

## Schritte zur weiteren Reduzierung des Klinker/Zement-Faktors

# Klinkereffiziente Zemente – ein wichtiger Baustein auf dem Weg zur Dekarbonisierung von Zement und Beton

Christoph Müller, Düsseldorf

Um das Ziel der Dekarbonisierung von Zement und Beton zu erreichen, wird gemäß der Studie „Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien“ des VDZ [1] ein Anteil der CEM II/C-Zemente am Inlandversand im Jahr 2030 von etwa 45 % angestrebt. Bis spätestens 2050 soll der Anteil von CEM II/C- und CEM VI-Zementen auf rd. 60 % des Inlandversands steigen. Die normative Grundlage für diese Zemente ist die Zementnorm EN 197-5. Während der Weg für CEM II/C-M-Zemente bereits absehbar ist, sind für die Verwendung von CEM VI-Zementen und weiteren Zementen mit vergleichbar geringen Klinkergehalten die Weichen noch zu stellen: Dabei wird es auf die Ausgestaltung der Rahmenbedingungen für die Anwendung der Zemente im Beton ankommen. Hierzu gehört auch, dass entsprechende Betone gezielt ausgeschrieben werden. Bereits heute lässt sich ermitteln, ob ein Beton auf der Basis eines CO<sub>2</sub>-effizienteren Zements vergleichbare technische Eigenschaften für die konkrete Anwendung aufweist. Die Frage, welche Zementart bei vergleichbarer technischer Leistungsfähigkeit in einem Transportbetonwerk, einem Fertigteilwerk oder einer anderen Anwendung zum Einsatz kommt, hängt zugleich aber auch von der Verfügbarkeit der dafür notwendigen Ausgangsstoffe ab.

### 1 Allgemeines

Die Verwendung klinkereffizienter Zemente macht im Szenario „Klimaneutralität“ der Studie „Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien“ des VDZ [1] etwa 20 % der angenommenen Minderungen aus und ist somit ein wichtiger Hebel. Der Markteinführung dieser Zemente kommt daher eine große Bedeutung zu und gemeinsames Ziel muss es sein, Betonherstellung und Bauausführung hierauf auszurichten. Dabei ist die Verwendung klinkereffizienter Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen nicht neu. Sie hat in vielen europäischen Ländern – auch in Deutschland – eine lange und erfolgreiche Tradition. Klinkereffiziente Zemente kommen bereits seit vielen Jahren zum Einsatz, auch weil dadurch die CO<sub>2</sub>-Emissionen aus der Zementherstellung reduziert werden können [2]. Bereits in der deutschen Zementnorm DIN 1164 waren neben dem Portlandzement auch Zemente mit den Hauptbestandteilen Hüttensand und Trass, später auch mit Flugasche, gebranntem Schiefer und nicht gebranntem Kalkstein definiert.

Die europäische Zementnorm EN 197-1 erweiterte das Produktportfolio um Zemente mit natürlichen getemperten Puzzolanen und Silikastaub. Sie bietet somit die Möglichkeit, Zemente mit niedrigeren Klinkergehalten herzustellen. Der Klinker/Zement-

Faktor konnte so in den vergangenen Jahrzehnten auf durchschnittlich 71 % gesenkt werden. Im Klimaneutralitätsszenario wird ein Wert von 53 % in 2050 angestrebt. Die normative Grundlage ist u.a. die neue Zementnorm EN 197-5. In CEM II/C-Zementen kann der Klinkergehalt auf bis zu 50 M.-% reduziert werden. So lassen sich beispielsweise Zemente mit 20 M.-% nicht gebranntem Kalkstein und bis zu 30 M.-% eines anderen Hauptbestandteils wie Hüttensand, Flugasche oder gebrannter Schiefer herstellen (Tafel 1).

Diese Zemente können erheblich zum Klimaschutz beitragen und weisen gleichzeitig eine gute Leistungsfähigkeit auf. Sie sind daher für sehr viele bautechnische Anwendungen gut geeignet. Durch die Verwendung von CEM II/C-M für Innenbauteile und „normale“ Außenbauteile (mit Expositionsanforderung XC1-4, XF1) lassen sich bis zu 25 % spezifische CO<sub>2</sub>-Emissionen in den genannten Anwendungsbereichen einsparen. CEM VI-Zemente, die ebenfalls bis zu 20 M.-% ungebrannten Kalkstein enthalten, ermöglichen eine weitere Senkung des Klinkergehalts im Zement auf bis zu 35 M.-%. Auch wenn ihr Einsatz in den nächsten Jahren auf ausgewählte Anwendungen begrenzt bleiben wird, werden diese Zemente wegen ihres noch einmal geringeren CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Dieser Beitrag stellt wesentliche Schritte zur weiteren Reduzierung des Klinker/Zement-Faktors dar und basiert in Teilen auf Ausführungen u.a. in [3, 4] sowie mehreren Ausgaben der VDZ-Mitteilungen.

### 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).

Tafel 1: Zusammensetzung besonders klinkereffizienter CEM II/C-M- und CEM VI-Zemente in DIN EN 197-5:2021-07

Hauptarten	Bezeichnung der Produkte (Zementarten)		Zusammensetzung (Massenanteil in Prozent) <sup>a</sup>										
			Hauptbestandteile									Nebenbestandteile	
	Klinker	Hütten-sand	Silica-staub	Puzzolan		Flugasche		Gebrannter Schiefer	Kalkstein				
				natürlich	natürlich getempert	kieselsäure-reich	kalk-reich		L <sup>c</sup>	LL <sup>c</sup>			
Produkt-name	Produkt-bezeichnung	K	S	D <sup>b</sup>	P	Q	V	W	T	L <sup>c</sup>	LL <sup>c</sup>		
CEM II	Portland-komposit-zement <sup>d</sup>	CEM II/C-M	50 bis 64	----- 36 bis 50 -----									0 bis 5
CEM VI	Komposit-zement	CEM VI (S-P)	35 bis 49	31 bis 59	—	6 bis 20	—	—	—	—	—	—	0 bis 5
		CEM VI (S-V)	35 bis 49	31 bis 59	—	—	—	6 bis 20	—	—	—	—	0 bis 5
		CEM VI (S-L)	35 bis 49	31 bis 59	—	—	—	—	—	—	6 bis 20	—	0 bis 5
		CEM VI (S-LL)	35 bis 49	31 bis 59	—	—	—	—	—	—	—	6 bis 20	0 bis 5

<sup>a</sup> Die Werte in der Tabelle beziehen sich auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile.  
<sup>b</sup> Im Fall einer Verwendung von Silicastaub ist der Anteil an Silicastaub auf 6 % bis 10 % Massenanteil begrenzt.  
<sup>c</sup> Im Fall einer Verwendung von Kalkstein ist der Anteil an Kalkstein (Summe von L, LL) auf 6 % bis 20 % Massenanteil begrenzt.  
<sup>d</sup> Die Anzahl der Hauptbestandteile, außer Klinker, ist auf zwei begrenzt und diese Hauptbestandteile müssen durch die Bezeichnung des Zements angegeben werden (Beispiele: siehe Abschnitt 6).

## 2 Anwendung von CEM II/C-M-Zementen

### 2.1 Allgemeines

Der VDZ hat in einer Studie zu den Eigenschaften von Mörteln und Betonen unter Verwendung von CEM II/C-M (S-LL) Ergebnisse eigener Untersuchungen sowie Daten anderer Quellen ausgewertet und in der Ausgabe 10/2019 der Fachzeitschrift **beton** veröffentlicht [5]. Aus dieser Studie werden nachfolgend beispielhaft Ergebnisse für CEM II/C-M (S-LL)-Zemente zur Carbonatisierung und zum Frost-Tausalz-Widerstand vorgestellt. Die Ergebnisse werden mit den in Deutschland üblichen Bewertungskriterien bzw. mit den Eigenschaften von Betonen mit Zementen verglichen, die langjährig in der Praxis verwendet werden. Dies sind z.B. Betone mit den Zementarten CEM I, CEM II/A-LL, CEM II/B-S, CEM II/B-M (S-LL) oder CEM III/A.

### 2.2 Carbonatisierung

In Bild 1 sind die Carbonatisierungstiefen von Betonen – bestimmt gemäß DAfStb Heft 422 – mit einem Zementgehalt von 260 kg/m<sup>3</sup> und einem Wasserzementwert w/z = 0,65 dargestellt. Für die Expositions-klasse XC3 müssen Betone in Deutschland diese Zusammensetzung aufweisen sowie die Anforderungen an die Festigkeitsklasse C20/25 einhalten.

Die Betone mit den Zementarten CEM II/B-M (S-LL) sowie CEM II/C-M (S-LL) ordnen sich zwischen einem Beton mit CEM I und einem Beton mit CEM III/A ein. Diese sind Betone, die nach DIN 1045-2 für die Expositions-klasse XC3 erlaubt und daher seit langem in der praktischen Anwendung sind.

### 2.3 Frost-Tausalz-widerstand

Für die Expositions-klasse XF4 müssen Betone in Deutschland einen Mindestzement-

gehalt von 320 kg/m<sup>3</sup>, einen Wasserzementwert von höchstens 0,50 und einen größt-kornabhängigen Gehalt an künstlichen Luftporen von mindestens 3,5 Vol.-% bis 5,5 Vol.-% aufweisen. Die Druckfestigkeit muss die Anforderungen an die Druckfestigkeits-klasse C30/37 erfüllen. Im Zulassungsverfahren des DIBt wird das CDF-Verfahren in Kombination mit dem BAW-Grenzwert [7] verwendet: Die Abwitterung nach 28 FTW darf höchstens 1,5 kg/m<sup>2</sup> betragen. Bild 2 zeigt die Abwitterungen nach 28 FTW. Betone mit CEM II/C-M (S-LL) liegen teilweise auch jenseits des Grenzwerts. Eine generelle Freigabe für die Expositions-klasse XF4 ist daher nicht möglich.

### 2.4 Zulassung und Anwendungsregeln

Auf der Basis der Auswertung in [5] enthält der Entwurf der DIN 1045-2 einen Vorschlag zu Anwendungsregeln für CEM II/

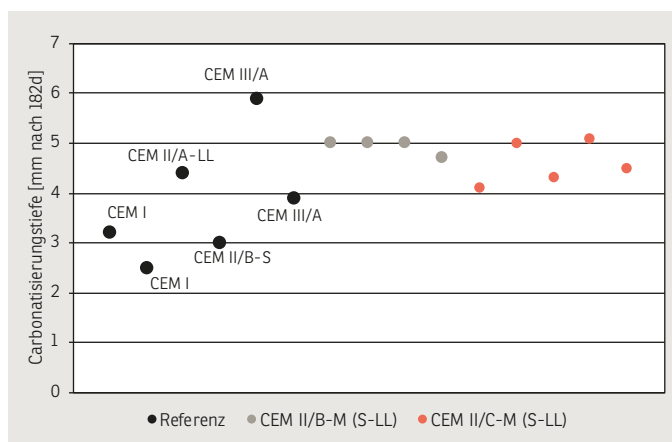


Bild 1: Carbonatisierungstiefen von Betonen mit einem Zementgehalt von 260 kg/m<sup>3</sup> und einem Wasserzementwert von 0,65 [6]

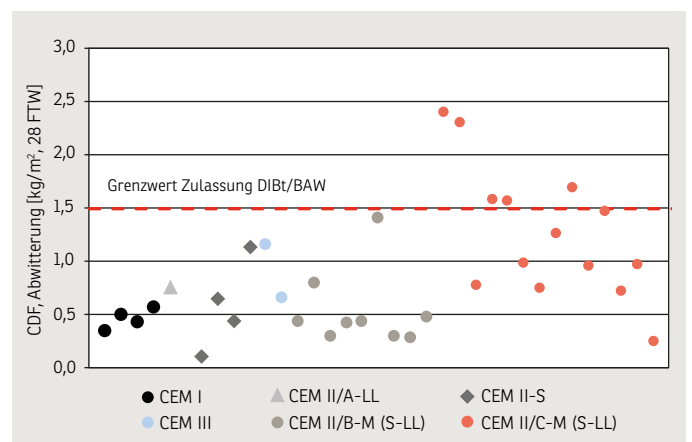


Bild 2: Abwitterung der Betone mit einem Zementgehalt von 320 kg/m<sup>3</sup>, einem Wasserzementwert von 0,5 und einem Luftgehalt von 5,0 ± 0,5 Vol.-% im CDF-Verfahren [6]

# DEKARBONISIERUNG

Tafel 2: CEM II/B-M und CEM II/C-M (S-LL) in E DIN 1045-2:2022-07, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton — Teil 2: Beton; Tabelle F.5

Expositionsklassen X = gültiger Anwendungsbereich O = für die Herstellung nach dieser Norm nicht anwendbar			Bewehrungskorrosion										Betonangriff									Spannstahlverträglichkeit		
			Kein Korrosions-/Angriffsrisiko	durch Karbonatisierung verursachte Korrosion					durch Chloride verursachte Korrosion					Frostangriff				Aggressive chemische Umgebung			Verschleiß			
									andere Chloride als Meerwasser		Chloride aus Meerwasser													
				X0	XC1	XC2	XC3	XC4	XD1	XD2	XD3	XS1	XS2	XS3	XF1	XF2	XF3	XF4	XA1	XA2	XA3		XM1	XM2
CEM II	A	S-D; S-T; S-LL; D-T; D-LL; T-LL; S-V; V-T; V-LL	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
		S-P; D-P; D-V; P-V; P-T; P-LL	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X	O	X	X	X	X	X	X	X	
	B	S-D; S-T; D-T; S-V; V-T	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
		S-P; D-P; D-V; P-T; P-V	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	X	O	X	X	X	X	X	X	X	
		S-LL*, V-LL*, T-LL*	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X	
		S-LL; D-LL; P-LL; V-LL; T-LL	X	X	X	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	O	X	
	C	M	S-LL	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X	

\* Anmerkung: Der zulässige Kalksteingehalt der Zemente (S-LL), (V-LL) und (T-LL) ist auf 20 M.-% begrenzt. Die Einhaltung des maximal zulässigen Kalksteingehalts ist durch den Hersteller des Zements zu erklären

C-M (S-LL)-Zemente. Die Anwendungsmöglichkeiten wurden mit der Wissenschaft, der Bauaufsicht, öffentlichen Bauherren und der Bauindustrie diskutiert. Im Ergebnis können CEM II/C-M (S-LL)-Zemente, wie CEM II/B-M (S-LL, V-LL, T-LL)-Zemente, zukünftig gemäß DIN 1045-2 mit Ausnahme von Bauteilen mit hoher Wassersättigung und Frost (XF3) sowie bei einer Beanspruchung durch Frost und Tausalze (XF2, XF4) in allen Expositionsklassen eingesetzt werden (Tafel 2).

Die zukünftige normative Regelung wird bereits jetzt durch das DIBt umgesetzt: In Zulassungen müssen für die Zemente CEM II/B-M (S-LL, V-LL, T-LL) und CEM II/C-M (S-LL) ohne Sondereigenschaften Dauerhaftigkeitsnachweise nur noch für XF2, XF3 und XF4 erbracht werden. Die neuen Portlandkompositzemente CEM II/C-M, für die eine Reihe allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassungen für ihre Anwendung vorliegen, können somit mindestens für Innenbauteile XC1 und Außenbauteile XC4 verwendet werden. Das ist insofern von Bedeutung, als etwa 70 % des Ortbetons in Deutschland in diesen Expositionsklassen verwendet werden. Mit Nachweis in der Zulassung kann auch eine Freigabe in XF2, XF3 und XF4 erfolgen. Auch solche Zulassungen liegen vor. Somit sind folgende Zementarten in allen Expositionsklassen verwendbar:

- Portlandzement CEM I,
- Portlandhüttenzemente CEM II/A-S und CEM II/B-S,
- Portlandschieferzemente CEM II/A-T und CEM II/B-T,
- Portlandkalksteinzemente CEM II/A-LL,
- Portlandflugaschezemente CEM II/A-V und CEM II/B-V,
- Portlandkompositzemente CEM II/A-M mit S, LL, T, V bzw. D<sup>1)</sup>,
- Portlandkompositzemente CEM II/B-M mit S, T, V bzw. D<sup>1)</sup>,
- Portlandkompositzemente CEM II/B-LL, CEM II/B-M und ggf. CEM II/C-M sowie weitere Zemente mit abZ (Anwendungszulassung az),
- Hochofenzemente CEM III/A<sup>2)</sup>,
- Hochofenzemente CEM III/B<sup>3)</sup>.

<sup>1)</sup> (D-V) nicht in XF2/XF4.  
<sup>2)</sup> Expositionsklasse XF4: CEM III/A der Festigkeitsklasse  $\geq 42,5$  N oder der Festigkeitsklasse 32,5 R mit bis zu 50 M.-% Hütten sand.  
<sup>3)</sup> CEM III/B darf in XF4 nur für die folgenden Anwendungsfälle verwendet werden:  
a) Meerwasserbauteile:  $w/z \leq 0,45$ ; Mindestfestigkeitsklasse C35/45 und  $z \geq 340$  kg/m<sup>3</sup>  
b) Räumlaufbahnen:  $w/z \leq 0,35$ ; Mindestfestigkeitsklasse C40/50 und  $z \geq 360$  kg/m<sup>3</sup>; Beachtung von DIN 19569-1  
c) Auf Luftporen kann in beiden Fällen verzichtet werden.

## 3 Klinkereffizienz im Beton

### 3.1 Allgemeines

Die entscheidende Frage ist, mit welchem Konzept künftig die größtmögliche Klinker- und damit CO<sub>2</sub>-Effizienz bei gleichzeitiger Sicherstellung der Dauerhaftigkeit im Baustoff Beton erreicht werden kann. Die Betonnorm DIN 1045-2 sieht derzeit feste Grenzzusammensetzungen für die jeweilige Expositionsklasse vor. Für die Anwendung von Zementen gilt bisher: Eine Anwendung ist entweder erlaubt oder ausgeschlossen. Eine Variation der Grenzzusammensetzung in Abhängigkeit von der Leistungsfähigkeit des Zements gibt es nicht.

Für die Praxis hat dieser Ansatz den Vorteil, einfach und wenig anfällig für Fehler zu sein. Für Ressourceneffizienz und CO<sub>2</sub>-Reduzierung ist er insofern nicht optimal, als die Grenzzusammensetzungen aus Zeiten stammen, in denen der Anteil der Portlandzemente am Inlandversand noch rd. 80 % betrug und von CEM II/C- und CEM VI-Zementen noch keine Rede war. Die Prüfungen der Zemente im Beton im Hinblick auf Dauerhaftigkeit (Carbonatisierung, Chlorideindringen, Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand) erfolgen heute bei bauaufsichtlichen Zulassungen in einer Grenzzusammensetzung für die betrachtete Expositionsklasse. Diese Grenzzusammensetzungen sind der Betonnorm DIN 1045-2

# Lebensdauer von Betonbau- werken verlängern

Gerne unterstützen  
wir Sie mit folgenden  
Leistungen:

- Bauwerksdiagnose und Beurteilung der Untersuchungsergebnisse
- Aufklärung von Schadensfällen (z.B. Rissbildungen und Verfärbungen)
- Abschätzung der Restnutzungsdauer des Bauwerks und der Stahlbetonbauteile
- Ermittlung des Instandsetzungsbedarfs
- BIM-gestützte Schadensaufnahme und Instandsetzungsplanung



Profitieren Sie von unserem ganzheitlichen Bauwerksmanagement, um die Lebensdauer Ihrer Betonbauwerke effizient zu verlängern.




**Kontaktieren Sie uns:**

bte@vdz-online.de

+49(0)211 45 78-343

<https://vdz.info/c2ecj>

Folgen Sie uns auf 

entlehnt. Ein entscheidender Parameter ist insbesondere der maximale Wasserzementwert. Eine entsprechende Änderung der Randbedingungen in der Prüfung, z.B. eine Absenkung des Wasserzementwerts, wird nunmehr auch in Zulassungsverfahren für Zemente möglich sein.

### 3.2 Beispiel Carbonatisierung

Bild 3 zeigt Prüfergebnisse von klinkereffizienten Zementen vor dem Bewertungshintergrund des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt). Diese Prüfung ist derzeit mit einem Wasserzementwert von  $w/z = 0,50$  durchzuführen. Während sich beispielsweise ein CEM III/A oder auch ein CEM II/C-M (S-LL) in dieser Prüfung mit der geforderten Grenzzusammensetzung gut in den Bewertungshintergrund einordnen, liegt die Carbonatisierungstiefe eines Zements mit 20 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 50 M.-% ungebranntem Kalkstein deutlich außerhalb.

Senkt man den Wasserzementwert auf  $w/z = 0,40$ , ergibt sich bereits ein Prüfergebnis im oberen Bereich des Bewertungshintergrunds. Eine weitere Absenkung auf  $w/z = 0,35$  führt zu einem Ergebnis in der Größenordnung der Referenzzemente. Eine weitere deutliche Reduzierung des Klinkergehalts in Zementen mit hohen Anteilen an ungebranntem Kalkstein wäre somit möglich, wenn die Betone entsprechend zusammengesetzt sind.

## 4 Hilfestellung für Planer

### 4.1 Orientierungswerte für leistungsbezogene Treibhausgasemissionen von Beton

Bereits heute lässt sich ermitteln, ob ein Beton auf Basis eines  $\text{CO}_2$ -effizienteren Zements vergleichbare technische Eigenschaften für die konkrete Anwendung aufweist. Die Frage, welche Zementart bei vergleichbarer technischer Leistungsfähigkeit in einem Transportbetonwerk, einem Fertigteilwerk oder einer anderen Anwendung zum Einsatz kommt, hängt zugleich aber auch von der Verfügbarkeit der dafür notwendigen Ausgangsstoffe ab.

Um zu verdeutlichen, welche  $\text{CO}_2$ -Minderungspotenziale bestehen, sind in Tafel 3

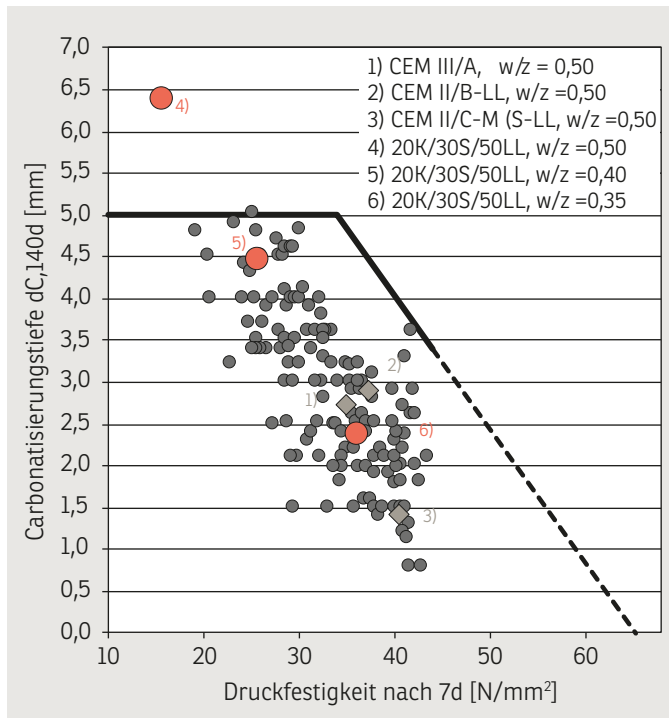


Bild 3: Prüfergebnisse der Carbonatisierung von klinkereffizienten Zementen [8] vor dem Bewertungshintergrund des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt)

Orientierungswerte für Treibhausgasemissionen von Betonen in Abhängigkeit von der gewählten Betondruckfestigkeitsklasse dargestellt. Tafel 4 zeigt zudem eine Dar-

stellung unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit des Betons ( $\text{CO}_2$ -Äquivalent/ $\text{m}^3$  Beton  $\times$  MPa). Hieraus wird Folgendes ersichtlich:

- In den höheren Festigkeitsklassen sind die leistungsbezogenen Treibhausgasemissionen geringer als in den niedrigen Festigkeitsklassen.
- Diese Betrachtung ergibt Sinn bei Ausnutzung der höheren Festigkeit durch eine Verringerung der Bauteilabmessung, d.h., wenn materialsparend gebaut wird.
- Sind höhere Festigkeiten aus statischen Gründen oder durch die Expositions-kategorie begründet, ohne dass eine Materialeinsparung möglich ist, kann anhand dieser Werte die  $\text{CO}_2$ -Effizienz des Betons beschrieben werden.

Der ressourceneffiziente Entwurf wird zukünftig weiter an Bedeutung gewinnen: „So viel wie nötig, so wenig wie möglich“. Insofern kann, je nach technischer Anforderung, bereits heute durch den Einsatz  $\text{CO}_2$ -effizienter Zemente im Beton oder durch den materialsparenden Einsatz von Beton oft klimaschonender gebaut werden. Gleichzeitig gilt es, die notwendigen rechtlichen und normativen Voraussetzungen zu schaffen, um die breite Anwendung neuer  $\text{CO}_2$ -effizienter Zemente zu ermöglichen und zu beschleunigen. Diese Daten und Überlegungen haben Eingang gefunden in die Planungshilfe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton [9].

Tafel 3: Orientierungswerte für Treibhausgasemissionen von Beton

1	Bezeichnung	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 45/55	C 50/60
2		Treibhausgasemissionen (kg $\text{CO}_2$ -Äquivalent/ $\text{m}^3$ Beton) <sup>1)</sup>					
3	Beton heutiger Durchschnitt	178	197	219	244	286	300
4	Beton mit CEM I (CSC Benchmark) <sup>2)</sup>	213	237	261	286	312	325
5	Beton 20 % unter Durchschnitt <sup>3)</sup>	142	158	175	195	229	240
6	Beton 30 % unter Durchschnitt <sup>4)</sup>	125	138	153	171	200	210

1) Werte ohne Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung  
 2)  $\text{CO}_2$ -Modul des Concrete Sustainability Council für Deutschland  
 3) z.B. Beton mit CEM III/A oder CEM II/C  
 4) z.B. Beton mit CEM VI

Tafel 4: Orientierungswerte für leistungsbezogene Treibhausgasemissionen von Beton

1	Bezeichnung	C 20/25	C 25/30	C 30/37	C 35/45	C 45/55	C 50/60
2		leistungsbezogene Treibhausgasemissionen <sup>1)</sup> (kg $\text{CO}_2$ -Äquivalent/ $\text{m}^3 \cdot \text{MPa}$ )					
3	Beton heutiger Durchschnitt	6,1	5,8	5,3	5,0	4,8	4,7
4	Beton mit CEM I (CSC Benchmark) <sup>2)</sup>	7,3	7,0	6,4	5,8	5,3	5,1
5	Beton 20 % unter Durchschnitt <sup>3)</sup>	4,9	4,6	4,3	4,0	3,9	3,8
6	Beton 30 % unter Durchschnitt <sup>4)</sup>	4,3	4,1	3,7	3,5	3,4	3,3

1) Berechnung der Werte auf Basis mittlerer Festigkeiten  $f_{cm,cube}$ : Beispiel C20/25 Zeile 3:  $178/(f_{ck}+4) = 178/29 = 6,1$   
 2)  $\text{CO}_2$ -Modul des Concrete Sustainability Council für Deutschland  
 3) z.B. Beton mit CEM III/A oder CEM II/C  
 4) z.B. Beton mit CEM VI

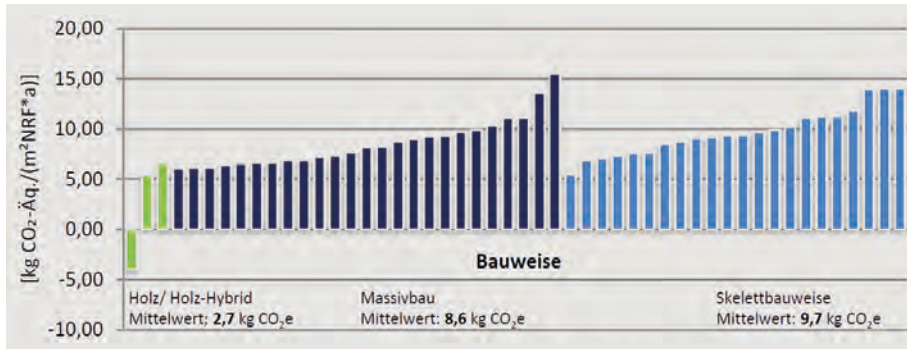


Bild 4: Treibhausgasemissionen (GWPK) in Abhängigkeit von der Bauweise/dem Material des Tragwerks (n = 50) [11]

## 4.2 Orientierungswerte für die Treibhausgasemissionen von Gebäuden

Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. hat 50 zertifizierte Gebäude hinsichtlich ihres CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks ausgewertet. Darunter befanden sich drei Holz- bzw. Holzhybridgebäude, 25 Gebäude in Massivbau- und 22 in Stahlbeton-Skelettbauweise. Beim Vergleich der Herstellungsemissionen der Bauteile fallen die Decken mit mehr als einem Drittel besonders ins Gewicht, gefolgt von den Außenwänden und der Gründung. Ein weiteres Ergebnis: Gut ein Drittel aller Treibhausgasemissionen eines Gebäudes entstehen vor der Nutzung – bei der Herstellung und Errichtung. Die Hebel zur Reduzierung dieser verbau-

ten CO<sub>2</sub>-Emissionen liegen nach [10] in der Bauweise, den Bauteilen mit großer Masse und der Nutzungsdauer der Baustoffe. Die Studie liefert Planenden und Auftraggebern Orientierungswerte für ihre eigenen Bauprojekte. Folgestudien sind in Planung [10].

Für die Stahlbetonskelettbauweise wurden in [11] Werte zwischen 6,1 kg/m<sup>2</sup>·a CO<sub>2</sub> und 15,5 kg/m<sup>2</sup>·a CO<sub>2</sub> gefunden. Der Mittelwert wird mit 9,7 kg/m<sup>2</sup>·a CO<sub>2</sub> angegeben. Für die Gruppe der „besten“ Massiv- und Skelettbauweise-Gebäude (Gebäude innerhalb des 15%-Perzentilwerts) wird festgestellt, dass die Treibhausgasemissionen der Gebäudeerrichtung jeweils 24 % unter dem Mittelwert liegen. Die Gruppe der „schlechtesten“ Gebäude (repräsentiert über

das 90%-Perzentil) liegt zwischen 30 % und 40 % über dem Mittelwert. Insofern gilt es für die Massivbauweisen zukünftig herauszuarbeiten, welche Optimierungspotenziale im Hinblick auf Klimaschutz und Ressourceneffizienz bestehen. Klinkereffiziente Zemente leisten dabei einen wichtigen Beitrag.

## Literatur

- [1] Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minde-rungspfade und Handlungsstrategien. Verein Deutscher Zementwerke (VDZ), Düsseldorf 2020
- [2] CEM II- und CEM III/A-Zemente im Betonbau – Nachhaltige Lösungen für das Bauen mit Beton (2008). www.beton.org
- [3] Müller, C.; Mohr, M.: Wie gelingt die Dekarbonisierung des Betonbaus in der Praxis? konstruktiv 2, Bau-kammer, Berlin 2021
- [4] Müller, C.; Mohr, M.: Wie gelingt die Dekarbonisierung des Betonbaus in der Praxis? HeidelbergCement Newsletter Technik, Leimen 2021
- [5] 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
- [6] Müller, C.; Palm, S.: Anwendung klinkereffizienter Zemente. HeidelbergCement Newsletter Technik, Leimen 2020
- [7] Frostprüfung von Beton. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe 2012
- [8] 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, S. 225–234
- [9] Nachhaltig bauen mit Beton – Planungshilfe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAStb), Berlin 2021
- [10] „DGNB veröffentlicht Studie zu CO<sub>2</sub>-Emissionen von Bauwerken“. DGNB-Pressemitteilung, Stuttgart 2021
- [11] Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden. Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V., Stuttgart 2021

## Fachbücher für die Tragwerksplanung und den Betonbau

### Weißer Wannen – einfach und sicher

Konstruktion und Ausführung wasserundurchlässiger Bauwerke aus Beton



Lohmeyer / Ebeling  
11. Auflage, 2018,  
592 S., 16,5 x 23,5 cm, geb.,  
€ 88,00  
ISBN 978-3-7640-0623-5

### Betonböden für Produktions- und Lagerhallen

Planung, Bemessung, Ausführung



Lohmeyer / Ebeling  
4. Auflage, 2019,  
608 S., 16,5 x 21 cm, geb.,  
€ 88,00  
ISBN 978-3-7640-0628-0

### Tiefgaragen + Parkdecks

Hinweise und Empfehlungen zur Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit für Parkbauten aus Beton



Lohmeyer / Ebeling  
3. Auflage, 2020,  
480 S., 16,5 x 23,5 cm, geb.,  
€ 88,00  
ISBN 978-3-7640-0635-8

edition beton