

Hinweise für die Praxis

# Vom Klinkerfaktor zur CO<sub>2</sub>-Abscheidung: Klimafreundliche Zemente und Betone heute und morgen

Christoph Müller, Düsseldorf

Die Dekarbonisierung ist die zentrale Herausforderung für die Betonbauweise. Mit der CO<sub>2</sub>-Roadmap des VDZ aus dem Jahr 2020 [1] hat die Branche aufgezeigt, mit welchen Maßnahmen Klimaneutralität von Zement und Beton erreicht werden kann. Die Verwendung klinkereffizienter Zemente (z.B. CEM II- und CEM III-Zemente) ist ein wichtiger Baustein auf dem Weg der Betonbauweise in diese Richtung. Viele Anwender von Zement verbinden mit diesen Zementen eine Festigkeitsentwicklung, aus der sich verlängerte Ausschulfristen und Nachbehandlungszeiten ergeben und die deshalb z.B. für die Vorfertigung ggf. nur bedingt verwendet werden können. Auch Einschränkungen in der Anwendbarkeit nach Expositionsclassen sind möglich. In welchen Fällen trifft das zu, was bedeutet eine weitere Absenkung des Klinker/Zement-Faktors für die Anwendung der Zemente in verschiedenen Bereichen und wann wird es klimaneutrale Zemente und Betone geben? Dieser Beitrag stellt Informationen und Daten zur Verfügung, die helfen können, diese und weitere Fragen zu beantworten.

## 1 Klinkereffiziente Zemente

Klinkereffiziente Zemente kommen in Deutschland seit vielen Jahren zum Einsatz, auch weil dadurch die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Zement- und Betonherstellung reduziert werden können. Den Trend zu klinkereffizienten Zementen im Produktmix der vergangenen Jahre zeigt Bild 1.

Seit der Veröffentlichung der CO<sub>2</sub>-Roadmap des VDZ [1] im Jahr 2020 haben Portlandkompositzemente CEM II/M noch einmal an Bedeutung gewonnen. Der Marktanteil stieg von 6,7 % in 2020 auf 12,6 % in 2023 (Bild 2). Davon entfielen schätzungsweise 200000 t auf die neuen CO<sub>2</sub>-reduzierten CEM II/C-M-Zemente mit einem Mindestklingergehalt von 50 M.-%. Das ist eine erfreuliche Entwicklung, wenn man

bedenkt, dass diese Zemente erst seit 2021 am Markt angeboten werden. Nun gilt es, die Nachfrage nach CO<sub>2</sub>-effizienten Zementen und damit hergestellten Betonen weiter zu steigern.

Normative Grundlagen für neue klinkereffiziente Zemente sind z.B. die Zementnormen EN 197-5 und EN 197-6. So ist z.B. ein CEM II/C-M (S-LL) mit Hütten sand und Kalkstein neben Portlandzementklinker in EN 197-5 definiert. EN 197-6 beschreibt Zemente mit rezyklierten Feinstoffen aus der Aufbereitung von Altbeton. Seit der Veröffentlichung der CO<sub>2</sub>-Roadmap des VDZ im Jahr 2020 hat das Deutsche Institut für Bautechnik zahlreiche allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen für die Anwendung klinkereffizienter Zemente

erteilt (Tafel 1). Insgesamt beträgt die Anzahl solcher Zulassungen für Zemente derzeit etwas mehr als 60. Tafel 2 zeigt Beispiele für allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen zwischen 2020 und März 2024 mit einem Schwerpunkt bei CEM II/C-Zementen. Weitere Zulassungsverfahren zu klinkereffizienten Zementen laufen.

Auch die DIN 1045-2:2023 unterstützt mit neuen Anwendungsregeln für CO<sub>2</sub>-effiziente Zemente die Dekarbonisierung von Zement und Beton. Tafel 3 gibt einen Überblick.

### Der Autor:

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

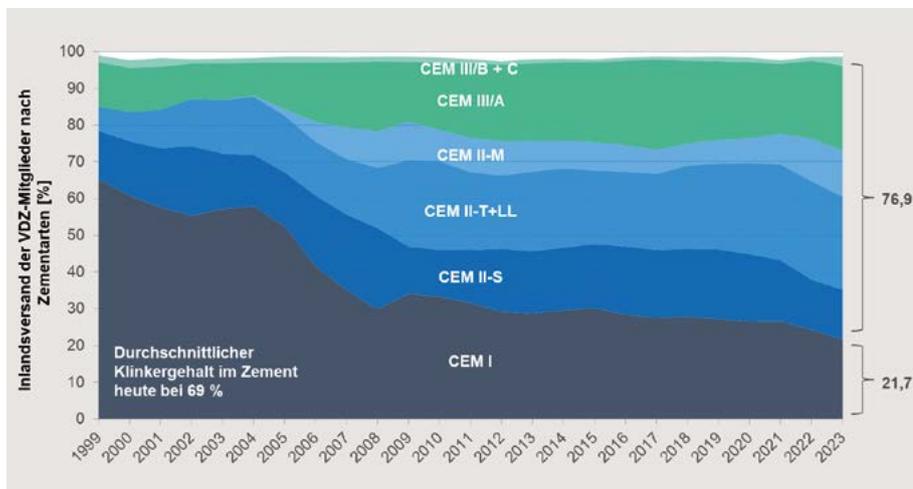


Bild 1: Entwicklung des Zementportfolios in Deutschland von 1999 bis 2023

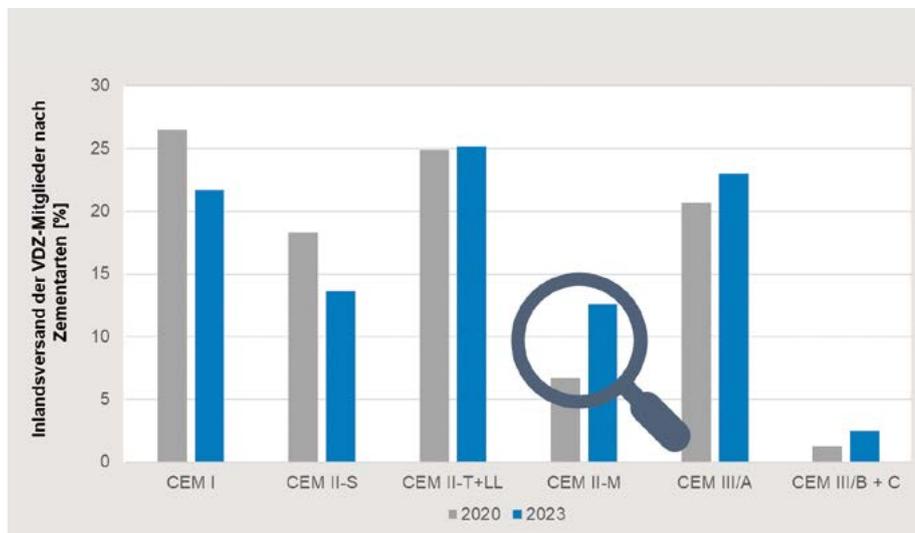


Bild 2: Entwicklung des Zementportfolios in Deutschland, Vergleich der Jahre 2023 und 2020 (Veröffentlichung der CO<sub>2</sub> Roadmap des VDZ)

Tafel 1: Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen zwischen 2018 und 2024 (Zusammenstellung VDZ, Sebastian Palm)

Zementart	2018	2021	2022	2023	2024
CEM II/B-M (S-LL)	12	14	16	17	17
CEM II/B-M (V-LL)	4	3	3	5	6
CEM II/B-M (T-LL)	2	2	2	2	2
CEM II/B-LL	1	1	1	1	1
CEM II/C-M	0	4	9	18	19
sonstige, z.B. CEM II, CEM IV, CEM V, CEM X, Zemente mit F als Nebenbestandteil	0	3	4	12	19
Gesamt	19	27	35	55	64

## 2 Festigkeitsentwicklung und Ausschallfristen

### 2.1 Allgemeines

Um den Anforderungen der Praxis an die Frühfestigkeit zu genügen, werden CEM II/B- und CEM III/A-Zemente in vielen Fällen in der Festigkeitsklasse 42,5 N angeboten. In Bild 3 ist die relative Druckfestigkeitsentwicklung von Betonen auf Basis von CEM I-, CEM II- und CEM III/A-Zementen der Festigkeitsklassen 32,5 R und 42,5 N bei vergleichbaren Betonzusammensetzungen und Lagerungsbedingungen beispielhaft dargestellt.

Die Relativwerte ergeben sich aus dem Bezug der Betondruckfestigkeit im Alter von 2 d, 7 d bzw. 28 d auf die 28-d-Druckfestigkeit des Betons. Zum Vergleich sind ergänzend die Prüfwerte für einen CEM III/A 32,5 N enthalten. Die ausgewiesenen Ergebnisse ermöglichen die Einstufung der untersuchten Betone in die mittlere bzw. langsame Festigkeitsentwicklung. Dementsprechend ist hier der Beton mit dem Zement CEM III/A 32,5 N als langsam einzustufen. Diese Einstufung ist maßgebend für die Dauer der Nachbehandlung [2].

### 2.2 Neue klinkereffiziente Zemente CEM II/C-M (S-LL)

In einer Literaturstudie [3] wurden Frisch- und Festbetoneigenschaften sowie Dauerhaftigkeitskennwerte von Betonen mit CEM II/B-LL- und CEM II/C-M (S-LL)-Zementen dargestellt und mit in Deutschland üblichen Bewertungskriterien bzw. Referenzbetonen mit CEM I oder CEM III/A verglichen. Die Anwendungsmöglichkeiten von CEM II/B-LL- und CEM II/C-M (S-LL)-Zementen wurden anhand dieser Datenlage abgeschätzt. Bild 4 zeigt die Festigkeitsentwicklung der Betone, dargestellt als Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeit nach 2 d ( $f_{cm2}$ ) und 28 d ( $f_{cm28}$ ) in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit nach 2 d ( $f_{cm2}$ ).

### 2.3 Modelle zur rechnerischen Prognose der Festigkeitsentwicklung

Für eine optimale Nutzung der Eigenschaften klinkereffizienter Zemente muss deren Erhärtungscharakteristik bei der Planung des Baufortschritts bzw. bei der Produktion von Fertigteilen berücksichtigt werden. Dabei kommt der Anwendung von Modellen zur rechnerischen Prognose der Festigkeitsentwicklung, auch unter Berücksichtigung unterschiedlicher Temperaturen, eine besondere Bedeutung zu. Gemäß fib Model Code 2010 [4] bzw. DIN EN 1992-1-1 [5] kann die Druckfestigkeitsentwicklung von Beton mit einer Exponentialfunktion beschrieben werden, deren Formparameter  $s$  in Abhängigkeit von der Zementfestigkeitsklasse gewählt wird (Bild 5).

Tafel 2: Beispiele für allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen zwischen 2021 und März 2024 (Anlage zu VDZ-Mitteilungen Nr. 185, Mai 2024)<sup>1)</sup>

Zementart	Anzahl	Expositionsklassen	min K/max LL [%]
CEM II/C	13	alle	50/20
CEM II/C + FA	2	alle	
CEM IV und CEM V <sup>1)</sup>	4	)	40/0
Zemente mit F als Nebenbestandteil	6	alle	
CEM II/C	8	alle außer XF2, XF3, XF4	50/20
CEM II/C + FA	11/21		
CEM X (siehe Abschnitt <sup>3)</sup> )	2	alle außer XF2, XF3, XF4, XA2/3, XM2/3	35/37

<sup>1)</sup> 1 x CEM IV alle, 1 x CEM V alle, 1 x CEM V ohne XF4, 1 x CEM V nur XC4/XF1 (siehe auch [https://www.dibt.de/fileadmin/verzeichnisse/NAT\\_n/SVA\\_3.pdf](https://www.dibt.de/fileadmin/verzeichnisse/NAT_n/SVA_3.pdf)).

Tafel 3: Neue Anwendungsregeln Zemente in DIN 1045-2:2023-08

Zementart	Expositionsklassen	Mindestklinkergehalt [%]
CEM II/A und CEM II/B mit Q als Hauptbestandteil	alle außer XF2, XF4	80/65
CEM II/B-M (S-LL, V-LL, T-LL) <sup>1)</sup>	alle außer XF2, XF3, XF4	65
CEM II/C-M (S-LL)		50
CEM V/A (S-V)	alle	40
CEM VI (S-V)		35
CEM VI (S-P) <sup>2)</sup>	alle außer XF2, XF3, XF4	
CEM VI (S-LL)	XC0, XC1, XC2	

<sup>1)</sup> Der zulässige Kalksteingehalt der Zemente (S-LL), (V-LL) und (T-LL) ist auf 20 M.-% begrenzt.

<sup>2)</sup> Die Einhaltung des maximal zulässigen Kalksteingehaltes ist durch den Hersteller des Zements zu erklären.

<sup>3)</sup> Gilt nur für Trass nach DIN 51043-1 als Hauptbestandteil.

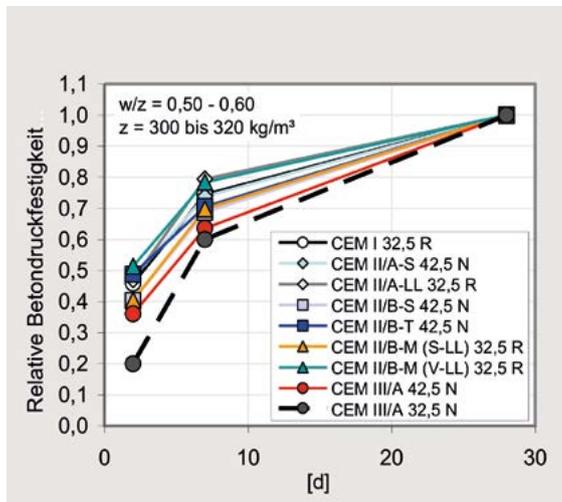


Bild 3: Relative Druckfestigkeit von Betonen mit verschiedenen CEM II- und CEM III/A-Zementen im Vergleich zum CEM I-Beton [2]

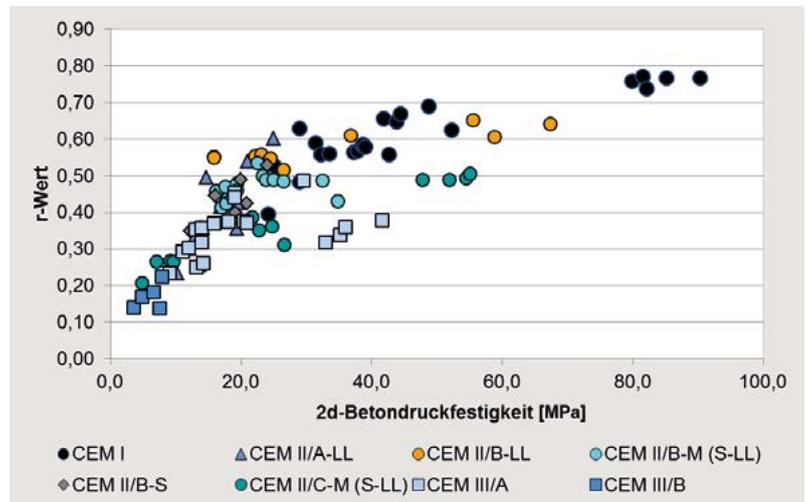


Bild 4: Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeit nach 2 d ( $f_{cm,2}$ ) und 28 d ( $f_{cm,28}$ ) (= r-Wert) in Abhängigkeit von der Druckfestigkeit nach 2 d, Daten aus [3]

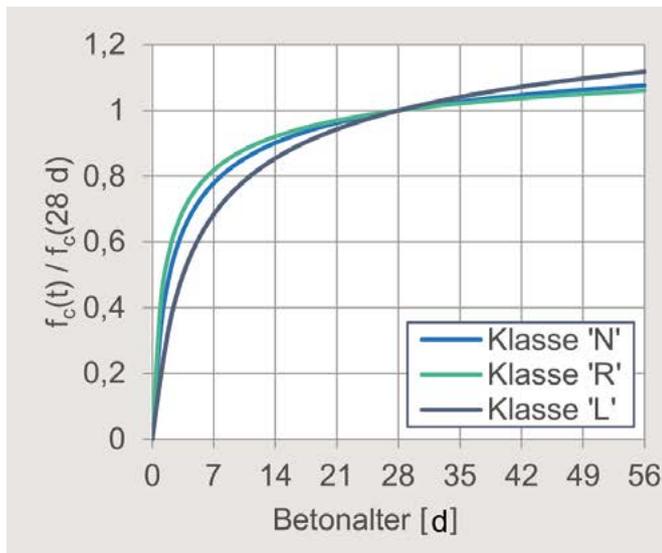


Bild 5: Prognose der Druckfestigkeitsentwicklung gemäß DIN EN 1992-1-1, Darstellung Hermerschmidt aus [12]

$$f_c(t) = f_c(28 d) \cdot \exp\left(s \cdot \left(1 - \left(\frac{28}{t}\right)^{0,5}\right)\right)$$

Klasse 'R'	Klasse 'N'	Klasse 'L'
s = 0,20	s = 0,25	s = 0,38
CEM 42,5 R CEM 52,5 N CEM 52,5 R	CEM 32,5 R CEM 42,5 N	CEM 32,5

Diese Vorgehensweise wurde ursprünglich für Betone mit Portlandzementen entwickelt und ist zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung von Betonen mit Zementen mit geringen Klinkeranteilen nur bedingt geeignet [6]. Eine Verbesserung für hütten-sandhaltige bzw. flugaschehaltige Zemente kann gemäß [6–8] erreicht werden, wenn der Funktionsparameter  $s$  in Abhängigkeit von dem Klinkergehalt und weiteren zement-technischen Parametern bestimmt wird.

Anhand einer Auswertung von Daten aus [9, 12] wurde die Anwendbarkeit der Modellfunktion zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung gemäß DIN EN 1992-1-1 (vgl. Bild 5) für Betone mit klinkereffizienten Zementen ohne und mit Flugasche als Betonzusatzstoff im Vergleich zu Betonen nur mit Portlandzement überprüft. Hierzu wurde der Funktionsparameter  $s$  durch nichtlineare Regression der Versuchsergebnisse bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass

die Geschwindigkeit der Festigkeitsentwicklung neben der Zementart auch maßgebend durch den Wasserzementwert beeinflusst wird (Bild 6). Mit sinkendem Wasserzementwert wurden bei gleicher Zementart abnehmende Werte für den Funktionsparameter  $s$  bestimmt, d.h. die relative Festigkeitsentwicklung läuft mit sinkendem Wasserzementwert schneller ab.

Der Einfluss der Temperatur auf die Erhärtungsgeschwindigkeit wird in der Regel mit so genannten Reifefunktionen beschrieben. Die am häufigsten verwendete Reifefunktion basiert auf der Arrhenius-Funktion zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeit von chemischen Reaktionen. Die unterschiedliche Temperatursensitivität der Zementhauptbestandteile wird dabei gewöhnlich über eine Anpassung der Aktivierungsenergie berücksichtigt. Für hütten-sandhaltige Zemente sind in der Literatur durch-

gehend höhere Werte für die Aktivierungsenergie zu finden als für Portlandzemente, während die für flugasche- bzw. kalksteinhaltige Zemente angegebenen Werte in der Regel geringer sind als für Portlandzement [8, 14]. Für ternäre Systeme und Zemente mit calcinierten Tonen bedarf es einer breiteren Datenbasis, um die Anwendbarkeit von Reifemodellen zu überprüfen. Zu diesem Thema führt der VDZ aktuell entsprechende Forschung durch.

### 3 Die CEM X-Technologie: Zemente mit hohen Kalksteingehalten

Bereits zwischen 2011 bis 2016 legte der VDZ gemeinsam mit Forschungspartnern die Grundlagen für die CEM-X-Technologie. Die Projekte wurden gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt. In der Phase 1 (2011 bis 2013) wurde gezeigt, dass Zement mit 50 M.-% Klinker und 50 M.-% ungebrauntem Kalkstein LL zur Herstel-

lung von Konstruktionsbetonen geeignet ist, wenn die Betontechnologie angepasst wird (Reduzierung des w/z-Werts). In einem Praxistest zeigte sich, dass diese Betone mit geringem Wassergehalt und hohem Anteil an Zusatzmittel anfällig für Entmischen sind. Die Robustheit konnte schlussendlich mit kleinformigen Praxistests überprüft und nachgewiesen werden.

In Phase 2 (2014 bis 2016) wurde für Zement mit 20 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 50 M.-% Kalkstein bei angepasster Betontechnologie die Eignung für alle Expositionsklassen außer XF4 gezeigt. In den verschiedenen Projekten [9, 10] wurde somit deutlich, dass eine Anpassung des Wasserzementwerts dazu führen kann, dass zulassungsrelevante bzw. zulassungsfähige Betoneigenschaften erreicht werden.

Im Februar 2024 wurde erstmals für einen solchen Portland-Kalkstein-Hüttenzement, für den es bisher keine Bezeichnung in der Normenreihe EN 197 gibt, die erste allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (Z-3.16-2244) erteilt. Diese gilt für die Expositionsklassen X0, XC1 bis XC4, XD1 bis XD3, XS1 bis XS3, XF1, XA1 und XM1. Je nach Expositionsklasse ist die Verwendung des CEM X an einen gesondert festgelegten, maximalen w/z-Wert geknüpft. Ein solcher Zement mit rd. 35 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 35 M.-% Kalkstein hat ein Global Warming Potential (GWP) von etwa 300 CO<sub>2</sub>-Äq/t Zement nach der EPD-Methodik der EN 15804.

#### 4 Interesse an „grünen“ Zementen, Betonen und Betontragwerken wecken

Klimaneutrales Bauen kann nur gelingen, wenn neben der Dekarbonisierung der Prozesse auch die emissionsarmen oder klimafreundlichen Produkte den Weg in den Markt finden. Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist das Bewusstsein auf der Nachfrageseite, dass es entsprechende CO<sub>2</sub>-reduzierte Alternativen gibt, die die gleichen oder sehr ähnliche Produkteigenschaften wie konventionelle Zemente, Betone und Bauteile aufweisen.

Daneben ist eine wichtige Voraussetzung, die Transparenz über den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von Zementen, Betonen und Bauweisen zu verbessern. Hierzu können einerseits Umweltproduktdeklarationen (EPDs) dienen, andererseits auch neue Kennzeichnungssysteme, wie etwa das CSC-Zertifikat für Beton und seine Ausgangsstoffe, das vom Concrete Sustainability Council (CSC) vergeben wird. Eine Richtlinie zu treibhausgasreduzierten Betontragwerken des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton ist im August 2024 erschienen [18]. Seit 2024 gibt es nunmehr auch eine Definition „grü-

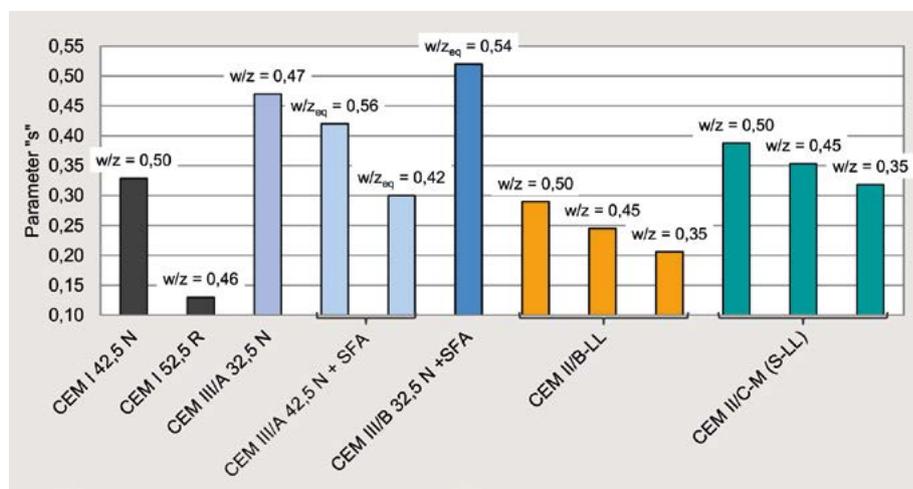


Bild 6: Parameter s zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung mittels Modellfunktion in Abhängigkeit der Zementart und des Wasserzementwerts, Daten aus [9, 12], Analyse und Darstellung Hermerschmidt aus [12] (SFA = Steinkohlenflugasche)

ner Zemente“, die im Dialog von Zementindustrie und Bundesregierung erarbeitet worden ist und die nun weltweit erstmals in Deutschland angewendet werden soll [16].

Gemäß dieser Klassifizierung wird bei den „grünen Zementen“ zwischen emissionsreduzierten und klimafreundlichen Produkten unterschieden. Die Klassen A bis D kennzeichnen dabei emissionsreduzierte Zemente mit einem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck > 100 kg CO<sub>2</sub>/t Zement bis < 500 kg CO<sub>2</sub>/t Zement in vier Stufen. Als klimafreundliche Zemente („Near Zero“) gelten solche mit einem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck < 100 kg CO<sub>2</sub>/t Zement. Die jeweiligen CO<sub>2</sub>-Klassen und eine beispielhafte Einordnung verschiedener Zementarten in die Klassifizierung sind in Bild 7 dargestellt. Die bereits heute am Markt etablierten sowie die neuen CO<sub>2</sub>-effizienten Zemente ordnen sich aktu-

ell in der Regel in die Klassen D und C ein. Perspektivisch ist damit zu rechnen, dass durch den Einsatz der CO<sub>2</sub>-Abscheidung im Zementwerk auch Zemente bis hin zur CO<sub>2</sub>-Klasse „Near Zero“ erreichbar sein werden. Das wird aber erst in den kommenden Jahren der Fall sein [16].

#### 5 Neues CO<sub>2</sub>-Label für Zement

Die Definition allein schafft jedoch noch keine Nachfrage und damit einen entsprechenden Markt. Deshalb hat der VDZ ein neues CO<sub>2</sub>-Label für Zement erarbeitet, das auf der beschriebenen Definition für grüne Zemente aufsetzt und als Kennzeichnungssystem die Sichtbarkeit dieser Produkte fördern soll. Das „Cement Carbon Class“- (CCC)-Label wurde Anfang 2025 veröffentlicht und soll den Zementherstellern die Möglichkeit geben, gegenüber Kunden

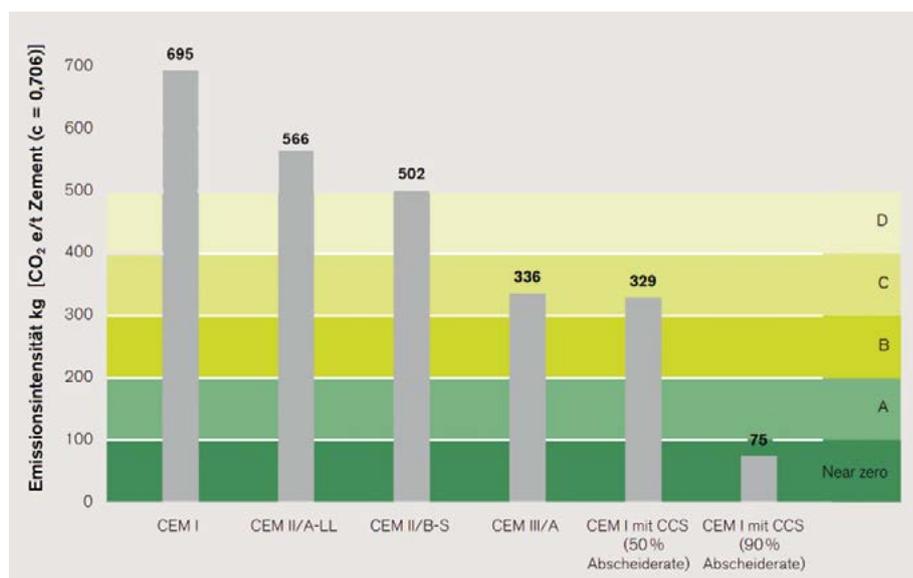


Bild 7: Vorgeschlagene Emissionsschwellenwerte in CO<sub>2</sub>-Äq/t Zement im Vergleich zu aktuellen und zukünftigen Zementarten sowie Technologien [15], Grafik aus [16]

neben den Produkteigenschaften auch den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck transparent anzugeben. Letzterer wird entsprechend extern geprüft und durch das Label verifiziert. Das Label wird seine Wirkung dann entfalten, wenn in den einschlägigen öffentlichen und privaten Vergabe- und Ausschreibungsrichtlinien hierauf Bezug genommen und – für die öffentliche Hand – auch eine verpflichtende Verwendung möglichst CO<sub>2</sub>-reduzierter Produkte entsprechend der Klassifikation zur Regel wird. Für private Bauprojekte kann dies als Blaupause dienen. Der Vorteil für Bauherren und Investoren: Mit dem Einsatz emissionsreduzierter Zemente, Betone und Betontragwerke lassen sich die „grauen Emissionen“ von Bauwerken bereits heute deutlich reduzieren, was nicht nur das Klima schont, sondern zunehmend sowohl für die Nachhaltigkeits-Zertifizierung von Gebäuden als auch die Gewährung von Fördermitteln wichtig wird [16] (siehe Interview S. 90).

## 6 Vom grünen Zement zum grünen Bauteil

Ein CEM X mit rd. 35 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 35 M.-% Kalkstein gemäß Abschnitt 3 hat ein Global Warming Potential (GWP) von etwa 300 CO<sub>2</sub>-Äq/t Zement nach der Methodik der EN 15804. In einem Beton der Festigkeitsklasse C35/45, gemäß allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) Z-3.16-2244 mit 350 kg/m<sup>3</sup> Zement geeignet für XC4/ XF1, ergibt sich damit ein Global Warming Potential (GWP) von etwa 140 CO<sub>2</sub>-Äq/m<sup>3</sup> Beton. Im CSC-System ist das ab dieser Festigkeitsklasse ein Level-3-Beton. Bild 8 zeigt den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck verschiedener Deckensysteme.

Im August 2024 erschien die Richtlinie zu treibhausgasreduzierten Betontragwerken



des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton DAfStb [17]. Die Richtlinie besteht derzeit aus den folgenden zwei Teilen: Teil 1 der Richtlinie legt die grundlegenden Anforderungen und die Nachweisführung für treibhausgasreduzierte Tragwerke fest. Teil 2 der Richtlinie behandelt Deckenbauteile, die im Geschossbau üblicherweise den höchsten Anteil an Treibhausgasemissionen im gesamten Tragwerk aufweisen. In Treibhausgas-Minderungsklassen erfolgt eine

Klassifizierung von Treibhausgas-Minderungszielen.

Bild 9 zeigt auf der rechten Seite das Global Warming Potential in [kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente] der Beispiele aus Bild 8 unter der Annahme der Verwendung von CSC-Level-3-Betonen. CSC-Level-3-Betone können zum Beispiel erreicht werden, wenn ein Zement der Klasse B nach Cement Carbon Class CCC verwendet wird. Dies kann zum Beispiel ein CEM X sein.

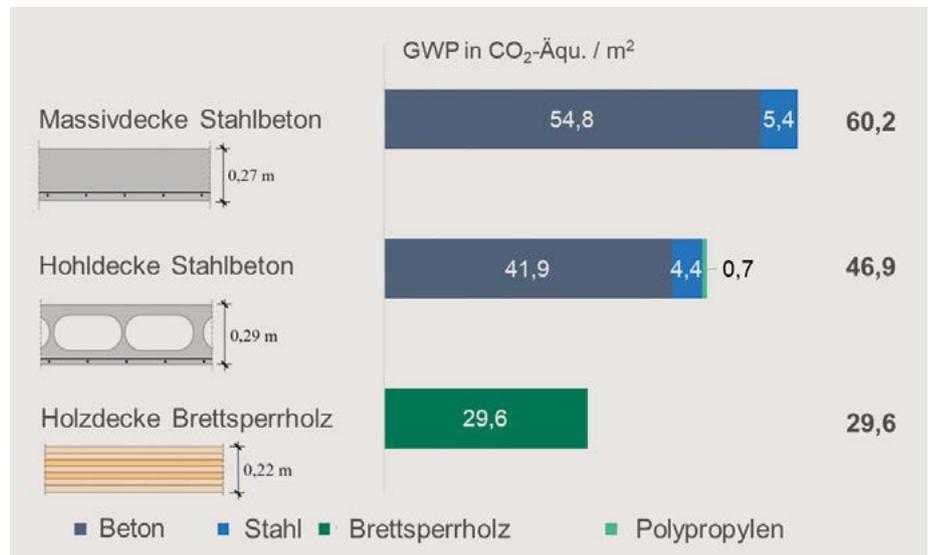


Bild 8: CO<sub>2</sub>-Fußabdruck verschiedener Deckensysteme, Berechnung nach [17]

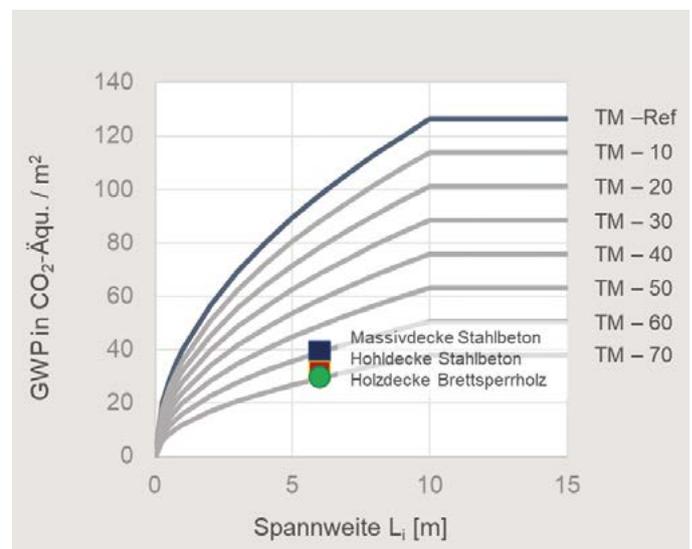
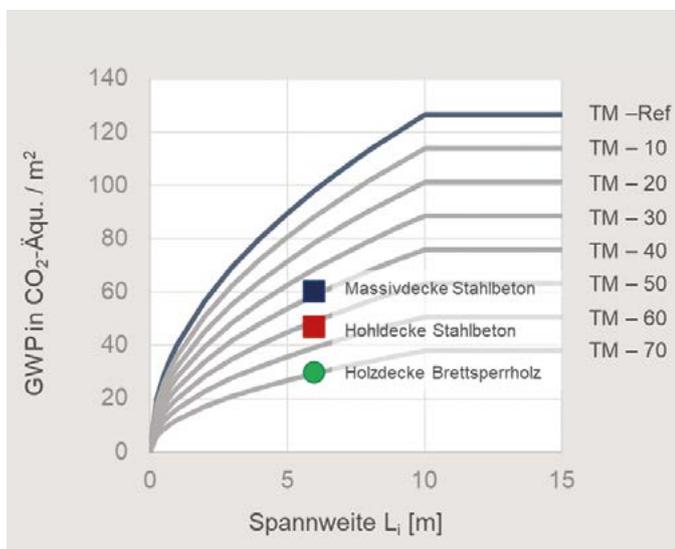


Bild 9: Referenzzustand und Treibhausgas-Minderungsklassen für Deckenbauteile nach [17]; links: Einordnung der Beispiele aus Bild 8; rechts: Beispiele aus Bild 8 unter der Annahme der Verwendung von CSC-Level-3-Betonen

### 7 Wann gibt es klimaneutralen Zement und Beton?

Bis die ersten klimaneutralen Zementwerke in Deutschland in Betrieb gehen, werden noch einige Jahre vergehen. Dies wird möglich sein, sobald es gelingt, die unvermeidbaren CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Herstellung abzuscheiden, zu transportieren und dauerhaft zu speichern bzw. zu nutzen. In der Zementindustrie in Deutschland und Europa werden derzeit zahlreiche Projekte geplant und teils bereits umgesetzt.

Auch die Planungen für eine entsprechende CO<sub>2</sub>-Infrastruktur nehmen Fahrt auf. Ein erstes CCS-Projekt in einem Zementwerk in Norwegen wird in 2025 den Betrieb aufnehmen und dann laut den Planungen rd. 300000 t klimaneutralen Zement pro Jahr erzeugen (siehe hierzu u.a. [www.brevikccs.com](http://www.brevikccs.com), das Brevik-Pro-

jekt der Heidelberg Materials AG). Auch in Deutschland sind derzeit etwa zehn CCUS-Projekte in der Planung bzw. im Bau (Bild 10), sodass in den nächsten Jahren auch hierzulande die ersten Standorte weitgehend klimaneutral produzieren werden.

Aus heutiger Sicht ist mit einem nennenswerten Angebot an klimaneutralem Zement und Beton Anfang der 2030er Jahre zu rechnen. Aufgrund der Minderungsverpflichtungen des Europäischen Emissionshandels stehen die Zementhersteller vor der Herausforderung ihre Produktionsprozesse bereits bis zum Jahr 2040 weitgehend zu dekarbonisieren – also fünf Jahre vor dem nationalen Klimaziel. Dies ist ein extrem ambitionierter Zeitplan und erfordert, dass auch die notwendigen externen Voraussetzungen für diese Transformation rechtzeitig geschaffen werden. Dazu gehört, neben dem

Rechtsrahmen für den Einsatz von CCUS in Deutschland, der rasche Aufbau einer CO<sub>2</sub>-Transportinfrastruktur sowie die Förderung grüner Leitmärkte, damit die zunehmend CO<sub>2</sub>-effizienteren bzw. klimaneutralen Produkte und Bauweisen auch auf eine entsprechende Nachfrage treffen.

Der Aufbau eines deutschen CO<sub>2</sub>-Leitungsnetzes mit einer Länge von etwa 4800 km wird nach einer Studie des VDZ etwa 14 Mrd. € kosten. Für die gesamte Kette von der CO<sub>2</sub>-Abscheidung über den Transport bis zur Speicherung werden die Kosten auf 115 €/t bis 220 €/t CO<sub>2</sub> geschätzt. Kurz bis mittelfristig werden die Kosten am oberen Ende dieser Bandbreite angenommen. Hier sind Politik, Industrie sowie alle Baubeteiligten gleichermaßen gefragt, ihren Teil zum Gelingen der Transformation beizutragen [16, 19].

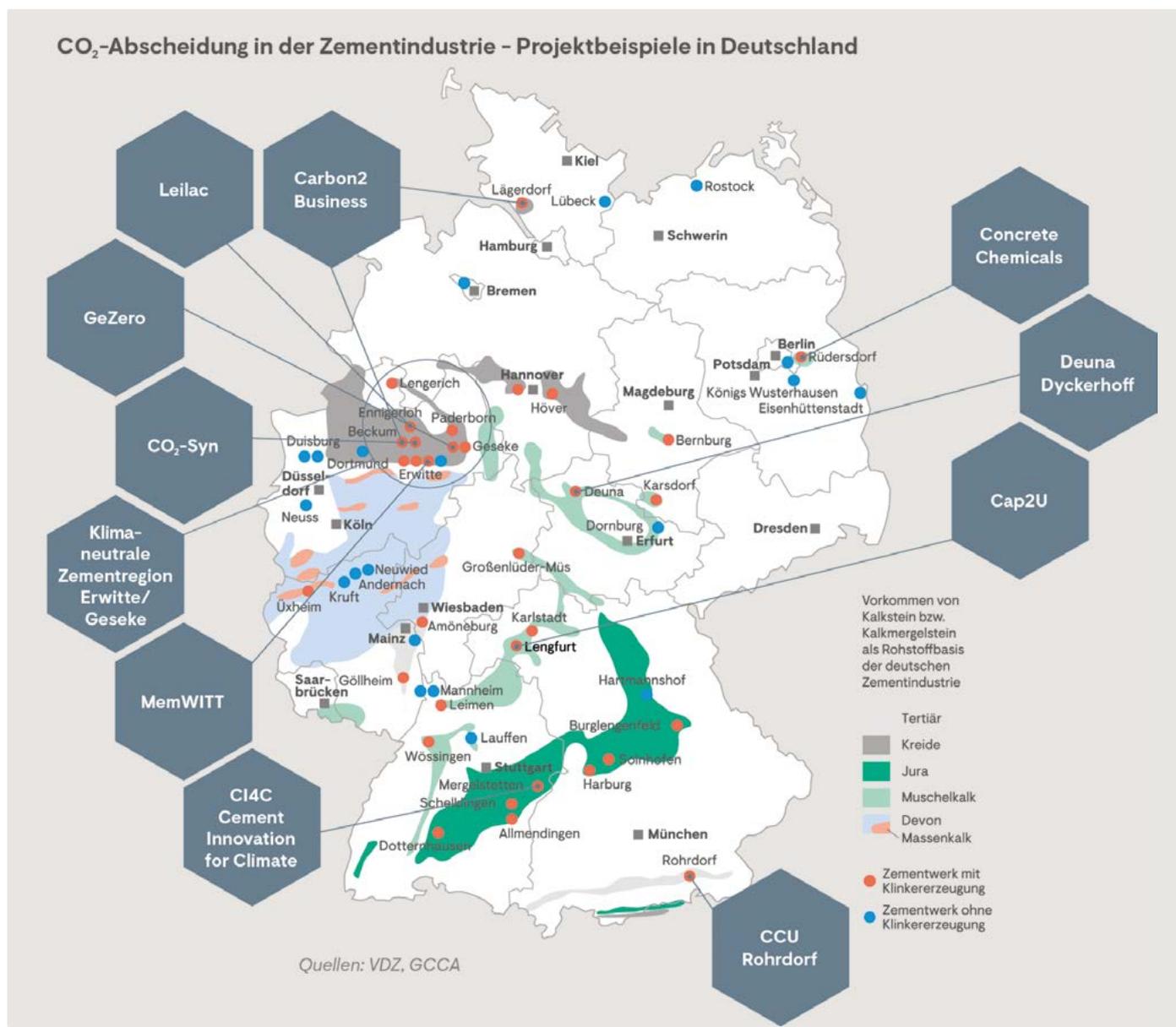


Bild 10: CO<sub>2</sub>-Abscheidung in der Zementindustrie, Projektbeispiele in Deutschland, Grafik aus [16]

Anteil Klinker [%]	Transportbeton	Betonwaren	Spezialtiefbau	Estrich (Sackware) Industriebetonboden	Konstruktive Fertigteile	Betonfahrbahndecken	Bahnachwellen
95-100	Anwendung nach Expositions-klassen K8/XD2-3, XF3-XF4	CEM I	Leichte Mischbarkeit Zement und Wasser zu Suspensionen	CEM I	Trocknungsverhalten	CEM I	Festigkeit
80-94	Dauerhaftigkeits-nachweis	CEM III/A	Geringes Schwindverhalten und geringe Sedimentationsneigung	CEM III/A	Schnelle Festigkeits-entwicklung	CEM III/A	AKR Widerstand
65-79	KC3, XC4/XF1, XS/D1	CEM III/B	Gute Fließ- und Pumpfähigkeit	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/B	CEM III/B
50-64	Druckfestigkeit = Dauerhaftigkeit XC1 (trocken)	CEM III/A CEM III/C		CEM III/A CEM III/C	CEM III/C	CEM III/A	CEM III/A CEM III/C
35-64	Robuste Frostbeton-Eigenschaften Mechanische Eigenschaften (Druckfestigkeit)	CEM III/A CEM V		CEM III/A CEM V			
20-34		CEM III/B		CEM III/B			

Bild 11: Klinkereffiziente Zemente in verschiedenen Anwendungen [20]

## 8 Klinkereffiziente Zemente in der Vorfertigung – Hinweise für die Praxis, Forschung und Ausblick

Nicht in allen Anwendungsbereichen zementgebundener Baustoffe wird sich der Klinkergehalt in Zement und Beton in gleicher Weise reduzieren lassen. Die folgende Abbildung 11 ist gleichermaßen der Versuch einer Bestandsaufnahme wie auch eines Ausblicks auf die Möglichkeiten der Optimierung des Portlandzementklinkeranteils und damit der Portfolioentwicklung für verschiedene Anwendungsbereiche. Der Klinkergehalt wird teilweise durch Anforderungen an z.B. Festigkeit, Karbonatisierungswiderstand oder Frost-Tausalz-Widerstand bestimmt. Die Zementarten sind als generische Beispiele zu verstehen. Bezüglich der unterschiedlichen Zementzusammensetzungen (Hüttensand, Flugasche, ungebrannter Kalkstein, kalzinierte Tone, rezyklierte Feinanteile, etc.) kann sich ein differenzierteres Bild ergeben. Entscheidend ist, dass in allen Bereichen das Mögliche unternommen wird den Klinkergehalt weiter zu senken. Ein Grund, der eine weitere Absenkung des Klinkergehaltes ggf. einschränkt, können Anforderungen an die Frühfestigkeit sein. Insbesondere in der Vorfertigung ist die Frühfestigkeit unter den heutigen Marktbedingungen ein wichtiges Kriterium; auch weil kurzfristige Ziele eine größere Rolle spielen als der vielzitierte Lebenszyklus.

Vielleicht werden aber heute auch in der Vorfertigung schon mehr klinkereffiziente Zemente eingesetzt als man gemeinhin annimmt.

„Wir setzen bereits jetzt ressourcenschonenden R-Beton mit Recycling-Gesteinskörnung sowie CO<sub>2</sub>-mindernden Zement der Sorte CEM III bei der Produktion von Betonfertigteilen ein. Gleichzeitig arbeiten wir an Lösungen, um den Anteil an

recyceltem Material noch weiter zu erhöhen sowie um unsere Fertigteile vollständig in die Kreislaufwirtschaft zurückzuführen.“ (Quelle: <https://www.brueeninghoff.de/fokus-zukunft/nachhaltigkeit/>)

In Gesprächen mit dem Betonverband Straße, Landschaft, Garten e. V. (SLG) im Zuge eines neuen VDZ Forschungsprojektes zu klinkereffizienten Betonwaren wurden durch die Hersteller der Betonwaren beispielhaft folgende Zementarten neben Portlandzement genannt, die wohl heute bereits in der Fertigung von Betonpflastersteinen verwendet werden:

- Kernbeton: CEM II/A-S 52,5 N, CEM II/B-S 42,5 R, CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R.
- Vorsatzbeton: CEM II/A-LL 42,5 R, CEM II/B-S 42,5 R, CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R.

Zudem stehen Technologien zur Verfügung, klinkerreduzierte Systeme im Hinblick auf Festigkeitsentwicklung und weitere Betoneigenschaften „anzuregen“. Beschleunigende Betonzusatzmittel und der Einsatz von Ultraschall seien hier beispielhaft genannt.

In dem seit Anfang 2021 durchgeführten Forschungsprojekt „R-ZiEMENT“ wurde untersucht, inwieweit sich ziegelhaltige Recyclingbaustoffe als Hauptbestandteil im Zement verwenden lassen. Inzwischen wurden neben Laborversuchen auch großtechnischen Betriebsversuche zur Herstellung klinkereffizienter R-Zemente erfolgreich durchgeführt. Es wurde ein ziegelhaltiger Werkzement mit einem Klinkerfaktor von etwa 65 M. % in der Herstellung von Transportbeton sowie in der Fertigung von Betonrohren großtechnisch erfolgreich getestet. Bis zum Abschluss des Projektes Ende 2024 wurden die Dauerhaftigkeit der Betone im Labor untersucht und deren Eigenschaften anhand zulassungsrelevanter Kriterien eingeordnet [21].

## Literatur

- [1] Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungs-pfade und Handlungsstrategien. Verein Deutscher Zementwerke (Hrsg.), Düsseldorf 2020
- [2] CEM II- und CEM III/A-Zemente im Betonbau – Nachhaltige Lösungen für das Bauen mit Beton. Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.), Düsseldorf 2008
- [3] Müller, C.; Palm, S.; Hermerschmidt, W.: Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit CEM II/B-LL und CEM II/C-M (S-LL) – Zementen. beton 69 (2019) H. 10, S. 362–371
- [4] fib (Hrsg.): fib Model Code for Concrete Structures 2010. Ernst & Sohn, Berlin 2013
- [5] DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: „Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau“; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010; Ausgabedatum: 2011-01
- [6] Vollpracht, A.; Soutsos, M.; Kanavaris, F.: Strength development of GGBS and fly ash concretes and applicability of fib model code’s maturity function – A critical review. Construction and Building Materials 162 (2018), pp. 830–846
- [7] Klemczak, B.; Batog, M.; Pilch, M.: Assessment of concrete strength development models with regard to concretes with low clinker cements. Archives of Civil and Mechanical Engineering 16 (2016), pp. 235–247
- [8] Soutsos, M.; Vollpracht, A.; Kanavaris, F.: Applicability of fib model code’s maturity function for estimating the strength development of GGBS concretes. Construction and Building Materials 264 (2020), 120157
- [9] Palm, S.; Müller, C.; Proske, T.; Rezvani, M.; Graubner, C. A.: Concrete application of clinker-efficient cements. Advances in Cement Research 31 (2019) No. 5, pp. 225–234
- [10] Proske, T.; Rezvani, M.; Palm, S.; Müller, C.; Graubner, C. A.: Concretes made of efficient multi-component cements with slag and limestone. Cement and Concrete Composites 89 (2018), pp. 107–119
- [11] Hermerschmidt, W.: Modelle zur Beschreibung der thermomechanischen Materialeigenschaften jungen Betons. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, Braunschweig 2016
- [12] Müller, C.; Hermerschmidt, W.: Dekarbonisierung: Weniger CO<sub>2</sub> – mehr Nachbehandlung? 16. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Karlsruhe 2020
- [13] Soutsos, M.; Vollpracht, A.; Kanavaris, F.: Applicability of fib model code’s maturity function for estimating the strength development of GGBS concretes. Construction and Building Materials 264 (2020), 120157
- [14] Tydlit, V.; Matas, T.; Cerny, R.: Effect of w/c and temperature on the early-stage hydration heat development in Portland-limestone cement. Construction and Building Materials 50 (2014), pp. 140–147
- [15] Leitmärkte für klimafreundliche Grundstoffe. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Berlin 2024
- [16] Mohr, M.; Müller, Ch.: Dekarbonisierung von Zement und Beton – Wo stehen wir heute und wo müssen wir hin? betonprisma (2024) H. 117
- [17] Heckmann, M.; Glock, C.: Life Cycle Assessment in the Building Sector – Greenhouse Gas Emissions of Common Ceiling Systems. Beton- und Stahlbetonbau 118 (2023) H. 2
- [18] DAfStb-Richtlinie - Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton (THG-Richtlinie). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), Berlin 2024
- [19] Mohr, M.: Anforderungen an eine CO<sub>2</sub>-Infrastruktur in Deutschland. Interview im DBV-Rundschreiben 281, Berlin 2024
- [20] Müller, Ch.: Use of CO<sub>2</sub> – reduced cements in building practice: Einsatz CO<sub>2</sub>-reduzierter Zemente in der Baupraxis. BFT International 89 (2023) H. 6, S. 74
- [21] Fiebig, N.; Severins, K.: R-ZiEMENT – Ziegelhaltige Recyclingbaustoffe für ressourceneffiziente Zemente. TB iNFO (2024) H. 96