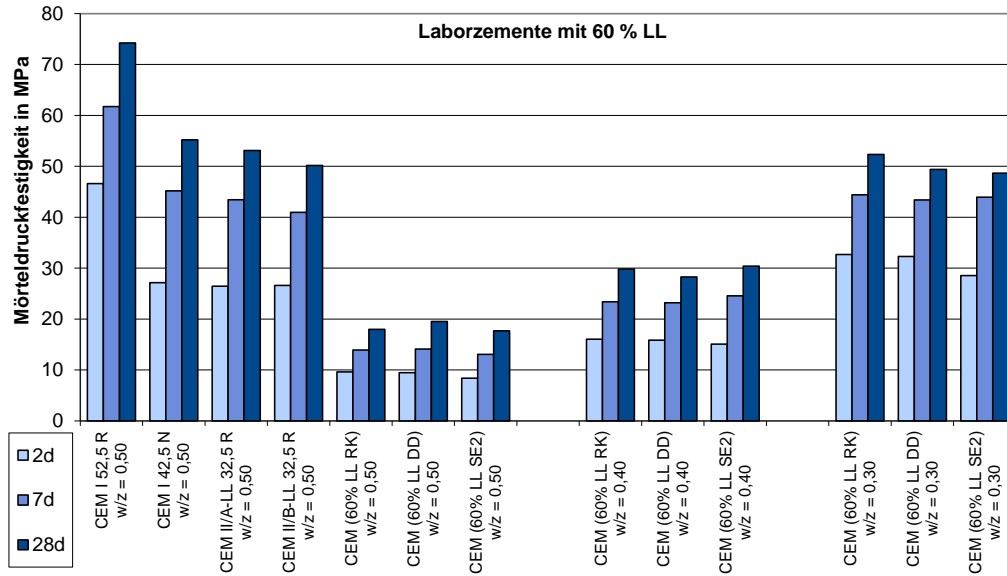


Bild 61 Festigkeitsentwicklung von Mörteln mit Laborzementen mit 60 % LL

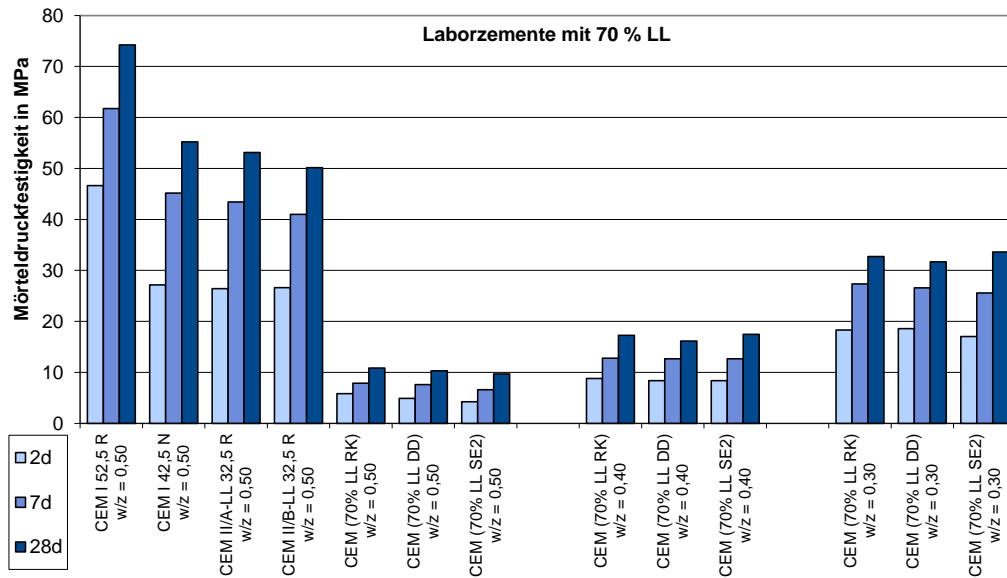


Bild 62 Festigkeitsentwicklung von Mörteln mit Laborzementen mit 70 % LL

Tabelle 17 Frischbetoneigenschaften

Beton	Zement	ρ_f	a_{10}	V_{10}	LP_{10}	T_f
		kg/dm ³	mm	-	Vol.-%	°C
1		2	3	4	5	6
B1	CEM I 42,5 N	2,39	430	-	1,0	20,0
	CEM II/A-LL 32,5 R	2,38	410	-	0,9	22,3
	CEM II/B-LL 32,5 R	2,38	385	1,27	1,1	19,1
	CEM (50 % LL RK) - W	2,36	390	-	1,0	20,5
	CEM (65 % LL RK) - W	2,37	395	-	1,1	21,7
	CEM (35 % LL RK) - W	2,37	390	-	0,9	21,8
	CEM (50 % LL SE3) - W	2,38	370	-	1,1	21,5
	CEM (50 % LL SE5) - W	2,36	345	-	1,0	21,3
B3	CEM I 42,5 N	2,40	395	-	1,3	21,3
	CEM II/A-LL 32,5 R	2,38	380	-	1,5	20,6
	CEM II/B-LL 32,5 R	2,37	-	1,41	1,5	20,7
	CEM (50 % LL RK) - W	2,38	365	-	1,2	21,2
	CEM (65 % LL RK) - W	2,37	380	-	1,2	22,1
	CEM (35 % LL RK) - W	2,39	375	1,03	1,3	21,6
	CEM (50 % LL SE3) - W	2,38	320	-	1,2	21,3
	CEM (50 % LL SE5) - W	2,40	-	1,34	1,0	20,3
B4	CEM (50 % LL RK) - W	2,42	523	-	0,8	13,9
	CEM (65 % LL RK) - W	2,39	510	-	1,2	19,6
	CEM (35 % LL RK) - W	2,40	530	-	1,2	20,2
	CEM (50 % LL SE3) - W	2,40	538	-	1,2	21,5
	CEM (50 % LL SE5) - W	2,30	540	-	4,9	19,1
B5	CEM (50 % LL RK) - W	2,44	500	-	0,9	21,1
	CEM (65 % LL RK) - W	2,42	500	-	1,2	21,2
	CEM (35 % LL RK) - W	2,46	500	-	0,5	22,9
	CEM (50 % LL SE3) - W	2,44	550	-	0,6	22,1
	CEM (50 % LL SE5) - W	2,38	540	-	2,6	20,1

Tabelle 18 Druckfestigkeitsentwicklung der untersuchten Betone

Beton	Zement	Druckfestigkeit, Mittelwerte in MPa		
		7 Tage	28 Tage	91 Tage
1	2	3	4	5
B1	CEM I 42,5 N	26,64	42,62	50,24
	CEM II/A-LL 32,5 R	30,21	42,35	48,41
	CEM II/B-LL 32,5 R	34,75	46,28	49,70
	CEM (35 % LL RK) - W	25,62	37,01	41,96
	CEM (50 % LL RK) - W	17,47	26,68	29,87
	CEM (65 % LL RK) - W	8,92	14,19	16,27
	CEM (50 % LL SE3) - W	21,51		
	CEM (50 % LL SE5) - W	16,74	27,37	
B3	CEM I 42,5 N	46,87	64,68	70,62
	CEM II/A-LL 32,5 R	44,46	61,37	66,99
	CEM II/B-LL 32,5 R	46,19	60,40	62,29
	CEM (35 % LL RK) - W	36,21	50,14	55,11
	CEM (50 % LL RK) - W	25,53	38,04	41,75
	CEM (65 % LL RK) - W	13,12	20,73	24,59
	CEM (50 % LL SE3) - W	32,64		
	CEM (50 % LL SE5) - W	26,62	38,97	
B4	CEM (35 % LL RK) - W	45,20	62,11	63,89
	CEM (50 % LL RK) - W	34,34	48,42	53,47
	CEM (65 % LL RK) - W	17,29	26,50	27,56
	CEM (50 % LL SE3) - W	37,98		
	CEM (50 % LL SE5) - W	24,40	34,98	
B5	CEM (35 % LL RK) - W	34,33	50,04	
	CEM (50 % LL RK) - W	56,71	75,39	79,26
	CEM (65 % LL RK) - W	74,03	94,14	98,87
	CEM (50 % LL SE3) - W	60,20		
	CEM (50 % LL SE5) - W	46,27	61,80	

Tabelle 19 Eindringtiefe und Chloridmigrationskoeffizient D der untersuchten Betone

Beton	Zement	Eindringtiefe in mm	$D_{\text{Migration}}$ in $10^{-12} \cdot \text{m}^2/\text{s}$	Eindringtiefe in mm	$D_{\text{Migration}}$ in $10^{-12} \cdot \text{m}^2/\text{s}$
		35 Tage		98 Tage	
1	2	3	4	5	6
B3	CEM I 42,5 N	13,9	17,10	10,5	12,97
	CEM II/A-LL 32,5 R	18,8	23,87	11,8	14,63
	CEM (35 % LL RK) - W	25,6	33,60	21,0	28,40
	CEM (50 % LL RK) - W	19,9	51,33	31,5	42,10
	CEM (65 % LL RK) - W	27,4	86,57	27,4	80,40
	CEM (50 % LL SE3) - W				
	CEM (50 % LL SE5) - W	23,1	60,23		
B4	CEM (35 % LL RK) - W	21,0	28,37	16,3	20,90
	CEM (50 % LL RK) - W	27,4	35,97	25,4	33,30
	CEM (65 % LL RK) - W	28,0	82,13	23,1	60,33
	CEM (50 % LL SE3) - W				
	CEM (50 % LL SE5) - W	19,4	50,00		
B5	CEM (35 % LL RK) - W	20,9	9,03	15,7	6,63
	CEM (50 % LL RK) - W	15,0	18,87	13,7	17,23
	CEM (65 % LL RK) - W	36,9	50,53	35,4	46,17
	CEM (50 % LL SE3) - W				
	CEM (50 % LL SE5) - W	16,3	29,57		

Tabelle 20 Abwitterungen und rel. dyn. E-Module der untersuchten Betone

Zement	Anzahl FTW	Abwitterung in kg/m ²	rel. dyn. E-Modul in %	Anzahl FTW	Abwitterung in kg/m ²	rel. dyn. E-Modul in %	Anzahl FTW	Abwitterung in kg/m ²	rel. dyn. E-Modul in %
Beton	B3			B4			B5		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
CEM I 42,5 N	2	0,01	99,67	-	-	-	-	-	-
	8	0,02	98,46	-	-	-	-	-	-
	14	0,03	97,06	-	-	-	-	-	-
	28	0,05	90,61	-	-	-	-	-	-
	42	0,08	88,08	-	-	-	-	-	-
CEM II/A-LL 32,5 R	4	0,04	99,32	-	-	-	-	-	-
	6	0,05	98,92	-	-	-	-	-	-
	14	0,09	93,82	-	-	-	-	-	-
	28	0,17	75,13	-	-	-	-	-	-
	44	0,28	60,48	-	-	-	-	-	-
CEM II/B-LL 32,5 R	55	0,37	60,19	-	-	-	-	-	-
	4	0,07	103,72	-	-	-	-	-	-
	6	0,08	103,99	-	-	-	-	-	-
	14	0,11	102,12	-	-	-	-	-	-
	28	0,14	96,49	-	-	-	-	-	-
CEM (35 % LL RK) - W	42	0,19	83,61	-	-	-	-	-	-
	56	0,31	75,04	-	-	-	-	-	-
	4	0,04	99,58	4	0,01	99,71	3	0,00	98,65
	10	0,09	99,74	8	0,02	99,08	7	0,01	97,75
	14	0,12	98,23	20	0,04	95,59	13	0,01	92,45
CEM (50 % LL RK) - W	28	0,21	79,48	32	0,07	78,70	27	0,02	76,32
	42	0,35	56,07	42	0,09	66,33	41	0,03	73,09
	56	0,55	43,08	56	0,13	54,64	55	0,04	70,77
	4	0,05	100,46	4	0,01	100,25	4	0,01	100,00
	8	0,12	100,46	6	0,01	100,31	8	0,01	97,99
CEM (65% LL RK) - W	14	0,19	99,54	14	0,02	100,33	14	0,01	96,51
	28	0,42	99,21	28	0,06	91,35	28	0,03	78,32
	42	0,81	39,91	42	0,14	65,17	42	0,05	60,97
	56	1,31	36,41	56	0,25	41,66	58	0,07	48,37
	2	0,01	92,83	4	0,04	95,60	4	0,01	99,55
CEM (50 % LL SE3) - W	8	0,05	36,97	6	0,07	82,48	6	0,02	99,90
	14	0,16	39,49	14	0,15	35,96	14	0,03	98,80
	28	0,67	35,15	28	0,81	33,87	28	0,06	59,64
	40	1,89	0,00	42	2,97	32,24	42	0,18	34,34
	56	nicht messbar, Probekörper zerstört						56	0,47
CEM (50 % LL SE5) - W									
CEM (50 % LL SE5) - W	4	0,10	100,73	4	0,00	100,11	4	0,00	99,42
	6	0,19	100,87	6	0,00	99,96	10	0,01	99,45
	14	0,36	98,41	14	0,01	100,14	14	0,01	99,15
	28	0,77	72,68	28	0,04	100,07	28	0,03	98,00
	42	1,24	37,79	42	0,06	100,86	42	0,04	98,01
	56			56	0,09	102,03	56	0,05	97,33

Tabelle 21 Karbonatisierungstiefen untersuchten Betone

Beton: Zement	Karbonatisierungstiefe in mm, Mittelwert					
	14 Tage	28 Tage	56 Tage	91 Tage	182 Tage	364 Tage
1	2	3	4	5	6	7
B1: CEM I 42,5 N	0,50	0,79	1,63	1,87	3,97	4,43
B1: CEM II/A-LL 32,5 R	0,00	0,46	1,33	3,00	4,13	4,50
B1: CEM II/B-LL 32,5 R	0,37	0,50	1,67	1,87	3,50	5,17
B1: CEM (35 % LL RK) - W	0,00	0,43	2,57	3,00	5,23	7,07
B1: CEM (50 % LL RK) - W	0,77	1,17	2,67	4,77	7,47	10,00
B1: CEM (65 % LL RK) - W	1,50	4,10	6,00	7,90	11,77	17,57
B1: CEM (50 % LL SE3) - W	0,03					
B1: CEM (50 % LL SE5) - W	0,00	0,43	2,93			
B4: CEM (35 % LL RK) - W	0,00	0,53	1,23	0,77	1,43	
B4: CEM (50 % LL RK) - W	0,00	1,03	1,83	1,80	2,93	
B4: CEM (65 % LL RK) - W	0,33	1,83	4,10	5,70	7,00	
B4: CEM (50 % LL SE3) - W	0,60					
B4: CEM (50 % LL SE5) - W	0,33	0,53	1,33			
B5: CEM (35 % LL RK) - W	0,00	0,00	0,13	0,00	0,00	
B5: CEM (50 % LL RK) - W	0,00	0,30	0,30	0,67	2,27	2,50
B5: CEM (65 % LL RK) - W	0,33	1,07	2,37	3,97	5,50	6,80
B5: CEM (50 % LL SE3) - W	0,00					
B5: CEM (50 % LL SE5) - W	0,10	0,43	0,90			

Tabelle 22 Karbonatisierungstiefen untersuchten Feinbetone nach 140 Tagen

Beton: Zement	w/z - Wert	LP-Gehalt in %	Karbonatisierungstiefe in mm, Mittelwert	
			7d Vorlagerung	28d Vorlagerung
1	2	3	4	5
FB: CEM I 42,5 N	0,50	-	0,53	0,00
FB: CEM II/A-LL 32,5 R	0,50	-	0,57	0,23
FB: CEM (35 % LL RK) - W	0,50	-		
FB: CEM (50 % LL RK) - W	0,50	0,9	5,27	3,03
FB: CEM (65 % LL RK) - W	0,50	-	7,53	4,20
FB: CEM (50 % LL SE3) - W	0,50			
FB: CEM (50 % LL SE5) - W	0,50	1,6		
FB: CEM (35 % LL RK) - W	0,45	-		
FB: CEM (50 % LL RK) - W	0,45	1,3		
FB: CEM (65 % LL RK) - W	0,45	-		
FB: CEM (50 % LL SE3) - W	0,45			
FB: CEM (50 % LL SE5) - W	0,45	6,2		
FB: CEM (35 % LL RK) - W	0,35	-		
FB: CEM (50 % LL RK) - W	0,35	2,6	2,27	0,70
FB: CEM (65 % LL RK) - W	0,35	-		
FB: CEM (50 % LL SE3) - W	0,35			
FB: CEM (50 % LL SE5) - W	0,35	6,4		

Tabelle 23 Zusammensetzung der Mörtelmischungen

w/z-Wert	Mischung	Zusammensetzung [g/l]					
		Basiszement	Kalkstein	Wasser	w/k-Wert	w/z-Wert	Fließmittel Typ
1	2	3	4	5	6	7	8
0,50	Referenz CEM I 52,5R	450	0	225,0	0,50	0,50	-
	Referenz CEM I 42,5R	450	0	225,0	0,50	0,50	-
	Referenz CEM II/A-LL 32,5R	450	0	225,0	0,60	0,50	-
	Referenz CEM II/B-LL 32,5R	450	0	225,0	0,71	0,50	-
	B050-CEM (30 LL RK)	315	135	225,0	0,71	0,50	-
	B050-CEM (50 LL RK)	225	225	225,0	1,00	0,50	-
	B050-CEM (50 LL SE2)	225	225	225,0	1,00	0,50	-
	B050-CEM (60 LL RK)	180	270	225,0	1,25	0,50	-
	B050-CEM (70 LL RK)	135	315	225,0	1,67	0,50	-
	B050-CEM (70 LL SE2)	135	315	225,0	1,67	0,50	-
B050-CEM (75 LL RK)	113	338	225,0	2,00	0,50	-	
0,35	B035-CEM I 52,5R	530	0	185,5	0,35	0,35	2
	B035-CEM II/A-LL 32,5R	440	90	185,5	0,42	0,35	2
	B035-CEM I 52,5R	530	0	185,5	0,35	0,35	3
	B035-CEM II/B-LL 32,5R	371	159	185,5	0,50	0,35	2
	B035-CEM (30 LL RK)	371	159	185,5	0,50	0,35	2
	B035-CEM (30 LL SE2)	371	159	185,5	0,50	0,35	2
	B035-CEM (50 LL SE2)	265	265	185,5	0,70	0,35	2
	B035-CEM (50 LL RK)	265	265	185,5	0,70	0,35	3
	B035-CEM (50 LL SE2)	265	265	185,5	0,70	0,35	2
	B035-CEM (60 LL RK)	212	318	185,5	0,88	0,35	2
	B035-CEM (70 LL RK)	159	371	185,5	1,17	0,35	2
	B035-CEM (63 LL RK-Sh 07)	159	334-37	185,5	1,17	0,35	2
	B035-CEM (56 LL RK-Sh 14)	159	297-74	185,5	1,17	0,35	2
	B035-CEM (49 LL RK-Sh 21)	159	260-111	185,5	1,17	0,35	2
	B035-CEM (70 LL RK)	159	371	185,5	1,17	0,35	3
	B035-CEM (70 LL SE2)	159	371	185,5	1,17	0,35	2
B035-CEM (75 LL RK)	133	398	185,5	1,40	0,35	2	
0,30	B030-CEM I 52,5R	560	-	168,0	0,30	0,30	2
	B030-CEM II/A-LL 32,5R	560	-	168,0	0,36	0,30	2
	B030-CEM II 32,5/B-LL	560	-	168,0	0,43	0,30	2
	B030-CEM I 52,5R	560	0	168,0	0,30	0,30	3
	B030-CEM (30 LL RK)	392	168	168,0	0,43	0,30	2
	B030-CEM (30 LL SE2)	392	168	168,0	0,43	0,30	2
	B030-CEM (50 LL RK)	280	280	168,0	0,60	0,30	2
	B030-CEM (50 LL RK)	280	280	168,0	0,60	0,30	3
	B030-CEM (30 LL SE2)	280	280	168,0	0,60	0,30	2
	B030-CEM (60 LL RK)	224	336	168,0	0,75	0,30	2
	B030-CEM (70 LL RK)	168	392	168,0	1,00	0,30	2
	B030-CEM (70 LL RK)	168	392	168,0	1,00	0,30	3
	B030-CEM (70 LL SE2)	168	392	168,0	1,00	0,30	2
	B030-CEM (63 LL RK- Sh 07)	168	352-40	168,0	1,00	0,30	2
	B030-CEM (56 LL RK- Sh 14)	168	314-79	168,0	1,00	0,30	2
	B030-CEM (49 LL RK- Sh 21)	168	275-117	168,0	1,00	0,30	2
B030-CEM (75 LL RK)	140	420	168,0	1,20	0,30	2	

Tabelle 24 Zusammensetzung der Betone

w/z-Wert	Bezeichnung	Zusammensetzung [kg/m ³]						
		Basisze- ment	Kalkstein	Wasser	w/k-Wert	w/z-Wert	Leimge- halt [l]	Fließmittel Typ
1	2	3	3	4	5	6	7	8
0,60	B060-CEM I 52,5 R	280	0	170	0,61	0,61	259	-
	B060-CEM I 42,5 N	280	0	170	0,61	0,61	259	-
	B060-CEM II/A-LL 32,5R	280	0	170	0,73	0,61	259	-
	B060-CEM II/B-LL 32,5R	280	0	170	0,87	0,61	259	-
	B060-CEM (30 LL RK)	195	85	165	0,85	0,59	259	-
0,50	B050-CEM (50 LL RK)	155	155	153	0,99	0,49	261	2
	B050-CEM (70 LL RK)	90	210	151	1,68	0,50	259	2
0,35	B035-CEM I 52,5R	385	0	134	0,35	0,35	256	2
	B035-CEM II 32,5R/B-LL	385	0	135	0,50	0,35	257	3
	B035-CEM (30 LL RK)	270	115	135	0,50	0,35	264	2
	B035-CEM (50 LL RK)	190	190	135	0,71	0,36	267	2
	B035-CEM (60 LL RK)	150	225	135	0,90	0,36	268	2
	B035-CEM (70 LL RK)	115	270	135	1,17	0,35	273	2
	B035-CEM (75 LL RK)	95	290	135	1,42	0,35	275	2
	B035-CEM (50 LL RK)	190	190	135	0,71	0,36	267	3
	B035-CEM (70 LL RK)	115	270	135	1,17	0,35	273	3
	B035-CEM (30 LL SE2)	270	115	135	0,50	0,35	264	3
	B035-CEM (50 LL SE2)	190	190	135	0,71	0,36	267	3
	B035-CEM (50 LL SE2)	190	190	135	0,71	0,36	267	2
	B035-CEM (70 LL SE2)	115	270	135	1,17	0,35	273	3
	B035-50-CEM (50 LL SE2)	190	190	135	0,71	0,36	267	2
	B035-50-CEM (50 LL SE2)	190	190	135	0,71	0,36	267	6
	B035-50-CEM (50 LL SE2)	190	190	135	0,71	0,36	267	5
	B035-50-CEM (50 LL SE2)	190	190	135	0,71	0,36	267	4
	B035-CEM (45 LL RK-Sh 05)	190	190	135	0,71	0,36	267	3
	B035-CEM (50 LL RK)-B16 ¹⁾	190	190	135	0,71	0,36	267	3
	B035-CEM (50 LL RK)-A16 ¹⁾	190	190	135	0,71	0,36	267	3
	B035-CEM (50 LL RK)-AB16 ¹⁾	190	190	135	0,71	0,36	267	3
	B035-CEM (50 LL RK)-U16 ¹⁾	190	190	135	0,71	0,36	267	3
	B035-CEM (50 LL RK)-U16 ¹⁾ (mehr Sand)	190	190	135	0,71	0,36	267	3
	B035-CEM (50 LL RK)- 8mm ²⁾	190	190	135	0,71	0,36	267	3
	B035-CEM (50 LL RK)-32mm ²⁾	190	190	135	0,71	0,36	267	3
	B035-CEM (50 LL RK)-240 ³⁾	170	170	126	0,74	0,37	244	3
B035-CEM (50 LL RK)-300 ³⁾	215	215	155	0,72	0,36	304	3	
B035-CEM (50 LL RK)-330 ³⁾	238	238	170	0,71	0,36	335	3	
B035-CEM (50 LL RK)-360 ³⁾	260	260	185	0,71	0,36	366	3	
0,30	B030-CEM (50 LL RK)	125	285	123	0,98	0,30	270	3
	B030-CEM (45 LL RK-Sh 05)	125	255/30	123	0,98	0,30	270	3
	B030-CEM (40 LL RK-Sh 10)	125	230/55	123	0,98	0,30	270	3
	B030-CEM (35 LL RK-Sh 15)	125	200/85	123	0,98	0,30	270	3
	B030-CEM (70 LL RK)	210	210	123	0,59	0,29	269	3
	B030-CEM (63 LL RK-Sh 07)	210	190/20	123	0,59	0,30	270	3
	B030-CEM (56 LL RK-Sh 14)	210	170/40	123	0,59	0,30	270	3
	B030-CEM (49 LL RK-Sh 21)	210	145/65	123	0,59	0,30	270	3
	B030-CEM (70 LL SE2)	115	270	135	1,17	0,35	273	2
0,25	B025-CEM (60 LL RK-Sh 10)	130	310	110	0,85	0,25	268	3

¹⁾ Sieblinie ²⁾ Größtkorn ³⁾ Leimvolumen [l/m³]

Tabelle 25 Übersicht der Ergebnisse der Mörtelversuche

w/z-Wert	Mischung	Fließmit-teltyp	Fließmittel [g/l]	Ausbreitmaß [mm]			Biegezug-festigkeit [N/mm ²]		Druckfestig-keit [N/mm ²]		Karbonati-sierungstie-fe [mm]
				5'	30'	60'	1d	28d	1d	28d	
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
0,50	Referenz CEM I 52,5R	-	0	145	133	130	5,5	7,7	30,0	66,8	0,43
	Referenz CEM I 42,5R	-	0	135	120	115	3,5	7,5	14,4	47,9	0,68
	Referenz CEM II/A-LL 32,5R	-	0	150	138	130	4,0	7,7	17,3	47,1	0,53
	Referenz CEM II/B-LL 32,5R	-	0	160	150	147	4,3	7,6	16,7	46,9	2,15
	B050-CEM (30 LL RK)	-	0	150	133	125	4,3	7,2	20,3	46,8	2,27
	B050-CEM (50 LL RK)	-	0	163	150	138	2,4	5,5	9,2	26,9	4,53
	B050-CEM (50 LL SE2)	-	0	140	130	123	0,0	5,4	7,5	29,3	0,00
	B050-CEM (60 LL RK)	-	0	145	155	153	0,0	4,1	6,0	17,3	6,55
	B050-CEM (70 LL RK)	-	0	165	160	155	0,0	2,7	2,9	9,4	14,39
	B050-CEM (70 LL SE2)	-	0	133	128	125	0,0	2,8	2,3	9,6	0,00
B050-CEM (75 LL RK)	-	0	175	155	150	0,0	1,2	2,1	6,4	>40	
0,35	B035-CEM I 52,5R	2	2,4	165	160	158	8,5	13,1	56,4	98,3	0,19
	B035-CEM II/A-LL 32,5R	2	2,5	140	135	123	6,3	8,8	30,7	72,4	0,83
	B035-CEM I 52,5R	3	2,5	130	115	110	6,7	12,4	56,6	96,1	0,10
	B035-CEM II/B-LL 32,5R	2	2,5	174	153	129	6,3	9,0	35,5	72,8	0,12
	B035-CEM (30 LL RK)	2	1,5	140	138	130	7,2	9,7	37,2	77,4	0,47
	B035-CEM (30 LL SE2)	2	3,0	153	135	125	7,4	6,1	50,3	89,1	0,55
	B035-CEM (50 LL SE2)	2	2,0	220	215	210	5,2	6,7	22,8	51,5	1,45
	B035-CEM (50 LL RK)	3	1,5	145	137	125	4,5	6,4	20,4	53,3	3,52
	B035-CEM (50 LL SE2)	2	4,0	190	143	138	6,1	6,1	31,0	59,6	2,35
	B035-CEM (60 LL RK)	2	1,5	210	203	195	3,7	5,9	16,0	36,9	3,81
	B035-CEM (70 LL RK)	2	1,0	185	165	140	0,0	4,8	7,7	23,3	-
	B035-CEM (63 LL RK-Sh 07)	2	1,0	165	160	135	2,7	6,0	10,2	25,8	-
	B035-CEM (56 LL RK-Sh 14)	2	1,0	165	155	125	2,7	5,7	11,1	27,3	4,57
	B035-CEM (49 LL RK-Sh 21)	2	1,0	180	150	125	2,9	6,2	11,1	28,2	4,87
	B035-CEM (70 LL RK)	3	2,0	220	215	210	2,1	5,1	7,8	25,5	7,20
B035-CEM (70 LL SE2)	2	5,0	150	120	115	3,3	5,4	11,2	24,7	7,62	
B035-CEM (75 LL RK)	2	1,0	145	135	130	0,0	4,0	6,1	16,2	-	
0,30	B030-CEM I 52,5R	2	3,0	115	110	108	8,4	16,1	76,7	105,2	0,11
	B030-CEM II/A-LL 32,5R	2	3,5	140	130	110	7,2	8,7	36,8	83,4	0,23
	B030-CEM II 32,5/B-LL	2	6,5	233	253	265	7,6	11,9	46,3	94,3	0,12
	B030-CEM I 52,5R	3	8,0	130	120	115	7,2	16,0	68,7	111,2	0,10
	B030-CEM (30 LL RK)	2	3,0	150	148	143	7,7	8,1	50,3	91,3	-
	B030-CEM (30 LL SE2)	2	6,0	235	200	170	9,1	12,2	52,8	102,2	0,19
	B030-CEM (50 LL RK)	2	3,0	150	148	140	7,8	7,7	46,9	67,5	1,52
	B030-CEM (50 LL RK)	3	3,5	155	145	135	5,9	8,8	27,9	66,9	1,36
	B030-CEM (30 LL SE2)	2	6,0	185	145	120	6,6	9,0	29,6	68,0	1,16
	B030-CEM (60 LL RK)	2	2,5	205	200	193	4,9	6,3	22,4	48,5	-
	B030-CEM (70 LL RK)	2	2,0	205	195	180	3,0	6,5	12,3	32,9	-
	B030-CEM (70 LL RK)	3	3,0	200	190	185	3,1	6,1	12,1	34,2	4,60
	B030-CEM (70 LL SE2)	2	8,0	215	185	165	3,2	5,9	10,2	29,8	4,35
	B030-CEM (63 LL RK- Sh 07)	2	2,0	205	200	185	4,0	7,1	15,7	36,7	4,91
	B030-CEM (56 LL RK- Sh 14)	2	1,5	145	135	120	3,9	7,3	17,4	38,6	3,99
	B030-CEM (49 LL RK- Sh 21)	2	1,8	180	175	150	4,4	7,3	17,7	38,4	-
B030-CEM (75 LL RK)	2	1,5	155	140	115	2,4	4,9	9,0	23,5	7,36	

Tabelle 26 Übersicht der Ergebnisse der Betonversuche (Frischbetoneigenschaften)

w/z-Wert	Bezeichnung	Fließmitteltyp	Fließmittel [kg/m ³]	Ausbreitmaß [mm]			Rheologie (BT2)	
				10 min	30 min	60 min	bezogene Fließgrenze [Nmm]	bezogene plat. Viskosität [Nmm/(m/s)]
1	2	3	4	5	6	7	8	9
0,60	B060-CEM I 52,5 R	-	0,0	445	450	405	6505	9846
	B060-CEM I 42,5 N	-	0,0	490	480	485	5730	40765
	B060-CEM II/A-LL 32,5R	-	0,0	485	445	430	5264	6712
	B060-CEM II/B-LL 32,5R	-	0,0	465	-	400	-	-
	B060-CEM (30 LL RK)	-	0,0	535	420	415	4356	16053
0,50	B050-CEM (50 LL RK)	2	0,6	575	570	560	1768	29296
	B050-CEM (70 LL RK)	2	0,4	590	520	420	2147	23558
0,35	B035-CEM I 52,5R	2	3,2	600	590	580	1191	59006
	B035-CEM II 32,5R/B-LL	3	5,0	525	550	432,5	1416	43426
	B035-CEM (30 LL RK)	2	1,7	585	515	490	1564	66358
	B035-CEM (50 LL RK)	2	1,7	630	590	565	1215	91026
	B035-CEM (60 LL RK)	2	1,0	550	540	455	1222	71317
	B035-CEM (70 LL RK)	2	1,0	605	560	395	1779	40801
	B035-CEM (75 LL RK)	2	0,9	550	435	275	1195	74874
	B035-CEM (50 LL RK)	3	2,6	620	590	595	1180	61609
	B035-CEM (70 LL RK)	3	1,5	550	490	505	1161	60698
	B035-CEM (30 LL SE2)	3	5,6	510	493	430	2006	19604
	B035-CEM (50 LL SE2)	3	6,0	505	455	450	2275	25973
	B035-CEM (50 LL SE2)	2	3,8	600	585	565	1954	80083
	B035-CEM (70 LL SE2)	3	7,1	460	380	400	2671	19779
	B035-50-CEM (50 LL SE2)	2	5,0	538	505	515	2065	44658
	B035-50-CEM (50 LL SE2)	6	3,3	575	458	385	2153	40936
	B035-50-CEM (50 LL SE2)	5	13,6	470	-	455	1742	53805
	B035-50-CEM (50 LL SE2)	4	10,8	455	-	455	1715	47048
	B035-CEM (45 LL RK-Sh 05)	3	2,1	540	530	525	1593	36043
0,35	B035-CEM (50 LL RK)-B16 ¹⁾	3	3,2	605	-	-	883	60066
	B035-CEM (50 LL RK)-A16 ¹⁾	3	2,3	530	-	-	1870	69227
	B035-CEM (50 LL RK)-AB16 ¹⁾	3	4,3	595	-	-	492	68562
	B035-CEM (50 LL RK)-U16 ¹⁾	3	2,3	585	-	-	3167	67279
	B035-CEM (50 LL RK)-U16 ¹⁾ (mehr Sand)	3	2,2	555	-	-	1371	33349
	B035-CEM (50 LL RK)-8mm ²⁾	3	4,1	620	-	-	2805	67728
	B035-CEM (50 LL RK)-32mm ²⁾	3	1,5	500	-	-	3769	73214
	B035-CEM (50 LL RK)-240 ³⁾	3	3,2	575	-	-	2613	84930
	B035-CEM (50 LL RK)-300 ³⁾	3	2,4	560	-	-	684	23787
	B035-CEM (50 LL RK)-330 ³⁾	3	2,5	615	-	-	312	13595
B035-CEM (50 LL RK)-360 ³⁾	3	2,9	670	640	600	37	2684	
0,30	B030-CEM (50 LL RK)	3	3,4	580	615	580	797	67560
	B030-CEM (45 LL RK-Sh 05)	3	3,3	595	610	570	1045	50071
	B030-CEM (40 LL RK-Sh 10)	3	3,3	495	495	500	1314	44795
	B030-CEM (35 LL RK-Sh 15)	3	3,5	570	540	565	782	38863
	B030-CEM (70 LL RK)	3	3,2	620	570	555	333	120164
	B030-CEM (63 LL RK-Sh 07)	3	2,5	550	500	510	1045	56891
	B030-CEM (56 LL RK-Sh 14)	3	2,9	595	590	545	1366	42998
	B030-CEM (49 LL RK-Sh 21)	3	2,6	530	500	500	1579	45898
	B030-CEM (70 LL SE2)	2	7,3	635	560	530	1005	88117
0,25	B025-CEM (60 LL RK-Sh 10)	3	6,4	700	525	550	498	133238

1) Sieblinie 2) Größtkorn 3) Leimvolumen [l/m³]

Tabelle 27 Übersicht der Ergebnisse der Betonversuche (Festbetoneigenschaften)

w/z-Wert	Bezeichnung	Fließmitteltyp	Druckfestigkeit [N/mm ²]		Klinkerbedarf [kg/(N/mm ²)]	Karbonatisierungstiefe 140 d [mm]
			1d	28d		
1	2	3	4	5	6	7
0,60	B060-CEM I 52,5 R	-	21,20	51,50	5,50	1,3
	B060-CEM I 42,5 N	-	7,90	34,00	8,25	2,7
	B060-CEM II/A-LL 32,5R	-	7,00	38,50	7,36	3,7
	B060-CEM II/B-LL 32,5R	-	9,10	34,40	8,14	3,9
	B060-CEM (30 LL RK)	-	9,30	34,70	5,58	3,6
0,50	B050-CEM (50 LL RK)	2	10,00	33,30	4,60	4,6
	B050-CEM (70 LL RK)	2	3,60	12,50	7,20	9,9
0,35	B035-CEM I 52,5R	2	63,80	106,70	3,60	0,1
	B035-CEM II 32,5R/B-LL	3	34,80	76,20	5,06	0,7
	B035-CEM (30 LL RK)	2	37,40	86,80	3,11	0,2
	B035-CEM (50 LL RK)	2	22,00	57,50	3,30	1,6
	B035-CEM (60 LL RK)	2	14,80	44,70	3,38	3,1
	B035-CEM (70 LL RK)	2	8,10	29,30	3,96	5,8
	B035-CEM (75 LL RK)	2	7,10	21,60	4,44	8,1
	B035-CEM (50 LL RK)	3	18,60	63,00	3,02	2,3
	B035-CEM (70 LL RK)	3	8,40	30,60	3,79	6,9
	B035-CEM (30 LL SE2)	3	33,30	88,50	3,05	-
	B035-CEM (50 LL SE2)	3	19,00	58,60	3,24	1,3
	B035-CEM (50 LL SE2)	2	23,90	56,40	3,37	2,7
	B035-CEM (70 LL SE2)	3	6,50	30,00	3,87	3,2
	B035-50-CEM (50 LL SE2)	2	19,50	55,30	3,45	2,0
	B035-50-CEM (50 LL SE2)	6	19,20	49,70	3,84	2,3
	B035-50-CEM (50 LL SE2)	5	14,84	57,06	3,35	-
	B035-50-CEM (50 LL SE2)	4	17,28	63,96	2,99	-
	B035-CEM (45 LL RK-Sh 05)	3	22,20	62,00	3,06	1,5
0,35	B035-CEM (50 LL RK)-B161)	3	-	62,42	3,04	-
	B035-CEM (50 LL RK)-A161)	3	-	62,13	3,06	-
	B035-CEM (50 LL RK)-AB161)	3	-	64,34	2,95	-
	B035-CEM (50 LL RK)-U161)	3	-	61,08	3,11	-
	B035-CEM (50 LL RK)-U161) (mehr Sand)	3	-	54,28	3,50	-
	B035-CEM (50 LL RK)- 8mm ²)	3	-	62,31	3,05	-
	B035-CEM (50 LL RK)-32mm ²)	3	-	54,28	3,50	-
	B035-CEM (50 LL RK)-2403)	3	-	66,40	2,64	-
	B035-CEM (50 LL RK)-3003)	3	-	60,25	3,57	-
	B035-CEM (50 LL RK)-3303)	3	-	56,20	4,27	-
	B035-CEM (50 LL RK)-3603)	3	20,54	52,20	0,00	-
0,30	B030-CEM (50 LL RK)	3	27,70	73,50	2,83	0,50
	B030-CEM (45 LL RK-Sh 05)	3	28,20	73,10	2,85	0,70
	B030-CEM (40 LL RK-Sh 10)	3	28,20	72,70	2,86	1,30
	B030-CEM (35 LL RK-Sh 15)	3	32,70	77,60	2,68	1,20
	B030-CEM (70 LL RK)	3	12,60	41,90	2,94	-
	B030-CEM (63 LL RK-Sh 07)	3	14,40	43,80	2,81	4,00
	B030-CEM (56 LL RK-Sh 14)	3	13,80	45,10	2,73	5,00
	B030-CEM (49 LL RK-Sh 21)	3	17,90	48,30	2,55	4,60
	B030-CEM (70 LL SE2)	2	11,90	39,90	3,08	4,9
0,25	B025-CEM (60 LL RK-Sh 10)	3	22,50	61,20	2,16	3,40

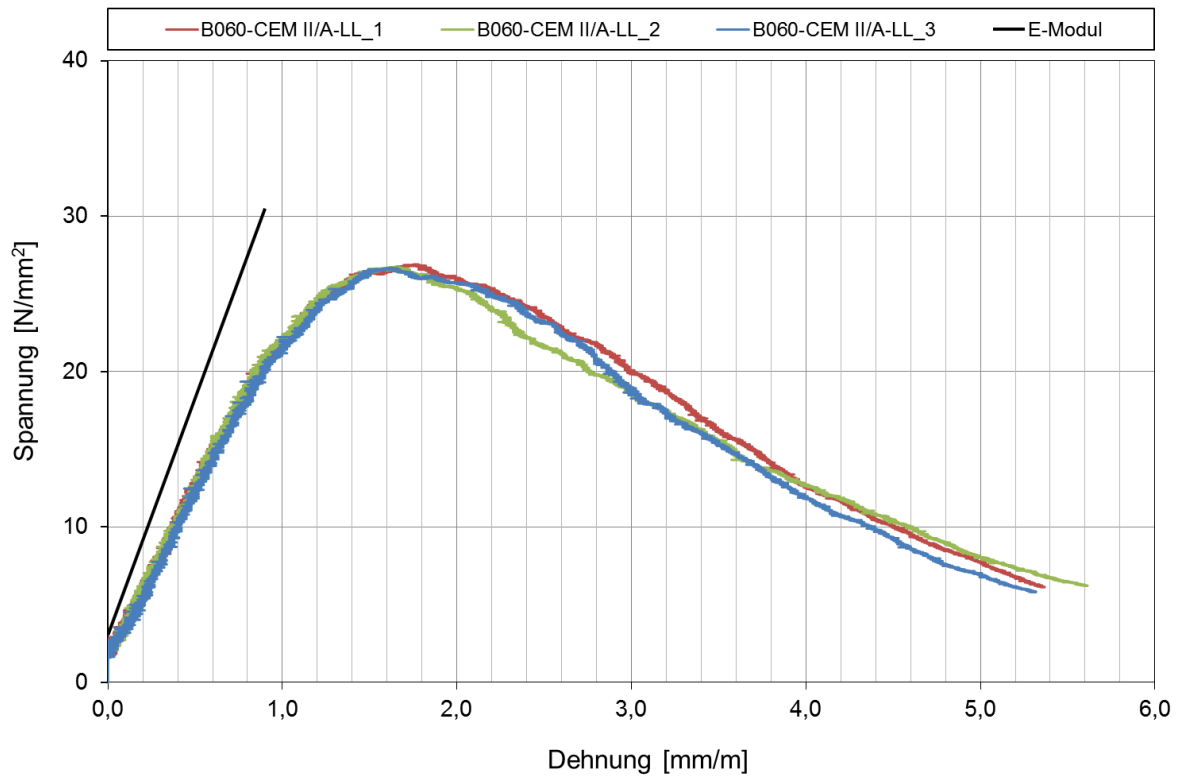


Bild 63 Spannung-Dehnung-Beziehung des Referenzbetons B060-CEM II/A-LL

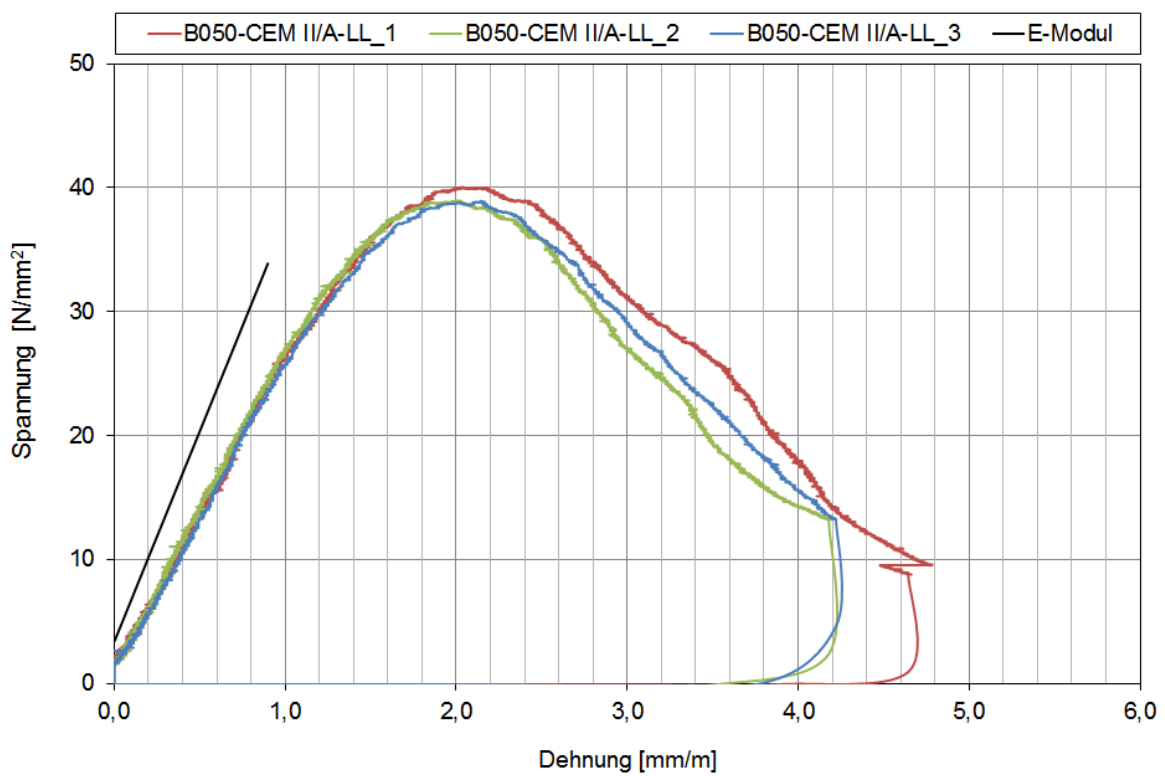


Bild 64 Spannung-Dehnung-Beziehung des Referenzbetons B050-CEM II/A-LL

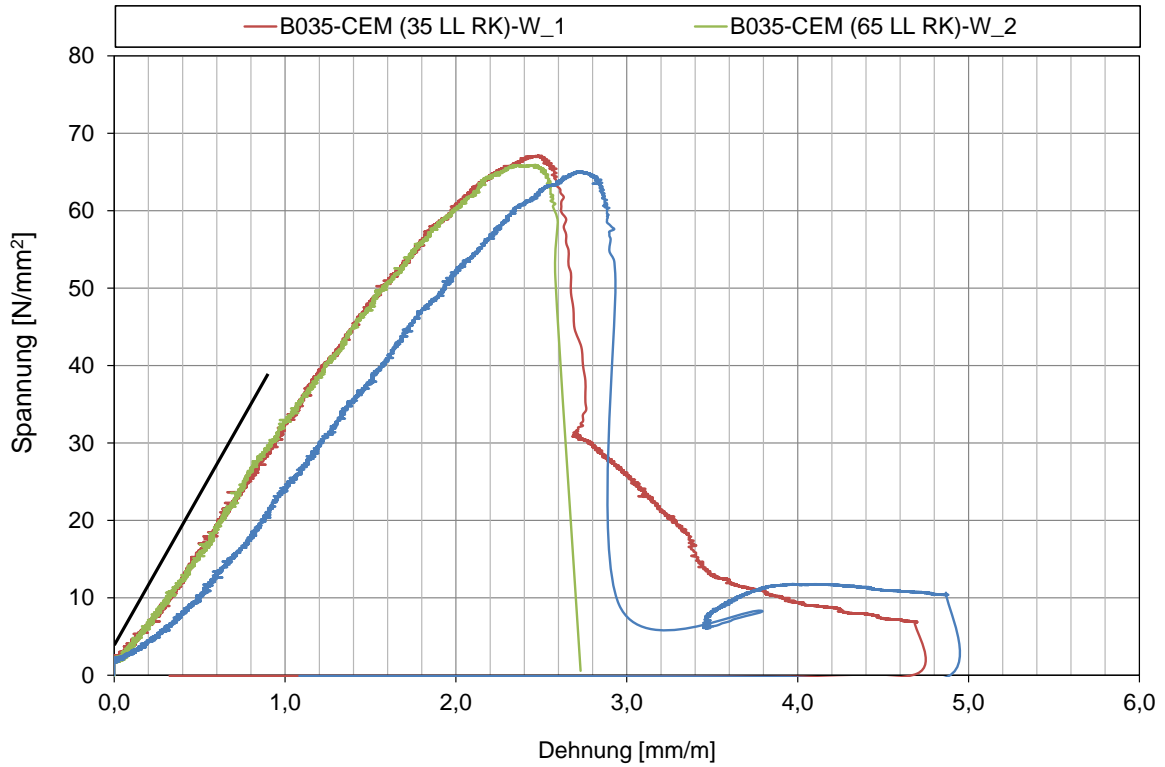


Bild 65 Spannung-Dehnung-Beziehung des Betons aus klinkerreduziertem Zement CEM (35 LL RK)-W und w/z-Wert von 0,35

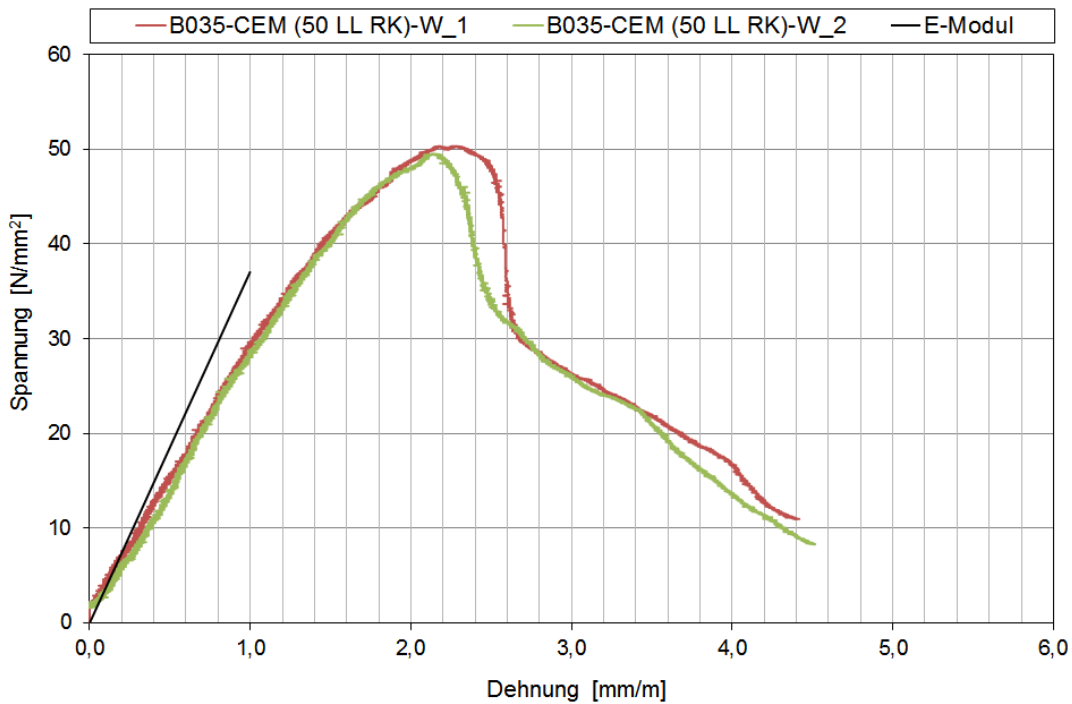


Bild 66 Spannung-Dehnung-Beziehung des Betons aus klinkerreduziertem Zement CEM (50 LL RK)-W und w/z-Wert von 0,35

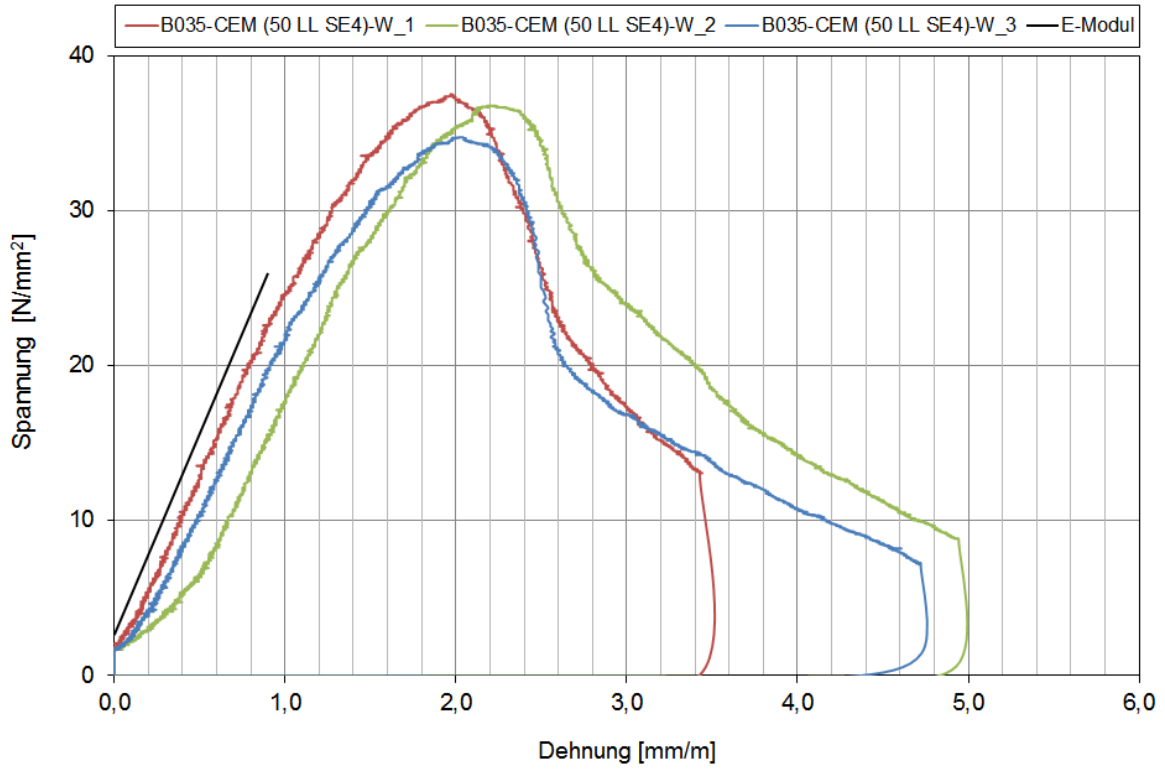


Bild 67 Spannung-Dehnung-Beziehung des Betons aus klinkerreduziertem Zement CEM (50 LL SE4)-W und w/z-Wert von 0,35

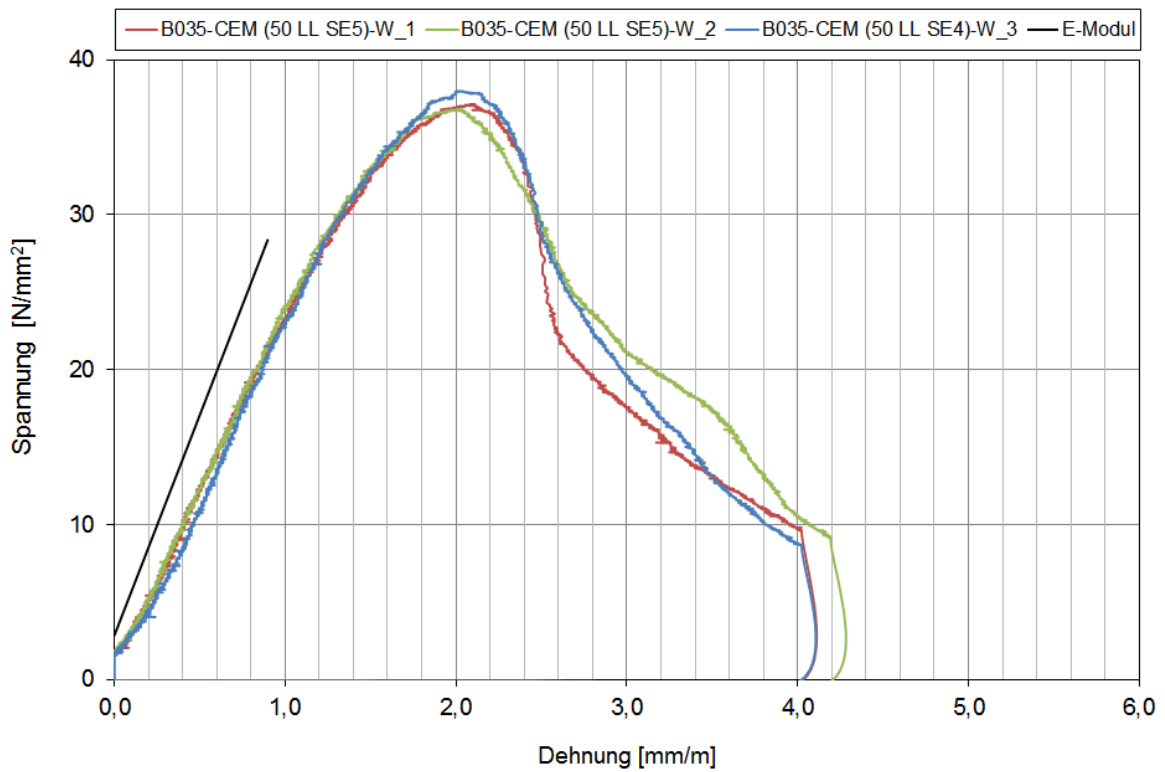


Bild 68 Spannung-Dehnung-Beziehung des Betons aus klinkerreduziertem Zement CEM (50 LL SE5)-W und w/z-Wert von 0,35

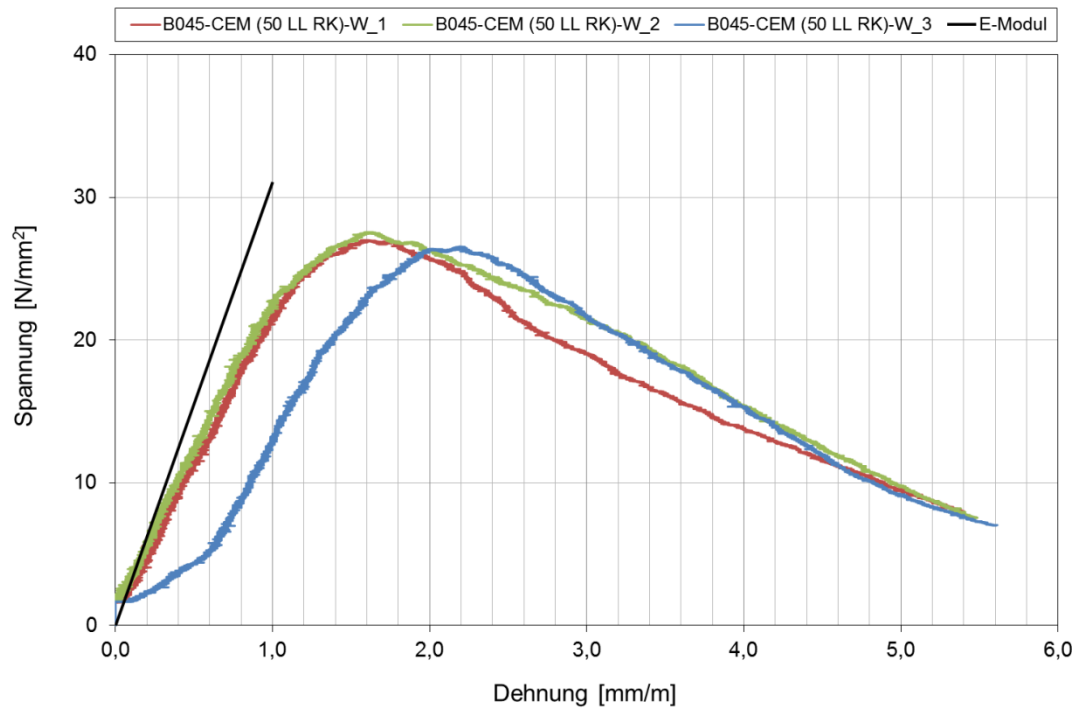


Bild 69 Spannung-Dehnung-Beziehung des Betons aus klinkerreduziertem Zement CEM (50 LL RK)-W und w/z-Wert von 0,45

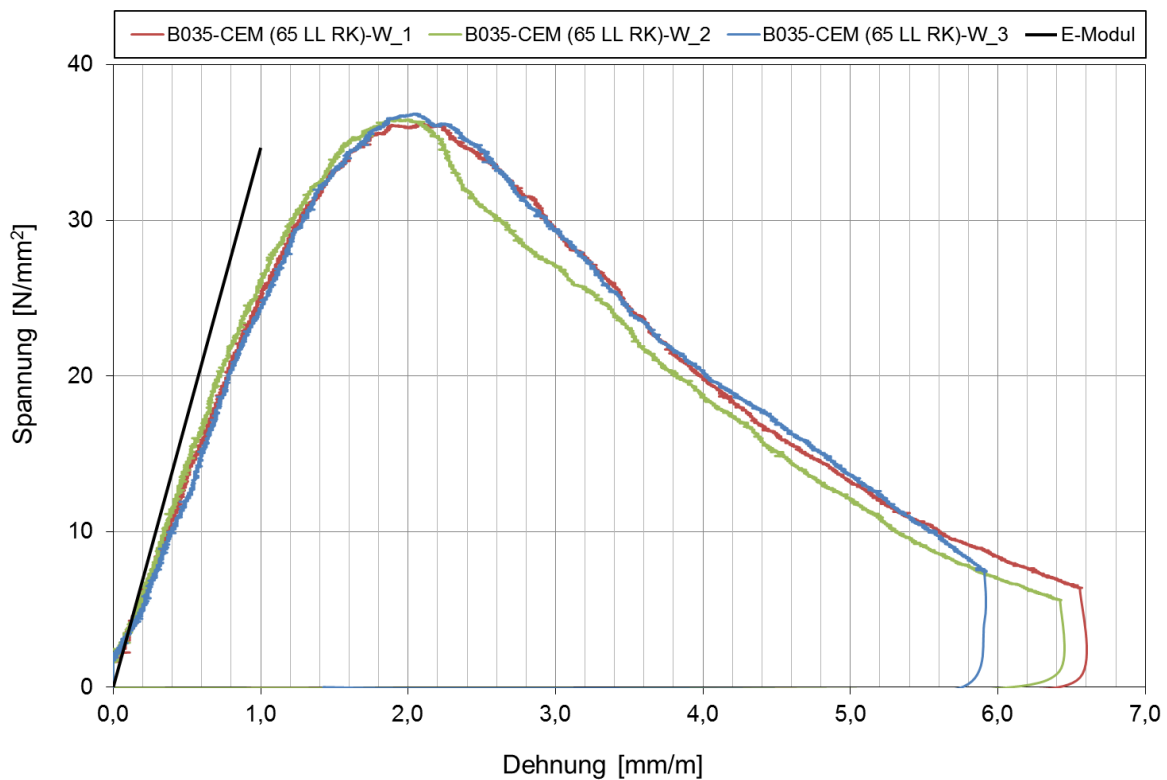


Bild 70 Spannung-Dehnung-Beziehung des Betons aus klinkerreduziertem Zement CEM (65 LL RK)-W und w/z-Wert von 0,35

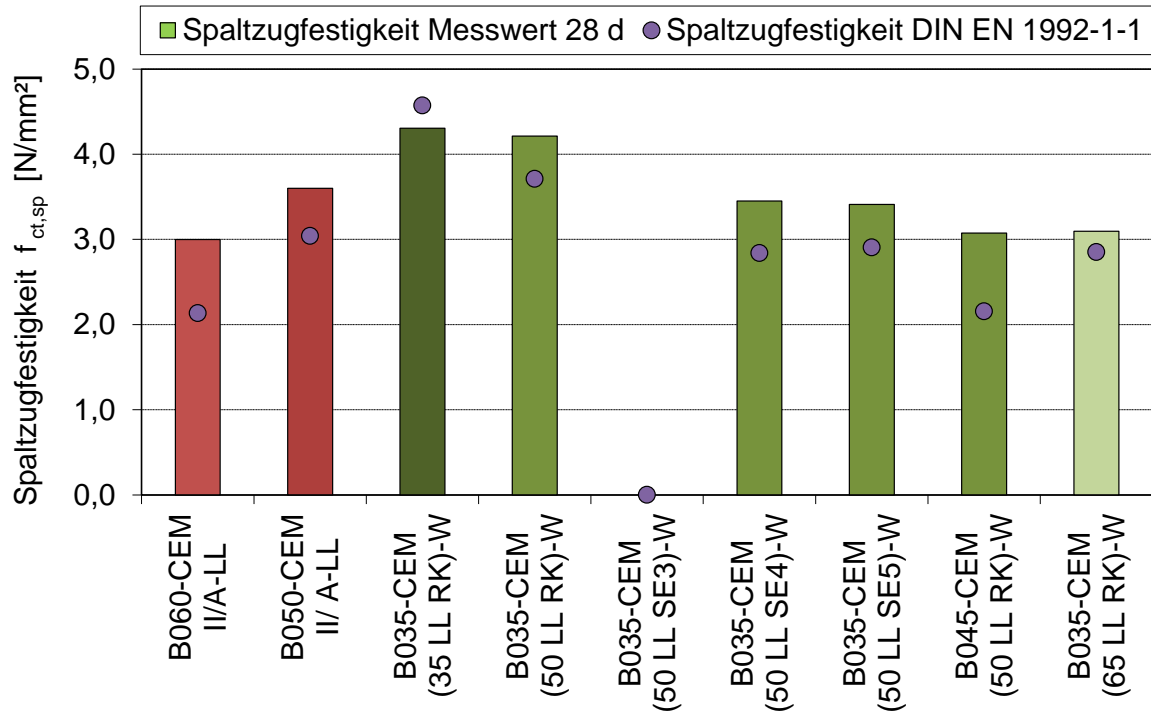


Bild 71 Grafische Darstellung der Spaltzugfestigkeiten

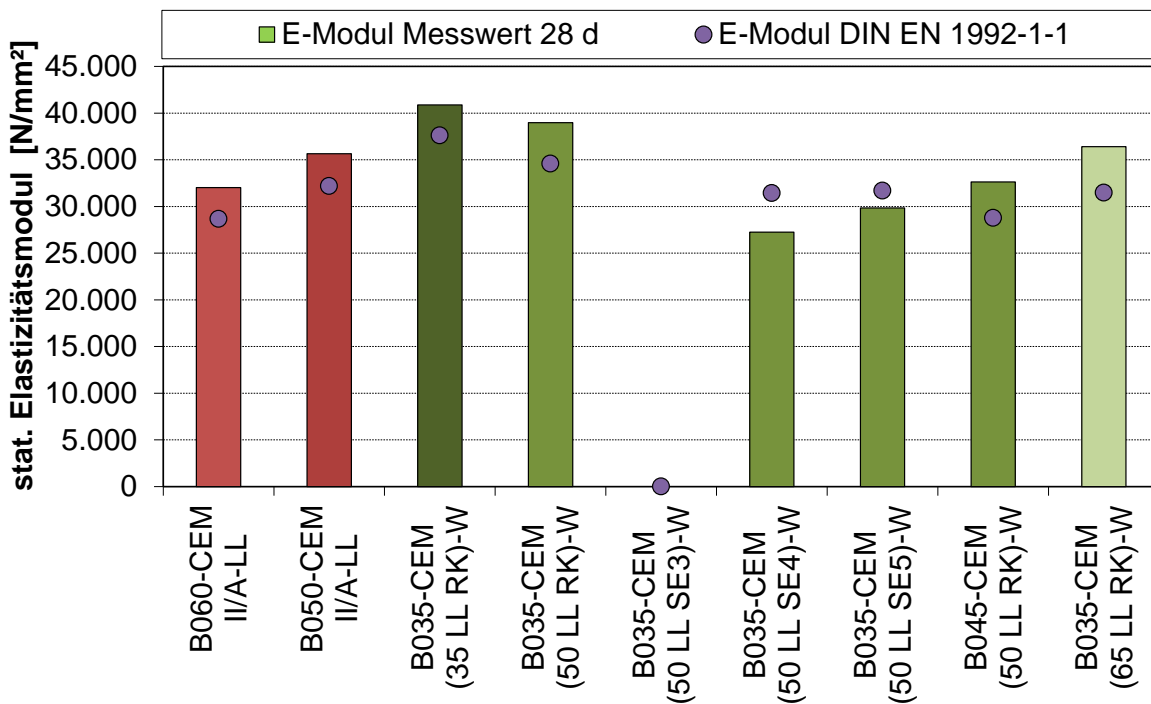


Bild 72 Darstellung des E-Moduls

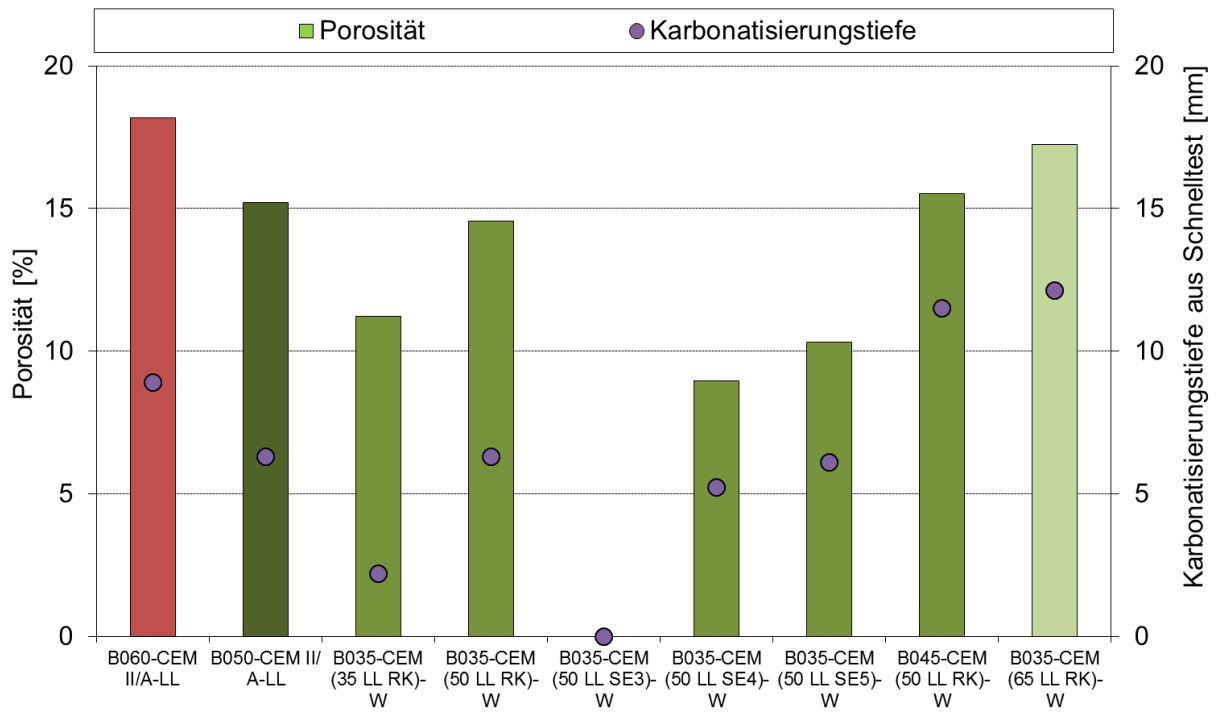


Bild 73 Grafische Darstellung der Porosität und Karbonatisierungstiefe

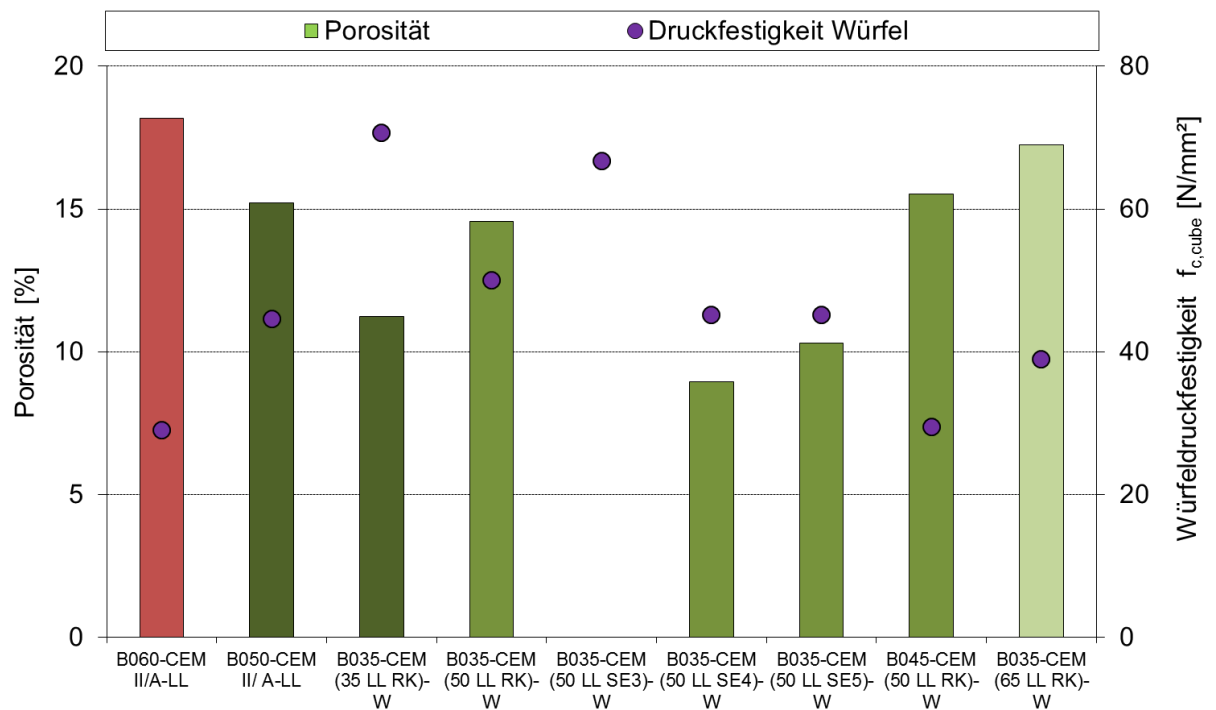


Bild 74 Grafische Darstellung der Porosität und Druckfestigkeit

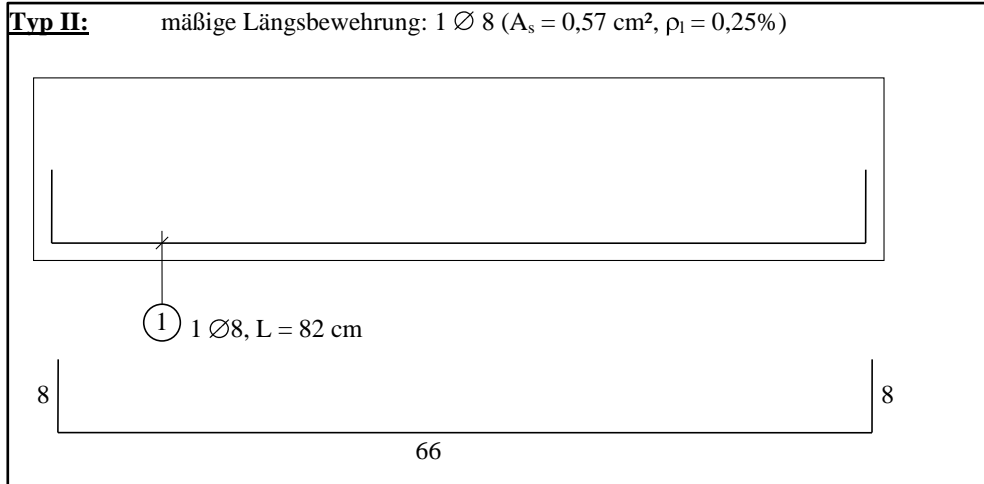


Bild 75 Bewehrungsplan für den Typ II Balken

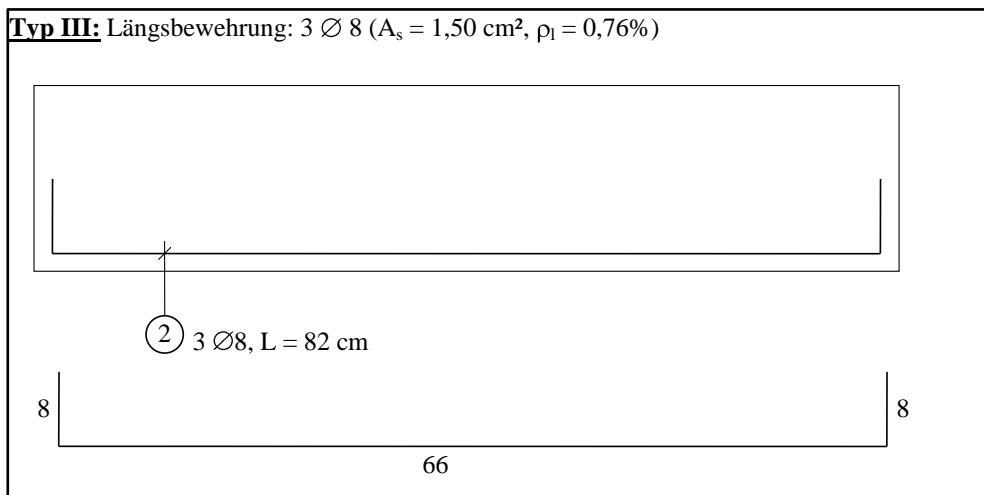


Bild 76 Bewehrungsplan für den Typ III Balken

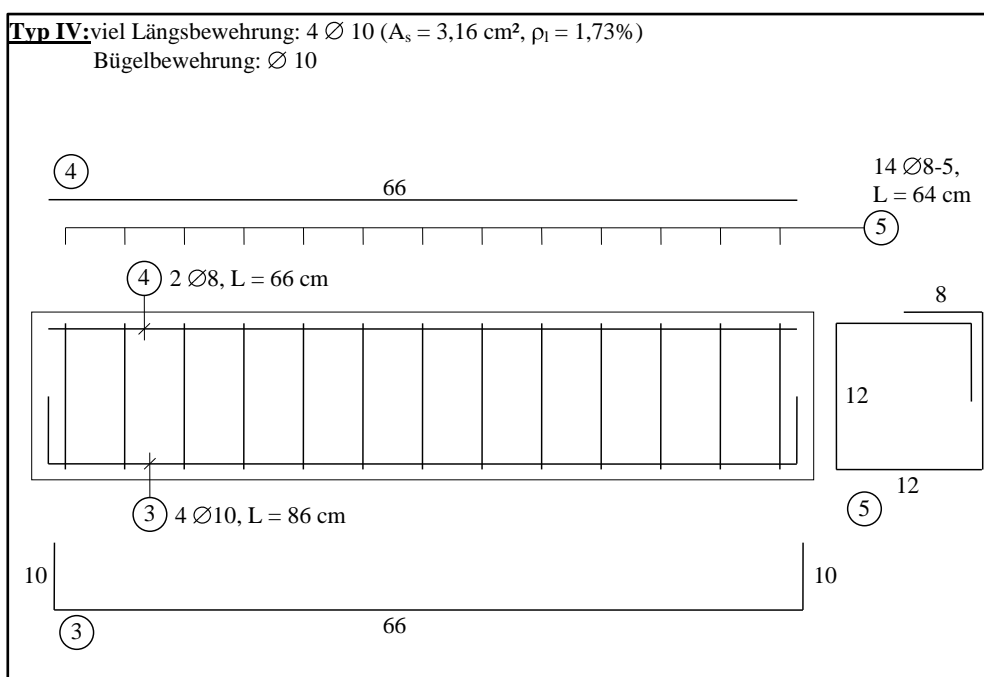


Bild 77 Bewehrungsplan für den Balkentyp IV



Bild 78 Ausgeführte Bewehrung der hergestellten Balken und exemplarische Balkenprüfung für Typ II, III und IV

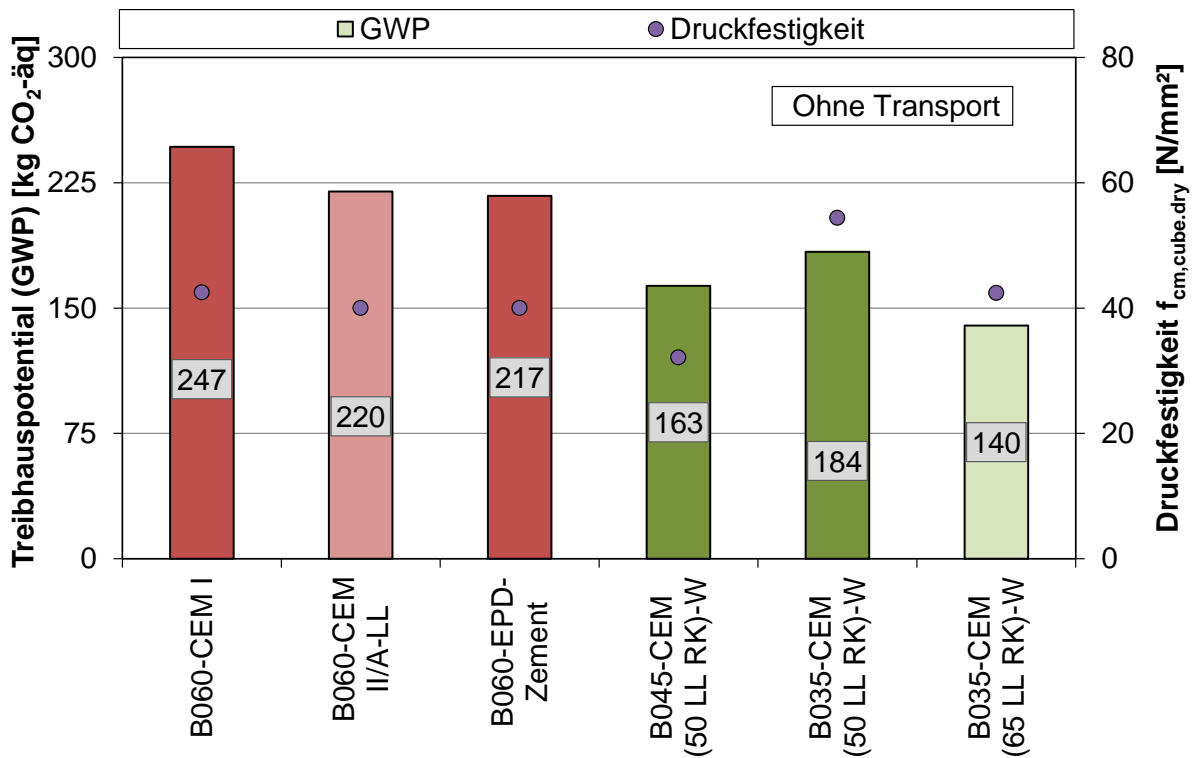


Bild 79 Treibhauspotential der balanzierten Betonmischungen mit einer Druckfestigkeit von ca. 40 MPa und vergleichbarem Karbonatisierungswiderstand

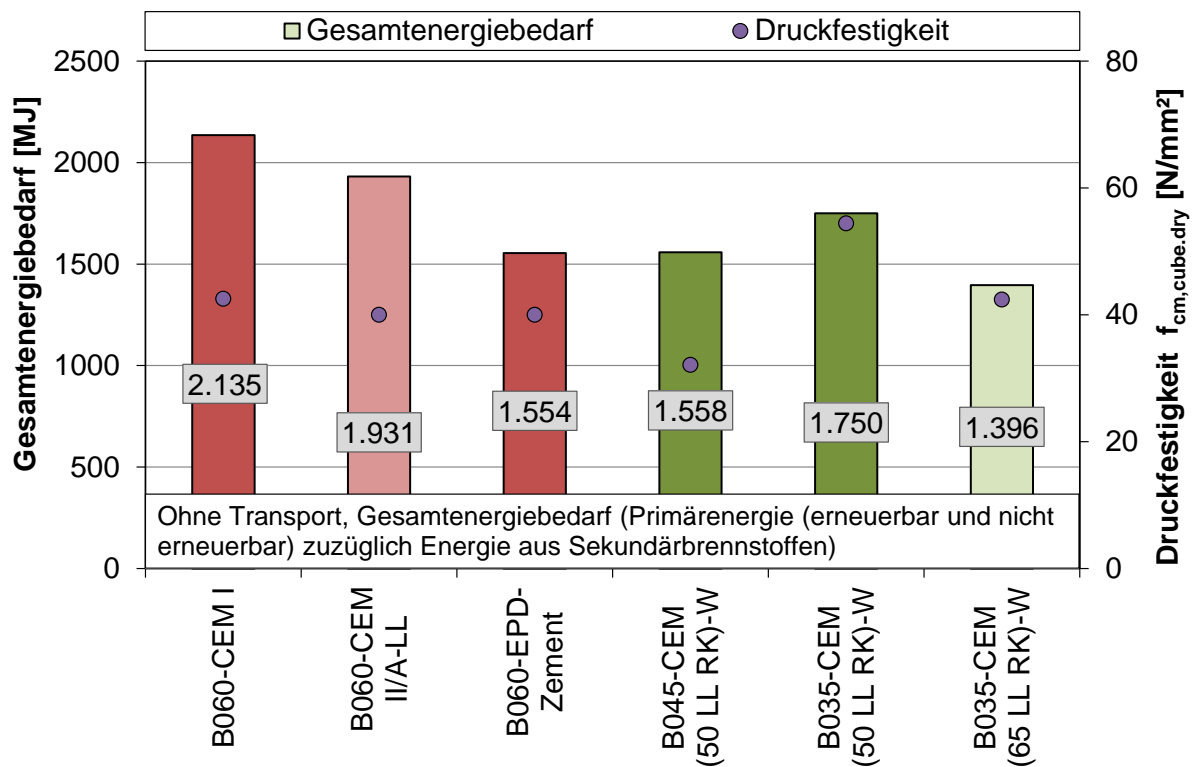


Bild 80 Gesamtenergiebedarf von Betonen mit einer Druckfestigkeit von ca. 40 MPa und vergleichbarem Karbonatisierungswiderstand

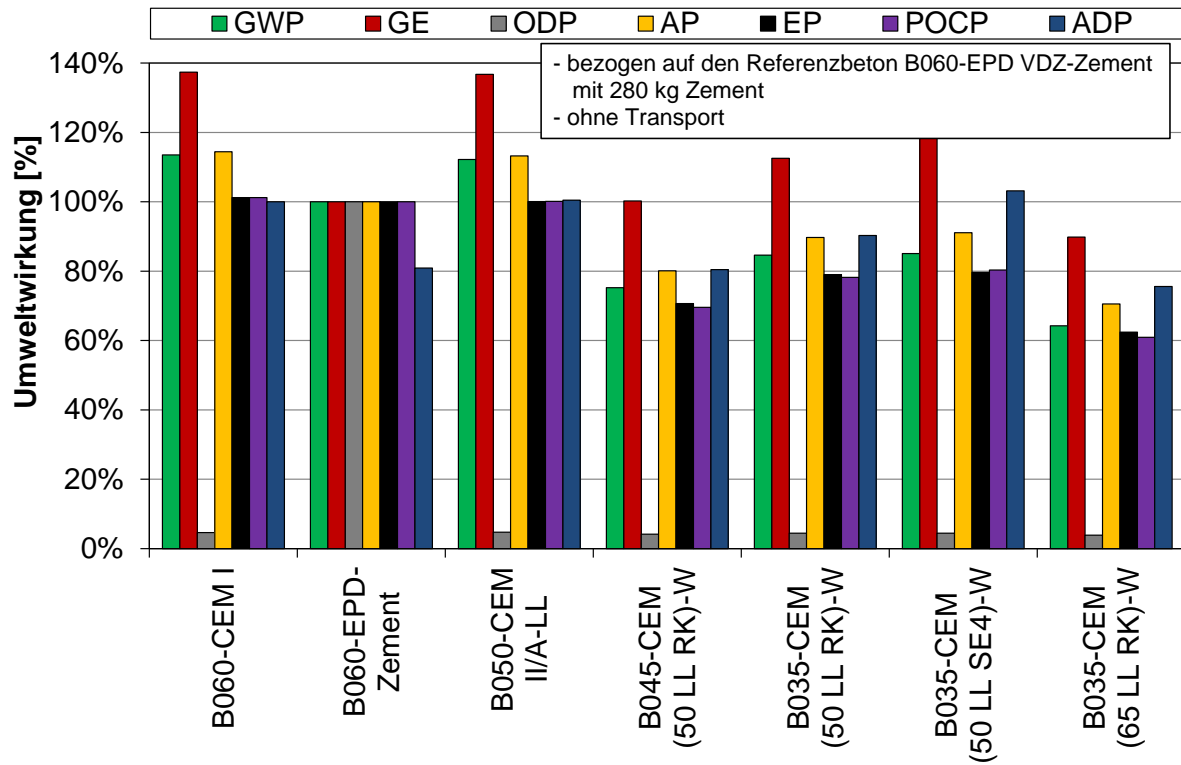


Bild 81 Umweltwirkungen von Betonen mit einer Druckfestigkeit von ca. 40 MPa

