

SYMPOSIUM

21. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 01. April 2025

Klimaeffizientes Bauen – Baustoffe und Bauweisen



Ulrich Nolting, Frank Dehn, Maureen Denu (Hrsg.)

SYMPOSIUM

Klimaeffizientes Bauen –
Baustoffe und Bauweisen

SYMPOSIUM

21. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 01. April 2025

Klimaeffizientes Bauen –
Baustoffe und Bauweisen

Herausgegeben von
Ulrich Nolting, Frank Dehn, Maureen Denu

Mit Beiträgen von

Robin Degen	David Ov
Frank Dehn	Jochen Reiners
Matthias Dichtl	Lukas Romanowski
Agemar Manny	Angelika Schießl-Pecka
Manuel Mohr	Udo Wiens
Christoph Müller	

Veranstalter:
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Gotthard-Franz Straße 3
76131 Karlsruhe

VDB – Verband Deutscher Betoningenieure e. V.
Regionalgruppen 8 und 10

InformationsZentrum Beton GmbH
Gerhard-Koch-Straße 2+4
73760 Ostfildern

Bildrechte Titelbildcollage:

Oben: © Gruber + Popp Architekten / Alexander Blumhoff, Berlin (Broschüre Energiesparend Bauen); Links: © stock.adobe.com-augustcindy; Mitte: © stock.adobe.com-chriss73; Unten: © stock.adobe.com-Moniek

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.bibliothek.kit.edu/ksp.php | E-Mail: info@ksp.kit.edu | Shop: 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-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-ND 4.0):
<https://creativecommons.org/licenses/by-nd/4.0/deed.en>*

Print on Demand 2025 – Gedruckt auf FSC-zertifiziertem Papier

ISBN 978-3-7315-1413-8

DOI 10.5445/KSP/1000178679

Vorwort

In den vergangenen Symposien wurde umfassend thematisiert, wie die Zement- und Betonindustrie zur Reduzierung der weltweiten CO₂-Emissionen beitragen kann. Hierbei wurden unterschiedliche Ansätze und Perspektiven beleuchtet. Das diesjährige Symposium rückt nun die Umsetzbarkeit sowie Wirkung der verschiedenen Ansätze für das klimaeffiziente Bauen in den Vordergrund.

Die Themen konzentrieren sich sowohl auf neue, klimaeffiziente Betone als auch nachhaltigere Bauweisen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt hierbei auf der praktischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit. Es sollen Lösungen gefunden werden, die sowohl den ökologischen als auch industriellen Anforderungen genügen und das konkrete Einsparpotenzial benennen.

Zum Auftakt erhalten Sie einen umfassenden Überblick über die Fortschritte bei emissionsreduzierten und klimafreundlichen Zementen. Dabei werden nicht nur die technischen Eigenschaften und relevanten Regelwerke, sondern auch die ökologische Bewertung dieser Zemente näher beleuchtet. Im Anschluss folgt eine Einführung in die theoretischen Grundlagen des additiven Bauens, insbesondere des 3D-Drucks, inklusive einer CO₂-Bilanzierung. Der Nachmittag beginnt mit einem Grußwort des Umweltministeriums Baden Württemberg. Danach liegt der Fokus auf dem modularen Bauen, wobei sowohl theoretische als auch praktische Aspekte sowie der Einfluss auf die Nachhaltigkeit betrachtet werden. Der abschließende Programmpunkt widmet sich den aktuell geltenden Richtlinien und Vorgaben für den Betonbau, die die Umsetzbarkeit und potenziellen Einschränkungen auf das klimaeffiziente Bauen betreffen.

Die Veranstalter

Inhalt

	Vorwort	I
Christoph Müller	Weiterentwicklung emissionsreduzierter, klimafreundlicher Zemente: Technische Eigenschaften, Zulassung und Regelwerke	1
Jochen Reiners Christoph Müller Manuel Mohr	Ökologische Bewertung: Von der EPD zum CO ₂ -Label	15
Agemar Manny Frank Dehn	Grundlagen des 3D-Drucks im Betonbau: Empfehlungen für die Praxis	25
Robin Degen Matthias Dichtl	Praxiseinblick in den 3D-Druck im Betonbau: Additives Bauen und CO ₂ -Bilanzierung im Fokus	35
Agemar Manny Frank Dehn	Nachhaltiges Bauen durch die Modularisierung von Skelettbauten	43
Lukas Romanowski	Net-Zero Concrete – Lässt er sich zukünftig in Betonfertigteilen realisieren?	61
Udo Wiens David Ov Angelika Schießl-Pecka	Betonbauwerke mit besonderen Anforderungen hinsichtlich Nachhaltigkeit - Welche DAfStb-Projekte unterstützen diesen neuen Anwendungsfall der DIN 1045-1000?	73
	Programm des 21. Symposiums	87
	Autorenverzeichnis	89
	Übersicht über Tagungsbände vergangener Symposien	91

Weiterentwicklung emissionsreduzierter, klimafreundlicher Zemente: Technische Eigenschaften, Zulassung und Regelwerke

Christoph Müller

Zusammenfassung

Die Dekarbonisierung ist die zentrale Herausforderung für die Betonbauweise. Mit der CO₂-Roadmap des VDZ aus dem Jahr 2020 [1] hat die Branche aufgezeigt, mit welchen Maßnahmen Klimaneutralität von Zement und Beton erreicht werden kann. Die Verwendung klinkereffizienter Zemente (z. B. CEM II- und CEM III-Zemente) ist ein wichtiger Baustein auf dem Weg der Betonbauweise in diese Richtung. Viele Anwender von Zement verbinden mit diesen Zementen eine Festigkeitsentwicklung, aus der sich verlängerte Ausschulfristen und Nachbehandlungszeiten ergeben und die deshalb z. B. für die Vorfertigung ggf. nur bedingt verwendet werden können. Auch Einschränkungen in der Anwendbarkeit nach Expositionsklassen sind möglich. In welchen Fällen trifft das zu, was bedeutet eine weitere Absenkung des Klinker/Zement-Faktors für die Anwendung der Zemente in verschiedenen Bereichen und wann wird es klimaneutrale Zemente und Betone geben? Dieser Beitrag stellt Informationen und Daten zur Verfügung, die helfen können, diese und weitere Fragen zu beantworten.

Schlagwörter: Dekarbonisierung, klinkereffiziente Zemente, Klinker/Zement-Faktor, Festigkeitsentwicklung, Expositionsklassen

Abstract

Decarbonisation is the key challenge for concrete construction. With the VDZ CO₂-Roadmap from 2020, the industry has shown which measures can be used to achieve climate neutrality in cement and concrete. The use of clinker-efficient cements (e. g. CEM II and CEM III cements) is an important step in this direction for concrete construction. Many cement users associate these cements with a strength development that results in longer demoulding and curing times and which can therefore only be used to a limited extent for prefabrication, for example. They may also be subject to restrictions in their applicability according to exposure class. In which cases does this apply? What does a further reduction of the clinker/cement-factor mean for the use of cements in different areas, and when will climate-neutral cements and concretes be available? This article provides information and data that can help answer these and other questions.

Keywords: Decarbonisation, clinker-efficient cements, clinker/cement-factor, strength development, exposure classes

1 Klinkereffiziente Zemente

Klinkereffiziente Zemente kommen in Deutschland seit vielen Jahren zum Einsatz, auch weil dadurch die CO₂-Emissionen aus der Zement- und Betonherstellung reduziert werden können. Den Trend zu klinkereffizienten Zementen im Produktmix der vergangenen Jahre zeigt Abbildung 1.

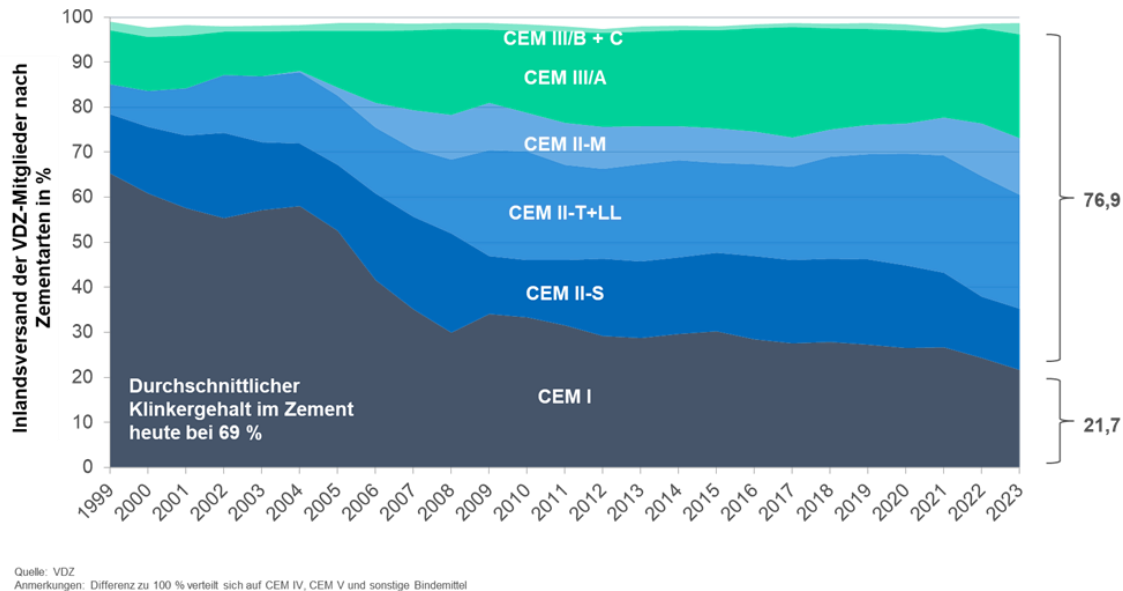


Abb. 1: Entwicklung des Zementportfolios in Deutschland von 1999 bis 2023

Seit der Veröffentlichung der CO₂-Roadmap des VDZ [1] im Jahr 2020 haben Portlandkompositzemente CEM II/M noch einmal an Bedeutung gewonnen. Der Marktanteil stieg von 6,7 % in 2020 auf 12,6 % in 2023 (Abbildung 2). Davon entfielen schätzungsweise 200 000 t auf die neuen CO₂-reduzierten CEM II/C-M-Zemente mit einem Mindestklinkergehalt von 50 %. Dies ist eine erfreuliche Entwicklung, wenn man bedenkt, dass diese Zemente erst seit 2021 am Markt angeboten werden. Nun gilt es, die Nachfrage nach CO₂-effizienten Zementen und damit hergestellten Betonen weiter zu steigern.

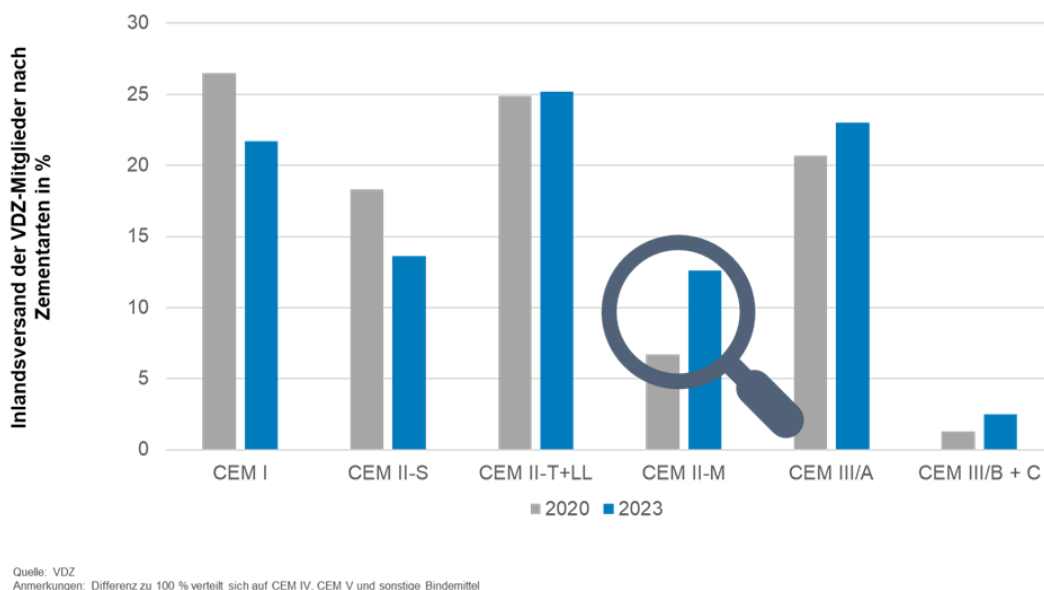


Abb. 2: Entwicklung des Zementportfolios in Deutschland: Vergleich der Jahre 2020 und 2023 (Veröffentlichung der CO₂-Roadmap des VDZ)

Normative Grundlagen für neue klinkereffiziente Zemente sind zum Beispiel die Zementnormen DIN EN 197-5 und DIN EN 197-6. So ist zum Beispiel ein CEM II/C-M (S-LL) mit Hüttensand und Kalkstein neben Portlandzementklinker in DIN EN 197-5 definiert. DIN EN 197-6 beschreibt Zemente mit rezyklierten Feinstoffen aus der Aufbereitung von Altbeton. Seit der Veröffentlichung der CO₂-Roadmap des VDZ im Jahr 2020 hat das Deutsche Institut für Bautechnik zahlreiche allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen für die Anwendung klinkereffizienter Zemente erteilt (Tabelle 1).

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

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

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

Tab. 2: Beispiele für allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen zwischen 2021 und 2024 (Zusammenstellung VDZ, Sebastian Palm – Stand 1/2025)

Zementart	Anzahl	Expositionsklassen	min K / max LL in %
CEM II/C	13	alle	50/20
CEM II/C + FA	2	alle	
CEM IV und CEM V ¹⁾	4	¹⁾	40/0
Zemente mit F ²⁾ als Nebenbestandteil	6	alle	95-35/0-20
CEM II/C	8	alle außer XF2, XF3, XF4	50/20
CEM II/C + FA	11/21		
CEM X (siehe Abschnitt 3)	2	alle außer XF2, XF3, XF4, XA2/3, XM2/3	35/37
¹⁾ 1 x CEM IV alle, 1 x CEM V alle, 1 x CEM V ohne XF4, 1 x CEM V nur XC4/XF1 (siehe auch https://www.dibt.de/fileadmin/verzeichnisse/NAT_n/SVA_3.pdf). ²⁾ F = Betonrecyclingmehl			

Auch die DIN 1045-2:2023 unterstützt mit neuen Anwendungsregeln für CO₂-effiziente Zemente die Dekarbonisierung von Zement und Beton. Einen Überblick dazu gibt die nachfolgende Tabelle 3.

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

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

¹⁾ 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.

²⁾ Gilt nur für Trass nach DIN 51043-1 als Hauptbestandteil.

2 Festigkeitsentwicklung und Ausschalfristen

2.1 Allgemeines

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

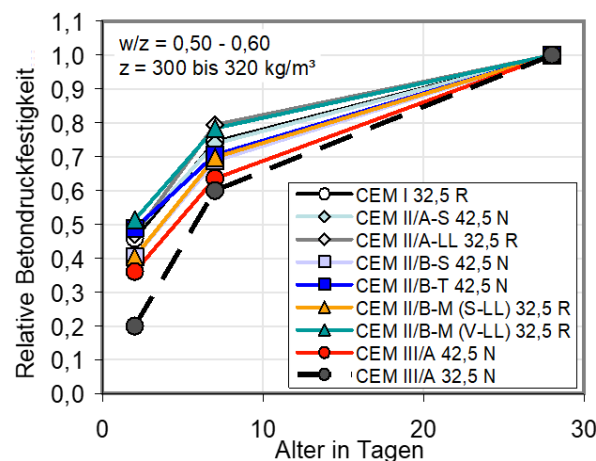


Abb. 3: Relative Druckfestigkeit von Betonen mit verschiedenen CEM II- und CEM III/A-Zementen im Vergleich zum CEM I-Beton [2]

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

2.2 Klinkereffiziente Zemente CEM II/C-M (S-LL)

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

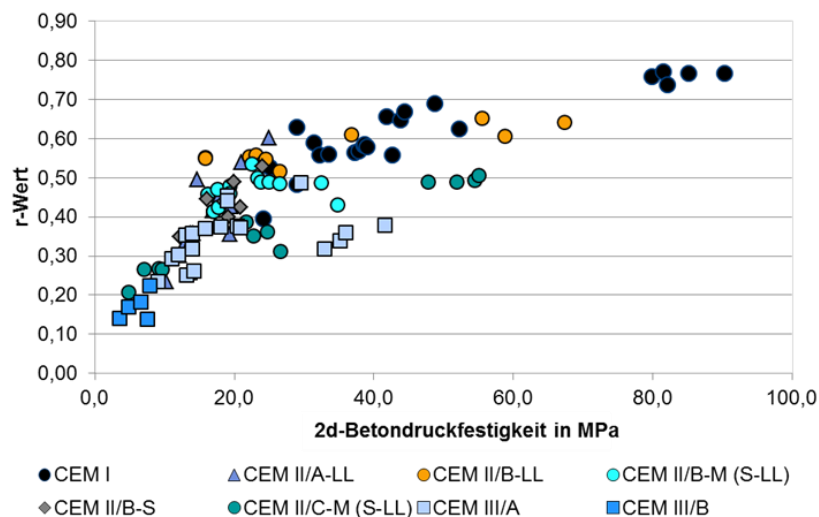


Abb. 4: Verhältnis der Mittelwerte der Druckfestigkeit nach 2 Tagen (f_{cm2}) und 28 Tagen (f_{cm28}) (= r-Wert) in Abhängigkeit der Druckfestigkeit nach 2 Tagen – Daten aus [3]

2.3 Modelle zur rechnerischen Prognose der Festigkeitsentwicklung

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

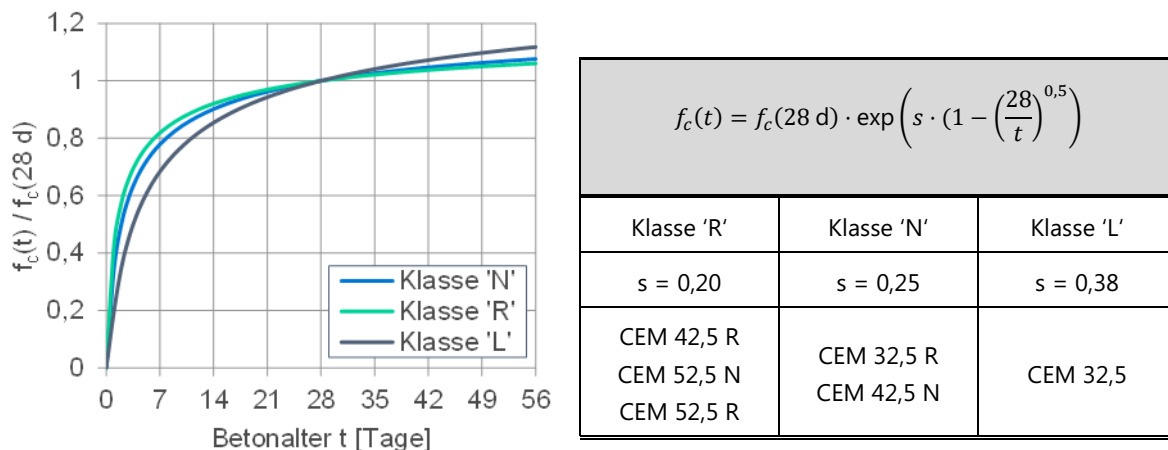
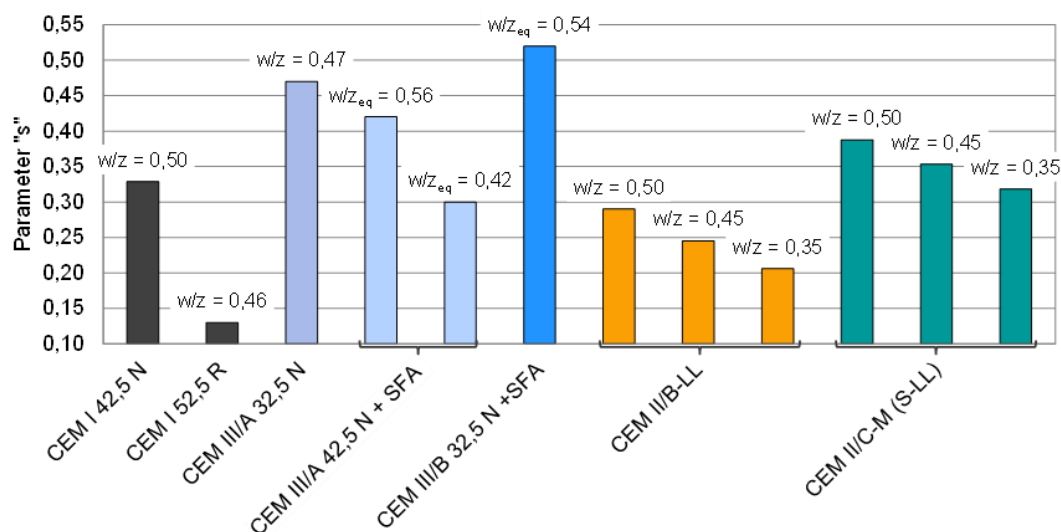


Abb. 5: Prognose der Druckfestigkeitsentwicklung gemäß DIN EN 1992-1-1 (Darstellung Hermerschmidt aus [12])

Diese Vorgehensweise wurde ursprünglich für Betone mit Portlandzementen entwickelt und ist zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung von Betonen mit Zementen mit geringen Klinkeranteilen nur bedingt geeignet [6]. Eine Verbesserung für hüttensandhaltige bzw. flugaschehaltige Zemente kann gemäß [6, 7, 8] erreicht werden, wenn der Formparameter s in Abhängigkeit des Klinkergehalts und weiterer zementtechnischer Parameter bestimmt wird.

Abb. 6: Parameter s zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung mittels Modellfunktion in Abhängigkeit der Zementart und des Wasser-Zement-Werts, Daten aus [9, 12] (SFA = Steinkohlenflugasche) - (Analyse und Darstellung Hermerschmidt aus [12])

Anhand einer Auswertung von Daten aus [9, 12] wurde die Anwendbarkeit der Modellfunktion zur Beschreibung der Festigkeitsentwicklung gemäß DIN EN 1992-1-1 (vgl. Abbildung 5) für Betone mit klinkereffizienten Zementen ohne und mit Flugasche als Betonzusatzstoff im Vergleich zu Betonen nur mit Portlandzement überprüft. Hierzu wurde der Funktionsparameter s durch nichtlineare Regression der Versuchsergebnisse bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Geschwindigkeit der Festigkeitsentwicklung neben der Zementart auch maßgebend durch den Wasser-Zement-Wert beeinflusst wird, vgl. Abbildung 6. Mit sinkendem Wasser-Zement-Wert wurden bei gleicher Zementart abnehmende Werte für den Funktionsparameter s bestimmt, d. h. die relative Festigkeitsentwicklung läuft mit sinkendem Wasser-Zement-Wert (w/z -Wert) schneller ab. Der Einfluss der Temperatur auf die Erhärtungsgeschwindigkeit wird in der Regel mit sogenannten

Reifefunktionen beschrieben. Die am häufigsten verwendete Reifefunktion basiert auf der Arrhenius-Funktion zur Beschreibung der Temperaturabhängigkeit der Geschwindigkeit von chemischen Reaktionen. Die unterschiedliche Temperatursensitivität der Zementhauptbestandteile wird dabei gewöhnlich über eine Anpassung der Aktivierungsenergie berücksichtigt. Für hüttensandhaltige Zemente sind in der Literatur durchgehend höhere Werte für die Aktivierungsenergie zu finden als für Portlandzemente, während die für flugasche- bzw. kalksteinhaltige Zemente angegebenen Werte in der Regel geringer sind als für Portlandzement [8, 14]. Für ternäre Systeme und Zemente mit calcinierten Tonen bedarf es einer breiteren Datenbasis, um die Anwendbarkeit von Reifemodellen zu überprüfen. Zu diesem Thema führt der VDZ aktuell entsprechende Forschung durch.

3 Die CEM X-Technologie: Zemente mit hohen Kalksteingehalten

Bereits zwischen 2011 bis 2016 legte der VDZ gemeinsam mit Forschungspartnern die Grundlagen für die CEM-X-Technologie. Die Projekte wurden gefördert durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt. In der Phase 1 (2011-2013) wurde gezeigt, dass Zement mit 50 M.-% Klinker und 50 M.-% ungebranntem Kalkstein LL zur Herstellung von Konstruktionsbetonen geeignet ist, wenn die Betontechnologie angepasst wird (Reduzierung des w/z-Wertes). In einem Praxistest zeigte sich, dass diese Betone mit geringem Wassergehalt und hohem Anteil an Betonzusatzmittel anfällig für Entmischen sind. Die Robustheit konnte schlussendlich mit kleinformigen Praxistests überprüft und nachgewiesen werden. In Phase 2 (2014-2016) wurde für Zement mit 20 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 50 M.-% Kalkstein bei angepasster Betontechnologie die Eignung für alle Expositionsklassen außer XF4 gezeigt. In den verschiedenen Projekten [9, 10] wurde somit deutlich, dass eine Anpassung des w/z-Werts dazu führen kann, dass zulassungsrelevante bzw. zulassungsfähige Betoneigenschaften erreicht werden. Im Februar 2024 wurde erstmals für einen solchen Portland-Kalkstein-Hüttenzement, für den es bisher keine Bezeichnung in der Normenreihe DIN EN 197 gibt, die erste allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (Z-3.16-2244) erteilt. Diese gilt für die Expositionsklassen X0, XC1 bis XC4, XD1 bis XD3, XS1 bis XS3, XF1, XA1 und XM1. Je nach Expositionsklasse ist die Verwendung des CEM X an einen gesondert festgelegten, maximalen w/z-Wert geknüpft. Ein solcher Zement mit rund 35 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 35 M.-% Kalkstein hat ein Global Warming Potential (GWP) von etwa 300 CO₂-Äq./t Zement nach der Umweltproduktdeklarationen (EPD)-Methodik der DIN EN 15804.

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

Klimaneutrales Bauen kann nur gelingen, wenn neben der Dekarbonisierung der Prozesse auch die emissionsarmen oder klimafreundlichen Produkte den Weg in den Markt finden. Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist das Bewusstsein auf der Nachfrageseite, dass es entsprechende CO₂-reduzierte Alternativen gibt, die die gleichen oder sehr ähnliche Produkteigenschaften wie konventionelle Zemente, Betone und Bauteile aufweisen. Daneben ist eine wichtige Voraussetzung, die Transparenz über den CO₂-Fußabdruck von Zementen, Betonen und Bauweisen zu verbessern. Hierzu können einerseits EPDs dienen, andererseits auch neue Kennzeichnungssysteme, wie etwa das CSC-Zertifikat für Beton und seine Ausgangsstoffe, das vom Concrete Sustainability Council (CSC) vergeben wird. Eine Richtlinie zu treibhausgasreduzierten Betontragwerken des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton ist im August 2024 erschienen [18]. Seit 2024 gibt es nunmehr auch eine Definition „grüner Zemente“, die im Dialog von Zementindustrie und Bundesregierung erarbeitet worden ist und die nun weltweit erstmals in Deutschland angewendet werden soll [16].

Gemäß dieser Klassifizierung wird bei den „grünen Zementen“ zwischen emissionsreduzierten und klimafreundlichen Produkten unterschieden. Die Klassen A bis D kennzeichnen dabei emissionsreduzierte Zemente mit einem CO₂-Fußabdruck > 100 kg CO₂/t Zement bis < 500 kg CO₂/t Zement in vier Stufen. Als klimafreundliche Zemente („Near Zero“) gelten solche mit einem CO₂-Fußabdruck < 100 kg CO₂/t Zement. Die jeweiligen CO₂-Klassen und eine beispielhafte Einordnung verschiedener Zementarten in die Klassifizierung

sind in Abbildung 7 dargestellt. Die bereits heute am Markt etablierten sowie die neuen CO₂-effizienten Zemente ordnen sich aktuell in der Regel in die Klassen D und C ein. Perspektivisch ist damit zu rechnen, dass durch den Einsatz der CO₂-Abscheidung im Zementwerk auch Zemente bis hin zur CO₂-Klasse „Near Zero“ erreichbar sein werden. Das wird aber erst in den kommenden Jahren der Fall sein [16].

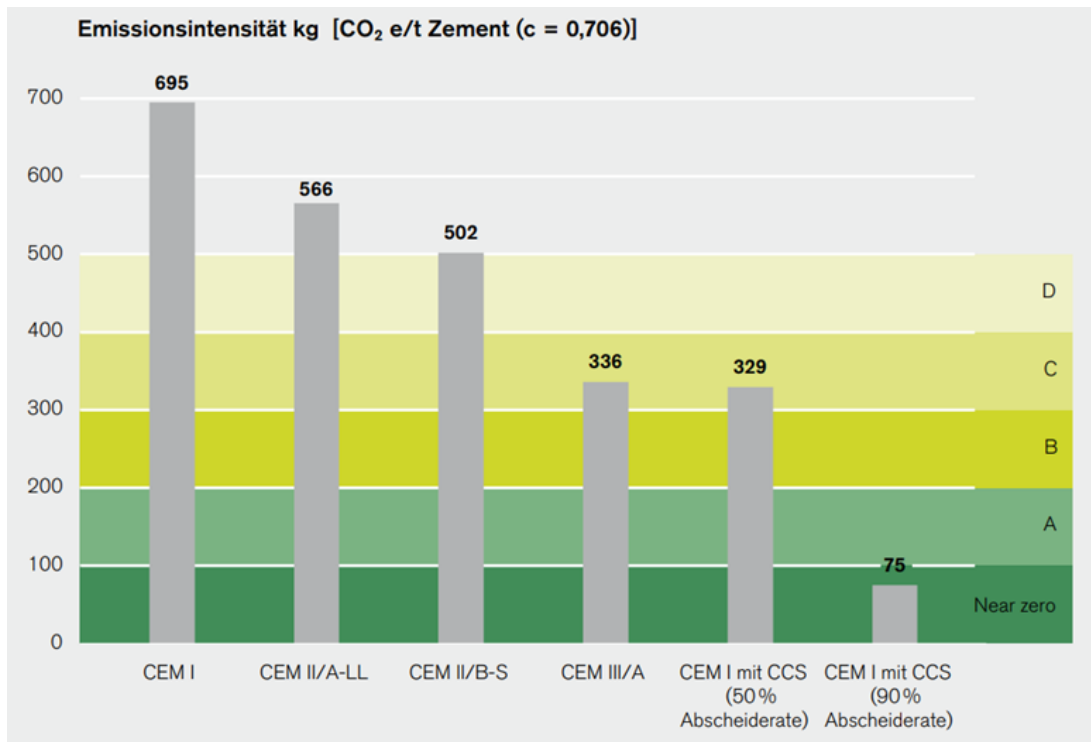


Abb. 7: Vorgeschlagene Emissionsschwellenwerte (in CO₂-Äq./t Zement im Vergleich zu aktuellen und zukünftigen Zementarten sowie Technologien) [15] – Grafik aus [16]

5 Neues CO₂-Label für Zement

Die Definition allein schafft jedoch noch keine Nachfrage und damit einen entsprechenden Markt. Deshalb hat der VDZ ein CO₂-Label für Zement („Cement Carbon Class“ (CCC)) entwickelt, das auf der beschriebenen Definition für grüne Zemente aufsetzt und als Kennzeichnungssystem die Sichtbarkeit dieser Produkte fördern soll. Das Label wurde im Januar 2025 veröffentlicht und gibt den Zementherstellern die Möglichkeit, gegenüber Kunden neben den Produkteigenschaften auch den CO₂-Fußabdruck transparent anzugeben. Letzterer wird entsprechend extern geprüft und durch das Label verifiziert. Das Label wird seine Wirkung dann entfalten, wenn in den einschlägigen öffentlichen und privaten Vergabe- und Ausschreibungsrichtlinien hierauf Bezug genommen und – für die öffentliche Hand – auch eine verpflichtende Verwendung möglichst CO₂-reduzierter Produkte entsprechend der Klassifikation zur Regel wird. Für private Bauprojekte kann dies als Blaupause dienen. Der Vorteil für Bauherren und Investoren: Mit dem Einsatz emissionsreduzierter Zemente, Betone und Betontragwerke lassen sich die „grauen Emissionen“ von Bauwerken bereits heute deutlich reduzieren, was nicht nur das Klima schont, sondern zunehmend sowohl für die Nachhaltigkeits-Zertifizierung von Gebäuden als auch die Gewährung von Fördermitteln wichtig wird [16].

6 Vom grünen Zement zum grünen Bauteil

Ein CEM X mit rund 35 M.-% Klinker, 30 M.-% Hüttensand und 35 M.-% Kalkstein gemäß Abschnitt 3 hat ein Global Warming Potential (GWP) von etwa 300 CO₂-Äq./t Zement nach der Methodik der DIN EN 15804. In einem Beton der Festigkeitsklasse C35/45, gemäß allgemeiner bauaufsichtlicher Zulassung (abZ) Z-3.16-2244

mit 350 kg/m^3 Zement geeignet für XC4/XF1, ergibt sich damit ein Global Warming Potential (GWP) von etwa $140 \text{ CO}_2\text{-Äq./m}^3$ Beton. Im CSC-System ist das ab dieser Festigkeitsklasse ein Level-3-Beton. Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt den CO_2 -Fußabdruck verschiedener Deckensysteme.

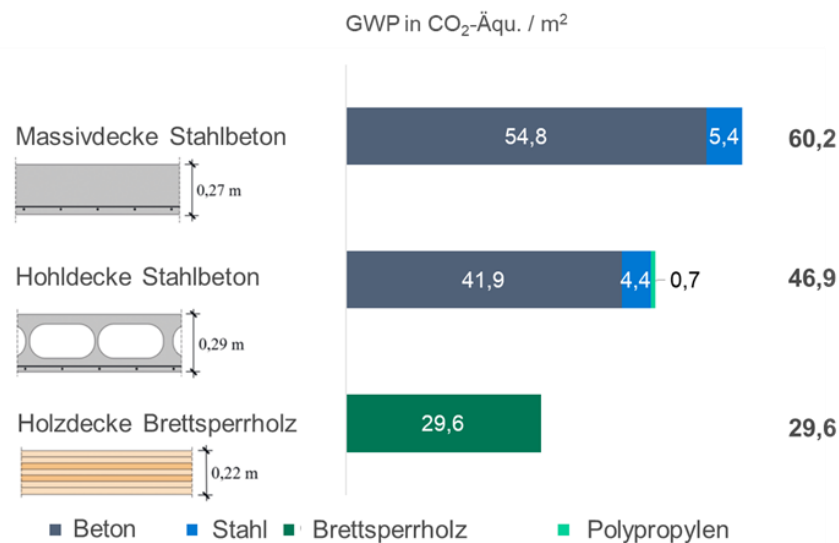


Abb. 8: CO_2 -Fußabdruck verschiedener Deckensysteme – Berechnung nach [17]

Im August 2024 erschien die Richtlinie zu treibhausgasreduzierten Betontragwerken des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) [17]. Die Richtlinie besteht derzeit aus den folgenden zwei Teilen: Teil 1 der Richtlinie legt die grundlegenden Anforderungen und die Nachweisführung für treibhausgasreduzierte Tragwerke fest. Teil 2 der Richtlinie behandelt Deckenbauteile, die im Geschossbau üblicherweise den höchsten Anteil an Treibhausgasemissionen im gesamten Tragwerk aufweisen. In Treibhausgas-Minderungsklassen erfolgt eine Klassifizierung von Treibhausgas-Reduktionszielen. Abbildung 9 zeigt auf der linken Seite das Global Warming Potential in $[\text{kg CO}_2\text{-Äquivalente}]$ der Beispiele aus Abbildung 8 im Vergleich mit einem Referenzzustand und den Treibhausgas-Minderungsklassen für Deckenbauteile nach [17]. Die Ermittlung des Referenzzustandes beruht auf Untersuchungen zu Deckenbauteilen mit einer Belastung zwischen $2,5 \text{ kN/m}^2$ und $7,5 \text{ kN/m}^2$. Für Belastungen größer $7,5 \text{ kN/m}^2$ darf der Referenzwert für ein Deckensystem mit gleicher Spannweite herangezogen werden ($\text{GWP}_{\text{Ref,Li,Bel.} > 7,5} = \text{GWP}_{\text{Ref,Li}}$). Abbildung 9 zeigt auf der rechten Seite das Global Warming Potential in $[\text{kg CO}_2\text{-Äquivalente}]$ der Beispiele aus Abbildung 8 unter der Annahme der Verwendung von CSC-Level-3-Betonen. CSC-Level-3-Betone können zum Beispiel erreicht werden, wenn ein Zement der Klasse B nach Cement Carbon Class CCC verwendet wird. Dieser Zement kann zum Beispiel ein CEM X nach Abschnitt 3 sein.

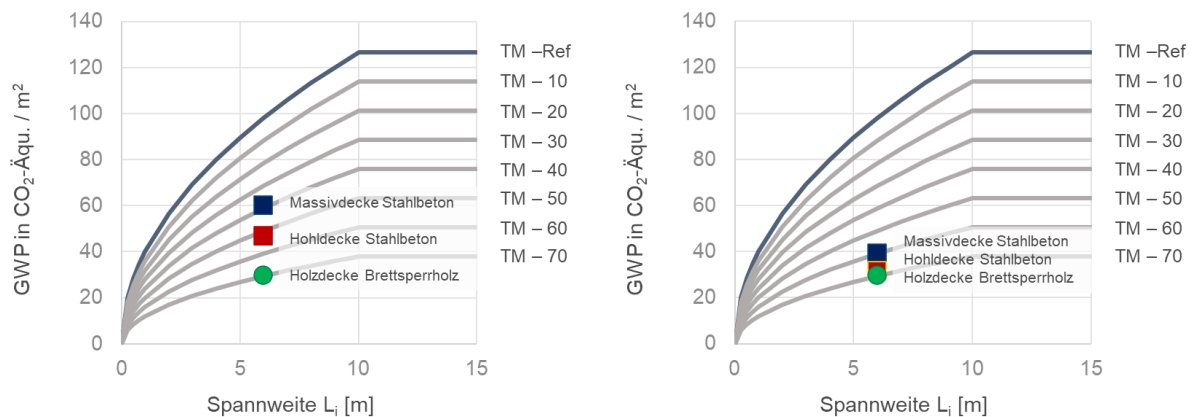


Abb. 9: Referenzzustand und Treibhausgas-Minderungsklassen für Deckenbauteile nach [17] – links: Einordnung der Beispiele aus Abbildung 8; rechts: Beispiele aus Abbildung 8 unter der Annahme der Verwendung von CSC-Level-3-Betonen

7 Wann gibt es klimaneutralen Zement und Beton?

Bis die ersten klimaneutralen Zementwerke in Deutschland in Betrieb gehen, werden noch einige Jahre vergehen. Dies wird möglich sein, sobald es gelingt, die unvermeidbaren CO₂-Emissionen aus der Herstellung abzuscheiden, zu transportieren und dauerhaft zu speichern bzw. zu nutzen. In der Zementindustrie in Deutschland und Europa werden derzeit zahlreiche Projekte geplant und teils bereits umgesetzt. Auch die Planungen für eine entsprechende CO₂-Infrastruktur nehmen Fahrt auf. Ein erstes CCS-Projekt in einem Zementwerk in Norwegen wird in 2025 den Betrieb aufnehmen und dann laut den Planungen rund 300 000 t klimaneutralen Zement pro Jahr erzeugen (siehe hierzu u. a. www.brevikccs.com, das Brevik-Projekt der Heidelberg Materials AG). Auch in Deutschland sind derzeit etwa zehn CCUS-Projekte in der Planung bzw. im Bau (Abbildung 10), sodass in den nächsten Jahren auch hierzulande die ersten Standorte weitgehend klimaneutral produzieren werden. Aus heutiger Sicht ist mit einem nennenswerten Angebot an klimaneutralem Zement und Beton Anfang der 2030er Jahre zu rechnen. Aufgrund der Minderungsverpflichtungen des Europäischen Emissionshandels stehen die Zementhersteller vor der Herausforderung ihre Produktionsprozesse bereits bis zum Jahr 2040 weitgehend zu dekarbonisieren – also fünf Jahre vor dem nationalen Klimaziel. Dies ist ein extrem ambitionierter Zeitplan und erfordert, dass auch die notwendigen externen Voraussetzungen für diese Transformation rechtzeitig geschaffen werden. Dazu gehört, neben dem Rechtsrahmen für den Einsatz von CCUS in Deutschland, der rasche Aufbau einer CO₂-Transportinfrastruktur sowie die Förderung grüner Leitmärkte, damit die zunehmend CO₂-effizienteren bzw. klimaneutralen Produkte und Bauweisen auch auf eine entsprechende Nachfrage treffen. Der Aufbau eines deutschen CO₂-Leitungsnetzes mit einer Länge von etwa 4800 km wird nach einer Studie des VDZ etwa 14 Mrd. Euro kosten. Für die gesamte Kette von der CO₂-Abscheidung über den Transport bis zur Speicherung werden die Kosten auf 115 bis 220 Euro/t CO₂ geschätzt. Kurz bis mittelfristig werden die Kosten am oberen Ende dieser Bandbreite angenommen. Hier sind Politik, Industrie sowie alle Baubeteiligten gleichermaßen gefragt, ihren Teil zum Gelingen der Transformation beizutragen [16, 19].

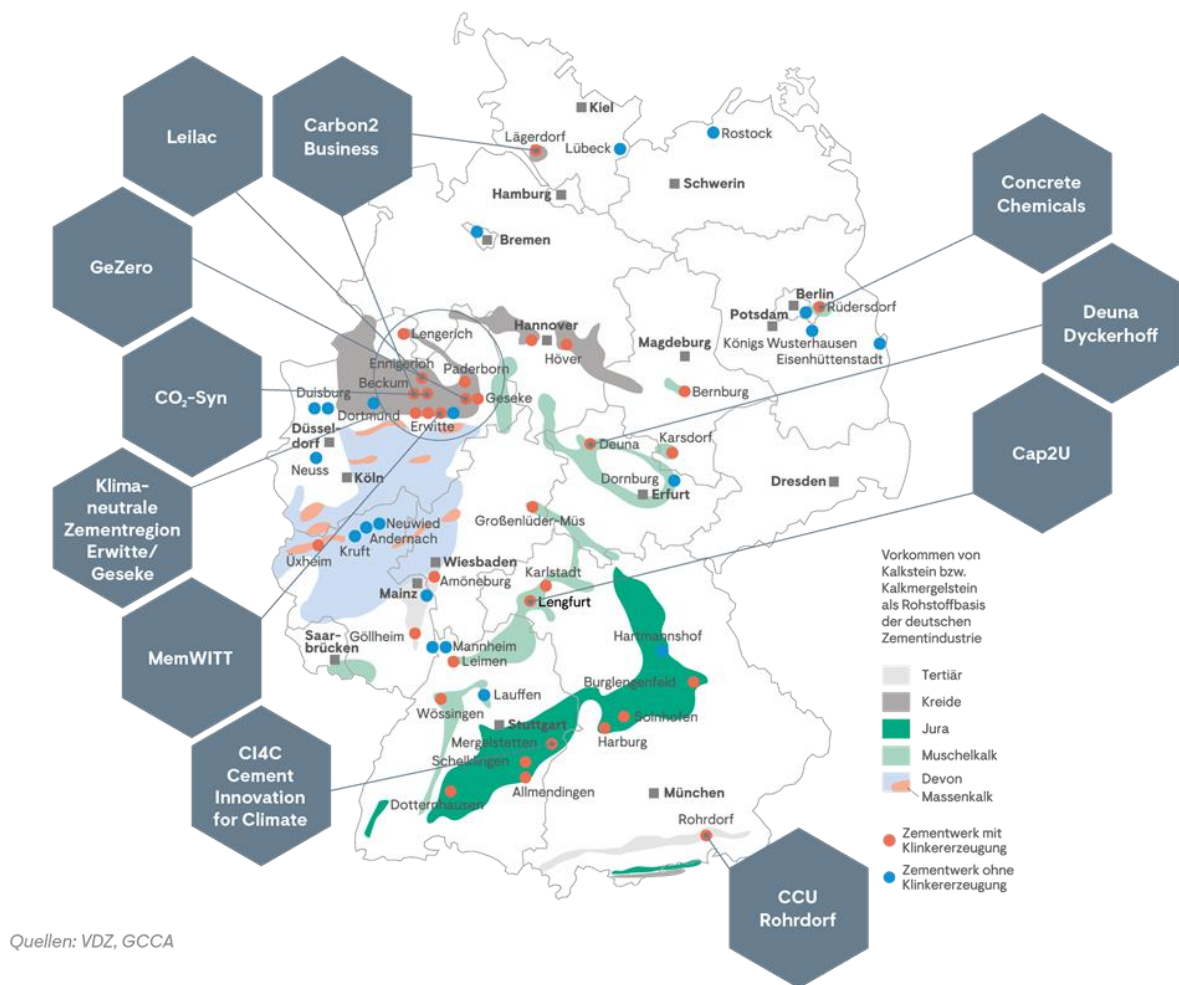


Abb. 10: CO₂-Abscheidung in der Zementindustrie – Projektbeispiele in Deutschland – Grafik aus [16]

8 Klinkereffiziente Zemente in verschiedenen Anwendungen

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

Anteil Klinker in %	Transportbeton	Betonwaren	Spezialtiefbau	Estrich (Sackware) Industriebetonböden	Konstruktive Fertigteile	Betonfahrbahndecken	Bahnschwellen					
												
95-100	Anwendung nach Expositionsklassen:	CEM I	Grünstandfestigkeit	CEM I	Trocknungsverhalten	CEM I	Schnelle Festigkeitsentwicklung	CEM I	Frost-Tausalz-Widerstand	CEM I	Schnelle Festigkeitsentwicklung	CEM I
80-94	XS/XD2-3, XF2-XF4	CEM II/A	Frost-Tausalz-Widerstand	CEM II/A	Leichte Mischbarkeit Zement und Wasser zu Suspensionen	CEM II/A	...	CEM II/A	AKR Widerstand	CEM II/A	AKR Widerstand	CEM II/A
65-79	XC3, XC4/XF1, XS/D1	CEM II/B	...	CEM II/B	Geringes Schwindverhalten und geringe Sedimentationsneigung	CEM II/B	...	CEM II/B	...	CEM II/B	...	CEM II/B
50-64	Druckfestigkeit = Dauerhaftigkeit	CEM III/A CEM II/C	...	CEM III/A CEM II/C	Gute Fließ- und Pumpfähigkeit	CEM II/C	...	CEM III/A CEM II/C	...	CEM III/A CEM II/C	...	CEM III/A CEM II/C
35-64	XC1 (trocken)	CEM III/A CEM V	...	CEM III/A CEM V	...	...	...	...	...	...	...	...
20-34	Mechanische Eigenschaften (Druckfestigkeit)	CEM III/B/ CEM X	...	CEM III/B/ CEM X	...	...	...	...	...	...	...	...

* Zementarten sind generische Beispiele. Bezüglich der unterschiedlichen Zementzusammensetzungen (Hüttensand, Flugasche, ungebrannter Kalkstein, kalzinierte Tone, rezyklierte Feinanteile etc.) kann sich ein differenzierteres Bild ergeben.

Abb. 11: Klinkereffiziente Zemente in verschiedenen Anwendungen [20]

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

„Wir setzen bereits jetzt ressourcenschonenden R-Beton mit Recycling-Gesteinskörnung sowie CO₂-mindernden Zement der Sorte CEM III bei der Produktion von Betonfertigteilen ein. Gleichzeitig arbeiten wir an Lösungen, um den Anteil an recyceltem Material noch weiter zu erhöhen sowie um unsere Fertigteile vollständig in die Kreislaufwirtschaft zurückzuführen.“ (Quelle: <https://www.brueeninghoff.de/fokus-zukunft/nachhaltigkeit/>)

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

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

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

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

9 Literatur

- [1] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. (2020) Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf
- [2] CEM II- und CEM III/A-Zemente im Betonbau (2008) Nachhaltige Lösungen für das Bauen mit Beton – zu beziehen über www.beton.org
- [3] Müller, C., Palm, S., Hermerschmidt, W. (2019) Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit CEM II/B-LL und CEM II/C-M (S-LL) – Zementen. Zeitschrift beton 10/2019, pp. 362-371
- [4] fib (Hrsg.) (2013) fib Model Code for Concrete Structures 2010. Ernst & Sohn
- [5] Deutsches Institut für Normung (DIN) (2011) DIN EN 1992-1-1: Eurocode 2 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontagwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010. Ausgabedatum: 2011-01
- [6] Vollpracht, A., Soutsos, M., Kanavaris, F. (2018) Strength development of GGBS and fly ash concretes and applicability of fib model code's maturity function – A critical review. Construction and Building Materials 162 (2018), pp. 830-846
- [7] Klemczak, B., Batog, M., Pilch, M. (2016) Assessment of concrete strength development models with regard to concretes with low clinker cements. Archives of Civil and Mechanical Engineering 16 (2016), pp. 235-2
- [8] Soutsos, M., Vollpracht, A., Kanavaris, F. (2020) Applicability of fib model code's maturity function for estimating the strength development of GGBS concretes. Construction and Building Materials 264 (2020), 120157
- [9] Palm, S., Müller, C., Proske, T., Rezvani, M., Graubner, C. A. (2019) Concrete application of clinker-efficient cements. Advances in Cement Research, Volume 31 Issue 5, 2019, pp. 225-234
- [10] Proske, T., Rezvani, M., Palm, S., Müller, C., Graubner, C. A. (2018) Concretes made of efficient multi-composite cements with slag and limestone. Cement and Concrete Composites 2018, 89, S. 107-119
- [11] Hermerschmidt, W. (2016) Modelle zur Beschreibung der thermomechanischen Materialeigenschaften jungen Betons. Dissertation, Technische Universität Braunschweig
- [12] Müller, C., Hermerschmidt, W. (2020) Dekarbonisierung: Weniger CO₂ -mehr Nachbehandlung? – 16. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 19. März 2020
- [13] Soutsos, M., Vollpracht, A., Kanavaris, F. (2020) Applicability of fib model code's maturity function for estimating the strength development of GGBS concretes. Construction and Building Materials 264 (2020), 120157
- [14] Tydlitát, V., Matas, T., Cerný, R. (2014) Effect of w/c and temperature on the early-stage hydration heat development in Portland-limestone cement. Construction and Building Materials 50 (2014), pp. 140-147
- [15] Sach, T. et al. (2024) Leitmärkte für klimafreundliche Grundstoffe. Hrsg.: Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK). Mai 2024. Berlin
- [16] Mohr, M., Müller, C. (2024) Dekarbonisierung von Zement und Beton – Wo stehen wir heute und wo müssen wir hin?. betonprisma 117/2024
- [17] Heckmann, M., Glock, C. (2023) Life Cycle Assessment in the Building Sector – Greenhouse Gas Emissions of Common Ceiling Systems. Beton- und Stahlbetonbau 118 (2023), Heft 2
- [18] DAfStb-Richtlinie - Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton (2024) (THG-Richtlinie). August 2024

- [19] Mohr, M. (2024) Anforderungen an eine CO₂ -Infrastruktur in Deutschland – Interview im DBV-Rundschreiben 281. September 2024
- [20] Müller, C. (2023) Use of CO₂ - reduced cements in building practice: Einsatz CO₂ - reduzierter Zemente in der Baupraxis. BFT International 2023, 89(6), p. 74
- [21] Fiebig, N, Severins, K. (2024) R-ZiEMENT – Ziegelhaltige Recyclingbaustoffe für ressourceneffiziente Zemente. TB iNFO 96. September 2024

10 Autor

Prof. Dr.-Ing. Christoph Müller

VDZ Technology gGmbH

Toulouser Allee 71

40476 Düsseldorf

christoph.mueller@vdz-online.de

Ökologische Bewertung: Von der EPD bis zum CO₂-Label

Jochen Reiners, Christoph Müller, Manuel Mohr

Zusammenfassung

Seit der Einführung der Norm DIN EN 15804 [1] im Jahr 2012 stellen Bauproduktehersteller Planern Ökobilanzen ihrer Bauprodukte in Form von unabhängig verifizierten Umweltproduktdeklarationen (EPDs) zur Verfügung. EPDs weisen die Umweltwirkungen des jeweiligen Produktes objektiv aus, ordnen diese aber nicht im Vergleich zu anderen am Markt verfügbaren Produkten ein. Um Kunden die gezielte Nachfrage nach "CO₂-armen" Zementen und Betonen zur ermöglichen, sind zuletzt im Rahmen mehrerer Initiativen Systeme entstanden, bei denen die Baustoffe anhand ihres Treibhauspotenzials in CO₂-Klassen eingeteilt werden. Der Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) führt aktuell ein freiwilliges CO₂-Label für Zement ein. Damit können Zemente zukünftig in einer „Cement Carbon Class“ (CCC) eingestuft werden.

Schlagwörter: Ökologische Bewertung, Treibhauspotenzial, Label

Abstract

Since the publication of the standard DIN EN 15804 in 2012, manufacturers of construction products have been providing planners with life cycle assessments of their construction products in the form of independently verified environmental product declarations (EPDs). EPDs objectively demonstrate the environmental impacts of the respective product, but do not classify them in comparison to other products available on the market. In order to enable customers to specifically request 'low CO₂' cements and concretes, systems have recently been developed as part of several initiatives in which the building materials are divided into CO₂ classes based on their global warming potential. The German Cement Association (VDZ) is currently introducing a voluntary CO₂ label for cement. This means that cements can be categorised in a 'Cement Carbon Class' (CCC) in the future.

Keywords: Environmental Assessment, Global Warming Potential, Label

1 Umweltproduktdeklarationen (EPDs)

Eine EPD (von engl. Environmental Product Declaration) ist ein Dokument, in dem die umweltrelevanten Eigenschaften eines bestimmten Produktes in Form von einheitlich festgelegten Daten abgebildet werden. Im Bauwesen bilden EPDs für Architekten und Planer eine wesentliche Grundlage dafür, Gebäude ganzheitlich planen und bewerten zu können.

Kerninhalt einer EPD ist die Ökobilanz. Eine Ökobilanz analysiert die Umweltwirkungen eines Produktes über seinen Lebensweg von der Rohstoffgewinnung bis zum einbaufertigen Produkt. Inzwischen sind für die meisten Produkte auch weitere Phasen des Lebenszyklus zu berücksichtigen, wie Abriss, Aufbereitung und Wiederverwendung oder die Entsorgung. Auch Angaben zur Nutzungsphase werden vermehrt bilanziert.

Die Einführung der Norm DIN EN 15804 „Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte“ [1] im Jahr 2012 stellte einen entscheidenden Schritt für die Vereinheitlichung der Erstellung von Ökobilanzen und EPDs dar. Sie soll sicherstellen, dass alle EPDs für Bauprodukte, Bauleistungen und Bauprozesse in einheitlicher Weise abgeleitet, verifiziert und dargestellt werden. Die Norm legt die grundlegenden Produktkategorieregeln (en: Product Category Rules, PCR) für Bauprodukte fest. Für EPDs ist durch DIN EN 15804 eine Prüfung und Freigabe durch einen unabhängigen Experten (Verifizierer) vorgeschrieben.

Produktspezifische Produktkategorieregeln können die Anforderungen der DIN EN 15804 für bestimmte Produktkategorien interpretieren und konkretisieren. Diese werden häufig in Normen veröffentlicht, die DIN EN 15804 ergänzen; wie z. B. die DIN EN 16908 [2] für Zement und die DIN EN 16757 [3] für Beton.

In den ersten Jahren nach der Veröffentlichung der DIN EN 15804 wurden vor allem generische EPDs für "typische" oder "durchschnittliche" Bauprodukte veröffentlicht, die häufig von Baustoffverbänden erstellt wurden. Inzwischen stellen Baustoffhersteller ihren Kunden oder Planern vermehrt spezifische EPDs für ihre Produkte zur Verfügung.

2 Novellierung der Bauproduktenverordnung

Mit der Bauproduktenverordnung werden harmonisierte Regeln für das Inverkehrbringen und die Bereitstellung von Bauprodukten auf dem Markt festgelegt. Eine überarbeitete Bauprodukteverordnung (BPV) ist am 18. Dezember 2024 als "Verordnung (EU) 2024/3110 zur Festlegung harmonisierter Vorschriften für die Vermarktung von Bauprodukten" im Amtsblatt der EU veröffentlicht worden und am 7. Januar 2025 in Kraft getreten [4].

Als wichtige Änderung gegenüber der bisherigen Fassung ist zu nennen, dass die Leistungs- und Konformitätserklärung die Umweltleistung des Produkts während seines gesamten Lebenszyklus in Bezug auf die vorab festgelegten wesentlichen Umweltmerkmale (Anhang II der Verordnung) umfasst. Diese Umweltmerkmale und die Methoden zu ihrer Berechnung entsprechen denen der Norm DIN EN 15804, also denen, die in aktuellen EPDs ausgewiesen werden [5]. Auch wenn die Zukunft von EPDs als eigenständiges Dokument derzeit unklar ist, so wird die Ermittlung der dort deklarierten Umweltmerkmale durch die BPV in Zukunft an Bedeutung gewinnen. Das Ausweisen der wesentlichen Umweltmerkmale in der Leistungs- und Konformitätserklärung erfolgt zeitlich gestaffelt ab dem 8. Januar 2026 bis zum 9. Januar 2032 (Artikel 15 der Verordnung).

Die neuen Regeln werden erst dann für eine Produktgruppe relevant, wenn auch eine neue harmonisierte Produktnorm eingeführt wird. Es ist derzeit davon auszugehen, dass von der EU-Kommission noch im Jahr 2025 ein entsprechender Normungsauftrag für die Erarbeitung einer überarbeiteten Produktnorm für Zement

erteilt wird. Optimistisch abgeschätzt wird die neue Zementnorm DIN EN 197-1 frühestens ein Jahr nach dem Normungsauftrag vorliegen können.

3 CO₂-Modul des Concrete Sustainability Council (CSC)

Seit dem Jahr 2017 können sich Unternehmen der Transportbeton- und Betonfertigteilindustrie durch das Concrete Sustainability Council (CSC) bestätigen lassen, dass sie nachhaltig wirtschaften. Die Zertifizierung erfolgt anhand von 24 Kriterien aus den vier Kategorien: Ökonomie, Ökologie, dem sozialen Aspekt der Nachhaltigkeit sowie der Kategorie Management und umfasst sowohl das Betonunternehmen bzw. -werk als auch dessen Lieferkette. Das System bietet vier Stufen von Zertifikaten an: Bronze, Silber, Gold und Platin. Das Concrete Sustainability Council (CSC) ist dabei der globale Systembetreiber und pflegt und entwickelt das internationale Zertifizierungssystem. Regionaler CSC-Systembetreiber für Deutschland ist der Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e. V. (BTB) [6]. Aktuell (Januar 2025) liegen in Deutschland über 800 Zertifikate aus den Bereichen Beton, Zement und Gesteinskörnung vor.

Im Jahr 2022 wurde im CSC das "CO₂-Modul" eingeführt. Das CO₂-Modul ist ein freiwilliges, ergänzendes Zusatzmodul zum CSC-Betonzertifikat. Ziel des CO₂-Moduls ist es, Transparenz hinsichtlich der mit der Betonherstellung verbundenen Emissionen an Treibhausgasen (THG) zu schaffen. CO₂-optimierte Betone werden dabei in vier Klassen eingeteilt – mit einer Minderung der THG-Emissionen [kg CO₂-Äquivalente je m³ Beton] um 30, 40, 50 und 60 % gegenüber einem regionalen Referenzwert. Das CSC CO₂-Modul kann entsprechend mit einem bis vier "Sternen" (Level 1 bis Level 4) erworben werden. Die Labelfarben des CSC CO₂-Moduls entsprechen der Zertifizierungsstufe des CSC-Hauptzertifikats, welches das Betonwerk besitzt, das den CO₂-armen Beton herstellt. Tabelle 1 zeigt die entsprechenden GWP-Referenzwerte für Deutschland. Der Branchenwert wurde anhand üblicher Betonzusammensetzungen in Deutschland unter der Annahme der Verwendung von Portlandzement (CEM I) ermittelt. Die in der Tabelle 1 angegebenen Werte sind Nettowerte (ohne Emissionen aus Abfallverbrennung bei der Klinkerherstellung). Anteilige Treibhauspotenziale, die aus der Produktion von Hüttensand und Flugasche resultieren, sind in den Werten enthalten.

Tab. 1: CO₂-Klassen für Betone in Deutschland gem. CSC [7]

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

4 GWP-Klasseneinteilung von Zementen

Um Anreize für eine emissionsarme und perspektivisch nahezu emissionsfreie Produktion von Zement zu schaffen, wurde von der International Energy Agency (IEA) ein System zur Bewertung von Zementen in GWP-Klassen entwickelt [8] (Abb. 1). Je nach Treibhauspotenzial der Herstellung einer Tonne Zement kann der Zement in eine "Low emission"-Klasse (A-E) oder in die Klasse "Near zero emission" eingeordnet werden. Die Berechnung des Treibhauspotenzials erfolgt hier als "Bruttowert" (inklusive Emissionen aus der Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung), aber ohne Berücksichtigung eines Treibhauspotenzials für Nebenprodukte anderer Industrien wie Hüttensand oder Flugasche.

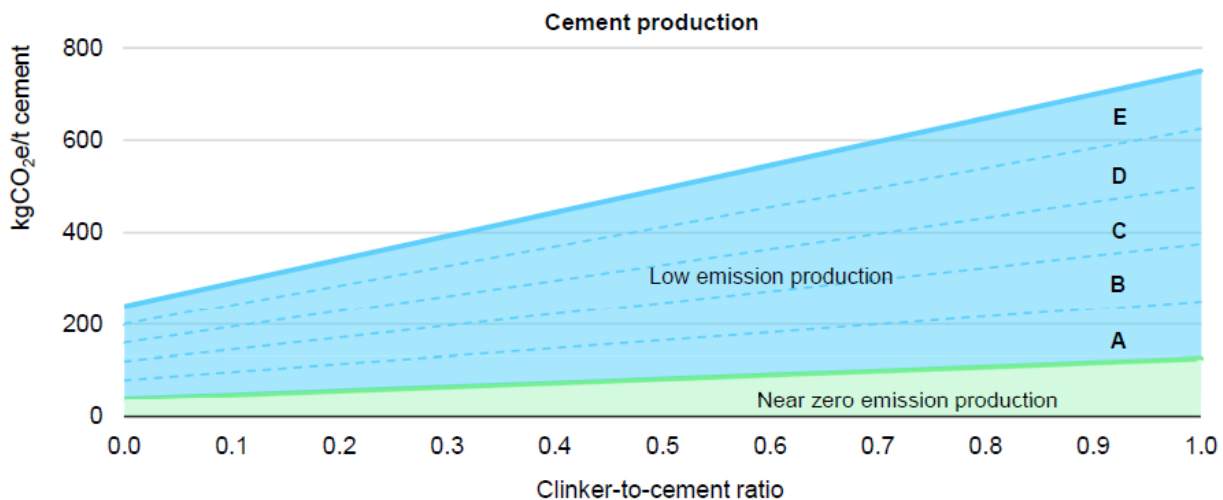


Abb. 1: "Low emission" und "Near zero emission" – Klassen gemäß IEA

Mit sinkendem Klinker-Zement-Faktor wird es nach Abb. 1 entsprechend anspruchsvoller, in eine bestimmte "Low emission"-Klasse oder in die Klasse "Near zero emission production" eingeordnet zu werden. Der Klinker-Zement-Faktor ist eine entscheidende Stellschraube für die Dekarbonisierung der Zement- und Betonindustrie. Er wird durch die Verfügbarkeit der Klinkerersatzstoffe und weitere Randbedingungen – wie zum Beispiel die Anwendungsregelungen – beeinflusst. Der Klinker-Zement-Faktor ist daher die Eingangsgröße auf regionaler Ebene.

Das Konzept der IEA wurde im Stakeholderprozess „Leitmärkte für klimafreundliche Grundstoffe“ des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) für die Umsetzung in Deutschland weiter spezifiziert. Ziel des Konzepts ist es, einen Impuls für die Schaffung von Leitmärkten für klimafreundliche Grundstoffe wie Stahl, Zement und Chemie zu geben [9]. Es soll die Grundlagen für die Einführung von Maßnahmen bieten, die die Wettbewerbsfähigkeit klimafreundlicher Grundstoffe stärken. Die Zementindustrie wurde im Stakeholderprozess durch den VDZ vertreten. Basierend auf den IEA-Klassen in Abb. 1 wurde der durchschnittliche deutsche Klinker-Zement-Faktor von 0,7 "fixiert", um die Klassen zu bilden. Dies führt zu der in Abb. 2 dargestellten Klasseneinteilung. Dabei gilt für die Berechnung des GWP die "EPD-Methodik" nach DIN EN 15804, d. h. ausgewiesen werden Nettoemissionen sowie anteilig das GWP aus der Herstellung von Nebenprodukten anderer Industrien (Hüttensand und Flugasche). Die Klasse "E" entfällt, da sich darauf verständigt wurde, Zemente mit einem GWP von größer als 500 kg CO₂-Äq./t nicht als emissionsarm zu bezeichnen. Dieser Kompromiss berücksichtigt die Unterschiede in der Methodik.

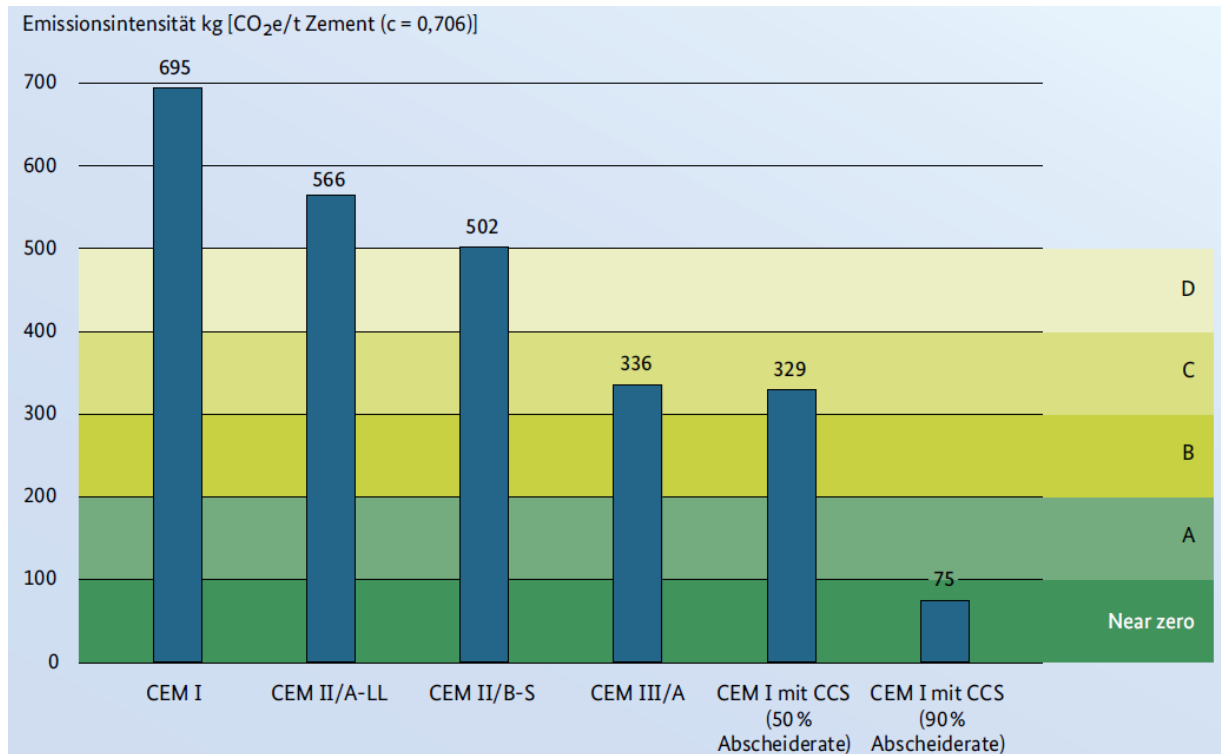


Abb. 2: Vorgeschlagene Emissionsschwellenwerte (in CO₂-Äq./t; farbliche Schattierung) im Vergleich zu aktuellen und zukünftigen Zementsorten sowie Technologien [9]

Ebenfalls aufbauend auf dem IEA-Dokument hat die Global Cement and Concrete Association (GCCA) in Zusammenarbeit mit der Clean Energy Ministerial Industrial Deep Decarbonisation Initiative (IDDI) einen Vorschlag für eine globale Definition von "Low Carbon" und "Near Zero Emissions"-Klassen für Betone in Abhängigkeit von ihrer Druckfestigkeit veröffentlicht [10].

5 CO₂-Label für Zement

5.1 Einführung eines CO₂-Labels für Zement

Aufbauend auf den Ergebnissen des Stakeholderprozesses „Leitmärkte für klimafreundliche Grundstoffe“ führt der Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) aktuell ein privatwirtschaftlich initiiertes freiwilliges CO₂-Label für Zement ein. Zemente können zukünftig in Abhängigkeit von den Treibhausgasemissionen (GWP) jeweils in einer „Cement Carbon Class“ (CCC) eingestuft werden. Die CO₂-Klassen leiten sich aus den im Konzept „Leitmärkte für klimafreundliche Grundstoffe“ definierten Schwellenwerten ab.

Tab. 2: CO₂-Klassen für Betone in Deutschland gem. CSC [7]

Klasse		Anforderungen (THG) CO ₂ -Äq./Tonne Zement
emissionsreduziert	D	400 ≤ THG < 500
	C	300 ≤ THG < 400
	B	200 ≤ THG < 300
	A	100 ≤ THG < 200
klimafreundlich	NZ	< 100

Konkret werden Zertifizierungen für „emissionsreduzierte“ Zemente mit Emissionen zwischen 100 und 500 kg CO₂ Äq./t Zement in den Klassen A bis D und für Zemente mit CO₂-Emissionen < 100 kg/t Zement in der CO₂-Klasse „Near Zero“ vergeben. Die Einstufung und die entsprechende Zertifizierung werden von der CCC-Zertifizierungsstelle des VDZ jährlich vorgenommen und basieren auf Ökobilanzdaten des Vorjahres (Durchschnittswerte). Relevant sind jeweils die Nettowerte, d. h. ohne Verbrennung von Abfällen bei der Klinkerherstellung und inklusive Allokation, z. B. bei Hüttensand.

Nach Einstufung eines Zements in eine der Klassen NZ bis D und entsprechender Zertifizierung hat der Hersteller das Recht, für den Zement das erteilte CCC-Label beispielsweise auf Säcken und Lieferscheinen oder in Produktinformationen zu verwenden. Abb. 3 zeigt die verschiedenen Label.

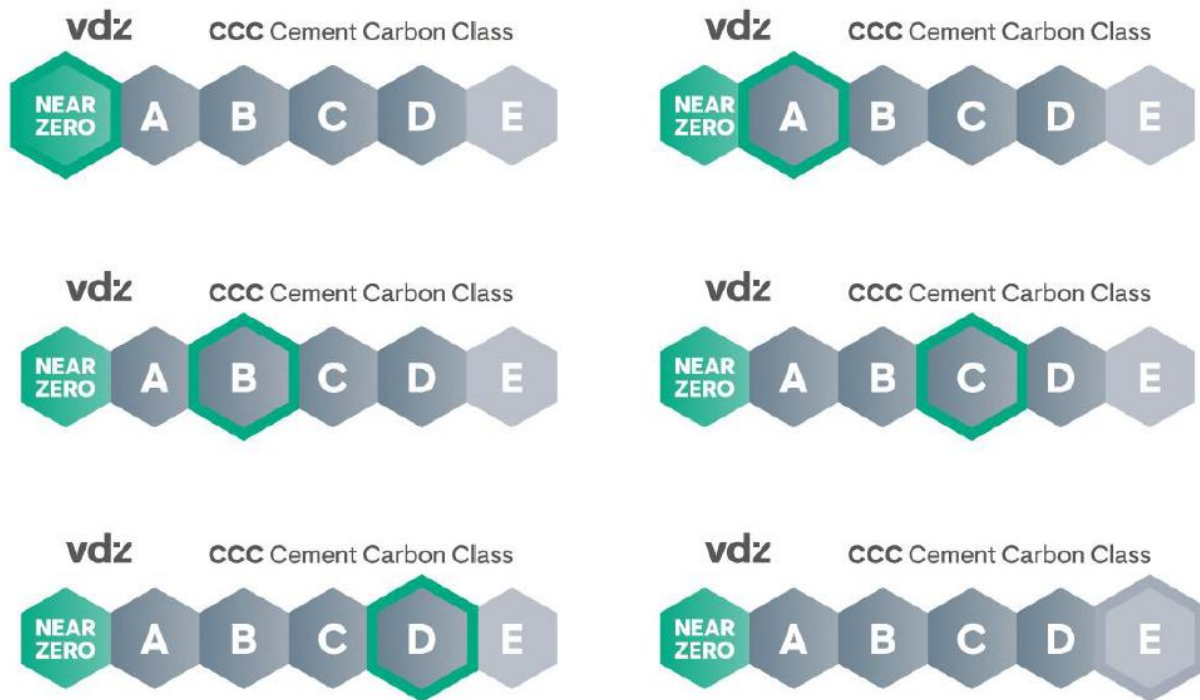


Abb. 3: Label für die verschiedenen Cement Carbon Classes

Das Konzept zur Labelvergabe ist in den folgenden Abschnitten beschrieben.

5.2 Antragsverfahren

Zementhersteller können für ihre Produkte bei der Zertifizierungsstelle des VDZ die Vergabe eines CCC-Labels beantragen. Hierfür ist das von der PÜZ-Stelle zur Verfügung gestellte Formular zu verwenden. Ein Antrag bezieht sich immer auf ein bestimmtes Produkt, das an einem bestimmten Standort hergestellt wird. Die Zertifizierung erfolgt jährlich auf der Basis von Daten des Vorjahres. Für die Ökobilanzierung sind Durchschnittswerte des jeweiligen Jahres zugrunde zu legen.

Mit dem Antrag sind vom Hersteller folgende Unterlagen/Informationen einzureichen:

- Eine gültige Umweltproduktdeklaration (EPD) für den betreffenden Zement bzw. alternativ die Vorlage einer Selbstdeklaration, die mit einem von einem EPD-Programmbetreiber zugelassenen EPD-Tool 1 erstellt wurde.
- Bei Nachweis der normgerechten Ökobilanzierung über eine gültige EPD: der Hintergrundbericht nach DIN EN 15804 und DIN EN 16908 für diese EPD.

- Bei Nachweis der normgerechten Ökobilanzierung über ein EPD-Tool: der entsprechende Hintergrundbericht aus dem Tool.
- Angaben zur Zusammensetzung des Zements und zum Verfahren der Berechnung des Jahresmittelwerts.
- Verifizierter Emissionsbericht mit Informationen über die CO₂-Intensität des verwendeten Klinkers im Vorjahr.
- Angaben zum elektrischen Energiebedarf der Klinkerherstellung („bis zum Klinkersilo“) und der Herstellung des Zements („ab Klinkersilo bis zum Versand“).

5.3 Prüfung der Informationen durch die CCC-Zertifizierungsstelle

Für die Vergabe des CCC-Labels prüft die Zertifizierungsstelle die Plausibilität der GWP-Werte aus der EPD bzw. aus dem EPD-Tool anhand der vom Hersteller bereitgestellten Informationen. Hierzu werden die wesentlichen Einflussfaktoren betrachtet.

Maßgebend für die Einstufung in CO₂-Klassen ist das über eine Ökobilanzierung nach DIN EN 15804 [1] und DIN EN 16908 [2] ermittelte Treibhauspotenzial der Zementherstellung (Lebenszyklusmodule A1-A3) in kg CO₂-Äq./t Zement als Nettowert.

Konkret wird für die Zertifizierung geprüft, ob die folgenden umweltrelevanten Produktionsdaten denen des vorgelegten Hintergrundberichts entsprechen:

- die Zementzusammensetzung,
- die CO₂-Intensität des Klinkers,
- der elektrische Energiebedarf für die Klinkerproduktion und für die Zementmahlung sowie
- die Wahl eines plausiblen Allokationsfaktors für die ökonomische Allokation (bei Verwendung von Hüttensand oder Flugasche).

Neben der Prüfung der EPD-Daten wird geprüft, ob es bei den Ökobilanzdaten des Vorjahres gegenüber den Parametern, die der verifizierten EPD (bzw. der ursprünglich ausgestellten Selbstdeklaration) zugrunde lagen, zu Veränderungen gekommen ist. Das Ergebnis dieser Prüfung wird bei der Klasseneinteilung berücksichtigt.

Die Regeln hierfür sind unter: <https://www.vdz-online.de/leistungen/zertifizierung/co2-label-fuer-zement-ccc-zertifizierung> veröffentlicht.

5.4 Zertifikatserteilung

Die Zertifizierungsstelle erteilt ein CCC-Zertifikat, das die Einstufung des Zements in eine Klasse angibt. Das Zertifikat ist grundsätzlich bis zum 31. Juli des folgenden Jahres befristet. Für die Ausstellung des Zertifikats und die damit verbundenen Tätigkeiten erhebt die Zertifizierungsstelle Gebühren.

Falls sich Bewertungsverfahren/-regeln oder die Herstellbedingungen für den Zement so ändern, dass eine Verschlechterung gegenüber der vorgenommenen Einstufung festgestellt wird, kann die Zertifizierungsstelle das Zertifikat auch vor Ablauf der Gültigkeit ungültig machen.

5.5 Jährliche Überprüfung

Falls der Hersteller die erneute Ausstellung eines CCC-Zertifikats wünscht, stellt er der Zertifizierungsstelle die erforderlichen aktuellen Informationen und ggf. eine neue EPD bzw. GWP-Werte aus einem verifizierten EPD-Tool zur Verfügung.

Die Zertifizierungsstelle prüft die eingereichten Unterlagen und stellt auf der Basis der Ergebnisse ggf. ein neues CCC-Zertifikat aus.

5.6 Verwendung des CCC-Labels

Ein gültiges CCC-Zertifikat berechtigt den Hersteller zur Verwendung des CCC-Labels beispielsweise auf Säcken und Lieferdokumenten sowie in Produktinformationen. Der Hersteller darf für einen Zement ausschließlich das CCC-Label gemäß der auf dem entsprechenden Zertifikat angegebenen CO₂-Klasse verwenden.

6 Literatur

- [1] Deutsches Institut für Normung (DIN) (2022) DIN EN 15804 - Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte; Deutsche Fassung EN 15804:2012+A2:2019 + AC:2021. Beuth Verlag, Berlin
- [2] Deutsches Institut für Normung (DIN) (2022) DIN EN 16908 Zement und Baukalk – Umweltproduktdeklarationen – Produktkategorieregeln in Ergänzung zu EN 15804; Deutsche Fassung EN 16908:2017+A1:2022. Beuth Verlag, Berlin
- [3] Deutsches Institut für Normung (DIN) (2023) DIN EN 16757 - Nachhaltigkeit von Bauwerken – Umweltproduktdeklarationen – Produktkategorieregeln für Beton und Betonelemente; Deutsche Fassung EN 16757:2022. Beuth Verlag, Berlin
- [4] Europäisches Parlament und Rat (2024) Verordnung (EU) 2024/3110 zur Festlegung harmonisierter Vorschriften für die Vermarktung von Bauprodukten. Am 18.12.2024 im EU-Amtsblatt veröffentlicht
- [5] CPR Acquis process (2023) Sub-group on Environmental Sustainability – Milestone A: Essential characteristics and environmental indicators, Task 1: Life cycle assessment indicators. Dokument verteilt an die Sub-group on Environmental Sustainability und die Steering group am 06 Februar 2023
- [6] Bundesverband Transportbeton – Concrete Sustainability Council (2024) Technisches Handbuch. Stand 05.07.2024
- [7] Bundesverband Transportbeton – Concrete Sustainability Council (2022) Technisches Handbuch CO₂-Modul. Stand 10.1.2022
- [8] International Energy Agency (IEA) (2022) Achieving Net Zero Heavy Industry Sectors in G7 Members. IEA 2022
- [9] Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) (2024) Leitmärkte für klimafreundliche Grundstoffe – Konzept des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK), Mai 2024
- [10] Global Cement and Concrete Association (GCCA) (2024) Numerical Definitions for Low Carbon and Near Zero Emissions Concrete. [GCCA LowCarbon2 Policy Document Digital.pdf](#)

7 Autoren

Dr.-Ing. Jochen Reiners

VDZ Technology gGmbH
Toulouser Allee 71
40476 Düsseldorf
jochen.reiners@vdz-online.de

Prof. Dr.-Ing. Christoph Müller

VDZ Technology gGmbH
Toulouser Allee 71
40476 Düsseldorf
christoph.mueller@vdz-online.de

Manuel Mohr, M.A.

Verein Deutscher Zementwerke e. V.
Kochstraße 6-7
10969 Berlin
manuel.mohr@vdz-online.de

Grundlagen des 3D-Drucks im Betonbau: Empfehlungen für die Praxis

Agemar Manny und Frank Dehn

Zusammenfassung

Mehrere Unternehmen konnten bereits erste Projekte mit additiven Fertigungsverfahren zur Herstellung von tragenden Wandscheiben im Wohnungsbau realisieren. Hierbei wurden entweder Schalungen aus Beton oder Mörtel gedruckt, anschließend Ortbeton in diese eingefüllt und dadurch zusammengesetzte Querschnitte hergestellt oder massive Wandquerschnitte mit voller Dicke des Querschnitts schichtweise in mehreren Arbeitsschritten gedruckt. In diesem Beitrag werden Ausführungsarten von Wandquerschnitten vorgestellt, die in der Praxis bereits angewendet wurden. Außerdem wird erläutert, welche Prüfungen an frischem und festem Beton oder Mörtel durchgeführt werden müssen, um diese neuartigen und regelungsbedürftigen Lösungen für die Herstellung tragender Wände ver- und anwenden zu können. Anschließend wird das Tragverhalten ausgewählter 3D-gedruckter Wände bzw. Wandquerschnitte erläutert. In den abschließenden Empfehlungen für planende und ausführende Unternehmen werden erste Erfahrungen hinsichtlich der Bewertung von Abweichungen in Bezug auf die derzeit gültigen Regelwerke aufgezeigt. Hierdurch soll eine breitere und raschere Anwendung von 3D-gedrucktem Beton bzw. Mörtel ermöglicht werden.

Schlagwörter: 3D-Druck, Beton, Mörtel, Wand, Tragverhalten, Bemessungsvorschlag

Abstract

Various companies have already realised their first projects with additive manufacturing technologies for the production of load-bearing walls in residential construction. In these projects, either the formwork was printed with concrete or mortar, then in-situ concrete was poured into them and thereby a composite cross-section was produced or solid walls with full cross-sectional height were printed layer by layer in several steps. This article presents different types of wall cross-sections that have already been used in practice. In addition, it is described which tests must be carried out on fresh and hardened concrete or mortar in order to be able to utilise and apply these innovative solutions, which require regulation, for the production of load-bearing walls. The load-bearing behaviour of selected 3D-printed walls respectively wall cross-sections is then explained. In the concluding recommendations for planning and construction companies, first experiences regarding the assessment of non-conformities in relation to the currently valid regulations are presented. The aim of these recommendations is to facilitate a broader and more rapid application of 3D-printed concrete and mortar.

Keywords: 3D printing, concrete, mortar, wall, load-bearing behaviour, design concept

1 Einleitung

Wandscheiben im Wohnungsbau werden derzeit überwiegend in Mauerwerksbauweise errichtet [1, 2], wobei die Herstellung von Mauerwerk eine arbeitsintensive Baumethode darstellt. Im vergangenen Jahrzehnt wurden automatisierte Fertigungsverfahren entwickelt, die in einem additiven Prozess die Herstellung unbewehrter und bewehrter Bauteile aus Beton oder Mörtel ermöglichen [3, 4]. Durch die Automatisierung ist einerseits eine Verringerung der physischen Belastung des Personals bei der Ausführung und andererseits eine Verbesserung des Bauprozesses mit einer Integration digitaler Modelle möglich. Für die automatisierte Fertigung tragender Wandscheiben besteht daher ein hohes Marktpotenzial [1].

Die Entwicklung neuer Technologien bringt meist nicht nur Vorteile mit sich. Bei einem Abweichen von bestehenden Regelwerken müssen zunächst Anforderungen und Grenzen für die Verwendung und die Anwendung neuartiger Bauprodukte und Bauarten festgelegt werden. Die größte Hürde für die rasche Markteinführung von mit einem 3D-Druck-Verfahren hergestellten unbewehrten, tragenden Bauteilen und Bauwerken aus Beton oder Mörtel ist das Fehlen von Regelwerken für die Ausführung und Bemessung [3]; dies beinhaltet auch Anforderungen an die Zusammensetzung und die Eigenschaften des frischen und festen Materials für die Errichtung standsicherer, gebrauchstauglicher und dauerhafter Tragwerke.

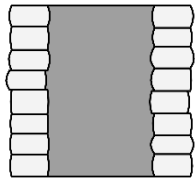
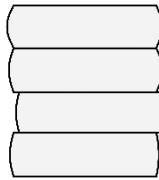
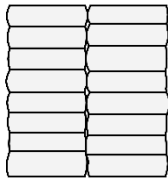
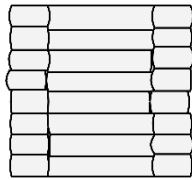
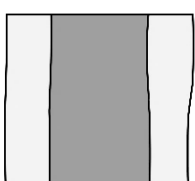
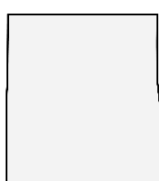
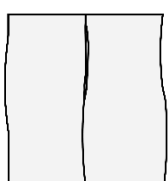
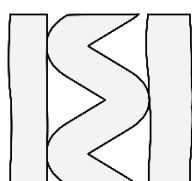
Mit den bestehenden Fertigungsverfahren können verschiedenartige Bauteile hergestellt werden. In den letzten Jahren wurden bei einzelnen Pilotprojekten in Deutschland tragende und nichttragende Bauteile, überwiegend Wände, aus 3D-gedrucktem Beton oder Mörtel hergestellt (z. B. [5–7]). Die Unterschiede in den Herstellungsverfahren führen zu unterschiedlichen Anforderungen und Nachweisen an den Beton oder Mörtel und die damit hergestellten Bauteile. Grundsätzlich sind für Bauprodukte Verwendbarkeitsnachweise und für Bauarten Anwendbarkeitsnachweise zu erbringen. In diesem Beitrag werden lediglich unbewehrte, tragende Wände betrachtet.

2 Ausführungsarten 3D-gedruckter Bauteile

Bei der additiven Fertigung kann zwischen unterschiedlichen Fertigungsverfahren (z. B. Extrusion, Partikelbett-Binden, Spritzen) und dem Ort der Herstellung der Bauteile (In-situ, Ex-situ) differenziert werden [3]. Im Folgenden wird lediglich die Extrusion, d. h. die Materialablage unter Druck durch eine formgebende Öffnung, mit einer In-situ-Herstellung der Betonbauteile näher betrachtet. Der Fokus liegt auf den Unterschieden auf der Bauteilebene sowie auf den am Markt verfügbaren Druckverfahren.

Bei allen derzeit in Deutschland ausgeführten, öffentlich bekannten 3D-Druck-Pilotprojekten wurden tragende oder nichttragende Wandquerschnitte oder Schalungen, in die anschließend Ortbeton eingefüllt wurde, mittels Extrusion vor Ort hergestellt. Tabelle 1 zeigt eine Übersicht verschiedener Quer- und Längsschnitte von Wänden, bei denen mindestens ein Teil davon mit einem 3D-Druck-Verfahren hergestellt wird.

Tab. 1: Übersicht und beispielhafte Ausschnitte verschiedener Ausführungsarten

Art	A	B	C	D
Herstellung	Druck einer Schalung, Einfüllen von Ortbeton	Druck des Querschnitts, ein Streifen	Druck des Querschnitts, mehrere Streifen	Weitere Querschnittsformen (Beispielhafte Darst.)
Querschnitt				
Längsschnitt				

Bei allen in Tabelle 1 gezeigten Ausführungsarten wird Beton oder Mörtel durch eine Düse extrudiert und entlang eines zuvor definierten Pfads schichtweise abgelegt (gedruckt). Bei der Ausführungsart A wird nicht der Wandquerschnitt, sondern eine Schalung gedruckt, anschließend in diese Beton eingefüllt und hierdurch ein Querschnitt hergestellt. Bei der Ausführungsart B wird der gesamte massive Wandquerschnitt schichtweise aufgetragen, während bei den Ausführungsarten C und D ein zusammengesetzter Querschnitt bestehend aus mehreren Querschnittsstreifen gedruckt wird.

Neben den verschiedenen Arten der Ausführung des Wandquerschnitts bestehen auch unterschiedliche Möglichkeiten der Extrusion des Betons oder Mörtels. Auf dem Markt sind bereits verschiedene 3D-Druck-Technologien verfügbar, bei denen die Form des Druckkopfs, die Richtung der Extrusion, das verwendbare Material und der Druckprozess variieren (vgl. Abb. 1). Beim Druckprozess wird zwischen Verfahren mit einer und mehreren Materialkomponenten differenziert. Bei einem 2-komponentigen Verfahren erfolgt beispielsweise eine Nachdosierung von Zusatzmitteln unmittelbar vor der Extrusion nahe oder im Druckkopf, um die Eigenschaften des frischen und des späteren festen Materials gezielt anpassen zu können. Darüber hinaus bestehen an die 3D-Druck-Technologien unterschiedliche Bedingungen bei der Anwendung (z. B. Größe des druckbaren Bereichs). Abbildung 1 zeigt zwei beispielhafte 3D-Druck-Verfahren mit unterschiedlichen Druckköpfen, Extrusionsrichtungen und Druckprozessen.

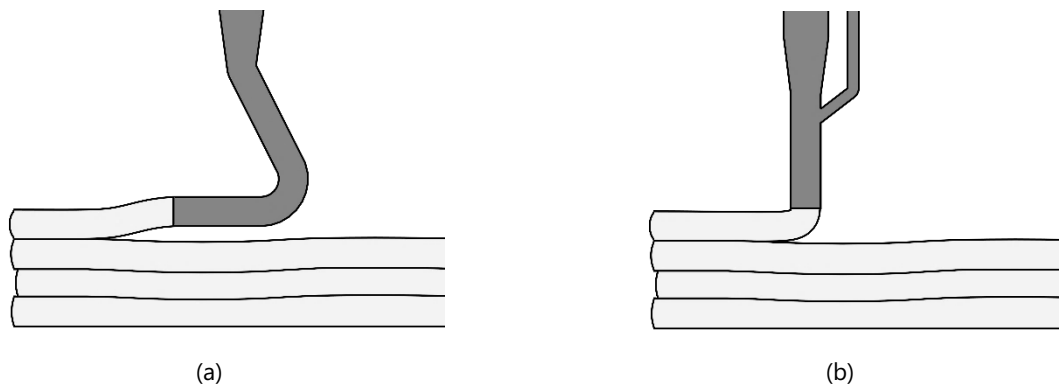


Abb. 1: Beispielhafte Darstellung verschiedener 3D-Druck-Verfahren: (a) Druckkopf mit horizontaler Extrusionsrichtung, (b) Druckkopf mit vertikaler Extrusionsrichtung und seitlicher Nachdosierung von Zusatzmitteln

Neben der Ausführung verschiedener Querschnitte mit dazugehörigen 3D-Druck-Verfahren bestehen in der Praxis bereits Erfahrungen mit unterschiedlichen Materialien; von Beton nach Norm über feinkörnige Betone und Mörtel bis hin zu 3-komponentigen Mörteln mit der Zugabe von Polymermischungen und Aktivatoren. Grundsätzlich bestehen abhängig von der Ausführungsart des Wandquerschnitts und des 3D-Druck-Verfahrens unterschiedliche Anforderung an das zu extrudierende Material. Es liegt zudem eine spezifische Wechselbeziehung zwischen Extrudat und Extruder vor. Tabelle 2 führt grundlegende Prüfungen am frischen und festen Material sowie Messungen der Umgebungsbedingungen auf, die mindestens bei der Erstherstellung durchzuführen sind, um die Eignung des frischen und festen Materials für den 3D-Druck nachzuweisen.

Tab. 2: Prüfungen am frischen und festen Material sowie weitere Messungen

Frishes Material	Festes Material
Konsistenz der Mischung, Ausbreitmaß, Fließfähigkeit	Rohdichte des festen Betons oder Mörtels
Konsistenz bei der Extrusion, Extrudierbarkeit	Druckfestigkeit
Grünstandfestigkeit	E-Modul
Temperatur der Luft	Frost-Tau-Widerstand
Temperatur des frischen Materials	Verbund- / Scherfestigkeit der Fugen
Rohdichte des frischen Betons oder Mörtels	Ggf. Biegezug- / zentr. Zugfestigkeit
Luftporengehalt	Ggf. Kriechen, Schwinden, Dauerstandverhalten

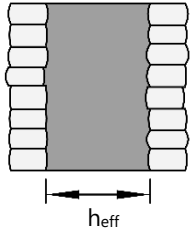
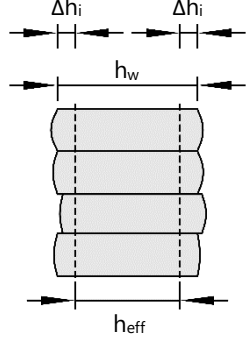
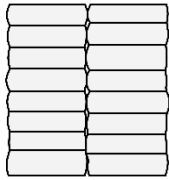
Bei der Prüfung der Extrudierbarkeit sind aufgrund der prozessspezifischen Charakteristik ggf. vom Hersteller eigens entwickelte Prüfverfahren anzuwenden. Es ist insbesondere darauf zu achten, dass eine gleichmäßige Extrusion ohne Lunker, Lufteinschlüsse oder Unterbrechungen des Materialflusses mit einer gleichbleibenden Qualität erfolgt. Bei der Bestimmung der Eigenschaften sind gemäß Tabelle 2 neben konventionell geschalteten Proben stets auch gedruckte und mittels Kernbohrung hergestellte Proben zu untersuchen. Dabei ist zu beachten, dass eine Verdichtung der geschalteten Proben analog zu den gedruckten Proben erfolgt. Abhängig von der Funktion einer 3D-gedruckten Wand (Außenwand, Innenwand) sind unter Umständen weitere Prüfungen durchzuführen; hier kann beispielsweise die Wasseraufnahme genannt werden.

Bei der Auswahl eines 3D-Druck-Verfahrens für ein Bauvorhaben sind u. a. die individuellen Parameter des Systems, die Anforderungen an das Material und die Anwendungsbedingungen zu beachten.

3 Tragverhalten 3D-gedruckter Wandquerschnitte

Der Überblick über den Stand der verschiedenen Ausführungsarten zeigt die Vielfalt der bestehenden Technologien und der Möglichkeiten bei der Herstellung von 3D-gedruckten Betonbauteilen und Bauwerken auf. Um im Nachfolgenden Empfehlungen für die Herstellung und Bemessung von mit einem 3D-Druck-Verfahren hergestellten Wänden mit den vorgestellten Ausführungsarten (vgl. Tab. 1) formulieren zu können, wird zunächst das Tragverhalten der Querschnitte näher betrachtet. Tabelle 3 gibt einen Überblick über die ausgewählten Ausführungsarten mit den unterschiedlichen Querschnitten, die voll oder teilweise tragend sind, sowie Empfehlungen zum Ansatz der effektiven Dicke des Querschnitts für die rechnerische Nachweisführung bei einer exzentrischen Druckbelastung. Die Ausführungsart D (vgl. Tab. 1) wird aufgrund der möglichen geometrischen Varianten und dem nur wenig erforschten Tragverhalten des gesamten Querschnitts sowie der einzelnen Querschnittsstreifen nicht weiter betrachtet.

Tab. 3: Tragverhalten des Querschnitts und Bemessung 3D-gedruckter Wände

Art	A	B	C
Herstellung	Druck einer Schalung, Einfüllen von Ortbeton	Druck des Querschnitts, ein Streifen	Druck des Querschnitts, mehrere Streifen
Tragender Querschnitt	Nichttragende Schalung, tragender Ortbetonquerschnitt (Kern) 	Ein tragender Querschnittsstreifen 	¹⁾ 
Effektive Dicke des Querschnitts	$h_{eff} = h$ (Ortbetonquerschnitt)	$h_{eff} = h_w - 2 \cdot \Delta h_i$	¹⁾
Bemessung	Nach Eurocode 2, Kapitel 12	Nach Eurocode 0, Anhang D	Nach Eurocode 0, Anhang D

¹⁾ Aufgrund der geringen verfügbaren Datenmenge können hier keine Angaben gemacht werden.

Das Tragverhalten 3D-gedruckter Bauteile hängt von der Ausführungsart, der Geometrie der Bauteile und dem verwendeten Beton oder Mörtel ab. Diese drei Aspekte sind bei der Nachweisführung unter Berücksichtigung der Einwirkungen zu beachten.

Bei der Ausführungsart A (vgl. Tab. 1 und 3) ist unter Vernachlässigung der Tragfähigkeit der gedruckten Schalungstreifen grundsätzlich eine Bemessung nach Eurocode 2 [8, 9] für den tragenden Betonkern unter Verwendung eines Betons nach DIN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2 möglich. In einem solchen Fall liegt lediglich eine Abweichung von DIN 1045-3 mit der Verwendung einer nicht geregelten Schalung (gedruckte

Schalungsstreifen) vor. Die effektive Dicke des Querschnitts entspricht hierbei der Dicke des Ortbetonquerschnitts (Kern), wobei Toleranzen bzw. Abweichungen der Druckschichten und die daraus resultierende tatsächliche Dicke des Querschnitts zu beachten sind. Für den Bauzustand ist zu berücksichtigen, dass an die gedruckten Schalungen Anforderungen gemäß einer vorübergehenden Bemessungssituation bestehen; es sind entsprechende Nachweise zu führen. Es muss beispielsweise der Widerstand der gedruckten Schalungsstreifen unter dem einwirkenden Frischbetondruck nachgewiesen werden.

Mit dem Druck eines vollständigen Querschnitts, Ausführungsart B (vgl. Tab. 1 und 3), wird ein Bauteil hergestellt, das derzeit nach keiner gültigen Norm bemessen werden kann; jedoch ist grundsätzlich eine versuchsgestützte Bemessung nach Eurocode 0 möglich. Es sind Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit für die vertikale zentrische und/oder exzentrische Belastung und die kombinierte vertikale sowie horizontale Belastung in Scheiben- und Plattenrichtung zu führen. Zudem ist das Brandverhalten zu untersuchen. Einzelne Nachweise können alternativ in Anlehnung an den Eurocode 2 geführt werden (z. B. Schubkraftübertragung in den Fugen), wenn die relevanten Einflussgrößen für das jeweilige Widerstandsmodell bekannt sind und die Konformität dieser Einflussgrößen gemäß den einschlägigen Regelwerken nachgewiesen wurde. Erforderlichenfalls sind Annahmen zu treffen, die nachweislich auf der sicheren Seite liegen, damit das nach Eurocode 0 geforderte Sicherheitsniveau stets erreicht wird. Für die rechnerische Nachweisführung ist eine effektive Dicke des Querschnitts h_{eff} (vgl. Tab. 3) zu ermitteln, die aus Erfahrungen und Vorinformationen, d. h. aus Vermessungen und der geometrischen Streuung, errechnet werden kann, wenn geometrische Abweichungen vorliegen, die größer sind als die in den Bemessungsmodellen der einschlägigen Normen berücksichtigten Abweichungen oder Variationskoeffizienten.

Für die Ausführungsarten C und D (vgl. Tab. 1), Querschnitte, die sich aus mehreren gedruckten Streifen in einer geradlinigen oder freien Form zusammensetzen, bestehen in der Literatur (z. B. [10, 11]) nur wenige Kenntnisse zum Tragverhalten. Ein Ansatz zur Berücksichtigung einer effektiven Dicke des Querschnitts für die Bemessung kann aufgrund der geringen Datenmenge und den unterschiedlichen geometrischen Varianten daher nicht formuliert werden. Bei der Ausführungsart C mit einer geradlinigen Anordnung der Querschnittsstreifen ist im ungünstigsten Fall von lediglich einem tragenden Streifen auszugehen.

Grundsätzlich sind bei der Herstellung eines Bauwerks Vermessungen tragender Bauteile durchzuführen, um Abweichungen vom Nennquerschnitt, die größer als die Maßtoleranzen nach DIN 18202 [12] und DIN EN 13670 [13] sind zu erfassen. Der Einfluss solcher Abweichungen ist in Bezug auf die Tragfähigkeit zu beurteilen.

4 Empfehlungen für die Praxis und Schlussfolgerungen

Die Herstellung von unbewehrten, tragenden Betonwänden, die mit Beton oder Mörtel ohne Nachverdichtung und ohne die Verwendung einer Schalung ausgeführt werden, sowie die Herstellung von tragenden Betonschalungen, in die Ortbeton eingefüllt wird, ist derzeit noch nicht normativ geregelt. Die Herstellung und Bemessung solcher Wände oder Schalungen mit einem 3D-Druck-Verfahren erfüllen daher nicht die allgemeinen Anforderungen, die in den Landesbauordnungen verankert sind, bzw. die Anforderungen der technischen Baubestimmungen der Länder.

Bei einem einzelnen Bauvorhaben bedarf es daher einer Zustimmung im Einzelfall (ZiE) und einer vorhabenbezogenen Bauartgenehmigung (vBg), um diese regelungsbedürftigen Lösungen ver- und anwenden zu können [14]. Die Beantragung einer allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassung (abZ) und einer allgemeinen Bauartgenehmigung (aBG) beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) ist für die deutschlandweite Anwendung dieses innovativen Herstellverfahrens erforderlich. Darüber hinaus besteht auf europäischer Ebene die Möglichkeit eine europäische technische Bewertung (ETA) zu erwirken [3].

Um eine Aussage über die Konformität von mit 3D-Beton-Druckverfahren hergestellten Wänden in Bezug auf die einschlägigen technischen Regelwerke treffen zu können, sind Anforderungen an das Material und die herzustellenden Bauteile zu formulieren; insbesondere dann, wenn Bauteile mit einem nicht nur vorübergehend tragenden Querschnitt vorliegen, die nicht vollständig nach Eurocode 2 bemessen werden können. In einem solchen Fall sind Untersuchungen auf der Material- und Bauteilebene durchzuführen. Weitere Empfehlungen für die Planung und Durchführung von Projekten mit additiven Fertigungsverfahren können [3] entnommen werden.

Die Bewertung von Abweichungen von Regelwerken wird mit zunehmender Anzahl an Abweichungen schwieriger; unter Umständen ist eine Bewertung von Abweichungen überhaupt nicht möglich. Um eine Aussage zur Konformität treffen zu können, sind experimentelle Untersuchungen erforderlich. Mit einer zunehmenden Anzahl an Abweichungen findet zudem eine Verschiebung von einer Bewertung für die Anwendung zu einer Grundlagenforschung statt. Eine praktische Anwendung der Ergebnisse und Erkenntnisse ist gegebenenfalls erst dann möglich, wenn alle relevanten Einflussgrößen untersucht wurden. Bei der Entwicklung neuartiger Bauprodukte und Bauarten wird daher grundsätzlich empfohlen, möglichst wenige Abweichungen von den aktuell anzuwendenden Regelwerken anzustreben und dies im Entwicklungsprozess zu berücksichtigen, um den technischen, zeitlichen und finanziellen Aufwand für den Nachweis der Ver- und Anwendbarkeit eines neuen Bauprodukts oder einer neuen Bauart möglichst gering zu halten. Für das 3D-Drucken mit Beton wird in diesem Zusammenhang empfohlen, einen Beton nach Norm zu verwenden, damit lediglich Abweichungen von den Regelwerken in Bezug auf die Ausführung und die Bemessung vorliegen. Das Trag- und Verformungsverhalten 3D-gedruckter Bauteile unter den verschiedenen Einwirkungen ist zukünftig ausführlich zu erforschen. Die Überführung der Ergebnisse in Regelwerke ermöglicht die breitere Anwendung von 3D-gedrucktem Beton oder Mörtel.

Abschließend werden drei Forschungsfragen formuliert, wobei die Antworten von wesentlicher Bedeutung für die praktische Anwendung 3D-gedruckter Bauteile sind:

- Sind Anpassungen der Widerstandsmodelle gemäß Eurocode 2 für den Nachweis 3D-gedruckter Bauteile möglich und/oder welche weiteren Einflussgrößen sind zwingend zu berücksichtigen; und können Bauteile und Tragwerke aus Mörtel ebenfalls nachgewiesen werden?
- Kann eine effektive Dicke des Querschnitts bei aus mehreren Streifen zusammengesetzten Querschnitten bei der Bemessung angesetzt werden oder ist lediglich eine versuchsgestützte Bemessung nach Eurocode 0 möglich?
- Welchen Einfluss hat die fehlende Nachverdichtung bzw. der fehlende Energieeintrag auf den Verbund zwischen den Druckschichten und damit auch auf das Tragverhalten eines Bauteils; insbesondere bei einer horizontalen Einwirkung?

5 Literatur

- [1] Näther, M., Nerella, V. N., Krause, M., Kunze, G., Mechtcherine, V., Schach, R. (2017) Beton-3D-Druck - Machbarkeitsuntersuchungen zu kontinuierlichen und schalungsfreien Bauverfahren durch 3D-Formung von Frischbeton. Abschlussbericht. Forschungsinitiative Zukunft Bau F 3024. Fraunhofer IRB Verlag, Stuttgart.
- [2] Statistisches Bundesamt (2022) Bauen und Wohnen - Baufertigstellungen von Wohn- und Nichtwohngebäuden (Neubau) nach überwiegend verwendetem Baustoff. Lange Reihen ab 2000.
- [3] Mechtcherine, V., Kuhn, A., Mai, I., Nerella, V. N., Weger, D., Ivaniuk, E., Wiens, U. (2024) Additive Fertigung mit Beton - Leitfaden für die Planung und die Durchführung von Projekten. Beton- und Stahlbetonbau 119, 4, 290-310, doi=10.1002/best.202400005.
- [4] Schutter, G. de, Lesage, K., Mechtcherine, V., Nerella, V. N., Habert, G., Agusti-Juan, I. (2018) Vision of 3D printing with concrete – Technical, economic and environmental potentials. Cement and concrete research 112, 25-36, doi=10.1016/j.cemconres.2018.06.001.
- [5] Die Landesregierung Nordrhein-Westfalen (2021) Ministerin Scharrenbach: 3D-Druck-Haus in Beckum sorgt für positiven Druck in der Baubranche. <https://www.land.nrw/pressemitteilung/ministerin-scharrenbach-3d-druck-haus-beckum-sorgt-fuer-positiven-druck-der>. Zugriff am 18.01.2025.
- [6] Heidelberg Materials AG (2024) Schlüsselübergabe für Europas größtes 3D-gedrucktes Gebäude. Heidelberg Materials liefert 333 Tonnen 3D-Druckbeton. Pressemitteilung. Zugriff am 18.01.2025.
- [7] STRABAG SE, Marketing (2024) Ein Haus aus einem Druck: Putzmeister und ZÜBLIN präsentieren ersten Massivbau mit tragenden Betonwänden aus dem 3D-Drucker. Presse-Information Nr.: 2015. Zugriff am 18.01.2025.
- [8] DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04. Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Beuth Verlag GmbH, Berlin, doi=10.31030/1946465.
- [9] DIN EN 1992-1-1:2011-01. Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010. Beuth Verlag GmbH, Berlin, doi=10.31030/1723945.
- [10] Mohammed, A. A., Al-Tamimi, A. K., Al-Abdwais, A. H. (2024) Structural performance of 3D concrete printed load-bearing walls. doi=10.1007/s40964-024-00914-4.
- [11] Daungwilailuk, T., Pheinsusom, P., Pansuk, W. (2021) Uniaxial load testing of large-scale 3D-printed concrete wall and finite-element model analysis. Construction and Building Materials 275, 122039, doi=10.1016/j.conbuildmat.2020.122039.
- [12] DIN 18202:2019-07. Toleranzen im Hochbau - Bauwerke. Beuth Verlag GmbH, Berlin, doi=10.31030/3061349.
- [13] DIN EN 13670:2011-03. Ausführung von Tragwerken aus Beton. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [14] Deutsches Institut für Bautechnik. Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (abZ)/ Allgemeine Bauartgenehmigung (aBG). <https://www.dibt.de/de/wir-bieten/zulassungen-etas-und-mehr/abz-abg>. Zugriff am 18.01.2025.

6 Autoren

Dr.-Ing. Agemar Manny

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe
agemar.manny@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe
frank.dehn@kit.edu

Praxiseinblick in den 3D-Druck im Betonbau: Additives Bauen und CO₂-Bilanzierung im Fokus

Robin Degen und Matthias Dichtl

Zusammenfassung

Der Bausektor steht vor vielen Herausforderungen für die Zukunft. Neben der Bekämpfung einer stagnierenden Produktivität und einem stetig wachsenden Fachkräftemangel bedarf es eines Wandels in der ökologischen Verträglichkeit von Bauwerken. Hierfür bietet der 3D-Druck innovative Lösungsansätze, um diesen Problemen entgegenzuwirken. Im Folgenden wird die genaue Funktionsweise des mobilen 3D-Druckers KARLOS erläutert und seine Vorteile gegenüber anderen am Markt verfügbaren Drucksystemen dargestellt. Zudem wird dargelegt, welcher technischen und auch normativen Entwicklungen es noch bedarf, damit der KARLOS den Bausektor vollumfänglich bei seinem zukünftigen Wandel unterstützen kann.

Schlagwörter: 3D-Druck, Betondruck, Innovation im Bauwesen

Abstract

The construction sector faces many challenges for the future. In addition to combating stagnating productivity and a steadily growing shortage of skilled workers, a change in the ecological compatibility of buildings is required. For this purpose, 3D printing offers innovative solutions to counter these problems. The following explains the exact functioning of the mobile 3D printer KARLOS and shows what advantages it has over other printing systems available on the market. Furthermore, it outlines what technical and normative developments are still needed for KARLOS to fully support the construction sector in its future transformation.

Keywords: 3D printing, concrete printing, innovation in construction

1 Allgemeines

Der Bausektor ist für 40 % des weltweiten Energieverbrauchs, 38 % der weltweiten Treibhausgasemissionen, 12 % des weltweiten Trinkwasserverbrauchs und für 40 % der festen Abfälle in Industrieländern verantwortlich. Gleichzeitig wird jedoch ein enormes Einsparpotential von 30 % – 70 % in eben jenen Bereichen gesehen, was dazu führt, dass in keinem anderen Bereich ein so großer Beitrag zur Minderung des Klimawandels geleistet werden kann [1]. Die Umwelteinwirkungen hängen im Bauprozess im Wesentlichen von der Art der verwendeten Materialien und der Optimierung des Materialverbrauchs ab [2]. Die Auswirkung der verwendeten Materialien lassen sich am Beispiel von Zement verdeutlichen. Dieser verursacht durch seine Herstellung zum einen aufgrund seiner hohen Brenntemperatur von 1350 °C – 1500 °C und zum anderen aufgrund der Entsäuerung, bei welcher zusätzlich CO₂ freigesetzt wird [3], rund 7 % der weltweiten CO₂-Emissionen [4]. Darüber hinaus hat die Baubranche vermehrt auch mit einem wachsenden Fachkräftemangel zu kämpfen. Hierbei bietet der 3D-Druck die Chance den wachsenden Problemen der Baubranche durch reduzierten Materialeinsatz, Arbeitsaufwand und Personalaufwand entgegenzuwirken.

2 Der Beton 3D-Druck

2.1 Der 3D-Druck in der Baubranche

Die in der Baubranche üblichen 3D-Druckverfahren sind das selektiv bindende und das ablegende Verfahren. Das ablegende Verfahren beinhaltet auch die Extrusion, also das Ablegen eines fortlaufenden Materialstranges. Dadurch entsteht Schicht für Schicht das gewünschte Objekt. Auf dieser Basis arbeitet auch der KARLOS-Drucker. Die Extrusion ist das auf der Baustelle derzeit üblichste 3D-Druckverfahren.

Für die extrusionsbasierten Fertigungsverfahren kommen unterschiedliche Systeme zum Einsatz. Der erste Typ ist der „small-scale robotic arm printer“ (dt. Kleinraumrobotik-Drucker), welcher insbesondere für die Herstellung von Fertigteilen oder Möbeln genutzt werden kann. Für die Herstellung ganzer Gebäude eignet er sich aufgrund seiner geringen Reichweite weniger. Für diesen Zweck wurden Gantry-Printer (dt. Portaldrucker) entwickelt. Durch Stützen und Horizontaltraversen wird ein Portal errichtet, über welches sich die Position des Druckkopfes in x-, y- und z-Richtung steuern lässt. Der Nachteil dieses Systems ist jedoch, dass die Abmessung des Portals die mögliche Druckfläche bestimmt. Ein schnelles Umstellen des Portals ist aufgrund der hohen Rüstzeit nicht einfach möglich. Zudem werden i. d. R. mit diesem System lediglich die Schalungen gedruckt. Zwar ist dadurch eine größere architektonische Gestaltungsfreiheit möglich, da für den Massivbau bisher untypische Formen, wie Rundungen einfach realisierbar sind, aber es benötigt hier noch einen zweiten Schritt, da die gedruckten Schalungen noch mit Beton verfüllt werden müssen. Ein anderer Ansatz wird mit dem letzten Typ, den „large-scale robotic arm printer“ (dt. Großraumrobotik-Druckern) verfolgt. Hierbei wird ein Großraummanipulator auf einen mobilen Unterbau montiert, was somit eine hohe Flexibilität und Mobilität ermöglicht und dadurch besonders für den direkten Einsatz auf der Baustelle geeignet ist. Das Drucksystem KARLOS, welches durch die Firma Putzmeister entwickelt wurde, ist dabei der erste Vertreter seines Typs. Neben der schnellen Rüstzeit von unter einer Stunde und einer großen Reichweite von 26 m bietet KARLOS noch den Vorteil, statisch tragende Bauteile im Vollwandquerschnitt zu drucken.

2.2 Der KARLOS-Drucker

Im Wesentlichen entspricht der KARLOS dem Erscheinungsbild einer klassischen Betonpumpe (vgl. Abb. 1), welche jedoch modifiziert wurde. Als Basis für den KARLOS dient eine 47-Meter-Putzmeister-Maschine. Diese übernimmt mit ihrer Kolbenpumpe die Förderung des Betons bis zu einer zweiten Pumpe, der Inlinepumpe. Diese wird für die Feindosierung benötigt, da es für den Herstellungsprozess wichtig ist, dass der Beton in einem konstanten Fluss zu der formgebenden Einheit, dem Druckkopf, gefördert wird. Um etwaige Mastschwankungen auszugleichen, wurde der Druckkopf mittels einer Ausgleichskinetik an dem Mast befestigt. Dadurch lässt sich eine hohe Präzision der einzelnen Lagen erreichen.



Abb. 1: Der mobile 3D-Betondrucker KARLOS

Die Formgebung des extrudierten Betonstranges erfolgt durch den in letzter Instanz angebrachten Druckkopf. Dieser legt den Betonstrang horizontal ab. Abbildung 2 zeigt, wie der Betonstrang mit einer Querschnittsabmessung von 55 mm auf 250 mm abgelegt wird. Durch das Anbringen eines anderen Druckkopfs lassen sich auch weitere Querschnittsabmessungen realisieren. So konnten bereits auch erfolgreich Tests durchgeführt werden, bei welchen die Höhe des Betonstrangs bis zu 100 mm betrug. Durch diese Anpassung ließ sich auf einfache Art und Weise ein schnellerer Druckfortschritt erzielen, da bei gleicher Fahrgeschwindigkeit ein größeres Volumen ausgebracht werden konnte.

Ebenso lassen sich durch andere Druckköpfe auch unterschiedliche Wandstärken realisieren. Dadurch kann auf die unterschiedlichen Gebäudeanforderungen reagiert werden. Ziel ist es jedoch, die geometrische Anpassung während des Druckprozesses durch den Druckkopf vornehmen zu können. Weitere Funktionen zur Minimierung der Nacharbeit nach der Extrusion der Lagen sind ebenfalls bereits in der Entwicklung.



Abb. 2: Ablage eines Betonstrangs mit einer Höhe von 55 mm und Breite von 250 mm

Mit dem KARLOS ist es möglich nach DIN EN 206-1 hergestellte Betone mit einem Größtkorn von 8 mm zu verarbeiten. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass an den Beton anspruchsvolle rheologische Anforderungen gestellt werden. Um die Förderung über die Betonpumpe zu gewährleisten, muss der Beton pumpbar sein. Sobald der Strang ausgebracht wurde, muss er jedoch eine ausreichende Formstabilität und Grünstandsfestigkeit aufweisen, um die Lasten aus den nachfolgend abgelegten Schichten abtragen zu können.

Grünstandsfestigkeit aufweisen, um die Lasten aus den nachfolgend abgelegten Schichten abtragen zu können. Diese Eigenschaften muss der Beton über einen Zeitraum von bis zu 3 Stunden möglichst konstant beibehalten, sodass ein reibungsloser Druckverlauf gewährleistet werden kann.

Erfüllt eine Betonrezeptur die entsprechenden Anforderungen, so kann Beton aus einem örtlichen Mischwerk für ein Bauvorhaben bezogen werden. Neben den im Rahmen der Qualitätssicherung nach DIN EN 13670 in Verbindung mit DIN 1045-3 durchzuführenden Überwachungsarbeiten wird der Umfang der Frischbetonprüfungen im Rahmen der Betonannahme für 3D-Druck-Betone auf Baustellen erweitert. Sobald die Verarbeitbarkeit des gelieferten Betons bestätigt werden konnte, wird der Beton in den Trichter des KARLOS gefüllt und der Druckprozess gestartet.

2.3 Der digitale Druckprozess

Die Grundlage des Druckvorgangs bildet ein digitales Modell, das in Form einer 3D-Zeichnung vorliegt. Mittels eigens entwickelter Verfahren werden aus diesem die zu druckende Wände extrahiert und in einzelne Lagen aufgeteilt (sog. „Slicen“). Anschließend erfolgt die Pfadplanung, um den effizientesten und technisch optimalen Druckablauf zu ermitteln. Hierbei ist darauf zu achten, dass sich die Druckrichtungen der übereinanderliegenden Stränge abwechselt. Dadurch wird verhindert, dass an den Ecken stumpfe Stoßverbindungen entstehen, und stattdessen eine alternierende Eckausbildung erzielt wird (vgl. Abb. 3). Dies ermöglicht eine stabile, formschlüssige Verbindung der Wandelemente an den Ecken und trägt zur Aussteifung des Gesamtbauwerks bei.

Diese Informationen werden in Form eines G-Codes an die Maschine übertragen. In diesem sind alle wichtigen Angaben zur Druckgeschwindigkeit und den Start- und Endpunkten enthalten. Der Manipulator verfügt nun über alle relevanten Informationen, um den Druck der Wandelemente automatisiert durchzuführen. Während des gesamten Druckvorgangs wird der Prozess überwacht, sodass der Druck bei potenziellen Gefahrensituationen jederzeit manuell gestoppt werden kann.

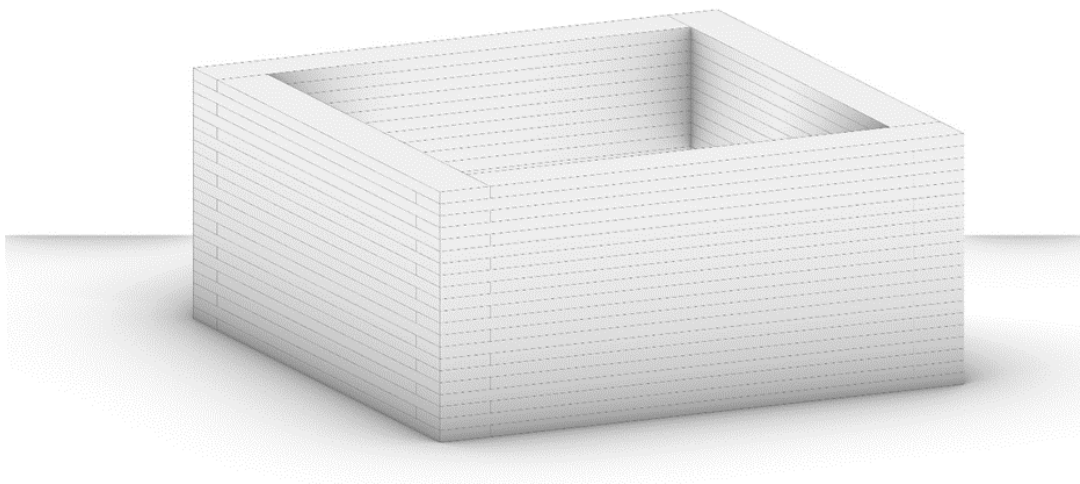


Abb. 3: Schematische Darstellung einer alternierenden Eckausbildung

2.4 Besonderheiten und Herausforderungen

2.4.1 Lagenverbund

Der Verbund zwischen den einzelnen Drucklagen wird vom Druckfortschritt und den möglichen Pausenzeiten beeinflusst. Man unterscheidet hierbei zwischen „warmen“ und „kalten“ Fugen: Warme Fugen entstehen, wenn zwei frische Betonlagen unmittelbar aufeinander gedruckt werden. Kalte Fugen hingegen entstehen

bei längeren Pausen zwischen den Lagen (z. B. über Nacht), wodurch sich kein ausreichender Verbund zwischen der alten und neuen Lage bilden kann. Um dennoch einen ausreichenden Verbund herstellen zu können wird in diesen Fällen vor Druckbeginn auf die letzte bereits gedruckte und erhärtete Lage eine Haftbrücke aufgetragen.

2.4.2 Höhenabweichungen

Während des Druckprozesses kann es zu leichten Setzungen der einzelnen Lagen kommen. Durch das Aufsummieren dieser Setzungen über mehrere Drucklagen hinweg kann es vorkommen, dass mit der geplanten Lagenanzahl nicht die Soll-Höhe erreicht wird, die es braucht, um Bauteile mit fest definierter Höhe einzubauen. Ist dies der Fall, muss auf die letzte Lage Material aufgetragen oder eine zusätzliche Lage gedruckt und das überschüssige Material abgetragen werden, sodass die Soll-Höhe erreicht wird (vgl. Abb. 4). Der Druck wird bis zur Oberkante des Sturzes fortgeführt. Vor dem Einsetzen des Sturzes wird eine Haftbrücke auf das Auflager sowie auf die beiden Stirnseiten des Sturzes aufgetragen. Anschließend wird der Sturz eingelegt und auch die Oberseite mit einer Haftbrücke versehen. Die Höhendifferenz zu den angrenzenden Drucklagen muss danach manuell ausgeglichen werden. Sobald diese Anpassungen abgeschlossen sind, kann die nächste Druckschicht ohne Höhenunterschiede fortgesetzt werden.

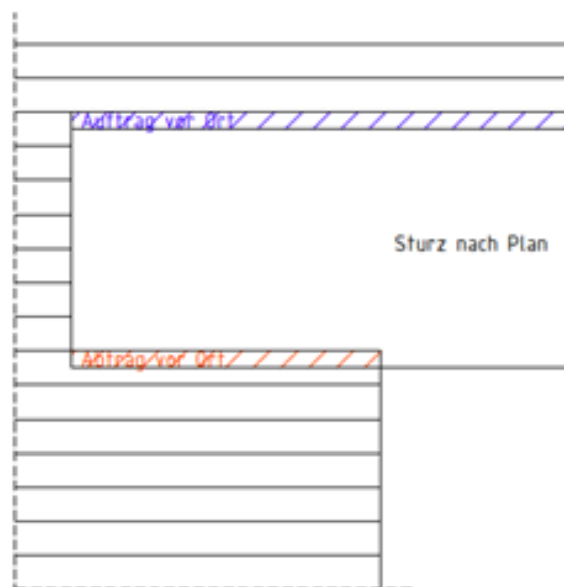


Abb. 4: Ausgleich von Höhendifferenzen beim Einbau von höhenabhängigen Bauteilen

2.4.3 Lagengenauigkeit

Um die angestrebte Genauigkeit in der additiven Fertigung zu erreichen, muss der Druckpfad möglichst präzise abgefahren werden. Dies ist nötig, damit die einzelnen Lagen eine ausreichend hohe Lagengenauigkeit aufweisen und sich somit das gesamte gedruckte Objekt innerhalb der vorgegebenen Toleranzen befindet. Die maximal zulässigen Abweichungen werden durch die DIN 18202 mit einem Zielwert von ± 3 mm vorgegeben. Dies stellt maschinenseitig bei einem Ausleger von rund 26 Metern und mehr als drei Gelenken eine erhebliche Herausforderung dar. Zusätzlich muss auf äußere Einflüsse wie Wind und Temperaturschwankungen flexibel reagiert werden können. Ungenauigkeiten, die derzeit nicht mithilfe der Ausgleichsmechanik verhindert werden, müssen gegebenenfalls durch manuelle Nacharbeit behoben werden. Um die Geometrie der gefertigten Bauteile zu überprüfen, wird das Objekt im Anschluss präzise vermessen und mit der 3D-Planung abgeglichen.

3 Ökologische Aspekte

Um die durch den Bau verschuldeten Umweltbelastungen auf ein Minimum zu reduzieren, ist ein enges Zusammenspiel aus Baustoffherstellern und Fertigungstechnik erforderlich. Wie anfangs bereits erwähnt, ist die Zementherstellung einer der Haupt-Emissionstreiber auf der Welt. Umso wichtiger ist es diese Ressource so rohstoffschonend und ökologisch verträglich wie möglich einzusetzen und einzubauen. Derzeit erfordern viele 3D-Drucksysteme speziell entwickelte Mörtel, deren spezielle Zusammensetzung jedoch mit einem sehr hohen GWP verbunden ist. Da der KARLOS mit normiertem Beton arbeitet liegt hier das GWP deutlich unterhalb des verwendeten Materials anderer Systeme. Zeitgleich wurde an die Betonhersteller die Anforderung gestellt, bei der Erstellung ihrer Betonrezeptur neben den rheologischen Anforderungen auch das GWP so niedrig wie möglich zu halten. Dadurch konnten bereits GWPs unterhalb derer von aktuell verwendeten Transportbetonen mit vergleichbarer Festigkeitsklasse erzielt werden (vgl. Abb. 5). Dennoch sind Materialhersteller weiterhin gefragt die Umweltbelastungen der für den 3D-Druck geeigneten Materialien weiterhin so gut wie möglich zu reduzieren.

Durch den KARLOS wiederum kann der Schritt des Schalungsbaus für die Wände auf der Baustelle vollständig übersprungen werden. Der KARLOS ermöglicht außerdem die vollelektrische Fertigung von Wandelementen. Auch wird derzeit daran gearbeitet, die Wandstärke während des Druckprozesses entsprechend den statischen Anforderungen anzupassen. Dies führt dazu, dass Material nur in der Menge verbraucht wird, die statisch nötig ist. Durch optimierte Wandstärken kann auch das Maximum an Wohnraum aus einem Bauvorhaben gewonnen werden.

Zudem werden derzeit geeignete Wandaufbauten erarbeitet, die optimal auf das Druckverfahren mit dem KARLOS abgestimmt sind. Ziel ist es dabei, zum einen den Aufwand der Nacharbeit so gering wie möglich zu halten und dadurch den Materialeinsatz in den weiteren Bauabschnitten zu minimieren und zum anderen auch die Möglichkeit der Rezyklierbarkeit auf ein Maximum zu erhöhen.

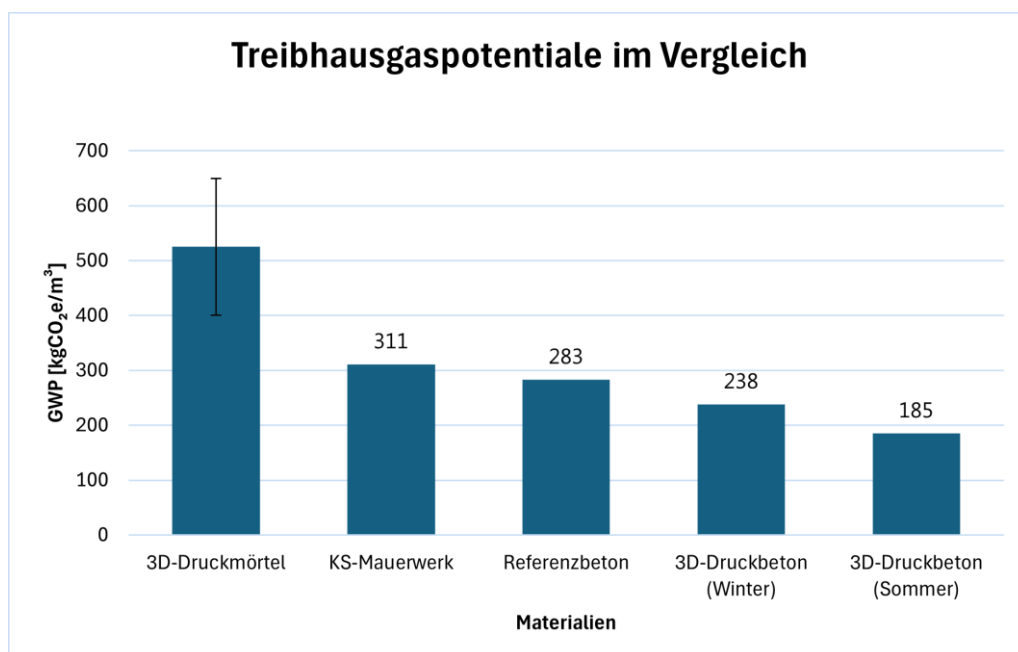


Abb. 5: Treibhausgaspotentiale verschiedener Materialien für die Lebenszyklusmodule A1-A3 im Vergleich (Quelle: KS-Mauerwerk, Referenzbeton: Ökobaudat)

4 Erste Bauvorhaben

Es konnten bereits erste Bauprojekte in Deutschland mithilfe des KARLOS erfolgreich realisiert werden. Das erste zugelassene Gebäude wurde im Jahr 2023, mit der Firma Züblin/Strabag als Projektpartner, auf dem Bauhof der Firma STRABAG BMTI GmbH & Co. KG in Weilimdorf gedruckt (vgl. Abbildung 7). Das erste Wohngebäude wurde in Vöhringen, zusammen mit der Firma Rupp realisiert (vgl. Abbildung 8). Bei letzterem handelte es sich um ein Mehrfamilienhaus mit einer Grundfläche von knapp 180 m², wobei auch alle statisch relevanten Bauteile gedruckt wurden.

Derzeit ist vor jedem Druckstart noch ein umfangreicher Planungs- und Genehmigungsprozess erforderlich, da die Errichtung von Gebäuden durch das 3D-Druckverfahren bisher noch nicht normativ geregelt ist. Dadurch bedarf es vor jedem Baustart einer vorhabenbezogene Bauartgenehmigung (vBG) die in enger Abstimmung mit den Zulassungsbehörden beantragt werden muss. Das KIT / MPA Karlsruhe unterstützte dabei auf wissenschaftlicher Ebene und erstellte alle nötigen Gutachten. Derzeit wird daran gearbeitet, eine allgemeine Bauartgenehmigung (aBG) für die KARLOS-Technologie zu erhalten.



Abb. 7: Rohbau des Gebäudes in Weilimdorf



Abb. 8: Druck der letzten Lagen des Gebäudes in Vöhringen

5 Literatur

- [1] Comstock, M., Garrigan, C., Pouffary, S. (2012) Building design and construction: Forging resource efficiency and sustainable development
- [2] Agusti-Juan, I., Habert, G. (2017) Environmental design guidelines for digital fabrication. Journal of Cleaner Production, Vol. 142, pp. 2780–2791
- [3] Locher, F. W. (2015) Zement. Grundlagen der Herstellung und Verwendung. 1. Aufl., Verlag Bau+Technik, Erkrath
- [4] Garcia-Lodeiro, I., Palomo, A., Fernández-Jiménez, A. (2015) An overview of the chemistry of alkali-activated cement-based binders. Handbook of Alkali-Activated Cements, Mortars and Concretes, pp. 19–47

6 Autoren

Robin Degen, M.Sc

INSTATIQ GmbH
Schelmenwasenstraße 37
70567 Stuttgart
robin.degen@karlos-3d.com

Matthias Dichtl, M.Sc

INSTATIQ GmbH
Schelmenwasenstraße 37
70567 Stuttgart
matthias.dichtl@karlos-3d.com

Nachhaltiges Bauen durch die Modularisierung von Skelettbauten

Agemar Manny und Frank Dehn

Zusammenfassung

Die Modularisierung von Tragwerken mit einer Verwendung einheitlicher Tragelemente und daraus zusammengesetzter Bauteile in Kombination mit lösbaren Verbindungen sowie Vorspannung ohne Verbund stellt eine Alternative zur monolithischen Bauweise dar. Durch die Verwendung einheitlicher Tragelemente, die mittels Serienfertigung hergestellt werden können, soll der beschädigungsfreie Rückbau von Tragwerken und eine Wiederverwendung der einzelnen Tragelemente sichergestellt werden. In diesem Beitrag erfolgt eine Betrachtung ausgewählter Hallenbauten in Stahlbetonskelettbauweise mit einer beispielhaften Modularisierung der Stützen. Anschließend wird eine parametrisierte Bemessung zur Festlegung der Querschnittsabmessungen der Tragelemente entsprechend einer Baukastenoptimierung durchgeführt und die erarbeitete Schnittstelle bzw. Verbindung an den Enden der stabförmigen Tragelemente vorgestellt. Eine Bewertung der Nachhaltigkeit erfolgt durch den Vergleich der vorgestellten modularen Bauweise mit der monolithischen Bauweise; es wird eine Betrachtung der Indikatoren „globales Erwärmungspotenzial“, „nicht erneuerbare Primärenergie“ und „erneuerbare Primärenergie“ auf der Werkstoffebene vorgenommen. Hierbei erfolgt eine Analyse der Werte für die verschiedenen Lebenszyklusphasen der ausgewählten Gebäude bzw. der im Fokus stehenden Gebäudestützen für einen festgelegten Betrachtungszeitraum von 40 Jahren. Der Vergleich zeigt, dass für das gewählte Szenario und die getroffenen Annahmen die modulare Bauweise im Vergleich zur monolithischen Bauweise mit geringeren Emissionen und einem geringeren Primärenergiebedarf verbunden ist. In einer anschließenden Diskussion werden die vorgestellten Ergebnisse kritisch beleuchtet und die Grenzen des Vergleichs aufgezeigt. Der Beitrag endet mit Schlussfolgerungen und Empfehlungen zum modularen Bauen mit Beton und skizziert einen Weg zur raschen Markteinführung modularer Baukastensysteme.

Schlagwörter: Modulares Bauen, Stahlbetonbau, Skelettbauweise, Baukastenoptimierung, Baukastensysteme, Nachhaltigkeit, Lebenszyklusphasen

Abstract

The modularisation of structures with the use of standardised load-bearing elements and components assembled from them in combination with detachable connections and prestressing without bond represents an alternative to monolithic construction. The use of standardised load-bearing elements, which can be produced in series, is intended to ensure the damage-free deconstruction of load-bearing structures and the reuse of individual load-bearing elements. This article considers selected hall buildings in reinforced concrete skeleton construction with an exemplary modularisation of the columns. A parameterised design is then carried out to determine the cross-sectional dimensions of the load-bearing elements in accordance with a construction kit optimisation and the interface respectively connection developed at the ends of the load-bearing elements is presented. Sustainability is assessed by comparing the modular construction method presented with the monolithic construction method; the indicators 'global warming potential', 'non-renewable primary energy' and 'renewable primary energy' are analysed at the material level. This involves analysing the values for the various life cycle phases of the selected buildings respectively the columns of the buildings for a defined period of 40 years. The comparison shows that for the selected scenario and the assumptions

made, modular construction is characterised by lower emissions and a lower primary energy demand compared to monolithic construction. In a subsequent discussion, the results presented are critically analysed and the limits of the comparison are pointed out. The article ends with conclusions and recommendations for modular construction with concrete and outlines an approach to the market launch of modular construction systems.

Keywords: Modular construction, reinforced concrete construction, skeleton construction, modular optimisation, modular systems, sustainability, life cycle phases

1 Einleitung

Durch die Wahl von Betonen mit regionalen oder rezyklierten Gesteinskörnungen sowie klinkerreduzierten Zementen können bereits heute CO₂-Emissionen und Ressourcen bei der Herstellung von Tragwerken in Ortbeton- oder Fertigteilbauweise eingespart werden [1, 2]. Neben der oftmals fokussiert betrachteten Einsparung von CO₂-Emissionen bei der Herstellung sind die grundsätzliche Nachhaltigkeit sowie die Effizienz einer Bauweise und eines Bauwerks in Bezug auf den Klimaschutz zu beachten, um insbesondere die im Bundes-Klimaschutzgesetz [3] verankerten Reduktionen der Treibhausgasemissionen zu erreichen.

Für eine nachhaltige Nutzung materieller Ressourcen ist es von wesentlicher Bedeutung, dass eine kontinuierliche Ressourcenentnahme zu einem Verlust der Ressource führt, wenn sie sich nicht auf natürliche Weise regenerieren oder anderweitig zur Verfügung gestellt werden kann. Die Kreislaufwirtschaft verfolgt aus diesem Grund das primäre Ziel, Produkte möglichst lange zu erhalten – insbesondere Produkte aus nicht erneuerbaren Ressourcen – bzw. Abfall zu vermeiden [4]. Das Ende der Lebensdauer eines Bauwerks kann durch eine Vielzahl von Gründen determiniert sein, z. B. durch einen irreversiblen Zustand des Bauwerks aufgrund von Baufälligkeit, Mängeln oder Schadstoffen, wobei meist nur ein Teil des Bauwerks betroffen ist, durch städtebauliche Planung, zunehmend auch durch zeit- und kostenintensive Sanierungs- oder Erhaltungsmaßnahmen und andere wirtschaftliche Aspekte sowie durch Auflagen, Verordnungen oder gesetzliche Pflichten. Der Rückbau von Bauteilen und Bauwerken weist heutzutage meist einen destruktiven Charakter auf. Beim anschließenden Recycling rückgebauter Bauteile muss eine beachtliche Energie eingesetzt werden, um aus ihnen Sekundärrohstoffe zu gewinnen. Grundsätzlich kann durch das Baustoffrecycling und die Substitution von natürlichen Rohstoffen durch den Einsatz von Sekundärrohstoffen ein Beitrag zur Ressourcenschonung und damit zur Nachhaltigkeit geleistet werden [2]. Neben dem Baustoffrecycling ist zudem auch das Recycling ganzer Bauteile durch die Vermeidung destruktiver Verfahren beim Rückbau denkbar (z. B. [5, 6]). Eine Wiederverwendung von Bauteilen – im besten Fall für denselben Zweck, ohne Einschränkung der Funktion – ist möglichst anzustreben. Die EU-Bauproduktenverordnung schreibt zwar bereits heute vor, dass die Wiederverwendung oder das Recycling von Baustoffen und Bauteilen nach dem Abriss eines Bauwerks sichergestellt werden müssen, jedoch bestehen hierzu keine wesentlichen Vorgaben für die praktische Umsetzung. Bisher findet keine nennenswerte gewerbliche Wiederverwendung von Bauteilen im Stahlbetonbau statt, da maßgeblich die Abmessungen und der Zustand der Bauteile sowie die Anforderungen bei der Errichtung von neuen Bauwerken mit Bauteilen aus dem Bestand eine wirtschaftliche Wiederverwendung der Bauteile ausschließen [7]. Um in Zukunft ganze Bauteile wiederverwenden zu können, ist es daher notwendig, nicht nur den beschädigungsfreien Rückbau bei der Planung eines Neubaus zu beachten, sondern auch den erneuten Einsatz der Bauteile nach der ersten Nutzungsphase mitzudenken. Dieses „Mitdenken“ des erneuten Einsatzes von Bauteilen kann beispielsweise in der „Frühen Phase“ einer sogenannten Systemgenerationsentwicklung berücksichtigt werden, wobei ein sorgfältiges Vorgehen in dieser Phase des Entwicklungsprozesses für den Erfolg eines neuartigen Systems bzw. einer neuen Bauweisen von großer Bedeutung ist [8]. Hier gilt es u. a. die Grenzen des Anwendungsbereichs des Systems bedacht abzustecken. Das Ziel der „Frühen Phase“ ist es, eine valide Bewertung für den Lösungsansatz eines neuen technischen Systems oder eine neue Systemgeneration unter Berücksichtigung einer ausreichenden Anzahl an Merkmalen zu erhalten [8].

Die Auflösung von integralen Gestaltungsformen in Systeme, die sich aus unabhängigen Subsystemen – Modulen – zusammensetzen, wird im Bauwesen als „modulare Bauweise“ bezeichnet [9]. Für den Betonbau bedeutet das, monolithische Tragwerke werden in modulare Tragwerke bestehend aus einzelnen Bauteilen überführt, die meist entsprechend ihrer Funktion verschiedenen Modulen zugeordnet werden. Für die Entwicklung von modularen Konstruktionen bestehen verschiedene Strategien und Methoden (z. B. [10–15]). Abbildung 1 zeigt beispielhaft einen Gebäudeausschnitt mit zwei unterschiedlichen Modularisierungen.

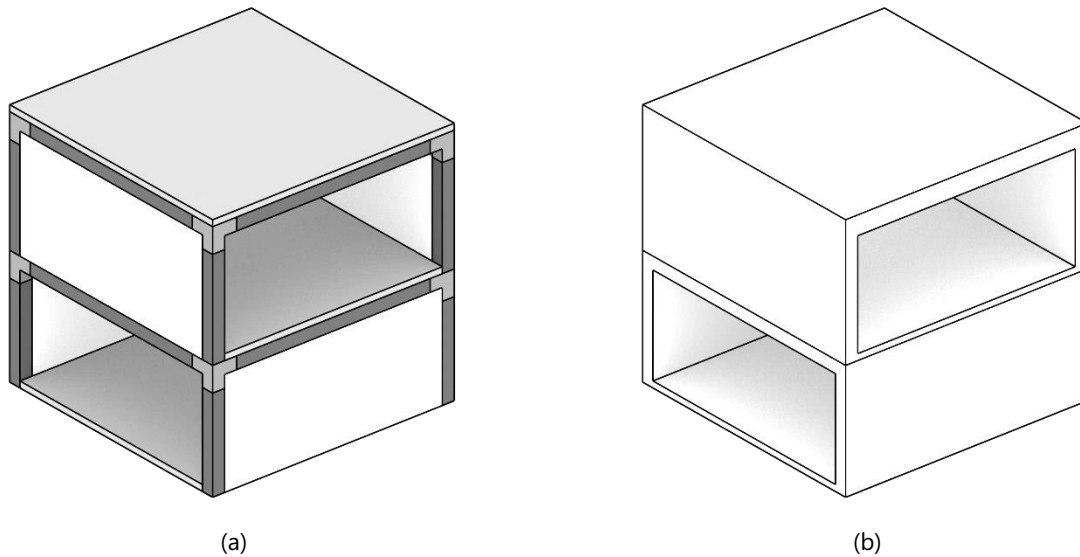


Abb. 1: Beispielhafte Modularisierungen: (a) Linien-, flächen- und knotenförmige Module, (b) volumenförmige (Raum-)Module

Für die Herstellung von modularen Tragwerken eignen sich Fertigteile, wobei ein Verguss der Bauteile möglichst zu vermeiden ist, um die Unabhängigkeit der Module, d. h. der Bauteile mit unterschiedlichen Funktionen, und damit auch die Planung, Optimierung, Herstellung, den Austausch und Rückbau sowie die Wiederverwendung und das Recycling der Module und Bauteile getrennt voneinander sicherzustellen [16]. Der Ausführung der Schnittstellen bzw. Knotenpunkte zwischen den Modulen kommt eine wesentliche Bedeutung zu, da diese Verbindungen einerseits einen Einfluss auf das lokale Tragverhalten haben und andererseits für die Komplexität eines modularen Systems mitverantwortlich sind [9, 16].

Der Literatur, beispielsweise [16, 17], können verschiedene bewährte Lösungen für die Verbindung von Betonfertigteilen entnommen werden. Zudem sind auf dem Markt Produkte mannigfaltigster Art für die Errichtung modularer Betontragwerke verfügbar, wobei ein beschädigungsfreier Rückbau und eine vollständige Wiederverwendung derzeit nur bei äußerst einfachen, behelfsmäßigen Konstruktionen möglich ist (z. B. [18]). Es sind demontable Bauweisen für die Errichtung von nachhaltigen und klimaeffizienten Bauwerken zu erfordern.

Bei der Modularisierung, d. h. dem Prozess der Zerlegung eines Systems in unabhängige Subsysteme, werden meist mehrere Ziele verfolgt. Beispielsweise können eine schnelle Montage vor Ort durch die Verwendung großer Bauteile oder ganzer Raummodule (vgl. Abb. 1), kosten- und zeitgünstige Herstell- und Logistikkonzepte durch die Verwendung leichter, in Serienfertigung hergestellter Einzelbauteile oder möglichst geringe Treibhausgasemissionen während der Herstellphase genannt werden [19]. Oftmals findet bei der Modularisierung eine Mehrzieloptimierung mit der Lösung eines multikriteriellen Problems statt; es sollen mehrere, nicht selten widersprüchliche Ziele bestmöglich erfüllt werden.

2 Konzept einer standardisierten Schnittstelle zwischen stabförmigen Betonbauteilen modularer Tragwerke

Die Skelettbauweise ist durch einen einfachen Aufbau im Grund- und Aufriss bestehend aus lastabtragenden, linien-/stabförmigen Betonbauteilen (Träger und Stützen) gekennzeichnet [20] und findet überwiegend im Hallen- und Geschossbau Anwendung. Die modulare Skelettbauweise ist durch eine Zerlegung monolithischer Rahmen und einer Unterteilung einzelner stabförmiger Bauteile in segmentäre Bauteile geprägt. Die Zerlegung von Tragstrukturen führt zu Diskontinuitäten auf Bauteilebene, wobei mehrere Anforderungen an

diese Diskontinuitäten bestehen [9]. Sogenannte Schnittstellen zwischen tragenden Elementen und Modulen, die zu physischen Verbindungen ausgearbeitet werden müssen, sind zu entwickeln und zu erforschen [9]. Diese Verbindungen müssen vollständig lösbar sein, um den Austausch, den Rückbau und die Wiederverwendung der Betonelemente zu ermöglichen [9]. Um insbesondere die Standsicherheit eines Tragwerks sicherzustellen, sind lösbare formschlüssige Verbindungen (Verzahnungen, Verschraubungen, Passfedern, Beschläge etc.) auch in Kombination mit einer Vorspannung in die Bauteillängsrichtung zu wählen; eine reine kraftschlüssige Verbindung ist meist nicht ausreichend. Abbildung 2 zeigt die konzeptionelle Idee einer Schnittstelle in der Stoßfläche eines stabförmigen Tragelements (kurz: Elements) aus Beton. Durch eine mehrfache Aneinanderreihung von Elementen in die Längsrichtung und eine durchgängige Spanngliedführung entsteht ein vorgespanntes Bauteil.

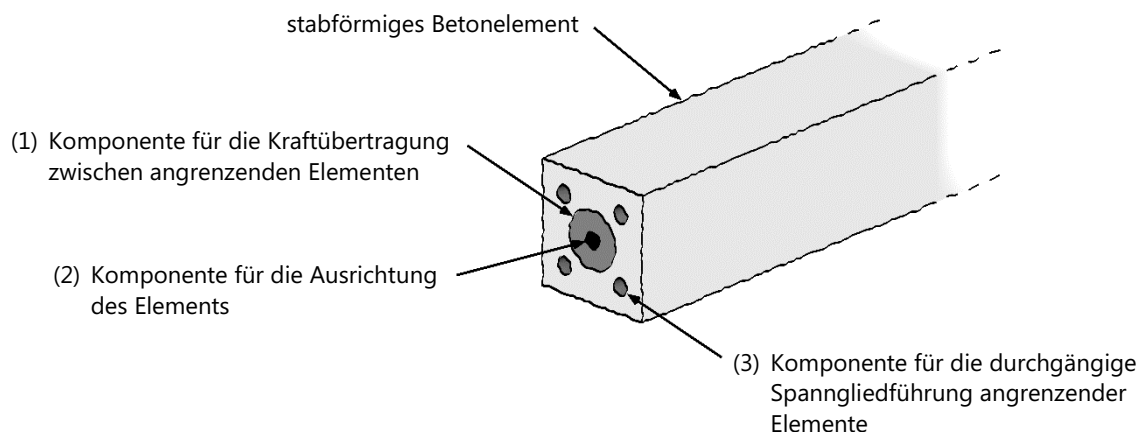


Abb. 2: Schematische Darstellung der Schnittstelle mit den einzelnen Komponenten für die Verbindung stabförmiger Tragelemente; nach [9]

In vorgenannter Abbildung 2 sind drei wesentliche Anforderungen an eine Schnittstelle zwischen zwei Betonelementen zu erkennen, die im Nachfolgenden als Komponenten bezeichnet werden: (1) Komponente der Kraftübertragung zwischen angrenzenden Elementen, (2) Komponente der Ausrichtung bzw. Justage des angefügten Elementes und (3) Komponente der durchgängigen/kontinuierlichen Spanngliedführung zwischen angrenzenden Elementen [9]; wobei in der Abbildung 2 beispielhafte Ausprägungen der Komponenten dargestellt sind.

Bei der Querschnittsbemessung wird meist eine möglichst geringe Bewehrungsmenge der einzelnen Stützen oder aller Rahmen nach dem Grundsatz einer wirtschaftlichen Bemessung mit dem Ziel eines möglichst geringen Werkstoffeinsatzes nach den einschlägigen Regelwerken angestrebt. Bei der Festlegung der Querschnittsabmessungen und der Bewehrungsmenge der Betonelemente eines modularen Tragwerks erfolgt keine wirtschaftliche Bemessung und Optimierung im klassischen Sinne. Es erfolgt vielmehr eine Vereinheitlichung der Betonelemente einschließlich der Bewehrungsführung, der Schnittstellen bzw. Verbindungen und der Betongüte mit einer Festschreibung von Parameterwerten für eine begrenzte oder gar unbegrenzte Zeitdauer mit dem Ziel, ein möglichst effizientes Gesamtsystem hervorzubringen [9, 21]. Das Gesamtsystem entspricht dabei nicht einem einzelnen Gebäude, sondern einer Vielzahl an Gebäuden, die mit demselben Baukastensystem, d. h. einer Sammlung unterschiedlicher Bausteine, errichtet werden können [9, 22]. Das Ziel der Baukastenstrategie ist es, die geforderten Varianten eines Gebäudetyps (Logistikhalle, Bürogebäude etc.) mit möglichst wenigen unterschiedlichen Bausteinen abzubilden [10]. Abbildung 3 zeigt den Aufbau des Gesamtsystems mit einer Aufteilung in sechs Betrachtungsebenen. Es erfolgt eine Unterteilung in Module (1.), d. h. Gruppen mit Bauteilen (2.), die gleichen Eigenschaften und Funktionen aufweisen, wobei sich diese Bauteile aus kleineren Tragelementen (3.) zusammensetzen können. Die bewehrten Betontragelemente können in einen Betonkörper und eine Bewehrungsführung aufgeteilt werden und stellen Komponenten (4.) des

Systems dar. Auf der untersten Ebene des Systems, der Baustoffebene (5.), erfolgt eine Unterteilung des Betonkörpers und der Bewehrungsführung entsprechend den Werkstoffen und Ausgangsstoffen. Durch den Einsatz modularer Bestandteile (Regelbestandteile) mit festgelegten und ggf. bereits standardisierten Eigenschaften und Merkmalen entstehen reine modulare Konstruktionen, während bei einer Kombination mit nicht-modularen Bestandteilen (Sonderbestandteile), die bei einzelnen Projekten individuell verwendet werden, Mischkonstruktionen entstehen. [9]

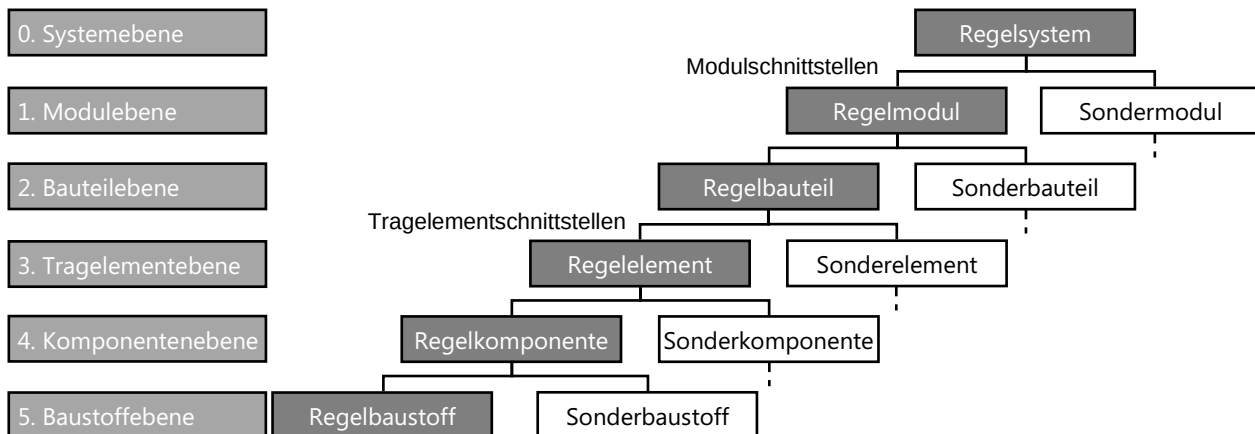


Abb. 3: Unterteilung eines Gesamtsystems gültig für Tragwerke aus Betonbauteilen; nach [9]

In der vorgenannten Abbildung 3 ist erkennbar, dass Schnittstellen bzw. Verbindungen zwischen den Bestandteilen des Systems vorliegen. So sind beispielsweise Tragelementschnittstelle (vgl. Abb. 2) an den Fügeflächen erforderlich, um die Aneinanderreihung einzelner Tragelemente zu einem Bauteil zu ermöglichen.

Das in Abbildung 3 gezeigte Schema ist überwiegend auf Tragwerke des Hochbaus, bestehend aus stabförmigen druck- und biegebeanspruchten Bauteilen, anwendbar. Scheiben- und plattenartig beanspruchbare Bauteile (Wände, Decken, Dächer) sowie Aussteifungskerne aus Beton stellen eine Herausforderung bei der Entwicklung demontabler Bauweisen dar und sind gesondert zu betrachten.

3 Beispielhafte Modularisierung einer Halle

3.1 Modularisierung und Baukastenoptimierung

Im Rahmen dieses Beitrags werden Hallenbauten ohne Kranbahn betrachtet, die meist in Skelett- und Mischbauweise errichtet werden. Abbildung 4 zeigt eine beispielhafte einschiffige Halle mit einem Satteldachbinder. Die Aussteifung der Halle erfolgt, wie im Hallenbau üblich, durch eingespannte Stützen [23]. Die Stützhöhe – gemessen von der Oberkante des Fundaments bis zur Unterkante des Binder – beträgt 7,0 m, der Binderabstand 6,0 m und die Spannweite des Binders 25,0 m.

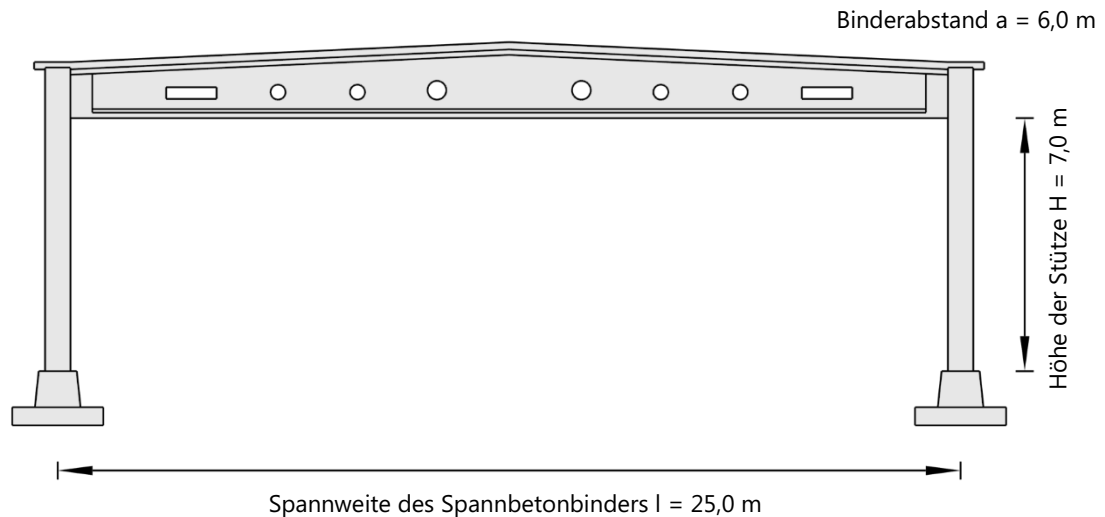


Abb. 4: Beispielhafte einschiffige Halle mit Satteldachbinder

Nach den Tragfähigkeitstabellen der Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilbau e. V. (FDB) [23] kann bei einer Dachlast von $2,5 \text{ kN/m}^2$, den in den Tragfähigkeitstabellen zugrunde gelegten Windlasten, den Eigenlasten der Stütze und des Binders sowie den vorgenannten Abmessungen der Halle ein Querschnitt der Innenstützen von $400 \text{ mm} \times 600 \text{ mm}$ als Eingangsgröße für die Bemessung in monolithischer Bauweise angenommen werden. In Abbildung 5a ist eine monolithische Stütze der Halle mit einem Köcherfundament und einer Auflagerung für den Spannbetonbinder mit einer Gabellagerung dargestellt.

Abbildung 5b zeigt eine modularisierte und segmentierte Stütze, wobei die beiden wesentlichen Ziele der Modularisierungsstrategie der Stützen mit dem übergeordneten Grundprinzip der Modularisierung „Unterteilung in Bereiche mit gleichen Eigenschaften oder Funktionen“ – ohne Wertigkeit der Reihenfolge – wie folgt lauten: Ermöglichung der Wiederverwendung der Betonelemente durch (1) den Einsatz lösbarer Verbindungen zwischen gefügten Elementen und (2) die Festlegung einheitlicher Abmessungen sowie weiterer Eigenschaften der Elemente.

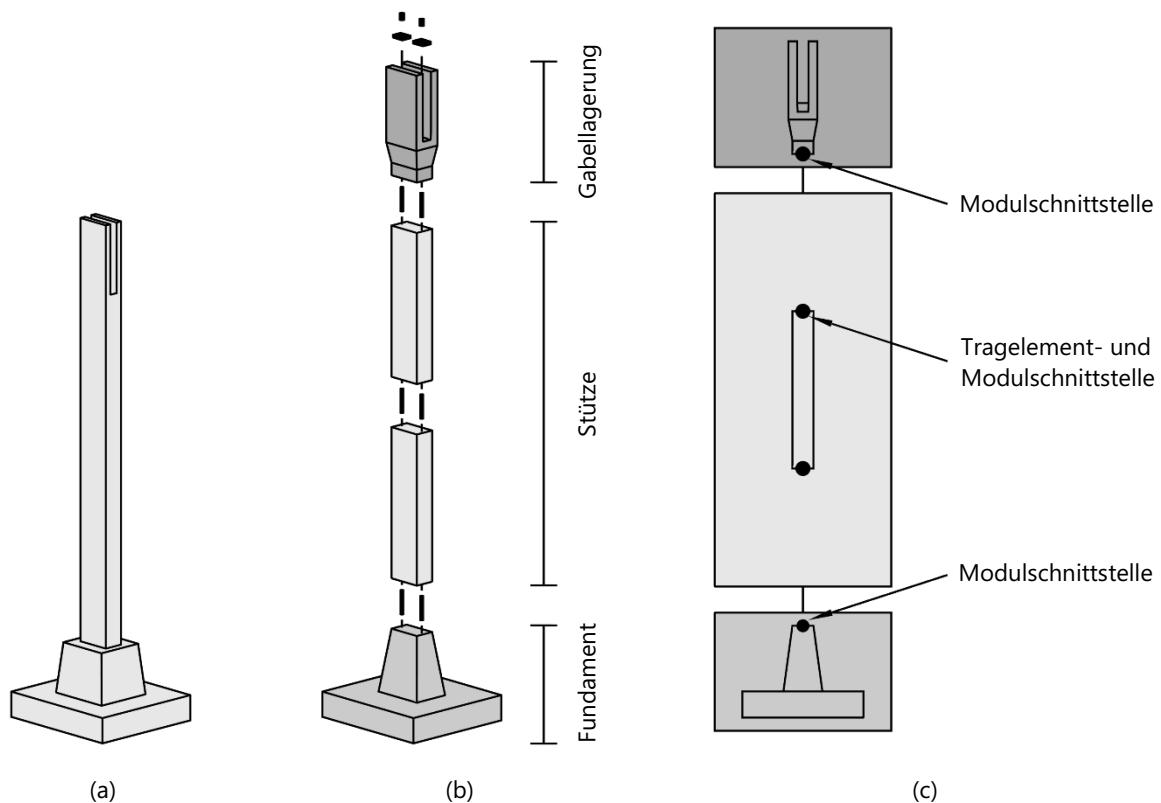


Abb. 5: (a) Monolithische Stahlbetonstütze mit Köcherfundament und Gabellagerung, (b) modularisierte, segmentierte Stütze mit angeschlossenen Bauteilen, verbundloser Vorspannung und lösbaren Verbindungen, (c) Module und Schnittstellen der segmentierten Stütze

Da sich die modularen Stützen aus mehreren Tragelementen und Bauteilen zusammensetzen, ist eine Vorspannung in die Bauteillängsrichtung erforderlich, die als verbundlose Vorspannung mit einem Stabspannverfahren realisiert wird. Die Ermittlung des Stützenquerschnitts und der Menge des Spannstahls erfolgt hier nicht auf Grundlage der tatsächlich vorliegenden Einwirkungen am Bauteil, sondern ist das Ergebnis der Baukastenoptimierung für Hallen mit den in Tabelle 1 festgelegten Größen.

Tab. 1: Eingangsgrößen und Abstufungen für die Baukastenoptimierung von Hallen

Abmessungen	Lasten	Werkstoffe
Höhe: 4,0 m, 7,0 m, 10,0 m	Eigenlasten: Stütze, Binder	Betonfestigkeitsklasse: C35/45
Binderabstand: 5,0 m, 6,0 m, 7,5 m	Dachlast (Ausbaulast): $g_k = 2,00 \text{ kN/m}^2$	Betonstahl: B500B
Spannweite Binder: bis zu 25,0 m	Schneelast: $s_k = 1,50 \text{ kN/m}^2$	Spannstahl: St 950/1050
-	Windlast: $w_k = 0,65 \text{ kN/m}^2$	-

Aus einer parametrisierten Bemessung entsprechend Eurocode 2 [24, 25] folgt als Ergebnis der Baukastenoptimierung ein möglichst einheitlicher Stützenquerschnitt. Für nahezu alle Kombinationen der in Tabelle 1 aufgeführten Abstufungen ist ein Stützenquerschnitt von 400 mm × 700 mm möglich. Lediglich für eine Halle mit einer Stützenhöhe von 10,0 m und einem Binderabstand von 7,5 m ist ein Querschnitt von

500 mm × 800 mm erforderlich. Abbildung 6 zeigt das Ergebnis der parametrisierten Bemessung mit einer Darstellung des Tragelements mit den festgelegten Abmessungen 400 mm × 700 mm × 3000 mm, der Schnittstelle und der Verbindung in den Fügeflächen sowie der Führung der Spannbewehrung. Die Tragelemente sind lediglich mit einer Mindestlängsbewehrung versehen, weisen jedoch aufgrund der Positionierung des Verbindungsdetails eine höhere Querkraftbewehrung im Vergleich zum monolithischen Bauteil auf.

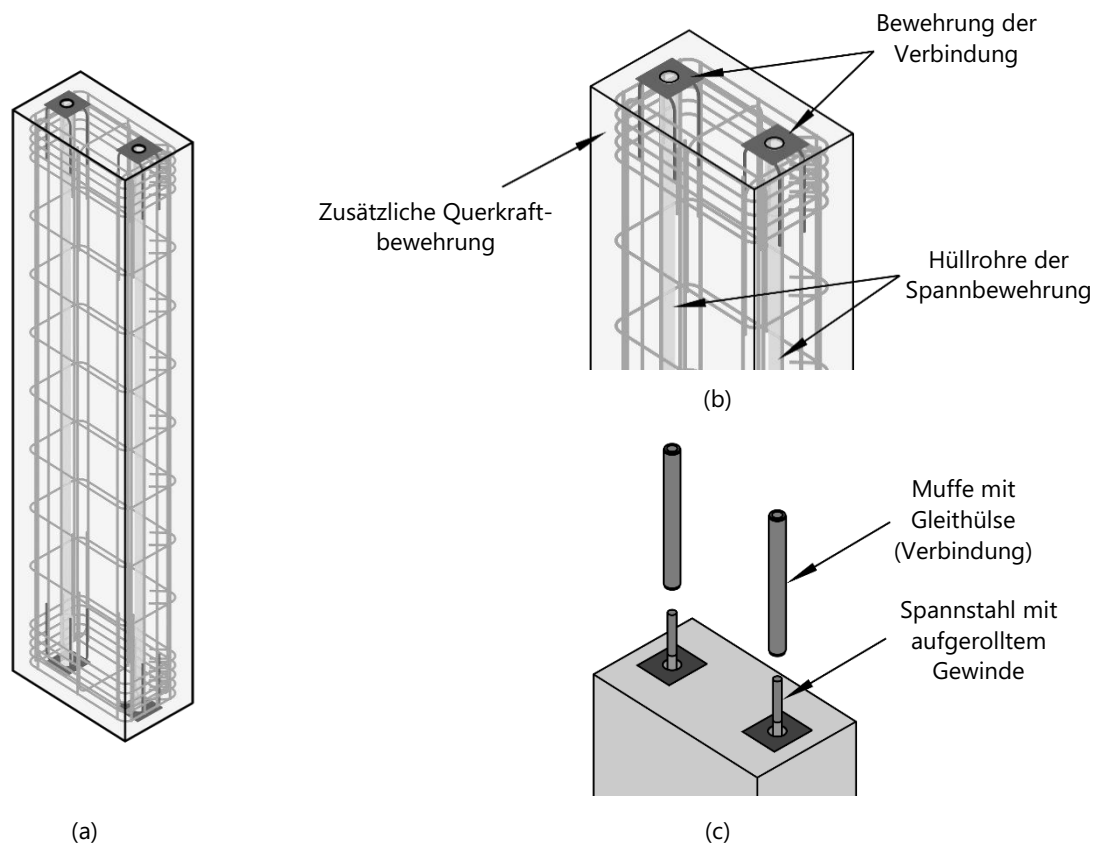


Abb. 6: (a) Vereinfachtes Tragelement mit Schnittstellen und Bewehrungsführung, (b) Detail: Schnittstelle, (c) Explosionszeichnung: Spannstäbe und Muffenkopplung

Durch die Überlagerung der Komponenten „Kraftübertragung“ (1) und „Spanngliedführung“ (3) entsprechend der konzeptionellen Idee der Schnittstelle (vgl. Abb. 2), ist eine Reduktion der Komplexität der Schnittstelle möglich. Es erfolgt eine Kopplung der Spannstäbe mit einer Muffe, die gleichzeitig als querkraftübertragendes Bauteil fungiert. Zudem dient die Flucht eines Spannkanaals als Bezug für die Festlegung von Toleranzen. Durch diese Definition der Komponente „Ausrichtung“ (2) wird die Fügbarkeit der Tragelemente sichergestellt.

3.2 Bewertung der Nachhaltigkeit und Klimaeffizienz

Bei der Bewertung der Nachhaltigkeit und Klimaeffizienz eines Gebäudes wird u. a. das Ziel verfolgt, die umweltbezogene, soziale und ökonomische Qualität eines Bauwerks darzulegen [26]. Im Folgenden wird aufgrund der beschränkten Datenlage lediglich eine Bewertung der umweltbezogenen Qualität (Ökologie) der aufgezeigten modularen Bauweise und ein Vergleich mit der monolithischen Bauweise vorgenommen. Hierzu werden beispielhafte Annahmen getroffen, die nachfolgend erläutert werden.

Die wirtschaftliche Gesamtnutzungsdauer für Lager- und Logistikhallen beträgt zwischen 15 und 40 Jahre [27]. Bei einer entsprechenden Charakteristik des Objekts und einer Drittverwendungsfähigkeit ist von längeren Nutzungsdauern auszugehen [27]. Der gesamte Betrachtungszeitraum für die Bewertung der Ökologie

wird in folgendem Beispiel zu 40 Jahren angenommen. In diesem Betrachtungszeitraum ist von einer Erstnutzung (1. Betrachtungszeitraum) an einem Ort und einer weiteren Nutzung der Tragelemente des modularen Systems nach 20 Jahren (2. Betrachtungszeitraum) an einem zweiten Ort auszugehen. Beim monolithischen Gebäude hingegen wird die Annahme getroffen, dass das Nutzungsende der Halle nach 20 Jahren erreicht ist und durch die Änderung des Bedarfs eine kleinere Halle mit einer Höhe von nur 4 m an einem zweiten Ort zu errichten ist. Abbildung 7 zeigt schematisch den Herstellprozess, die Errichtung der Stützen der ersten beispielhaften Halle, die Demontage bzw. den Abriss sowie die Errichtung der Stützen des zweiten Gebäudes.

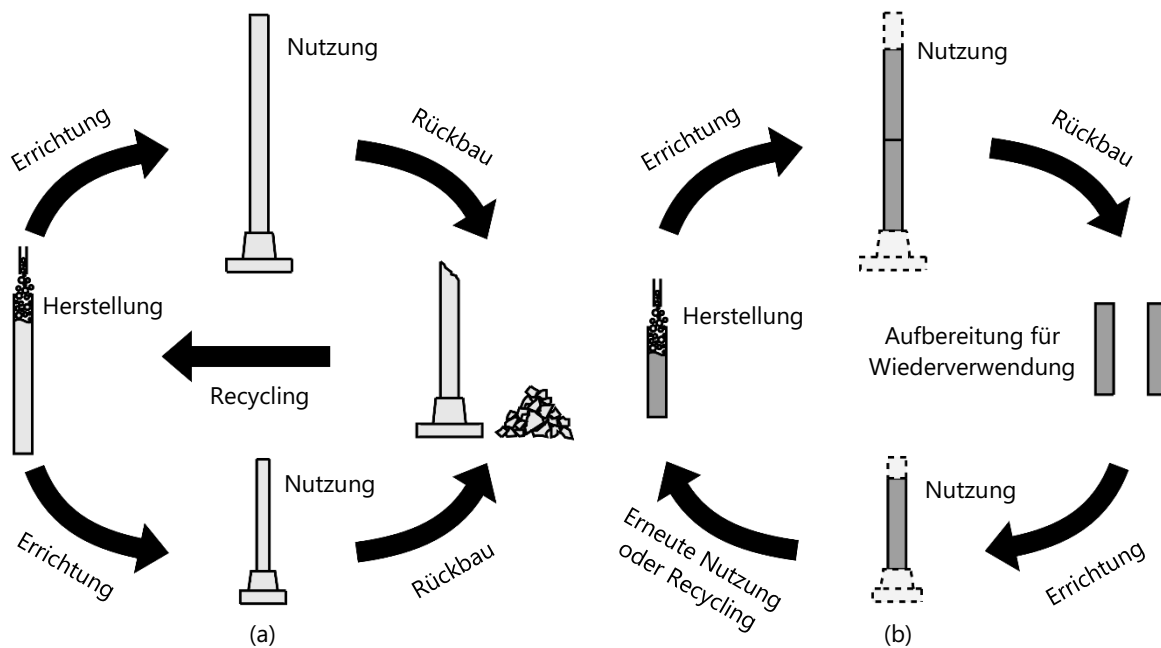


Abb. 7: Lebenszyklus der Stützen beider Betrachtungszeiträume: (a) Monolithische Bauweise, (b) modulare Bauweise

Es wird angenommen, dass die Spannbewehrung des modularen Gebäudes bei der Errichtung im zweiten Betrachtungszeitraum nicht erneut verwendet werden kann. Tabelle 2 fasst die Annahmen für die ökologische Betrachtung zusammen. Es werden lediglich die Stützen als Bauteile, ohne Fundamente und Gabelagerungen, betrachtet (vgl. Abb. 5b).

Tab. 2: Kennwerte der betrachteten Gebäude in modularer und monolithischer Bauweise

	Modulare Bauweise	Monolithische Bauweise
Gesamter Betrachtungszeitraum	40 Jahre	
1. Betrachtungszeitraum	20 Jahre	
Abmessungen der Halle	60 m x 25 m x 7 m	
Binderabstand	6 m	
Stützenquerschnitt	400 mm x 700 mm	400 mm x 600 mm
Beton C35/45	43 m³	37 m³
Betonstahl B500B	1,0 t	5,3 t
Spannstahl St 950/1050	1,3 t	-
2. Betrachtungszeitraum	20 Jahre	
Abmessungen der Halle	30 m x 15 m x 4 m	
Binderabstand	5 m	
Stützenquerschnitt	400 mm x 700 mm	400 mm x 400 mm
Beton C35/45	14 m³ (im 1. Zeitraum enthalten)	8 m³
Betonstahl B500B	0,3 t (im 1. Zeitraum enthalten)	0,5 t
Spannstahl St 950/1050	0,4 t	-

Bei der nachfolgenden Analyse ausgewählter Indikatoren wird lediglich eine Betrachtung der in Tabelle 2 aufgeführten Werkstoffe durchgeführt, da keine ausreichende Datengrundlage für die Bewertung des Verbundwerkstoffs Stahlbeton vorliegt. Die Daten für die Analyse entstammen der ÖKOBAUDAT-Datenbank [28–30]. Die Kennwerte der Werkstoffe für die einzelnen Informationsmodule (Phasen) entstammen *Environmental Product Declarations* (EPD) auf Grundlage der DIN EN 15804 [31]. In der Datenbank bzw. den Datensätzen wird der Hinweis gegeben, dass die Werte der Indikatoren des Werkstoffs Stahlbeton durch eine Kombination der Werte der Datensätze ‚Beton‘ und ‚Betonstahl‘ zu ermitteln sind. In Tabelle 3 sind die Ergebnisse der Indikatoren „totales globales Erwärmungspotenzial“, „totale nicht erneuerbare Primärenergie“ und „totale erneuerbare Primärenergie“ für die Informationsmodule der Module A bis C und die Vorteile sowie Belastungen außerhalb der Systemgrenze, Modul D, aufgeführt, wobei nicht alle Informationsmodule gemäß [26, 31] berücksichtigt wurden.

Tab. 3: Ausgewählte Indikatoren der betrachteten Gebäude in modularer und monolithischer Bauweise

Indikator	Totales globales Erwärmungspotenzial (GWP-total)		Totale nicht erneuerbare Primärenergie (PENRT)		Totale erneuerbare Primärenergie (PERT)	
Einheit	t CO ₂ -Äq.		GJ		GJ	
Bauweise	Modular	Monolith.	Modular	Monolith.	Modular	Monolith.
1. Betrachtungszeitraum						
A Herstellungsphase						
A1-A3 Herstellung	13,8	10,7	87,3	70,3	18,2	25,1
A4-A5 Transport, Einbau	0,4	0,3	5,1	4,4	0,7	0,6
B Nutzungsphase						
B1 Nutzung	-0,4	-0,5	-	-	-	-
C Entsorgungsphase						
C1-C4 Entsorgung	0,0	0,7	0,1	19,3	0,0	1,9
D Recyclingpotenzial						
D Recycling	-1,9	1,4	-16,9	7,8	1,5	-4,4
Zwischensumme	11,9	12,6	75,6	101,8	20,4	23,2
2. Betrachtungszeitraum						
A Herstellungsphase						
A1-A3 Herstellung	1,1	2,0	10,5	11,6	1,3	3,5
A4-A5 Transport, Einbau	0,0	0,1	0,0	0,9	0,0	0,1
B Nutzungsphase						
B1 Nutzung	-0,1	-0,1	-	-	-	-
C Entsorgungsphase						
C1-C4 Entsorgung	0,8	0,2	12,4	2,9	2,1	0,4
D Recyclingpotenzial						
D Recycling	-0,8	0,1	-9,4	0,0	-3,0	-0,7
Zwischensumme	1,0	2,3	13,5	15,4	0,4	3,3
Gesamter Betrachtungszeitraum						
Summe	12,9	14,9	89,1	117,2	20,8	26,5

Die Berechnung des CO₂-Äquivalents sowie des Primärenergiebedarfs lässt eine Einschätzung und einen Vergleich der beiden Bauweise sowie der beispielhaften Gebäude in den gewählten Betrachtungszeiträumen in Bezug auf die Ökologie zu. Tabelle 3 zeigt auf, dass die Herstellung der Tragelemente im ersten Betrachtungszeitraum für das modulare Gebäude mit rund 30 % höheren CO₂-Emissionen (CO₂-Äquivalent) im Vergleich zu den Bauteilen der monolithischen Bauweise verbunden ist. Aufgrund der Vorspannung der modularen, segmentären Stützen, der daraus folgenden geringeren erforderlichen Menge an Betonstahl im Vergleich zur monolithischen Bauweise und des guten Recyclingpotenzials des Spannstahls – gemäß der ÖKO-BAUDAT-Datenbank – liegen über den gesamten Betrachtungszeitraum geringere kumulierte Emissionen der modularen Bauweise vor. Hierbei ist zu erwähnen, dass zusätzliche Emissionen aus der Errichtung, dem Transport, der Instandhaltung und Instandsetzung, dem Austausch, der Modernisierung und weiteren Prozessen,

die aus der Eigenart der beiden betrachteten Bauweisen herrühren, unberücksichtigt bleiben. Außerdem ist Tabelle 3 erkennbar, dass der gesamte Energiebedarf (nicht erneuerbare und erneuerbare Primärenergie) der modularen Bauweise aufgrund einer deutlich geringeren Menge an Betonstahl sowohl im ersten als auch im zweiten Betrachtungszeitraum – und damit auch über den gesamte Betrachtungszeitraum gesehen – geringer ist; im Vergleich zur monolithischen Bauweise.

Für eine Einordnung der beispielhaften Berechnungen ist zu erwähnen, dass die Herstellung (Module A1 bis A3) ca. 70 bis 80 % der CO₂-Emissionen der gesamten Herstellungsphase (Modul A) einnehmen. Der Transport und der Einbau bzw. die Montage nehmen somit rund 20 bis 30 % der CO₂-Emissionen der Herstellungsphase ein. Dabei betragen die CO₂-Emissionen der Zementproduktion im Mittel bereits ca. 60 % aller Emissionen der Herstellung (Module A1 bis A3) [32]. Im vorliegenden Fall sind für die beiden betrachteten modularen Gebäude CO₂-Emissionen aus der Betonherstellung (Module A1 bis A3) von rund 64 % und für die monolithischen Gebäude CO₂-Emissionen aus der Betonherstellung von rund 78 % bezogen auf die jeweiligen gesamten CO₂-Emissionen der Module A1 bis A3 festzustellen. Es kann ergänzt werden, dass die Herstellung und Errichtung eines Gebäudes (Modul A) ca. 40 % der CO₂-Emissionen und die Nutzung (Modul B) ca. 60 % umfassen; bezogen auf einen üblichen Betrachtungszeitraum von 50 Jahren [32]. Die in Tabelle 3 aufgeführte CO₂-Aufnahme des Betons (negatives Vorzeichen) in der Nutzungsphase bezieht sich auf die Karbonatisierung.

4 Schlussfolgerungen und Empfehlungen

Die modulare Bauweise birgt durch die Zerlegung monolithischer Strukturen und der Überführung der Bauteile in ein Baukastensystem Vor- und Nachteile, die im Folgenden zusammenfasst werden. Zudem erfolgt eine kritische Betrachtung der Ergebnisse dieses Beitrags.

- Durch die Vorspannung von Stützen kann die Menge des Betonstahls gegenüber einer schlaff bewehrten Stütze deutlich reduziert werden; unabhängig von der Zerlegung der Stützen in kleinere Tragelemente. Hierdurch können CO₂-Emissionen sowie der erforderliche Primärenergiebedarf mit einer Betrachtung der relevanten Phasen über den gesamten Lebenszyklus eines Bauwerks reduziert werden. Aus dieser Folgerung kann ein Forschungsbedarf verbundlos vorgespannter Stützen – in modularer und monolithischer Bauweise – abgeleitet werden.
- Durch die Modularisierung und Segmentierung von Bauteilen kann eine Wiederverwendung von Anfang an mitgedacht werden. Im Rahmen der „Frühen Phase“ der Produktentwicklung sind bei der Entwicklung eines Baukastensystems der Bedarf und die Einsatzmöglichkeiten wiederverwendbarer Bauteile zu berücksichtigen. Bei der Entwicklung von Baukastensystemen sind zudem die Umgebungsbedingungen vollständig zu erfassen. Neben den äußeren Einwirkungen und Expositionen ist beispielsweise auch die Baugrundbeschaffenheit zu berücksichtigen [9].
- Durch die Standardisierung von Tragelementen und Bauteilen können positive Skaleneffekte in der Produktion erzielt werden. Der Rückbau, der Austausch, die Vorbereitung für die Wiederverwendung und das Recycling einheitlicher Tragelemente und Bauteile ist im Vergleich zu individuellen Bauteilen grundsätzlich kostengünstiger, schneller und unter Umständen auch klimaeffizienter, da durch die Vereinheitlichung Parameter in verschiedenen Prozessen für einen begrenzten oder gar unbegrenzten Zeitraum festgeschrieben werden können [9].
- Eine vollumfängliche Bewertung der Nachhaltigkeit mit einer Betrachtung ökonomischer und sozialer Aspekte ist vorzunehmen, um ein valides Ergebnis der Bewertung der Nachhaltigkeit zu erhalten. Beispielsweise ist bei einer ökonomischen Bewertung zu beachten, dass sich der personelle Aufwand bei der Errichtung eines modularen Gebäudes erhöht, da einzelne Bauteile aus mehreren Tragelementen in aufeinanderfolgenden Arbeitsschritten zusammengefügt werden müssen, jedoch gleichzeitig der personelle Aufwand durch die Möglichkeit der maschinellen Vorfertigung mit einer Herstellung kleiner, standardisierter Tragelemente reduziert wird. Zudem sind neben der Bewertung der

Nachhaltigkeit auch technische Bewertungen im Rahmen des Produktentwicklungsprozesses zur Beurteilung des Produktes und dem Vergleich mit bestehenden Produkten erforderlich. Hierbei ist zu beachten, dass Referenzen für den Vergleich richtig gewählt werden.

- In diesem Beitrag wurden ausgewählte Module im Lebenszyklus der betrachteten Gebäude und lediglich drei Indikatoren entsprechend den einschlägigen Regelwerken betrachtet. Für die Bewertung der Nachhaltigkeit wurden Mengen der erforderlichen Werkstoffe herangezogen. Grundsätzlich sind alle Module, weitere Indikatoren sowie detailliertere Betrachtungen vorzunehmen. Insbesondere der Anteil der Instandhaltung der modularen Bauweise ist bei der ökonomischen Bewertung genaustens zu untersuchen. Es ist von einem höheren Aufwand zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit verbundlos vorgespannter Tragwerke im Vergleich zu Bauweisen mit schlaffer Bewehrung oder Vorspannung mit Verbund auszugehen.
- Die der Erstellung eines EPD-Dokuments zugrundeliegenden Annahmen sind bei der Auswahl von Werten für die Bewertung der Nachhaltigkeit auf Bauteil- oder Bauwerksebene kritisch zu betrachten. Die anzuwendenden Normen lassen teilweise einen erheblichen Spielraum bei der Bestimmung der Werte zu. Beispielsweise beträgt gemäß den Herstellerangaben für das Modul D, Recyclingpotenzial, das gesamte globale Erwärmungspotenzial 349 kg CO₂-Äq. je Tonne Betonstahl [33], während für die Spannbewehrung ein Wert von -1496 kg CO₂-Äq. je Tonne Spannstahl angegeben wird [34]. Es wird empfohlen, das Modul D und die dort hinterlegten Kennwerte kritisch zu betrachten, damit die eigenen Annahmen bei der Ermittlung der Einzelwerte verschiedener Indikatoren im Einklang mit den Eingangsgrößen und Annahmen stehen, die bei der Erstellung des EPD-Dokument getroffen wurden.
- Die beispielhaft dargestellten Hallen sind aus Stützen und Fundamenten aus Beton, Spannbetonbindern und einem Dachaufbau aus Porenbetonplatten aufgebaut. Grundsätzlich kann ein nachhaltiges und klimaeffizientes Bauen durch die bedachte Kombination verschiedener Werkstoffe erreicht werden. Beispielsweise eignen sich für einen alternativen Aufbau Binder aus Brettschichtholz und Dachaufbauten aus Trapezblech mit Wärmedämmung. Durch eine hybride Bauweise können die Vorteile der einzelnen Werkstoffe kombiniert werden; insbesondere dann, wenn für ein Bauvorhaben angepasste Bauteile bzw. Sonderbauteile (vgl. Abb. 3) zum Einsatz kommen und eine Wiederverwendung der Bauteile aufgrund ihrer Individualität ausgeschlossen ist.

Bei der Entwicklung modularer Baukastensysteme sind zukünftig verschiedene Herausforderungen zu bewältigen. Es sind Fertigungstechniken, Fügeprozesse, die Bemessung von trockenen Lagerfugen und Stoßflächen außerhalb des im Eurocode 2 geregelten Bereichs, die erneute oder sogar mehrfache Nutzung von Tragelementen, die Weiterentwicklung von Regelwerken, die Änderung derzeit festgeschriebener Parameterwerte sowie die Änderung des Bedarfs und der Anforderungen an Tragwerke zu berücksichtigen und teilweise zu erforschen. Aufgrund dieser Vielzahl an Aspekten wird empfohlen, Baukastensysteme mit vereinheitlichten Tragelementen über allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen (abZ) und allgemeine Bauartgenehmigungen (aBG) für eine Anwendung in Deutschland zuzulassen. Darüber hinaus besteht auf europäischer Ebene die Möglichkeit, eine europäische technische Bewertung (ETA) zu erwirken.

5 Literatur

- [1] Bruckschlägl, S., Beuchle, G., Vollmer, E., Patarca, H. P., Volk, R., Schultmann, F., Dehn, F. (2023) Ergebnisse einer Machbarkeitsstudie für ganzheitliches Betonrecycling, doi=10.5445/IR/1000157027.
- [2] Reiners, J., Höffgen, J., Denu, M., Müller, C., Dehn, F. (2024) Der Einfluss von Recyclingmaterial auf die Eigenschaften von Beton. In: Bauen mit rezyklierten mineralischen Baustoffen - Von der Ausnahme zur Regelbauweise: 20. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung, Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 19. März 2024. KIT Scientific Publishing, 31-43, doi=10.58895/ksp/1000167485-6.
- [3] Bundesgesetz (2019) Bundes-Klimaschutzgesetz. KSG.
- [4] Bundesgesetz (2012) Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen. (Kreislaufwirtschaftsgesetz - KrWG).
- [5] Dechantsreiter, U., Horst, P., Mettke, A., Asmus, S., Schmidt, S., Knappe, F., Reinhardt, J., Theis, S., Jens Jürgen, L. (2015) Instrumente zur Wiederverwendung von Bauteilen und hochwertigen Verwertung von Baustoffen. Texte 93/2015. Umweltbundesamt.
- [6] Heyn, S., Mettke, A. (2008) Rückbau industrieller Bausubstanz – Großformatige Betonelemente im ökologischen Kreislauf. Teil 0: Zielstellung und Zusammenfassung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Forschungsvorhabens. Schlussbericht zum Forschungsvorhaben.
- [7] Bundesministerium des Innern, für Bau und Heimat (2018) Baufachliche Richtlinien Recycling. Arbeits-hilfen zum Umgang mit Bau- und Abbruchabfällen sowie zum Einsatz von Recycling-Baustoffen auf Liegenschaften des Bundes.
- [8] Albers, A., Rapp, S., Birk, C., Bursac, N. (2017) Die Frühe Phase der PGE - Produktgenerationsentwicklung. In 4. Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung 2017 (SSP) : Produktentwicklung im disruptiven Umfeld, Stuttgart, Deutschland, 28-29 Juni 2017. Beiträge zum Stuttgarter Symposium für Produktentwicklung. Fraunhofer Verlag.
- [9] Manny, A. N. B. (2024) Ein Beitrag zur Entwicklung standardisierter Schnittstellen für den modularen Betonfertigteiltbau. Karlsruher Institut für Technologie (KIT), doi=10.5445/IR/1000171212.
- [10] Bender, B., Gericke, K. (2021) Pahl/Beitz Konstruktionslehre. Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [11] Erixon, G. (1998) Modular function deployment. A method for product modularisation. Zugl.: Stockholm, Kungl. Tekn. Högsk., Diss., 1998. TRITA-MSM 98,1. The Royal Inst. of Technology Dept. of Manufacturing Systems Assembly Systems Division, Stockholm.
- [12] Koppenhagen, F. (2004) Systematische Ableitung modularer Produktarchitekturen. Komplexitätsreduzierung in der Konzeptphase. Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Arbeitsbereich Produktionswirtschaft, Diss., 2004. Berichte aus der Konstruktionstechnik. Shaker, Aachen.
- [13] Lindemann, U., Maurer, M. (2006) Entwicklung und Strukturplanung individualisierter Produkte. In Individualisierte Produkte. Komplexität beherrschen, in Entwicklung und Produktion, U. Lindemann, R. Reichwald and M. Zäh, Eds. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg, 41-62, doi=10.1007/3-540-34274-5_4.
- [14] Lindemann, U., Reichwald, R., Zäh, M. (Hrsg.) (2006) Individualisierte Produkte. Komplexität beherrschen, in Entwicklung und Produktion. VDI-Buch. Springer, Berlin, Heidelberg, doi=10.1007/3-540-34274-5.
- [15] Stone, R. B., Wood, K. L., Crawford, R. H. (2000) A heuristic method for identifying modules for product architectures. Design Studies 21, 1, 5-31, doi=10.1016/S0142-694X(99)00003-4.

- [16] Steinle, A., Bachmann, H., Tillmann, M. (2018) Bauen mit Betonfertigteilen im Hochbau. Bauingenieur-Praxis. Ernst & Sohn, A Wiley Brand, Berlin.
- [17] Tillmann, M. (2019) Knotenverbindungen für Betonfertigteile. Hinweise für Bemessung und Konstruktion.
- [18] o. V. (2011) Formschlüssig stapelbarer Beton-Körper mit Natursteinen, Verfahren zur Herstellung und deren Verwendung sowie eine darauf hergestellte Mauer, Patent: DE 10 2009 051 957 A1.
- [19] Mark, P., Lanza, G., Lordick, D., Albers, A., König, M., Borrmann, A., Stempniewski, L., Forman, P., Frey, A. M., Renz, R., Manny, A. (2021) Vom Handwerk zur individualisierten Serienfertigung. Bautechnik 98, 3, 243-256, doi=10.1002/bate.202000110.
- [20] Albers, A., Kempf, C., Renz, R., Spadinger, M., Stempniewski, L., Manny, A. (2020) Intelligente Modularisierung für den skalierbaren Betonbau durch Adaption der Methoden zur Baukastenentwicklung. BetonWerk International, 3, 27.
- [21] Koller, R. (1994) Standardisieren von Produkten. In Konstruktionslehre für den Maschinenbau, R. Koller, Ed. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 282-305, doi=10.1007/978-3-662-08165-5_7.
- [22] Nasvytis, A. (1953) Die Gesetzmäßigkeiten kombinatorischer Technik. Wissenschaftliche Normung, Schriftenreihe. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- [23] Hierlein, E., Tillmann, M. (2021) Betonfertigteile im Geschoss- und Hallenbau. Grundlagen für die Planung.
- [24] DIN EN 1992-1-1/NA:2013-04. Nationaler Anhang - National festgelegte Parameter - Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau. Beuth Verlag GmbH, Berlin, doi=10.31030/1946465.
- [25] DIN EN 1992-1-1:2011-01. Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; Deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010. Beuth Verlag GmbH, Berlin, doi=10.31030/1723945.
- [26] DIN EN 15643:2021-12. Nachhaltigkeit von Bauwerken - Allgemeine Rahmenbedingungen zur Bewertung von Gebäuden und Ingenieurbauwerken. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [27] Bienert, S., Wagner, K. (2018) Bewertung von Spezialimmobilien. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, doi=10.1007/978-3-8349-4738-3.
- [28] OEKOBAU.DAT (2022) Prozess-Datensatz: Betonstahl in Ringen und Betonstabstahl. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=b14811fa-c9ad-4073-9d8f-68ad1fcd4d1d&version=00.02.000&stock=OBD_2024_I&lang=de. Zugriff am 18.01.2025.
- [29] OEKOBAU.DAT (2023) Prozess-Datensatz: Beton der Fruckfestigkeitsklasse C35/45. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=90999905-ace2-49ee-90f0-f2a649c8989e&version=00.02.000&stock=OBD_2024_I&lang=de. Zugriff am 18.01.2025.
- [30] OEKOBAU.DAT (2023) Prozess-Datensatz: Spannstahl. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/datasetdetail/process.xhtml?uuid=231073e3-f6ab-44e1-8117-0d38b9c2e526&version=00.06.000&stock=OBD_2024_I&lang=de. Zugriff am 18.01.2025.
- [31] DIN EN 15804:2022-03. Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [32] Wang, G., Luo, T., Luo, H., Liu, R., Liu, Y., Liu, Z. (2024) A comprehensive review of building lifecycle carbon emissions and reduction approaches. City Built Enviro 2, 1, doi=10.1007/s44213-024-00036-1.

- [33] Baustahlgewebe GmbH (2022) Betonstahl in Ringen und Betonstabstahl. EPD-BSW-20210265-CBA1-DE. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/resource/sources/3b454b49-76ee-4160-b7d4-d8750712580d/Betonstahl_in_Ringen_und_Betonstabstahl_14846.pdf?version=00.01.000. Zugriff am 18.01.2025.
- [34] voestalpine AG (2023) Drawn Wire - Prestressing Wire and Strand. EPD-VOE-20230108-IBC2-EN. https://oekobaudat.de/OEKOBAU.DAT/resource/sources/ea34d5c5-fc16-49ec-9a42-2ce48bb6a7b9/Drawn_Wire_-_Prestressing_Wire_and_Strand_18886.pdf?version=00.03.000. Zugriff am 18.01.2025.

6 Autoren

Dr.-Ing. Agemar Manny

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe
agemar.manny@kit.edu

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
Gotthard-Franz-Straße 3
76131 Karlsruhe
frank.dehn@kit.edu

Net-Zero Concrete – Lässt er sich zukünftig in Betonfertigteilen realisieren?

Lukas Romanowski

Zusammenfassung

Der Zement- und Betonindustrie kommt bei den globalen Klimaschutzbewegungen und der Erfüllung des 1,5 °C-Ziels aus dem Pariser Klimaabkommen eine gewichtige Rolle zu. In diesem Symposiumsbeitrag werden der Status der Dekarbonisierung der Zement- und Betonindustrie in Deutschland betrachtet und Handlungsstrategien zur Dekarbonisierung von Betonfertigteilen diskutiert. Die Leitfrage ist dabei, welchen Beitrag die einzelnen Ansätze zur Dekarbonisierung liefern können und welche Herausforderungen bei der Umsetzung auftreten können. Ein besonderer Fokus wird dabei auf das Bauteildesign, den Einsatz klinkereffizienter Zemente und die Sequestrierung von Emissionen im Bauteil gelegt.

Schlagwörter: Nachhaltigkeit, Dekarbonisierung, Betonfertigteile, Sequestrierung, Bindemittel

Abstract

The cement and concrete industry plays a significant role in global climate protection movements and in achieving the 1.5 °C target of the Paris Climate Agreement. This symposium contribution examines the status of decarbonization of the cement and concrete industry in Germany and discusses strategies for the decarbonization of precast concrete elements. The guiding question is what contribution each approach can make to decarbonization and what challenges may arise in implementation. Special focus is placed on component design, the use of clinker-efficient cements, and the sequestration of emissions in the component.

Keywords: Sustainability, Decarbonization, Precast Concrete Elements, Sequestration, Binders

1 Allgemeines

Der anthropogene Klimawandel und seine möglichen Folgen gehören zu den größten Herausforderungen unserer Zeit. Bereits im Jahr 2017 erreichte die durch den Menschen verursachte Erderwärmung ein Niveau von ca. 1 °C gegenüber der vorindustriellen Zeit, wobei von einem weiteren Anstieg von 0,2 °C pro zukünftige Dekade auszugehen ist [1]. Wie Abb. 1 entnommen werden kann, würde die globale Erwärmung bei Fortführung des Kurses aus dem Jahr 2017 im Jahr 2040 1,5 °C erreichen. Das Jahr 2024 war bereits das erste Jahr in dem die globale Erwärmung im Durchschnitt über 1,5 °C lag [2]. Mittlerweile ist klar, dass die bisher umgesetzten Maßnahmen nicht ausreichen werden, um dieses Ziel zu erreichen. Aus einem Bericht des Weltklimarates kann entnommen werden, dass die weltweiten Emissionen bis zum Jahr 2030 gegenüber dem Stand von 2023 halbiert werden müssten, um das 1,5 °C noch erreichen zu können [3].

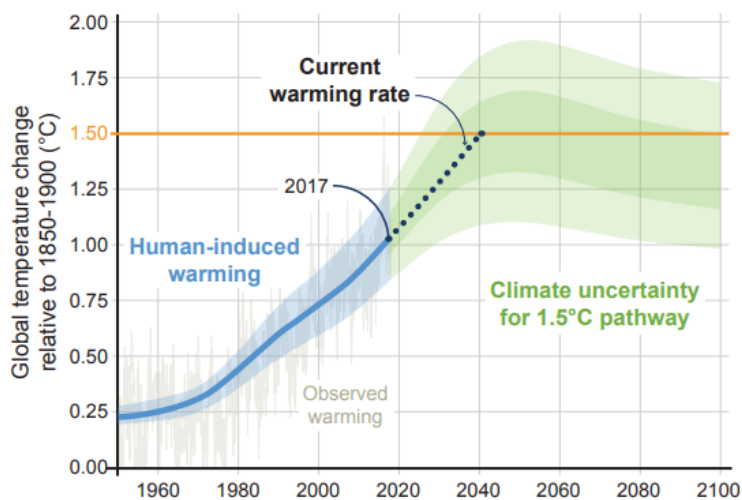


Abb. 1: Bei Beibehaltung der aktuellen CO₂-Emissionen wird die globale Erwärmung ca. im Jahr 2040 die 1,5 °C überschreiten [1].

Eine Begrenzung der Schäden an unserem Planeten und unserem Lebensraum erfordert also intensive Anstrengungen der Weltgemeinschaft. Dabei kommt auch der Zementindustrie eine gewichtige Rolle zu. Die Zementindustrie ist für 8 % der globalen CO₂-Emissionen verantwortlich [3]. Auch wenn dieser Anteil in Deutschland mit 2 % geringer ausfällt, [4], entspricht dies, wie Abb. 2 entnommen werden kann, 11 % der gesamten deutschen Industrieemissionen. Diese Zahlen verdeutlichen den Handlungsbedarf für alle Stakeholder in der Zement- und Betonindustrie sich intensiv mit Dekarbonisierungsstrategien für ihre Produkte auseinanderzusetzen.

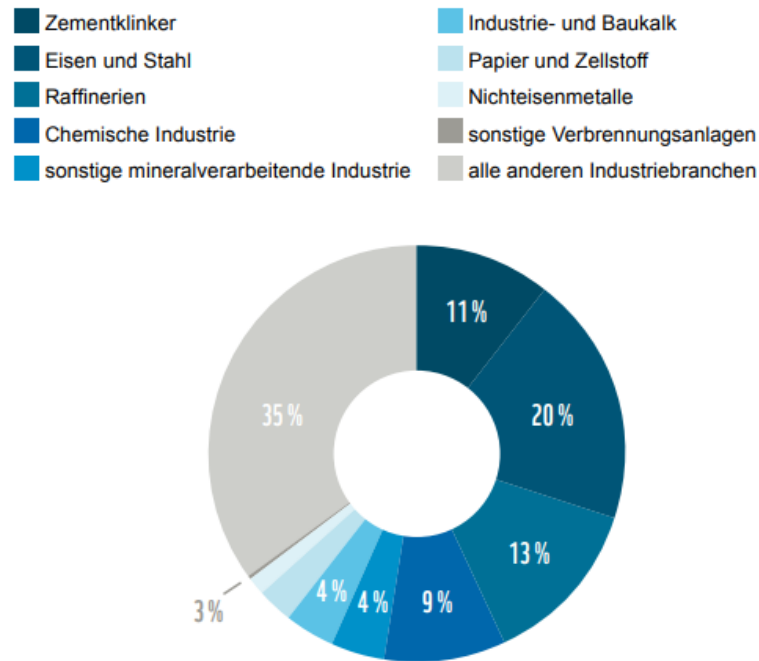


Abb. 2: Mit 11 % der deutschen Industrieemissionen ist die Herstellung von Zementklinker der drittgrößte Emittent von CO₂-Emissionen in der deutschen Industrie [4].

Auch wenn Zement das maßgebliche Bindemittel für die Herstellung von Betonen ist, haben Hersteller von Betonprodukten eine Vielzahl von Möglichkeiten und Ansätzen, um bereits heute und zukünftig CO₂-Emissionen zu reduzieren. Diese Möglichkeiten sollen in der Folge in diesem Symposiumsbeitrag diskutiert werden.

2 Die Absprungbasis: Pfade zur Dekarbonisierung und der Status Quo im Jahr 2025

Roadmaps zur Dekarbonisierung der Zement- und Betonindustrie wurden bereits von zahlreichen Institutionen, teils auf nationaler, teils auf internationaler Ebene erarbeitet. So veröffentlichten die Global Cement and Concrete Association (GCCA) im Jahr 2021 [5] und der Verein Deutscher Zementwerke (VDZ) im Jahr 2020 [6] jeweils ein Szenarien- und Strategiepapier. Aufgrund der vorwiegend nationalen Perspektive dieses Artikels ist insbesondere die Veröffentlichung des VDZ von Interesse. In dieser wurden zwei Szenarien unterschieden: Ein ambitioniertes Referenzszenario, bei dem State-of-the-Art-Technologien zum Einsatz kommen sollen und ein Szenario zur Klimaneutralität, das von der Umsetzung von unterschiedlichen technologischen Innovationen ausgeht. Letzteres Szenario ist für die Diskussion bezüglich der Herstellung von Betonfertigteilen mit Netto-Null-Emissionen von besonderem Interesse und kann in Abb. 3 eingesehen werden.

Szenario Klimaneutralität – CO₂-Minderung bis 2050

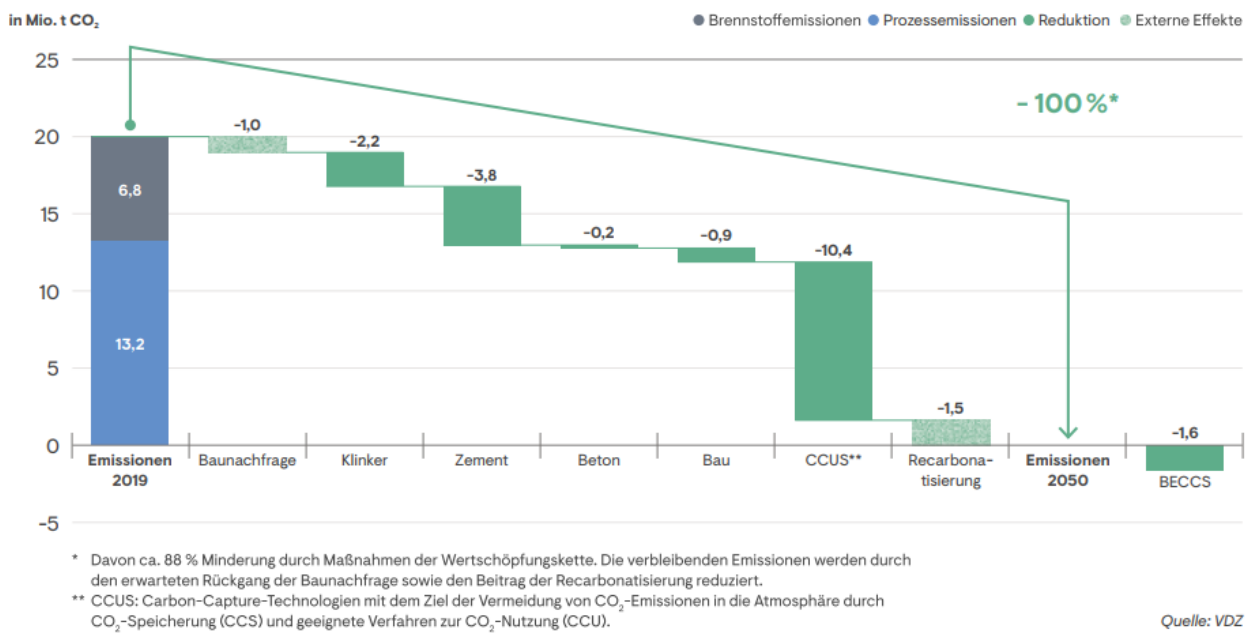


Abb. 3: Mögliches Szenario zur Dekarbonisierung der deutschen Zement- und Betonindustrie bis zum Jahr 2050. Die mit Abstand größten Potentiale werden in Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) gesehen [6].

Das größte Dekarbonisierungspotenzial wird dabei in Carbon Capture, Utilization and Storage (CCUS) prognostiziert. Aufgrund der Skalierbarkeit der Technologie wird diese einen signifikanten Beitrag zur Dekarbonisierung der Zement- und Betonindustrie beitragen müssen.

Jedoch gibt es viele valide Gründe CCUS als Lösungsstrategie kritisch zu betrachten. Die Hauptprobleme bei der Implementierung von Carbon Capture and Storage (CCS) und Carbon Capture and Utilization (CCU) sind hohe Kosten, technologische Herausforderungen, regulatorische Unsicherheiten, mangelnde wirtschaftliche Anreize und Umwelt- sowie Sicherheitsbedenken [7]. Eine detaillierte Betrachtung möglicher Kosten für CCS wurde von Budinis et al. [7] durchgeführt. Basierend auf den Preisen aus dem Jahr 2015 lag der Kostenbereich pro Tonne gespeichertes, transportiertes (Annahme: 250 km lange Pipeline) und verpresstes CO₂ zwischen 22,9 \$ und 156,5 \$. Aus unternehmerischer Sicht ist CCS ein kritisch zu betrachtender Use-Case, denn die Abscheidung von CO₂ generiert keine Produktivität oder Wertschöpfung. Wird fossiler Kohlenstoff in Form von CCU weiterverarbeitet, gelangt er am Ende der Nutzungskette zwangsläufig in die Atmosphäre, sodass es nur zu einer zeitlichen und örtlichen Verlagerung der Emissionen kommt [8].

Eine Förderung alternativer Dekarbonisierungsstrategien sollte basierend auf dieser Faktenlage im Interesse sämtlicher Zement- und Betonhersteller gegeben sein. Hersteller von Betonen sind bei ihrer Dekarbonisierung in einem gewissen Maße abhängig von ihren Lieferanten, insbesondere den Zementherstellern, haben jedoch durch die Freiheiten in der Rezepturgestaltung und den Herstellprozess auch eigene Hebel zur Reduktion von CO₂-Emissionen in der Hand.

Bevor diese Möglichkeiten im Zuge der nächsten Abschnitte diskutiert werden, soll jedoch zunächst der Status Quo bei den Emissionen bei der Betonherstellung betrachtet werden. Hierzu wird die Entwicklung von repräsentativen Werten für das Global Warming Potential (GWP) und deren Entwicklung über die letzten Jahre betrachtet [9-11]. Als Referenz werden hierfür EPDs des Informationszentrum Beton aus den vergangenen Jahren genutzt. Eine Übersicht der Entwicklung der GWP-Werte kann Tab. 1 entnommen werden. Je nach Druckfestigkeitsklasse konnten über einen Zeitraum von 10 Jahren die Emissionen zwischen 12,8 % und

17,9 % reduziert werden. Zur Erreichung der ambitionierten Klimaziele wird es hierbei in Zukunft einer schnelleren Dekarbonisierung bedürfen, wobei durch die zunehmende Nachhaltigkeitsanforderungen und Nachhaltigkeitsregulierungen auch von deutlicheren Marktanreizen für alle Unternehmen entlang der Wertschöpfungskette auszugehen ist.

Tab. 1: Entwicklung des GWP für durchschnittliche Betone aus EPDs des Informationszentrum Beton [9–11].

Druckfestigkeitsklasse	GWP [netto kg CO ₂ -Äq./m ³]			Reduktion 2023 zu 2013
	Referenzjahr 2023	Referenzjahr 2018	Referenzjahr 2013	
C20/25	157	178	191	17,8 %
C25/30	181	197	211	14,2 %
C30/37	196	219	232	15,5 %
C35/45	220	244	265	17,0 %
C45/55	273	286	313	12,8 %
C50/60	275	300	335	17,9 %

Welche Hebel zur Dekarbonisierung zur Verfügung stehen und welches Potenzial diese im Hinblick auf Fertigteile bieten könnten, wird im folgenden Abschnitt 3 thematisiert.

3 Strategische Überlegungen zur Dekarbonisierung aus Sicht eines Herstellers von Betonfertigteilen

3.1 Ressourceneffizientes Bauteildesign

Bevor die Möglichkeiten zur Dekarbonisierung durch intelligente und nachhaltige Betonrezepturen diskutiert werden, sollte einer der Kernvorteile beim Einsatz von Betonfertigteilen thematisiert werden. Durch eine Bauweise mit Betonfertigteilen werden gegenüber einer Ortbetonbauweise Ressourcen eingespart. Die kontrollierte Werksumgebung ermöglicht es last- und geometrieoptimierte Bauteile herzustellen und dabei in wirtschaftlichen Prozessen zu arbeiten. Weiterhin wird auch der Personaleinsatz und die Bauzeit auf der Baustelle reduziert. Die Vorteile des Bauens mit Fertigteilen werden in zahlreichen Publikationen thematisiert [12–14].

Insbesondere die Reduktion des Materialeinsatzes über die gesamte Prozesskette ist ein entscheidender Vorteil der Bauweise mit Betonfertigteilen bei der Realisierung einer ökologischen Nachhaltigkeit im Bauprojekt. Die Vermeidung von Materialeinsatz senkt nicht nur die CO₂-Emissionen, sondern schont auch wertvolle Primärressourcen. Dies macht diese Bauweise aus Sicht der Kreislaufwirtschaft vorteilhaft, folgt sie doch der Priorisierung der Abfallhierarchie aus dem Kreislaufwirtschaftsgesetz [16], die in Abb. 4 visualisiert ist.



Abb. 4: Abfallhierarchie gemäß des Kreislaufwirtschaftsgesetzes. Die Abfallvermeidung genießt hierbei die höchste Priorität. Die Reduktion des Materialeinsatzes ist eine mögliche Strategie zur Abfallvermeidung [16].

3.2 Einsatz klinkereffizienter Zemente

In den letzten Jahren gab es deutliche Verschiebungen im Klinkerfaktor der eingesetzten Zemente. Hierzu sei auf die in Abb. 5 dargestellten Daten verwiesen. Zunächst ist auffällig, dass bis zum Jahr 2020 die Menge der ausgelieferten Zemente zugenommen hat. In den Folgejahren kann ein Rückgang der Gesamtzementauslieferung festgestellt werden, was mit den Auswirkungen der Corona-Krise und des Ukraine-Kriegs, sowie der damit einhergehenden wirtschaftlichen Auswirkungen erläutert werden kann. Gestützt wird diese These auch von einem kontinuierlichen Rückgang der Investitionen der Zementindustrie seit 2019 [17].

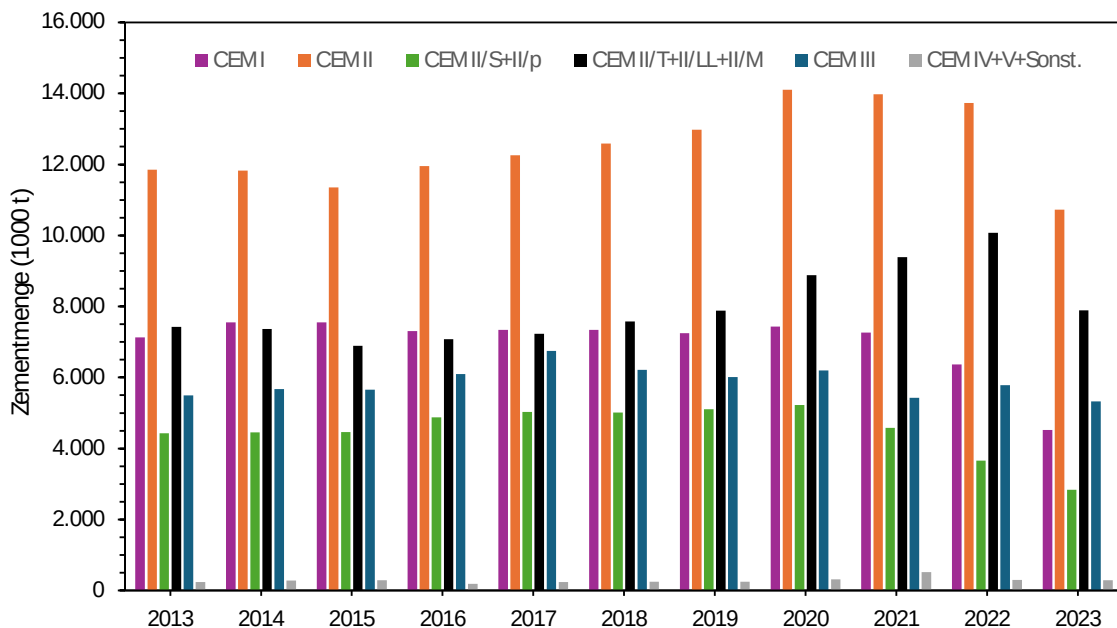


Abb. 5: Entwicklung des Inlandsversands der VDZ-Mitglieder zwischen 2013 und 2023. Diagramm erstellt auf Datenbasis aus [17].

Für die Interpretation der Auswirkungen auf die CO₂-Emissionen ist die Entwicklung der verwendeten Zementarten von Bedeutung. Dabei ist deutlich erkennbar, dass es einen starken Rückgang beim Versand von CEM I Zementen gab (ca. 37 %), während die Gesamtmenge der verwendeten CEM II- und CEM III-Zemente auf einem stabilen Niveau geblieben sind. Infolgedessen hat der Marktanteil der klinkerreduzierten Zemente deutlich zugenommen.

Bei der Herstellung von Betonfertigteilen wurden bisher vor allem Zemente mit einem hohen Klinkerfaktor, insbesondere CEM I-Zemente, eingesetzt, um frühzeitig höhere Druckfestigkeiten zu erreichen, die für niedrige Ausschalzeiten erforderlich sind und einen wirtschaftlichen Produktbetrieb ermöglichen [18]. Dies führt dazu, dass Betonrezepturen für Betonfertigteile häufig höhere CO₂-Emissionen verursachen als vergleichbare Transportbetonrezepturen für ähnliche Anwendungsfälle.

Mittlerweile etablieren sich jedoch klinkereffiziente CEM III/A 52,5 R-Zemente am Markt, die sich besonders für den Einsatz in CO₂-reduzierten Betonfertigteilen eignen [19, 20]. Derartige Zementprodukte bieten lokalen Betonfertigherstellern die Möglichkeit, effiziente CO₂-reduzierte Betonrezepturen zu erarbeiten. Allerdings könnte die zukünftige Verknappung von Hüttensanden aus der Stahlindustrie dazu führen, dass diese Produkte nur einem kleinen Teil des Betonfertigteilmärktes zur Verfügung stehen. Eine vielversprechende Alternative für die Zukunft könnte thermochemisch konditionierte Stahlwerkschlacke darstellen [21, 22]. Für Betonfertigteile mit Netto-Null-Emissionen werden klinkereffiziente Betone jedoch allein nicht ausreichen, es werden weitere Maßnahmen erforderlich sein.

3.3 Sequestrierung von Emissionen im Beton

Die in diesem Artikel bisher diskutierten Ansätze (CCUS, ressourceneffizientes Bauteildesign und klinkereffiziente Zemente) können in den kommenden Jahren zwar die Herstellung von deutlich CO₂-reduzierten Betonen ermöglichen, jedoch werden sie nicht ausreichen, um Betonfertigteile mit Netto-Null-Emissionen zu erreichen. Hierbei sei auch noch darauf hingewiesen, dass bei der Herstellung von Stahlbetonbauteilen durch die verwendete Stahlbewehrung zusätzlich Emissionen entstehen. Mögliche Ansätze zur technischen Kompensation dieser Emissionen innerhalb der Betonrezeptur umfassen die kontrollierte Karbonatisierung oder den Einsatz von CO₂-Senken in Beton.

(Re)Karbonatisierung ist eine natürlich in Zement (und Beton) auftretende Reaktion, die sich durch folgende vereinfachte Formel (1) ausdrücken lässt, [6]:



mit

Ca(OH) ₂	= Calciumhydroxid
CO ₂	= Kohlenstoffdioxid
CaCO ₃	= Calciumcarbonat
H ₂ O	= Wasser

Diese Reaktion hat positive Auswirkungen auf die Ökobilanz von Betonprodukten. Das tatsächliche Karbonatisierungspotenzial hängt jedoch von vielen Faktoren ab, wie z. B. dem Wasser/Zement-Wert (w/z-Wert), der Porosität, der Betonrezeptur, der Nutzungsdauer und der Aufbereitung am Ende des Lebenszyklus [23]. Die in [23] verglichenen Studien schätzen das Karbonatisierungspotenzial von Betons auf Werte zwischen 19 % und 38 %.

Die Geschäftsidee einer kontrollierten mineralischen Karbonatisierung von Beton wurde bereits in den vergangenen Jahren von einigen Unternehmen monetarisiert [24, 25]. Die Startups Neustark [26] und Zirkulit Beton [27] bieten technische Lösungen zur Karbonatisierung von Betonzuschlägen (z. B. Recyclingmaterialien), die in ihrer karbonatisierten Form wiederum in die Herstellung von Frischbeton integriert werden können. Dieser Ansatz fördert die Kreislaufwirtschaft, wobei die Karbonatisierungsrate auf wenige Prozent begrenzt ist und zusätzlicher Energieaufwand für die Behandlung der Zuschläge erforderlich ist.

In der Praxis stellt insbesondere die Produktion von Stahlbetonprodukten eine Herausforderung dar, da die Reaktion des Calciumhydroxids (Ca(OH)₂) zu Calciumcarbonat (CaCO₃) zu einem Abfall des pH-Wertes führt. Wenn die Karbonatisierungsfront die Stahlbewehrung erreicht, kann es bei gleichzeitiger Anwesenheit von Wasser und Sauerstoff zur Stahlkorrosion kommen [6]. Es gibt mittlerweile Startups, die innovative Ansätze

verfolgen, wie z. B. Concrete4Change aus Großbritannien, die auf eine kontrollierte Karbonatisierung durch den Einsatz von Additiven setzen und damit eine kontrollierte/gezielte Mineralisierung des Betons erreichen. Dieser Ansatz ermöglicht es, die Zementmenge zu reduzieren, während der Beton gleichzeitig als teilweise CO₂-Senke fungiert. Das Startup erzielt damit nach eigenen Angaben CO₂-Einsparungen in Höhe von ca. 20 %, ohne dass Mehrkosten entstehen [28–30].

Ein vielversprechendes Material, das als Kohlenstoffsенke für den Einsatz in Betonen diskutiert wird, ist Pflanzekohle [31, 32]. Die genaue Berechnung der tatsächlich reduzierten Emissionen gestaltet sich jedoch als komplex [33], insbesondere da die Fachliteratur in Bezug auf „negative Emissionen“ uneinheitlich ist [34]. Das Speichervermögen von einer Tonne Pflanzekohle variiert je nach Herstellprozess und liegt zwischen 2,5 und 3,3 Tonnen CO₂ [35, 36]. Obwohl das Potential zur CO₂-Speicherung in der Literatur eindeutig hervorgehoben wird, gibt es zahlreiche konkurrierende Anwendungsfelder. Ein Bericht des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft stellt fest: „Insgesamt ergibt sich aus den dargestellten Aspekten eine ausgesprochene Konkurrenzsituation um die Nutzung von Biomasse für die Herstellung von Biokohle (Pflanzekohle) auf der einen und für die Humusreproduktion von Böden, das landwirtschaftliche Nährstoffrecycling, die Wärmeerzeugung und die Herstellung von Baustoffen und Verpackungen auf der anderen Seite.“ [37] Diese Konkurrenzsituationen bergen das Potenzial für eine „Teller oder Tank“-Diskussion, was die Abschätzung des tatsächlichen Einsatzpotenzials von Pflanzekohle in der Betonindustrie erschwert.

3.4 Weitere Ansätze

In den Abschnitten 3.1 bis 3.3 wurden Ansätze mit erheblichem Dekarbonisierungspotenzial in der Betonindustrie vorgestellt. Durch intelligentes Bauteildesign mit reduziertem Materialeinsatz, die Nutzung von klinkeffizienten Zementen und den Einsatz moderner Verfahren in der Betonherstellung (deren detaillierte Darstellung den Rahmen dieses Artikels sprengen würde) erreicht das Unternehmen GOLDBECK bereits heute CO₂-Emissionenseinsparungen von über 35 % bei tragenden Stahlbetonfertigteilen im Vergleich zu den Branchenreferenzwerten des CSC CO₂-Moduls [38].

Konkret bedeutet dies, dass eine Rezeptur für einen Beton der Klasse C35/45 weniger als 186 kg CO₂-Äq./m³ verursachen muss [39]. Diese Bauteile werden bereits heute ohne Aufpreis und zu wettbewerbsfähigen Konditionen angeboten, was weiteres Dekarbonisierungspotenzial in Verbindung mit möglichen Green-Premium-Aufschlägen eröffnet.

Für die Zukunft könnten neben den bereits diskutierten Ansätzen auch neuartige Bindemittel einen bedeuteten Beitrag zur Dekarbonisierung leisten. Neben Geopolymeren könnten insbesondere calcinierte Tone oder alkalisch aktivierte Bindemittel signifikantes Potenzial zur weiteren Reduktion der CO₂-Emissionen bieten [40].

4 Fazit

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass Betonfertigteile mit Netto-Null-Emissionen in den kommenden Jahren marktreif sein könnten. Die grundlegenden technischen Lösungen sind bereits entwickelt. Die eigentliche Herausforderung wird darin liegen, die Verfügbarkeit dieser Lösungen auf einen bedeutenden Marktanteil auszuweiten und zu wirtschaftlich tragfähigen und wettbewerbsfähigen Konditionen anzubieten. Bis dahin ist es noch ein langer Weg.

5 Literatur

- [1] Allen, M. R., Dube, O. P., Solecki, W., Aragón-Durand, F., Cramer, W., Humphreys, S., Kainuma, M., Kala, J., Mahowald, N., Mulugetta, Y., Perez, R., Wairiu, M., Zickfeld, K. (2018) Framing and Context. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte, V., Zhai, P., Pörtner, H.-O., Roberts, D., Skea, J., Shukla, P. R., Pirani, A., Moufouma-Okia, W., Péan, C., Pidcock, R., Connors, S., Matthews, J. B. R., Chen, Y., Zhou, X., Gomis, M. I., Lonnoy, E., Maycock, T., Tignor, M. and Waterfield, T. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 49-92, doi:10.1017/9781009157940.003.
- [2] Ehring, G. (2024) Das Weltklima lag 2024 erstmals über der 1,5 Grad-Grenze. Onlinequelle: <https://www.deutschlandfunk.de/copernikus-klimawandel-pariser-abkommen-co2-100.html> (abgerufen am 22.01.2025).
- [3] IPCC (2023) Summary for Policymakers. In: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, Lee, H., Romero, J. (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 1-34, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.001. Beyond Zero Emissions (2017) Zero carbon industry plan: re-thinking cement.
- [4] WWF Deutschland (2019) Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie: Hintergrund und Handlungsoptionen. Berlin, Germany, pp. 7-11. Onlinequelle: [WWF Klimaschutz in der Beton- und Zementindustrie WEB.pdf](#)
- [5] Global Cement and Concrete Association (GCCA) (2021) Concrete Future – The GCCA 2050 Cement and Concrete Industry Roadmap for Net-Zero Concrete.
- [6] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. (2020) Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien. Düsseldorf. Onlinequelle: [Dekarbonisierung von Zement und Beton – Minderungspfade und Handlungsstrategien](#)
- [7] Budinis, S. et al. (2018) An assessment of CCS costs, barriers and potential."Energy strategy reviews, Vol. 22, pp. 61-81. Onlinequelle: [\(PDF\) An assessment of CCS costs, barriers and potential](#)
- [8] Purr, K. et al. (2021) Diskussionsbeitrag zur Bewertung von Carbon Capture and Utilization. Umweltbundesamt pp. 32 Onlinequelle: [Diskussionsbeitrag zur Bewertung von Carbon Capture and Utilization | Umweltbundesamt](#)
- [9] Ökobaumat (2016) Onlinequelle: <https://www.oekobaumat.de/>, Ökobaumat 2016 (abgerufen am 16.01.25)
- [10] Ökobaumat (2023) Onlinequelle: <https://www.oekobaumat.de/>, Ökobaumat 2023-I (abgerufen am 16.01.25)
- [11] Ökobaumat (2019) Onlinequelle: <https://www.oekobaumat.de/>, Ökobaumat 2019-I (abgerufen am 16.01.25)
- [12] Verein Deutscher Zementwerke, VDZ, Hrsg. (2022) Ressourcen der Zukunft für Zement und Beton – Potenziale und Handlungsstrategien. Düsseldorf. Onlinequelle: [VDZ-Studie Ressourcenroadmap 2022.pdf](#)
- [13] Bundesverband Spannbeton-Fertigdecken, Hrsg. (2019) Die Zukunft Spannbeton-Fertigdecken: schnell – flexibel – wirtschaftlich, Berlin. Onlinequelle: [BVSF Broschuere Spannbeton Fertigdecken 2020 web.pdf](#)

- [14] Bachmann, Huber, (2024) Betonfertigteile im Hochhausbau. Tagungsband zum 28. Münchener Massivbau Seminar, München. pp. 65-77 doi:10.14459/mbs28.07 Onlinequelle: [28. Münchener Massivbau Seminar am 22. November 2024](#)
- [15] Bundesministerium der Justiz (2013) Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen (Kreislaufwirtschaftsgesetz-KrWG). Onlinequelle: [KrWG - Gesetz zur Förderung der Kreislaufwirtschaft und Sicherung der umweltverträglichen Bewirtschaftung von Abfällen](#)
- [16] Fischer, D., Pyschny, D. (2023) Abfallhierarchie. Nachhaltig Bauen (nbau) Onlinequelle: [Abfallhierarchie - Nachhaltig Bauen](#) (abgerufen am 21.01.2025).
- [17] Verein Deutscher Zementwerke e. V., Hrsg. (2024) Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2023. Düsseldorf. Onlinequelle: [Umweltdaten der deutschen Zementindustrie 2023](#)
- [18] Müller, C., Mohr, M. (2021) Wie gelingt die Dekarbonisierung des Betonbaus in der Praxis? Heidelberg-Cement Newsletter Technik. Onlinequelle: [Wie gelingt die Dekarbonisierung des Betonbaus in der Praxis?](#)
- [19] Dyckerhoff GmbH (2021) Dyckerhoff Variodur Premiumzement für Hochleistungsbetone. Produktbroschüre. Onlinequelle: [c4f03b50-aa17-3f48-7ac5-7daa5d44cae9](#)
- [20] Holcim (Deutschland) GmbH (2025) Holcim Ecoplanet A5 CEM III/A 52,5 R. Onlinequelle: <https://www.holcim.de/zement/co2-reduziert/holcim-ecoplanet-a5> (abgerufen am 21.01.2025).
- [21] Haslauer, P. et al. (2023) Einflüsse von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen auf Ressourcennutzung und Dekarbonisierung in der Stahl- und Zementindustrie. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Vol. 168, pp. 318-324. Onlinequelle: [Einflüsse von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen auf Ressourcennutzung und Dekarbonisierung in der Stahl- und Zementindustrie - Montanuniversität Leoben](#)
- [22] Vollprecht, D., Pomberger, R. (2021) Ökodesign von Stahlwerksschlacken durch thermochemische Behandlung zur Erhöhung der Recyclingfähigkeit. BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte, Vol.166, pp. 137-143. Onlinequelle: [Ökodesign von Stahlwerksschlacken durch thermochemische Behandlung zur Erhöhung der Recyclingfähigkeit | BHM Berg- und Hüttenmännische Monatshefte](#)
- [23] Pade, C., Guimaraes, M (2007) The CO₂ uptake of concrete in a 100-year perspective. Cement and Concrete Research, Vol. 37, pp. 1348-1356. Onlinequelle: [The CO2 uptake of concrete in a 100 year perspective | Request PDF](#)
- [24] Meyer, J. B., S. Sahu (2018) Solidia technologies: an example of carbon capture and utilization. Int. VDZ Congress.
- [25] Emerson, J. (2020). Low Carbon Concrete-Starting from the Ground Up. Retrieved from Zero Energy Project: [org/2020/11/09/low-carbon-concrete-starting-from-the-ground-up](https://zeroenergyproject.org/2020/11/09/low-carbon-concrete-starting-from-the-ground-up). Onlinequelle: <https://zeroenergyproject.org/2020/11/09/low-carbon-concrete-starting-from-the-ground-up>. Onlinequelle: <https://zeroenergyproject.org/2020/11/09/low-carbon-concrete-starting-from-the-ground-up>
- [26] Neustark AG. Onlinequelle: <https://www.neustark.com/de/unsere-!%C3%B6sung-mineralisierung> (abgerufen am: 22.01.2025).
- [27] Zirkulit Beton AG. Onlinequelle: <https://www.neustark.com/de/unsere-!%C3%B6sung-mineralisierung> (abgerufen am 22.01.2025).
- [28] Sherif, Z. et al. (2025) A Critical Review of the Decarbonisation Potential in the UK Cement Industry. Materials 18.2, p. 292. Onlinequelle: [A Critical Review of the Decarbonisation Potential in the U.K. Cement Industry](#)

- [29] Chhetri, V. (2025) This UK Startup Cements £2.5M Funding to Pioneer CO₂ Mineralisation in Concrete, Onlinequelle: <https://techfundingnews.com/this-uk-startup-cements-2-5m-funding-to-pioneer-co2-mineralisation-in-concrete/> (abgerufen am 22.01.2025).
- [30] Concrete4Change (2024) Permanently locking down CO₂ into Concrete. Onlinequelle: https://www.concrete4change.com/technology?utm_source=chatgpt.com (abgerufen am 22.01.2025).
- [31] Aman, A. M. N. et al. (2022) Biochar as cement replacement to enhance concrete composite properties: A review. Energies 15.20, p. 7662. Onlinequelle: [Biochar as Cement Replacement to Enhance Concrete Composite Properties: A Review](#)
- [32] Wyrzykowski, M. et al. (2024) Cold-bonded biochar-rich lightweight aggregates for net-zero concrete. Journal of Cleaner Production, Vol. 434: 140008. Onlinequelle: [\(PDF\) Cold-bonded biochar-rich lightweight aggregates for net-zero concrete](#)
- [33] Woolf, D. et al. (2010) Sustainable biochar to mitigate global climate change. Nat. Commun. 1:56 doi: 10.1038/ncomms1053. Onlinequelle: [Sustainable biochar to mitigate global climate change | Nature Communications](#)
- [34] Tanzer, S. E., Ramírez, A. (2019) When are negative emissions negative emissions? Energy & Environmental Science 12.4: 1210-1218. Onlinequelle: [When are negative emissions negative emissions? - Energy & Environmental Science \(RSC Publishing\)](#)
- [35] Novocarbo. Onlinequelle: <https://www.novocarbo.com/> (abgerufen am 22.01.2025).
- [36] US Biochar Initiative (2023) Biochar removes Carbon – Carbon markets offer a new opportunity for biochar. Onlinequelle: [BIOCHAR Carbon-sheet DIGITAL.pdf](#)
- [37] Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) (2023) Biokohle in der Pflanzenproduktion – Nutzen, Grenzen und Zielkonflikte – Standpunkt des wissenschaftlichen Beirats für Düngungsfragen. Onlinequelle: [Biokohle in der Pflanzenproduktion – Nutzen, Grenzen und Zielkonflikte](#)
- [38] GOLDBECK GmbH Blue Concrete. Onlinequelle: https://cms.goldbeck.de/fileadmin/goldbeck.de/00_newsroom/prospekte/goldbeck_blue_concrete_onepager.pdf (abgerufen am 22.01.2025).
- [39] Bundesverband Transportbeton (2022) Concrete Sustainability Council, Technisches Handbuch – CO₂-Modul, Stand 10.01.2022.
- [40] Fraunhofer Institut für Bauphysik IBP Nachhaltige Bindemittel als Grundlage CO₂-reduzierter Massenaustoffe. Onlinequelle: <https://www.ibp.fraunhofer.de/de/kompetenzen/mineralische-werkstoffe-baustoffrecycling/nachhaltige-bindemittel.html> (abgerufen am 22.01.2025).

6 Autor

Lukas Romanowski, M.Sc.

Teamleiter Baustoffe & Zirkularität – Innovation – Products – Systems

GOLDBECK Technologies GmbH

Goldbeckstraße 7

69493 Hirschberg an der Bergstraße

lukas.romanowski@goldbeck.de

Betonbauwerke mit besonderen Anforderungen hinsichtlich Nachhaltigkeit – Welche DAfStb-Projekte unterstützen diesen neuen Anwendungsfall der DIN 1045-1000?

Udo Wiens, David Ov und Angelika Schießl-Pecka

Zusammenfassung

Mit Blick auf den fortschreitenden Klimawandel wird deutlich, dass eine möglichst schnelle Reduktion der Treibhausgasemissionen (THG-Emissionen) auch im Bauwesen notwendig ist und klimafreundliche Lösungen zunehmend an Bedeutung gewinnen. Um eine quantifizierbare Vergleichbarkeit der „Klimafreundlichkeit“ unterschiedlicher Lösungen zu ermöglichen, wurde vom Technischen Ausschuss „Nachhaltig Bauen mit Beton (TA NBB)“ des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) innerhalb von rund zwei Jahren die Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton (THG-Richtlinie)“ entwickelt. Die THG-Richtlinie führt zusätzlich zu den im Bauwesen bekannten Grenzzuständen der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit eine quantifizierbare Anwendungsregel zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen bei der Planung der Tragstruktur aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton ein. Bauherren und Bauherinnen sowie Planende können durch die Einführung eines Klassifizierungssystems Zielvorgaben zu den zu realisierenden Treibhausgaseinsparungen im Vergleich zu einem Referenzbauwerk bzw. -bauteil festlegen.

Im neuen Eurocode 2, FprEN 1992-1-1:2023 (DE)¹⁾, werden sogenannte Expositionswiderstandsklassen (englisch ERC = Exposure Resistance Classes) eingeführt, mit deren Hilfe Bewertungskriterien für die dauerhaftkeitsrelevanten Betoneigenschaften bezüglich einer karbonatisierungs- oder chloridinduzierten Bewehrungskorrosion auf Grundlage der Leistungsfähigkeit von Betonen zielgerichteter als bisher festgelegt werden. Somit können Betone künftig durch entsprechende Performance-Prüfungen nach ihrer Leistungsfähigkeit in eine ERC eingeordnet bzw. klassifiziert werden – vergleichbar mit der bereits bewährten Einteilung von Beton in eine Druckfestigkeitsklasse. Durch Anwendung der ERC-Richtlinie können auch Treibhausgasemissionen bei der Herstellung von Beton maßgeblich reduziert werden.

Beide Richtlinien sind zentrale Elemente in der Strategie des DAfStb, die Betonbauweise in Zeiten großer ökologischer und technischer Herausforderungen weiterzuentwickeln und wettbewerbsfähig in die Zukunft zu führen.

Schlagwörter: Beton, Tragstruktur, THG-Emissionen, THG-Richtlinie, Klassifizierungssystem, Eurocode 2, DIN 1045-1000, Expositionswiderstandsklassen (ERC), Performance-Prüfung

Abstract

In light of the ongoing climate change, it is evident that a rapid reduction of greenhouse gas emissions (GHG emissions) in the construction industry is necessary, and climate-friendly solutions are gaining increasing importance. To enable a quantifiable comparison of the "climate-friendliness" of different solutions, the Tech-

¹⁾ In der Formellen CEN-Abstimmung angenommene Fassung des neuen EC 2 (FprEN); die deutsche Sprachfassung DIN EN 1992-1-1 wird voraussichtlich im Sommer 2025 zusammen mit dem Entwurf des Nationalen Anhangs veröffentlicht; FprEN 1992-1-1:2023 kann nicht käuflich erworben werden.

nical Committee "Sustainable Building with Concrete (TA NBB)" of the German Committee for Structural Concrete (DAfStb) developed the guideline "Greenhouse Gas-Reduced Concrete Structures (GHG Guideline)" over approximately two years. The GHG Guideline introduces a quantifiable application rule for reducing greenhouse gas emissions in the planning of structures made of concrete, reinforced concrete, or prestressed concrete, in addition to the limit states of load-bearing capacity and serviceability known in the construction industry. Clients and planners can set target specifications for the greenhouse gas savings to be achieved compared to a reference structure or component through the introduction of a classification system.

In the new Eurocode 2, FprEN 1992-1-1:2023 (DE)²⁾, so-called Exposure Resistance Classes (ERC) are introduced, which help to define evaluation criteria for the durability-relevant concrete properties regarding carbonation- or chloride-induced reinforcement corrosion based on the performance of concretes more specifically than before. Thus, in the future, concretes can be classified into an ERC through corresponding performance tests based on their performance – similar to the already established classification of concrete into a compressive strength class. The application of the ERC guideline can also significantly reduce greenhouse gas emissions in concrete production.

Both guidelines are central elements in the DAfStb's strategy to further develop concrete construction in times of great ecological and technical challenges and to lead it competitively into the future.

Keywords: concrete, concrete structures, GHG emissions, GHG guideline, classification system, Eurocode 2, DIN 1045-1000, Exposure Resistance Classes (ERC), performance testing

²⁾ The version of the new EC 2 (FprEN) adopted in the Formal CEN vote; the German language version DIN EN 1992-1-1 is expected to be published in summer 2025 together with the draft of the National Annex; FprEN 1992-1-1:2023 cannot be purchased.

1 Allgemeines

Aspekte der Nachhaltigkeit und des Umweltschutzes sind heutzutage fester Bestandteil der Planung von Bauwerken. Daher ist nur folgerichtig, dass auch bei der Erarbeitung der neuen Normenreihe DIN 1045:2023 verstärkt auf Maßnahmen und Regelungen zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen durch geeignete Wahl der Bauteile, Betone und der Bauverfahren geachtet wurde. So unterscheidet der Anwendungsfall 0 von DIN 1045-1000:2023-08, Zitat *„Betonbauwerke mit besonderen Anforderungen hinsichtlich Nachhaltigkeit (insbesondere Klimaschutz, Ressourceneffizienz) und Bauen im Bestand, jeweils außerhalb der Regelungen der Normenreihe DIN 1045 oder außerhalb von bauaufsichtlichen Verwendbarkeitsnachweisen“* in Maßnahmen innerhalb und außerhalb von Regelungen der Normenreihe. Zu den bereits in der neuen Normenreihe umgesetzten Maßnahmen gehören z. B. die Verwendung von Beton mit erweiterten Anwendungsmöglichkeiten für rezyklierte Gesteinskörnung, die Verwendung von klinkereffizienten Zementen nach DIN 1045-2:2023-08 (z. B. CEM II/C-M (S-LL)) oder eine ressourceneffiziente Planung nach [1]. DIN 1045-1000:2023-08 sieht für diesen Anwendungsfall die Einstufung in PK-S, BK-S und AK-S (BBQ-S) mit besonderen Anforderungen oder Festlegungen nach Bedarf des Bauherrn vor. Es ist unstrittig, dass bei Aspekten der Nachhaltigkeit mit Nachweisen über den gesamten Lebenszyklus eines Gebäudes die Kommunikation unter den Beteiligten in dem vorgesehenen Betonbaukonzept für den Erfolg zwingend erforderlich ist.

Die Roadmap „Nachhaltig bauen mit Beton“ des DAfStb [2] enthält nun zwei weitere wichtige Projekte außerhalb der Normenreihe DIN 1045-1000:2023-08, die zukünftig einen Beitrag zur Reduzierung von Treibhausgasemissionen im Betonbau leisten sollen:

- a) DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton (THG-Richtlinie)“, Ausgabe August 2024 [3, 4];
- b) DAfStb-Richtlinie „Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken nach dem System der Expositionswiderstandsklassen (ERC-Richtlinie)“, in Bearbeitung.

Beide DAfStb-Vorhaben werden in diesem Beitrag kurz vorgestellt.

2 THG-Richtlinie des DAfStb

2.1 Einführung

Die Analyse des Bedarfes nach Regelungen in Bezug auf die THG-Emissionen aus Erstellung und Entsorgung von Tragwerken hat den TA „Nachhaltig bauen mit Beton (NBB)“ dazu veranlasst, die neue Richtlinienreihe „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton“ zu erarbeiten. Aus den konzeptionellen Beratungen im TA BB ergaben sich folgende Eckpunkte als Grundlage für die Richtlinienarbeit:

- Die Richtlinie soll die Umsetzung der international und national beschlossenen Treibhausgasminde rungspfade ermöglichen.
- Die Regelungen der Richtlinie sollen für alle Bauwerksarten gelten, wobei besonderer Blick auf den üblichen Hochbau (u. a. Büro- und Wohnungsbau) gelegt werden soll.
- Als Vergleichsgröße zur Bewertung der THG-Emissionen eines neuen Bauwerkes dient ein Referenz gebäude aus dem Jahr 2020.
- Die zugrundeliegende Ökobilanzierung bezieht sich auf das Global Warming Potenzial (GWP) in der Einheit kg CO_{2,e}, andere Bewertungsgrößen fließen nicht ein.
- In Anlehnung an das QNG-Siegel [5] sollen die Module A1 bis A3, C3 und C4 betrachtet werden. Emissionen aus Austauschprozessen (B4) werden als vernachlässigbar für die Bilanzierung einer Tragstruktur bewertet. Die Betriebsemissionen (B6) sind i. A. relevant, jedoch separat zu analysieren.

Bei der Konzeption und dem Verfassen der Richtlinie auf Grundlage der o. g. Kriterien stand stets die praxisgerechte Anwendung im Vordergrund.

2.2 Aufbau der THG-Richtlinie

Die Richtlinie besteht derzeit aus den folgenden zwei Teilen:

- Teil 1: Grundlagen und Nachweis am gesamten Tragwerk
- Teil 2: Deckenbauteile

Im Teil 1 der Richtlinie wird u. a. ein Referenzzustand für die THG-Emissionen infolge der Errichtung und Entsorgung von Wohn- und Nichtwohngebäuden für das Jahr 2020 festgelegt. Zugleich enthält dieser Teil Anforderungen an die zulässigen THG-Emissionen in Abhängigkeit von zugrunde gelegten Treibhausgas-minderungs-Klassen. Ihrem hohen Anteil an den Gesamt-Treibhausgasemissionen eines Rohbaus folgend, werden Deckenbauteile im Teil 2 der Richtlinie gesondert betrachtet (siehe auch [6]). Weitere Richtlinienteile sind in Bearbeitung.

2.3 Referenzbauwerke und Referenzbauteile

Der Definition von Referenzbauwerken kommt in der Richtlinie eine wesentliche Bedeutung zu, denn diese bilden die Bewertungsbasis und Ausgangspunkt der Treibhausgas-minderungs-Klassen. In diesem Sinne wird als Referenzjahr das Jahr 2020 angesetzt. Zum einen ist der Status-quo hinsichtlich der verwendeten Baustoffe und Tragwerksformen am Markt weitestgehend bekannt, zum anderen liegt für dieses Bezugsjahr eine gute Basis ökobilanzieller Daten zur Ermittlung der THG-Emissionen vor.

Aufgrund der besonderen Bedeutung des üblichen Hochbaus hinsichtlich der Gesamtemissionen von Treibhausgasen sowie seiner großen Marktrelevanz definiert Teil 1 der Richtlinie GWP-Werte für Referenzgebäude von Wohn- und Büro- bzw. Nichtwohngebäuden. Grundlage hierfür bilden eigene, durch den DAfStb finanziell geförderte Untersuchungen ebenso wie umfassende Bewertungen vorhandener internationaler und nationaler Regelungen ([5, 7, 8]). Im Ergebnis der Auswertung dieser unterschiedlichen Anforderungen legt die Richtlinie folgende Referenzwerte für die THG-Emissionen des Tragwerks dieser Bauwerke für das Referenzjahr 2020 fest.

- Wohngebäude: 250 kg CO_{2,e}/(m² BGF)
- Nichtwohngebäude und Bürogebäude: 320 kg CO_{2,e}/(m² BGF)

Die o. g. Werte fanden im Einspruchsverfahren des Gelbdruckes uneingeschränkte Zustimmung, zudem bestätigten neben eigenen Untersuchungen auch Studien im Rahmen des Gelbdruckverfahrens, z. B. [6], [9] und [10] deren Validität und Größenordnung.

Da insbesondere die Nutzung von Nichtwohngebäuden stark voneinander abweichen kann, bietet die Richtlinie unter Einhaltung definierter Anforderungen und Ökobilanz-Datensätzen zudem die Möglichkeit, alternative Referenzzustände für andere Bauwerke zu ermitteln.

Mit Blick auf den üblichen Hochbau wurde zudem bei der Richtlinienkonzeption ein besonderes Bauteil in den Fokus genommen – die Hochbaudecke. Mit rund 40 % der THG-Emissionen von Hochbauten ([8, 11-13]) stellt sie das relevanteste Bauteil dar, und wird konsequenterweise in einem eigenen Richtlinienteil behandelt. Für die Planungs- und Baupraxis bringt dies den Vorteil, dass Deckensysteme bereits zu Beginn eines Entwurfes hinsichtlich der THG-Emissionen einzeln beurteilt werden können, ohne das Gesamttragwerk zu kennen. Folglich sind analog zu dem Gesamtgebäude Referenzwerte für übliche Deckensysteme im Jahr 2020 zu definieren. Neben umfangreichen theoretischen Untersuchungen ([5, 10, 14]) wurden im Rahmen des TA NBB in einer Praxisstudie [6] über 50 ausgeführte Deckensysteme hinsichtlich ihrer THG-Emissionen aus-

gewertet. Aufbauend auf den theoretischen Untersuchungen und den Werten der ausgeführten Deckensysteme wurde die in [6] und [15] entwickelte Referenzwertfunktion für Deckensysteme in Abhängigkeit der Spannweite entsprechend Gleichungen (1) und (2) festgelegt und in den Teil 2 der Richtlinie [4] als Grundlage für die deckenspezifischen Treibhausgas-Minderungsklassen übernommen (s. a. [6, 10]).

$$GWP_{Ref,i} = 40 \cdot \sqrt[2]{L_i} \quad [\text{kg CO}_2\text{-Äq./m}^2] \quad \text{für } 0 \text{ m} \leq L_i \leq 10 \text{ m} \quad (1)$$

$$GWP_{Ref,i} = 126,5 \quad [\text{kg CO}_2\text{-Äq./m}^2] \quad \text{für } L_i > 10 \text{ m} \quad (2)$$

2.4 Treibhausgas-minderungs-Klassen

Der Grundgedanke eines Messbarmachens der möglichen Reduktion von THG-Emissionen gemäß Richtlinie ist der Vergleich einer ökologisch optimierten Variante (Eco) mit der Referenzvariante (Ref) aus dem Jahr 2020. Hierbei wird die Summe aller Treibhausgase beider Varianten anhand des Indikators GWP in der Einheit $\text{kg CO}_{2,e}$ für die Module A1 bis A3, C3, C4 nach [3] gemäß Gleichung (3) gegenübergestellt. Wesentlich für diesen Vergleich ist ein einheitliches funktionales Äquivalent beider Varianten, z. B. 1 m^2 Fläche.

$$\frac{\left(\frac{\sum GWP}{\text{funktionales Äq.}} \right)_{Eco}}{\left(\frac{\sum GWP}{\text{funktionales Äq.}} \right)_{Ref}} \leq \alpha_{GWP} \quad (3)$$

Dabei ist:

- GWP Global Warming Potential [$\text{kg CO}_{2,e}$], Module A1 bis A3, C3, C4 nach DIN EN 15978
- funktionales Äquivalent Eco und Ref (quantifizierte funktionale Anforderungen und/oder technische Anforderungen an das Tragwerk oder an ein zusammengesetztes Bauteil (Bauwerksteil), die als Grundlage für Vergleiche dienen)

Der Grenzwert α_{GWP} in Gleichung (3) beschreibt das Verhältnis zwischen der Eco-Variante und der Referenzvariante aus dem Jahr 2020. Durch Vorgabe von α_{GWP} -Werten können folglich Anforderungen an die erforderliche Reduktion der THG-Emissionen definiert werden. Ein Wert von $\alpha_{GWP} = 1$ bedeutet, dass keinerlei Einsparungen der THG-Emissionen bezogen auf das Referenztragwerk erforderlich sind. Ein Wert von $\alpha_{GWP} = 0$ stellt die Untergrenze dar und entspricht den Anforderungen an ein Bauwerk ohne THG-Emissionen; hierzu würde es Techniken zur vollständigen Eliminierung oder dem vollständigen Ausgleich der THG-Emissionen bei Herstellung von Baustoffen und Gebäuden bedürfen (z. B. durch CCS-Verfahren – Carbon Capture and Storage). Die Grenzwerte α_{GWP} in Gleichung (3) werden in der Richtlinie mit prozentualen Treibhausgas-Minderungsklassen, z. B. TM₋₃₀ mit $\alpha_{GWP} = 0,70$ verknüpft. Tabelle 1 stellt die neu definierten Treibhausgas-Minderungsklassen dar. Vorteil der Definition ist, dass zum einen die Projektbeteiligten auf fundierter Grundlage sowie der regionalen Verfügbarkeit von Rohstoffen und Fertigungstechnologien individuelle, projektspezifische Ziele festlegen können und zum anderen die Gesetzgebung auf eindeutig definierte Treibhausgas-Minderungsklassen zurückgreifen kann, sei es aufgrund regulatorischer Maßnahmen oder aufgrund von Fördermaßnahmen.

Tab. 1: Treibhausgas-Minderungsklassen TM_{xx} [3]

Treibhausgas-Minderungsklasse TM_{xx}	α_{GWP} [-]
TM_{Ref}	1,00
TM_{10}	0,90
TM_{20}	0,80
TM_{30}	0,70
TM_{40}	0,60
TM_{50}	0,50
TM_{60}	0,40
TM_{70}	0,30

Weitere Hintergrundinformationen zur Herleitung der Treibhausgas-Minderungsklassen sind in [16] enthalten. Die Erreichbarkeit der höchstmöglichen Treibhausgas-Minderungsklasse variiert je Bauwerksart und ist insbesondere davon abhängig, welche Effizienz das Referenzbauwerk im Jahre 2020 hat. Aufgrund der hohen Anforderungen sind Treibhausgas-Minderungsklassen mit $\alpha_{GWP} \leq 0,50$ nach dem heutigen Stand der Technik und den gültigen bauaufsichtlichen Regelwerken nur in wenigen Ausnahmefällen umsetzbar.

Tab. 2 zeigt die resultierenden zulässigen Grenzwerte für Wohn- und Nichtwohn- bzw. Bürogebäude mit Bezug auf die Bruttogrundfläche der Tragstruktur (BGF).

Tab. 2: Zulässige Grenzwerte für THG-Emissionen des Tragwerks – Wohngebäude, Nichtwohngebäude und Bürogebäude [3]

Treibhausgas-Minderungsklasse TM_{xx}	α_{GWP} [-]	Zulässige Grenzwerte für die Emissionen des Tragwerks [kg CO _{2,e} /m ² BGF]	
		Wohngebäude ²⁾	Nichtwohngebäude ²⁾ und Bürogebäude
$TM_{Ref}^{1)}$	1,00 ¹⁾	250	320
TM_{10}	0,90	225	288
TM_{20}	0,80	200	256
TM_{30}	0,70	175	224
TM_{40}	0,60	150	192
TM_{50}	0,50	125	160
TM_{60}	0,40	100	128
TM_{70}	0,30	75	96

¹⁾ Referenzjahr 2020.

²⁾ Die Aufteilung in Wohn- und Nichtwohngebäude wurde an das QNG-System angelehnt [5]. Wohngebäude sind demnach Gebäude nach § 3, Absatz 1, Nummer 33, GEG, die nach ihrer Zweckbestimmung überwiegend dem Wohnen dienen. Hierzu gehören auch Wohn-, Alten- und Pflegeheime und ähnliche Einrichtungen. Beispiele für Nichtwohngebäude sind: Schulen, Universitätsgebäude, Kindergärten, Industriegebäude.

Werden die Grenzwerte α_{GWP} der Treibhausgas-Minderungsklassen auf die Referenzwertfunktionen der Deckensysteme bezogen (siehe Gleichungen (1) und (2)), resultiert daraus eine Kurvenschar, die in Abhängigkeit der Spannweite und der einzuhaltenden Treibhausgas-Minderungsklasse Grenzwerte für das jeweilige Deckensystem definiert (vgl. Abb. 1).

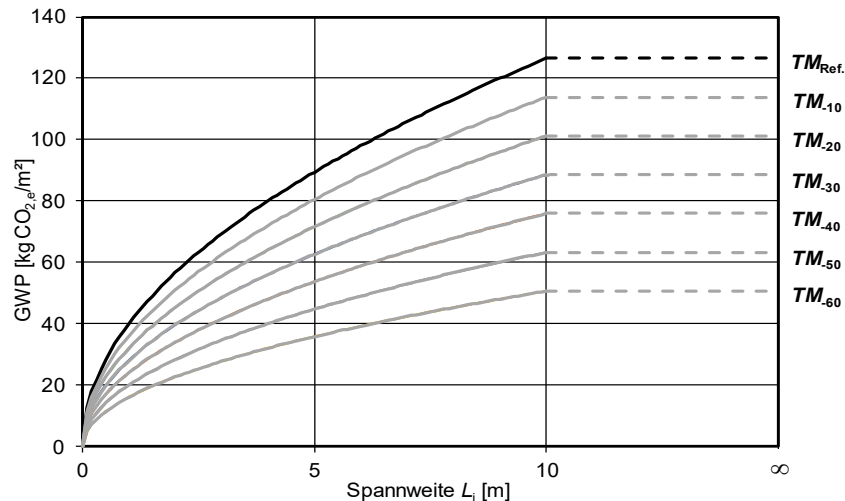


Abb. 1: Zulässige Grenzwerte für THG-Emissionen der Deckensysteme in Abhängigkeit der Spannweite [3]

Um für ein konkretes Vorhaben die THG-Emissionen nach einem einheitlichen Maßstab aus der Massenermittlung der verwendeten Baustoffe berechnen zu können, legt der normative Anhang B von Teil 1 der Richtlinie [3] die im Jahr 2020 (Referenzjahr) repräsentativen GWP-Werte für die verschiedenen Baustoffe im Referenzzustand fest. Zur Berechnung des Eco-Szenarios im Rahmen des zu planenden Projektes dürfen nur GWP-Werte aus den, zum Zeitpunkt der Bauantragstellung, gültigen Datensätzen der ÖKOBAUDAT verwendet werden. Alternativ dürfen auch entsprechend gültige Umweltproduktdeklarationen nach DIN EN 15804:2020-03 (EN 15804+A2) herangezogen werden. Alternativ zu den Angaben aus der ÖKOBAUDAT oder aus den Umweltproduktdeklarationen nach DIN EN 15804 kann auch eine Ökobilanz mit projektspezifischen Datensätzen für die Ausgangsstoffen, als auch für die Betonfertigteile und die Bewehrung unter Einhaltung bestimmter Bedingungen durchgeführt werden.

Durchschnittswerte für die Ökobilanz von einem m³ Beton wurden aus dem CO₂-Modul des Concrete Sustainability Council (CSC [17]) in einen informativen Anhang zum Teil 1 der Richtlinie übernommen [3]. Mit den dort angegebenen vier CO₂-Klassen wird den Planenden Hilfestellung bei der Optimierung des Tragwerks durch die Wahl von geeigneten Betonen gegeben. Perspektivisch können diese Betone nach dem nachfolgend dargelegten ERC-Konzept weiter optimiert werden.

3 ERC-Richtlinie des DAfStb

3.1 Ausgangssituation und Aufbau der ERC-Richtlinie

Nach FprEN 1992-1-1:2023 [18] werden Betone durch entsprechende Performance-Prüfungen in eine Expositionswiderstandsklasse (ERC) eingeordnet bzw. klassifiziert. Die Umsetzung des Konzeptes in die sogenannte ERC-Richtlinie erfolgt durch den Unterausschuss „Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken“ des DAfStb. Dabei werden folgende Aspekte berücksichtigt:

- Die Richtlinie setzt alternativ zu der neuen Normenreihe DIN 1045:2023 mit deskriptiven Anforderungen zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Beton das System der Expositionswiderstandsklassen nach FprEN 1992-1-1:2023 [18] in Deutschland um. Hinsichtlich der Nachhaltigkeit erfolgt eine Rückkoppelung an die DIN 1045-1000 (Anwendungsfall 0, BBQ-S, s. a. Abschnitt 1).
- Die ERC-Richtlinie des DAfStb greift in einem ersten Schritt die überwiegend im Hochbau vorkommenden Expositionsklassen XC1 bis XC4 und XD1/XS1 auf. Die im Hochbau ebenfalls relevanten Expositionsklassen XF1 und XA1 werden in den Kontext der ERC-Richtlinie über deskriptive Elemente

miteingebunden. Die Beschränkung auf die genannten Expositionsklassen führt in der Regel zu Betonen bis einschließlich der Druckfestigkeitsklasse C30/37, wodurch bis zu ca. 80 % des Betonmarktes erfasst werden kann (s. Tab. 3).

- Es wird der Nachweisweg über Performance-Prüfungen für XC1 bis XC4 und XD1/XS1 gewählt, um die von Wasser/Zement-Wert (w/z-Wert) und Bindemittel abhängige Dichtheit des Betons über eine Einordnung in eine ERC zu berücksichtigen. Die Höhe der Betondeckung wird in Abhängigkeit von der ERC, der Expositionsklasse, der Nutzungsdauer (50 oder 100 Jahre) sowie der Nachbehandlung festgelegt (s. Abschnitt 3.2). Insbesondere durch die bindemittelspezifische Erfassung der Leistungsfähigkeit des Betons können Reduktionspotenziale bezüglich der Emission von Treibhausgasemissionen gehoben werden.

Tab. 3: Anteil der Druckfestigkeitsklassen an der Gesamtbetonproduktion nach DIN EN 206-1/DIN 1045-2 [19]

Druckfestigkeitsklasse	2021	2022	2023
C8/10	0,6 %	0,7 %	0,6 %
C12/15	5,2 %	5,1 %	5,2 %
C16/20	1,5 %	1,7 %	1,7 %
C20/25	11,6 %	11,7 %	11,8 %
C25/30	41,7 %	39,8 %	39,8 %
C30/37	21,9 %	22,2 %	24,3 %
C35/45	11,5 %	13,0 %	12,5 %
C40/50	1,2 %	1,8 %	1,9 %
C50/60	2,7 %	1,6 %	0,5 %
andere	1,4 %	1,9 %	1,2 %

Gegenwärtig besteht die ERC-Richtlinie aus den folgenden fünf Teilen:

- Teil 0: Anwendungsbereich, normative Verweisungen, Begriffe und Definitionen
- Teil 1: Planung, Bemessung und Konstruktion
- Teil 2: Beton
- Teil 3: Bauausführung
- Teil 4: Betonfertigteile

In einer nächsten Generation der Richtlinie werden weitergehende Anforderungen für die schärferen Expositionsklassen XS2, XS3, XD2, XD3 und XA2, XA3, XF2, XF3 und XF4 mit deutlich aufwändigeren/komplexeren Nachweisen entwickelt.

3.2 Expositionswiderstandsklassen

Das bisherige deskriptive Konzept mit der Festlegung von Anforderungen an die Betonzusammensetzung, die Nachbehandlung und die Mindestdicke der Betondeckung wird als Referenzkonzept für den Nachweis der Dauerhaftigkeit im neuen FprEN 1992-1-1:2023 [18] in Verbindung mit dem noch in der Bearbeitung befindlichen zugehörigen Nationalen Anhang und der DIN 1045-2:2023-08 [20] erhalten bleiben.

Mit dem als Alternative zum deskriptiven Konzept geplanten Ansatz der neuen ERC-Richtlinie des DAfStb werden – wie bisher auch – die bekannten Expositionsklassen zur Beschreibung der Einwirkungen aus der Umgebung übernommen (für karbonatisierungs- und chloridinduzierte Bewehrungskorrosion XC bzw. XD/XS). Die Expositionswiderstandsklassen beziehen sich auf den Materialwiderstand des Betons gegenüber Eindringen von CO₂ (XRC) oder Chloriden (XRDS). Die Zuordnung von Betonen zu Expositionswiderstandsklassen wird über die Anwendung entsprechender Prüfverfahren erreicht. Geeignete europäische Referenzverfahren sind z. B. in DIN EN 12390-10 [21] und DIN EN 12390-11 [22] enthalten. Nationale Prüfverfahren

sind außerdem im BAW Merkblatt MDCC [23] beschrieben. Tab. 4 bis Tab. 7 enthalten die aktuell in der Diskussion befindlichen Klassengrenzen für Betone zur Einordnung in die Expositionswiderstandsklassen XRC und XRDS sowie die Mindestbetondeckungen $c_{\min, \text{dur}}$ für planmäßige Nutzungsdauern von 50 oder 100 Jahren, abhängig von der Nachbehandlungsklasse nach DIN 1045-3:2023-08 [24].

Tab. 4: Expositionswiderstandsklassen nach ERC-Richtlinie für Karbonatisierung (aktueller Diskussionsstand)

Expositionswiderstandsklassen	XRC 5	XRC 7	XRC 9	XRC 11
Bereiche der mittleren Karbonatisierungsgeschwindigkeit ^{a)} $k_{\text{NACm}, 140 \text{ Tage}}$ (mm/ $\sqrt{a}$)	$\leq 5,0$	$> 5,0$ und $\leq 7,0$	$> 7,0$ und $\leq 9,0$	$> 9,0$ und $\leq 11,0$
^{a)} Ermittelt nach BAW MB MDCC, Anlage A [23].				

Tab. 5: Mindestbetondeckung $c_{\min, \text{dur}}$ nach ERC-Richtlinie für unlegierten Betonstahl nach DIN 488 – Karbonatisierung (aktueller Diskussionsstand)

Expositions- klasse		Nachbe- handlungs- klasse	Expositionswiderstandsklasse							
			XRC 5		XRC 7		XRC 9		XRC 11	
			$c_{\min, \text{dur}}$ [mm]							
			für geplante Nutzungsdauer [Jahre]							
			50	100	50	100	50	100	50	100
1	XC1	≥ 1	10							
2	XC2 XC3	2 ^{a)}	15	20	20	25	25	35	30	40
3		3	15 ^{b)}	20 ^{b)}	15	20	20	30	25	35
4		4	15 ^{b)}	15 ^{b)}	15 ^{b)}	15	15	25	20	30
5	XC4	2 ^{a)}	20	25	30	40	35	45	40	50
6		3	15	20	25	35	30	40	35	45
7		4	15 ^{b)}	15	15	30	25	35	30	40
a) Nachbehandlungsklasse 2 bei gleichzeitigen Expositionsklassen XF, XA oder XM nicht zulässig (mindestens Nach- behandlungsklasse 3 erforderlich).										
b) Bei Betonfertigteilen ist eine Reduktion um 5 mm zulässig.										

Tab. 6: Expositionswiderstandsklassen nach ERC-Richtlinie für Chlorideinwirkung (aktueller Diskussionsstand)

Expositionswiderstandsklassen	XRDS 2 (XRDS 7) ^{b)}	XRDS 5 (XRDS 14) ^{b)}	XRDS 10 (XRDS 24) ^{b)}
Bereiche des mittleren Migrationskoeffizienten ^{a)} $D_{\text{RCMm}, 28 \text{ Tage}}$ ($10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)	$\leq 7,3$	$> 7,3$ und $\leq 14,4$	$> 14,4$ und $\leq 24,0$
^{a)} Ermittelt nach BAW MB MDCC, Anlage B [23].			
^{b)} Geplante Neubezeichnung.			

Tab. 7: Mindestbetondeckung $c_{\min, \text{dur}}$ nach ERC-Richtlinie für unlegierten Betonstahl nach DIN 488 – Chloride (aktueller Diskussionsstand)

Expositions- klasse		Nachbe- handlungs- klasse	Expositionswiderstandsklasse					
			XRDS 2 (XRDS 7) ^{b)}		XRDS 5 (XRDS 14) ^{b)}		XRDS 10 (XRDS 24) ^{b)}	
			c _{min,dur} [mm]					
			für geplante Nutzungsdauer [Jahre]					
			50	100	50	100	50	100
1	XD1 XS1	2 ^{a)}	25	30	35	45	45	55
2		3	20	25	30	40	40	50
3		4	15	20	25	35	35	45
^{a)} Nachbehandlungsklasse 2 bei gleichzeitigen Expositionsklassen XF, XA oder XM nicht zulässig (mindestens Nach- behandlungsklasse 3 erforderlich).								
^{b)} Geplante Neubezeichnung.								

Bei gleicher Nachbehandlungsklasse weist ein XRC 5-Beton mit einer nachgewiesenen Karbonatisierungsgeschwindigkeit $\leq 5,0 \text{ mm}/\sqrt{a}$ gegenüber einem XRC 9-Beton einen höheren Karbonatisierungswiderstand mit entsprechend geringerer resultierender Mindestbetondeckung auf. Das gleiche Prinzip gilt analog auch für XRDS-Betone.

Die Einstufung des Betons in eine XRC- bzw. XRDS-Klasse erfolgt im Rahmen der Erstprüfung. Die Einstufung ist durch eine jährliche Wiederholungsprüfung zu bestätigen. Für die Produktionskontrolle und die Konformitätskriterien gelten die Regelungen von DIN 1045-2:2023-08 [20] analog (z. B. Konformität anhand der Druckfestigkeit).

Da der Nachweis des Materialwiderstands zur Einordnung in eine ERC in der Erstprüfung von Beton zeitaufwendig ist, soll die Möglichkeit eingeräumt werden, alternative bzw. schnellere Prüfverfahren heranzuziehen. So soll für die Bestätigungsprüfung alternativ zu der Prüfung nach BAW MB MDCC, Anlage A [23], auch die beschleunigte Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes nach DIN EN 12390-12:2020-04 [25] bei einer CO_2 -Konzentration von $(3 \pm 0,5) \text{ Vol.-%}$ und einer relativen Feuchte von $(57 \pm 3) \%$ ermöglicht werden, wenn in der Erstprüfung eine entsprechende Korrelation zwischen beiden Verfahren bestimmt wurde oder eine allgemeingültige Korrelation zwischen beiden Verfahren angenommen werden kann.

3.3 Weiterentwicklung der ERC-Richtlinie

Zur Weiterentwicklung der ERC-Richtlinie müssen die darin enthaltenen Lücken für die Expositionsklassen XD2/XS2 und XD3/XS3 geschlossen werden. In diesem Zusammenhang wurde das IGF-Verbundforschungsvorhaben „Dauerhaftigkeit von Beton nach dem Performance-Prinzip“, bestehend aus 5 Teilprojekten im Mai 2021 initiiert. Das Vorhaben konnte im Frühjahr 2024 abgeschlossen werden. Die Ergebnisse des Verbundforschungsvorhabens werden in Kürze in der Schriftenreihe des DAfStb veröffentlicht und als Grundlage für die Erweiterung der Richtlinie verwendet.

Dass mit dem ERC-Konzept die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken nachgewiesen werden kann, ist durch langjährige Forschung, Erfahrung, und Anwendung abgesichert. Ob aber das ERC-Konzept in der Praxis auch den erhofften Reduktionseffekt hinsichtlich THG-Emissionen mit abdecken kann, wird zum Teil noch kritisch gesehen. Um hier die Zweifel auszuräumen, läuft aktuell ein vom DAfStb gefördertes Forschungsvorhaben an der Hochschule Aachen [26]. Neben einer vertieften Studie des Einflusses unterschiedlicher betontechnologischer Parameter und der Karbonatisierungsrate wird das CO_2 -Einsparpotenzial von ERC-Betonen im Vergleich zum deskriptiven Konzept untersucht.

4 Literatur

- [1] Wiens, U. (2021) Nachhaltig bauen mit Beton – Planungshilfe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb). Beton- und Stahlbetonbau. Vol. 117, Issue 1, pp. 58 – 65, Onlinequelle: <https://doi.org/10.1002/best.202100097>
- [2] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2023) Nachhaltig bauen mit Beton - Roadmap des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) für einen klimagerechten und ressourceneffizienten Betonbau (Version 2.0, September 2023). Onlinequelle: https://www.dafstb.de/application/nachhaltigkeit/2023-09-25_DAfStb_Roadmap_Nachhaltig_Bauen_mit_Beton_2.0.pdf [letzter Zugriff am 31.01.2025].
- [3] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2024) DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton (THG-Richtlinie) – Teil 1: Grundlagen und Nachweis am gesamten Tragwerk. Ausgabe August 2024, DIN Media GmbH. Berlin.
- [4] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton (2024) DAfStb-Richtlinie „Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton (THG-Richtlinie) – Teil 2: Deckenbauteile. Ausgabe August 2024, DIN Media GmbH. Berlin.
- [5] Qualitätssiegel Nachhaltiges Gebäude (QNG) des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen, Onlinequelle: www.qng.info [letzter Zugriff am 31.01.2025].
- [6] Heckmann, M., Glock, C. (2025) Graue Emissionen von Hochbaudeckensystemen – Praxis-Umfrage und Hintergründe zur neuen DAfStb Richtlinie. Beton- und Stahlbetonbau Vol. 120, Issue 1, pp. 22-32, Onlinequelle: <https://doi.org/10.1002/best.202400076>.
- [7] Institut Français pour la performance du bâtiment (IFPEB) (2022) Quels enseignements de la conversion de l'Observatoire E+C- avec les indicateurs de la RE2020 (24. Mai 2022). Onlinequelle: <https://www.if-peb.fr/retour-dexperience-e-c-re2020-dune-experimentation-a-une-reglementation/> [letzter Zugriff am 31.01.2025].
- [8] Deutsche Gesellschaft für Nachhaltiges Bauen (2021) Benchmarks für die Treibhausgasemissionen der Gebäudekonstruktion – Ergebnisse einer Studie mit 50 Gebäuden.
- [9] Kaczorowski, M., Felber, L. Klimaverträgliche Tragwerksplanung – Auswertung von 19 Gebäuden nach der kommenden DAfStb-Richtlinie. Onlinequelle: www.nbau.org/2024/02/21/klimavertraegliche-tragwerksplanung/ [Letzter Zugriff 31.01.2025].
- [10] Kuhn, S., Feiri, T., Wiens, U., Ricker, M. (2025) Anwendung der neuen THG-Richtlinie des DAfStb zur Bewertung praxisrelevanter Deckensysteme in Massivbauweise. Beton- und Stahlbetonbau Vol. 120, Issue 1, pp. 12-21, Onlinequelle: <https://doi.org/10.1002/best.202400075>.
- [11] Graubner, A. et al. (2014) Der Stadtbaustein im DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhaben „Nachhaltig Bauen mit Beton“ – Dossier zu Nachhaltigkeitsuntersuchungen, Teilprojekt A. Schriftenreihe des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton. Beuth. Heft Nr. 588. Berlin.
- [12] Weidner, S. et al. (2021) Graue Emissionen im Bauwesen – Bestandsaufnahme und Optimierungsstrategien. Beton- und Stahlbetonbau, Vol. 116, Issue 12, pp. 969-977.
- [13] Birgisdottir, H., Houlihan-Wiberg, A. (2016) Strategies for Reducing Embodied Energy and Embodied GHG Emissions. Guideline for Designers and Consultants – Part 2, Tokyo.
- [14] Heckmann, M., Glock, C. (2023) Ökobilanz im Bauwesen – Treibhausgasemissionen praxisüblicher Deckensysteme. Beton- und Stahlbetonbau Vol. 118, Issue 2, pp. 110-123, Onlinequelle: <https://doi.org/10.1002/best.202200102>.

- [15] Heckmann, M. (2024) Entwicklung eines Benchmarksystems für die Grauen Emissionen von Deckensystemen. Dissertationsschrift an der Rheinland-Pfälzischen Technischen Universität Kaiserslautern-Landau, Fachbereich Bauingenieurwesen. Kaiserslautern
- [16] Glock C., Haist, M., Wiens, U., Heckmann, M., Schack, T. (2024) Treibhausgasreduzierte Tragwerke aus Beton, Stahlbeton oder Spannbeton – die neue DAfStb-Richtlinie. Bauingenieur Bd. 99 (2024) Nr. 11; Onlinequelle: <https://doi.org/10.37544/0005-6650-2024-11-25>.
- [17] Concrete Sustainability Council, Hintergrundbericht zum CO₂-Modul (2022) Onlinequelle: <https://www.csc-zertifizierung.de/downloads/> [letzter Zugriff am 31.01.2025].
- [18] FprEN 1992-1-1:2023 (2023) Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken - Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau.
- [19] Wirtschaftsdaten des BTB, Onlinequelle: <https://www.transportbeton.org/branche/wirtschaftsdaten/> [letzter Zugriff am 31.01.2025].
- [20] Deutsches Institut für Normung (DIN) DIN 1045-2:2023 08, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton. Beuth Verlag, Berlin
- [21] Deutsches Institut für Normung (DIN) DIN EN 12390-10:2019-08, Prüfung von Festbeton – Teil 10: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton bei atmosphärischer Konzentration von Kohlenstoffdioxid (Kammertest). Beuth Verlag, Berlin
- [22] Deutsches Institut für Normung (DIN) DIN EN 12390-11:2015-11, Prüfung von Festbeton – Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstandes von Beton – Einseitig gerichtete Diffusion. Beuth Verlag, Berlin
- [23] Bundesanstalt für Wasserbau (2019) BAW-Merkblatt Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Karbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC), Bundesanstalt für Wasserbau, Karlsruhe.
- [24] Deutsches Institut für Normung (DIN) DIN 1045-3:2023 08, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 3: Bauausführung. Beuth Verlag, Berlin
- [25] Deutsches Institut für Normung (DIN) DIN EN 12390-12:2020-03, Prüfung von Festbeton – Teil 12: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton – Beschleunigtes Karbonatisierungsverfahren. Beuth Verlag, Berlin
- [26] Hermerschmidt, W. Wissenschaftliche Studie zur Ermittlung des CO₂-Reduktionspotenziales durch das deutsche ERC-Konzept. DAfStb-Sonderforschungsvorhaben S022 (in Bearbeitung).

5 Autoren

Prof. Dr.-Ing. Udo Wiens

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.

Budapester Straße 31

10787 Berlin

udo.wiens@dafstb.de

David Ov, M.Sc.

Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.

Budapester Straße 31

10787 Berlin

david.ov@dafstb.de

Dr.-Ing. Angelika Schießl-Pecka

Ingenieurbüro Schiessl Gehlen Sodeikat GmbH

Landsberger Straße 370

80687 München

schiessl-pecka@ib-schiessl.de

Programm des 21. Symposiums

01. April 2025, Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

09:00 Uhr	Anmeldung Kaffee	14:00 Uhr	Nachhaltiges Bauen durch die Modularisierung von Skelettbauten Dr.-Ing. Agemar Manny Karlsruher Institut für Technologie (KIT)
09:30 Uhr	Begrüßung Moderation Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Dr.-Ing. Diethelm Bosold Verband Deutscher Betoningenieure e. V. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH	14:30 Uhr	Net-Zero Concrete – Lässt er sich zukünftig in Betonfertigteilen realisieren? Lukas Romanowski GOLDBECK Technologies GmbH
09:45 Uhr	Weiterentwicklung emissionsreduzierter, klimafreundlicher Zemente Technische Eigenschaften, Zulassung und Regelwerke Prof. Dr.-Ing. Christoph Müller VDZ Technology gGmbH Ökologische Bewertung: Von der EPD zum CO₂-Label Dr.-Ing. Jochen Reiners VDZ Technology gGmbH	15:00 Uhr	Kaffeepause
		15:30 Uhr	Betonbauwerke mit besonderen Anforderungen hinsichtlich Nachhaltigkeit – Welche DAfStb-Projekte unterstützen diesen neuen Anwendungsfall der DIN 1045-1000? Prof. Dr.-Ing. Udo Wiens Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (DAfStb)
10:45 Uhr	Kaffeepause	16:00 Uhr	Einführung der MVV TB 2024/1: Auswirkungen auf den Betonbau Martin Kneisel Umweltministerium Baden-Württemberg
11:15 Uhr	Grundlagen des 3D-Drucks im Betonbau: Empfehlungen für die Praxis Dr.-Ing. Agemar Manny Karlsruher Institut für Technologie (KIT)	16:30 Uhr	Zusammenfassung Schlusswort Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn Karlsruher Institut für Technologie (KIT) Dr.-Ing. Diethelm Bosold Verband Deutscher Betoningenieure e. V. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Ulrich Nolting InformationsZentrum Beton GmbH
11:45 Uhr	Praxiseinblicke in den 3D-Druck im Betonbau: Additives Bauen und CO₂-Bilanzierung im Fokus Robin Degen INSTATIQ GmbH		
12:15 Uhr	Mittagspause	16:45 Uhr	Umtrunk Imbiss
13:45 Uhr	Grußwort des Umweltministeriums Baden-Württemberg Staatssekretär Dr. Andre Baumann Umweltministerium Baden-Württemberg		

Autorenverzeichnis

21. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung Klimaeffizientes Bauen – Baustoffe und Bauweisen

Robin Degen

INSTATIQ GmbH,
Schelmenwasenstraße 37, 70567 Stuttgart

Prof. Dr.-Ing. Frank Dehn

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB), Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe

Matthias Dichtl

INSTATIQ GmbH,
Schelmenwasenstraße 37, 70567 Stuttgart

Dr.-Ing. Agemar Manny

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie (IMB), Karlsruher Institut für Technologie (KIT),
Gotthard-Franz-Str. 3, 76131 Karlsruhe

Manuel Mohr

Verein Deutscher Zementwerke e. V.,
Kochstraße 6-7, 10969 Berlin

Prof. Dr.-Ing. Christoph Müller

VDZ Technology gGmbH,
Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf

David Ov

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

Dr.-Ing. Jochen Reiners

VDZ Technology gGmbH,
Toulouser Allee 71, 40476 Düsseldorf

Lukas Romanowski

Goldbeck Production GmbH,
Ummelner Straße 4-6, 33649 Bielefeld

Dr.-Ing. Angelika Schießl-Pecka

Ingenieurbüro Schiessl Gehlen Sodeikat GmbH,
Landsberger Straße 370, 80687 München

Prof. Dr.-Ing. Udo Wiens

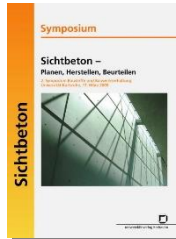
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V.,
Budapester Straße 31, 10787 Berlin

Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

Themen vergangener Symposien (2004-2024)



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-Bearbeitung
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

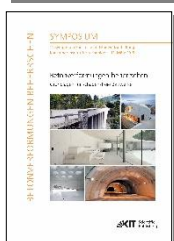


10. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

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

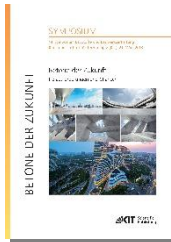


13. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung

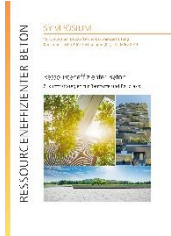
Sicherheit durch Beton – Schutz vor Explosion, Brand und Risikostoffen

Hrsg. H. S. Müller, U. Nolting, J. Link

ISBN 978-3-7315-0629-4



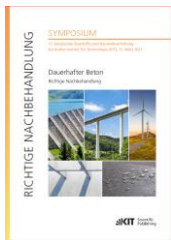
14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Betone der Zukunft – Herausforderungen und Chancen
 Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, J. Link
 ISBN 978-3-7315-0767-3



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



18. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Gutes Klima für die Zukunft.
Dekarbonisierung als wichtiger Schlüssel zum nachhaltigen Bauen mit Beton
 Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, V. Mercedes Kind
 ISBN 978-3-7315-1163-2



19. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Bauen mit Beton im Kreislauf
Recycling, Re-Use und Ressourcenschonung
 Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, V. Mercedes Kind
 ISBN 978-3-7315-1270-7



20. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung
Bauen mit rezyklierten mineralischen Baustoffen -
Von der Ausnahme zur Regelbauweisen
 Hrsg. U. Nolting, F. Dehn, V. Mercedes Kind, M. Denu
 ISBN 978-3-7315-1338-4

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

In den vergangenen Symposien wurde umfassend thematisiert, wie die Zement- und Betonindustrie zur Reduzierung der weltweiten CO₂-Emissionen beitragen kann. Hierbei wurden unterschiedliche Ansätze und Perspektiven beleuchtet. Das diesjährige Symposium rückt nun die Umsetzbarkeit sowie Wirkung der verschiedenen Ansätze für das klimaeffiziente Bauen in den Vordergrund. Die Themen konzentrieren sich sowohl auf neue, klimaeffiziente Betone als auch nachhaltigere Bauweisen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt hierbei auf der praktischen und wirtschaftlichen Realisierbarkeit. Es sollen Lösungen gefunden werden, die sowohl den ökologischen als auch industriellen Anforderungen genügen und das konkrete Einsparpotenzial benennen. Zum Auftakt erhalten Sie einen umfassenden Überblick über die Fortschritte bei emissionsreduzierten und klimafreundlichen Zementen. Dabei werden nicht nur die technischen Eigenschaften und relevanten Regelwerke, sondern auch die ökologische Bewertung dieser Zemente näher beleuchtet. Im Anschluss folgt eine Einführung in die theoretischen Grundlagen des additiven Bauens, insbesondere des 3D-Drucks, inklusive einer CO₂-Bilanzierung. Der zweite Teil beginnt mit einem Grußwort des Umweltministeriums Baden-Württemberg. Danach liegt der Fokus auf dem modularen Bauen, wobei sowohl theoretische als auch praktische Aspekte sowie der Einfluss auf die Nachhaltigkeit betrachtet werden. Der abschließende Programmpunkt widmet sich den aktuell geltenden Richtlinien und Vorgaben für den Betonbau, die die Umsetzbarkeit und potenziellen Einschränkungen auf das klimaeffiziente Bauen betreffen.

Schirmherrschaft:



Baden-Württemberg

MINISTERIUM FÜR UMWELT, KLIMA UND ENERGIEWIRTSCHAFT

www.betoninstitut.de
www.beton.org
www.betoningenieure.de

ISBN 978-3-7315-1413-8

