

Dekarbonisierung von Zement und Beton

Christoph Müller, VDZ Technology gGmbH, Düsseldorf

Infobox: Kernaussagen des Artikels

- Eine klimaneutrale Betonbauweise ist möglich; aber auch eine große Herausforderung.
- Die Mitwirkung der gesamten Wertschöpfungskette von Planern und Architekten bis hin zur Bauausführung ist gefragt.
- CO₂-effiziente Zemente und Betone können heute bereits verwendet werden.
- Mit neuen Zementen CEM II/C können kurzfristig 20 % CO₂ eingespart werden
- CO₂-effiziente Bauteile und Konstruktionen aus Beton bieten weitere Potenziale.
- Wahrscheinlich wird es weniger „all-purpose“-Zemente geben.
- Die Diversifizierung der Leistungsfähigkeit von Beton wird zunehmen.
- Die Nachbehandlung von Beton wird noch wichtiger.
- Neue Konzepte (z. B. ERC) müssen die Dekarbonisierung in bestmöglicher Weise unterstützen

Einführung in das Thema

Die Betonbauweise steht auf dem Weg zur Klimaneutralität vor großen Herausforderungen. Hintergrund ist, dass bei der Herstellung von Zement bzw. seinem Vorprodukt Portlandzementklinker große Mengen an CO₂ freigesetzt werden. Rund zwei Drittel davon entfallen auf rohstoffbedingte Prozessemissionen aus der Entsäuerung des Kalksteins und rund ein Drittel auf energiebedingte CO₂-Emissionen aus dem Einsatz der Brennstoffe (Bild 1). Seit 1990 ist es den deutschen Zementherstellern gelungen, die CO₂-Emissionen sowohl spezifisch als auch absolut in einer Größenordnung von 20 bis 25 % zu reduzieren. Entscheidend für diese Minderungserfolge waren neben Verbesserungen der thermischen Effizienz vor allem zwei Faktoren: Erstens die Senkung der Klinkergehalte im Zement und zweitens der verstärkte Einsatz biomassehaltiger alternativer Brennstoffe, durch die fossile Energieträger mehrheitlich ersetzt wurden.

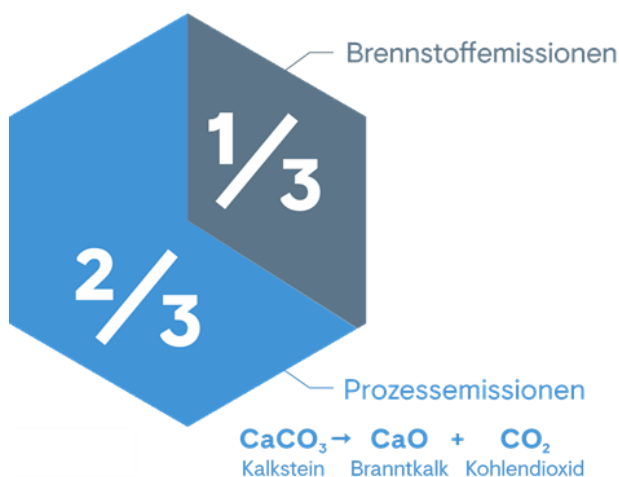


Bild 1. Direkte CO₂-Emissionen aus der Zementherstellung (Quelle: VDZ)

Bei der weiteren Minderung ihrer CO₂-Emissionen stößt die Zementindustrie jedoch zunehmend an Grenzen, denn insbesondere die prozessbedingten CO₂-Emissionen der Klinkerherstellung sind mit konventionellen Maßnahmen nicht zu mindern. Die Zementindustrie benötigt dafür die Mitwirkung der gesamten Wertschöpfungskette, angefangen mit dem Anlagenbau und den Betonherstellern über die bauausführende Industrie bis hin zu Planern und Architekten. Zudem wird es darauf ankommen, neben konventionellen Minderungsmaßnahmen auch ganz neuartige Technologien in der Herstellung und Anwendung von Zement und Beton einzusetzen. Dazu gehören neben der Verwendung teils neuer, CO₂-effizienter Rohstoffe in der Produktion von Zement und Beton sowie materialsparender Konstruktionsprinzipien letztlich auch die Abscheidung von CO₂ im Zementwerk und dessen anschließende Nutzung bzw. Speicherung („Carbon Capture and Utilisation/Storage“ – CCUS).

Der vorliegende Artikel fasst die wichtigsten Kernaussagen der Studie „Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien“ des VDZ [1] zusammen und betrachtet die zu erwartenden Folgen für das Bauen mit Beton. Wesentliche Teile des Textes wurden aus [1], [2], [3] und [4] übernommen. Im Fokus steht dabei die Darstellung von CO₂-Minderungsoptionen, die Planer und Architekten sowie Bauherren bereits heute beeinflussen können, um den CO₂-Fußabdruck von Bauwerken oder Bauteilen aus Beton zu reduzieren. Gleichzeitig werden die Voraussetzungen für eine klimaneutrale Betonbauweise in 2050 aufgezeigt. Eine entscheidende Rolle für die Erreichung dieses Ziels spielt das Mitwirken aller am Bauprozess Beteiligten. Fragen der Verwendung CO₂-effizienter Zemente und Betone im Hinblick auf die möglichen Auswirkungen für die Bauausführung werden angesprochen.

Der Weg der Betonbauweise zur Klimaneutralität

Die Dekarbonisierung von Zement und Beton macht Maßnahmen entlang der gesamten Wertschöpfungskette erforderlich. Die Studie in [1] betrachtet deshalb einen breiten Mix von Minderungsoptionen auf allen fünf Wertschöpfungsstufen der Betonbauweise (Klinker/Zement/Beton/Bauwerk/CO₂-Aufnahme im Beton) und stellt diese anhand von zwei Szenarien bis zum Jahr 2050 dar: ein ambitioniertes Referenzszenario und ein Szenario Klimaneutralität. Ausgangspunkt ist die Frage, wie die heutigen CO₂-Emissionen der Zementindustrie in Deutschland von rund 20 Mio. Tonnen bis 2050 auf Netto-Null gesenkt werden können.

Aus Sicht von Planern, Architekten und Bauherren stellen dabei die Auswahl und Anwendung des Betons (einschließlich der verwendeten Zemente) sowie die Baukonstruktion inkl. deren Nutzungsdauer die wesentlichen Einflussfaktoren dar. Im Folgenden werden zunächst die Ergebnisse der Szenarien kurz zusammengefasst und anschließend einzelne CO₂-Minderungsoptionen, die aus Sicht der Planung besonders relevant erscheinen, vertieft betrachtet.

Das **ambitionierte Referenzszenario** basiert im Kern auf dem Einsatz heute verfügbarer CO₂-Minderungstechnologien und legt hierbei sehr anspruchsvolle Annahmen zugrunde. Es ist insofern keineswegs als „business-as-usual“-Pfad zu verstehen. Neben weiteren deutlichen Steigerungen der thermischen Effizienz und des Einsatzes biomassehaltiger alternativer Brennstoffe bei der Zementklinkerherstellung wird hier beispielsweise auch ein breiter Einsatz von CO₂-effizienten CEM II/C-Zementen in der Praxis angenommen.

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 Hauptbestandteilen wie Hüttensand, Flugasche oder gebrannter Schiefer herstellen (Tabelle 1).

Durch die Kombination der in ihrem Aufkommen limitierten Ausgangsstoffe Hüttensand und Flugasche mit ungebranntem Kalkstein wird ihre Reichweite erhöht.

Hauptarten	Bezeichnung der Produkte (Zementarten)		Zusammensetzung (Massenanteil in Prozent) ^a										Nebenbestandteile
			Hauptbestandteile										
	Klinker	Hüttensand	Silicastaub	Puzzolan		Flugasche		Gebrannter Schiefer	Kalkstein				
				natürlich	natürlich getempert	kieselsäurereich	kalkreich		L ^c	LL ^c			
Produktname	Produktbezeichnung	K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L ^c	LL ^c		
CEM II	Portlandkompositzement ^d	CEM II/C-M	50 bis 64	←----- 36 bis 50 -----→								0 bis 5	
CEM VI	Kompositzement	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

^a Die Werte in der Tabelle beziehen sich auf die Summe der Haupt- und Nebenbestandteile.
^b Im Fall einer Verwendung von Silicastaub ist der Anteil an Silicastaub auf 6 % bis 10 % Massenanteil begrenzt.
^c Im Fall einer Verwendung von Kalkstein ist der Anteil an Kalkstein (Summe von L, LL) auf 6 % bis 20 % Massenanteil begrenzt.
^d 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).

Tabelle 1. CEM II/C-M- und CEM VI-Zemente in der (nicht harmonisierten) Produktnorm EN 197-5

Mit einem Klinkeranteil zwischen 50 und 65 % wird diese neue Zementart deutlich zur CO₂-Minderung beitragen. Zudem führen Weiterentwicklungen der Betonbauweise im Sinne der Ressourceneffizienz zu Materialeinsparungen und damit auch in gewissem Umfang zur CO₂-Reduzierung.

Das **Szenario Klimaneutralität** geht über das ambitionierte Referenzszenario noch einmal hinaus und stößt damit an die Grenzen des aus heutiger Sicht technisch Machbaren. Wesentlicher Unterschied gegenüber dem Referenzszenario ist die zusätzliche Anwendung von Breakthrough-Technologien. Hierzu zählen etwa die Markteinführung von CEM VI-Zementen mit einem Klinkeranteil zwischen 35 und 50 % oder der Einsatz von Wasserstoff als Energieträger bei der Zementklinkerherstellung. CEM VI-Zemente sind ebenfalls in EN 197-5 enthalten. Anwendungsregeln müssen aber noch geschaffen werden. Unter Umständen müssen dafür betontechnologische Eckpunkte, wie zum Beispiel die maximalen Wasserzementwerte in Abhängigkeit von den Expositionsklassen, modifiziert werden. Außerdem werden weitere Effizienzsteigerungen und Innovationen in der Herstellung und Anwendung von Beton angenommen. Dadurch wird in Summe rund die Hälfte der heutigen Emissionen gemindert. Die verbleibende CO₂-Menge in Höhe von rund 10 Mio. Tonnen pro Jahr wird in diesem Szenario schließlich durch den flächendeckenden Einsatz von CCUS-Technologien reduziert. Zusätzlich können durch die nachhaltige Nutzung von biomassehaltigen Abfällen als Brennstoff bei gleichzeitiger CO₂-Abscheidung (BECCS) jährlich etwa 1,6 Mio. Tonnen CO₂ aus der Atmosphäre entnommen werden. Rechnerisch werden die Gesamtemissionen somit um mehr als 100 % verringert (Bild 2).

Effizienzsteigerungen in Zement, Beton und Konstruktion wurden in Summe zu etwa 5 Mio. Tonnen CO₂ abgeschätzt.

Dies entspräche etwa 25 % der direkten CO₂-Emission in Deutschland.

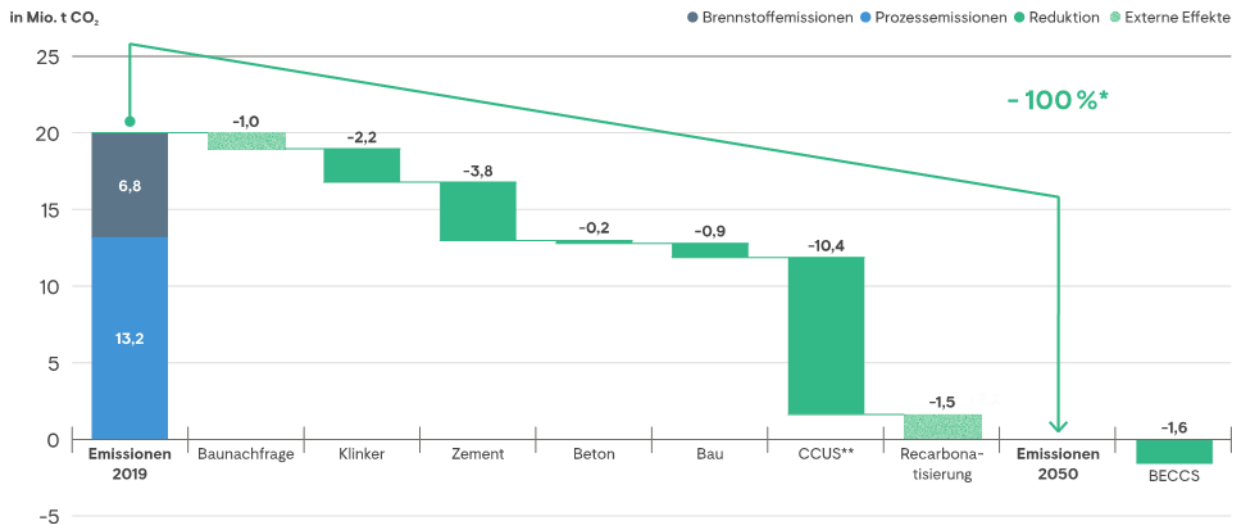
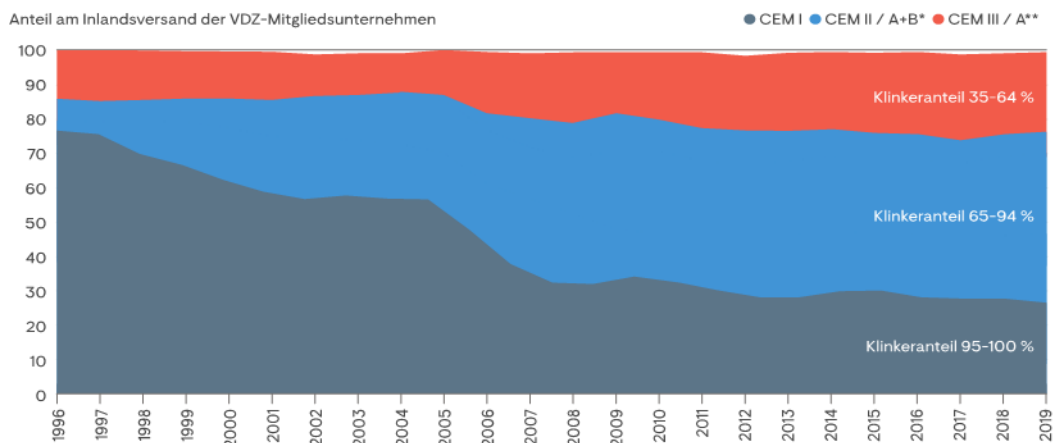


Bild 2. Szenario Klimaneutralität – CO₂-Minderung bis 2050 [1]

CO₂-effiziente Zemente und Betone können bereits verwendet werden

Portlandzementklinker ist der wichtigste Bestandteil von Zement und sorgt für die Festigkeitsbildung des Betons. Darüber hinaus kommen je nach Zementart neben Klinker weitere Rohstoffe – sogenannte Hauptbestandteile – zum Einsatz. Die Zusammensetzung hängt von der jeweiligen Zementart und den in der Zementnorm definieren Mengenanteilen ab. Die Zemente weisen je nach Anwendung im Beton unterschiedliche Leistungsmerkmale auf. Diese sind aus bautechnischer Sicht von Bedeutung, weil damit Betone für unterschiedliche Anwendungen hergestellt werden können. Neben diesen bautechnischen Merkmalen kommt seit einigen Jahren auch dem CO₂-Gehalt eine hohe Bedeutung zu. Die Verringerung des Klinkergehalts ist dabei ein Hebel, um den CO₂-Fußabdruck von Zementen und Betonen zu reduzieren.

Die Verwendung von klinkereffizienten Zementen mit mehreren Hauptbestandteilen hat in Deutschland eine lange und erfolgreiche Tradition. Portlandhüttenzemente CEM II-S und Hochofenzemente CEM III mit Hüttensand als Hauptbestandteil neben dem Portlandzementklinker werden seit mehr als einem Jahrhundert industriell hergestellt und verwendet. Heute werden Hochofenzemente CEM III/A mit etwa 50 % Portlandzementklinker in einigen Regionen als Regelzemente für die Herstellung von Transportbeton im Hoch- und Ingenieurbau verwendet. Portlandkalksteinzemente CEM II/A-LL mit 80-85 % Portlandzementklinker werden in Deutschland seit Beginn der 1980er Jahre hergestellt und im Beton eingesetzt. Die Einführung erfolgte zunächst über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen. Im Jahre 1994 wurden Portlandkalksteinzemente in Deutschland, damals noch in der nationalen Zementnorm DIN 1164-1, gemeinsam mit weiteren Portlandkompositzementen genormt. Von regionaler Bedeutung sind zum Beispiel Portlandölschieferzemente. Einige deutsche Zementhersteller haben in den vergangenen ca. 20 Jahren zudem Portlandkompositzemente CEM II/A-M und CEM II/B-M mit Portlandzementklinkergehalten zwischen 65 und etwa 85 % entwickelt und in den Markt eingeführt. Vor diesem Hintergrund hat der Anteil der Portlandzemente CEM I am Inlandversand kontinuierlich abgenommen und der der CEM II-Zemente entsprechend zugenommen (Bild 3).



Anmerkungen:

Differenz zu 100 % verteilt sich auf CEM IV, CEM V und sonstige Bindemittel;

* CEM II/A+B unterteilt sich größtenteils in Portlandhütten-, Portlandkalkstein- und Portlandkompositzemente;

** Deckt in Deutschland ca. 95 % aller CEM III-Zemente ab

Bild 3. Trend zu klinkereffizienten Zementen im Produktmix der vergangenen Jahre [1]

Klinkereffiziente Zemente kommen in Deutschland also bereits seit vielen Jahren zum Einsatz, auch weil dadurch die CO₂-Emissionen aus der Zementherstellung reduziert werden können. Der Klinker-Zement-Faktor konnte in den letzten Jahrzehnten auf 71 % gesenkt werden. Dadurch haben die Zementhersteller in Deutschland in signifikanter Weise CO₂-Emissionen eingespart.

Die aktuellen Betonnormen DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 enthalten die Anwendungsregeln für Normzemente in Abhängigkeit von den Expositionsklassenⁱ. Enthalten die Betonnormen für einen Zement keine oder eine sehr eingeschränkte Anwendung, so wurde und wird auch heute in diesen Fällen der Nachweis der Eignung für die Anwendung in bestimmten Expositionsklassen durch eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (Anwendungszulassung AZ) des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) erbracht. Aktuell (Auflistung des DIBt 06/2022) gibt es insgesamt 44 dieser Zulassungenⁱⁱ.

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. D¹⁾,
- Portlandkompositzemente CEM II/B-M mit S, T, V bzw. D¹⁾,
- 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/A²⁾,
- Hochofenzemente CEM III/B³⁾.

¹⁾ (D-V) nicht in XF2/XF4.

²⁾ Expositionsklasse XF4: CEM III/A der Festigkeitsklasse $\geq 42,5$ N oder der Festigkeitsklasse 32,5 R mit bis zu 50 M.-% Hüttensand.

- 3) CEM III/B darf in XF4 nur für die folgenden Anwendungsfälle verwendet werden:
- a) Meerwasserbauteile: $w/z \leq 0,45$; Mindestfestigkeitsklasse C35/45 und $z \geq 340 \text{ kg/m}^3$
 - b) Räumlerlaufbahnen: $w/z \leq 0,35$; Mindestfestigkeitsklasse C40/50 und $z \geq 360 \text{ kg/m}^3$; Beachtung-von DIN 19569-1. Auf Luftporen kann in beiden Fällen verzichtet werden.

ⁱ Zum Zeitpunkt der Einführung dieser Normen etwa ab 2002 galten für einige Normzemente Anwendungsbeschränkungen, die vor allem auf die in Deutschland noch nicht hinreichenden praktischen Erfahrungen zurückzuführen waren. Da die derzeit gültige Normausgabe aus dem Jahr 2008 datiert, sind die Anwendungsbeschränkungen noch enthalten.

- ⁱⁱ CEM II/B-M (S-LL): 17
 CEM II/B-M (V-LL): 3
 CEM II/B-M (T-LL): 2
 CEM II/B-M (S-V): 1
 CEM II/B-LL: 1
 CEM II/A-P und CEM II/B-P: 1
 CEM II/C-M (S-LL): 12
 CEM II/C-M (V-LL): 1
 CEM II/A-S 42,5 N (rc) mit rezyklierten Feinstoff aus Betonbruch:1
 CEM II/B-S 42,5 N (rc) mit rezyklierten Feinstoff aus Betonbruch:1
 CEM V/A (S-V):1
 CEM V/A (S-P):1
 Portland-Schiefer-Kalkstein-CSA-Zement:1
 Schieferhochofenzement: 1

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.

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 im Heft 10/2019 der Zeitschrift „beton“ veröffentlicht [6]. Aus dieser Studie werden nachfolgend beispielhaft Ergebnisse für CEM II/C-M (S-LL)-Zemente zur Karbonatisierung 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.

Carbonatisierung

In Bild 4 sind die Karbonatisierungstiefen von Betonen – bestimmt gemäß DAfStb Heft 422 – mit einem Zementgehalt von 260 kg/m^3 und einem Wasserzementwert $w/z = 0,65$ dargestellt. Für die Expositionsklasse XC3 müssen Betone in Deutschland diese Zusammensetzung aufweisen so-wie die Anforderungen an die Festigkeitsklasse C20/25 einhalten.

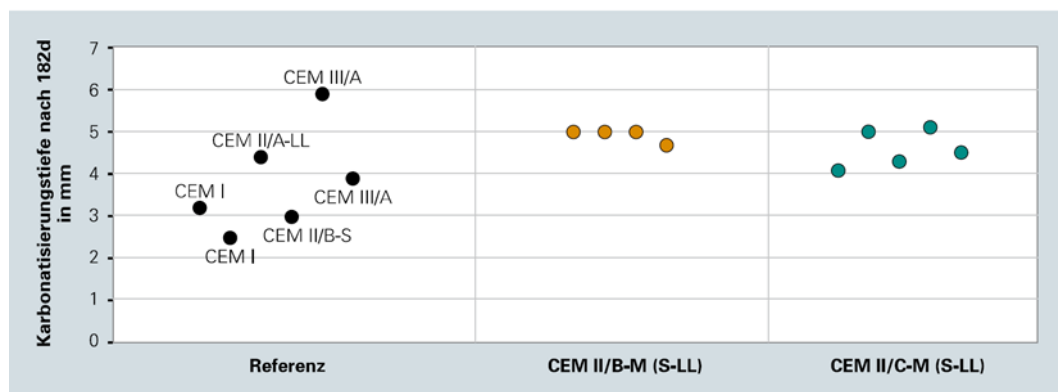


Bild 4. Karbonatisierungstiefen von Betonen mit einem Zementgehalt von 260 kg/m^3 und einem Wasserzementwert von 0,65 [7]

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 Expositionsklasse XC3 erlaubt und daher seit langem in der praktischen Anwendung sind.

Frost-Tausalz-Widerstand

Für die Expositionsklasse XF4 müssen Betone in Deutschland einen Mindestzementgehalt von 320 kg/m^3 , einen Wasserzementwert von höchstens 0,50 und einen größtkornabhängigen Gehalt an künstlichen Luftporen von mindestens 3,5 % bis 5,5 Vol.-% aufweisen. Die Druckfestigkeit muss die Anforderungen an die Druckfestigkeitsklasse C30/37 erfüllen. In Zulassungsverfahren des DIBt wird das CDF-Verfahren in Kombination mit dem BAW-Grenzwert [8] verwendet: Die Abwitterung nach 28 FTW darf höchstens $1,5 \text{ kg/m}^2$ betragen. Bild 5 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 Expositionsklasse XF4 ist daher nicht möglich.

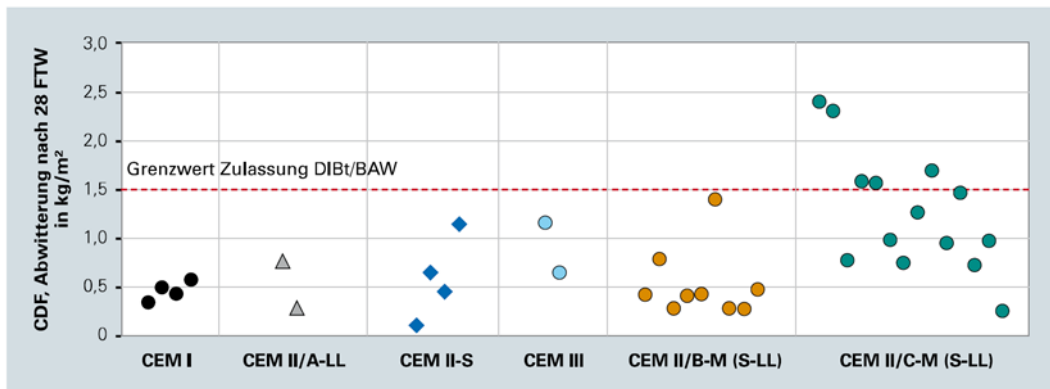


Bild 5. Abwitterung der Betone mit einem Zementgehalt von 320 kg/m^3 , einem Wasserzementwert von 0,5 und einem Luftgehalt von $5,0 \pm 0,5 \text{ Vol.-%}$ im CDF-Verfahren [7]

CEM II/C-M-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 20 % spezifische CO_2 -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_2 -Fußabdruckes zunehmend an Bedeutung gewinnen.

Auf der Basis der Auswertung in [6] enthält der Entwurf der DIN 1045-2 einen Vorschlag zu Anwendungsregeln für CEM II/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 Expositions-klassen eingesetzt werden (Tabelle 2).

Expositionsklassen X = gültiger Anwendungsbereich O = für die Herstellung nach dieser Norm nicht anwendbar			Kein Korrosions- Angriffsrisiko	Bewehrungskorrosion									Betonangriff									Spannstahlverträglichkeit	
				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
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	
		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	M	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
			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
		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
	C	M	S-LL	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X

Fußnoten nicht aufgeführt

Tabelle 2. CEM II/B-M und CEM II/C-M (S-LL) in DIN 1045-2:202x; Tabelle F.3.2.

Der zulässige Kalksteingehalt der Zemente (S-LL), (V-LL) und (T-LL) ist auf 20 M.-% begrenzt. Die Einhaltung des maximal zulässigen Kalksteingehaltes ist durch den Hersteller des Zements zu erklären. Bei den Zementen CEM II/C-M (S-LL) ist der zulässige Kalksteingehalt in der Zementnorm EN 197-5 auf 20 M.-% begrenzt.

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 Sonder-eigenschaften Dauerhaftigkeitsnachweise nur noch für XF2, XF3 und XF4 erbracht werden.

Die Ausgabe „MVV TB 2022/1 – Anhörung“ der Musterverwaltungsvorschrift Technische Bau-bestimmungen enthält die Regelung bereits im Abschnitt C 2 „Voraussetzungen zur Abgabe der Übereinstimmungserklärung für Bauprodukte nach § 22 MBO“ als Anlage C 2.1.8.

Betone für den üblichen Hochbau (Innenbauteile XC1 und Außenbauteile XC4/XF1) können je nach Verfügbarkeit mit allen zuvor genannten Zementen hergestellt werden. Dies ist insofern von Bedeutung, als etwa 70 % des Ortbetons in Deutschland in diesen Expositionsklassen verwendet werden.

Alternative Bindemittel

Weltweit wird – zum Teil bereits seit Langem – daran gearbeitet, alternative Klinker bzw. Bin-demittel-Systeme möglichst mit geringen spezifischen CO₂-Emissionen und vergleichbarer Leistungsfähigkeit sowie Verfügbarkeit wie Portlandzementklinker herzustellen. Die Forschun-gen befinden sich jedoch vielfach noch im Laborstadium. Die Marktentwicklung wird in diesen Fällen Zeit für die sorgfältige technische und praktische Erprobung und Untersuchung der lang-fristigen Eignung erfordern. Erste Demonstrationsprojekte und auch praktische Anwendungen wurden auf den Weg gebracht. Aus heutiger Sicht wird es für den Einsatz dieser Bindemittel vielfach bei Nischenanwendungen bleiben, u. a. auch deshalb, weil diese Bindemittel zum Teil Rohstoffe benötigen, die überregional nicht in den erforderlichen Mengen zur Verfügung

stehen. Darüber hinaus ist die technische Leistungsfähigkeit dieser Bindemittel begrenzt und die damit verbundenen Einsatzmöglichkeiten in Bauwerken eingeschränkt.

Vor diesem Hintergrund kommen unter Berücksichtigung des derzeitigen Standes der Technik und der Forschung für Deutschland, Österreich und die Schweiz mittelfristig folgende alternative Klinker-/Bindemittelsysteme infrage [9]:

Calcium-Sulfoaluminat-Zemente (CSA-Zemente)

CSA-Zemente sind seit Langem bekannt und bestehen im Wesentlichen aus Ye'elimit, Belit, ggf. Ternesit und Calciumsulfat. Sie benötigen anders als Portlandzement hohe Anteile an geeigneten aluminium- und sulfathaltigen Rohmaterialien. Je nach Anteilen können in konventionellen Zementöfen schnell erhärtende bzw. quellfähige Zemente bei bis zu 200 °C niedrigeren Brenntemperaturen hergestellt werden. CSA-Klinker sind typischerweise leichter mahlbar als Portlandzementklinker. Zum Teil können CO₂-Einsparungen von bis zu 30 % bezogen auf Portlandzement (CEM I) realisiert werden. Gegenüber dem heutigen Zementportfolio in Deutschland (Klinker/Zement-Faktor 71 %) ergeben sich dagegen vergleichsweise geringere spezifische CO₂-Minderungspotenziale [9].

Calciumhydrosilicate (CHS)

Calciumhydrosilicate können in einem hydrothermalen Prozess im Autoklaven aus Quarz (SiO₂) und Branntkalk (CaO) gebildet werden. Durch verschiedene technische Verfahren (mechanisch, thermisch) werden daraus reaktive Calciumhydrosilicate (CHS) erzeugt. Als Rohstoffe für die Herstellung von einer Tonne CHS (z. B. Celitement®) werden in etwa 600 kg Calciumhydroxid (Ca(OH)₂) und 400 kg Quarzsand benötigt. Nach bisherigen Erkenntnissen können dadurch mindestens 30 % CO₂-Einsparung bezogen auf Portlandzementklinker erreicht werden. Eine erste Industrieanlage mit einer Kapazität von 50.000 t/a ist in Planung. Gegenüber dem heutigen Zementportfolio in Deutschland (Klinker/Zement-Faktor 71 %) ergeben sich entsprechend geringere spezifische CO₂-Minderungspotenziale [9].

Karbonatisierung von Calcium-Silicat(hydraten)

Die Karbonatisierung von Calcium-Silicat(hydraten), z. B. von Wollastonit, führt über die Bildung von amorphem Silicium und Calciumcarbonat zur Festigkeitsbildung. Erste industrielle Versuche zur Herstellung von Klinkern aus Wollastonit (CaOxSiO₂) und Rankinit (3CaOx2SiO₂) wurden mit üblichen Rohstoffen und bestehender Technologie erfolgreich durchgeführt (z. B. Solidia Cement®). Dieses nicht hydraulische Bindemittel kann zur Betonherstellung verwendet werden. Während Portlandzementklinker durch Hydratation, d. h. in einer Reaktion mit Wasser, erhärten, beruht die Festigkeitsentwicklung im vorliegenden Fall auf der Karbonatisierung der Calcium-silicate während einer CO₂- und Wärmebehandlung bei normalem Umgebungsdruck. Diese Technologie ist gegenwärtig für Fertigteilwerke bzw. die Betonwarenherstellung vorgesehen. Gegenüber dem heutigen Zementportfolio in Deutschland (Klinker/Zement-Faktor 71 %) beträgt das mögliche CO₂-Einsparpotenzial rund 60 %, wenn das beim Klinkerbrennprozess entstehende CO₂ abgeschieden und für die Karbonatisierung wiederverwendet wird [9].

Eine der wichtigsten Fragen im Hinblick auf den Einsatz CO₂-effizienter Rohstoffe für die Klinker-, Zement- und Betonherstellung ist ihre Verfügbarkeit: Portlandzementklinker wird auf absehbare Zeit der wesentliche Bestandteil von Zement bleiben. Alternativen in ausreichender technischer Qualität, die den stetig wachsenden globalen Bedarf an Zement decken können,

sind bislang nicht in Sicht. Tabelle 3 zeigt eine Auswahl an Bindemittelsystemen neben Portlandzement.

S	1	2
Z	Festigkeitsbildende Phase(n)	Zement/Binder
1	C-(A)-S-H:	Belit-Zement, Celitement
2	Aft/AFm/C-A-S-H:	Belit-Ca-Sulfoaluminat-Zement, AETHER, TernoCem, Next Base, ALIPRE ...
3	©-N-A-S-H:	Zeobond, E-Crete, HySSL, GEOGREEN CRETE ... (Geopolymere)
4	CaCO ₃ (Calcit, Aragonit): CaCO ₃ /amorphes SiO ₂	Amorphes CaCO ₃ (ACC-Vaterit) ... SOLIDIA (Wollastonit C/S ~ 1, CO ₂), Carbstone ...
5	Mg-Cl/SO ₄ -H: MgPO ₄ /MgCO ₃ : Mg-S-H/MgCO ₃ :	Sorel (1867, Steinholzböden) ... Mg-Phosphatzement (MPC) ... Novacem ...

Tabelle 3. Übersicht über die derzeit verfügbaren bzw. sich in Entwicklung befindlichen Bindemittelsysteme neben Portlandzement [10]

Die Erforschung der Systeme ist vielfach noch im Laborstadium. Teilweise gibt es Demonstrationsobjekte und auch praktische Anwendungen. Die Marktentwicklung wird in einigen Fällen noch lange dauern. Aus heutiger Sicht wird es daher vielfach bei Nischenanwendungen bleiben (u. a. wegen der Rohstoffverfügbarkeit).

Daher bleibt die weitere Steigerung der Klinkereffizienz über die Senkung des Klinker/Zement-Faktors die wesentliche Herausforderung.

CO₂-effiziente Bauteile und Konstruktionen aus Beton bieten weitere Potenziale

Bauteile mit reduziertem Betoneinsatz können bei einer für den jeweiligen Anwendungszweck angemessenen Leistungsfähigkeit ebenfalls dazu beitragen, Ressourcen und CO₂ einzusparen. Folgende Maßnahmen sind hierbei aus heutiger Sicht von Bedeutung:

Flach- bzw. Hohldecken

Mit vorgespannten Flach- bzw. Hohldecken besteht zum Beispiel bereits heute die Möglichkeit, den Materialeinsatz zu optimieren, wenn alle zu berücksichtigenden Randbedingungen, wie z. B. Schall- und Brandschutz, dies zulassen. Nach [12] benötigen Spannbeton-Fertigdecken im Vergleich zu anderen Betondeckensystemen bei vergleichbaren statischen Anforderungen an die Decke bis zu 50 % weniger Beton und bis zu 75 % weniger Stahl.

Auch wenn sich diese Angaben nicht verallgemeinern lassen, wird aus einer Reihe von Studien und Veröffentlichungen doch deutlich, dass vergleichbar leistungsfähige Bauteile so mit

geringerem Ressourceneinsatz und geringerer CO₂-Intensität hergestellt werden könnten. Der Planer wird im Einzelfall entscheiden müssen, welche Lösung unter Berücksichtigung aller Randbedingungen aus Tragwerkplanung, Bauphysik, Brandschutz etc. gewählt werden kann. Die Frage der Ressourceneffizienz scheint in der heute gängigen Planungspraxis noch eher von untergeordneter Bedeutung zu sein. In dieser Studie wurde eine moderate Steigerung der Nutzung von Flach- und Hohldecken oder vergleichbarer, weiterer Ansätze angenommen.

Stellvertretend für andere Bauteile wurde in [1] bei Betondecken auch eine gewisse Verlagerung vom Ortbeton hin zur Vorfertigung angenommen. Damit einher geht die Annahme, dass es sich bei den vorgefertigten Decken z. B. um Spannbetonhohldecken mit einem verminderten Beton-anteil handelt. Das Verhältnis zwischen den vor Ort hergestellten Massivdecken und den Spannbetonhohldecken verändert sich in beiden Szenarien im Vergleich zum Status quo deutlich. So wird mit einem Hohldecken-Anteil von 25 % in 2030 bzw. von 50 % in 2050 gerechnet (2019: 3 %). Aber auch die Ortbetonbauweise bietet bei einer Erhöhung des Industrialisierungsgrades entsprechende Möglichkeiten der Effizienzsteigerung.

Carbonbeton

Zu den weiteren Ansätzen gehört der Carbonbeton. Das Projektkonsortium C3 – Carbon Concrete Composite entwickelt in Zusammenarbeit mit über 160 Partnern aus Forschung und Praxis seit einigen Jahren diesen neuartigen Verbundwerkstoff. Statt Baustahl dienen textile und stabförmige Strukturen aus hochzugfesten Carbonfasern als Bewehrungsmaterial, wodurch die Dauerhaftigkeit erhöht und damit die Lebensdauer von Bauteilen und Bauwerken verlängert sowie Ressourcen und CO₂-Emissionen eingespart werden sollen [13].

Bei Vergleichen z. B. eines Doppel-T-Trägers aus Carbonbeton und Stahlbeton mit äquivalenter Tragfähigkeit in [14] oder auch einer Carbon- und einer Stahlbetonbrücke in [13] werden Möglichkeiten der Einsparung des Betons von teilweise 50 % und eine Verringerung des Globalen Erwärmungspotenzials (GWP) und damit eine Verringerung der CO₂-Emissionen für die Herstellung z. B. der Brücke von 30 % angegeben. Es ist heute schwierig, vorherzusehen, welchen Weg diese Technologie in der Praxis nehmen wird, zumal auch Fragen des Recyclings noch weiter erforscht werden. Im Zuge der Erarbeitung der Studie wurden moderate Anteile an Carbonbeton an der gesamten zukünftigen Betonmenge angenommen.

Additive Fertigung

Entwicklungen im Bereich der additiven Fertigung werden vielfach unter dem Schlagwort „3D-Druck“ zusammengefasst. Einen Überblick der Potenziale dieser Technologien geben z. B. [15, 16]. Derzeit sind die Effekte dieser neuen Verfahren in den Bereichen Ressourceneffizienz und Klimaschutz im Detail nur schwer abzuschätzen. Eine Quantifizierung erfolgte im Rahmen der Szenarien bisher nicht. Sie sind in den „betoneinsparenden“ Ansätzen wie „Hohldecke“ und „Carbonbeton“ sinngemäß enthalten.

Neben Flachdecken und Spannbetonhohldecken sind somit weitere Technologien vorstellbar, mit denen bei gleichen Bauteileigenschaften geringere Betonmengen erforderlich wären. Als Beispiele wurden der Carbonbeton oder auch Betone aus additiver Fertigung (3D-Druck) genannt. Diese Technologien spielen im ambitionierten Referenzszenario erst nach 2030 eine größere Rolle: 10 % des Stahlbetonbaus (Ortbeton + Betonfertigteile) werden bis 2050 durch derartige Lösungen ersetzt. Für die entsprechenden Bauteile wird mit einer Betoneinsparung von im Mittel 20 % gerechnet. Im Szenario Klimaneutralität wird eine Einsparung von 20 % in 10

% der Anwendungen bereits im Jahr 2030 erreicht, während in 2050 20 % des Stahlbetonbaus ersetzt werden. Hier wird für die entsprechenden Bauteile eine Verringerung der Betonmenge im Mittel um 30 % angenommen.

Gradientenbeton und Leichtbau

Im Gradientenbeton wird die Betonzusammensetzung über den Querschnitt eines Bauteils variiert. Das Prinzip beruht darauf, dass Beton in tragenden Bauteilen nicht über den ganzen Querschnitt gleich stark beansprucht wird. So hat Gradientenbeton nach außen ein dichtes Gefüge mit hoher Tragfähigkeit und weist zugleich im Wandkern eine hohe Wärmedämmung durch Lufteinschlüsse auf. Infraleichtbetone ermöglichen auf ähnliche Weise durch ihre poröse Gesteinskörnung und einen entsprechend hohen Luftanteil Außenwandkonstruktionen ohne zusätzliche Wärmedämmung [17]. Mit hochfesten und ultrahochfesten Betonen lassen sich zudem schlanke Bauteile bei hohen Beanspruchungen erzielen [18]. Bei einer Stütze gleicher Tragfähigkeit können bereits bei Verwendung eines Betons C50/60 statt eines Betons C25/30 aufgrund der Querschnittsreduzierung der Klinkergehalt und damit die CO₂-Emissionen je Meter Stützhöhe um etwa 20 % reduziert werden.

Mit den in diesem Unterkapitel genannten Technologien können in bestimmten Anwendungsbereichen höhere Materialeffizienzen und somit Einsparungen bei Ressourcen, Energie und Emissionen erreicht werden. Wie hoch diese Effekte ausfallen, kann zum Teil erst abgeschätzt werden, wenn entsprechende konstruktive Lösungen für Gebäudestrukturen entwickelt worden sind. Die betontechnischen und konstruktiven Voraussetzungen zum Einsatz ressourcenschonender Bauteile sind zudem in vielen Fällen noch in der Entwicklung oder beschränken sich auf Pilotprojekte. In Zukunft könnten sogar völlig neue Konstruktionsprinzipien entwickelt werden, wenn man mit baubionischen Strukturen den Prinzipien der Natur folgt [19].

Einiges ist also noch „Zukunftsmusik“. Der Planer kann aber bereits heute einen Beitrag leisten.

Was Planer und Ausschreibende heute bereits tun können

Die Herausforderung besteht darin, die CO₂-Bilanz des Betons bzw. eines Bauteils weiter zu verbessern, ohne die technische Leistungsfähigkeit aus den Augen zu verlieren. Je nach Anwendungsfeld steht neben robusten Frischbetoneigenschaften und einer praxisingerechten Festigkeitsentwicklung die Dauerhaftigkeit im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Der Planer legt in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen bauteilbezogen die Expositivklassen fest (siehe Bild 6).

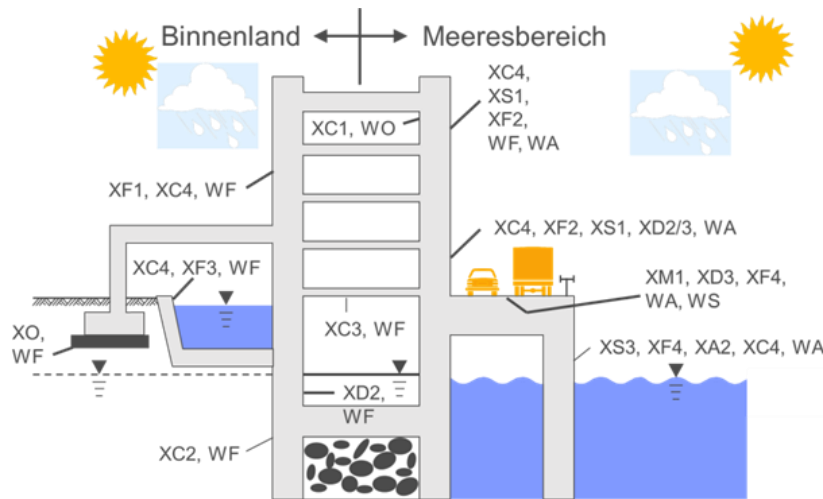


Bild 6. Expositions- und Feuchtigkeitsklassen an Bauteilmustern

Wie zuvor beschrieben können für Betone im üblichen Hochbau (Innenbauteile XC1 und Außenbauteile XC4/XF1) je nach Verfügbarkeit alle zuvor genannten Zementarten verwendet werden. Die Festigkeitsentwicklung von Betonen mit CEM II- und CEM III/A-Zementen ist unter baupraktischen Bedingungen ebenfalls vergleichbar. 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 7 ist die relative Druckfestigkeitsentwicklung von Betonen auf Basis handelsüblicher CEM I-, CEM II- und CEM III/A-Zemente 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, 7 bzw. 28 Tagen auf die 28-Tage-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 nur der Beton mit dem Zement CEM III/A 32,5 N als langsam einzustufen. Diese Einstufung ist maßgebend für die Dauer der Nachbehandlung [5].

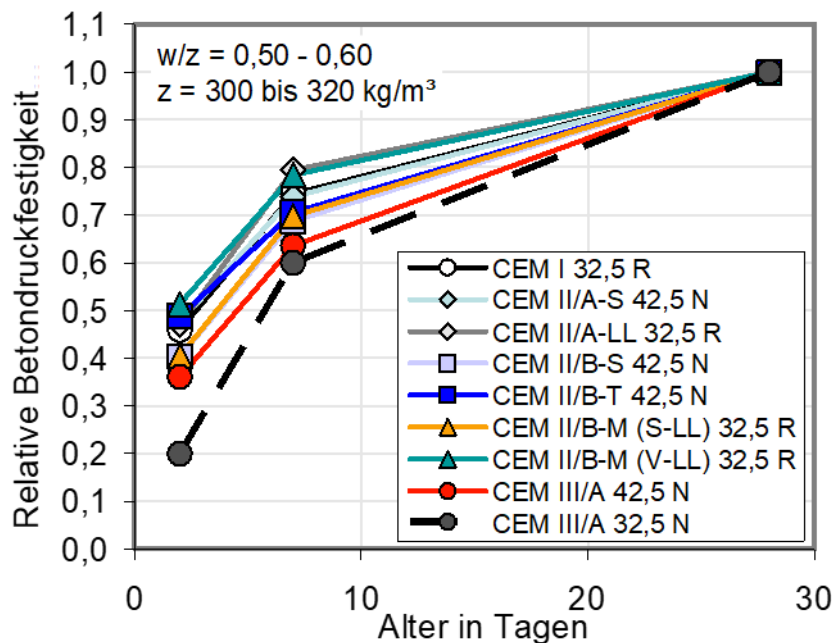
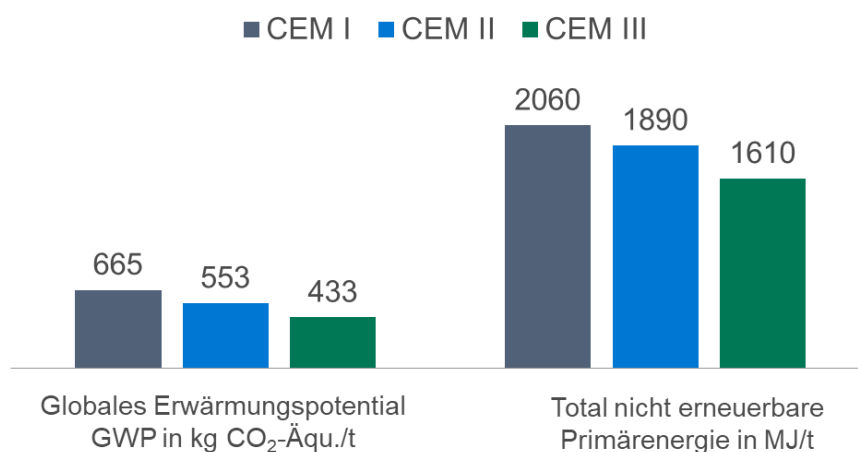


Bild 7. Relative Druckfestigkeit von Betonen mit verschiedenen CEM II- und CEM III/A-Zementen im Vergleich zum CEM I-Beton [5]

Für eine Bauaufgabe stehen somit verschiedene Zemente mit vergleichbarer technischer Leistungsfähigkeit zur Verfügung, für deren Herstellung pro Tonne unterschiedlich viel CO₂ freigesetzt wird. Bild 8 zeigt dies am Beispiel des mittleren deutschen Zements CEM II im Vergleich zu CEM I (Portlandzement) und CEM III/A (Hochofenzement mit 50 % Hüttensand).

Es besteht also bereits heute die Möglichkeit, zu prüfen, ob ggf. ein Beton auf Basis eines CO₂-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 maßgeblich auch von der Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe ab. Bei Vorgaben bezüglich zu verwendender Betonausgangsstoffe bzw. Betone sind somit immer auch die örtlich vorhandenen und verfügbaren Ressourcen zu beachten. Es kommt also auf eine gute Kommunikation der am Bau Beteiligten an.

In der nächsten Generation der Betonnormen DIN 1045 sind daher unter dem Stichwort „BetonBauQualität BBQ“ zwecks Austausches relevanter Informationen und der Abstimmung wesentlicher Entscheidungen in vielen Fällen verbindliche BBQ-Ausschreibungs- und BBQ-Ausführungsgespräche vorgesehen. Im BBQ-Ausschreibungsgespräch erarbeiten Objektplaner, Tragwerksplaner, Ausschreibender und ein Experte für Betonbautechnik gemeinsam die Festlegungen für die Ausschreibung zu Herstellung, Einbau und Nachbehandlung von Beton unter Einbeziehung der projektspezifischen Randbedingungen, u. a. auch bezüglich der Nutzung von örtlich vorhandenen und verfügbaren Ressourcen. Hier können dann ebenfalls gemeinsam Ziele für Ressourceneffizienz und Klimaschutz vereinbart werden. Bei konkreten Fragen zum Thema stehen auch VDZ/IZB (www.vdz-online.de und www.beton.org) als Ansprechpartner zur Verfügung.



- GWP-Werte ohne Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung (Netto)
- Mittlerer (Durchschnitts)Zement (CEM II)
- Portlandzement CEM I und Hochofenzement CEM III

Bild 8. Globales Erwärmungspotenzial und nicht erneuerbare Primärenergie von Zement in Deutschland: Generischer mittlerer Zement CEM II, generischer Portlandlandzement CEM I, generischer Hochofenzement CEM III/A mit 50 % Hüttensand [11]

Tabelle 4 zeigt in Zeile 5 die heute mit der Herstellung von einem Kubikmeter Beton im Mittel verbundenen CO₂-Emissionen – ausgedrückt als Global Warming Potenzial (GWP) in kg CO₂-Äquivalente je Kubikmeter Beton, auf Basis der Umweltproduktdeklarationen für Beton (weitere Informationen unter www.beton.org).

Die Tabelle enthält zur Orientierung außerdem Werte für Betone, die bezüglich der zu ihrer Herstellung notwendigen Treibhausgasemissionen 20 bzw. 30 % besser wären als der Durchschnitt oder bis zu 20 % über dem heutigen Durchschnitt liegen.

Neben einer Einteilung anhand der Einheit kg CO₂-Äquivalent/m³ Beton zeigt Tabelle 5 eine Darstellung unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit des Betons (CO₂-Äquivalent/(m³ Beton x MPa)). Die Anwendbarkeit nach Expositionsklassen ist zu berücksichtigen. Die Werte in den Zeilen 4, 5 und 6 sind für alle Betone bzw. Betonbauteile für den üblichen Hochbau (Innenbauteile XC1 und Außenbauteile XC4/XF1) verwendbar.

1	Bezeichnung	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C50/60
2		Treibhausgasemissionen in kg CO ₂ -Äquivalent/m ³ Beton					
3	Beton z. B. mit CEM VI o. ä.	125	138	153	171	200	210
4	Beton z. B. mit CEM III/A, CEM II/C o. ä.	142	158	175	195	229	240
5	Beton heutiger Durchschnitt ¹⁾	178	197	219	244	286	300
6	Beton mit CEM I	213	237	261	286	312	325

¹⁾ Werte GWP ohne Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung

Tabelle 4. Orientierungswerte für Treibhausgasemissionen von Beton

1	Bezeichnung	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C50/60
2		leistungsbezogene Treibhausgasemissionen ¹⁾ in kg CO ₂ -Äquivalent/(m ³ x N/mm ²)					
3	Beton z. B. mit CEM VI o. ä.	4,3	4,1	3,7	3,5	3,4	3,3
4	Beton z. B. mit CEM III/A, CEM II/C o. ä.	4,9	4,6	4,3	4,0	3,9	3,8
5	Beton heutiger Durchschnitt	6,1	5,8	5,3	5,0	4,8	4,7
6	Beton mit CEM I	7,3	7,0	6,4	5,8	5,3	5,1

¹⁾ Berechnung der Werte auf Basis mittlerer Festigkeiten $f_{cm,cube}$: Beispiel C20/25, Zeile 3:
 $125/(f_{ck}+4) = 125/29 = 4,3$

Tabelle 5. Orientierungswerte für leistungsbezogene Treibhausgasemissionen von Beton

Diese Darstellung zeigt:

- 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.

Insofern kann je nach technischer Anforderung bereits heute durch den Einsatz CO₂-effizienter Betone oder dessen materialsparendem Einsatz häufig klimaschonender gebaut werden.

Es sei nochmals betont, dass bei Vorgaben bezüglich zu verwendender Betonausgangsstoffe bzw. Betone immer die bautechnischen Anforderungen sowie die örtlich vorhandenen und verfügbaren Ressourcen zu beachten sind.

Zur Umsetzung seiner Nachhaltigkeitsziele hat der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) die Planungshilfe „Nachhaltig bauen mit Beton“ für Bauwerke des üblichen Hochbaus veröffentlicht (Wohnungsbauten, Verwaltungsgebäude, Veranstaltungsbauten, Einkaufszentren, Industriehallen etc.; (siehe auch www.dafstb.de). Sie dient Investoren, Bauherren, Planern, Ausführenden und Vertretern der Bauaufsicht für Entscheidungsprozesse beim nachhaltigen Bauen mit Beton. Sie zeigt auf, wie mit dem bereits vorhandenen Regelwerk im Betonbau nachhaltig geplant und gebaut werden kann und verdeutlicht Wechselwirkungen zwischen den Maßnahmen. Grundsätzlich kommt es auf eine gute Kommunikation der am Bau Beteiligten an. Hierzu kann die Planungshilfe beitragen und zum Beispiel zukünftig in der BetonBauQualitäts-Klasse BBQ-S nach DIN 1045:1000 zwischen den Vertragsparteien vereinbart werden.

Die Planungshilfe gliedert sich in Handlungsempfehlungen zur Planung und zur Baustoffverwendung, um die CO₂-, Ressourcen- und Energieeffizienz von Betonbauwerken zu verbessern. Sie erläutert zudem die Auswirkungen von Planungsentscheidungen auf die Bauausführung. Abschnitt 3.3 formuliert dabei konkrete „Hinweise zur Baustoffwahl und -Optimierung“ und zeigt auf, welche Möglichkeiten schon heute bestehen, Betone mit einem geringeren CO₂-Fußabdruck zu nutzen. Dazu ist wie zuvor bereits ausgeführt in der Planung zu prüfen, ob ein Beton auf Basis eines CO₂-effizienteren Zements vergleichbare technische Eigenschaften für die konkrete Anwendung aufweist. Die Planungshilfe enthält eine Auflistung der in allen Expositionsklassen verwendbaren Zementarten einschließlich der CEM II/C-Zemente mit allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung für die Anwendung. Ergänzt wird diese Zusammenstellung um den Hinweis, dass die Anwendung eines Zements, z. B. in einem Transportbetonwerk oder in einem Fertigteilwerk bei vergleichbarer technischer Leistungsfähigkeit maßgeblich auch von der Verfügbarkeit der Ausgangsstoffe abhängt. Es ergibt daher Sinn, Ziele für die CO₂-Effizienz für den Beton bzw. das Bauteil zu formulieren und die konkrete Umsetzung dem Betonhersteller bzw. dem Hersteller eines Betonfertigteils zu überlassen. Hierzu enthält die Planungshilfe:

- Orientierungswerte für (leistungsbezogene) Treibhausgasemissionen von Beton sowie einen Hinweis auf die
- CO₂-Klassen des Concrete Sustainability Council (CSC).

CO ₂ -Klassen	C20/25	C25/30	C30/37	C35/45	C45/55	C50/60
Maximal zulässige Treibhausgasemissionen [netto kg CO ₂ -Äq./m ³]						
Branchenreferenzwert	213	237	261	286	312	325
GWP-Wert für einen Durchschnittsbeton	178	197	219	244	286	300
Level 1 (↓ ≥ 30 %)	149	166	183	200	218	228
Level 2 (↓ ≥ 40 %)	128	142	157	172	187	195
Level 3 (↓ ≥ 50 %)	107	119	131	143	156	163
Level 4 (↓ ≥ 60 %)	85	95	104	114	125	130

Durchschnittsbeton x 0,8 (z. B. CEM II/C); siehe auch Tabelle 4	142	158	175	195	229	240
---	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabelle 6. Betone mit CEM II/C: Level 1/Level 2 in der Systematik des CSC CO₂-Moduls

Bild 9 skizziert schematisch, wie ein Planer die in der Planungshilfe zur Verfügung gestellten Informationen nutzen kann, um die CO₂-Effizienz des Betons in Ortbetonbauweise im Planungsprozess zu berücksichtigen und verdeutlicht die Rolle klinkereffizienter Zemente beim nachhaltigen Bauen mit Beton: Bisher legt der Planer in Abhängigkeit von den Umgebungsbedingungen bauteilbezogenen Expositions-/Feuchtigkeitsklassen und

Betondruckfestigkeitsklasse fest (z. B. C25/30, XC4, XF1, WF) – siehe Bild 6. Zukünftig sollte der Planer die Aspekte Dekarbonisierung und Ressourceneffizienz verstärkt berücksichtigen. Hierzu kann er in Absprache mit dem Bauherrn eine leistungsbezogene CO₂-Klasse des Betons gemäß Tabelle 4 bzw. Tabelle 6 vorgeben. Wichtige Schnittstellenfragen, wie z. B. die Verfügbarkeit der gewählten stofflichen Variante im wirtschaftlich wie ökologisch sinnvollen Umfeld der Baumaßnahme, werden im BBQ-Ausschreibungsgespräch geklärt. Die CO₂-Klasse des Betons wird Bestandteil der Ausschreibung und der Betonhersteller verwendet einen CO₂-effizienten Zement um CO₂-Klasse zu erreichen. Der Nachweis der CO₂-Klasse erfolgt z. B. mit Hilfe einer CSC-Einstufung gemäß Tabelle 6 und entsprechender Kennzeichnung.

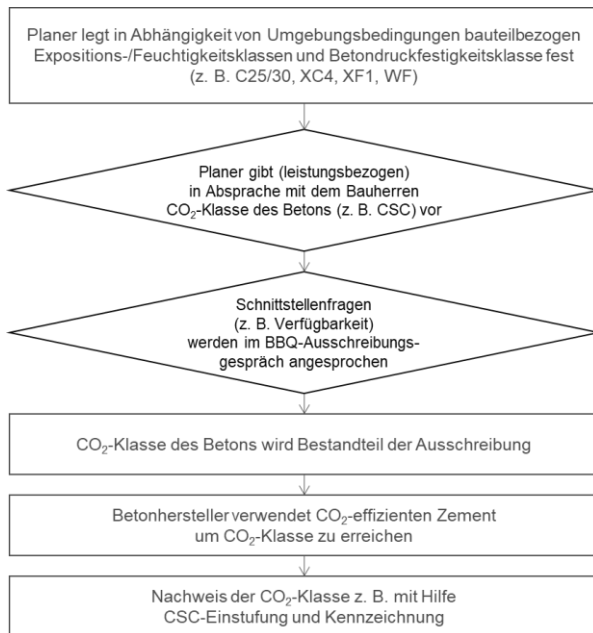


Bild 9. Optimierung der CO₂-Effizienz von Beton

Orientierungswerte für die Treibhausgasemissionen von Gebäuden

Die Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. hat 50 zertifizierte Gebäude hinsichtlich ihres CO₂-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 Reduktion dieser verbauten CO₂-Emissionen liegen nach [20] 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 [20]. Für die Stahlbetonskelettbauweise wurden in [21] Werte zwischen 6,1 und 15,5 kg CO₂ / m² x a gefunden. Der Mittelwert wird mit 9,7 kg CO₂ / m² x a angegeben. Für die Gruppe der besten Massiv- und Skelettbauweise-Gebäude (Gebäude innerhalb des 15 %-Perzentilwertes) 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, ob und wie die Gebäude innerhalb des 15 %-Perzentilwertes Modellcharakter für das zukünftige Bauen mit Beton haben und welche Rolle klinkereffiziente Zemente dabei spielen können.

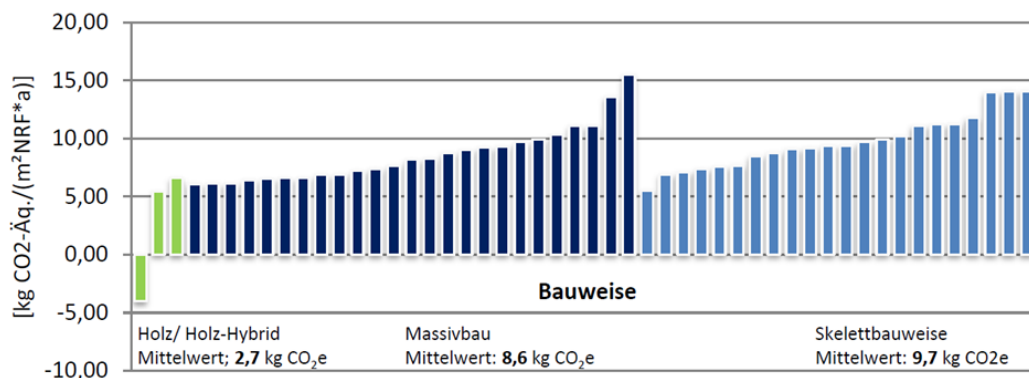


Bild 10. Treibhausgasemissionen (GWPK) in Abhängigkeit der Bauweise / Materialität des Tragwerks (n=50) [21]

Qualitätssiegel „Nachhaltiges Gebäude“ des BMI

Das „Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude“ ist ein staatliches Qualitätssiegel für Gebäude. Voraussetzung für die Vergabe des Qualitätssiegels ist ein Nachweis der Erfüllung allgemeiner und besonderer Anforderungen an die ökologische, soziokulturelle und ökonomische Qualität von Gebäuden. Dieses ist beispielweise erforderlich, wenn die Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG) beantragt wird. Im Qualitätssiegel sind zwei Klassen „QNG-Plus“ mit Treibhausgasemissionen von maximal 28 kg CO₂/m²*a und „QNG-Premium“ (20 kg CO₂/m²*a) ausgewiesen. Betrachtungszeitraum ist in beiden Fällen 50 Jahre.

Überschlägliche Berechnungen zur Einordnung dieser „Grenzwerte“ für die Betonbauweise bzw. die Massivbauweise zeigen, dass der Konstruktionsanteil des „Grenzwerts“ für „QNG Plus“ bereits heute von den meisten DGNB-zertifizierten Massivbauten erreicht wird. Der „QNG-Premium“-Zielwert für die Konstruktion von etwa 7 kg CO₂/(m² x a) könnte erreicht werden, indem das GWP des Betons um rd. 20 % reduziert wird. Verglichen mit dem CSC-System bedeutet dies, dass mit Level 1 bzw. Level 2-Betonen gemäß CSC-Modul auch der QNG-Premium-Wert erreichbar ist. Dies sind Betone zum Beispiel mit den Zementen CEM II/C-M (S-LL) oder CEM II/C-M (V-LL).

CO₂-effiziente Zemente und Betone: Mögliche Auswirkungen für die Bauausführung

1 Robuste Frischbetoneigenschaften

Die Betonzusammensetzung und die Ausgangsstoffe für Beton nach Eigenschaften oder Beton nach Zusammensetzung müssen gemäß DIN 1045-2 so ausgewählt werden, dass unter Berücksichtigung des Herstellungsverfahrens und des gewählten Ausführungsverfahrens für die Betonarbeiten die festgelegten Anforderungen an Frischbeton und Festbeton einschließlich Konsistenz, Rohdichte, Festigkeit und Dauerhaftigkeit erfüllt werden.

S	1	2			
Z	Größtkorn D_{max}	Mindestwerte für das Leimvolumen ^{1) 2) 3)}			
		l/m ³			
1	mm	F3	F4	F5	F6
2	32	270	280	290	300
3	22	275	285	295	305
4	16	280	290	300	310
5	8	295	305	315	325
6	¹⁾ Besondere Gesteinskörnungen (z. B. gebrochene Gesteinskörnungen) können ein höheres Leimvolumen erfordern. ²⁾ Gilt nicht für Betone nach DAfStb-RL Massenbeton. ³⁾ Das Leimvolumen ist aus den volumetrischen Anteilen von Zement, Zusatzstoffen und dem wirksamen Wassergehalt zu berechnen.				

Tabelle 7. Mindest-Leimvolumen in der neuen DIN 1045-2

Für die Einhaltung dieser Anforderungen sind für Betone ab der Konsistenzklasse F3 und ab der Festigkeitsklasse C25/30 entweder die Mindestwerte an die Zusammensetzung (Mindest-Leimgehalt) nach Tabelle 11 einzuhalten oder es ist alternativ eine erweiterte Erstprüfung durchzuführen.

Werden die Eckpunkte der Tabelle 11 eingehalten, verhalten sich Frischbetone unter Verwendung neuer Zemente CEM II/C-M wie bekannte Systeme (Bild 11).

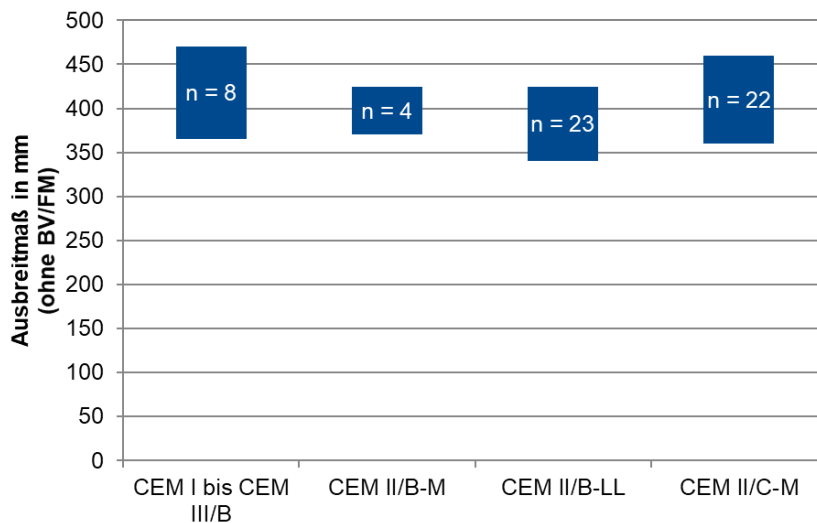
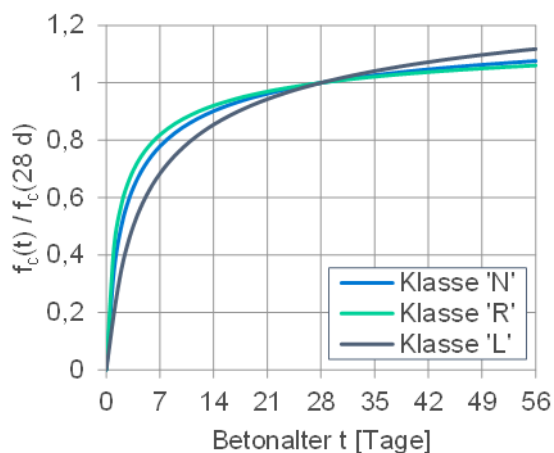


Bild 11. Ausbreitmaß von Beton mit verschiedenen Zementen ($z = 300 \text{ kg/m}^3$, $w/z = 0,60$, Leimvolumen rd. 300 l/m^3)

2 Festigkeitsentwicklung und Ausschalfrieten

Bei besonderen Anforderungen an die Frischbetonverarbeitung und das Festbetonverhalten können von der Zementart und der Zementfestigkeitsklasse abhängige Einflüsse genutzt werden. Werden sehr frühe Ausschalfrieten für Ortbetonbauteile gefordert oder muss bei niedrigen Außentemperaturen ausgeschalt werden, so eignen sich dafür die auch in der Werkfertigung bevorzugten Zemente mit hoher Anfangsfestigkeit. Zur Verminderung der Hydratationswärmeentwicklung in massigen Bauteilen eignen sich LH-Zemente mit niedriger Hydratationswärmeentwicklung bzw. Zemente der Festigkeitsklasse 32,5 N mit langsamer Festigkeitsentwicklung und einem etwas längeren Nachbehandlungsbedarf.

Ein Betonbauteil darf erst ausgeschalt bzw. entformt werden, wenn der Beton ausreichend erhärtet ist, um die Beanspruchungen während des Bauzustands mit ausreichender Sicherheit ohne Schädigung aufzunehmen. So ist beispielsweise für die Gefrierbeständigkeit eine Frühfestigkeit von etwa 5 N/mm² bis 10 N/mm² notwendig. Schadfrees Stapeln und Transportieren von Betonwaren setzt eine hinreichende Kantenfestigkeit voraus, die im Allgemeinen bei einer Druckfestigkeit von wenigstens 20 N/mm² gegeben ist. Demgegenüber erfordert das Vorspannen oder das Befahren einer Straße i. d. R. eine Druckfestigkeit von mehr als 30 N/mm² oder 40 N/mm². Im Einzelfall können Erhärtungsprüfungen zum Beispiel durch Ermittlung des Reifegrads unter den vorgegebenen Bedingungen notwendig sein. Durch eine an den Bautakt und die Jahreszeit angepasste Wahl der Betonzusammensetzung können die Anforderungen an die Festigkeitsentwicklung erfüllt werden. Die erforderliche Nachbehandlungs-dauer wird allgemein durch einen Mindesthydratationsgrad definiert, den ein Beton während der Nachbehandlung erreichen muss. Sie kann in Abhängigkeit von der Festigkeitsentwicklung des Betons abgeschätzt werden. Art und Festigkeit des Zements sind dabei nur noch indirekt ein Kriterium für den Nachbehandlungsbedarf. Sobald der Beton ausreichende Festigkeit aufweist, kann er entschalt werden. In besonderen Fällen kann dieses Entschalen sofort nach der Verdichtung erfolgen, z. B. bei grünstandfesten Betonen in der Betonwarenherstellung. Nur geringfügig erhärtet darf der Beton sein, wenn er eine Gleitschalung verlässt. DIN 1045-3 enthält keine Anhaltswerte für Ausschalfrieten, da es sinnvoller ist, darüber im Einzelfall verantwortlich zu entscheiden. Gerüste und Schalungen dürfen erst dann entfernt werden, wenn der Beton eine ausreichende Festigkeit erreicht hat, um die auf das Bauteil aufgebraachten Lasten aufnehmen zu können und ungewollte Durchbiegungen aus elastischem und plastischem Verhalten des Betons sowie eine Beschädigung der Oberflächen und Kanten durch das Ausschalen zu vermeiden. Dafür sind erforderlichenfalls Erhärtungsprüfungen durchzuführen, die den jeweils verwendeten Beton und die Temperatur am Bauwerk berücksichtigen. 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 [22] bzw. DIN EN 1992-1-1 [23] kann die Druckfestigkeitsentwicklung von Beton mit einer Exponentialfunktion beschrieben werden, deren Formparameter s in Abhängigkeit der Zementfestigkeitsklasse gewählt wird, vgl. Bild 12.



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

Bild 12. Prognose der Druckfestigkeitsentwicklung gemäß DIN EN 1992-1-1 [23]

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 [24]. Eine Verbesserung für hüttensandhaltige bzw. flugaschehaltige Zemente kann gemäß [24, 25, 26] erreicht werden, wenn der Formparameter s in Abhängigkeit des Klinkergehalts und weiterer zementtechnischer Parameter bestimmt wird. Es bleibt zu prüfen, ob ein solcher Ansatz auch für Betone mit Zementen mit mehr als zwei Hauptbestandteilen eine ausreichende Genauigkeit liefert. Der Einfluss der Temperatur auf die Erhärtungsgeschwindigkeit wird in der Regel mit sogenannten 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 hüttensandhaltige Zemente sind in der Literatur durchgehend 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 [26, 27]. 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 Festigkeitsentwicklung als Grundlage für die Nachbehandlung

Allgemeines

Die Festigkeitsentwicklung von Betonen mit CEM II- und CEM III/A-Zementen ist unter baupraktischen Bedingungen vergleichbar mit der von CEM I-Betonen. 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 7 ist die relative Druckfestigkeitsentwicklung von Betonen auf Basis handelsüblicher CEM I-, CEM II- und CEM III/A-Zemente der Festigkeitsklassen 32,5 R und 42,5 N bei vergleichbaren Betonzusammensetzungen und Lagerungsbedingungen beispielhaft dargestellt.

Die Ergebnisse wurden bereits im Zusammenhang mit der Darstellung von Bild 7 diskutiert.

Beispiel Betonstraßenbau

Die Druckfestigkeit von Fahrbahndeckenbeton wird bisher üblicherweise im Zuge der Abnahme an Bohrkernen im Alter von 60 Tagen ermittelt. In Einzelfällen, z. B. bei nachträglichen Schiedsuntersuchungen, muss ein späterer Prüfzeitpunkt gewählt werden. Zur Rückrechnung der Druckfestigkeit auf die relevanten 60-Tage-Werte enthielt die 2007 zurückgezogene ZTV Beton-StB 01 sogenannte Zeitbeiwerte. Zum Zeitpunkt der Einführung der ZTV Beton-StB 01 (März 2001) wurde standardmäßig PZ 35 F als Fahrbahndeckenzement eingesetzt. Inzwischen sind zusätzliche Anforderungen an die Zementeigenschaften festgelegt worden und es werden auch vereinzelt hüttensandhaltige Zemente verwendet. Fahrbahndeckenzemente werden zudem fast ausnahmslos als Zemente der Festigkeitsklasse 42,5 N eingesetzt. Da zum Zeitpunkt der Veröffentlichung der ZTV Beton-StB 07 nicht bekannt war, in welchem Umfang die Zemente die Nacherhärtung des Betons und damit die Zeitbeiwerte verändern, wurde die zeitabhängige Druckfestigkeitsentwicklung von Fahrbahndeckenbeton in einem Untersuchungsprogramm ermittelt [28].

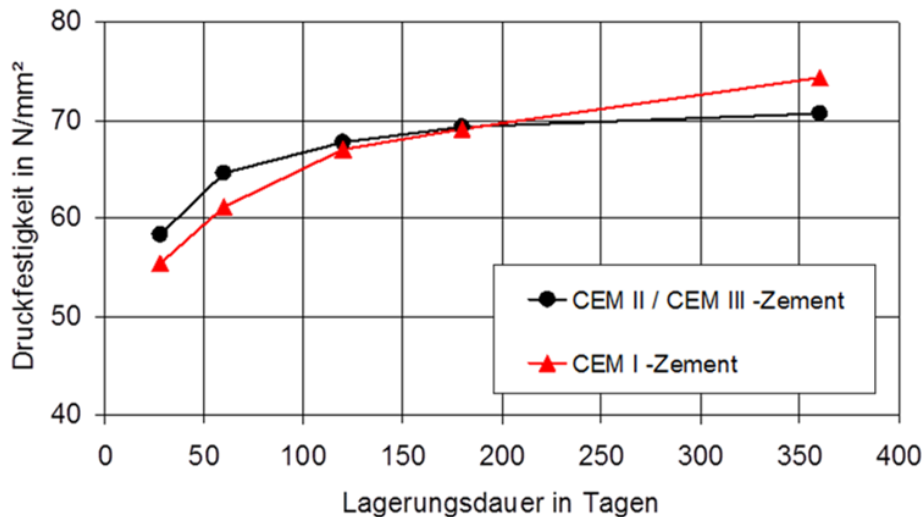


Bild 13. Druckfestigkeit in Abhängigkeit des Betonalters und der Zementart (Mittelwerte der 4 Betone mit CEM I-Zement bzw. der 4 Betone mit CEM II / CEM III-Zement) [28]

Dazu wurden acht Fahrbahndeckenzemente unterschiedlicher Zementart und Festigkeitsklasse (4 CEM I und 4 CEM II/CEM III) ausgewählt. An den damit hergestellten acht Betonen, die typischen Straßenbetonen entsprachen, wurde die Druckfestigkeit im Alter von 28, 60, 120, 180 und 360 Tagen bestimmt. Die Betone mit CEM II/ CEM III-Zement wiesen nach 28 bzw. 60 Tagen im Mittel eine etwas höhere Festigkeit auf als die Betone mit CEM I-Zement. Ursachen sind u. a. die Absenkung des Alkaligehalts der CEM I-Zemente und die feinere Aufmahlung der CEM II/ CEM III-Zemente zur Verringerung der Nachbehandlungsempfindlichkeit. Um die unterschiedliche Festigkeitsentwicklung zu berücksichtigen, wurden die Zeitbeiwerte angepasst und mit dem ARS 27/2012 eingeführt.

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

In einer Studie [6] 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 14 zeigt die Festigkeitsentwicklung der Betone, dargestellt als Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeit nach 2 Tagen (f_{cm2}) und 28 Tagen (f_{cm28}) in Abhängigkeit der Druckfestigkeit nach 2 Tagen (f_{cm2}).

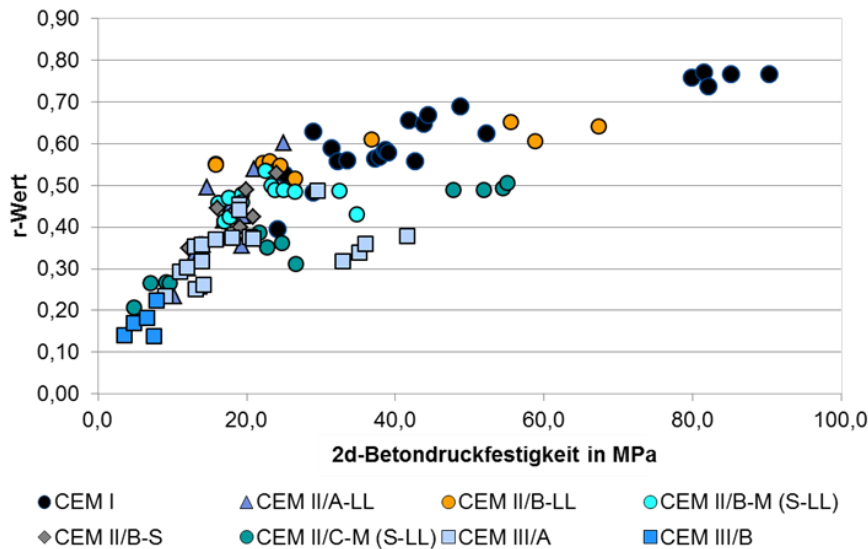


Bild 14. Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeit nach 2 Tagen (f_{cm2}) und 28 Tagen (f_{cm28}) (= r-Wert) in Abhängigkeit der Druckfestigkeit nach 2 Tagen – Daten aus [6]

Betone mit Portlandzement CEM I sowie kalksteinhaltigen Zementen CEM II/A-LL und CEM II/B-LL weisen relativ hohe Frühfestigkeiten auf und liegen im oberen Wertebereich. CEM II/C-M (S-LL) sind hier mit CEM III/A-Zementen vergleichbar, die mit einem Klinkerfaktor von etwa 0,5 regional typische Zemente zur Herstellung von Transportbeton sind.

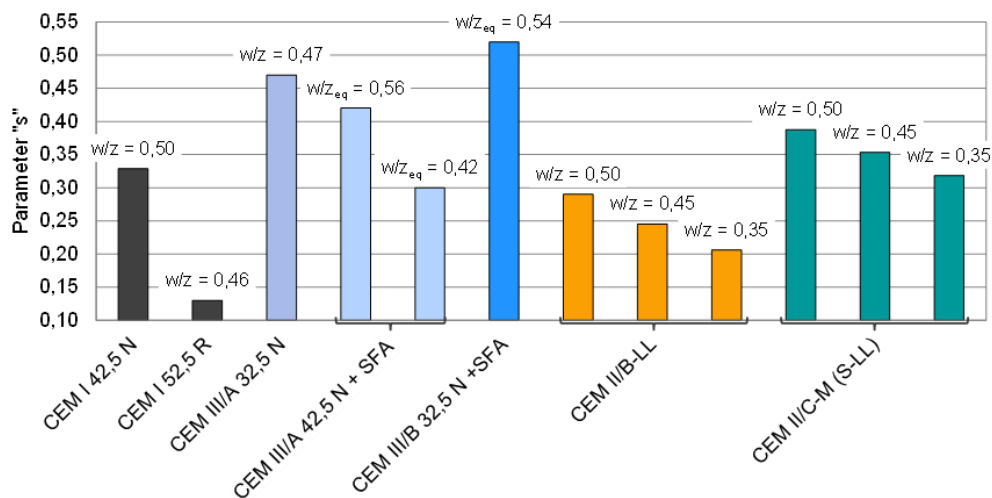


Bild 15. Parameter s zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung mittels Modellfunktion in Abhängigkeit der Zementart und des Wasserzementwerts, Daten aus [32] [33] (SFA = Steinkohlenflugasche)

Anhand einer Auswertung von Daten aus [32] [33] wurde die Anwendbarkeit der Modellfunktion zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung gemäß DIN EN 1992-1-1 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, vgl. Bild 15. 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.

Fazit Nachbehandlung

Zum Einfluss der verschiedenen (z. T. latenthydraulischen bzw. puzzolanischen) Zementhauptbestandteile bzw. Betonzusatzstoffe auf den Nachbehandlungsbedarf gibt [30] folgende Hinweise:

- Die latent-hydraulische Reaktion des Hüttensands führt dazu, dass die Anfangserhärtung des Zements mit zunehmendem Hüttensandgehalt langsamer abläuft. Da der Hüttensand jedoch in höherem Hydratationsalter immer noch einen deutlichen Reaktionsfortschritt zeigt, weisen die hüttensandreichen Zemente bei entsprechend sorgfältiger Nachbehandlung eine höhere Nacherhärtung nach 28 Tagen auf als z. B. Portlandzemente.
- Ein ausreichend hoch bemessener Mindestzementgehalt, ein ausreichend geringer w/z-Wert, ein genügend hoher Alkalipuffer sowie eine sorgfältige Nachbehandlung verringern die Carbonatisierungsgeschwindigkeit auf ein technisch tolerierbares Maß [5, 31]. Bei Bauwerksuntersuchungen wurde beobachtet, dass bei den in Deutschland vorherrschenden Feuchtebedingungen kein signifikanter Unterschied in der Carbonatisierungstiefe von Betonen mit Portlandzementen oder Hochofenzementen vorliegt [30].
- Neben der physikalischen Wirkung können die puzzolanischen Eigenschaften von Steinkohlenflugaschen eine zusätzliche Gefügeverdichtung im erhärtenden Beton herbeiführen. Da puzzolanische Reaktionen verhältnismäßig langsam im Vergleich zu den hydraulischen Reaktionen der Zementklinkerphasen ablaufen, tritt dieser Einfluss von Steinkohlenflugaschen erst mit zunehmender Hydratationszeit in den Vordergrund. Die Nutzung der puzzolanischen Reaktion erfordert also eine sorgfältige Nachbehandlung.

Die zuvor genannten Punkte werden bei der Festlegung der Mindestdauer der Nachbehandlung indirekt über die Festigkeitsentwicklung berücksichtigt. Die relativ hohen Frühfestigkeiten von Betonen mit Portlandzement CEM I sowie kalksteinhaltigen Zementen CEM II/A-LL und CEM II/B-LL führen zu einer vergleichsweise geringen Mindestdauer der Nachbehandlung. Bei Betonen mit CEM III/A-Zementen ist aufgrund der etwas langsameren Festigkeitsentwicklung ggf. eine längere Nachbehandlung erforderlich. Für Betone mit neuen klinkereffizienten CEM II/C-M

(S-LL)-Zementen sind vergleichbare Mindestnachbehandlungsdauern zu erwarten wie für CEM III/A, wenn die bekannten Kriterien der Festigkeitsentwicklung zugrunde gelegt werden. Die Mindestdauer der Nachbehandlung befindet sich für diese Zemente somit im baupraktisch üblichen Bereich. Die weitere Reduktion des Klinkergehalts, z. B. bei CEM VI-Zementen könnte je nach Kombination der Hauptbestandteile zu einer langsameren Festigkeitsentwicklung als bei den aktuell überwiegend verwendeten Zementen führen, was eine längere Mindestdauer der Nachbehandlung zur Folge hätte. Hierbei ist zusätzlich zu beachten, dass die Festigkeitsentwicklung neben der Zementart durch weitere betontechnologische Parameter wie beispielsweise den Wasserzementwert und die Art und Dosierung von Zusatzmitteln maßgebend beeinflusst werden kann. Um in Zukunft eine breite baupraktische Anwendung neuer klinkereffizienter Zemente zu ermöglichen, sollte eine entsprechende Optimierung von Betonzusammensetzungen und Bauabläufen unter Berücksichtigung aller maßgebenden Parameter erfolgen.

In diesem Zusammenhang sei auf einen Aspekt des aktuellen Nachbehandlungskonzepts der DIN 1045-3:2012 hingewiesen, der auch in der E DIN 1045-3:2022-07 so wieder enthalten ist. Bei Umweltbedingungen, die den Expositionsklassen außer X0, XC1 und XM entsprechen, muss der Beton bis zum Erreichen von 50 % seiner charakteristischen Festigkeit im oberflächennahen Bereich nachbehandelt werden. Diese Forderung ist in Tabelle 8 in Abhängigkeit von

Festigkeitsentwicklung und Oberflächentemperatur des Betons in eine Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen umgesetzt.

Oberflächen- temperatur ϑ [°C] ²⁾	Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen			
	Festigkeitsentwicklung des Betons $r = f_{cm2}/f_{cm28}$ ¹⁾			
	schnell $r \geq 0,5$	mittel $r \geq 0,30$	langsam $r \geq 0,15$	sehr langsam ³⁾ $r < 0,15$
$\vartheta \geq 25$	1	2	2	3
$25 > \vartheta \geq 15$	1	2	4	5
$15 > \vartheta \geq 10$	2	4	7	10
$10 > \vartheta \geq 5$	3	6	10	15

¹⁾ Zwischenwerte dürfen eingeschaltet werden.

²⁾ Anstelle der Oberflächentemperatur des Betons darf die morgendliche Lufttemperatur angesetzt werden.

³⁾ Betone mit sehr langsamer Festigkeitsentwicklung sind in Deutschland nicht üblich.

Tabelle 8: Mindestdauer der Nachbehandlung in Tagen nach DIN EN 13670/DIN 1045-3 für alle Expositionsklassen außer X0, XC1 und XM [34]

Die Mindestdauer der Nachbehandlung von Beton in der Nachbehandlungsklasse NBK 3 nach E DIN 1045-3:2022-07 beträgt gemäß Tabelle XX für alle Expositionsklassen außer X0, XC1 und XM für eine Oberflächentemperatur $25 > \vartheta \geq 15$ °C und $r \geq 0,30$ 2 Tage. In NBK 3 soll die Festigkeit des oberflächennahen Betons am Ende der Nachbehandlungszeit 50 % der charakteristischen Festigkeit des verwendeten Betons betragen. Dies entspricht der aktuellen Regelung in DIN 1045-3:2012 Tabelle 5.NA. Gleichwohl stellt sich ggf. folgende Frage: Kann ein Beton, der im Labor bei 20 °C nach 2 Tagen gerade 30 % der charakteristischen Festigkeit erreicht hat, im Bauteil bei 15 °C – 25 °C nach 2 Tagen im oberflächennahen Bereich sicher 50 % der charakteristischen Festigkeit erreichen? Diese Frage ist unter Bezug auf eine konkrete Datenbasis / Studie zu beantworten. Sollte dies nicht möglich sein, ist in Sinne der Dauerhaftigkeit und damit auch Nachhaltigkeit zu überlegen, die Nachbehandlungszeiten in NBK 3 (50 %) bei Betonen mit r-Werten < 0,50 entsprechend anzupassen; sprich: zu erhöhen. CO₂-reduzierte Betone werden in vielen Fällen r-Werte zwischen 0,3 und 0,4 aufweisen.

4 Ausblick weitere Senkung des Klinkerfaktors

Die entscheidende Frage ist, mit welchem Konzept künftig die größtmögliche Klinker- und damit CO₂-Effizienz bei gleichzeitiger Sicherstellung der Dauerhaftigkeit im Baustoff Beton erreicht werden kann. Die Betonnorm DIN 1045-2 sieht derzeit feste Grenzzusetzungen 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 CO₂-Reduzierung ist er insofern nicht optimal, als die Grenzzusetzungen aus Zeiten stammen, in denen der Anteil der Portlandzemente am Inlandversand noch rund 80 Prozent betrug und von CEM II/C- und CEM VI-Zementen noch keine Rede war. Die Prüfungen der Zemente im Beton im Hinblick auf Dauerhaftigkeit (Karbonatisierung, 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 entlehnt. Ein entscheidender Parameter ist insbesondere der maximale Wassermenge-Wert.

Das folgende Bild 16 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 zum Beispiel 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 Prozent Klinker, 30 Prozent Hüttensand und 50 Prozent ungebranntem Kalkstein deutlich außerhalb.

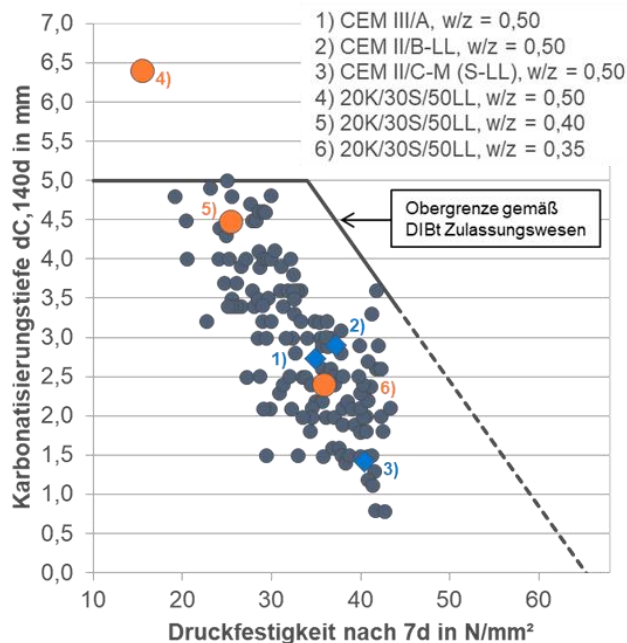


Bild 16. Carbonatisierung: Prüfergebnisse von klinkereffizienten Zementen [32] vor dem Bewertungshintergrund des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt)

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. Dieses Prinzip wird nun in ersten bauaufsichtlichen Zulassungen des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt) umgesetzt.

5 CO₂-Reduzierung vs. Dauerhaftigkeit

Im Zuge der Diskussion, mit welchen Maßnahmen in der Baustoffanwendung die Dekarbonisierung von Zement und Beton am besten unterstützt werden kann, fällt ein ums andere Mal der Begriff „Performance“. Sind leistungsbezogene Nachweise also ein „Allheilmittel“? Beim genaueren Hinsehen zeigt sich: Es kommt darauf an. Das Regelwerk des Betonstraßenbaus sieht seit einigen Jahren zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion Performanceprüfungen der Betone vor. Ähnlich ist es bei Bahnschwellen. In beiden Fällen leisten diese Konzepte gute Dienste: Seit ihrer Einführung werden Schäden sicher vermieden. Dies ist ein wichtiger Beitrag zur nachhaltigen Verwendung des Betons. In weiten Teilen des Betonbaus wird das Thema Dauerhaftigkeit derzeit dagegen durch deskriptive Regeln (maximaler Wasserzementwert, Mindestzementgehalt, Mindestdruckfestigkeitsklasse, Mindestbetondeckung) behandelt. Das Regelwerk beruft sich auf baupraktische Erfahrungen. Die nächste Ausgabe des Eurocode 2 (EC2) beinhaltet mit den „Exposure Resistance Classes ERC“ nun auch einen leistungsbezogenen Nachweis der Dauerhaftigkeit. Grundlage sind Prüfungen der

Leistungsfähigkeit des Betons im Labor sowie Erkenntnisse aus Zuverlässigkeitsberechnungen (z. B. nach fib Model code). Im Deutschen Ausschuss für Stahlbeton wird derzeit die Frage diskutiert, ob und wie dieses Konzept in Deutschland umgesetzt werden könnte. Als Anwendungsbereich sind die Expositionsklassen XC1 bis XC4, XF1, XA1, XS1, XD1 vorgesehen. Das ist im Prinzip der übliche Hochbau. Bis auf einen Mindestklinkergehalt von 70 kg je m³ Beton und das Mindestleimvolumen nach E DIN 1045-2:2022-07 sollen alle deskriptiven Elemente entfallen. Der Mindestklinkergehalt ergibt sich aus dem aktuellen Regelwerk: Im bewehrten Außenbauteil kann Beton mit CEM III/B und Flugaschenanrechnung verwendet werden. Es sind drei Klassen für den Nachweis der Karbonatisierung und drei Klassen für den Nachweis des Widerstandes gegen das Eindringen von Chloriden vorgesehen. Damit würde die Klassenanzahl im Vergleich zum EC2 reduziert. Die Mindestbetondeckung ergibt sich zum Beispiel aus dem Karbonatisierungswiderstand des Betons (XRC-Klasse), der Expositionsklasse und der Mindestnutzungsdauer (50 oder 100 Jahre) – siehe Bild 17.

Expositions- widerstands- klasse	Expositionsklasse							
	XC1		XC2		XC3		XC4	
	Geplante Nutzungsdauer (Jahre)							
	50	100	50	100	50	100	50	100
XRC 0,5	10	10	10	10	10	10	10	10
XRC 1	10	10	10	10	10	15	10	15
XRC 2	10	15	10	15	15	25	15	25
XRC 3	10	15	15	20	20	30	20	30
XRC 4	10	20	15	25	25	35	25	40
XRC 5	15	25	20	30	25	45	30	45
XRC 6	15	25	25	35	35	55	40	55
XRC 7	15	30	25	40	40	60	45	60

Die Bezeichnung der Widerstandsklasse für die durch Karbonatisierung induzierte Korrosion von Betonstahl (XRC) wird aus der Karbonisierungstiefe in mm als charakteristischer Wert (90 % Quantil) abgeleitet, die sich nach 50 Jahren unter folgenden Referenzbedingungen ergibt: konstante CO₂-Konzentration von 400 ppm (0,04 Vol-%), konstante relative Luftfeuchte von 65 % bei einer konstanten Temperatur von 20 °C. XRC hat die Dimension einer **Karbonisierungsrate mm/√(Jahr)**.

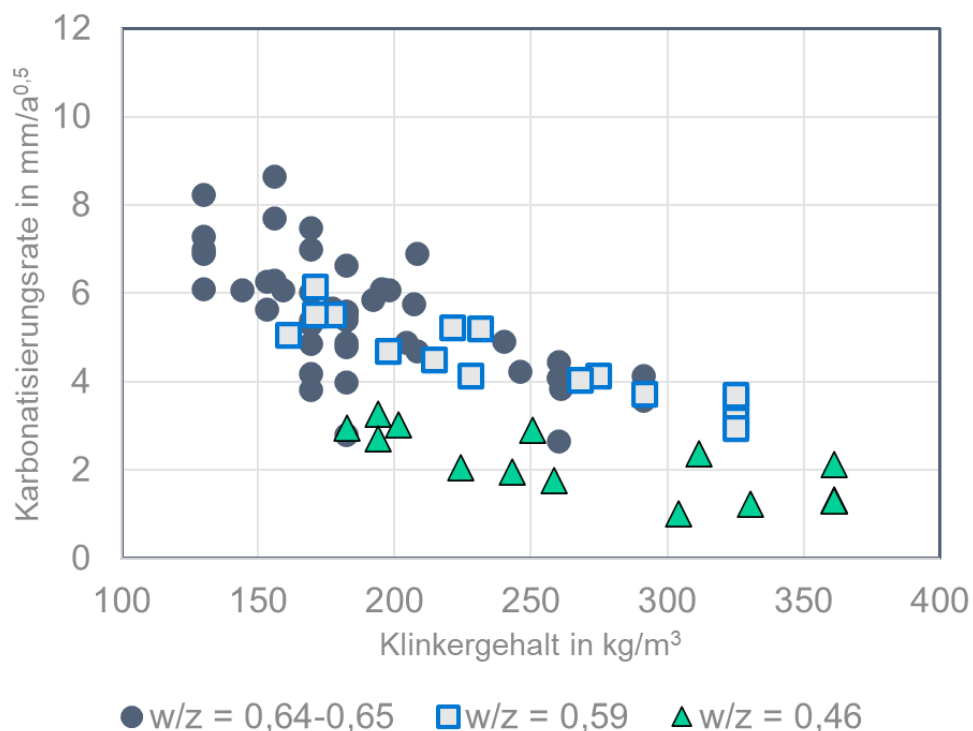
Quelle: E DIN EN 1992-1-1:2021-10, Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Regeln für Hochbauten, Brücken- und Ingenieurbauwerke; Deutsche Fassung prEN 1992-1-1:2021.

Bild 17. Konzept der Expositionswiderstandsklassen im neuen Eurocode 2 - Beispiel Karbonatisierung (XRC) – Mindestbetondeckungen in mm

Frost bei mäßiger Wassersättigung XF1 und ein geringer chemischer Angriff XA1 sollen ohne prüftechnischen Nachweis bei Einhaltung einer Mindestfestigkeitsklasse als nachgewiesen gelten. Der Betonhersteller könnte nun als Alternative zum deskriptiven Konzept eine Optimierung der Betonzusammensetzung im Hinblick auf die Verringerung des Klinkergehaltes vornehmen. Hierzu könnte er – um zwei Beispiele zu nennen – den Mindestzementgehalt der Norm unterschreiten und zum Erreichen des Mindestleimvolumens weitere Betonzusatzstoffe (Flugasche, Kalksteinmehl) verwenden oder einen Zement CEM VI gemäß EN 197-5 auch ohne allgemeine bauaufsichtliche Zulassung für die Anwendung einsetzen. Der Nachweis der Eignung des Betons erfolgt anhand entsprechender Prüfungen und Einordnung in die genannten Klassen.

Deutschland hat im europäischen Vergleich in einigen (gängigen) Expositionsklassen relativ hohe w/z-Werte und geringe Mindestzementgehalte - es gibt zudem keine Differenzierung

nach der Zementart innerhalb einer Expositionsklasse. Beton für ein Außenbauteil XC4 ist mit einem maximalen Wasserzement von 0,60 herzustellen. Die Zemente CEM I bis CEM III/B können verwendet werden. Das nachfolgende Bild 18 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Klinkergehalt im Beton und der Karbonatisierungsrate für Betone mit Wasserzementwerten zwischen 0,59 und 0,65. Diese Betone sind nach DIN 1045-2 für die Expositionsklassen XC4 bzw. XC3 geeignet. In Ergänzung sind Daten für einen verringerten w/z-Wert enthalten. Folgendes wird deutlich: Entsprechend der heutigen Anwendungspraxis müssten die zulässigen Karbonatisierungsraten bei etwa $9 \text{ mm/a}^{0,5}$ für XC3 bzw. bei etwa $7 \text{ mm/a}^{0,5}$ für XC4 liegen. Bisher sind aber auf der Basis von Zuverlässigkeitsbetrachtungen für die heute verwendeten Betondeckungen Werte von etwa $4\text{--}5 \text{ mm/a}^{0,5}$ vorgesehen. Würden Betone nach dem deskriptiven Konzept zusätzlich getestet, wären Wasserzementwerte abzusenken bzw. Klinkergehalte zu erhöhen.



allerdings Abschnitt „Festigkeitsentwicklung als Grundlage für die Nachbehandlung“) verwendet werden können.

6 Eine klimaneutrale Betonbauweise ist möglich

Der vorliegende Artikel hat aufgezeigt, dass auf dem Weg zur klimaneutralen Betonbauweise ein umfangreicher Maßnahmen-Mix entlang der gesamten Wertschöpfungskette von Zement und Beton notwendig ist. So lassen sich bereits heute bei vergleichbarer technischer Leistungsfähigkeit bevorzugt Betone unter Verwendung klinkereffizienter Zemente (z. B. CEM II- bzw.

CEM III-Zemente) einsetzen. Dabei sind jedoch regionale Unterschiede in der Verfügbarkeit der Zemente bzw. der für ihre Herstellung notwendigen Rohstoffe zu beachten. Zudem bieten CO₂-effiziente Bauteile und Konstruktionen aus Beton weitere Potenziale. Gleichzeitig gilt es, die notwendigen normativen und rechtlichen Voraussetzungen zu schaffen, damit neue, besonders CO₂-effiziente Zemente und Betone in die Anwendung kommen. Dies betrifft einerseits die Überarbeitung bestehender Normen und Regelwerke, an denen die Branche mit Hochdruck arbeitet, aber auch die Frage, wie beispielsweise Anreize für den Einsatz CO₂-effizienter Betone in Ausschreibungen gesetzt werden könnten.

Doch die Dekarbonisierung ist nicht nur eine technische Herausforderung. Es bedarf vielmehr der engagierten Mitwirkung aller am Bauprozess Beteiligten. Planer, Architekten und die bauausführenden Unternehmen nehmen hier eine entscheidende Rolle ein und sind aufgerufen, in Zukunft viel stärker als bisher die Aspekte Ressourceneffizienz und Klimaschutz in ihre Überlegungen einzubeziehen. Der VDZ, das IZB und die Zementhersteller in Deutschland ihrerseits stehen für einen breit angelegten Dialog zur Umsetzung der vorgeschlagenen Maßnahmen entlang der Wertschöpfungskette bereit.

Schrifttum

- [1] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2020
- [2] Müller, Christoph; Mohr, Manuel. Wie gelingt die Dekarbonisierung des Betonbaus in der Praxis? Konstruktiv: Nachrichten für die im Bauwesen tätigen Ingenieure. 2021, (02), S. 34 - 40
- [3] Müller, Christoph; Hermerschmidt, Wibke: Dekarbonisierung: Weniger CO₂ – mehr Nachbehandlung? In: Tagungsband zum 17. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung am 11. März 2021
- [4] Müller, Christoph: Klinkereffiziente Zemente – wichtiger Baustein auf dem Weg zur Dekarbonisierung von Zement und Beton. In: Tagungsband zum 18. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung am 10. März 2022
- [5] CEM II- und CEM III/A-Zemente im Betonbau – Nachhaltige Lösungen für das Bauen mit Beton (2008) – zu beziehen über www.beton.org
- [6] Müller, C.; Palm, S.; Hermerschmidt, W.: Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit CEM II/B-LL und CEM II/C-M (S-LL)-Zementen. Zeitschrift beton 10/2019, S.362-371
- [7] Müller, C.; Palm, S.: Anwendung klinkereffizienter Zemente. HeidelbergCement Newsletter Technik, September 2020
- [8] Frostprüfung von Beton. Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe 2012
- [9] European Cement Research Academy (ECRA) (2017) Development of State of the Art-Techniques in Cement Manufacturing: Trying to Look Ahead; CSI/ECRA-Technology Papers 2017 (Hrsg. Cement Sustainability Initiative (CSI)), Düsseldorf, Genf.

- [10] Dienemann, W.; Neumann, T.; Schnedl, G.; Walenta, G.; Rickert, J. (2015) Alternative Bindemittelkonzepte – ein Überblick; VDZ-Jahrestagung Zement, Düsseldorf.
- [11] Verein Deutscher Zementwerke e.V.: Umweltproduktdeklarationen für verschiedene Zemente; verifiziert und freigegeben durch das Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU)
- [12] Bundesverband Spannbeton-Fertigdecken, Hrsg. Die Zukunft Spannbeton-Fertigdecken: schnell – flexibel – wirtschaftlich. Berlin, 2019 Verfügbar unter: https://www.spannbetonfertigdecken.de/images/BVSF-Imagebroschuere_2019.pdf
- [13] Seifert, W.; Lieboldt, M.: Ressourcenverbrauch im globalen Stahlbetonbau und Potenziale der Carbonbetonbauweise: Globale Herausforderungen des Bauwesens. Beton- und Stahlbetonbau. 2020, 115(6), S.469-478
- [14] Seifert, W.; Lieboldt, M.; Curbach, M.: Ressourcenverfügbarkeit und Konsequenzen bei der Planung von Betonbauwerken. Beton. 2019, 69(9), S.321-322
- [15] Robert J. Flatt, Timothy Wangler. Digital Concrete 2018: Special Issue. Cement and Concrete Research. 2018, 112(SI)
- [16] Digital Concrete 2020: Sonderheft. CPT Worldwide – Construction Printing Technology. 2020, (2), S.1-71
- [17] Lösch, Claudia; Rieseberg, Philip. Infralichtbeton: Entwurf, Konstruktion, Bau. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl., 2018
- [18] Fischer, Oliver; Gehrlein, Sebastian; Lechner, Thomas; Mensinger, Martin; Ndogmo, Josef; Seidl, Günter. Entwicklung ressourcenschonender, modularer Betonkonstruktionen aus Ultrahochleistungsbeton (UHPC). Stuttgart, 2017 (IRB-Forschungsbericht F 3053) Verfügbar unter: <https://www.irbnet.de/daten/rswb/17119008933.pdf>
- [19] Wörner, Mark; Schmeer, Daniel; Schuler, Benjamin; Pfinder, Julian; Garrecht, Harald; Sawodny, Oliver; Sobek, Werner. Gradientenbetontechnologie: Von der Mischungsentwicklung über den Bauteilentwurf bis zur automatisierten Herstellung. Beton- und Stahlbetonbau. 2016, 111(12), S.794-805
- [20] "DGNB veröffentlicht Studie zu CO₂-Emissionen von Bauwerken"; DGNB Pressemitteilung, Stuttgart, 10.11.2021
- [21] Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion – Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden; Herausgeber und Ansprechpartner: Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen –DGNB e.V., Stand August 2021
- [22] fib (Hrsg.): fib Model Code for Concrete Structures 2010, Ernst & Sohn, 2013
- [23] DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontagwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010; Ausgabedatum: 2011-01
- [24] 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
- [25] 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
- [26] 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
- [27] Tydlitat, 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

- [28] Müller, Christoph; Eickschen, Eberhard; Breitenbücher, Rolf; Köster, Caroline: Überprüfung des Zeitbeiwerts für Fahrbahndeckenbetone In: Griffig: Aktuelles über Verkehrsflächen aus Beton (2013) 1, S. 2–7
- [29] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.): Zement-Taschenbuch 2008, 51. Ausgabe, Düsseldorf: Verlag Bau+Technik (2008), ISBN 978-3-7640-0499-6
- [30] Neisecke, J.: Karbonatisierung von Stahlbeton – wirklich ein Problem? In: Beton-Informationen 31 (1991) 3–4, S. 27–31
- [31] Walz, K.: Carbonatisierung des Betons: Einflüsse und Auswirkungen auf den Korrosionsschutz der Bewehrung In: beton (1972) 7, S. 296–299
- [32] Palm, S.; Müller, C.; Proske, T.; Rezvani, M.; Graubner, C. A.: Concrete application of clinker-efficient cements. *Advances in Cement Research*, Volume 31 Issue 5, 2019, pp. 225–234
- [33] Hermerschmidt, W.: Modelle zur Beschreibung der thermomechanischen Materialeigenschaften jungen Betons. Dissertation, Technische Universität Braunschweig, 2016
- [34] Zement-Merkblatt Betontechnik B8 - 4.2014 - Nachbehandlung und Schutz jungen Betons - Informations-Zentrum Beton GmbH, Toulouser Alle 71, Düsseldorf (Hrsg.)