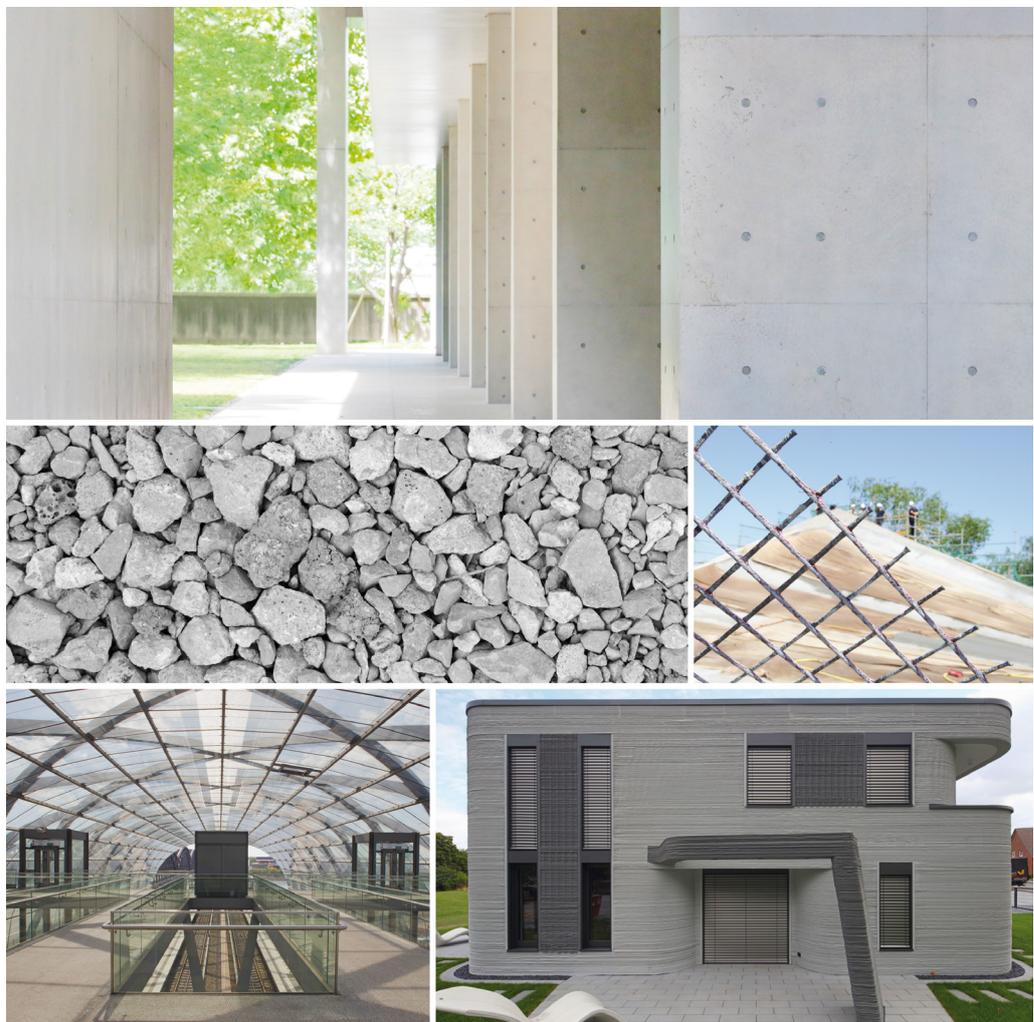


SYMPOSIUM

18. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 10. März 2022

Gutes Klima für die Zukunft.
Dekarbonisierung als wichtiger Schlüssel
zum nachhaltigen Bauen mit Beton



Ulrich Nolting, Frank Dehn, Vanessa Mercedes Kind (Hrsg.)

SYMPOSIUM

Gutes Klima für die Zukunft.

Dekarbonisierung als wichtiger Schlüssel zum nachhaltigen Bauen mit Beton

SYMPOSIUM

18. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 10. März 2022

Gutes Klima für die Zukunft.
Dekarbonisierung als wichtiger Schlüssel zum nachhaltigen Bauen mit Beton

Herausgegeben von
Ulrich Nolting, Frank Dehn, Vanessa Mercedes Kind

Mit Beiträgen von

Winfried Baumgärtel	Frank Schultmann
Alper-Sedat Dönmez	Rebekka Volk
Torben Gädt	Thomas Wagner
Rudolf Hügel	Mark Weiher
Christoph Müller	Udo Wiens
Markus Müller	

Veranstalter:
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
76131 Karlsruhe
VDB – Verband Deutscher Betoningenieure e. V.
Regionalgruppen 8 und 10
InformationsZentrum Beton GmbH
Gerhard-Koch-Straße 2+4
73760 Ostfildern

Titelbildcollage

Oben: Adobe Stock © taka, Mitte links: Adobe Stock © maho, Mitte rechts: © Robert Mehl,
Unten links: © Robert Mehl, Unten rechts: © Robert Mehl

Hinweis der Herausgeber

Für den Inhalt namentlich gekennzeichnete Beiträge ist die jeweilige Autorin bzw. der jeweilige Autor verantwortlich.

Impressum



Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
KIT Scientific Publishing
Straße am Forum 2
D-76131 Karlsruhe

KIT Scientific Publishing is a registered trademark
of Karlsruhe Institute of Technology.
Reprint using the book cover is not allowed.

www.ksp.kit.edu



*This document – excluding parts marked otherwise, the cover, pictures and graphs –
is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License (CC BY 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>*



*The cover page is licensed under a Creative Commons
Attribution-Non Commercial 4.0 International License (CC BY-NC 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2022 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISBN 978-3-7315-1163-2

DOI 10.5445/KSP/1000141938

Vorwort

Unsere Weltbevölkerung wächst stetig und damit auch der Bedarf an Wohn- und Lebensraum. Nie wurden so viele Gebäude errichtet und Brücken gebaut wie jetzt. Dabei ist Beton als leistungsfähiger und dauerhafter Baustoff in vielen Bereichen unersetzlich. Gleichzeitig ist der Klimaschutz heute wichtiger denn je. Es ist unsere Aufgabe, Treibhausgasemissionen zu reduzieren und mit den uns zur Verfügung stehenden Ressourcen verantwortungsvoll umzugehen.

Die Dekarbonisierung der bislang CO₂-intensiven Betonbauweise stellt dabei einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg zum nachhaltigen Bauen dar. Doch welchen Beitrag können die einzelnen Beteiligten leisten? Und welche Chancen aber auch Herausforderungen bringt klimaneutrales Bauen mit sich? Diesen und weiteren Fragestellungen widmet sich unser Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Wir möchten Ihnen einen Überblick darüber geben, wie nachhaltiges und klimaneutrales Bauen mit Beton gelingen kann. Welche Lösungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen und welche Hürden noch überwunden werden müssen.

Die Veranstaltung beginnt mit einem Überblick über die Notwendigkeit des klimaneutralen Bauens und den Anforderungen, die sich daraus für den Betonbau ergeben. Anschließend stellen Vortragende aus den Bereichen Zementindustrie, Bauchemie und Bauausführung Zukunftsstrategien vor und zeigen auf, welche Ansätze bereits realisiert wurden. Ergänzend präsentieren Vertreter der Regelsetzer und der öffentlichen Hand, welche Ziele und Wege sie auf dem Weg zum nachhaltigen Bauen anstreben. Im letzten Vortrag wird wiederum der Frage nachgegangen, wie sich diese Ansätze mit dem Ziel der Wirtschaftlichkeit, aber auch der Verfügbarkeit der benötigten Ressourcen realisieren lassen. Die Veranstaltung schließt mit einer ausführlichen Fragen- und Diskussionsrunde, in der sich Vortragende und Publikum über die behandelten Themen austauschen können.

Die Veranstalter

Inhalt

	Vorwort	I
Christoph Müller	Klinkereffiziente Zemente – ein wichtiger Baustein auf dem Weg zur Dekarbonisierung von Zement und Beton	1
Alper-Sedat Dönmez Thomas Wagner Torben Gädt	Zur Zukunft von Betonzusatzmitteln: Herausforderungen und Chancen im Zusammenspiel mit neuen Bindemitteln	11
Udo Wiens	Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen nach dem Performance-Prinzip	23
Rudolf Hügel Mark Weiher	Herausforderungen und Chancen der Bauwirtschaft – Unser Beitrag zur Nachhaltigkeit	35
Winfried Baumgärtel Markus Müller	Sichtweise der öffentlichen Hand	49
Rebekka Volk Frank Schultmann	Stoffstrommanagement als Beitrag zum nachhaltigen Bauen	55
	Programm der Veranstaltung	57
	Autorenverzeichnis	59
	Übersicht über Tagungsbände vergangener Symposien	61

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

Christoph Müller

Zusammenfassung

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 Prozent angestrebt. Bis spätestens 2050 soll der Anteil von CEM II/C- und CEM VI-Zementen auf rund 60 Prozent 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 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 Fertigteilverk 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 CO₂-Emissionen aus der Zementherstellung reduziert werden können [2]. Bereits in der historischen 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 letzten 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 (Tabelle 1).

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

Hauptarten	Bezeichnung der Produkte (Zementarten)		Zusammensetzung (Massenanteil in Prozent) ^a										Nebenbestandteile
			Hauptbestandteile										
			Klinker	Hütten-sand	Silica-staub	Puzzolan		Flugasche		Gebrannter Schiefer	Kalkstein		
	natürlich	natürlich getempert				kieselsäure-reich	kalk-reich	L ^c	LL ^c				
Produkt-name	Produkt-bezeichnung	K	S	D ^b	P	Q	V	W	T	L ^c	LL ^c		
CEM II	Portland-komposit-zement ^d	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

^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).

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 CO₂-Emissionen in den genannten Anwendungsbereichen einsparen. CEM VI-Zemente, die ebenfalls bis zu 20 M.-% ungebraunten 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 Zement wegen ihres noch einmal geringeren CO₂-Fußabdruckes 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.

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 im Heft 10/2019 der Zeitschrift „beton“ veröffentlicht [5]. 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.

2.2 Carbonatisierung

In Abbildung 1 sind die Karbonatisierungstiefen von Betonen - bestimmt gemäß DAFStb Heft 422 - mit einem Zementgehalt von 260 kg/m³ und einem Wasserzementwert w/z = 0,65 dargestellt. Für die Expositionsklasse XC3 müssen Betone in Deutschland diese Zusammensetzung aufweisen sowie die Anforderungen an die Festigkeitsklasse C20/25 einhalten.

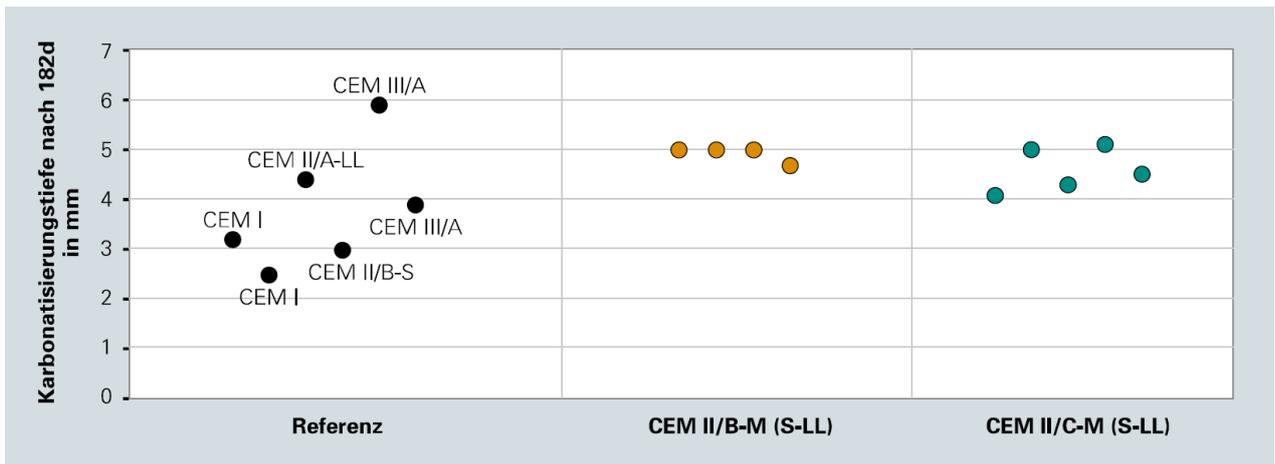


Abb. 1: Karbonatisierungstiefen von Betonen mit einem Zementgehalt von 260 kg/m^3 und einem Wasserzementwert von 0,65 [6]

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

2.3 Frost-Tausalz-widerstand

Für die Expositions-kategorie 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 Druckfestigkeits-kategorie C30/37 erfüllen. In Zulassungsverfahren des DIBt wird das CDF-Verfahren in Kombination mit dem BAW-Grenzwert [7] verwendet: Die Abwitterung nach 28 FTW darf höchstens $1,5 \text{ kg/m}^2$ betragen. Abbildung 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-kategorie XF4 ist daher nicht möglich.

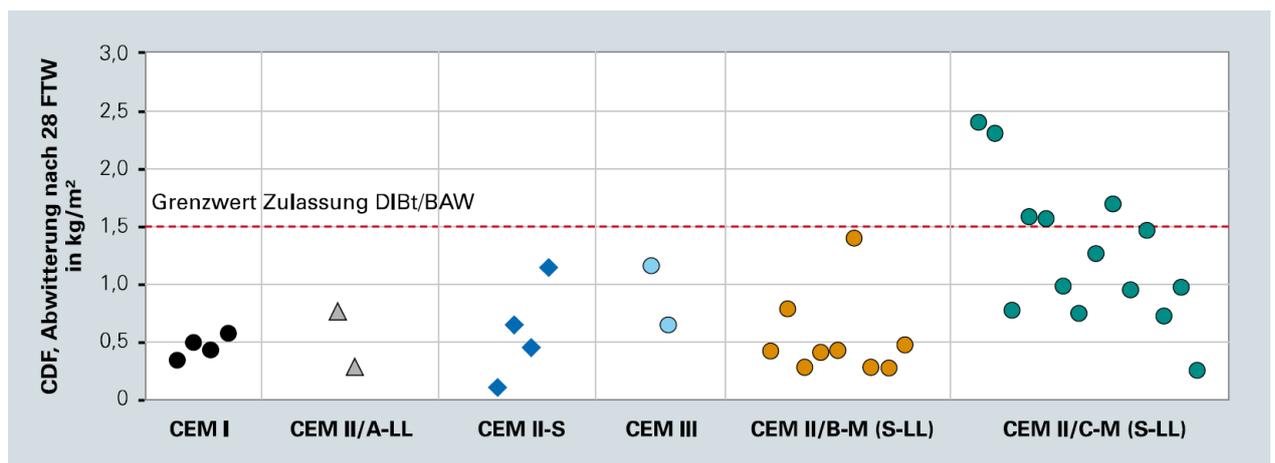


Abb. 2: Abwitterung der Betone mit einem Zementgehalt von 320 kg/m^3 , einem Wasserzementwert von 0,5 und einem Luftgehalt von $5,0 \pm 0,5 \text{ Vol.-%}$ im CDF-Verfahren [6]

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/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 (Tabelle 2).

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

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	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	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	O	X
	C	M S-LL	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	O	O	O	X	X	X	X	X	X	X

Fußnoten nicht aufgeführt

* 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

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 seit wenigen Monaten erste allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen vorliegen, können somit mindestens für alle Expositionsklassen außer XF2, XF3 und XF4 verwendet werden. Diese Regelung wird für CEM II/C-M (S-LL)-Zemente dann in etwa zwei Jahren in der nächsten Ausgabe der Betonnorm DIN 1045-2 enthalten sein. Betone für den üblichen Hochbau (Innenbauteile XC1 und Außenbauteile XC4/XF1) können je nach Verfügbarkeit mit CEM II/C-M (S-LL)-Zementen hergestellt werden. Dies ist insofern von Bedeutung, als etwa 65 % 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 ¹⁾,
- Portlandkompositzemente CEM II/B-M mit S, T, V bzw. D ¹⁾,
- Portlandkompositzemente CEM II/B-LL, CEM II/B-M und ggf. CEM II/C-M mit abZ (Anwendungszulassung az),
- Hochofenzemente CEM III/A ²⁾,
- Hochofenzemente CEM III/B ³⁾.

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 $z \geq 340$ kg/m³

b) Räumlerlaufbahnen: $w/z \leq 0,35$; Mindestfestigkeitsklasse C40/50 und $z \geq 360$ kg/m³; Beachtung von DIN 19569-1

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 CO₂-Effizienz bei gleichzeitiger Sicherstellung der Dauerhaftigkeit im Baustoff Beton erreicht werden kann. Die Betonnorm DIN 1045-2 sieht derzeit feste Grenzrezepturen 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 Grenzrezepturen 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 Wasserzementwert. Eine entsprechende Änderung der Randbedingungen in der Prüfung, z. B. eine Absenkung des Wasserzementwerts, ist in Laborversuchen möglich, bauordnungsrechtlich derzeit aber nicht umsetzbar. Die Diskussion, dies künftig generell zu ermöglichen, hat aber begonnen.

3.2 Beispiel Carbonatisierung

Die folgende Abbildung 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 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.

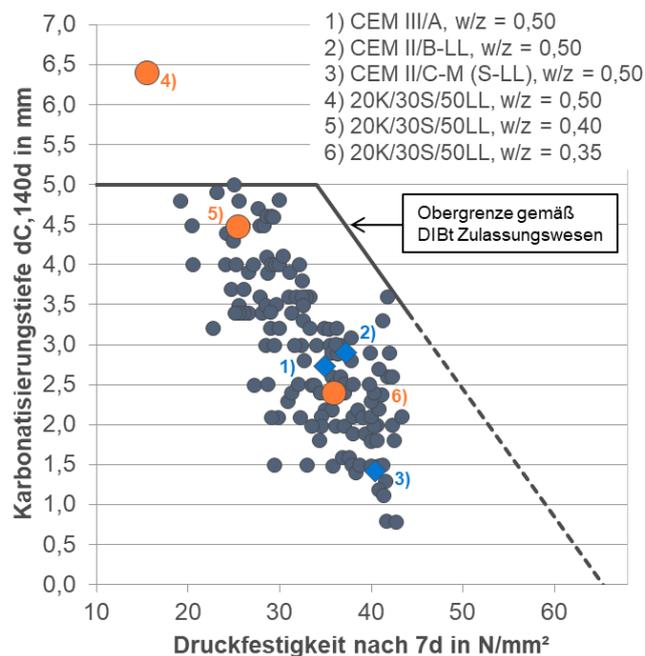


Abb. 3: Carbonatisierung: Prüfergebnisse von klinkereffizienten Zementen [8] vor dem Bewertungshintergrund des Deutschen Instituts für Bautechnik (DIBt)

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.

4 Hilfestellung für Planer

4.1 Orientierungswerte für leistungsbezogene Treibhausgasemissionen von Beton

Bereits heute lässt sich ermitteln, ob ein Beton auf Basis eines 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 CO_2 -Minderungspotenziale bestehen, sind in Tabelle 3 Orientierungswerte für Treibhausgasemissionen von Betonen in Abhängigkeit von der gewählten Betondruckfestigkeitsklasse dargestellt. Tabelle 4 zeigt zudem eine Darstellung unter Berücksichtigung der Leistungsfähigkeit des Betons (CO_2 -Äquivalent/ $(\text{m}^3 \text{ Beton} \times \text{MPa})$). 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 Expositionsklasse begründet, ohne dass eine Materialeinsparung möglich ist, kann anhand dieser Werte die CO_2 -Effizienz des Betons beschrieben werden.

Tab. 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 CO ₂ -Äquivalent/m ³ Beton) ¹⁾					
3	Beton heutiger Durchschnitt	178	197	219	244	286	300
4	Beton mit CEM I (CSC Benchmark) ²⁾	213	237	261	286	312	325
5	Beton 20 % unter Durchschnitt ³⁾	142	158	175	195	229	240
6	Beton 30 % unter Durchschnitt ⁴⁾	125	138	153	171	200	210

1) Werte ohne Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung
 2) CO₂ Modul des Concrete Sustainability Council für Deutschland (in Vorbereitung)
 3) z. B. Beton mit CEM III/A oder CEM II/C
 4) z. B. Beton mit CEM VI

Tab. 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 ¹⁾ (kg CO ₂ -Äquivalent/m ³ x MPa)					
3	Beton heutiger Durchschnitt	6,1	5,8	5,3	5,0	4,8	4,7
4	Beton mit CEM I (CSC Benchmark) ²⁾	7,3	7,0	6,4	5,8	5,3	5,1
5	Beton 20 % unter Durchschnitt ³⁾	4,9	4,6	4,3	4,0	3,9	3,8
6	Beton 30 % unter Durchschnitt ⁴⁾	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) CO₂ Modul des Concrete Sustainability Council für Deutschland (in Vorbereitung)
 3) z. B. Beton mit CEM III/A oder CEM II/C
 4) z. B. Beton mit CEM VI

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 CO₂-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 CO₂-effizienter Zemente zu ermöglichen und zu beschleunigen. Diese Daten und Überlegungen haben Eingang gefunden in die Planungshilfe des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton [9].

4.2 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 [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].

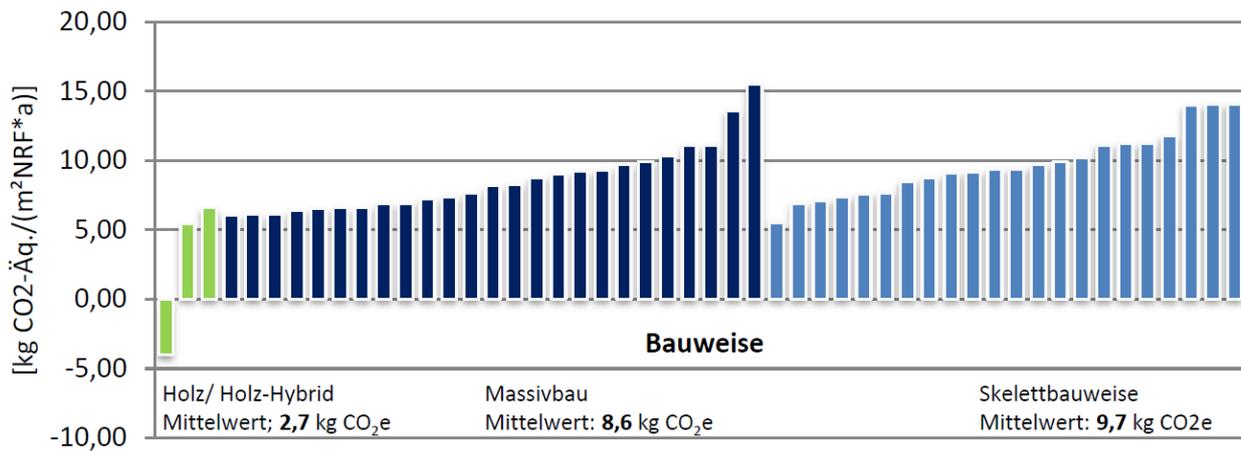


Abb. 4: Treibhausgasemissionen (GWPK) in Abhängigkeit der Bauweise / Materialität des Tragwerks (n=50) [11]

Für die Stahlbetonskelettbauweise wurden in [11] 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.

5 Literatur

- [1] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. Dekarbonisierung von Zement und Beton - Minderungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf, 2020
- [2] CEM II- und CEM III/A-Zemente im Betonbau - Nachhaltige Lösungen für das Bauen mit Beton (2008) - zu beziehen über www.beton.org
- [3] Müller, C., Mohr, M.: Wie gelingt die Dekarbonisierung des Betonbaus in der Praxis? - konstruktiv 2/2021 (Baukammer, Berlin)
- [4] Müller, C., Mohr, M.: Wie gelingt die Dekarbonisierung des Betonbaus in der Praxis? HeidelbergCement Newsletter Technik, September 2021
- [5] 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
- [6] Müller, C.; Palm, S.: Anwendung klinkereffizienter Zemente. HeidelbergCement Newsletter Technik, September 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, Volume 31 Issue 5, 2019, pp. 225-234
- [9] Nachhaltig bauen mit Beton - Planungshilfe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb); Berlin, 29. Oktober 2021
- [10] "DGNB veröffentlicht Studie zu CO₂-Emissionen von Bauwerken"; DGNB Pressemitteilung, Stuttgart, 10.11.2021

- [11] 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

6 Autor

Prof. Dr.-Ing. Christoph Müller

VDZ Technology gGmbH

Toulouser Allee 71

40476 Düsseldorf

Zur Zukunft von Betonzusatzmitteln: Herausforderungen und Chancen im Zusammenspiel mit neuen Bindemitteln

Alper-Sedat Dönmez, Thomas Wagner, Torben Gädt

Zusammenfassung

Betonzusatzmittel sind unentbehrliche Instrumente, um die Eigenschaften von Frisch- und Festbeton zu verbessern. Von herausragender Bedeutung unter den Zusatzmitteln sind dabei Fließmittel, welche es erlauben den Wasseranspruch von Beton zu senken und damit Zement einzusparen. Aufgrund der Notwendigkeit, die Nachhaltigkeit und insbesondere die CO₂-Intensität von Beton weiter stark zu verbessern, arbeiten Forschende intensiv an neuen Bindemittelkonzepten für Beton, welche niedrigere CO₂-Intensitäten als Portlandzement aufweisen. Während es für das Verständnis der Wirkungsbeziehungen zwischen Fließmitteln und Portlandzement in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gegeben hat, steht das Wissen um die Wirkungsbeziehungen zwischen neuen Bindemitteln und Zusatzmitteln naturgemäß am Anfang. In dieser Arbeit wird einerseits ein knapper Literaturüberblick zur Wirksamkeit von Fließmitteln für alkali-aktivierte Bindemittel und LC³-(Limestone Calcined Clay Cement) Zement gegeben und andererseits werden eigene Arbeiten zur Rheologie von LC³-Bindemitteln in Gegenwart von Polycarboxylatether-Fließmitteln dargestellt. Während Fließmittel in alkali-aktivierten Bindemitteln nur für den Fall niedrig konzentrierter NaOH-Aktivierung und hoch geladener Bindemittel in gewohnter Weise funktionieren, ergibt sich aus dem Stand der Technik sowie aus den hier gezeigten Arbeiten das Bild, dass Fließmittel in LC³-Bindemitteln in wesentlichen Zügen normal wirken: eine starke Wasserreduktion ist erreichbar und die Fließmittel folgen ähnlichen Struktur-Wirkungsbeziehungen wie in reinen Zementbindemitteln. Unterschiede finden sich in einem deutlich erhöhten Fließmittelbedarf sowie in verkürzten Verarbeitungszeiten. Die Forschung befindet sich hier noch in einer frühen Phase und es ist zu erwarten, dass sich die Zusammenhänge in den nächsten Jahren deutlich präzisieren werden.

1 Einleitung

1.1 Betonzusatzmittel

Die Herausforderungen für modernen Beton sind groß. Einerseits erfordert die Umstellung auf eine CO₂-neutrale Bauwirtschaft eine Veränderung der Bindemittelmittelchemie von Portlandzement hin zu CO₂-emissionsarmen oder -freien Bindemitteln, andererseits gilt es im Bestand zu modernisieren und wenn möglich auf Neubauten zu verzichten, um so die vorhandene Bausubstanz länger nutzen zu können.

Zusatzmittel spielen insbesondere für die Herstellung von ressourceneffizienten Betonen eine zentrale Rolle [1, 2]. Dabei sind insbesondere Fließmittel wichtig, da diese eine Senkung des Wasser-Zement-Werts (w/z) ermöglichen (senkrechter Pfeil in Abbildung 1). Als zweiter wichtiger Nutzen von Fließmitteln sei die Erhöhung der Fließfähigkeit von Betonen bei konstantem w/z-Wert genannt (horizontaler Pfeil in Abbildung 1). Da der w/z-Wert direkt mit der erreichbaren Festigkeit und Dauerhaftigkeit eines Betons verknüpft ist, spielt die Senkung des w/z-Werts eine sehr große Rolle in der Betontechnologie. So wird es möglich, entweder druckfesteren Beton zu formulieren oder Beton mit niedrigeren Bindemittelanteilen bei gleichbleibender Festigkeit. Beide Ansätze führen zu einer deutlichen Steigerung der Ressourceneffizienz des Betons – einerseits durch die deutlich verlängerte maximale Nutzungszeit und andererseits durch die mögliche Einsparung von Zement.

Die Wirksamkeit von Fließmitteln für SCM-haltige (SCM: Supplementary Cementitious Material) Betone ist für SCMs wie Flugasche, Hüttensand oder natürliche Puzzolane weitgehend bekannt. Ganz allgemein lässt sich sagen, dass Flugasche oder Hüttensand die Wirksamkeit der Fließmittel nicht stören, sondern im Gegenteil gegenüber reinen Portlandzement-basierten Betonen oft zu erhöhter Fließfähigkeit führen [3, 4].

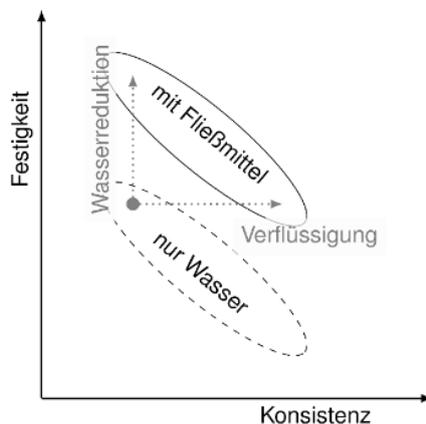


Abb. 1: Schema zu erreichbaren Festigkeits- und Konsistenzwerten von Betonen, welche entweder mit oder ohne Fließmittel formuliert sind.

2 Literaturübersicht

2.1 Fließmittel für alkali-aktivierte Bindemittel

Unter den neueren Bindemittelkonzepten sind alkali-aktivierte Bindemittel (auch alkali-aktivierte Materialien AAM genannt) zu nennen. Diese sind in der Regel frei von Portlandzement und basieren auf der Reaktion von glasig-amorphen Materialien wie natürlichen Puzzolanen, Hüttensand oder Flugasche mit Aktivatoren. Als Aktivatoren besonders geeignet sind Alkalisalze wie NaOH, Na₂SiO₃ oder Na₂CO₃. Die Vielfalt von alkali-aktivierten Materialien resultiert aus den vielen möglichen Kombinationen aus Aktivatoren und Alumosilikaten. Aufgrund der großen Kombinationszahl, dem jüngeren Alter des Bindemittels und der deutlich geringeren Relevanz für Beton ist die Zahl der Rheologiestudien deutlich geringer als für Portlandzement. Aktuelle Übersichtsartikel geben einen hilfreichen Überblick über dieses Forschungsfeld [5, 6].

Um einordnen zu können, wie sich alkali-aktivierte Bindemittel rheologisch von Portlandzement (PZ oder hier auch OPC genannt, für Ordinary Portland Cement) unterscheiden, wurden im Rahmen dieser Arbeit einige Daten für Leime aus alkali-aktivierten Materialien aus der Literatur in Abbildung 2 zusammengefasst [7-12]. Dort sind die Fließgrenzen für verschiedene alkali-aktivierte Hüttensande als Funktion des Volumenanteils des Hüttensands zusammengetragen. Diese Fließgrenzen sind dabei entweder in der Literatur rheometrisch bestimmt worden oder sie wurden im Rahmen dieser Arbeit aus dem berichteten Fließmaß in eine Fließgrenze unter Verwendung der folgenden Gleichung umgerechnet [13]:

$$\tau_0 = \frac{228\rho g V^2}{128\pi^2 R^5} \quad (1)$$

Darin sind ρ = Dichte des Leims, g = Erdbeschleunigung, V = Volumen des Konus und R = Radius des Fließmaßes des Leims.

Die ausgewählten Daten umfassen verschiedene Aktivatorsysteme sowohl hinsichtlich der verwendeten Menge (in der Abbildung 2 nicht gezeigt) als auch der Chemie (dargestellt als unterschiedliche Symbole). Weiterhin wurden rheologische Daten einbezogen, welche mit Fließmitteln erhalten wurden (graue Quadrate = mit Fließmittel, schwarz = ohne Fließmittel). Befinden sich die grauen Punkte exakt unterhalb von schwarzen Punkten,

d. h. bei gleichem Volumenanteil Hüttensand, so handelt es sich in diesem Fall um erfolgreiche Versuche die Fließgrenze von NaOH-aktivierten Systemen durch Fließmittel zu senken. Während hochgeladene Polycarboxylatether (PCE) die kompetitive Adsorption auf den Hüttensandpartikeln im Wettbewerb mit Hydroxidionen gewinnen können und somit als Fließmittel wirksam werden, ist dies bei Verwendung von Carbonaten oder Silikaten nicht mehr möglich. Das bedeutet, dass konventionelle Fließmittel praktisch nicht mehr adsorbieren und keine Erniedrigung der Fließgrenze gegenüber des Referenzsystems bewirken können. Auch für NaOH-aktivierte Systeme ist beschrieben, dass die Wirksamkeit von der Ladungsdichte der PCE einerseits und der Konzentration der OH^- -Ionen andererseits abhängt [14], d. h. bei sehr hoher NaOH-Konzentration und normal geladenen PCE-Fließmitteln findet ebenfalls keine Adsorption statt und somit keine zusätzliche Verflüssigung durch das Fließmittel.

Um die Fließgrenzen von alkali-aktivierten Materialien besser einordnen zu können, sind in der Abbildung 2 zusätzlich die gefitteten YODEL Kurven [15] für Leime aus Portlandzement mit und ohne PCE-Fließmittel eingetragen (Daten adaptiert nach [16]). Es ist zu beachten, dass im Fall der OPC-Kurven die statische Fließgrenze bestimmt wurde, während die dargestellten Punkte der alkali-aktivierten Hüttensande die dynamische Fließgrenze repräsentieren). Durch Natriumsilikat aktivierte Hüttensande zeigen Fließgrenzen, welche teilweise im Bereich von Zementleimen liegen, die durch PCE vollständig dispergierte Zementpartikel enthalten (siehe die Rauten um die untere Kurve "YODEL Fit OPC + PCE"). Da die Partikelgrößenverteilung von Hüttensand oft derjenigen von Zement sehr ähnlich ist, kann daraus geschlossen werden, dass die kolloidalen Kräfte zwischen den Hüttensandpartikeln ähnlich groß wie diejenigen von PCE dispergierten Zementpartikeln sind.

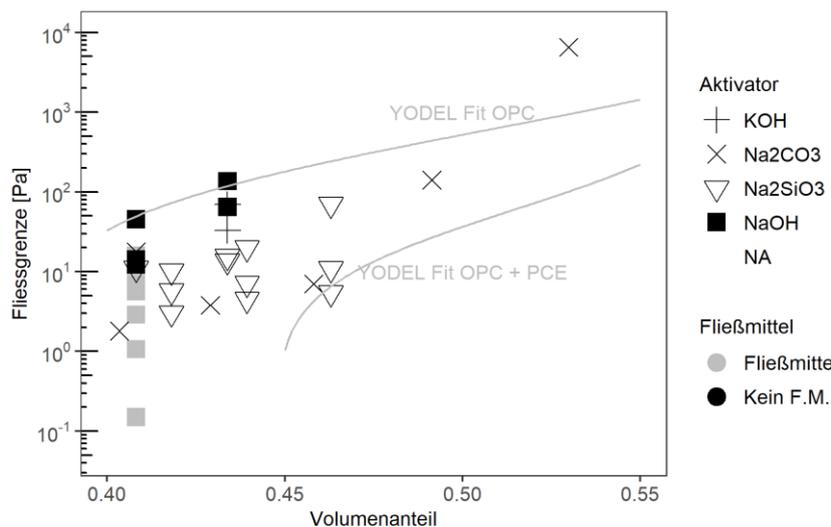


Abb. 2: Fließgrenzen verschiedener, ausgewählter alkali-aktivierter Hüttensande aus der Literatur. In Grau sind Mischungen gezeigt, welche ein Fließmittel enthalten. Die Form der Punkte gibt den verwendeten Aktivator an. Die grauen Linien dienen als Referenz und entsprechen der YODEL Gleichung für einen Portlandzement mit und ohne PCE (Portlandzement-Daten adaptiert nach Perrot - die PCE Menge für die OPC+PCE Kurve entspricht 2 % [16]).

2.2 Fließmittel für LC^3 -Bindemittel

In den letzten Jahren gewinnt das LC^3 -Bindemittelkonzept zunehmend an Aufmerksamkeit. Dabei steht die Abkürzung LC^3 für "Limestone Calcined Clay Cement". Chemisch besteht ein LC^3 -Bindemittel aus einer Mischung aus Portlandzement, kalziniertem Ton und Kalksteinmehl. Es ist dabei üblich den Zementklinkeranteil als Ziffer anzugeben: ein LC^3 -50-Bindemittel enthält entsprechend 50 Gew.-% Portlandzementklinker, ein LC^3 -65-Bindemittel 65 Gew.-%. Ein großer Teil der bisherigen Forschungsarbeiten verwendete das LC^3 -50-Mischungsverhältnis bestehend aus 50 % Portlandzementklinker, 30 % kalziniertem Ton, 15 % Kalksteinmehl und 5 % Gips. Die Eigenschaften des Bindemittels wurden mittlerweile intensiv untersucht und haben sich in vielen Aspekten als

vielfersprechend erwiesen [17]. So sind die Endfestigkeiten der LC³-Betone oft genauso gut oder besser als diejenigen von portlandzementhaltigen Betonen. Weiterhin haben die LC³-basierten Bindemittel gute Dauerhaftigkeitseigenschaften, so ist z. B. die Permeabilität von Chlorid niedriger als in Portlandzementbetonen (siehe auch den aktuellen Übersichtsartikel von Bishnoi et al. [17] sowie die darin enthaltenen Referenzen). Verbesserungspotential haben LC³-Bindemittel hinsichtlich ihrer Frühfestigkeiten und ihres Wasseranspruchs. Die Druckfestigkeiten nach 1 Tag liegen unterhalb der erreichbaren Werte für vergleichbare Betone mit Portlandzement. Ebenso sind gegenüber Portlandzement größere Wassermengen notwendig, um eine fließfähige Konsistenz einzustellen. Neben der Viskosität einer Suspension ist vor allem die Fließgrenze entscheidend für die rheologischen Eigenschaften. Ein nützliches Modell zur Beschreibung der Fließgrenze einer Suspension ist das von Flatt [15] erarbeitete YODEL (Yield Stress Model). Ein alternatives Modell wurde kürzlich formuliert [18]. Nach YODEL gilt für die Fließgrenze einer Suspension folgender Zusammenhang.

$$\tau_0 = \frac{ma^*}{R_{50}^2} \cdot G_{\max} \cdot \frac{\phi^2(\phi - \phi_0)}{\phi_m(\phi_m - \phi)} \quad (2)$$

Das bedeutet, dass neben dem Volumenanteil ϕ der festen Phase (ϕ_0 : Perkulationsvolumenanteil, ϕ_m : maximale Packungsdichte) vor allem die attraktiven kolloidalen Kräfte zwischen den Partikeln G_{\max} sowie die Partikelform ma^*/R_{50}^2 einen Einfluss auf die Fließgrenze τ_0 einer Suspension haben.

Die kolloidalen Kräfte werden insbesondere durch die Oberflächenchemie der Partikel bestimmt. Für Zement liegt in zementärer Porenlösung nur ein sehr geringes Zetapotential vor. Das bedeutet, dass die attraktiven van-der-Waals Kräfte zu einer Flockung der Zementpartikel führen, da die abstoßende elektrostatische Wechselwirkung aufgrund des niedrigen Oberflächenpotentials einen geringeren Betrag aufweist. Als Konsequenz wird Wasser in den Zementagglomeraten eingeschlossen und es kommt zu einem Anstieg der Fließgrenze. Die Oberflächenchemie der suspendierten Partikel wird dabei wesentlich bestimmt durch deren chemische Zusammensetzung sowie durch die in der Porenlösung gelösten Spezies, z. B. der Sulfatkonzentration, der Aktivatorkonzentration (im Fall von alkali-aktivierten Bindemitteln) oder der Fließmittelkonzentration. Der mittlere Partikelradius R_{50} steht im Nenner des YODEL Modells und geht quadratisch ein. Das bedeutet, dass bei ansonsten gleichem Volumenanteil und gleicher Oberflächenchemie, eine Halbierung des mittleren Partikelradius zu einer Vervierfachung der Fließgrenze führt. Da kalzinierte Tone besonders kleine Partikel freisetzen und eine hohe innere Oberfläche haben, ist es nicht überraschend, dass LC³-Bindemittel einen größeren Wasseranspruch haben als Portlandzement. Weiterhin sind die Eigenschaften der kalzinierten Tonminerale entscheidend für deren Wasseranspruch. Da die Eigenschaften der kalzinierten Tone von den Eigenschaften des Rohstoffs, d. h. vor allem der chemischen und mineralogischen Zusammensetzung der Tonminerale, und den Prozessbedingungen beim Brennen abhängen, ist damit zu rechnen, dass sich auch die rheologischen Eigenschaften von LC³-Bindemitteln mit unterschiedlichen Tönen stark unterscheiden. Dies wird durch bisher vorliegende Arbeiten bestätigt [19, 20].

Die in den letzten Jahren erschienenen Studien haben folgende Zusammenhänge für die Rheologie von LC³-Systemen mit und ohne Fließmitteln gezeigt:

- LC³-Leime, Mörtel und Betone haben einen höheren Wasseranspruch als reine OPC Systeme.
- Die Zeta-Potentiale der kalzinierten Tone haben niedrige Beträge, was für attraktive, kolloidale Kräfte spricht [20].
- Durch Packungsoptimierung können die Fließgrenzen bei konstantem Volumenanteil gesenkt werden [21].
- Der Wasseranspruch eines LC³-Systems ist umso höher, je höher der Tonanteil ist.
- Konventionelle Fließmittel sind in LC³-Systemen wirksam. Die notwendige Dosierung ist größer als für Portlandzement. PCE sind dabei dosiereffizienter als beta-Naphthalinsulfonat (BNS) Kondensate [22].

- Die notwendige Menge Fließmittel nimmt mit der Oberfläche und dem Anteil des kalzinierten Tons zu [19,23].
- Die Verarbeitungszeit von LC³-Betonen ist kürzer als für OPC Beton [22].

Im Rahmen dieser Arbeit wurden ausgewählte Literaturergebnisse zur Rheologie von LC³-Leimen mit und ohne Fließmittel in zwei Diagrammen zusammengefasst [19, 20, 22-28]. Einerseits erkennt man in Abbildung 3, dass vor allem zwei Sorten von Studien zur Rheologie vorliegen. Einerseits werden bei konstantem Wasser/Feststoff-Wert (w/s) bzw. bei konstanten Volumenanteilen die Anteile von Zement, kalziniertem Ton und Kalksteinmehl variiert. So entstehen vertikal bei einem Volumenanteil übereinanderliegende Werte. Für diese Serien gilt meist, dass die unteren Werte einer Serie der jeweiligen Portlandzement-Referenz entsprechen bzw. der Mischung mit dem geringsten Anteil an kalziniertem Ton, während der höchste Wert Mischungen entspricht, welche besonders viel kalzinierten Ton enthalten oder einen kalzinierten Ton mit besonders großer Oberfläche. In anderen Rheologiestudien wurde der w/s-Wert für unterschiedliche Mischungen angepasst und die Fließgrenze konstant gehalten. So entstehen horizontal nebeneinanderliegende Punkte im Diagramm (siehe Abbildung 3). Dabei wandern die Punkte mit zunehmender Menge an kalziniertem Ton zu niedrigeren Volumenanteilen. Versuche mit Fließmitteln sind ebenfalls dargestellt (Quadrate). Für die Arbeiten von Plank und Mitarbeitern [23, 27] gilt, dass hier stets die Fließmittelmenge für verschiedene Systeme angepasst wurde, um einen w/s-Wert von 0.5 zu erreichen, was einem Volumenanteil um ca. 0.4 entspricht. Diese Serie erkennt man an den vielen übereinanderliegenden Punkten. Als Referenz sind die YODEL Fits für Portlandzement mit und ohne PCE in das Diagramm eingetragen.

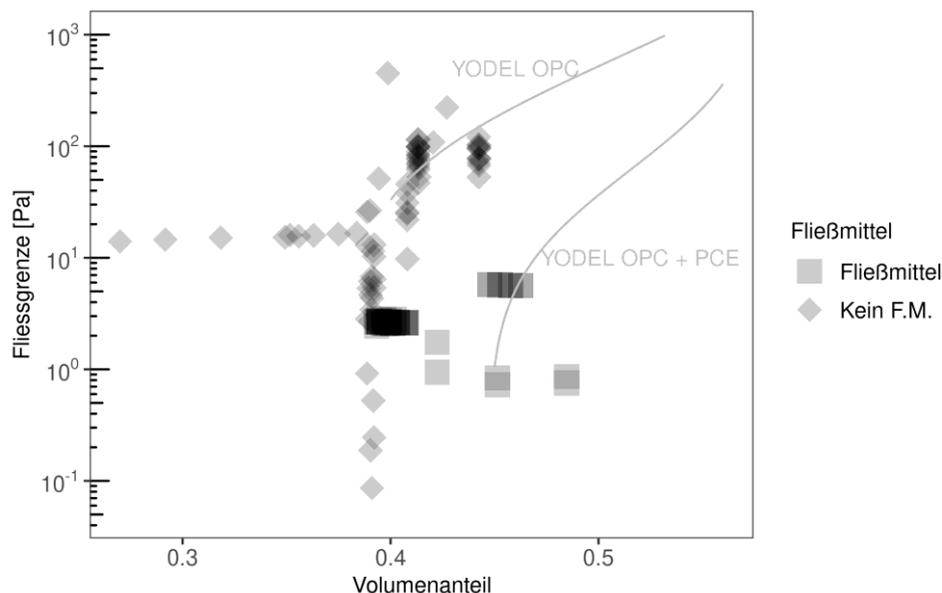


Abb. 3: Fließgrenzen verschiedener, ausgewählter LC³- oder LC³-ähnlicher Leime aus der Literatur. Die Quadrate zeigen Mischungen mit Fließmitteln, die Rauten entsprechen Mischungen ohne Fließmittel. Die YODEL Linien entsprechen denjenigen in Abbildung 2.

Die notwendige Fließmittelmenge für unterschiedliche LC³-Systeme hängt vor allem von der spezifischen BET-Oberfläche der suspendierten Partikel (hier in m²/cm³ angegeben) ab (siehe Abbildung 4). Die Fließgrenze der in diesem Diagramm gezeigten Systeme liegt zwischen ca. 1-3 Pa. Die Fließmittelmenge nimmt dabei linear mit der spezifischen Oberfläche des Systems zu. Je nach Leistungsfähigkeit des Dispergiermittels ist die Steigung dabei umso größer, je weniger leistungsfähig das Dispergiermittel ist. Die Steigungen der verschiedenen PCE liegen nahe beieinander. Weiterhin wird deutlich, dass es einige Meta-Tone gibt, welche besondere Effekte aufweisen (z. B. der Meta-Muskovit, siehe die grauen Dreiecke in Abbildung 4 und die Arbeit von Sposito et al. [19]).

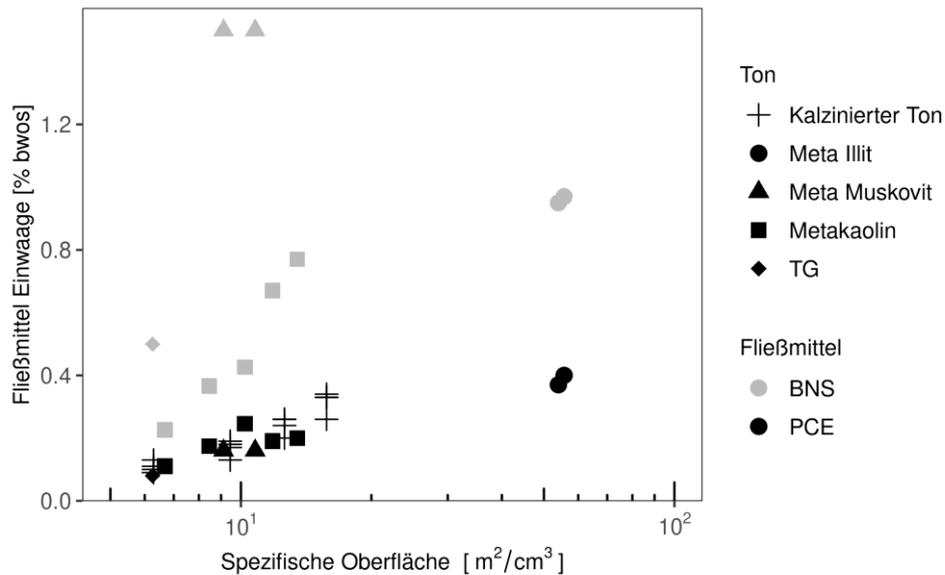


Abb. 4: Aus der Literatur adaptierte Daten. Die Fließgrenzen der hier gezeigten Systeme sind jeweils auf ca. 1-2 Pa eingestellt. Die spezifische Oberfläche setzt sich dabei zusammen aus der Summe der Oberfläche des Zements, des kalzinierten Tons und ggf. des Kalksteinmehls. In Grau sind Systeme gezeigt, in welchen beta-Naphthalinsulfonat (BNS) als Fließmittel verwendet wurde, in schwarz verschiedene PCE. Punkte bei gleicher spezifischer Oberfläche entsprechen unterschiedlich dosiereffizienten PCE.

3 Experimentelle Arbeit

3.1 Materialien

Fließmittel: Es wurden zwei unterschiedliche Fließmittel des PCE-Typs verwendet. Dazu wurde im Labor PCE P1 aus Methacrylsäure und MPEG1000-Methacrylat synthetisiert. Das Molverhältnis Methacrylsäure zu MPEG1000-Methacrylat des Polymer P1 beträgt 2 und die durch Gelpermeationschromatographie bestimmten Molmassen sind $M_w = 42.9$ kDa und $M_n = 29.6$ kDa. Weiterhin wurde ein kommerzielles PCE P2 mit einer mittleren Seitenkettenlänge und einer mittelgroßen Ladungsdichte verwendet, welches hohe Dosiereffizienz in der Wasserreduktion von Betonen zeigt.

Bindemittel: Als Zement wurde ein handelsüblicher CEM I 42.5 R aus Deutschland verwendet. Das Metakaolin wurde ebenfalls kommerziell bezogen. Die Daten des Zements sowie des verwendeten Metakaolins sind in Tabelle 1 dargestellt. Das verwendete Kalksteinmehl ist Betoflow D der Firma Omya (Blaine Wert $11288 \text{ cm}^2/\text{g}$).

3.2 Herstellung der Mischungen

Die für die rheologischen Messungen verwendeten Mischungen wurden in einem Edelstahlbecher mit einem mechanischen Rührwerk mit Flügelrührer bei 1600 rpm für 60 Sekunden angemischt (Gesamtvolumen ca. 100 mL). Die verwendeten Mengen sind in Tabelle 2 gezeigt. Um den Einfluss von unterschiedlichen Volumenanteilen (bzw. unterschiedlichen w/z- oder w/s-Werten) und Polymermengen zu studieren, wurde deren Menge variiert und ist in den jeweiligen Versuchen explizit genannt. Das Fließmittel wurde mit dem Anmachwasser hinzugegeben.

Tab. 1: Links: Elementare Zusammensetzung vom verwendeten Metakaolin und Zement sowie deren Partikelgrößenverteilung und Blaine Oberfläche. Rechts: Phasenzusammensetzung des verwendeten Zements.

Größe	Metakaolin	Zement	Phase	Massenprozent
SiO ₂	50.4	19.6	C ₃ S	48.74
Al ₂ O ₃	32.3	4.9	C ₂ S	20.33
CaO	1.3	60.3	C ₃ A kubisch	4.61
Na ₂ O	7.6	0.18	C ₃ A orthorhombisch	5.29
K ₂ O	3.3	0.76	C ₄ AF	8.99
Fe ₂ O ₃	1.1	3.0	Anhydrit	2.73
SO ₃	0.1	2.9	Hemihydrat	1.81
D10 µm	1.97	1.24	Calcite	3.24
D50 µm	8.32	18.7	Dolomit	0.89
D90 µm	22.11	56.95	Quartz	0.17
Blaine cm ² /g	14624	3162	Periclas	1.91
			Portlandit	1.06

Tab 2: Zusammensetzung der im Rotationsrheometer untersuchten Mischungen. Angabe in Prozent.

	CEM I	Metakaolin	Kalkstein	Wasser	PCE
PZ	100			variabel	variabel
LC ³ -50	55	30	15	variabel	variabel

3.3 Rheologische Untersuchung

Die rheologischen Untersuchungen wurden mit einem Rotationsrheometer durchgeführt (Anton Paar MCR 302e). Dazu wurde eine Platte-Platte Geometrie mit 25 mm Durchmesser und einer aufgerauten oberen Platte genutzt. Die frisch angemischten Proben wurden nach Mischbeginn bei 20 °C in das Rheometer eingebaut und die Messung 5 Minuten 30 Sekunden nach Mischung des Bindemittels mit Wasser gestartet. Das Scherprotokoll umfasste: 60 s Vorscherung bei 100 s⁻¹, 2 min Pause, gefolgt von einer auf- und wieder absteigenden Scherrampe von 0.1 - 100 s⁻¹. Die rheologische Auswertung erfolgt durch Fitting des Bingham-Modells an die absteigende Kurve zwischen 20 - 80 s⁻¹ [29].

4 Ergebnisse und Diskussion

4.1 Ermittlung Wasseranspruch unterschiedlicher Leime

Um den Wasseranspruch verschiedener Bindemittel miteinander zu vergleichen, wurden die in Tabelle 3 gezeigten Mischungen verwendet. Dabei wurde der w/s-Wert so lange variiert, bis das anfängliche Fließmaß eines Mini-Slump Tests (Konus mit 5 cm Höhe und 3 cm Durchmesser) zwischen 8-11 cm lag (siehe auch Abbildung 5).

Tab. 3: Zusammensetzung der Mischungen zur Bestimmung des Wasseranspruchs sowie der Konsistenzhaltung der Leime.

	LC ³ -50	LC ³ -35	100CEM	30MK	30FA
CEM I	55	40	100	70	70
Kalksteinmehl	15	20			
Metakaolin	30	40		30	
Flugasche					30

Das Fließmaß wurde dann über eine Zeit von 30 Minuten wiederholt aufgezeichnet. Der Wasseranspruch der Mischungen mit Metakaolin ist deutlich größer als derjenige des Zementleims bzw. der Zementleim-Flugasche-

Mischung. Für die LC³-Mischungen gilt, dass der Wasseranspruch für die Mischung mit dem größeren Metakaolinanteil (LC³-35) größer als für die LC³-50-Mischung ist. Der größte Wasseranspruch mit w/s=0.75 liegt für die Mischung aus 70 Gew.-% Portlandzement und 30 % Metakaolin ohne Kalksteinmehl vor (Abbildung 5 rechts). Die Konsistenzhaltung der Leime unterscheidet sich nicht sehr stark. Während der Fließmaßverlust des reinen Zementleims bei 1.5 cm über 30 Minuten liegt, findet man jeweils >2 cm für die LC³-Mischungen.

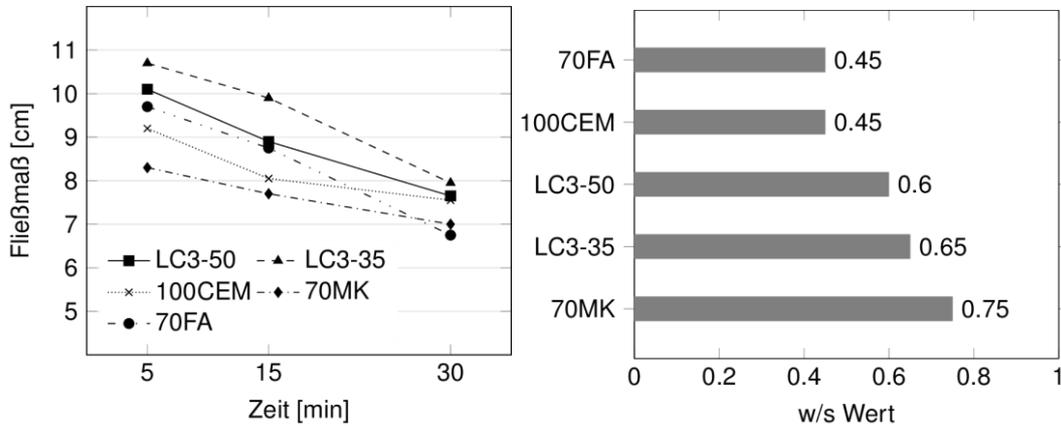


Abb. 5: Links: Fließmaß verschiedener zementhaltiger Leime (die notwendigen w/s-Werte sind im Balkendiagramm rechts dargestellt). Rechts: w/s-Wert der Leime, um ein Ausgangsfließmaß zwischen 8-11 cm zu erreichen.

4.2 Rheologie der Leime

Zementleim und LC³-50-Leim wurden nach dem oben beschriebenen Protokoll mit verschiedenen w/s-Werten angemischt. Der Wasserbedarf der LC³-50-Mischung ist erheblich größer als derjenige des Portlandzementleims (LC³-50 rechts und Zementleim links in Abbildung 6). Wie man in Abbildung 6 erkennt, liegen die Kurven für einen w/s-Wert von 0.36 (PZ, Fünfecke) und 0.52 (LC³-50, Kreuze) auf einem ähnlichen Niveau, ebenso die Kurven 0.42 (PZ) und 0.60 (LC³-50). Das bedeutet, dass der Wasserbedarf der LC³-50-Leime ungefähr um 0.16-0.18 größer ist als derjenige der Portlandzementleime.

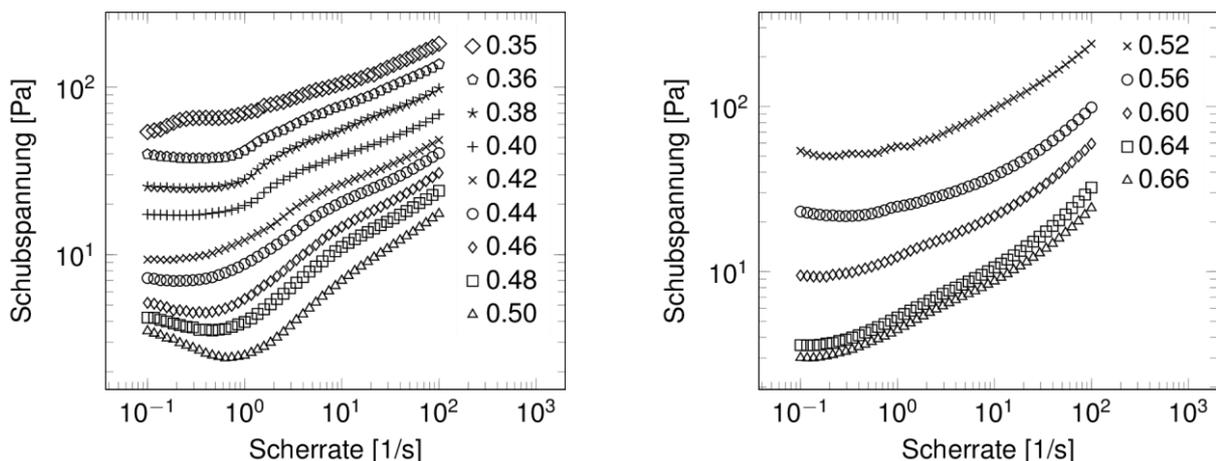


Abb. 6: Fließkurven Zementleim (links) und LC³-50 Leim (rechts) für unterschiedliche w/s-Werte

Eine Auswertung der LC³-50- und PZ-Fließkurven nach dem Bingham-Modell liefert die Fließgrenzen und die plastischen Viskositäten (Abbildung 7). Zusätzlich wurden die Fließkurven für zwei unterschiedliche PCE bei unterschiedlichen Volumenanteilen und Dosierungen bestimmt. Die Daten und die entsprechenden YODEL Fits sind in Abbildung 7 dargestellt. Dabei ist zu erkennen, dass die untersuchte LC³-50-Mischung einen deutlich größeren Wasseranspruch hat als die PZ-Mischungen. Die PCE verflüssigen die LC³-50-Mischung effektiv. Dabei

ist das PCE P1 ein deutlich schwächeres PCE als das kommerzielle P2 (vergleiche die Kurven für jeweils 0.1 % Dosierung in Abbildung 7 rechts). Weiterhin ist die Steigung der Fließgrenze als Funktion des Volumenanteils der LC³-50-Mischungen etwas größer als diejenigen der PZ Mischungen. Diese Steigung wird noch größer in Gegenwart von PCE.

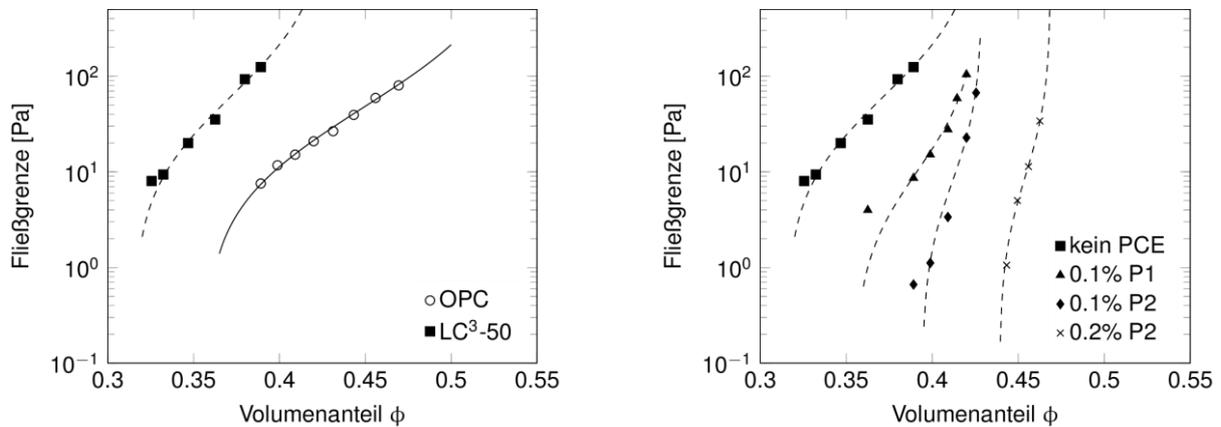


Abb. 7: Links: Fließgrenze von PZ- und LC³-50-Mischung als Funktion des Volumenanteils des Feststoffs. Rechts: Fließgrenze von LC³-50-Mischungen ohne und mit PCE P1 und P2. Die Linien entsprechen der gefitteten YODEL Gleichung.

Was die plastische Viskosität der LC³-50-Leime betrifft, liegen diese bei gleicher Fließgrenze höher als die Viskosität der Zementleime (Abbildung 8 links). Bei gleicher Fließgrenze nimmt die plastische Viskosität im dispergierten Zustand (Abbildung 8 rechts) weiter zu. Für die plastische Viskosität einer Suspension gibt es verschiedene Modelle. Eine einfache Gleichung in diesem Kontext ist die Krieger-Dougherty-Gleichung (siehe unten). Diese zeigt den Zusammenhang auf zwischen Volumenanteil und Viskosität.

$$\eta_r = \left(1 - \frac{\phi}{\phi_m}\right)^{-[\eta]\phi_m} \tag{3}$$

Darin sind η_r = relative Viskosität, ϕ_m = maximale Packungsdichte und $[\eta]$ = intrinsische Viskosität.

Insofern ist zu erwarten, dass eine Suspension mit größerem Volumenanteil (also die dispergierte Suspension) bei gleicher Fließgrenze eine höhere Viskosität hat.

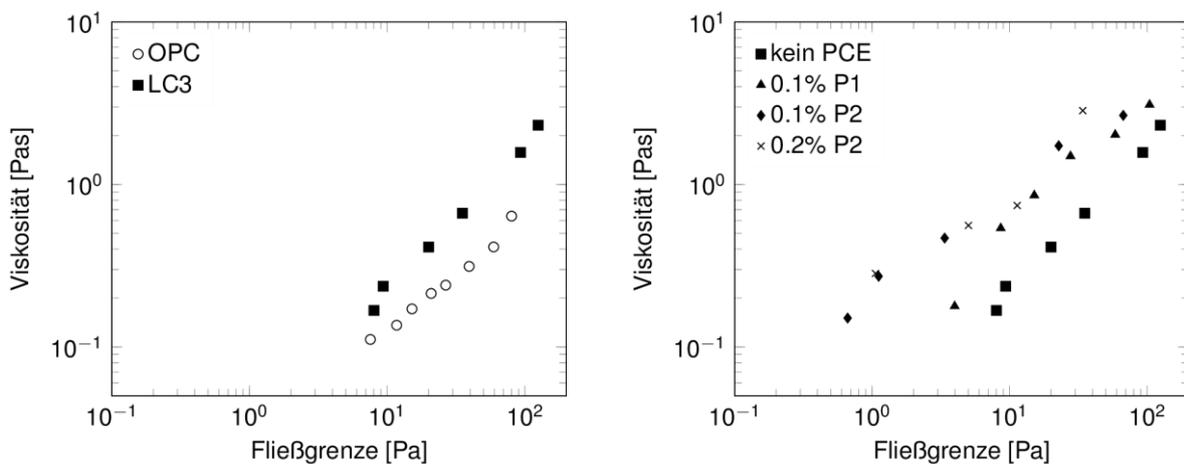


Abb. 8: Links: Zusammenhang zwischen Viskosität und Fließgrenze für Zementleim und LC³-50-Leim (nach dem Bingham Modell). Rechts: Viskosität von PCE-haltigen LC³-50-Leimen (die Referenzmischung ist mit schwarzen Quadraten dargestellt und links und rechts identisch).

5 Zusammenfassung und Ausblick

LC³-50-Mischungen haben einen größeren Wasseranspruch als Portlandzemente. Dabei sind vor allem die Menge und die Oberfläche der kalzinierten Tone entscheidend für den Wasseranspruch. Bei ansonsten identischer Fließgrenze ist die Viskosität der LC³-50-Systeme größer als diejenige der Portlandzemente. Weiterhin ist es durch die Verwendung von konventionellen Fließmitteln möglich, den Wassergehalt von LC³-50 Systemen deutlich zu senken. Zur Konsistenzhaltung sind weitere und vertiefende Arbeiten notwendig. In dieser Studie konnte weiterhin gezeigt werden, dass unterschiedliche PCE-Strukturen unterschiedlich stark auf die Fließfähigkeit von LC³-50-Leimen wirken. Noch offene Fragen betreffen die Struktur-Wirkungsbeziehung von Fließmitteln für LC³-haltige Mischungen. Ebenso ist noch offen, inwiefern durch erhöhte PCE Mengen fließfähige Konsistenzen für sehr niedrige w/s-Werte erreichbar sind. Schließlich ist die Rolle des Carbonats aus dem Kalksteinmehl und des Sulfats aus dem zusätzlichen Gips für die Rheologie von LC³-Systemen in Gegenwart von Fließmitteln ein noch nicht umfassend untersuchter Punkt.

Im Unterschied zu LC³-Bindemitteln ist die Situation für alkali-aktivierte Bindemittel komplexer. Hier scheinen konventionelle Fließmittel insbesondere bei silikatischen oder carbonatischen Aktivatoren unwirksam zu sein. Insofern ist für diese Bindemittelklasse zu klären, inwiefern klassische Fließmittelkonzepte zur Senkung des w/s-Werts ein sinnvoller Ansatz sind und welche chemischen Fließmittelstrukturen hier wirksam sein können. Schließlich lässt sich zusammenfassend feststellen, dass die CO₂-Effizienz von Beton deutlich erhöht werden kann, wenn CO₂-arme Bindemittel wie der LC³ zusammen mit hochwirksamen Fließmitteln, welche den Gesamtbindemittelbedarf senken können, zügig weiterentwickelt und im Markt umgesetzt werden.

6 Literatur

- [1] Flatt, R., and Schober, I. (2012) 7 - Superplasticizers and the Rheology of Concrete. In: Roussel, N. (eds) Understanding the rheology of concrete. Woodhead publishing series in civil and structural engineering, pp. 144-208, Woodhead Publishing
- [2] Grübl, P., Weigler, H., and Karl, S. (2002) Beton: Arten, Herstellung und Eigenschaften, John Wiley & Sons, Berlin
- [3] Yeh, I.-C. (2007) Modeling slump flow of concrete using second-order regressions and artificial neural networks. Cement and Concrete Composites, Vol. 29, pp. 474-480
- [4] Yeh, I.-C. (2006) Exploring concrete slump model using artificial neural networks. Journal of Computing in Civil Engineering, Vol. 20, pp. 217-221
- [5] Lu, C., Zhang, Z., Shi, C., Li, N., Jiao, D., and Yuan, Q. (2021) Rheology of alkali-activated materials: A review. Cement and Concrete Composites, Vol. 121, 104061
- [6] van Deventer, J. S. J., White, C. E., and Myers, R. J. (2021) A roadmap for production of cement and concrete with low-CO₂ emissions. Waste and Biomass Valorization, Vol. 12, pp. 4745-4775
- [7] Lei, L., and Chan, H.-K. (2020) Investigation into the molecular design and plasticizing effectiveness of HPEG-based polycarboxylate superplasticizers in alkali-activated slag. Cement and Concrete Research, Vol. 136, 106150
- [8] Palacios, M., Houst, Y. F., Bowen, P., and Puertas, F. (2009) Adsorption of superplasticizer admixtures on alkali-activated slag pastes. Cement and Concrete Research, Vol. 39, pp. 670-677
- [9] Puertas, F., Varga, C., and Alonso, M. M. (2014) Rheology of alkali-activated slag pastes. Effect of the nature and concentration of the activating solution. Cement and Concrete Composites, Vol. 53, pp. 279-288

- [10] Kashani, A., Provis, J. L., Qiao, G. G., van Deventer, J. S. J. (2014) The interrelationship between surface chemistry and rheology in alkali activated slag paste. *Construction and Building Materials*, Vol. 65, pp. 583-591
- [11] Tan, Z., Bernal, S. A., and Provis, J. L. (2017) Reproducible mini-slump test procedure for measuring the yield stress of cementitious pastes. *Materials and Structures*, Vol. 50, 235
- [12] Ez-zaki, H., Riva, L., Bellotto, M., Valentini, L., Garbin, E., Punta, C., and Artioli, G. (2021) Influence of cellulose nanofibrils on the rheology, microstructure and strength of alkali activated ground granulated blast-furnace slag: A comparison with ordinary portland cement. *Materials and Structures*, Vol. 54, 23
- [13] Roussel, N., and Coussot, P. (2005) "Fifty-cent rheometer" for yield stress measurements: From slump to spreading flow. *Journal of Rheology*, Vol. 49, pp. 705-718
- [14] Marchon, D., Sulser, U., Eberhardt, A., and Flatt, R. J. (2013) Molecular design of comb-shaped polycarboxylate dispersants for environmentally friendly concrete. *Soft Matter*, Vol. 9, pp. 10719-10728
- [15] Flatt, R. J., and Bowen, P. (2006) Yodel: A yield stress model for suspensions. *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 89, pp. 1244-1256
- [16] Perrot, A., Lecompte, T., Khelifi, H., Brumaud, C., Hot, J., and Roussel, N. (2012) Yield stress and bleeding of fresh cement pastes. *Cement and Concrete Research*, Vol 42, pp. 937-944
- [17] Sharma, M., Bishnoi, S., Martirena, F., and Scrivener, K. (2021) Limestone calcined clay cement and concrete: A state-of-the-art review. *Cement and Concrete Research*, Vol. 149, 106564
- [18] Ukrainczyk, N., Thiedeitz, M., Kränkel, T., Koenders, E., and Gehlen, C. (2020) Modeling SAOS yield stress of cement suspensions: Microstructure-based computational approach. *Materials*, Vol. 13, 2769
- [19] Sposito, R., Beuntner, N., and Thienel, K.-C. (2020) Characteristics of components in calcined clays and their influence on the efficiency of superplasticizers. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 110, 103594
- [20] Schmid, M., and Plank, J. (2021) Interaction of individual meta clays with polycarboxylate (PCE) superplasticizers in cement investigated via dispersion, zeta potential and sorption measurements. *Applied Clay Science*, Vol. 207, 106092
- [21] Zunino Sommariva, F. A. (2020) Limestone calcined clay cements (LC3): Raw material processing, sulfate balance and hydration kinetics. *École Polytechnique Fédérale de Lausanne, Lausanne, Switzerland*
- [22] Nair, N., Mohammed Haneefa, K., Santhanam, M., and Gettu, R. (2020) A study on fresh properties of limestone calcined clay blended cementitious systems. *Construction and Building Materials*, Vol. 254, 119326
- [23] Li, R., Lei, L., Sui, T., and Plank, J. (2021) Effectiveness of PCE superplasticizers in calcined clay blended cements. *Cement and Concrete Research*, Vol. 141, 106334
- [24] Vance, K., Kumar, A., Sant, G., and Neithalath, N. (2013) The rheological properties of ternary binders containing portland cement, limestone, and metakaolin or fly ash. *Cement and Concrete Research*, Vol. 52, pp. 196-207
- [25] Muzenda, T. R., Hou, P., Kawashima, S., Sui, T., and Cheng, X. (2020) The role of limestone and calcined clay on the rheological properties of LC3. *Cement and Concrete Composites*, Vol. 107, 103516
- [26] Lorentz, B., Zhu, H., Mapa, D., Riding, K. A., and Zayed, A. (2020) Effect of clay mineralogy, particle size, and chemical admixtures on the rheological properties of CCIL and CCI/II systems. In: Bishnoi, S. (eds) *Calcined clays for sustainable concrete*. RILEM Bookseries, Vol. 25, pp. 211-218, Springer, Singapore

- [27] Schmid, M., and Plank, J. (2020) Dispersing performance of different kinds of polycarboxylate (PCE) superplasticizers in cement blended with a calcined clay. *Construction and Building Materials*, Vol. 258, 119576
- [28] Zaribaf, B. H., Uzal, B., and Kurtis, K. (2015) Compatibility of superplasticizers with limestone-metakaolin blended cementitious system. In: Scrivener, K., Favier, A. (eds) *Calcined clays for sustainable concrete*. RILEM Bookseries, Vol. 10, pp. 427–434, Springer, Dordrecht
- [29] Haist, M., Link, J., Nicia, D., Leinitz, S., Baumert, C., von Bronk, T., Cotardo, D., Eslami Pirharati, M., Fataei, S., Garrecht, H., Gehlen, C., Hauschildt, I., Ivanova, I., Jesinghausen, S., Klein, C., Krauss, H.-W., Lohaus, L., Lowke, D., Mazanec, O., Pawelczyk, S., Pott, U., Radebe, N. W., Riedmiller, J. J., Schmid, H.-J., Schmidt, W., Secrieru, E., Stephan, D., Thiedeitz, M., Wilhelm, M., and Mechtcherine, V. (2020) Interlaboratory study on rheological properties of cement pastes and reference substances: Comparability of measurements performed with different rheometers and measurement geometries. *Materials and Structures*, Vol. 53, 92

7 Autoren

Alper-Sedat Dönmez

Fakultät für Chemie
Lehrstuhl für Bauchemie
Technische Universität München
D-85748 Garching bei München

Thomas Wagner

Fakultät für Chemie
Lehrstuhl für Bauchemie
Technische Universität München
D-85748 Garching bei München

Prof. Dr. Torben Gädt

Fakultät für Chemie
Lehrstuhl für Bauchemie
Technische Universität München
D-85748 Garching bei München

Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen nach dem Performance-Prinzip

Udo Wiens

Zusammenfassung

Das derzeitige normative Konzept zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken besteht

- aus der Klassifizierung der Umgebungsbedingungen über Expositionsklassen (Einwirkungsseite) und
- der Festlegung von Anforderungen an die Dicke (Mindestbetondeckung) und die Dichtheit (höchstzulässiger Wasserzement-Wert, Mindestzementgehalt, Mindestdruckfestigkeitsklasse, ausreichende Nachbehandlung) der Betondeckungsschicht (Widerstandsseite).

Im aktuellen Entwurf des Eurocode 2, E DIN EN 1992-1-1:2021-10 [1], wird zukünftig ein neues Dauerhaftigkeitskonzept vorgegeben werden, das auf so genannten „Expositionswiderstandsklassen“ beruht und in diesem Beitrag vorgestellt werden soll. Ein wesentlicher Vorteil der Expositionswiderstandsklassen ergibt sich aus der Möglichkeit, die Klassen durch entsprechende Prüfungen nachzuweisen. Damit können z. B. Betone, deren Zusammensetzungen außerhalb der in DIN EN 206 in Verbindung mit DIN 1045-2 vorgegebenen Grenzwerte und Anforderungen liegen, durch Prüfung und Zuordnung zu entsprechenden Widerstandsklassen hinsichtlich ihrer Leistungsfähigkeit (Performance) beurteilt werden. Das bisherige deskriptive (= beschreibende) Konzept aus den Expositionsklassen und der Festlegung von Anforderungen an die Betonzusammensetzung, die Nachbehandlung und die Mindestdicke der Betondeckungsschicht bleibt als Alternative über einen informativen Anhang in der E DIN EN 1992-1-1:2021-10 erhalten, um einen geordneten Übergang auf das neue System sicherzustellen.

1 Einleitung

Die Betonherstellung unterliegt einem stetigen Wandel. In den letzten Jahren wurden neue Zemente entwickelt, mit denen der Energieaufwand und die CO₂-Emissionen bei der Herstellung deutlich verringert werden können. Zudem führen der gesellschaftliche Anspruch und der Druck auf die Hersteller durch gesetzliche Vorgaben wie z. B. das Kreislaufwirtschafts- und Abfallgesetz dazu, dass Herstellprozesse vermehrt unter dem Aspekt der Ressourcenschonung und Nachhaltigkeit optimiert werden. Auf der anderen Seite stellt sich in naher Zukunft die Frage, inwieweit Flugasche, die bereits seit mehreren Jahrzehnten erfolgreich im Betonbau eingesetzt wird und die die CO₂-Bilanz von Beton verbessern kann, als Nebenprodukt aus der Kohleverstromung noch verfügbar sein werden. Diese Umbrüche im Markt, die Frage nach der zukünftigen Verfügbarkeit von Rohstoffen zur Herstellung von Beton sowie die damit einhergehenden Zement- und Zusatzstoffneuentwicklungen stellen die Branche in den nächsten 10 Jahren vor große Herausforderungen. Betonrezepturen müssen dahingehend optimiert werden, dass sie nachhaltig, d. h. mit einem möglichst geringem „CO₂-Rucksack“ ausgestattet, und gleichzeitig dauerhaft sind, damit die Bauwerke über die geplante Nutzungsdauer den physikalischen (z. B. durch Frost) und chemischen (z. B. durch Tausalze und betonangreifende Stoffe)

Einwirkungen ausreichend lange widerstehen. Hier stößt die bisherige Herangehensweise, die Dauerhaftigkeit von Beton mit einfachen Parametern der Betonzusammensetzung wie Zementart, Wassermenge, Mindestdruckfestigkeitsklasse oder Mindestzementgehalt zu beschreiben, an ihre Grenzen, da mit ökologisch optimierten Zementen oder industriell hergestellten Gesteinskörnungen anstelle von natürlichen Gesteinskörnungen wie Kies oder Sand keine langfristigen Erfahrungen vorliegen.

Alternativwege, bei denen die Leistungsfähigkeit von Beton über eine sogenannte Lebensdauerbemessung in Verbindung mit dem Performance-Prinzip, das heißt über geeignete Prüfungen, erfasst wird, sind zwar für einige Bauwerkseinwirkungen bereits recht weit entwickelt, es fehlt aber an der Einordnung der Ergebnisse in den bisherigen, auf deskriptiven Anforderungen fußenden, praktischen Erfahrungsschatz. Darüber hinaus gibt es auch zu bereits existierenden Prüfverfahren Vorbehalte, da ihre Ergebnisse nicht immer mit den Praxiserfahrungen übereinstimmen.

Performancebasierte Ansätze, mit denen neue (z. B. ressourcenschonendere) oder bereits vorhandene Betonrezepturen hinsichtlich ihrer Dauerhaftigkeit zielsicher beurteilt und optimiert werden können, sollen der Praxis nun durch das System der Expositionswiderstandsklassen im neuen Eurocode 2 an die Hand gegeben werden.

2 Expositionswiderstandsklassen

2.1 Allgemeines

In dem Konzept des neuen Eurocode 2 werden – wie bisher auch – zunächst die bekannten Expositionsklassen zur Beschreibung der Einwirkungen aus der Umgebung bereitgestellt. Die Klassenbezeichnungen X0 ... XA3 wurden unverändert übernommen. Bei der Beschreibung der Umgebung und den informativen Beispielen für die Zuordnung von Expositionsklassen werden gegenüber dem Eurocode 2 aus 2004 wenige Änderungen vorgenommen, die aufgrund ihres informativen Charakters national anpassbar bleiben. Neu hinzugefügt werden die in Deutschland bereits seit Langem etablierten Expositionsklassen XM1 bis XM3 zur Klassifizierung der mechanischen Beanspruchung von Betonbauteilen.

Diesen Expositionsklassen wird jetzt jeweils ein System aus sogenannten Expositionswiderstandsklassen zugeordnet, das den expositionsrelevanten Materialwiderstand in Form von Koeffizienten z. B. für das Eindringen der Karbonatisierungs- bzw. der Chloridfront unter Referenzbedingungen erfasst. Damit wird dem deskriptiven Bemessungsansatz ein performance-basierter Ansatz alternativ an die Seite gestellt. Die Nachweise der Expositionswiderstandsklassen können über die Anwendung entsprechender europäischer Prüfverfahren oder durch Festlegung deskriptiver Anforderungen wie in der Zusammenfassung beschrieben erbracht werden.

Die neuen Expositionswiderstandsklassen (englisch ERC = **E**xposure **R**esistance **C**lasses) werden für die Umgebungsbedingungen festgelegt, bei denen Schäden an Betonbauteilen durch Bewehrungskorrosion infolge Karbonatisierung (XRC) oder durch Chloride (XRDS) entstehen können. Betonkorrosion durch Frostangriff ohne und mit Taumittel wird durch die Expositionswiderstandsklasse XRF erfasst, wobei zur Erfüllung der Anforderungen in [1] auf die EN 206 verwiesen wird. Die aktuelle DIN EN 206:2021-06 [2] enthält diese Anforderungen bisher noch nicht. Bei der nächsten Revision der EN 206 sollen entsprechende Regelungen zur Umsetzung des Konzeptes der Expositionswiderstandsklassen in betontechnische Anforderungen aufgenommen werden.

Für den Fall, dass EN 206 nicht auf ERC verweist, lässt E DIN EN 1992-1-1:2021-10 die Möglichkeit zu, über einen Nationalen Anhang oder ein nationales Anwendungsdokument zu EN 206 die landesspezifische Einführung von ERC-Regeln vorzunehmen. Auf diese Weise können bereits jetzt nationale technische Regeln zur Umsetzung des Systems der Expositionswiderstandsklassen entwickelt werden.

2.2 Bewehrungskorrosion infolge Karbonatisierung

Tabelle 1 enthält für die Verwendung von Betonstahl im Betonbauteil die erforderlichen Mindestbetondeckungen $c_{\min, \text{dur}}$ nach E DIN EN 1992-1-1:2021-10 in Abhängigkeit von der planmäßigen Nutzungsdauer, den Expositionsklassen XC (Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung) und den Expositionswiderstandsklassen (XRC).

Tab. 1: Mindestbetondeckung $c_{\min, \text{dur}}$ für Betonstahl in mm – Bewehrungskorrosion infolge Karbonatisierung (Quelle: E DIN EN 1992-1-1:2021-10, [1])

Expositions- widerstands- klasse	Expositionsklasse (Karbonatisierung)							
	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 CO_2 -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 ($\text{mm}/\sqrt{\text{Jahr}}$).

Das nachfolgende Beispiel für **XRC 4** verdeutlicht den Zusammenhang zwischen Expositionswiderstandsklasse und Mindestbetondeckung: die Klassenbezeichnung entspricht einer Karbonisierungsrate von **4 mm / $\sqrt{50 \text{ Jahre}}$** . Damit ergibt sich für die Karbonisierungstiefe (10 % Quantil) nach 50 Jahren ein Wert von $4 \cdot \sqrt{50} = 28 \text{ mm}$. D. h., nur in 10 % aller Fälle wird diese so berechnete Karbonisierungstiefe überschritten. Die oben genannten Referenzbedingungen stimmen am ehesten mit Bauteilen in der Expositionsklasse XC3 überein. Folglich korrespondiert dieser Wert gut mit der Mindestbetondeckung von **25 mm** nach Tabelle 1. Über den Bereich der Karbonisierungsraten von 0,5 $\text{mm}/\sqrt{50 \text{ Jahre}}$ bis 7 $\text{mm}/\sqrt{50 \text{ Jahre}}$ ergeben sich somit Karbonisierungstiefen zwischen unter 5 mm und 50 mm. Unter der Annahme eines einheitlichen Zielwertes für den Zuverlässigkeitsbeiwert von $\beta = 1,5$, wie er nach EN 1990 üblicherweise für Gebrauchstauglichkeitseigenschaften angesetzt wird, und der Berücksichtigung der unterschiedlichen Feuchtebedingungen (in XC3 und XC4 i. d. R. höhere durchschnittliche Luftfeuchten, in XC4 auch direkte Beregnung), Alterungseffekten sowie Annahmen für die Nachbehandlungsdauer (hier: Nachbehandlung bis zum Erreichen von 35 % der charakteristischen Druckfestigkeit nach 28 Tagen, entspricht Nachbehandlungsklasse 2 nach EN 13670) und zum möglichen Ausmaß der Schäden durch die Bewehrungskorrosion in der jeweiligen Expositionsklasse (z. B. XC1 ständig trocken und damit kaum eine Korrosionsgefahr auch nach Karbonatisierung (Innenräume)) ergeben sich anhand von Modellrechnungen dann die Mindestbetondeckungen nach Tabelle 1 (auf- oder abgerundet auf eine Genauigkeit von 5 mm), die gut mit den Werten des bisherigen Eurocode 2 aus dem Jahr 2004 korrespondieren und im Einklang mit den Praxiserfahrungen stehen. Für die über die Karbonisierungsraten aus den XRC-Klassen ermittelten Karbonisierungstiefen wird ein Wurzel-Zeit-Gesetz angenommen. Dies ist eine auf der sicheren Seite liegende Annahme; unter Praxisbedingungen dringt die Karbonisierungsfront in der Regel langsamer in den Beton ein (Exponent rd. 0,4 statt 0,5).

Zur Beurteilung des Ausmaßes der Schäden durch Bewehrungskorrosion infolge Karbonatisierung werden folgende Prinzipien zugrunde gelegt, die sich mit zahlreichen Literaturergebnissen und praktischen Erfahrungen decken¹⁾:

- **XC1:** Beton in trockener Umgebung: die Karbonatisierungsfront dringt unter diesen Randbedingungen zwar schnell in den Beton ein, durch die fehlende Feuchtigkeit ist das Risiko von Schäden durch Bewehrungskorrosion als sehr gering einzustufen.
- **XC2:** Beton, der ständig nass lagert oder dauerhaft hoher Luftfeuchte ausgesetzt ist (selten trocken): die Eindringgeschwindigkeit der Karbonatisierungsfront ist gering, wenn Depassivierung der Betonstahloberfläche eintritt, setzt Bewehrungskorrosion ein.
- **XC3:** Beton, der mäßiger Feuchte ausgesetzt ist (Innenbauteile bei mäßiger Feuchte (nicht dauerhaft hohe Luftfeuchte), vor Regen geschützte Außenbauteile): Das Eindringen von CO₂ führt zu signifikanten Karbonatisierungstiefen (allerdings geringer als bei XC1); nach der Depassivierung stellt sich ein langsamer Korrosionsprozess ein, da der Feuchtegehalt an der Betonstahloberfläche im Vergleich zu Bauteilen in XC4 geringer ist.
- **XC4:** Beton in wechselnd nasser und trockener Umgebung (ungeschützte Außenbauteile): während trockener Perioden dringt die Karbonatisierungsfront schnell in den Beton ein; dies führt beim Wechsel auf nasse Umgebungsbedingungen zu hohen Korrosionsgeschwindigkeiten, wenn die Depassivierung eingetreten ist (im Vergleich zu XC3 deutlich höherer Wassergehalt an der Betonstahloberfläche).

Die Mindestbetondeckungen können je nach den vorliegenden praktischen Erfahrungen in einem Nationalen Anhang oder in einem nationalen Anwendungsdokument angepasst werden (sog. NDP = **N**ationally **D**etermined **P**arameter).

Im Folgenden wird ein Vorschlag zur Umsetzung der Expositionswiderstandsklassen für die Bewehrungskorrosion durch Karbonatisierung skizziert. Zur Vereinfachung werden hierzu die XRC-Klassen zunächst mit den zugehörigen $c_{min,dur}$ -Werten wie folgt gruppiert:

- XRC 0,5, XRC 1 und XRC 2 zur Klasse XRC 2,
- XRC 3, XRC 4 und XRC 5 zur Klasse XRC 5,
- XRC 6 und XRC 7 zur Klasse XRC 7.

Eine Gruppierung ist sinnvoll, da die in E DIN EN 1992-1-1:2021-10 vergleichsweise eng gesetzten Grenzen für die XRC-Klassen z. T. mit den großen Streuungen der Laborprüfung kollidieren (s. Abbildung 2). Außerdem werden die Praxiserfahrungen mit den verschiedenen Zementarten insgesamt besser abgebildet. Dies führt zu der folgenden Vereinfachung (Tabelle 2).

Tab. 2: Mindestbetondeckung $c_{min,dur}$ für Betonstahl in mm – Bewehrungskorrosion infolge Karbonatisierung (Gruppierung von XRC-Klassen)

Expositions- widerstands- klasse	Expositionsklasse (Karbonatisierung)							
	XC1		XC2		XC3		XC4	
	Geplante Nutzungsdauer (Jahre)							
	50	100	50	100	50	100	50	100
XRC 2	10	15	10	15	15	25	15	25
XRC 5	15	25	20	30	25	45	30	45
XRC 7	15	30	25	40	40	60	45	60

¹⁾ Hinweis: Die nachfolgenden Expositionsklassenbeschreibungen wurden aus E DIN EN 1992-1-1:2021-10 entnommen; diese weichen zum Teil von den derzeitigen Beschreibungen in der DIN 1045-2 ab.

Unter der Annahme, dass die Umgebungsbedingungen in XC3 etwa den unterhalb der Tabelle 1 beschriebenen Referenzbedingungen für die Klassenbildung entsprechen und vergleichbar mit den Laborbedingungen der Karbonatisierungsprüfung nach BAW-Merkblatt „Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC) [4]“ sind, lassen sich aus dem Nomogramm in Abbildung 1 Kriterien für mittlere Karbonatisierungsraten abschätzen, die z. B. für die Bewertung von Betonen im Rahmen einer erweiterten Erstprüfung genutzt werden können (s. Tabelle 3).

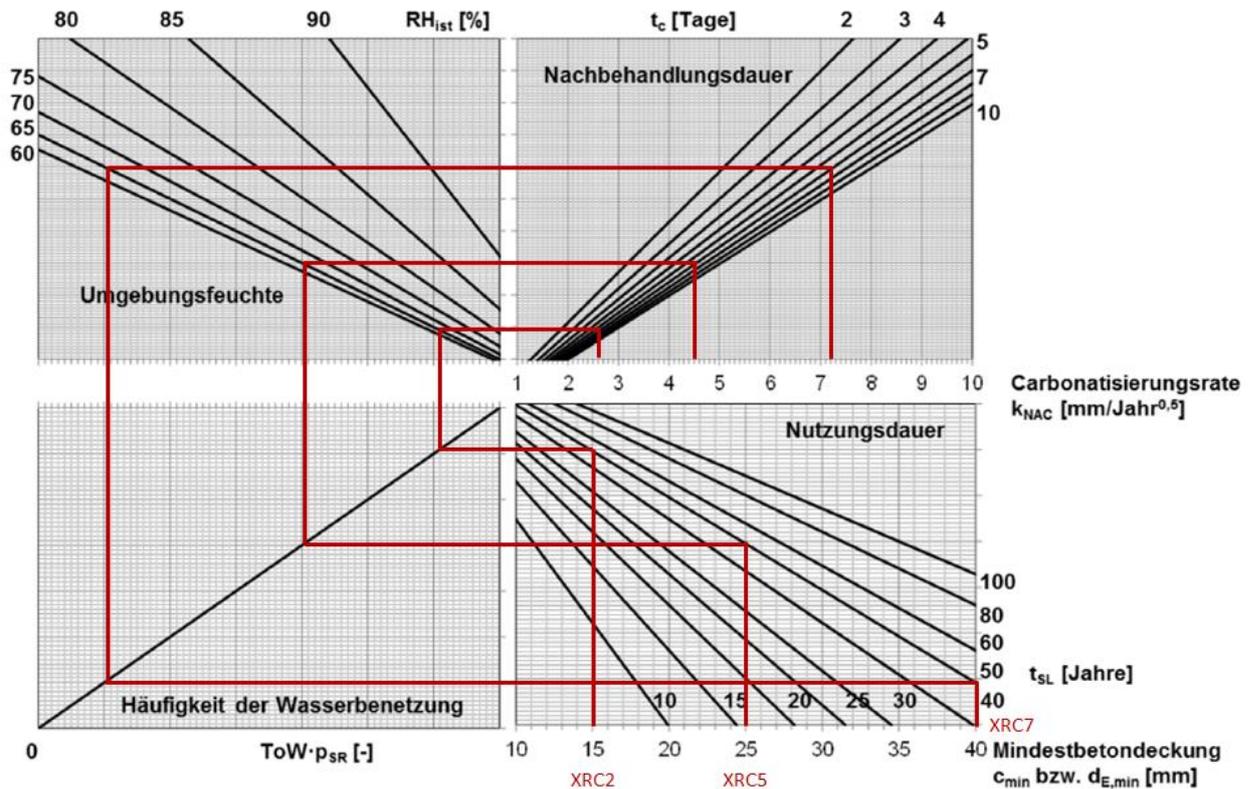


Abb. 1: Ableitung von Karbonatisierungsraten für Bauteile der Expositionsklasse XC3 (Beton, der mäßiger Feuchte ausgesetzt) für eine Zielzuverlässigkeit von $\beta_0 = 0,5$ [3] und eine planmäßigen Nutzungsdauer von 50 Jahren; Prüfbedingungen s. Tabelle 3, Quelle: [4]

Zur Einordnung der Karbonatisierungsraten aus Tabelle 3 in den Erfahrungsbereich europäischer Untersuchungen zum Widerstand von Beton gegenüber Karbonatisierung wurde die Datenbank „CarboDB“ des cbm der TU München ausgewertet [5]. Die Datenbank wurde auf Anregung von CEN/TC 104/SC1/WG1 im Jahr 2020 eingerichtet. Sie bietet einen offenen Zugang zu Versuchsdaten zum Karbonatisierungswiderstand von Betonen unterschiedlicher Zusammensetzung, Lagerung und Prüfbedingungen (überwiegend Daten aus Laborversuchen). Ziel der Datenbank ist es, belastbare Daten bereitzustellen, um das vorhandene Wissen zur Karbonatisierung von Beton zu erweitern und die bestehenden Prüfverfahren zu verbessern bzw. zu validieren. Die Datenbank ermöglicht das Filtern verschiedener Ergebnisse und Eingabewerte. Die Daten wurden aus verschiedenen deutschen, schweizerischen und finnischen Literaturquellen zusammengestellt.

Die Tabellen 4, 5 und 6 fassen die wesentlichen Parameter der Betonzusammensetzungen und der Vorlage- und Prüfbedingungen zusammen, die der Datenbank in [5] entnommen wurden. Zum Teil fehlen in den ausgewerteten Literaturquellen wichtige Informationen, daher sind die Angaben lückenbehaftet.

Tab. 3: Kriterien für die Erstprüfung - Karbonatisierungsraten

Expositions-widerstands-klasse	Mittelwert der Karbonatisierungsrate $k_{NACm,140\text{ Tage}}$ für eine Serie aus 3 Prüfungen in $\text{mm}/\sqrt{(\text{Jahr})}$ (Prüfung nach Anlage A in [4]) ^{a)}	Größter zulässiger Einzelwert $k_{NACi,140\text{ Tage}}$ in einer Serie aus 3 Prüfungen in $\text{mm}/\sqrt{(\text{Jahr})}$
XRC 2	$\leq 2,6$	$1,25 \cdot k_{NACm,140\text{ Tage}}$
XRC 5	$2,6 < k_{NACm,140\text{ Tage}} \leq 4,5$	
XRC 7	$4,5 < k_{NACm,140\text{ Tage}} \leq 7,2$	

^{a)} Vorlagerung bis zur Prüfung der Karbonatisierungstiefe: 1 d Schalung, 6 d unter Wasser bei 20 °C; anschl. 140 Tage in der Klimakammer bei 20 °C und einer relativen Luftfeuchte von 65 %; CO₂-Konzentration der Luft von (0,04 ± 0,001) Vol.-%. Die Karbonatisierungsrate wird anhand der Karbonatisierungstiefe nach der 140tägigen Klimakammerlagerung unter Anwendung des Wurzel-Zeit-Gesetzes bestimmt.

Tab. 4: Übersicht über die Betonzusammensetzungen nach [5]

Zementarten	Zement-festig-keitsklas-sen	Art des Zusatz-stoffes bzw. Hauptbestandtei-les im Zement (ohne PZ-Klinker)	Spannbreite der Zement-gehalte	Spannbreite des Gehaltes an Zu-satzstoff bzw. der Hauptbestand-teile im Zement (ohne PZ-Klinker)	Spannbreite des Bindemit-telgehaltes ^{b)}	Spannbreite des Wasser-bindemittel-wertes ^{b)}
[--]	[--]	[--]	kg/m^3	kg/m^3	kg/m^3	[--]
CEM I CEM II/A-L CEM II/A-LL CEM II/A-M CEM II/A-S CEM II/A-V CEM II/B-LL CEM II/B-S CEM II/B-M ^{c)} CEM III/A CEM III/B	32,5 N 32,5 R 42,5 N 42,5 R 52,5 N 52,5 R	Flugasche Hüttensand Kalksteinmehl Silikastaub gebrannter Schiefer	134 - 485 ^{a)}	15 - 146	230 - 485	0,35 - 0,80

^{a)} Feinbetone mit 8 mm Größtkorn (Sieblinie A/B 8) aus deutschen Zulassungsversuchen.
^{b)} Bei Zusatzstoffen, Anrechnung mit $k = 1,0$.
^{c)} V-LL, S-LL oder T-LL.

Tab. 5: Übersicht über die Lagerungsbedingungen bis zur Prüfung (Vorlagerung) nach [5]

Lagerungsdauer bis zum Ausschalen der Prüfkörper	Art der Nachbehandlung	Dauer der Nachbehandlung	Vorlagerungsdauer bis zum Beginn der Messungen	Temperatur während der Vorlagerungsdauer	Relative Luftfeuchte während der Vorlagerung
Tage	[--]	Tage	Tage	°C	%
k. A.	k. A.	7	k. A.	k. A.	k. A.
1	k. A.	1	27	20	70
1	k. A.	7	21	20	70
1	k. A.	28	14	20	70
1	k. A.	7	k. A.	k. A.	k. A.
1	k. A.	7	k. A.	20	k. A.
k. A.	k. A.	1	6	20	98
k. A.	k. A.	1	27	20	100
k. A.	k. A.	1	6	20	k. A.
k. A.	k. A.	1	27	20	k. A.
k. A.	k. A.	7	21	20	65
1	k. A.	7	21	20	65
1	k. A.	7	21	20	65
k. A.	k. A.	7	7	20	65
1	unter Wasser	7	k. A.	k. A.	k. A.

k. A.: keine Angabe

Tab. 6: Übersicht über die Prüfbedingungen während der Messung der Karbonisierungstiefen nach [5]

Art der Karbonatisierung ^{a)}	Alter der Prüfkörper bei Beginn der Karbonatisierung	CO ₂ -Konzentration in der Luft	Messmethode	Relative Luftfeuchte während der Karbonatisierung	Temperatur	Auslagerung (Feldversuch)
[--]	Tage	Vol.-%	[--]	%	°C	[--]
ACC	k. A.	2	k. A.	k. A.	k. A.	--
NAC	k. A.	0,045	k. A.	65	20	--
ACC	28	4	Phenolphthalein 1 % in 95 % Ethanol	61,8	20,6	--
ACC	42	4	Phenolphthalein 1 % in 95 % Ethanol	61,8	20,6	--
NAC	7	0,04	k. A.	65	20	--
NAC	28	0,032	k. A.	69	20,2	--
NAC	42	0,032	k. A.	69	20,2	--
ACC	28	1	k. A.	59,8	20,2	--
ACC	42	1	k. A.	59,8	20,3	--
NAC	7	0,04	DAfStb Heft 422 [6]	70	20	--
NAC	7	0,04	DafStb Heft 422 [6]	65	20	--
NAC	28	0,04	DafStb Heft 422 [6]	65	20	--
ACC	7	1	RILEM CPC-18	60	21	--
NAC	28	0,032	Phenolphthalein 1 % in 95 % Ethanol	69	20,2	--
NAC	42	0,032	Phenolphthalein 1 % in 95 % Ethanol	69	20,2	--
ACC	42	1	k. A.	59,8	20,3	--
ACC	28	4	k. A.	61,8	20,6	--
ACC	42	4	k. A.	61,8	20,6	--
ACC	28	4	k. A.	61,8	20,6	--
ACC	28	4	k. A.	61,8	20,6	--
ACC	42	4	k. A.	61,8	20,6	--
ACC	28	2	k. A.	65	20	--
ACC	28	1	RILEM CPC-18	60	21	--
Feld	28	0,0376	RILEM CPC-18	79	6	Außenlagerung, geschützt
ACC	28	1	k. A.	59,8	20,3	--
NAC	14	0,04	DafStb Heft 422 [6]	65	20	--
Feld	14	0,04	DafStb Heft 422 [6]	78	9	Außenlagerung, geschützt

^{a)} NAC: Karbonatisierung bei atmosphärischer CO₂-Konzentration; ACC: beschleunigte Karbonatisierung bei erhöhten CO₂-Konzentrationen (Schnellkarbonatisierung). Die ermittelten Karbonatisierungsraten aus der Schnellkarbonatisierung wurden über einen entsprechenden Umrechnungsfaktor auf Karbonatisierungsraten k_{NAC} bei atmosphärischer CO₂-Konzentration umgerechnet.

Abbildung 2 enthält alle ermittelten Karbonatisierungsraten k_{NAC} aus den 210 derzeit enthaltenen Datensätzen der Datenbank in Abhängigkeit vom Wasserbindemittelwert und der Zementart (Rohdaten). Insgesamt sind eindeutige Trends erkennbar. Wie zu erwarten war, nehmen die Karbonatisierungsraten für alle Zementarten mit den Wasserbindemittelwerten ab. Betone mit CEM I und CEM II/A liegen auf einem vergleichbaren Niveau, während Betone mit CEM II/B und CEM III/A oder CEM III/B z. T. deutlich höhere Karbonatisierungsraten aufweisen.

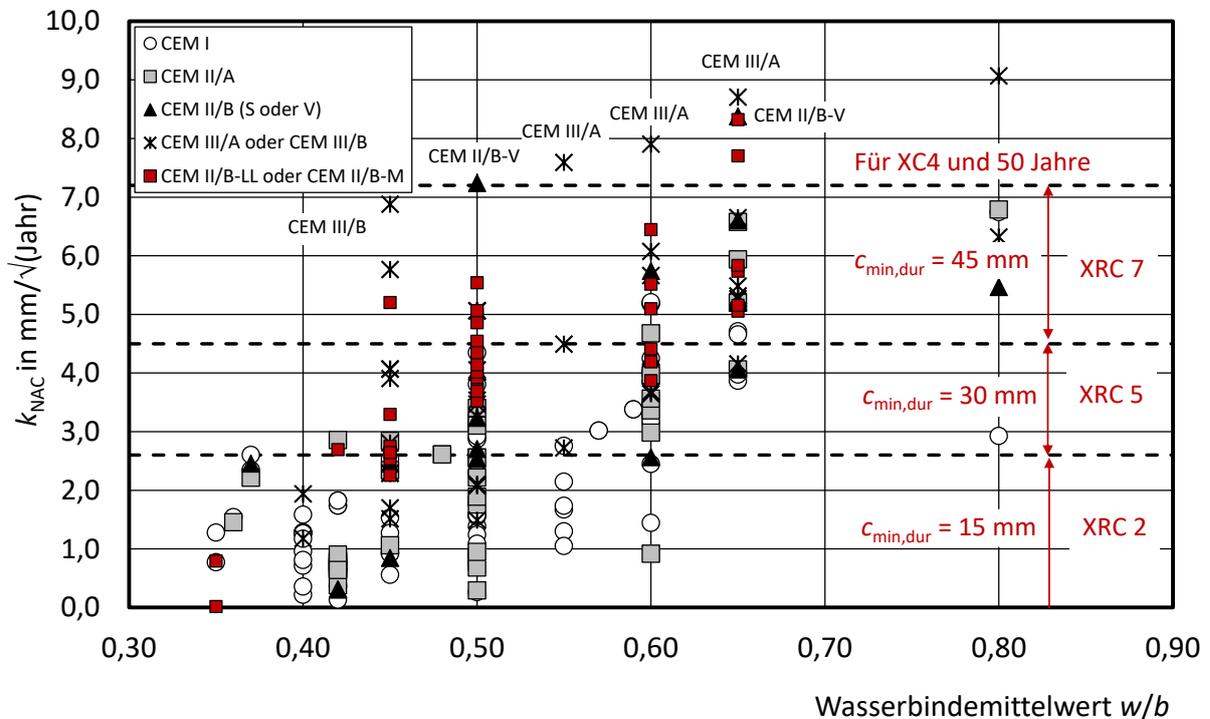


Abb. 2: Karbonatisierungsraten in Abhängigkeit vom Wasserbindemittelwert und der Zementart nach [5]

Die vergleichsweise großen Streuungen ergeben sich unter anderem aus den unterschiedlichen Lagerungs- und Prüfbedingungen (z. B. NAC oder ACC), wie dies die Tabellen 5 und 6 anschaulich dokumentieren. Die Karbonatisierungsraten der Betone oberhalb der Grenzlinie für die Klasse XRC 7 sollten noch einmal auf Plausibilität geprüft werden. Das absolute Wertenniveau scheint hier zu hoch zu sein. Die drei Werte für den CEM III/A oberhalb von $7,2 \text{ mm}/\sqrt{\text{Jahr}}$ stammen aus einer Versuchsserie.

Zur Einordnung der Ergebnisse in das Konzept der Expositionswiderstandsklassen wurden in Abbildung 2 die XRC-Klassen aus Tabelle 3 mit den zugehörigen Mindestbetondeckungen für die Expositionsklasse XC4 bei einer geplanten Nutzungsdauer von 50 Jahren aus E DIN EN 1992-1-1:2021-10 eingetragen. Die gewählten Klassen mit ihren Grenzwerten erscheinen zunächst einmal als grundsätzlich sinnvoll gewählt.

In den verschiedenen CEN-Mitgliedsstaaten gelten unterschiedliche Anforderungen an die Betonzusammensetzung und die zugehörigen Mindestbetondeckungen. In Deutschland beträgt der höchstzulässige Wasserzementwert in XC4 z. B. 0,60. Von den in [5] enthaltenen Zementarten dürfen in dieser Expositionsklasse in Deutschland derzeit alle außer CEM II/B-LL und CEM II/B-M (V-LL, S-LL oder T-LL) eingesetzt werden (rote Quadrate in Abbildung 2). Der Ausschluss dieser Zementarten gilt auch für eine Verwendung in der Expositionsklasse XC3. Die Mindestbetondeckung in XC4 ist auf $c_{\min,dur} = 25 \text{ mm}$ festgelegt und durch jahrzehntelange praktische Erfahrung ohne Schäden durch Bewehrungskorrosion bestätigt. Da die Mindestbetondeckungen in E DIN EN 1992-1-1:2021-10 national anpassbar sind (s. o.), können für die Bewertung von Betonen in Deutschland unter der Annahme der gewählten XRC-Klassengruppierung und den langjährigen Erfahrungen mit dem derzeitigen deskriptiven Konzept die in Tabelle 7 zusammengestellten Mindestbetondeckungen

zugrunde gelegt werden (Änderungen gegenüber Tabelle 2 grau unterlegt). Insbesondere für die Expositionsklasse XC3 mit einem derzeit höchstzulässigen w/z-Wert von 0,65 bedeutet dies eine Verschärfung der Anforderungen. Wird der Wasserzementwert beibehalten, müsste die Mindestbetondeckung von derzeit 20 mm auf 30 mm erhöht werden, da die Betone lediglich die Kriterien der Klasse XRC 7 erfüllen (s. Abbildung 2).

Betone mit CEM II/B-LL und CEM II/B-M (V-LL, S-LL oder T-LL) liegen bei einem Wasserzementwert von 0,60 durchaus im Bereich von Betonen mit CEM I, CEM II/A oder CEM III und wären damit auch mit den derzeit in XC3 und XC4 festgelegten Mindestbetondeckungen anwendbar.

Tab. 7: XRC-Klassen mit möglichen deutschen Mindestbetondeckungen $c_{\min,dur}$ für Betonstahl in mm – Bewehrungskorrosion infolge Karbonatisierung

Expositions- widerstands- klasse	Expositionsklasse (Karbonatisierung)							
	XC1		XC2		XC3		XC4	
	Geplante Nutzungsdauer (Jahre)							
	50	100	50	100	50	100	50	100
XRC 2	10	15	10	15	15	25	15	25
XRC 5	10	20	20	30	20	40	25	40
XRC 7	15	30	25	40	30	50	35	50

Bei der überwiegenden Anzahl der Datensätze in der Datenbank beiträgt die Dauer der Nachbehandlung in den Laborversuchen 7 Tage (s. Tabelle 5). Für langsam oder sehr langsam erhärtende Betone mit CEM III/A, CEM III/B oder CEM II/B-V führt dies zu vergleichsweise hohen Karbonatisierungsraten (s. a. Abbildung 2), die nicht mit den praktischen Erfahrungen mit diesen Zementen zusammenpassen. In diesen Fällen sollte die Nachbehandlungsdauer der Probekörper im Labor von 6 Tagen unter Wasser soweit erhöht werden, dass sich die Karbonatisierungsraten in einem Maße verringern, welches der Leistungsfähigkeit unter Praxisbedingungen besser Rechnung trägt.

Mit dem hier vorgestellten Konzept zur Umsetzung der Expositionswiderstandsklassen durch Festlegung entsprechender Klassengrenzen und Karbonatisierungsraten für die Erstprüfung und Zuordnung zu Mindestbetondeckungen können zukünftig Betone mit neuen oder bekannten, bisher in bestimmten Expositionsklassen ausgeschlossenen, Zementen oder Zusatzstoffen bewertet und in den Bereich der Betone mit langjährigen praktischen Erfahrungen eingeordnet werden.

2.3 Bewehrungskorrosion durch Chloride

Analog zu Tabelle 1 werden in E DIN EN 1992-1-1:2021-10 für die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion erforderliche Mindestbetondeckungen $c_{\min,dur}$ in Abhängigkeit von der planmäßigen Nutzungsdauer, den Expositionsklassen XS/XD und den Expositionswiderstandsklassen (XRDS) angegeben. Leitgröße für die Klasseneinteilung, die in diesem Fall von XRDS 0,5 bis XRDS 10 reicht, ist der scheinbare Chloriddiffusionskoeffizient D_{app} im Alter von 50 Jahren in $10^{-13} \text{ m}^2/\text{s}$.

Wie bei den XRC-Klassen können die empfohlenen Werte der Mindestbetondeckung auch in den Expositionswiderstandsklassen XRDS national geändert werden (NDP). Die in Abschnitt 2.2 beschriebene Verfahrensweise zur Umsetzung des Konzeptes kann grundsätzlich auch bei den Expositionswiderstandsklassen XRDS angewendet werden. Allerdings sind bei der chloridinduzierten Korrosion weitere Randbedingungen zu beachten, z. B. bindemittelabhängige Alterungskoeffizienten bei der Chloriddiffusion.

2.4 Ausblick

In dem für die Weiterentwicklung der EN 206 zuständigen europäischen Technischen Komitee CEN/TC 104/SC 1 und seiner WG 1 werden derzeit zu den XRC- bzw. XRDS-Klassen der E DIN EN 1992-1-1:2021-10 zugehörige Kriterien für die Erstprüfung und die werkseigene Produktionskontrolle von Beton entwickelt.

Geeignete europäische Referenzverfahren sind z. B. in DIN EN 12390-10 [7] und DIN EN 12390-11 [8] enthalten. Hinsichtlich der Vorlagerungsbedingungen der Probekörper (Art und Dauer) könnte z. B. bei der Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes die Dauer der Wasserlagerung bei 20 °C nach dem Ausschalen der Probekörper für alle Zementarten einheitlich von 6 auf 20 Tage erhöht werden, um langsam erhärtende Zemente oder Zusatzstoffe vom Typ II nicht zu benachteiligen und die Anbindung an die Praxiserfahrungen mit den Bindemitteln sicherzustellen (s. o.). CEM III/B-Zemente oder Bindemittelkombinationen aus CEM I und Flugasche nach DIN EN 450 erhärten z. B. deutlich langsamer als Betone mit CEM I.

Da der Nachweis der Expositionswiderstandsklassen in der Erstprüfung von Beton durch die lange Prüfdauer aufwendig ist, müssen für die Überwachung der Eigenschaften in der werkseigenen Produktionskontrolle des Betons Alternativen entwickelt werden. Hier bieten sich Schnelltests nach DIN EN 12390-12 [9] und DIN EN 12390-18 [10] an, die allerdings hinsichtlich ihrer Eignung für eine praxisnahe Bewertung der Leistungsfähigkeit von Betonen überprüft werden müssen.

Aus den Anforderungen an die Performance-Prüfungen sollen zur Vereinfachung und Verringerung des Prüfaufwandes am Ende auch deskriptive Anforderungen entwickelt werden (höchstzulässiger Wasserzementwert, Auswahl geeigneter Zementarten und Zusatzstoffe vom Typ II, Mindestzementgehalt, Mindestdruckfestigkeitsklassen), durch die die Widerstandsklassen erfüllt werden. Diese Anforderungen sollen in der überarbeiteten EN 206 informativen Charakter haben und auf nationaler Ebene (in Deutschland DIN 1045-2) geändert werden können. Alternativ zur Anwendung von Schnellprüfverfahren kann die Leistungsfähigkeit der Betone dann im Rahmen der werkseigenen Produktionskontrolle auch durch Einhaltung der Grenzwerte an die Zusammensetzung aus der Erstprüfung nachgewiesen werden (höchstzulässiger w/z-Wert mit zulässigen Toleranzen, Mindestzementgehalt mit zulässigen Toleranzen, Zementart, Art des Zusatzstoffes etc.).

Um das Konzept möglichst schnell in Deutschland umzusetzen, wurde durch den DAfStb-Vorstand die Ausarbeitung einer entsprechenden DAfStb-Richtlinie beschlossen, s. Tabelle 1, Zeile 6 in [11].

3 Literatur

- [1] 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.
- [2] DIN EN 206:2021-06, Beton - Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Deutsche Fassung EN 206:2013+A2:2021.
- [3] Positionspapier des DAfStb zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206-1, Anhang J - In: Beton- und Stahlbetonbau 103 (2008), Heft 12, S. 837- 839.
- [4] BAWMerkblatt Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe 2019.
- [5] Datenbank CarboDB des cbm der TU München zur Erfassung, Auswertung und für den Vergleich von Versuchsergebnissen zur Bestimmung der Karbonatisierungsraten von Beton, s. <https://carbodb.bgu.tum.de/#/>, zuletzt abgerufen am 13.01.2022.

- [6] Prüfung von Beton-Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, Heft Nr. 422, 1991.
- [7] DIN EN 12390-10:2019-08, Prüfung von Festbeton – Teil 10: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton bei atmosphärischer Konzentration von Kohlenstoffdioxid (Kammertest).
- [8] DIN EN 12390-11:2015-11, Prüfung von Festbeton – Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton – Einseitig gerichtete Diffusion.
- [9] DIN EN 12390-12:2020-03, Prüfung von Festbeton – Teil 12: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton – Beschleunigtes Karbonatisierungsverfahren.
- [10] DIN EN 12390-18:2021-09, Prüfung von Festbeton – Teil 18: Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten.
- [11] Nachhaltig bauen mit Beton – Roadmap des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) für einen klimagerechten und ressourceneffizienten Betonbau (Version 1.0), September 2021, s. http://www.dafstb.de/application/2021-09-27_DAfStb_Roadmap_Nachhaltig_Bauen_mit_Beton_final.pdf, zuletzt abgerufen am 13.01.2022.

4 Autor

Prof. Dr.-Ing. Udo Wiens

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.
Budapester Straße 31
10787 Berlin

Herausforderungen und Chancen der Bauwirtschaft – unser Beitrag zur Nachhaltigkeit

Rudolf Hügel und Mark Weiher

Zusammenfassung

Mit unserem Beitrag zum KIT-Symposium "Dekarbonisierung als wichtiger Schlüssel zum nachhaltigen Bauen mit Beton" möchten wir als mittelständisches Bauunternehmen unsere Sichtweise auf das komplexe Thema des nachhaltigen Bauens darlegen. Insbesondere möchten wir aufzeigen, wie wir unsere Rolle als ausführendes Unternehmen sehen und welche Chancen wir im Zuge der ökologischen Bauwende, gemeinsam mit unseren Partnern in der Wertschöpfungskette, nutzen möchten. Zunächst wird die öffentliche Wahrnehmung der Bauwirtschaft aus mehreren Perspektiven betrachtet sowie die wesentlichen politischen Steuerungsinstrumente, wie z. B. das GEG in Verbindung mit den Bundes-Fördertöpfen, eingeführt. Anschließend werden die THG-Emissionen über den Lebenszyklus eines Gebäudes betrachtet und das relative Verhältnis der beiden Hauptphasen eines Lebenszyklus quantifiziert. Ziel muss es sein, dass auch die Emissionen in der Herstellung des Gebäudes auf der Baustelle erfasst und reduziert werden, worin wir als ausführendes Unternehmen eine zentrale Rolle einnehmen. Über die Emissions-Kategorien nach dem Greenhouse Gas Protocol arbeiten wir im Kontext der Herausforderungen der Bauwirtschaft abschließend noch die Wichtigkeit des Scope 1 jedes einzelnen Unternehmens heraus. Im darauffolgenden Kapitel werden wir zu den Möglichkeiten der Bauwirtschaft aber insbesondere auch unseren Emissions-Scope 3 betrachten. Anhand eines konkreten Projekts werden wir aufzeigen, dass mit Variantenvergleichen für die massereichen und großen Bauteile, insbesondere mit dem Werkzeug der Lebenszyklusanalyse (LCA), ein wesentlich größerer Fokus auf die Nachhaltigkeitsparameter gelegt werden kann. Im abschließenden Ausblick werden wir aufzeigen, dass zukünftig sowohl die Bilanzierung der direkten Emissionen aller beteiligten Unternehmen als auch die Emissionen des zu erstellenden Gebäudes über den gesamten Lebenszyklus betrachtet werden müssen.

1 Intro

Die Bauwirtschaft rückt im Kontext von Nachhaltigkeit und Klimaschutz zunehmend in den Fokus. Es wird nun auch öffentlich wahrgenommen, wie hoch der Anteil des Gebäudesektors an den Treibhausgasemissionen ist. Gefordert wird nichts weniger als eine "Bauwende".

Als Bauunternehmen stehen wir für die Errichtung des Gebäudes auf der Baustelle. Nach einer langen Phase der Fokussierung auf die Energieeffizienz im Betrieb, wird nun immer klarer, dass die Graue Energie ein mindestens genauso großer Hebel zur Senkung der Emissionen über den Lebenszyklus ist. Und dabei wird die Phase der Errichtung des Gebäudes bislang nahezu nicht betrachtet, weil hierzu kaum bzw. keine Daten vorliegen. Unsere Verantwortung liegt darin, sowohl Transparenz zu den Emissionen in der Errichtung von Gebäuden zu schaffen als auch unsere direkten Emissionen auf Netto-Null zu senken. Wir möchten es aber nicht nur dabei belassen, sondern in Zusammenarbeit mit Baustoffherstellern, Planern und Bauherren an der Reduzierung der herstellungs- und betriebsbedingten Emissionen arbeiten.

Unser Beitrag auf dem KIT-Symposium beschäftigt sich mit den Herausforderungen und Chancen der Bauwirtschaft, einen Beitrag zur Senkung der herstellungs- und errichtungsbedingten Emissionen einerseits, sowie der betriebsbedingten Emissionen andererseits zu leisten.

2 Herausforderungen der Bauwirtschaft

2.1 Öffentliche Wahrnehmung

Mit dem Organisationserlass vom 08.12.2021 und der Vereidigung der neuen Ministerinnen und Minister hat Deutschland wieder ein eigenes Bauministerium – konkret: ein Ministerium für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (BMI). Waren das Ressort Bauen und die entsprechenden Aufgaben seit 1998 in andere Ministerien integriert, sollen die Themen Bauwesen, Bauwirtschaft und Bundesbauten, Stadtentwicklung, Stadtentwicklungsprogramme, Wohnen sowie Raumordnung, Regionalpolitik und Landesplanung wieder von einem eigenen Ministerium bearbeitet werden [1].

Ein Zeichen dafür, dass das Bauwesen bzw. die Bauwirtschaft in den Zielen der neuen Bundesregierung eine wichtige Rolle spielt. Übergeordnete Ziele werden klar formuliert: Zum einen muss zwingend und kurzfristig bezahlbarer Wohnraum geschaffen werden, zum anderen liegt vor allem im Klimaschutz ein großer Hebel im Gebäudebestand sowie in der Reduktion der THG-Emissionen, des Abfallaufkommens und des Ressourcenbedarfs des gesamten Gebäudesektors. In der öffentlichen Wahrnehmung dominiert zunehmend die negative Darstellung der Bauwirtschaft. Vorherrschendes Thema sind die THG-Emissionen in der Herstellung von Baustoffen sowie in der Errichtung und dem Betrieb von Gebäuden. Aber auch die Kennzahlen zur Abfallerzeugung des Sektors, verursacht v. a. durch den Abriss von Gebäuden und Entsorgung der Abbruchmaterialien (statt einer Rückführung in den Produktlebenszyklus), und zum Energieverbrauch von Gebäuden werden deutlich wahrnehmbarer öffentlich kommuniziert. Aber auch Forderungen werden konkreter und kommen von verschiedensten Verbänden und Organisationen, auch aus dem eigenen Sektor. Der Bundesverband deutscher Wohnungs- und Immobilienunternehmen (GdW) fordert beispielsweise einen Plan zur Vereinbarkeit von Klimaschutz und bezahlbarem Wohnen [2], die Deutsche Gesellschaft für nachhaltiges Bauen (DGNB) ruft gemeinsam mit weiteren Organisationen im Rahmen eines Aktionsbündnisses eine Sanierungsoffensive für den Klimaschutz aus [3]. Aber auch vermeintlich unbekanntere Vereine stellen konkrete Forderungen an den Sektor: Architects for Future Deutschland e.V. rufen bspw. zum kritischen Hinterfragen von Abriss oder kreislaufgerechtem Konstruieren auf [4], GermanZero e.V. skizzieren einen konkreten und wissenschaftlich belegten Pfad für die Erreichung des 1,5-Grad-Ziels für die Bereiche Gebäude und Wärme [5].

Neben den o. g. übergeordneten Zielen im Bereich Gebäude und Bauwirtschaft gibt es Herausforderungen und Hürden, welche die Umsetzung dieser Ziele deutlich erschweren. Aus Sicht eines Bauunternehmens sind dies insbesondere die teilweise kritische Materialverfügbarkeit und der konstante Anstieg der Kosten für Baustoffe, zuletzt bei vielen Materialien sogar sprunghaft. Zudem ist der Fachkräftemangel und die hohe Auslastung von Bauunternehmen keine leere Worthülse, sondern ein reales Problem. Als Bauunternehmen mit ca. 250 eigenen gewerblichen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern auf den Baustellen, darunter viele Azubis aus den Bereichen Stahlbetonbau und Haustechnik, betrifft uns insbesondere der Fachkräftemangel erheblich. Zudem sind auch weitere Nachhaltigkeitsparameter im Zielkorridor des Sektors zu beachten, z. B. eine sinkende Innenraumluftqualität durch den Einsatz von immer schlechteren und toxischeren Baustoffen sowie der Erhalt der Biodiversität bzw. die Vergrößerung der Artenvielfalt, insbesondere bei großen Quartiersvorhaben im innerstädtischen Bereich. Weitere Parameter im Kontext der Nachhaltigkeit sind zudem die Reduzierung von Staub- und Lärmemissionen, Einschränkungen bei den Entsorgungswegen von Erd- und Abbruchmaterial sowie auch die Rohstoffknappheit, z. B. Sand.

2.2 Politische Steuerungsinstrumente

Die Steuerungsmaßnahmen der Politik unterstützen die o. g. Ziele nur bedingt und nicht vollumfänglich. Das Gebäudeenergiegesetz (GEG) und die Bundesförderung für effiziente Gebäude sind stark auf die Energieeffizienz im Gebäudebetrieb fokussiert. Allerdings plant die Ampel-Koalition einige Weiterentwicklungen, z. B. durch die Fokussierung auf die THG-Emissionen in Abhängigkeit von der Wohnfläche, durch die Anhebung der energetischen Standards im GEG oder durch ein Verbot von Heizungen mit weniger als 65 % Anteil an erneuerbaren Energien. Grundsätzlich sollen GEG und BEG technologieoffen und lösungsorientiert weiterentwickelt werden [6]. Insbesondere die Erhöhung der EE-Anteile bei den Heizungen wird durch Förderungen im Bereich der fossilen Energien nur bedingt unterstützt. Gasheizungen werden weiterhin gefördert [7] und die Bundesrepublik Deutschland sichert nach wie vor das Risiko von Exportgeschäften für Öl- und Gasinfrastrukturprojekte durch Bürgschaften ab, zuletzt in einer Gesamthöhe von über 11 Mrd. Euro in den Jahren 2015 bis 2021 [8]. Im Koalitionsvertrag sind jedoch klare Ziele für den Anteil an Strom und Wärme aus erneuerbaren Energien bis 2030 enthalten [6].

Kaum Beachtung in den politischen Steuerungsinstrumenten finden Themen wie die Reduzierung des Primärressourcenverbrauchs und die Biodiversität bzw. Artenvielfalt. Im Gegenteil: Die Zielstellung von 400.000 neuen Wohnungen pro Jahr wirken ohne weitergehende steuernde Maßnahmen kontraproduktiv auf die wichtige Aufgabe, insbesondere den Primärressourcenverbrauch deutlich zu reduzieren. Zudem kann man v. a. auf den Baustellen einen sehr niedrigen Umsetzungsgrad der Gewerbeabfallverordnung (GewAbfV) und des Kreislaufwirtschaftsgesetzes (KrWG) beobachten. Die GewAbfV schreibt die Trennung von Bau- und Abbruchabfällen in verschiedene, konkret definierte Abfallfraktionen vor. Trotzdem werden die Bauabfälle oftmals als Baumischmüll entsorgt – sei es wegen Kleinmengen, deren Trennung nicht wirtschaftlich wäre, oder weil eine Trennung technisch nicht möglich ist. Diese Ausnahmen lässt die GewAbfV zu, was aber für den Wandel zu einer Kreislaufwirtschaft nicht förderlich ist.

Ein weiteres wichtiges Steuerungsinstrument ist die EU-Taxonomie-Verordnung als neuer Kompass für ökologisch nachhaltiges Wirtschaften. Sie formuliert Umweltziele in sechs Bereichen, die von Unternehmen oder Gebäuden einzuhalten sind. Im Kontext Klimaschutz geht es bspw. um den Einsatz von erneuerbaren Energien, die Energieeffizienz, den Einsatz von erneuerbaren und nachhaltigen Materialien oder der CO₂-Abscheidung. Die Wirkung der EU-Taxonomie-Verordnung wird sich am Markt beobachten lassen: Seit dem 01.01.2021 müssen von 15 Branchen zunächst die Umweltziele aus den Bereichen Klimaschutz und Anpassung an den Klimawandel eingehalten werden [9]. Auch für diverse "Tätigkeiten der Bau- und Immobilienwirtschaft" wurden Regeln definiert, damit eine Tätigkeit als ökologisch nachhaltig eingestuft werden kann [10]. Dabei wird der Wirkungsgrad im Gebäudebereich auch maßgeblich davon abhängen, inwieweit der Finanzsektor die Regeln der EU-Taxonomie-Verordnung bei der Vergabe von Baukrediten einbezieht.

2.3 THG-Emissionen im Gebäude-Lebenszyklus

Die Weiterentwicklung der politischen Steuerungsinstrumente zeigt, dass der Fokus bei der Nachhaltigkeit des Gebäudesektors zunehmend auf die THG-Emissionen allgemein, statt auf die Energieeffizienz im Betrieb gelegt werden soll. Betrachtet man die Emissionen über den gesamten Lebenszyklus von Immobilien, so wird deutlich, dass nicht nur der Betrieb der Gebäude, sondern insbesondere auch deren Herstellung und Errichtung betrachtet werden. Laut einer Studie des Umweltbundesamtes [11] entstehen bei Mehrfamilienhäusern (energetischer Standard: EnEV 2016 oder Passivhaus) rund 30 % der Emissionen durch die Konstruktion, 70 % durch den Betrieb. Zudem konnte die Studie zeigen, dass im Massivbau die Bauteile Außenwände, Innenwände, Decken und Technische Anlagen jeweils ca. 20 % der konstruktionsbedingten THG-Emissionen ausmachen. In der Materialität hingegen zeigt sich ein deutliches Bild: Beton und Stahl sind für ca. 50 % der Emissionen in der Konstruktion verantwortlich. Mit weitem Abstand folgen PV-Anlage (17 %) und Fenster (10 %). Zur Verteilung von bauwerksbedingten und betriebsbedingten THG-Emissionen kommt eine Studie

der DGNB im Kontext von Gewerbeimmobilien zu einem ähnlichen Ergebnis wie die o. g. Studie des Umweltbundesamtes [12]. Die konstruktions- oder bauwerksbedingten Emissionen werden im allgemeinen Sprachgebrauch als *Graue Energie* bezeichnet. Spricht man von der Grauen Energie von Gebäuden, ist damit jene Energie gemeint, die für

- die Materialgewinnung, die Herstellung und Verarbeitung von Bauteilen und Baustoffen (Lebenszyklusphasen A1-3),
- den Transport von Menschen, Maschinen und Materialien auf die Baustelle (Lebenszyklusphase A4),
- den Einbau von Materialien und Baustoffen im Gebäude (Lebenszyklusphase A5) sowie
- zur Entsorgung (Lebenszyklusphasen C1-4)

verbraucht wird [13].

Beide o. g. Studien weisen die gleiche Lücke in der Datenbasis zu den THG-Emissionen während der Herstellungs- und Errichtungsphase auf: Für die Lebenszyklusphasen A4 und A5 konnten im Rahmen der ökobilanziellen Analyse der Gebäude keine Daten herangezogen werden. Somit kann der Anteil des Baumanagements und der Erbringung von Bauleistungen an der gesamten Grauen Energie im Rahmen von ökobilanziellen Analysen aktuell nicht bzw. nicht in der erforderlichen Breite ermittelt werden. Genau genommen müsste man auch noch die Planungsphasen (LPH 1-9 nach HOAI) berücksichtigen. In den Bilanzierungsregeln wird die Errichtungsphase des Gebäudes (Lebenszyklusphase A4-5) ausgeblendet – sowohl im DGNB-Zertifizierungssystem als auch im Bewertungssystem Nachhaltiges Bauen (BNB) des Bundesinnenministeriums.

Zusammengefasst lässt sich festhalten, dass in den meisten Angaben zur Grauen Energie von Gebäuden die Lebenszyklusphasen A4-5 und C1-2 fehlen. Diese sind sehr projektspezifisch und im Wesentlichen abhängig von der Umweltleistung der beteiligten Bauunternehmen. Die konstruktionsbedingten bzw. bauwerksbedingten THG-Emissionen dürften daher nochmal etwas höher sein und bestätigen die zunehmende Fokussierung der Emissionen dieser Lebenszyklusphasen im Vergleich zur Nutzungsphase. Eine Betrachtung dieser Emissionen kann dazu führen, dass auch Bauunternehmen ökologischer arbeiten. Unternehmen, die bereits ein Umweltmanagementsystem wie z. B. EMAS eingeführt haben, werden für ihre Investition in die Nachhaltigkeit belohnt.

2.4 Emissions-Kategorien

Das Greenhouse Gas Protocol ist ein international anerkannter Standard zur Bilanzierung von unternehmensbezogenen THG-Emissionen [14]. Dabei werden die Emissionen in drei Kategorien (Scopes) eingeteilt:

- Scope 1: direkte Emissionen eines Unternehmens, z. B. Wärmeerzeugung an den Standorten oder den Betrieb eines Fuhrparks mit Geschäftsautos
- Scope 2: indirekte Emissionen eines Unternehmens durch den Bezug von Strom
- Scope 3: alle weiteren indirekten Emissionen eines Unternehmens, die durch die Leistungserbringung entlang der Wertschöpfungskette eines Produkts oder einer Dienstleistung entstehen

Übertragen auf Bauunternehmen und damit die Firma Gottlob Rommel bedeutet dies, dass es im Scope 1 – und damit den direkt beeinflussbaren Emissionen – insbesondere um die Wärmeerzeugung und Kühlung an den Verwaltungsstandorten und Bauhöfen, den Bauheizungen sowie den Betrieb des Fuhrparks geht. Sämtliche Maßnahmen zur Reduktion der daraus resultierenden THG-Emissionen liegen in unserer Hand und bestimmen unsere Umweltleistung maßgeblich. Kombiniert mit den Emissionen aus dem Scope 2, das heißt jenen Treibhausgasen, die bei der Erzeugung des von uns genutzten Stroms in den Büros und auf den Baustellen entstehen, kann damit unsere Umweltleistung im Kontext von Emissionen gut abgebildet werden. Die Daten hierzu sind die Grundlage für die Ermittlung der THG-Emissionen aus den Lebenszyklusphasen A4-5 – von allen am Bau beteiligten Unternehmen und Lieferanten! Aus der Perspektive von Bauunternehmen sind Emissionen in Scope 3 z. B. durch die Produktion der eingesetzten Baustoffe, der Abfallerzeugung auf der Baustelle oder der Nutzung der Gebäude nur indirekt und bedingt beeinflussbar.

2.5 Synthese

Die Graue Energie eines Gebäudes, welche anteilig rund ein Drittel aller Emissionen im gesamten Lebenszyklus ausmacht, kann nur dann reduziert werden, wenn jedes beteiligte Unternehmen die Emissionen aus dem jeweiligen Scope 1 und 2 weitestgehend reduziert - gemäß der Zielsetzung der Europäischen Union bis 2045 auf Netto-Null. Es ist offensichtlich, dass dies nur dann gelingt, wenn entlang der gesamten Wertschöpfungskette zusammengearbeitet wird. Um den Gebäudesektor in Richtung Klimaneutralität zu entwickeln, ist die Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus das zentrale Werkzeug. Damit in der Bilanz auch die realen Emissionen abgebildet werden, müssen alle Lebenszyklusphasen betrachtet werden – inklusive umfassender Bilanzierung der Errichtungs- und End-Of-Life-Phase (A4-5 bzw. C1-4). Die Ökobilanz sowie die Lebenszykluskostenbetrachtung sollten die zentralen, wenngleich nicht die einzigen, Parameter in der Entscheidungsfindung zur Planung und Errichtung des Gebäudes sein. Lineare Planungsprozesse sind hierfür nicht zielführend. Hingegen können iterative Prozesse auf Basis individueller Anforderungen des Projekts/Grundstücks, standardisierten Bauteilen oder Bausystemen sowie darauf aufbauender Variantenvergleiche mit hoher Datenqualität diese Entscheidungsgrundlage umso mehr definieren.

Im Gesamten wird damit erreicht, dass Scope 1 und 2 des fertiggestellten Gebäudes auf Null reduziert werden. Und nur so kann ein klimaneutraler Gebäudebestand erreicht werden. Die Firma Gottlob Rommel bearbeitet Scope 1 und 2 intensiv mit dem Umweltmanagementsystem nach EMAS. Scope 3 können wir nur dann beeinflussen, wenn wir in die der Bauausführung vor- und nachgelagerten Prozesse eingebunden werden. Anhand des Projekts *Neckarbogen Heilbronn, Baufeld K4* möchten wir nachfolgend aufzeigen, welche Potenziale der Bauwirtschaft durch die Integration aller Beteiligten in den Planungsprozess möglich werden.

3 Möglichkeiten der Bauwirtschaft

3.1 Nachhaltigkeit bei Gottlob Rommel

Im Folgenden möchten wir auf den Scope 3 etwas genauer eingehen. Auch wir als Gottlob Rommel unterstützen den Ansatz, die Nachhaltigkeit als Summe der gleichberechtigten Teilgebiete Ökologie, Soziales und Wirtschaft zu betrachten.

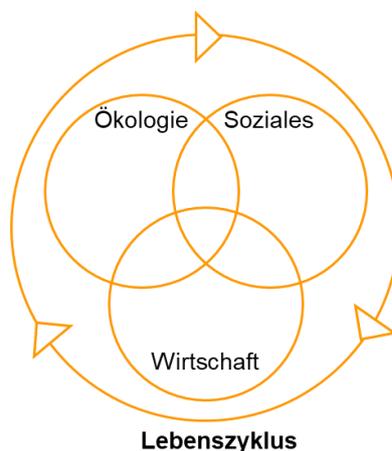


Abb. 1: Nachhaltigkeit im Lebenszyklus

Der wesentliche Faktor der Nachhaltigkeit aus unserer Sicht ist die Vermeidung von Treibhausgasen im Lebenszyklus. Vor allem in der Herstellung und im Betrieb von Gebäuden.

Bei der Herstellung legen wir den Fokus auf den Einsatz von alternativen Baumaterialien wie Holz und alternativen Zementen wie CEM II, CEM III und die Reduktion eingesetzter Masse durch Leichtbau. Wichtig hierbei

ist die Technologieoffenheit. Variantenvergleiche für Objekte sind entscheidend, um die für das Bauvorhaben ideale Bauweise zu finden. Eine Vorgabe eines speziellen Baumaterials hingegen schränkt den Lösungsraum unnötig ein.

Beim Betrieb legen wir den Fokus auf gute Dämmung der Gebäudehülle und den Einsatz von effizienter Gebäudetechnik, idealerweise mit hohem Anteil erneuerbarer Energien. Dabei ist die Reduktion des Energiebedarfs wichtig. Entscheidend ist jedoch die Reduktion von Treibhausgasemissionen durch bspw. den Einsatz von selbst erzeugtem PV-Strom und dem Einsatz von nachwachsenden Rohstoffen.

Nachhaltigkeit ist jedoch weit mehr als die Reduktion von Treibhausgasen. Es geht um Ressourcenschonung, Umnutzungsmöglichkeiten, Schadstofffreiheit der Materialien, Qualität der Innenraumluft, Zukunftsfähigkeit und einfache Bedienung der (automatisierten) Gebäudetechnik inkl. Smart Home, Energiemanagement, E-Mobilität und vieles mehr.

Ressourcenschonung kann erreicht werden, indem Baumaterialien wiederverwendet werden. Naheliegendes Beispiel ist R-Beton, aber auch Fassadenelemente, Dachziegel, Innentüren, Treppen(-häuser), Aufzüge, Nasszellen sollten nach Möglichkeit mehr als einmal den Weg in Gebäude finden. Das kann nur erreicht werden, wenn bereits in der Planungsphase auf die Wiederverwendbarkeit nach dem Lebensende geachtet wird. Z. B. durch das Verwenden lösbarer Verbindungen und das Vermeiden von Verbundwerkstoffen. Umnutzungsmöglichkeiten wiederum können Gebäuden zu langen Nutzungsdauern verhelfen. Generell gilt, ein Gebäude ist nur dann nachhaltig, wenn es im erbauten Zustand lange bestehen bleiben und sich neuen Anforderungen anpassen kann. Beispiele hierfür sind eine alternde Gesellschaft (Barrierefreiheit) oder die Verlagerung der Arbeitsorte vom Büro ins eigene Zuhause.



Abb. 2: Emissionen im Betrieb und in der Herstellung

Wir gehen davon aus, dass sich das eingangs erwähnte Verhältnis der Treibhausgasemissionen von Herstellung (ca. 1/3) zu Betrieb (ca. 2/3), in den nächsten Jahren umdrehen wird. Gründe hierfür sind der Umbau des deutschen Stromnetzes auf erneuerbare Energien, den vermehrten Einsatz von Wärmepumpen und den teils gesetzlichen vorgeschriebenen Einsatz von PV-Modulen auf Gebäuden. All diese Maßnahmen reduzieren zwar nicht den Energiebedarf, jedoch reduzieren sie die Treibhausgasemissionen im Betrieb.

3.2 Beitrag zu nachhaltigem Bauen

Der mögliche Beitrag zu nachhaltigem Bauen ist für Gottlob Rommel sehr stark abhängig vom Einstieg. Im klassischen Geschäftsfeld des Generalunternehmers (ab Leistungsphase 5/6) sind die Möglichkeiten sehr beschränkt. Baustoffe, Baukonstruktionen, Grundrisse und weitere elementare Parameter des Gebäudes sind festgelegt. Der wesentliche Beitrag liegt hierbei in der Reduzierung der Treibhausgasemissionen des Scope 1.

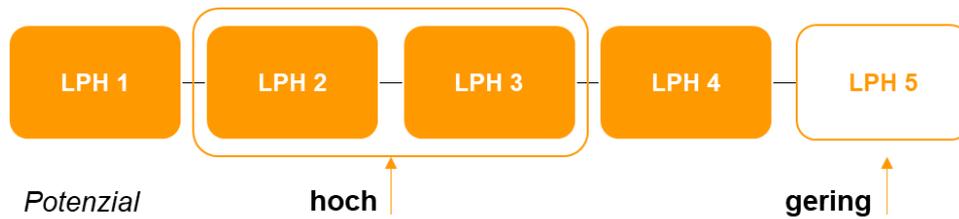


Abb. 3: Potenziale für nachhaltiges Bauen in den Leistungsphasen

Durch eine Beteiligung in frühen Phasen (Leistungsphase 2/3) kann der Beitrag deutlich erhöht werden. Variantenvergleiche unterschiedlicher Baustoffe und Baukonstruktionen können verglichen werden. Der Einsatz alternativer Materialien wie z. B. bei Fassaden, Innenwänden, Fenstern, Türen können verglichen werden, um so die ökologisch und ökonomisch beste Variante auszuwählen.



Abb. 4: Betrachtungsebenen für nachhaltiges Bauen

Darüber hinaus ergeben sich Möglichkeiten standardisierte und somit kostengünstige Bauteile einzusetzen. Eine Standardisierung bedeutet letztlich immer eine gewisse Einschränkung. Wenn die ökologischen und ökonomischen Vorteile jedoch überwiegen, ist das für viele Bauherren eine sehr willkommene Alternative.

4 Bauvorhaben Neckarbogen

4.1 Kurzvorstellung Projekt "Neckarbogen K4"

Beim Projekt "Neckarbogen K4" in Heilbronn handelt es sich um ein 6-geschossiges Wohngebäude mit 12 Wohneinheiten und einer Gewerbeeinheit. Das Grundstück K4 (20 x 12 m) ist eines von insgesamt 10 Grundstücken im Baufeld und 28 Grundstücken im Quartier "2. Bauabschnitt Neckarbogen-Mitte-Heilbronn".

Das Projekt zeichnet sich durch einen sehr hohen Fensteranteil in der Fassade und die Anordnung der Loggien aus. Des Weiteren ist die (für PV nutzbare) Dachfläche im Verhältnis zur Wohnfläche sehr gering. Durch Vorgaben aus dem Wettbewerb wie die markante Plattenstruktur der Fassade und dem Anschluss an das Fernwärmenetz wird der Lösungsraum eingeschränkt, bietet jedoch noch genügend Freiheiten für Variantenvergleiche in Bezug auf Ökologie und Ökonomie.

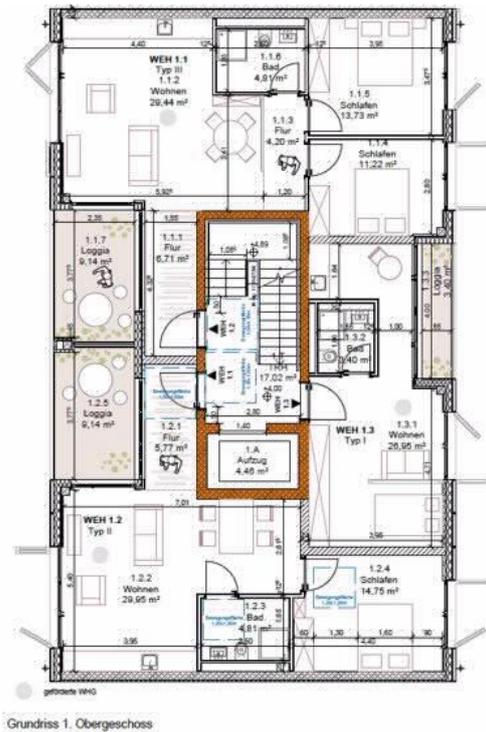


Abb. 5: Projekt Neckarbogen HN - Ansicht und Grundriss

4.2 Variantenvergleich Bauweise und Außenwand

Für das Projekt wurden zu Beginn drei Bauweisen miteinander verglichen:

Tab. 1: Variantenvergleich Bauweise

Bauweise	Variante (Effizienzhaus 40)
<u>Standardmassivbau</u> Tragender und aussteifender Treppenhauskern aus Stahlbeton, Außenwände aus Stahlbeton, Halfertigteildecken	0a
<u>Stahlbetonskelett</u> Tragender und aussteifender Treppenhauskern aus Stahlbeton, Außenwände in Holzrahmenkonstruktion, Halfertigteildecken	1a
<u>Holz-Beton-Hybrid</u> Tragender und aussteifender Treppenhauskern aus Stahlbeton, Holzstützen, Holzaußenwände in Holzrahmenkonstruktion, Holz-Beton-Verbunddecken	2a

Ziel war die ökologische und ökonomische Bewertung des Standardmassivbaus im Vergleich zu einer Ausführung als Stahlbetonskelett mit Holzaußenwänden und einer Ausführung als Holz-Beton-Hybrid, in welchem nur EG, UG und der Treppenhauskern in Stahlbeton ausgeführt wird. Die Basis für alle drei Bauweisen ist die Ausführung als Effizienzhaus 40 nach der aktuellen Bundesförderung für effiziente Gebäude (BEG).

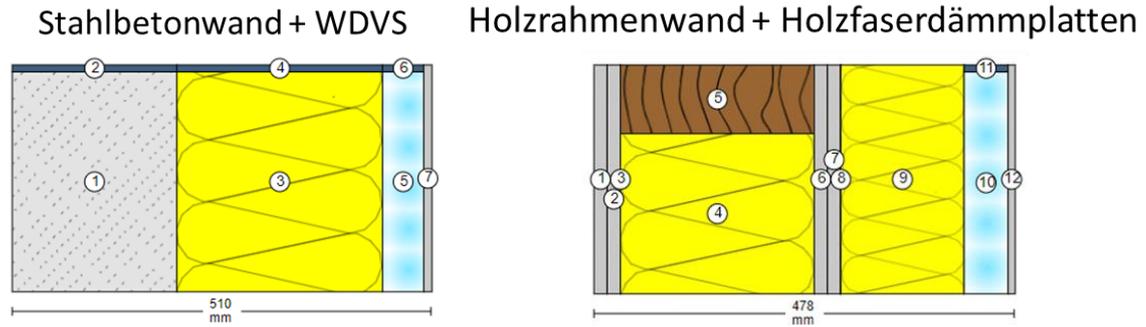


Abb. 6: Varianten der Außenwand

Das Stahlbetonskelett in Kombination mit Außenwänden in Holzrahmenbauweise (Variante 1a) zeigt gegenüber der Standardmassivbauweise eine deutliche Reduktion der Treibhausgasemissionen (> 60 % bei der Außenwand) und das bei vertretbaren Mehrkosten (ca. 2 %). Neben der im Lebenszyklus geringeren spezifischen Treibhausgasemissionen des Baumaterials Holz, ist vor allem die geringere Masse ausschlaggebend (Reduktion um > 70 %). Der Holz-Beton-Hybrid (Variante 2a) wurde aus Gründen der Wirtschaftlichkeit nicht weiterverfolgt (Mehrkosten >10 %).

Tab. 2: LCA zu den Außenwand-Varianten

Angaben je m ² _{NGF} · Jahr	Gewichtung DGNB	Einheit	Stahlbetonwand + WDVS	Holzständerwand mit vorgehängter Fassade	Abweichung	Abweichung prozentual
Globales Erwärmungspotenzial (GWP)	40 %	kg CO ₂ -Äq.	285,4	92,0205	-193,3795	-68 %
Bildungspotenzial für troposphärisches Ozon	10 %	kg Ethen-Äq.	0,0801	0,0285	-0,0516	-64 %
Versauerungspotenzial von Boden und Wasser (AP)	10 %	kg SO ₂ -Äq.	0,6613	0,2386	-0,4227	-64 %
Eutrophierungspotenzial (EP)	10 %	kg PO ₄ -Äq.	0,0789	0,0355	-0,0434	-55 %
Nicht-erneuerbare Primärenergie als Energieträger (P _{ENE})	15 %	MJ	2690	1253,9	-1436,1	-53 %
Gesamtprimärenergiebedarf (P _{GES})	10 %	MJ	3099	2524,8	-574,20	-19 %
Prozentualer Anteil nicht erneuerbarer Primärenergie (P _{ENE} /P _{GES})	5 %	[%]	87	50	-37	-43 %
Eigengewicht		kg	607,62	134,1	-473,31	-78 %

Basis: eLCA/ÖKOBAUDAT, ohne Berücksichtigung Lebenszyklusmodul D

Zusätzlich lässt das Stahlbetonskelett eine freie Grundrissgestaltung zu. Durch den Einsatz von nichttragenden Innenwänden steht einer späteren Umgestaltung und Umnutzung nichts im Wege - eine entsprechende TGA-Planung vorausgesetzt.

4.3 THG Reduktion in Betonbauteilen

Nachdem die Bauweise inkl. der Holzaußenwand festgelegt wurde, wurden die Bauteile, welche in Stahlbeton ausgeführt werden, untersucht. Vor allem der Einsatz von alternativen Zementen und Recyclingbeton wurde untersucht. Da Zement für ca. 90 % der Treibhausgasemissionen im Beton verantwortlich ist, ist das Reduktionspotenzial am höchsten.

Durch den Einsatz von alternativen Zementen wie CEM III/B oder einer Mischung von CEM I/CEM III können die Treibhausgasemissionen deutlich reduziert werden. Beim Einsatz der Mischung aus CEM I und CEM III/B sind ca. 12 % Reduktion möglich, beim Einsatz von CEM III/B sogar bis zu 36 %. Vor allem die rohstoffbedingten Treibhausgasemissionen werden durch den geringeren Zementanteil reduziert. Kompensiert wird dies durch die Zugabe von Zuschlagstoffen. Diese Zuschlagstoffe können jedoch Auswirkungen auf technische Eigenschaften wie die Nachbehandlungsdauer oder das Prüfalter haben. Diese Auswirkungen müssen bei der Prüfung auf Eignung für den jeweiligen Einsatzzweck geprüft werden.

Tab. 3: Variantenvergleich Betonarten

	CEM I 42,5 R	CEM I 42,5 R mit RC Typ 1	CEM II/A-LL 42,5 N	Mischung CEM I/ CEM III	CEM III/B 32,5 N LH-SR
Umweltauswirkungen					
kg CO ₂ -Äq./m ³	205	205	211	181	131
∑ Decke kg CO ₂ -Äq.	71.952	72.004	74.172	63.500	45.955
∑ Wände kg CO ₂ -Äq.	63.205	63.251	65.155	55.781	40.368
∑ kg CO ₂ -Äq.	135.156	135.255	139.328	119.281	86.324
Einsparung Gesamt	0 %	0 %	3 %	-12 %	-36 %
Einsparung in Auto-km	0	0	-29.797	113.397	348.805
Randbedingungen					
Nachbehandlungsdauer in Tagen bei Einbautemperatur > 15 °C	2	2	2	2	4
Nachbehandlungsdauer in Tagen bei Einbautemperatur 10-15 °C	4	4	4	4	7
Nachbehandlungsdauer in Tagen bei Einbautemperatur 5-10 °C	8	8	8	8	14
Prüfalter [Tage]	28	28	28	28	56

Es bestätigt sich in dieser Untersuchung ebenfalls, dass der Einsatz von Recyclingbeton zu keinen direkten Reduktionen von Treibhausgasen führt. Dies begründet sich dadurch, dass näherungsweise der gleiche Anteil an frischem Zement eingesetzt werden muss wie bei neuem Beton.

5 Ausblick

Wir müssen in der Bau- und Immobilienwirtschaft den Perspektivwechsel hinbekommen – weg von der reinen Energieeffizienz im Betrieb, hin zu einer Fokussierung auf die THG-Emissionen im Lebenszyklus. Nur so werden auch die Herstellungs- und Errichtungsphasen stärker betrachtet, schließlich entstehen bereits heute in diesen Phasen mindestens ein Drittel der THG-Emissionen im gesamten Lebenszyklus des Gebäudes. Bei der zu erwartenden und auch politisch gesteuerten Erhöhung der Anteile an erneuerbaren Energien (statt fossiler Brennstoffe) wird sich das Verhältnis der Emissionen zunehmend in Richtung der Konstruktion und weg vom Gebäudebetrieb verschieben. Die Graue Energie eines Gebäudes wird also in Zukunft wesentlich an Bedeutung gewinnen, während die Energie im Betrieb zwingend und kontinuierlich auf erneuerbare Energien umgestellt wird. Der Scope 1 von Baustoffherstellern und Bauunternehmen wird der zentrale Stellhebel für eine klimaneutrale Bauwirtschaft und damit auch ein klimaneutraler Gebäudebestand sein. Das bedeutet, dass sowohl Anlagen zur Zementherstellung oder der Produktion von Trockenbaumaterialien als auch Holz-Abbindeanlagen, Fertigteilerwerke oder weitere Anlagen zur Vorfertigung von Bauteilen klimaneutral betrieben werden müssen. Aber auch das Baumanagement und die Prozesse vor Ort auf der Baustelle dürfen keine weiteren Emissionen in größerem Umfang erzeugen.

Elementarer Bestandteil einer Entscheidungsfindung in Planung und Ausführung muss eine Betrachtung der relevanten ökonomischen und ökologischen Parameter über den gesamten Lebenszyklus sein. Das bedeutet einerseits, dass der vorherrschende Fokus auf Herstellkosten zugunsten einer Betrachtung der Lebenszykluskosten, inklusive Herstellung und Errichtung sowie End-of-life-Szenarien, verschoben wird. Andererseits wird damit erreicht, dass sämtliche Emissionen über den gesamten Lebenszyklus bilanziert werden. In Kombination mit realen Umweltfolgekosten entsteht hierdurch unter Umständen eine ganz andere Entscheidungsgrundlage als bei einer rein ökonomischen und auf Herstellkosten aufgerichteten Betrachtung.

Beides, also sowohl die Bilanzierung von direkten Emissionen von Unternehmen als auch die Bewertung der relevanten Parameter von Gebäuden über den gesamten Lebenszyklus, wird nur über die Nutzung politischer Steuerungsinstrumente möglich werden. Technologieoffene Förderungen und Steuerungsinstrumente sind eine zwingende Voraussetzung, um sämtliche Innovationspotenziale zu nutzen. Alle politischen Anstrengungen müssen gemein haben, dass die Senkung von THG-Emissionen über den gesamten Lebenszyklus und die Erhöhung der Nutzung von erneuerbaren Energien die zentralen und quantifizierten Zielgrößen sind. Zudem müssen sämtliche Geschäftsmodelle der Bauwirtschaft von den Steuerungsinstrumenten erfasst sein. Insbesondere das klassische Bauträgergeschäft hat rein aus seinem Geschäftsmodell heraus wenig bis kein Interesse an einer Betrachtung des Gebäudes über den gesamten Lebenszyklus. Die einzig entscheidenden Kenngrößen dieses Geschäftsmodells sind heute die Herstellkosten und die erzielbaren oder erzielten Verkaufspreise. Auch dahingehend müssen die gesetzlichen Vorgaben sowie die Förderungsgrundlagen weiterentwickelt werden, um das Ziel eines klimaneutralen Gebäudesektors und – auf dem Weg dahin – die Sektorziele zu erreichen.

Die Bauwende ist eine große gesellschaftliche Aufgabe. Damit sie gelingt, ist eine Vision, wohin uns diese Transformation der Bauwirtschaft führen soll, als Abkehr von der aktuell emissionsintensiven und stark ressourcenbeanspruchenden Branche unabdingbar. Gleichzeitig darf diese große Vision und die damit verbundene Komplexität nicht zur Lethargie der Beteiligten führen. Es geht auch darum, zu zeigen, was schon möglich ist, wenngleich damit noch lange nicht der gewünschte Idealzustand erreicht werden kann. 10 % weniger CO₂ in der Herstellung eines Gebäudes sind besser als keine Reduzierung. Die Transformationsforscherin Prof. Dr. Maja Göpel nutzt hierfür den Begriff des "inkrementellen radikalen Wandels" und meint damit sowohl eine radikale Abkehr vom (schlechten) Ist-Zustand als auch viele kleine Schritte auf dem Weg hin zu einem klimafreundlichen Gebäudesektor [15].

6 Literatur

- [1] Bundesrepublik Deutschland – Der Bundeskanzler (2021) Organisationserlass nach §9 der Geschäftsordnung der Bundesregierung, veröffentlicht am 08.12.2021
- [2] vgl. <https://www.gdw.de/pressecenter/pressemitteilungen/wohnungswirtschaft-fordert-von-neuer-regierung-realistischen-plan-fuer-die-vereinbarkeit-von-klimaschutz-und-bezahlbarem-wohnen/>; zuletzt zugegriffen am 20.12.2021
- [3] vgl. <https://www.dgnb.de/de/aktuell/pressemitteilungen/2021/position-duh-dgnb-bak>; zuletzt zugegriffen am 20.12.2021
- [4] vgl. <https://drive.google.com/file/d/10CfpLCtRfoRLMHkAWsUsVS-WYUt8-uH8/view>; zuletzt zugegriffen am 20.12.2021
- [5] vgl. <https://www.germanzero.de/erreichen/1-5-grad-massnahmen/loesungen-gebaeude>, zuletzt zugegriffen am 20.12.2021
- [6] o. V. (2021) Mehr Fortschritt wagen – Bündnis für Freiheit, Gerechtigkeit und Klimaschutz; Koalitionsvertrag zwischen SPD, Bündnis90/Die Grünen und FDP für die 20. Legislaturperiode; online verfügbar unter <https://www.bundesregierung.de/re-source/blob/974430/1990812/a4ceb7591c8d9058b402f0a655f7305b/2021-12-10-koav2021-data.pdf?download=1>; zuletzt zugegriffen am 20.12.2021
- [7] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (Hrsg.) (2021) Parlamentarische Anfrage an die Bundesregierung (Frage Nr. 542) zur Höhe der Fördermittel für den Einbau von Gasheizungen durch; online verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Parlamentarische-Anfragen/2021/09/8-542.pdf?__blob=publicationFile&v=4; zuletzt zugegriffen am 20.12.2021
- [8] Deutsche Umwelthilfe, urgewald e.V. (Hrsg.) (2021) Klimakrise weltweit – gefördert von Deutschland. Wie Deutschland mit staatlichen Krediten und Garantien klimaschädliche Öl- und Gasinfrastrukturprojekte im Ausland massiv unterstützt
- [9] Vgl. <https://www.nachhaltigkeitsrat.de/aktuelles/eu-taxonomie-so-steht-es-auf-dem-weg-zur-nachhaltigen-wirtschaft/?cn-reloaded=1>; zuletzt zugegriffen am 20.12.2021
- [10] Vgl. https://ec.europa.eu/sustainable-finance-taxonomy/tool/index_en.htm; zuletzt zugegriffen am 20.12.2021
- [11] Umweltbundesamt (Hrsg.) (2019) Energieaufwand für Gebäudekonzepte im gesamten Lebenszyklus – Abschlussbericht; online verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-10-29_texte_132-2019_energieaufwand-gebaeudekonzepte.pdf; zuletzt zugegriffen am 20.12.2021
- [12] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen – DGNB e.V. (Hrsg.) (2021) Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion; online verfügbar unter https://static.dgnb.de/fileadmin/dgnb-ev/de/themen/Klimaschutz/Toolbox/102021_Studie-Benchmarks-fuer-die-Treibhausgasemissionen-der-Gebaeudekonstruktion.pdf?m=1633093306; zuletzt zugegriffen am 20.12.2021
- [13] Vgl. <https://www.baunetzwissen.de/glossar/g/graue-energie-664290>; zuletzt zugegriffen am 20.12.2021
- [14] World Business Council for Sustainable Development, World Resources Institute (Hrsg.) (2004) The Greenhouse Gas Protocol. A Corporate Accounting and Reporting Standard; online verfügbar unter <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/ghg-protocol-revised.pdf>; zuletzt zugegriffen am 20.12.2021
- [15] Göpel, M. (2020) Unsere Welt neu denken – Eine Einladung. Ullstein Buchverlage, Berlin

7 Autoren

Rudolf Hügel

Projektleitung Entwicklung und Innovation
Gottlob Rommel GmbH & Co. KG
Von-Pistorius-Straße 14
70188 Stuttgart

Mark Weiher

Projektleitung Entwicklung und Innovation
Gottlob Rommel GmbH & Co. KG
Von-Pistorius-Straße 14
70188 Stuttgart

Sichtweise der öffentlichen Hand

Winfried Baumgärtel und Markus Müller

Zusammenfassung

In den nachfolgenden Ausführungen wird dafür plädiert, neben den als entscheidend angesehenen Maßnahmen zur Dekarbonisierung einen möglichst vielfältigen Werkzeugkasten zu erarbeiten und über die Regulierung verfügbar zu machen, um dann für jeden konkreten Anwendungsfall die im Sinne der Nachhaltigkeit optimale Lösung anwenden zu können.

1 Einleitung

Unsere Gesellschaft steht vor großen Herausforderungen. Das betrifft natürlich den Klimaschutz und die Anpassung an den Klimawandel, aber auch viele weitere wichtige Themen, wie beispielsweise bezahlbaren Wohnraum in ausreichender Menge zu schaffen.

Zu diesen großen Herausforderungen gesellen sich nun weitere wie steigende Preise und gestörte Lieferketten – insbesondere in der Bauwirtschaft –, bei denen noch nicht sicher gesagt werden kann, wie diese uns zukünftig weiter in der Planung und Ausführung beschäftigen werden.

Dass internationale Warenströme aus dem Takt geraten sind, zeigt, wie wertvoll Rohstoffe sind und welche Vorteile eine unabhängige Versorgung, beispielsweise durch Recycling, durch Verwendung von regionalen nachwachsenden Baustoffen oder die Nutzung von erneuerbaren Energien, nicht nur aus Gründen des Klimaschutzes, hat.

Die zukünftige Gestaltung des Bauens muss deshalb auf der Grundlage von Konzepten erfolgen, die auf Energieeffizienz, einem anderen Umgang mit Ressourcen und auf intelligenten Systemen basieren. Für all diese Themen sind innovatives Denken und kreative Ideen erforderlich. Man wird einräumen müssen, dass zu viel Zeit vertan wurde und wir deswegen jetzt schnell, aber mit langfristigem Blick, handeln müssen.

2 Politische Rahmenbedingungen für ein klimaneutrales Baden-Württemberg

Das neue Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen wird sich ganz gezielt diesen herausfordernden Themen widmen. Wir machen damit deutlich, welche Bedeutung die gebaute Lebenswirklichkeit für die Innovationsfähigkeit, für das Selbstbild und für den Zusammenhalt unserer immer komplexeren Gesellschaft hat. Im Koalitionsvertrag hat die Landesregierung eine Vielzahl an Maßnahmen vereinbart, mit denen das Land beim Klimaschutz vorangehen möchte. Es soll Vorreiter bei nachhaltiger Produktion und grünen Technologien werden.

Eine wichtige Bedeutung kommt hierbei dem Klimaschutzgesetz des Landes zu. Dazu hat der Landtag Anfang Oktober vergangenen Jahres eine Novelle verabschiedet, mit der sich Baden-Württemberg ambitionierte

Ziele gesetzt hat. Zentrales Element des Klimaschutzgesetzes sind die Klimaschutzziele für die Jahre 2030 und 2040. Als Zwischenziel will Baden-Württemberg eine Minderung der Treibhausgasemissionen um mindestens 65 Prozent bis zum Jahr 2030 erreichen. Die Netto-Treibhausgasneutralität soll bis 2040 erreicht werden: Baden-Württemberg will damit fünf Jahre früher klimaneutral werden als der Bund und sogar zehn Jahre früher als die EU.

Ein Baustein, um dieses ehrgeizige Ziel in Baden-Württemberg zu erreichen, ist die „Task Force zur Beschleunigung des Ausbaus erneuerbarer Energien“. Sie soll Konzepte erarbeiten, um die Zeit von der Idee bis zur Inbetriebnahme von Anlagen zu Erzeugung von erneuerbarer Energie zu halbieren. Die Task Force soll vorrangig Maßnahmen zur Beschleunigung des Ausbaus der Windenergie im Land umsetzen. Sie soll aber auch die Photovoltaik, Bioenergie, Wasserkraft und die tiefe Geothermie in den Blick nehmen. Die Task Force der Landesregierung wird bei der Entbürokratisierung und Beschleunigung der Verfahren auch von externen Sachverständigen begleitet.

Die Bauwirtschaft hat eine Schlüsselrolle, wenn es um die Erreichung von Klimazielen geht. Sie hat einen hohen Anteil an der Bruttowertschöpfung, an der Beschäftigung, aber auch an den CO₂-Emissionen. Aus diesem Grund ist sie ein entscheidender Hebel zur Förderung des Klimaschutzes. Nur wenn es gelingt, in der Bauwirtschaft – und auch im Wohnungsbau – neue Impulse in Richtung Klimaneutralität zu setzen, können wir unsere hochgesteckten Ziele erreichen.

Unter dem Motto des KIT-Symposiums 2022 ist mit dem Begriff der öffentlichen Hand sicher zunächst der Staat mit Bund, Ländern und Gemeinden als Bauherr gemeint. Aus den nachfolgenden Ausführungen wird aber deutlich, dass „der Staat“ auch darüber hinaus auf vielfältige Weise an der Ausgestaltung der erforderlichen Veränderungen mitwirkt.

Mit der Gliederung der nachfolgenden Abschnitte in Anlehnung an das Programm des Symposiums soll versucht werden, den verschiedenen Aspekten des Themas aus der Sicht der öffentlichen Hand noch den einen oder anderen Gesichtspunkt hinzuzufügen.

3 Nachhaltiges Bauen aus Sicht der Landesregierung

Die Stärkung und Weiterentwicklung des nachhaltigen Bauens ist ein zentrales Ziel der Landesregierung. Dabei wird unter nachhaltigem Bauen ein Bauen verstanden, das ökologischen, ökonomischen, sozialen und kulturellen Aspekten gerecht wird. Die Landesregierung nimmt auf verschiedene Weise Einfluss auf das nachhaltige Bauen:

- Nachhaltiges Bauen in Förderprogrammen
- Nachhaltiges Bauen mit dem N!BBW-Planungswerkzeug
- Nachhaltiger Umgang mit dem Bestand

3.1 Nachhaltiges Bauen in Förderprogrammen

Mit der Novelle des Klimaschutzgesetzes im letzten Jahr wurden auch die Grundsätze des nachhaltigen Bauens gestärkt. Künftig sollen alle Förderprogramme des Landes für den Neubau sowie der Sanierung von Nichtwohngebäuden den Grundsätzen des nachhaltigen Bauens Rechnung tragen. Dabei soll es keine Unterschiede geben, ob es sich um private oder öffentliche Antragsteller handelt.

Mit dieser neuen Regelung wird die Auseinandersetzung der am Bau Beteiligten mit Nachhaltigkeitskriterien in der Planung und Ausführung gestärkt.

3.2 Nachhaltiges Bauen mit dem N!BBW-Planungswerkzeug

Um das nachhaltige Bauen beim Planen und Bauen zu konkretisieren und das Bewusstsein für nachhaltiges Bauen für die am Bau Beteiligten zu erhöhen, hat das Land bereits im Jahr 2014 mit den Nachhaltigkeitskriterien und dem Internetportal „NBBW – Nachhaltiges Bauen in Baden-Württemberg“ ein Planungswerkzeug geschaffen, welches die Prozesse der Planung optimieren kann. Das Programmsystem wurde entwickelt, um im Rahmen des Klimaschutzgesetzes als Voraussetzung für die staatliche Förderung von Hochbaumaßnahmen angewendet zu werden. Es wurde bewusst als niederschwellige Anwendung konzipiert, um einen leichten Einstieg in das nachhaltige Bauen zu ermöglichen. Es versteht sich nicht als Konkurrenz zu Nachhaltigkeitsbewertungssystemen.

Das System wendet sich in erster Linie an Bauherr*innen und Planer*innen und soll diese für die Aspekte des nachhaltigen Bauens sensibilisieren. Es beschränkt sich auf zehn wesentliche Nachhaltigkeitskriterien und nimmt keine quantitative Bewertung der Nachhaltigkeit vor. Das Programmsystem ist für Neu-, Erweiterungs- und Modernisierungsmaßnahmen gleichermaßen anwendbar. Es findet auch außerhalb von Förderprogrammen immer mehr an Zuspruch.

Das System wird fortlaufend weiterentwickelt und soll einen Impuls geben, dass nachhaltiges Bauen bei den Bauschaffenden zur Selbstverständlichkeit wird.

3.3 Nachhaltiger Umgang mit dem Bestand

Das nachhaltige Bauen von Gebäuden umfasst ein sehr breites Themenfeld, das über die Anwendung von Nachhaltigkeitskriterien hinausgeht. Um das nachhaltige Bauen wirkungsvoll und zielsicher weiter voranzubringen, müssen Schwerpunkte gesetzt werden.

Das Aufstocken und Erweitern sowie das Modernisieren von Gebäuden bietet erhebliche ökologische Vorteile gegenüber dem Abbruch und dem Neubau von Gebäuden. Der Einsatz von Ressourcen für Energie und Material wird deutlich reduziert. Darüber hinaus ist das Bauen im Bestand bei sachgerechter Konzeption auch ökonomisch von Vorteil. Manchmal kann durch Verwendung des leichten Baustoffs Holz bei Aufstockungen bestehender Gebäude unkompliziert zusätzlicher Wohnraum ohne weiteren Flächenverbrauch geschaffen werden.

Eine weitere wichtige Aufgabe besteht darin, die Verwendung von recycelten Baustoffen voranzubringen und - wenn keine Sicherheitsaspekte dagegen sprechen - den Einsatz von gebrauchten Bauprodukten zu ermöglichen.

Für die Bereiche Bauen im Bestand und die Verwendung von gebrauchten Bauprodukten, gibt es bislang kein einschlägiges Regelwerk. Die Landesbauordnungen sind in erster Linie für den Neubau konzipiert. Die Verwendung gebrauchter Bauprodukte ist nicht explizit vorgesehen. Es stellen sich rechtliche, u. a. auch haftungsrechtliche, aber auch wirtschaftliche Fragen. Nach heutigem Stand muss etwa für alle Produkte deren gesundheitliche Unbedenklichkeit nachgewiesen werden, dies könnte z. B. für einen gebrauchten Parkettboden wirtschaftlich keinen Sinn machen. Auch die Aufstockung von Gebäuden kann insbesondere in den zahlreichen von Erdbeben gefährdeten Gebieten Baden-Württembergs aus statischen Gründen problematisch sein. Ebenso kann die Erfüllung der Vorgaben zum Brandschutz bei Aufstockungen aufwendig sein. Es ist zwar technisch fast immer möglich, die vorstehenden Probleme zu lösen, wirtschaftlich sinnvoll sind aufwendige Ertüchtigungsmaßnahmen aber nicht immer.

Um hier verantwortbare Fortschritte zu erreichen, müssen gemeinsam mit den anderen Ländern, Wirtschaftakteuren und Forschungseinrichtungen sukzessive technische Lösungen erarbeitet und ggf. auch rechtliche Rahmenbedingungen angepasst werden.

4 Nachhaltiger Beton: Klinkereffiziente Zemente, alternative Bindemittel, Betonzusatzmittel, Ökobetone

Schon seit vielen Jahren wird in der Fachpresse über neu entwickelte Ökozemente, Ökobetone und alternative Bindemittel berichtet. Im Gegenzug wird seitens der Baustoffexperten und der Bauindustrie auf die Konsequenzen aus veränderten Frisch- und Festbetoneigenschaften hingewiesen. Dies betrifft auch Auswirkungen auf den Bauablauf wie z. B. die Verarbeitbarkeit des Betons, die Frühfestigkeit für das Ausschalen und die Nachbehandlung. Die erforderliche Dauerhaftigkeit und letztlich die Robustheit der Betonbauweise müssen gewahrt bleiben. Natürlich fordert all das auch eine erhöhte und strukturierte Kommunikation.

Selbstverständlich sind für solche Zemente und Betone dann auch technische Regelwerke zu erarbeiten und auch die Regelungen für Bemessung und Konstruktion sind ggf. an die neuen Baustoffe anzupassen. All das braucht Vorlauf und an all dem wird gearbeitet. Das Ziel besteht in der Klimaneutralität der Betonbauweise.

Für viele Bauaufgaben stehen schon heute verschiedene Zemente mit vergleichbarer technischer Leistungsfähigkeit, aber unterschiedlicher CO₂-Bilanz zur Verfügung. Für die am Bau Beteiligten besteht hier ein Potential für Optimierungen. Voraussetzung ist natürlich die regionale Verfügbarkeit.

Aus der Sicht der öffentlichen Hand als Bauherr und Verwalter von Bauwerken aus Stahlbeton, insbesondere im Bereich der Infrastruktur, ist neben der Standsicherheit insbesondere der Aspekt der Dauerhaftigkeit von Belang. Darauf soll später noch eingegangen werden. Und natürlich ist die öffentliche Hand über die öffentlich geförderte Forschung auf den verschiedensten Ebenen aktiv an diesen Entwicklungen beteiligt.

5 Weitere Entwicklungen im Bereich Baustoffe und Nachhaltigkeit

Dass gemäß dem Thema des KIT-Symposiums 2022 die Dekarbonisierung ein wichtiger Schlüssel zum nachhaltigen Bauen mit Beton ist, ist völlig unstrittig. Es ist jedoch erforderlich, unter der Überschrift „Nachhaltigkeit“ einige weitere Aspekte zumindest zu erwähnen. Wichtig ist, dass Verbesserungen in einem Bereich zu Verschlechterungen an anderer Stelle führen können, so dass die Suche nach der nachhaltigsten Lösung oft eine Optimierungsaufgabe ist, die, je nach Schwerpunktsetzung, zu mehreren „richtigen“ Lösungen führen kann.

- Auf das **Bauen im Bestand** wurde bereits eingegangen.
- Ressourcenschonung, Rohstoffknappheit und begrenzter Deponieraum sind drei Argumente für die Verwendung von **rezyklierten oder gebrauchten Produkten**. Ein positives Beispiel ist die Verwendung von Recycling- bzw. R-Beton – allerdings mit Luft nach oben. Nachdem das technische Regelwerk ungenutzt schon einige Jahre zur Verfügung stand, hatte das Umweltministerium Baden-Württemberg Mitstreiter gesucht, z. B. das ifeu-Institut Heidelberg und die Firma Feess. Geeignete Pilotprojekte wurden dann ganz konkret gefördert und publiziert. Inzwischen ist R-Beton für die in einer DAfStb-Richtlinie geregelten Anwendungsfälle etabliert. Die Wirtschaftlichkeit hängt im Einzelfall natürlich von der Verfügbarkeit der rezyklierten Gesteinskörnungen in ausreichender Menge und bei gleichbleibender Qualität, aber auch von der lokalen Konkurrenz der Hersteller natürlicher Gesteinskörnungen ab. Sowohl durch Vorgaben für Ausschreibungen der öffentlichen Hand als auch durch die Einbindung in das Standardleistungsbuch konnte die Verbreitung gefördert werden. Im Rahmen von Nachhaltigkeitsbewertungssystemen und auch im Rahmen von N!BBW kann die Verwendung von R-Beton angerechnet werden. An den vorhandenen technischen Regelwerken scheitert die Verwendung der verfügbaren RC-Gesteinskörnungen nicht, trotzdem sind auch hier weitere Optimierungen in Arbeit.
- Zur Ressourceneffizienz gehört auch die Verwendung **hochfester Baustoffe bei Stahl und Beton** oder auch vorgespannter Konstruktionen mit entsprechend geringeren Abmessungen.

- Zu geringeren Abmessungen führt auch die Verwendung **alternativer, nicht rostender Bewehrungen** aus Carbon oder anderen Fasern. Technische Verfahren für eine sortenreine Trennung beim Recycling sind in der Entwicklung. Neben dünnwandigen Bauteilen sind für die Nachhaltigkeit insbesondere auch die Möglichkeiten zur Instandsetzung bzw. zum Verstärken von Tragwerken von Bedeutung.
- Bauherren sollten sich beim Vergleich verschiedener Lösungen nicht nur an den Kosten für die Errichtung orientieren. Für eine langfristig nachhaltige Lösung sollten **Lebenszyklusbetrachtungen** für die Baustoffe, aber v. a. auch ganzheitlich für das Gebäude erfolgen. Die beste Lösung kann dann durchaus im Einplanen von Tragreserven für spätere Umnutzungen bestehen oder in einem Tragsystem, das solche Umnutzungen möglichst wenig einschränkt. Zukünftig kann ggf. auch die Wiederverwendbarkeit von Bauteilen eine Rolle spielen. Insgesamt gilt es, die Kriterien der Nachhaltigkeit untereinander und gegeneinander abzuwägen und ihre Wechselwirkungen zu berücksichtigen.

Es gibt noch viele weitere Beispiele wie z. B. Infralichtbeton oder Gradientenbeton. Aus Sicht der öffentlichen Hand ist wichtig, dass über die unverzichtbare CO₂-Reduzierung hinaus viele Möglichkeiten zur Verfügung stehen, um dann unter dem Gesichtspunkt Nachhaltigkeit das Optimum zu finden.

6 Dauerhaftigkeit, Normen, bauaufsichtliche Rahmenbedingungen

Zur öffentlichen Hand als Bauherr und späterer Verwalter gehören über den Anwendungsbereich der LBO hinaus auch viele meist kostspielige, für eine lange Nutzung geplante und wirtschaftlich bedeutsame Bauwerke der Infrastruktur, wie z. B. Straßen- und Eisenbahnbrücken, Schleusen an Wasserstraßen und Tunnel. Die Regeln für die Konstruktion, aber auch für die Baustoffe basieren auf langjährigen Erfahrungen, die auf der Grundlage neuer wissenschaftlicher Erkenntnisse, aber auch aufgrund von Erfahrungen aus Schadensfällen, immer weiter verbessert wurden. Mangelhafte Dauerhaftigkeit zeigt sich oft erst nach vielen Jahren. So ist es verständlich, wenn die für bauliche Anlagen zuständigen Verwaltungen als Vertreter der öffentlichen Hand ihrer Verantwortung gerecht werden und bewährte Lösungen fordern. Hier liegt die nachhaltigste Lösung sicher bei möglichst lange wartungsfreien und später wartungsarmen Konstruktionen, ggf. auch mit Tragreserven.

In der Breite der Bauaufgaben entsteht aus den Anforderungen der Nachhaltigkeit aber auch Druck, jahrelang praktizierte Lösungen zu hinterfragen. Die angestrebte Vereinheitlichung von Regelungen im Zuge der europäischen Normung bringt nicht nur die Notwendigkeit, sondern auch die Chance mit sich, die Konzepte anderer Staaten kritisch zu prüfen und Gutes zu übernehmen. Ein im Sinne der Nachhaltigkeit statisch optimiertes Tragwerk erfordert dann u. U. eine anspruchsvollere Tragwerksplanung, führt aber ggf. auch zu einer geringeren Toleranz gegenüber Ausführungsfehlern und späteren Laständerungen. Auch hier ist bei Beachtung der Wechselwirkungen ein Optimum zu suchen.

Letztlich müssen solche neuen Konzepte dann im Zuge der Normungsarbeit und der Überführung in öffentliches Recht von den Vertretern der öffentlichen Hand bzw. der Bauaufsicht geprüft und mitgetragen werden. Alternativ können natürlich – z. B. bei Bauvorhaben im Anwendungsbereich der Landesbauordnungen – Zustimmungen im Einzelfall, vorhabenbezogene oder allgemeine Bauartgenehmigungen, allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen oder Europäische Technische Bewertungen erste Anwendungen und das Sammeln von Erfahrungen ermöglichen.

7 Bauwirtschaft

Bei vielen zu planenden Bauvorhaben steht der Betonbau zumindest ab dem Erdgeschoss in Konkurrenz zu anderen Bauweisen. Es ist offensichtlich, dass neben den gesetzgeberischen bzw. regulatorischen Vorgaben auch immer mehr direkte wirtschaftliche Aspekte Einfluss auf die Baukosten und die Vergabe nehmen wer-

den. Über die mit der Herstellung von Zement verbundenen Emissionen besteht da ein besonderer Handlungsbedarf zur Mitgestaltung der Prozesse. Dazu sei auf die Überlegungen aus dem Deutschen Ausschuss für Stahlbeton sowie die Konzepte der Baustoffindustrie verwiesen.

Die Dekarbonisierung im Betonbau führt zwangsläufig auch zu anderen Baustoffen, hat erhebliche Auswirkungen auf die Planungsprozesse, auf die Baustellenabläufe, auf Anpassungen beim Informationsaustausch und bei erforderlichen Kontrollen. All das muss erarbeitet und in Form verbindlicher Regelungen zur Verfügung gestellt werden.

Letztlich sind über die auszuschreibenden Bauvorhaben natürlich auch die Bauherren mit im Boot. Sie stellen die Weichen für ein vorschriftengerechtes, aber wirtschaftlich auf kurze Sicht maximal optimiertes Gebäude oder für ein Bauwerk, bei dem über eine Lebensdauerbetrachtung spätere Umnutzungen konstruktiv, z. B. bzgl. eventueller Lastreserven oder Umplanungen ermöglichende Tragwerke berücksichtigt – und natürlich auch bezahlt – werden. Planer und Baufirmen sollten hier beratend im Sinne der Nachhaltigkeit tätig werden.

8 Zusammenfassung

Die öffentliche Hand hat mit der Festlegung der politischen und insbesondere regulatorischen Rahmenbedingungen als Bauherr, als Mitwirkender bei der Regelsetzung, als Finanzier von Forschungsvorhaben und in weiteren Bereichen etliche Stellschrauben zur Verfügung. Diese werden auch genutzt. Damit es jedoch gelingt, Baden-Württemberg innerhalb von weniger als zwanzig Jahren klimaneutral zu gestalten und so Vorreiter in Sachen Klimaschutz zu werden, ist das Land auf die engagierte Zusammenarbeit aller Akteure angewiesen. Dies gilt natürlich bundesweit und ganz besonders auch für die internationale Zusammenarbeit in der Forschung und in der Regelsetzung. Wir müssen alle gemeinsam unseren Beitrag leisten, um das 1,5-Grad-Ziel zu erreichen.

Es erscheint zielführend, neben den als entscheidend angesehenen Maßnahmen zur Dekarbonisierung einen möglichst vielfältigen Werkzeugkasten zu erarbeiten und über die Regelsetzung verfügbar zu machen, um dann für die konkreten Anwendungsfälle die im Sinne der Nachhaltigkeit optimale Lösung anwenden zu können.

9 Autoren

Dr.-Ing. Winfried Baumgärtel

Technischer Direktor Referat 21 – Bautechnik und Bauökologie
Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg (MLW)
Theodor-Heuss-Str. 4
70174 Stuttgart

Prof. Dr. Markus Müller

Abteilungsleiter 2 (Wohnen, Städtebau, Baurecht, Denkmalpflege)
Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg (MLW)
Theodor-Heuss-Str. 4
70174 Stuttgart

Stoffstrommanagement als Beitrag zum nachhaltigen Bauen

Rebekka Volk und Frank Schultmann

Zusammenfassung

Zur Reduktion von Treibhausgasen und zur Berücksichtigung weiterer Umweltaspekte im Bausektor werden zahlreiche Aktivitäten, insbesondere in der Baustoffproduktion sowie der Nutzung und dem Betrieb von Gebäuden, vorangetrieben. Neben einer Reduktion negativer Umweltauswirkungen in der Nutzungsphase von Gebäuden steckt ein großes Potential im selektiven Rückbau und der Kreislaufwirtschaft, beispielsweise hinsichtlich Wiederverwendung oder Recycling von energie- und CO₂-intensiven Materialien und Bauprodukten. Allerdings ist die Datenlage bezüglich der Umweltaspekte der End-of-Life-Phase von Gebäuden, Bauteilen, Materialien und Infrastrukturen bzw. der Rückbau- und Kreislaufwirtschaft nach wie vor unzureichend. Zudem bestehen einige technische, ökonomische, organisatorische und informatorische Hemmnisse, um die Reduktion negativer Umweltauswirkungen im Rückbau und der Kreislaufwirtschaft zu realisieren. Beispielsweise fehlen schnelle, günstige und verlässliche Charakterisierungsinstrumente, um die Qualität und Zusammensetzung von Materialien vor Ort zu bestimmen. Des Weiteren fehlen detaillierte Daten zum erwarteten und tatsächlichen (Sekundär-)Baustoffaufkommen je Materialkategorie sowie zugehörige, definierte Materialqualitäten, welche die Grundlage eines effektiven (regionalen) Stoffstrommanagements bilden könnten. Zudem bieten die derzeitigen Rohstoffpreise und Deponiekosten keinen ausreichenden ökonomischen Anreiz zu einem aktiven, hochwertigen Stoffstrommanagement im Bauwesen. Ein regionales Stoffstrommanagement sollte dabei alle Baustoffe mit potentiell hohen Umweltauswirkungen berücksichtigen, wie beispielsweise Zement/Beton, Kunststoffe, Metalle, Gläser oder Isolationsmaterial. Dabei sollten die Bemühungen zum Management von Stoffströmen bzw. zum Aufbau von Kreislaufwirtschaftssystemen mit dem Ziel, weitestgehend geschlossene Baustoffkreisläufe aufzubauen, sich nicht nur auf Teilaspekte wie etwa die Reduktion von Energieverbrauch und Treibhausgasemissionen fokussieren, sondern möglichst alle Umweltaspekte berücksichtigen, um transmediale Problemverlagerungen zu vermeiden. Langfristig sollten allerdings nicht nur Effizienzmaßnahmen in der Kreislaufwirtschaft im Bausektor umgesetzt werden, da diese technische und physikalische Grenzen haben, sondern es müssen auch Konsistenz-/Suffizienz-Strategien entwickelt und umgesetzt werden wie beispielsweise verbessertes Produktdesign, Verhaltens-/Konsumänderung, Lebensdauerverlängerung oder neue, nachhaltigere Produktions-, Reparatur- und Recyclingverfahren und Materialien.

Autoren

Dr.-Ing. Rebekka Volk

Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann

Institut Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP)

Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU)

Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hertzstraße 16

76137 Karlsruhe

Programm des Web-Symposiums

10. März 2022, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

09:00 Uhr	Anmeldung Kaffee	13:45 Uhr	Herausforderungen und Chancen der Bauwirtschaft - Unser Beitrag zur Nachhaltigkeit Mark Weiher Rommel SF-Bau GmbH & Co. KG
09:30 Uhr	Begrüßung Moderation Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Dr.-Ing. Michael Aufrecht Verband Deutscher Betoningenieure e. V. Dipl. Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH	14:15 Uhr	Sichtweise der öffentlichen Hand Prof. Dr. Markus Müller Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg
09:45 Uhr	Das Zukunftskonzept: Nachhaltigkeit als Neues Normal! Dr.-Ing. Stephan Anders Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen - DGNB e. V.	14:45 Uhr	Kaffeepause
10:15 Uhr	Klinkereffiziente Zemente – ein wichtiger Baustein auf dem Weg zur Dekarbonisierung von Zement und Beton Prof. Dr.-Ing. Christoph Müller VDZ gGmbH	15:15 Uhr	Stoffstrommanagement als Beitrag zum nachhaltigen Bauen Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann Dr.-Ing. Rebekka Volk Karlsruher Institut für Technologie
10:45 Uhr	Kaffeepause	15:45 Uhr	Diskussionsrunde
11:15 Uhr	Zur Zukunft von Betonzusatzmitteln: Herausforderungen und Chancen im Zusammenspiel mit neuen Bindemitteln Prof. Dr. rer. nat. Torben Gädt TU München	16:15 Uhr	Zusammenfassung Schlusswort Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Dr.-Ing. Michael Aufrecht Verband Deutscher Betoningenieure e. V. Dipl. Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH
11:45 Uhr	Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen nach dem Performance-Prinzip Prof. Dr.-Ing. Udo Wiens Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.	16:30 Uhr	Umtrunk Imbiss
12:15 Uhr	Mittagspause		

Autorenverzeichnis

18. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Gutes Klima für die Zukunft.

Dekarbonisierung als wichtiger Schlüssel zum nachhaltigen Bauen mit Beton

Dr.-Ing. Winfried Baumgärtel

Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg, Theodor-Heuss-Str. 4, 70174 Stuttgart

Alper-Sedat Dönmez

TU München, Lehrstuhl für Bauchemie, Lichtenbergstraße 4, 85748 Garching

Prof. Dr. rer. nat. Torben Gädt

TU München, Lehrstuhl für Bauchemie, Lichtenbergstraße 4, 85748 Garching

Rudolf Hügel

Rommel SF-Bau GmbH & Co. KG, Von-Pistorius-Straße 14, 70188 Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Christoph Müller

VDZ Technology gGmbH, Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf

Prof. Dr. Markus Müller

Ministerium für Landesentwicklung und Wohnen Baden-Württemberg, Theodor-Heuss-Str. 4, 70174 Stuttgart

Prof. Dr. rer. pol. Frank Schultmann

Institut Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hertzstraße 16, 76137 Karlsruhe

Dr.-Ing. Rebekka Volk

Institut Industriebetriebslehre und Industrielle Produktion (IIP), Deutsch-Französisches Institut für Umweltforschung (DFIU), Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Hertzstraße 16, 76137 Karlsruhe

Thomas Wagner

TU München, Lehrstuhl für Bauchemie, Lichtenbergstraße 4, 85748 Garching

Mark Weiher

Rommel SF-Bau GmbH & Co. KG, Von-Pistorius-Straße 14, 70188 Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Udo Wiens

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V., Budapester Straße 31, 10787 Berlin

Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Themen vergangener Symposien (2004-2021)



1. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Instandsetzung bedeutsamer Betonbauten der Moderne in Deutschland
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Vogel, M. Haist
ISBN 978-86644-098-2



2. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Sichtbeton – Planen, Herstellen, Beurteilen
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 3-937300-43-0



3. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Innovationen in der Betonbautechnik
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 3-86644-008-1



4. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Industrieböden aus Beton
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-120-0



5. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betonbauwerke im Untergrund – Infrastruktur für die Zukunft
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-214-6



6. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Dauerhafter Beton – Grundlagen, Planung und Ausführung bei Frost- und Frost-Taumittel-Beanspruchung
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-341-9



7. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Beherrschung von Rissen in Beton
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-487-4



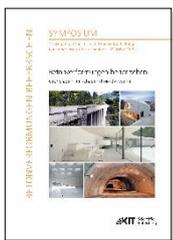
8. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Schutz und Widerstand durch Betonbauwerke bei chemischen Angriff
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-86644-654-0



9. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Nachhaltiger Beton – Werkstoff, Konstruktion und Nutzung
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer
ISBN 978-3-86644-820-9



10. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Gestalteter Beton – Konstruieren in Einklang von Form und Funktion
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer
ISBN 978-3- 73150-179-4



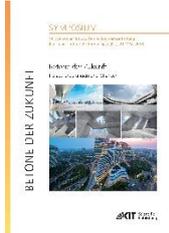
11. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betonverformungen beherrschen – Grundlagen für schadensfreie Bauwerke
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist, M. Kromer
ISBN 978-3-7315-0343-9



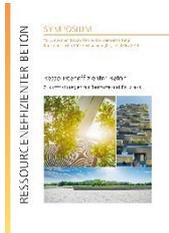
12. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Bauwerkserhaltung – Instandsetzung im Beton- und Stahlbetonbau
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, M. Haist
ISBN 978-3-7315-0474-0



13. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Sicherheit durch Beton – Schutz vor Explosion, Brand und Risikostoffen
Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, J. Link
ISBN 978-3-7315-0629-4



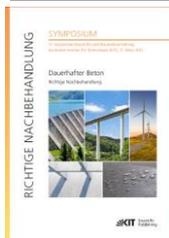
14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, J. Link
ISBN 978-3-7315-0767-3



15. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Ressourceneffizienter Beton – Zukunftsstrategien für Baustoffe und Baupraxis
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, J. Link; V. Mercedes Kind
ISBN 978-3-7315-0993-6



16. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Klima, Risse und Co. – Betonbau im herausfordernden Umfeld
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, V. Mercedes Kind
ISBN 978-3-7315-0994-3



17. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Dauerhafter Beton - Richtige Nachbehandlung
Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, V. Mercedes Kind
ISBN 978-3-7315-1073-4

Alle Bände sind kostenfrei als Download bei **KIT Scientific Publishing** (<http://www.ksp.kit.edu>) oder für einen Unkostenbeitrag im Buchhandel erhältlich.

Unsere Weltbevölkerung wächst stetig und damit auch der Bedarf an Wohn- und Lebensraum. Nie wurden so viele Gebäude errichtet und Brücken gebaut wie jetzt. Dabei ist Beton als leistungsfähiger und dauerhafter Baustoff in vielen Bereichen unersetzlich. Gleichzeitig ist der Klimaschutz heute wichtiger denn je. Es ist unsere Aufgabe, Treibhausgasemissionen zu reduzieren und mit den uns zur Verfügung stehenden Ressourcen verantwortungsvoll umzugehen. Dabei stellt die Dekarbonisierung der bislang CO₂-intensiven Betonbauweise einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg zum nachhaltigen Bauen dar. Doch welchen Beitrag können die einzelnen Beteiligten leisten? Und welche Chancen aber auch Herausforderungen bringt klimaneutrales Bauen mit sich? Diesen und weiteren Fragestellungen widmet sich unser Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung. Wir möchten Ihnen einen Überblick darüber geben, wie nachhaltiges und klimaneutrales Bauen mit Beton gelingen kann. Welche Lösungsmöglichkeiten zur Verfügung stehen und welche Hürden noch überwunden werden müssen. Die Veranstaltung beginnt mit einem Überblick über die Notwendigkeit des klimaneutralen Bauens und den Anforderungen, die sich daraus für den Betonbau ergeben. Anschließend stellen Vortragende aus den Bereichen Zementindustrie, Bauchemie und Bauausführung Zukunftsstrategien vor und zeigen auf, welche Ansätze bereits realisiert wurden. Ergänzend präsentieren Vertreter der Regelsetzer und der öffentlichen Hand, welche Ziele und Wege sie auf dem Weg zum nachhaltigen Bauen anstreben. Im letzten Vortrag wird wiederum der Frage nachgegangen, wie sich diese Ansätze mit dem Ziel der Wirtschaftlichkeit aber auch der Verfügbarkeit der benötigten Ressourcen realisieren lassen.

