



INFORMATIONSSCHRIFT

**Beitrag der  
BZM-Industrie  
zur Dekarboni-  
sierung der  
Betonbauweise**

1. Ausgabe | Mai 2024

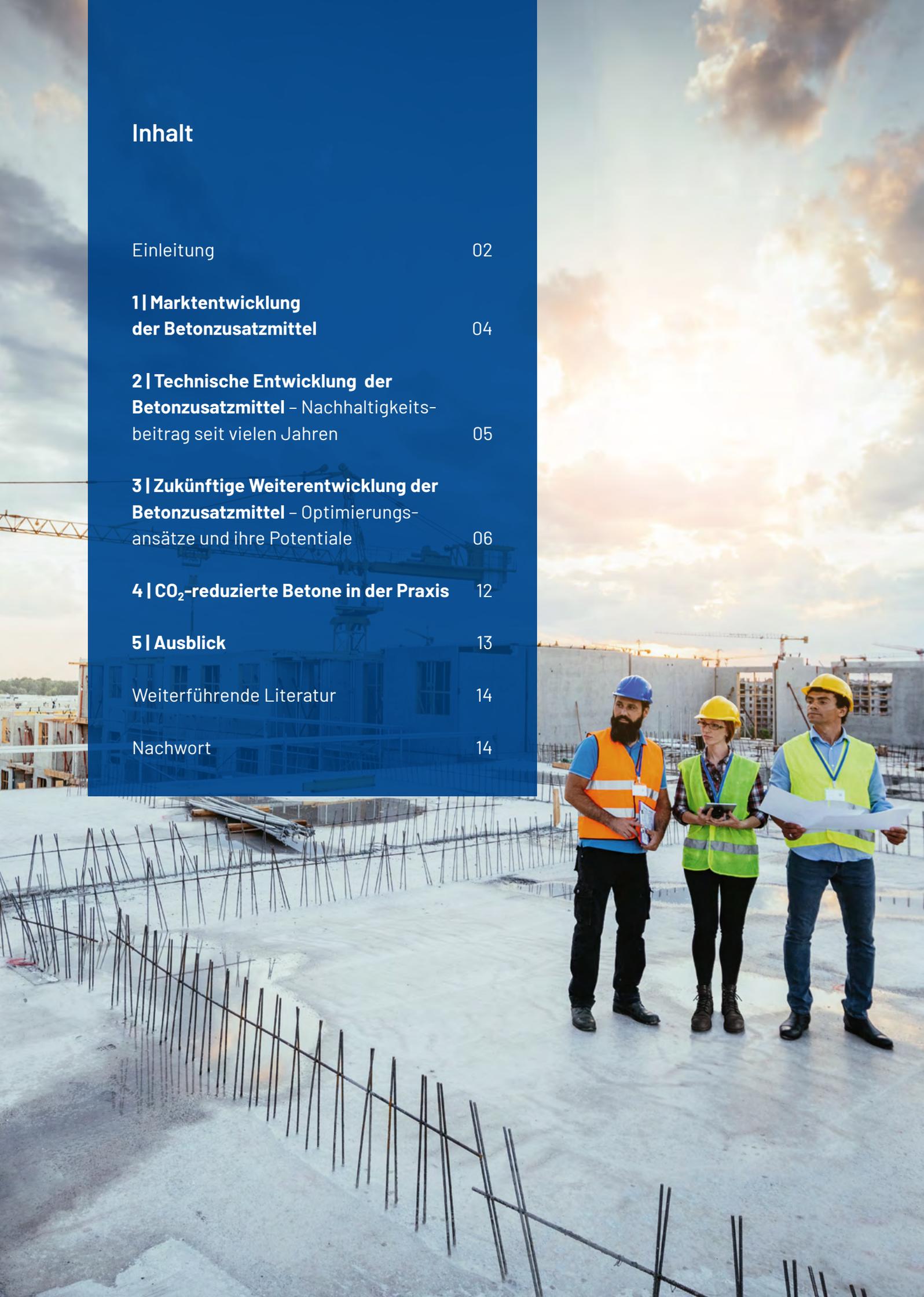
## Einleitung

Beton ist ein unverzichtbarer Bestandteil moderner Zivilisation. Seine Vielseitigkeit und Dauerhaftigkeit machen ihn auch in Zukunft zu einem zentralen Element der Weiterentwicklung unserer Städte und Infrastruktur. Gleichwohl wird seine zukünftige Relevanz auch davon abhängen, wie gut es gelingt, CO<sub>2</sub>-Emissionen zu mindern. Es ist daher eine Aufgabe an die gesamte Branche gemeinsam am Ziel einer Dekarbonisierung der Betonbauweise zu arbeiten.

Moderne Betonzusatzmittel leisten schon heute einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigeren Betonbauweise. Der vorliegende Beitrag zeigt auf, welche Erfolge bei der Minderung der CO<sub>2</sub>-Emissionen auf diesem Wege bereits erreicht wurden und welche weiteren Schritte noch notwendig sind. Im Kontext einer sich stark verändernden Rohstoffbasis wird aufgezeigt, wie innovative Betonzusatzmittel eine zuverlässige Steuerung der Betoneigenschaften auch in Zukunft ermöglichen und dadurch im Zusammenspiel mit allen am Bau Beteiligten einen wichtigen Beitrag zur Erreichung einer klimaneutralen Betonbauweise leisten.

# Inhalt

Einleitung	02
<b>1   Marktentwicklung der Betonzusatzmittel</b>	04
<b>2   Technische Entwicklung der Betonzusatzmittel – Nachhaltigkeitsbeitrag seit vielen Jahren</b>	05
<b>3   Zukünftige Weiterentwicklung der Betonzusatzmittel – Optimierungsansätze und ihre Potentiale</b>	06
<b>4   CO<sub>2</sub>-reduzierte Betone in der Praxis</b>	12
<b>5   Ausblick</b>	13
Weiterführende Literatur	14
Nachwort	14



# 1 | Marktentwicklung der Betonzusatzmittel

Betontechnologie heutiger Prägung ist ohne Betonzusatzmittel undenkbar. Spezifische Betonzusatzmittel ermöglichen die Herstellung von Hochleistungsbetonen wie selbstverdichtenden, hochfesten und ultrahochfesten Betonen. Die Hersteller produzieren heutzutage Betonzusatzmittel für eine Vielzahl hochspezialisierter Anwendungen, von Hochhausbau in Wüstenstaaten über Offshore-Windanlagen in den Meeren bis hin zu Tunnelprojekten in den Alpen. Auch normale Betone des allgemeinen Hoch- und Ingenieurbaus können durch Betonzusatzmittel verbessert werden.

Im Jahresbericht 2022/23 der Deutschen Bauchemie [1] wurden die Absatzzahlen von Betonzusatzmitteln für

Deutschland (+ Export) der letzten zwanzig Jahre veröffentlicht (siehe Bild 1). Es ist zu erkennen, dass im Jahr 2017 die Schallmauer von 200.000 Tonnen durchbrochen wurde und der Absatz seitdem auf hohem Niveau verblieben ist.

Bild 1 zeigt, dass Betonverflüssiger und Fließmittel die am häufigsten eingesetzten Betonzusatzmittel sind. Die Entwicklung und Optimierung dieser Zusatzmittel wird ständig vorangetrieben. Ein Beispiel dafür sind Fließmittel auf Basis von Polycarboxylatether (PCE), die es ermöglichen, bestimmte Betoneigenschaften gezielt einzustellen und so das enorme Potenzial dieses Hochleistungsbaustoffs weiter auszuschöpfen.

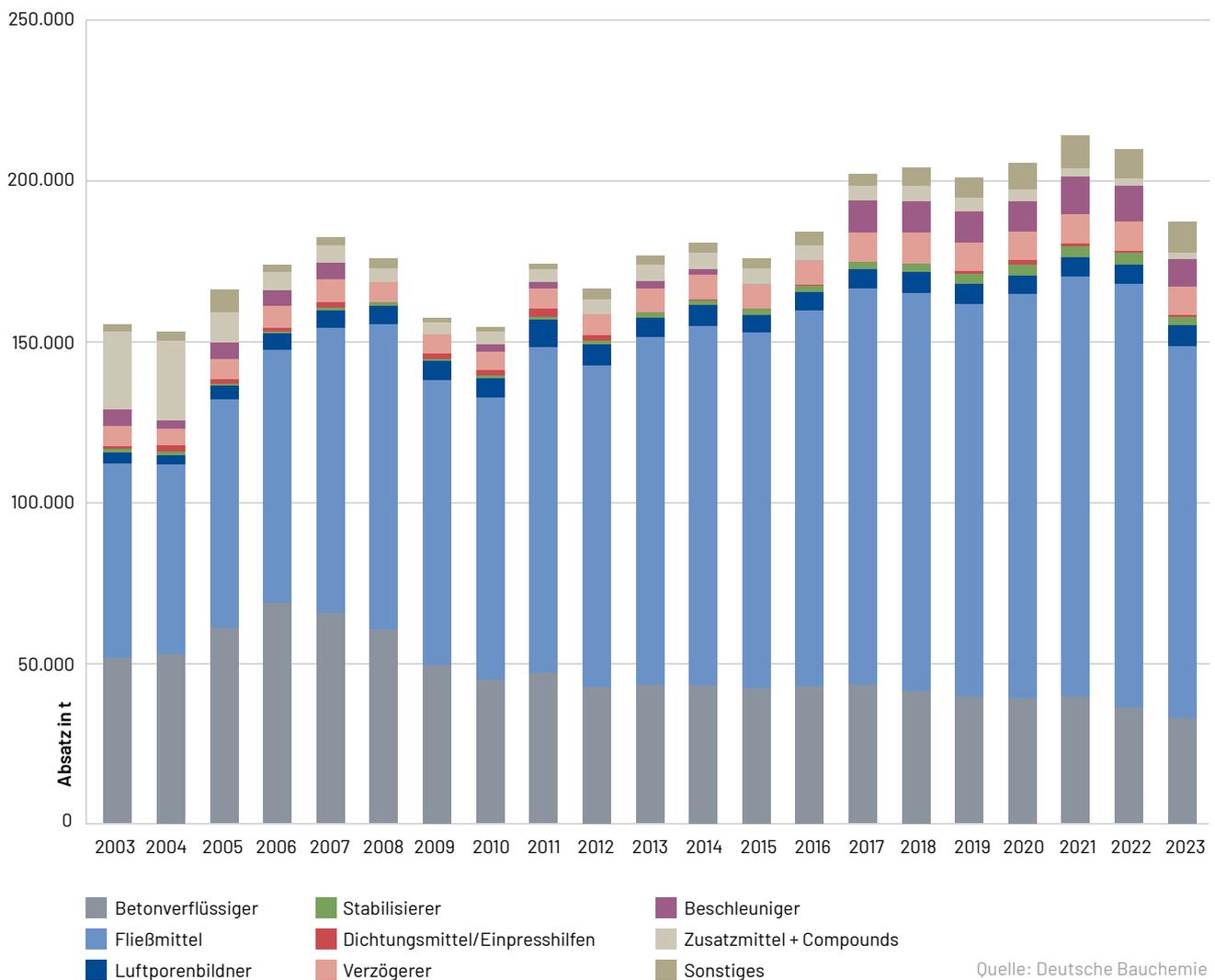


Bild 1 | Absatzentwicklung Betonzusatzmittel in Deutschland + Export

## 2 | Technische Entwicklung der Betonzusatzmittel

### Nachhaltigkeitsbeitrag seit vielen Jahren

Der Einsatz von Betonzusatzmitteln spielt in der Betonindustrie seit vielen Jahren eine große Rolle bei der Optimierung von Betonrezepturen. Dabei geht es einerseits um die ökonomische Optimierung durch Bindemittelreduktion und andererseits um die Optimierung der Verarbeitbarkeit.

Eine Reduktion des Bindemittelgehalts steht in Zusammenhang mit einer Senkung des Gesamtwassergehalts der Betonrezeptur, während die Verarbeitbarkeit des Betons erhalten bleibt. Betonverflüssiger und Fließmittel sind hierbei besonders relevant und wurden kontinuierlich weiterentwickelt und optimiert.

Moderne Fließmittel ermöglichen eine Absenkung des Wassergehalts um durchschnittlich ca. 30 kg/m<sup>3</sup> Beton. Bei einem w/z-Wert von 0,5 kann der anrechenbare Bindemittelgehalt um ca. 60 kg/m<sup>3</sup> reduziert werden. Dadurch wird die CO<sub>2</sub>-Bilanz beträchtlich verbessert, um ca. minus 30 bis minus 45 kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>3</sup> Beton. Bei einem Produktionsvolumen von 52,2 Mio. m<sup>3</sup> aus dem Jahr 2022 ergeben sich signifikante Einsparungen von mehr als 2,3 Mio. t CO<sub>2</sub>.

Dieser Pfad zur Erhaltung der Verarbeitbarkeit bei maximaler Wasserreduktion wird intensiv von der Zusatzmittelbranche verfolgt. Er bildet eine wesentliche Grundlage zur zukünftigen Minimierung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks in Verbindung mit dem Einsatz von Zementen neuer und zukünftiger Generationen mit weiter verringertem Klinkergehalt.

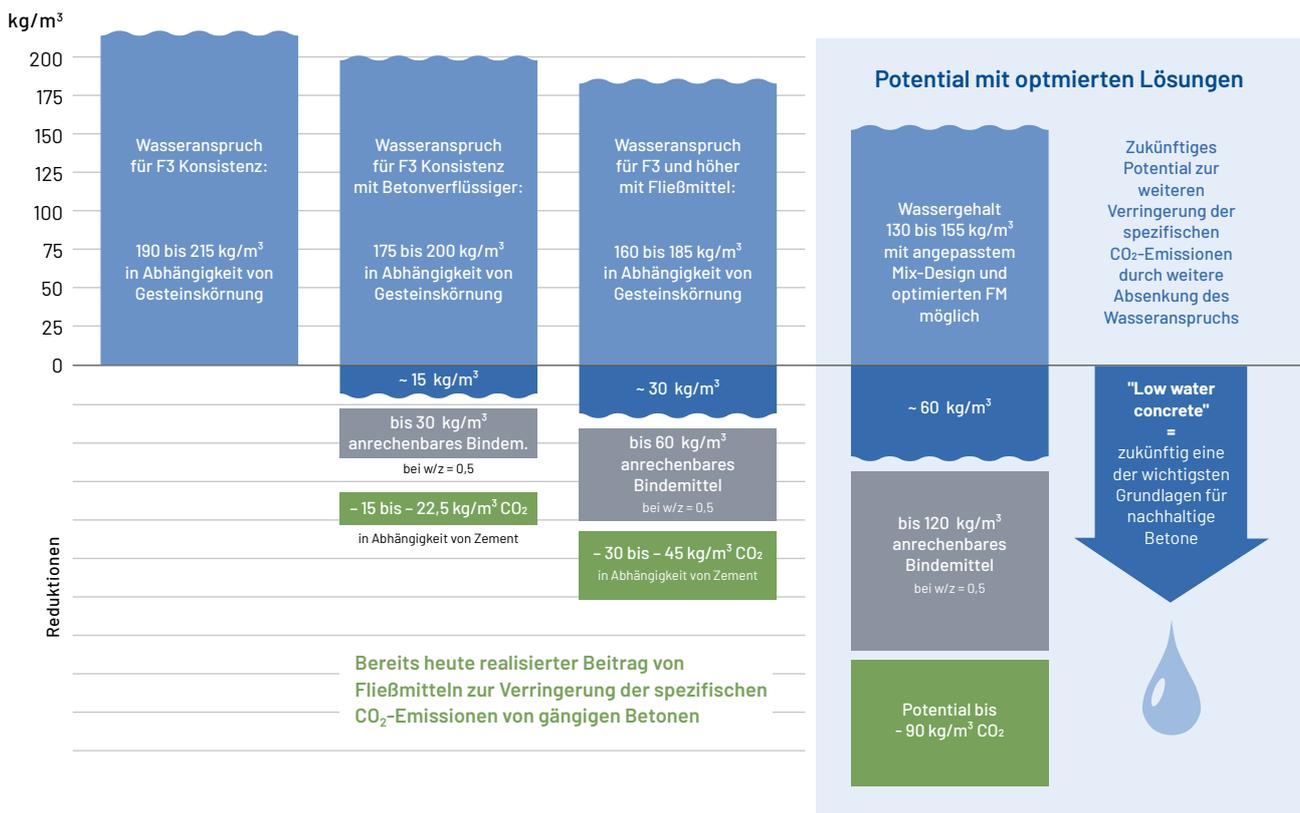


Bild 2 | Zukünftiges Potential zur weiteren Verringerung der spezifischen CO<sub>2</sub>-Emissionen durch weitere Absenkung des Wasseranspruchs

Die Zementindustrie in Deutschland hat seit jeher den Fokus auf eine klimaneutrale und ressourcenschonende Betonbauweise gelegt. Die spezifische CO<sub>2</sub>-Emission des Herstellprozesses wurde von 742 kg/t Zement im Jahr 1990 auf aktuell etwa 566 kg/t Zement [2] gemindert. Bezogen auf die genannten rd. 52,2 Mio. m<sup>3</sup> Transportbeton im Jahr 2022

ergibt sich eine CO<sub>2</sub>-Einsparung von rd. 2,8 Mio. t pro Jahr. Die spezifische CO<sub>2</sub>-Emission wurde wesentlich verringert, indem der absolute und fossile Energieeinsatz bei der Zementproduktion reduziert und vermehrt klinkereffiziente Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen hergestellt wurden. Laut Bild 3 betrug der Anteil dieser CO<sub>2</sub>-effizienten

Zemente am Inlandsversand in Deutschland im aktuellen Berichtsjahr 2022 bereits etwa 75 %. Die Verwendung von klinkereffizienten Zementen ist weiterhin ein wichtiger Bestandteil der Dekarbonisierung und Ressourcenschonung im Betonbau. In Deutschland werden hauptsächlich ungebrannter Kalkstein und/oder Hüttensand als weitere Zementbestandteile eingesetzt. Um Klimaneutralität beim Bauen mit Beton zu erreichen, wird der Gehalt an weiteren Hauptbestandteilen in den klinkereffizienten Zementen der neuen Generation, wie den CEM II/C-M- und CEM VI-Zementen, auf etwa 50 % bzw. 65 % gesteigert. Dies erfolgt durch eine Kombination von Kalkstein und/oder Betonrecyclingmehl sowie Hüttensand, Puzzolane bzw. calcinierte Tone in ternären bzw. quartären Systemen. Das Ziel zukünftiger Zemente, insbesondere der sogenannten CEM X-Zemente, ist es, den Gehalt an ungebranntem Kalkstein oder Betonrecyclingmehl zu maximieren, während die Zementleistungsfähigkeit aufrechterhalten wird. Solche Zemente können bis zu 80 % andere Hauptbestandteile neben Klinker enthalten.

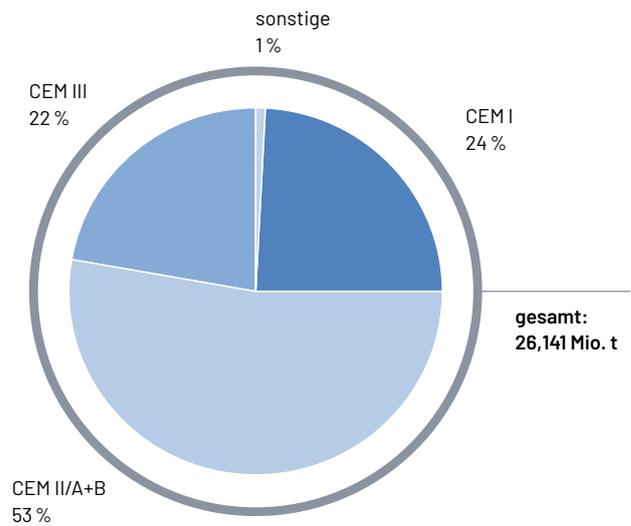


Bild 3 | Inlandsversand der VDZ-Verbandsmitglieder in 2022 [2]

### 3 | Zukünftige Weiterentwicklung der Betonzusatzmittel

#### Optimierungsansätze und ihre Potentiale

Im Prinzip gibt es fünf Möglichkeiten zur Dekarbonisierung von Beton:

- > Verwendung erneuerbarer Energie,
- > Reduktion des Klinkergehalts von Zement durch weitere Hauptbestandteile oder Verwendung alternativer Bindemittel,
- > Verringerung des Klinkeranteils pro Kubikmeter Beton,
- > Klimakompensation und CO<sub>2</sub>-Abscheidung
- > sowie sonstige Maßnahmen wie die Verwendung rezyklierte Gesteinskörnung oder die CO<sub>2</sub>-Speicherung im Beton.

Zementadditive und Betonzusatzmittel können zur Dekarbonisierung von Beton folgenden Beitrag leisten:

#### Optimierung der Zementproduktion

Durch Zementadditive kann die Leistungsfähigkeit von Zement mit geringen Klinkergehalten optimiert werden. Diese verbessern die Produktionsabläufe, verringern den Energiebedarf bei der Mahlung und steigern die Klinkereffizienz sowie die Leistungsfähigkeit des Bindemittels.

#### Klinkerersatz

Der Gehalt an weiteren Hauptbestandteilen im Zement kann durch die Verwendung von natürlichen Puzzolanen und calcinierten Tonen erhöht werden. Gleichzeitig kann die Menge herkömmlicher weiterer Hauptbestandteile, wie Hütten-

sand, Flugasche und ungebranntem Kalkstein, maximiert werden, ohne dass dies zu Einbußen bei der Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit führt.

#### Klinkereffizienter Beton

Um den Klinkergehalt pro Kubikmeter Beton zu reduzieren, wird die Gesamtwassermenge deutlich gesenkt und Zusatzstoffe wie Gesteinsmehle hinzugefügt. Dabei wird die Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit erhalten.

#### Sonstige Ansätze

Alternative Ausgangsstoffe wie Recyclingmaterial und bisher nicht verwendbare Gesteinskörnungen werden eingesetzt, um die Verarbeitbarkeit, Festigkeit und Dauerhaftigkeit zu erhalten.

Möglichkeiten diese Zielsetzung zu erreichen, sehen die Hersteller von Betonzusatzmitteln in folgenden Bereichen bzw. Wirkungsgruppen:

- > Fließmittel
- > Erhärtungsbeschleuniger
- > Stabilisierer/Viskositätsmodifizierer
- > Betonzusatzmittel zur Optimierung der Lebensdauer von Betonbauteilen
- > Geopolymerbeton
- > Zusatzmittel für die Zementindustrie
- > Recycling

## 1. Fließmittel

Innovative Fließmittelkonzepte bieten das größte Potenzial, um die Verarbeitbarkeit, die Betonrheologie, die Verarbeitungszeit und die Konsistenzhaltung zu steuern. Insgesamt lassen sich fünf verschiedene Optionen unterscheiden.

Um den Klinkergehalt im Beton zu reduzieren, gibt es zwei Möglichkeiten: Erstens kann bereits klinkerreduzierter Zement verwendet werden. Zweitens kann ein erheblicher Teil des Zements durch Gesteinsmehle oder andere Zusatzstoffe ersetzt werden.

In Deutschland werden jährlich 52 Mio. m<sup>3</sup> Transportbeton verarbeitet. Durch die Senkung des Mindestzementgehalts

von derzeit ca. 280 kg/m<sup>3</sup> auf 200 kg/m<sup>3</sup> und den Einsatz von Zusatzstoffen sowie neuen, innovativen Fließmittelkonzepten zur Erhaltung der Verarbeitbarkeit bei gleichzeitig reduziertem Gesamtwassergehalt können bis zu 50 kg CO<sub>2</sub> pro Kubikmeter Beton eingespart werden. Selbst wenn man nur 60 % bis 70 % des Transportbetonvolumens erfasst (z. B. Expositionsklassen XC1 und XC2), kann man eine Einsparung von 1,6 Mio. bis 1,85 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub> pro Jahr erzielen. Die Grafik unten zeigt die Effekte durch Reduktion des Mindestzementgehalts bei gleichzeitiger Einhaltung des maximalen w/z-Werts (Beispiel für Expositionsklassen XC4, XF1, XA1).

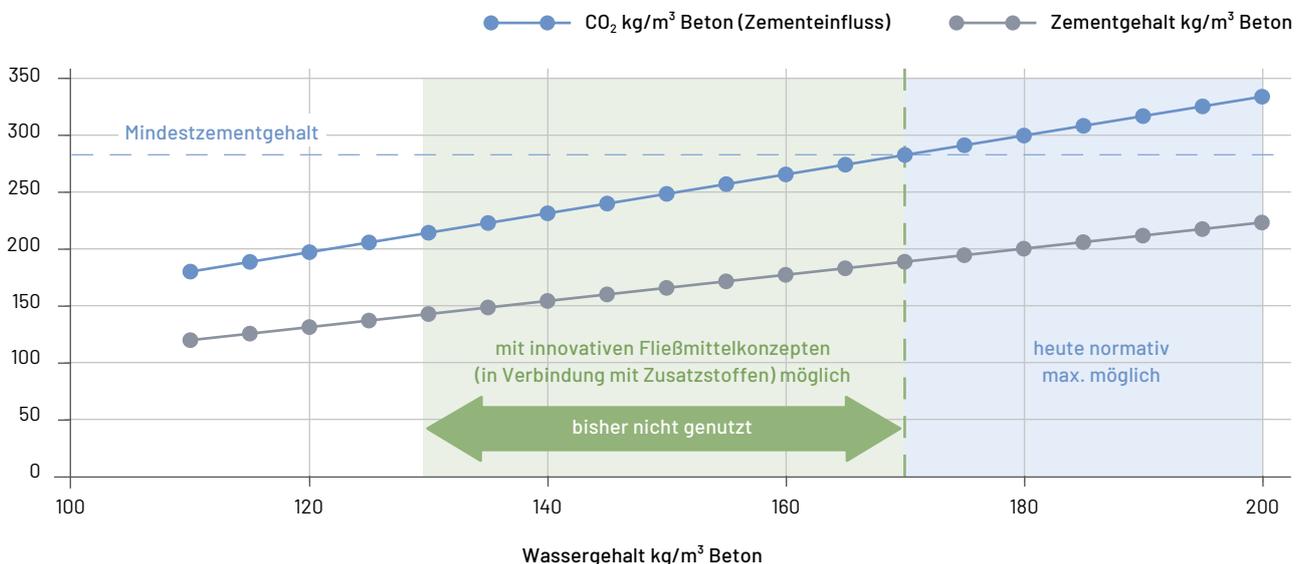


Bild 4 | Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch Einsparungen bei der Zugabewassermenge sowie beim Klinker- bzw. Zementgehalt (Beispiel für die drei im Diagramm genannten Expositionsklassen)

Alternativ könnte der Nachweis der gleichen Leistungsfähigkeit von Beton (Performancetest) freigegeben werden, um vergleichbare Optimierungspotenziale zu erschließen. Eine weitere wichtige Grundlage zur Dekarbonisierung der Betonbauweise ist die Verwendung von CEM II/C- und CEM VI- bzw. CEM X-Zementen. Um die Dauerhaftigkeitseigenschaften von Beton zu gewährleisten, ist eine Verschärfung der maximalen w/z-Werte bzw. eine Absenkung des Wassergehalts im Beton notwendig. Die Einhaltung der Anforderungen an den w/z-Wert bei gleichzeitigem Erhalt der Verarbeitbarkeit können zukünftig nur in Verbindung mit geeigneten und leistungsfähigen Fließmitteltechnologien realisiert werden.

Im Allgemeinen weisen calcinierte Tone, natürliche Pozzolane und Betonmehl eine größere spezifische Oberfläche auf als beispielsweise Hüttensand, wodurch ein höherer Wasseranspruch entsteht. Die Zementindustrie ist in der Lage, diesem Problem mit moderner Mahl- und Sichter-technologie zu begegnen, wobei die Anforderungen an die Fließmitteltechnologie weiter steigen werden.

Das Zusammenspiel zwischen Zement und Betonzusatzmitteln, insbesondere bei geringen Wassergehalten, wird immer wichtiger. Die Betonzusatzmittelindustrie bietet bereits heute innovative Fließmitteltechnologien zur Steuerung der Verarbeitungseigenschaften wie Frischbetonkonsistenz und Rheologie an und entwickelt diese kontinuierlich weiter.

## 2. Erhärtungsbeschleuniger

Moderne Erhärtungsbeschleuniger steigern insbesondere die Frühfestigkeit des Betons, ohne die Spätfestigkeit negativ zu beeinflussen. Sie eignen sich daher besonders für die Herstellung von Betonwaren und Fertigteilen. Durch ihren Einsatz kann bei Verwendung von klinkereffizienten Zementen mit deutlich verringerter spezifischer CO<sub>2</sub>-Emission die Ausschal- bzw. Abhebefestigkeit zur gleichen Zeit oder sogar früher erreicht werden. Durch den vollständigen Ersatz der im Jahr 2022 produzierten rund 6,4 Mio. t Portlandzement CEM I [2] durch CEM II/A-Zemente hätten rund 0,72 Mio. t CO<sub>2</sub> eingespart werden können. Für die entsprechende Menge an Beschleuniger müssen ca. 0,15 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Jahr veranschlagt werden. Insgesamt ergibt sich immer noch eine Einsparung von 0,57 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen.

Der nächste Schritt besteht darin, Portlandkompositzemente der Art CEM II/B oder punktuell CEM II/C mit einem Klinkergehalt von mindestens 65 bzw. 50 M.-% zu etablieren. Die Steuerung der Frühfestigkeit durch Erhärtungsbeschleuniger gewinnt dabei zunehmend an Bedeutung. Es ist zu beachten, dass der CO<sub>2</sub>-Eintrag von Erhärtungsbeschleunigern innerhalb der CO<sub>2</sub>-Bilanz von Beton signifikant unter den CO<sub>2</sub>-Einsparpotentialen aus der Klinkerreduktion liegt. In einer typischen Fertigteilverzeptur können durch den Wechsel von CEM I auf CEM II/A etwa 30 kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>3</sup> Beton eingespart werden. Bei Verwendung von Hochofenzement CEM III sind es sogar 130 kg CO<sub>2</sub> pro m<sup>3</sup> Beton. Die Gesamtbilanz ist äußerst positiv, da übliche Dosiermengen eines Erhärtungsbeschleunigers zwischen 2,0 und 4,0 M.-% vom Zement nur einen CO<sub>2</sub>-Footprint von ca. 5 kg/m<sup>3</sup> bis 15 kg/m<sup>3</sup> besitzen.

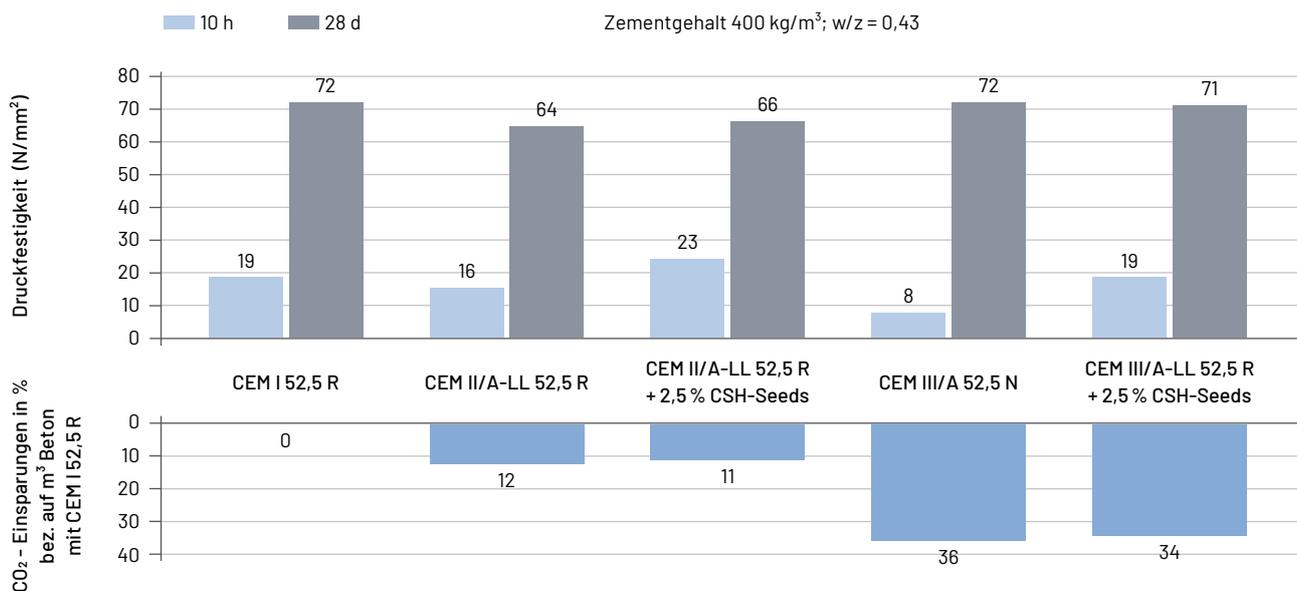


Bild 5 | Potential der CO<sub>2</sub>-Einsparung durch die Verwendung von CEM II/A- bzw. CEM III/A-Zementen in Kombination mit Erhärtungsbeschleunigern

In der Transportbetonindustrie werden vorwiegend klinkereffiziente CEM II und, je nach Verfügbarkeit, CEM III-Zemente verwendet. Daher hat der Einsatz von Erhärtungsbeschleunigern in der Transportbetonindustrie eine andere Relevanz als in der Betonwaren- und Fertigteilbranche. Optimierungspotentiale beim Transportbeton betreffen hauptsächlich die Beschleunigung des Baufortschritts, insbesondere bei kühleren Temperaturen (Winterbetonagen). So können u. a. die Gefrierbeständigkeit, die Begehrbarkeit bzw. mechanische Belastbarkeit von Bauteilen, die Ausschalfestigkeit und

der Zeitpunkt zur Oberflächenbearbeitbarkeit (Abscheiben/ Glätten) von Betonböden deutlich früher erreicht werden. Praxisbeispiele zeigen, dass selbst stark klinkerreduzierte CEM III/B-Zemente, die bei einer Herstellungs- und Lager- temperatur von 10 °C nach einem Tag keine messbaren Druckfestigkeitswerte aufweisen, mit geeigneten Erstar- rungsbeschleunigern bereits nach 24 Stunden vergleich- bare Festigkeiten wie das unbeschleunigte System bei 20 °C bzw. nach 2 Tagen Erstarrungszeit erreichen.

Ein schnellerer Baufortschritt auf Transportbetonbaustellen sowie das vorzeitige Ausschalen oder Abheben in Werken der Betonwaren- und Fertigteilbranche senken vor allem die Betriebsstunden einer Wärmebehandlung. Der Energieverbrauch sowie die Emissionen werden reduziert und somit der ökologische Fußabdruck minimiert. Der Einsatz von Erhärtungsbeschleunigern in Kombination mit klinkereffizienten Zementen trägt daher zur Klimaneutralität und Ressourceneffizienz einer nachhaltigeren Betonindustrie bei. Durch innovative Erhärtungsbeschleuniger kann trotz Absenkung der Temperaturen von Warmbeton, der Temperatur in Wärmekammern oder der Temperatur Schalungsheizung die Frühfestigkeit erhalten bleiben.

### 3. Stabilisierer/Viskositätsmodifizierer

Unter Stabilisierern/Viskositätsmodifizierern versteht man Substanzen, die zu einem andickenden Effekt oder zumindest zu einer Viskositätserhöhung (Zähflüssigkeit) in zementären Systemen führen. Oft werden Cellulosen, Stärken oder andere viskositätsmodifizierende Substanzen verwendet. Anwendungsgebiete sind z. B. Unterwasserbeton, Bohrpfehlbeton, Betonrezepturen, die zum Bluten neigen, sowie standfeste Spachtel- und Mörtelrezepturen.

Diese Betonzusatzmittel gewährleisten eine maximale Robustheit und Sicherheit bei der Betonherstellung auch bei extrem reduzierten Bindemittelgehalten. Durch den Einsatz von Stabilisierern ist in Verbindung mit hochwirksamen Fließmitteln eine Maximierung der CO<sub>2</sub>-Reduktion möglich. Betonrezepturen mit geringem Feinanteil bieten in der Regel ein besonders hohes CO<sub>2</sub>-Einsparpotenzial. Grund hierfür ist, dass der Mehlkornanteil weniger Zement enthält. Oftmals wird zum ‚Auffüllen‘ relativ günstiges Kalksteinmehl verwendet. Das Kalksteinmehl muss dabei eine Mindestqualität erfüllen und darf z. B. nicht mit Tonmineralien verunreinigt sein, da dies zu einer erhöhten Adsorption des Fließmittels und einer signifikant schlechteren Verarbeitbarkeit führen würde. Diese Mindestqualität führt dazu, dass Kalksteinmehl oft über größere Distanzen transportiert werden muss, was sowohl mit transportbedingten CO<sub>2</sub>-Emissionen als auch mit erheblichen Kosten verbunden ist.

Die dargestellten möglichen jährlichen Einsparungen an CO<sub>2</sub> in der Transportbeton- und Fertigteil- bzw. bauchemischen Industrie sind durchaus in einem Zeitraum von fünf bis zehn Jahren erreichbar, der allein für eine vollständige Umstellung von CEM I auf beispielsweise CEM II/A-LL Zemente erforderlich ist. Diese Einsparungen sind also in einem mittelfristigen Zeitraum erreichbar. Für eine weitergehende Dekarbonisierung der Betonbauweise ist es daher notwendig, dass das beim Klinkerbrand prozessbedingt entstehende, unvermeidbare CO<sub>2</sub> abgeschieden und eingelagert oder genutzt wird, sodass es dauerhaft gebunden bleibt.

Durch den Einsatz eines geeigneten Stabilisierers kann die Einsatzmenge von Zusatzstoffen, wie Kalksteinmehl, vermieden oder beträchtlich reduziert werden. Stabile, robuste und konstante Betonsorten mit reduziertem Feinanteil und Leimgehalt können so hergestellt werden. Der Einsatz von Stabilisierern wird sich insbesondere bei weiter steigenden CO<sub>2</sub>-Zertifikatspreisen auch aus wirtschaftlicher Sicht lohnen.

Eines der häufigsten Anwendungsgebiete für Stabilisierer ist selbstverdichtender Beton (SVB). Bei diesem Beton muss eine hohe Fließfähigkeit ohne Instabilität (Sedimentation) und ohne Leimabsonderung/Bluten erreicht werden. In Deutschland ist laut der SVB-Richtlinie des DAfStb [4] ein verhältnismäßig hohes Setzfließmaß erforderlich. In anderen europäischen Ländern wie den Niederlanden oder Dänemark ist SVB, aufgrund geringerer Anforderungen an die Mindestkonsistenz, deutlich beliebter. Viele Fertigteilwerke nutzen diese Technologie.

Besonders bei mehlkornarmen SVB-Rezepturen ist es eine große Herausforderung, das Bluten und Instabilitäten vollständig zu verhindern. Um diese Anforderungen bei einem hohen Konsistenzniveau zu erfüllen, werden oft pulverförmige Stabilisierer eingesetzt. Seit einiger Zeit sind auch flüssige Stabilisierer/Viskositätsmodifizierer auf dem Markt verfügbar, mit deren Hilfe sich selbstverdichtende Betone mit geringen Mehlkornanteilen stabil herstellen lassen.



#### 4. BZM zur Verbesserung der Betondauerhaftigkeit bzw. Verlängerung der Lebensdauer von Betonbauteilen

Zur Verbesserung der Dauerhaftigkeit von Beton bei Frostangriff mit oder ohne Taumittel können Luftporen (LP)-bildner und Mikrohohlkugeln beitragen. Durch die Zugabe von Mikrohohlkugeln oder LP-Bildnern stabilisierte, kugelförmige Mikroluftporen bieten sich gefrierendem Wasser Expansionsräume im Festbeton. Bei ausreichender Menge und entsprechendem geringem Abstand dieser Luftporen untereinander erfolgt das Gefrieren des Wassers ohne relevante Druckspannungen aufzubauen, die den Beton schädigen würden. Die Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen bei entsprechendem Angriff kann dadurch signifikant verbessert werden.

Weitere Betonzusatzmittel zur Verlängerung der Lebensdauer von Bauteilen aus Stahlbeton sind u. a. Hydrophobierungs- und Dichtungsmittel, Korrosionsinhibitoren und Passivatoren sowie Superabsorber, Schwindreduzierer und

eingekapselte, calciumcarbonatbildende Bakterien/Sporen. Die drei letztgenannten sollen die Bildung von Rissen durch chemisches Schwinden bzw. Trocknungsschwinden verringern bzw. die Selbstdichtung von Beton nach einer Rissbildung unterstützen und dadurch die Eindringung von korrosionsauslösenden Substanzen verringern. Auch Korrosionsinhibitoren bzw. Passivatoren werden Beton bei dessen Herstellung zugegeben und verlängern im Festbeton die Zeit bis zur Depassivierung der Stahlbewehrung und verzögern somit den Beginn der Bewehrungskorrosion. Die Korrosion beginnt, sobald die Wirkstoffe im Festbeton durch korrosionsauslösende Substanzen verbraucht sind. Sie unterstützen daher eine auf die Lebensdauer des Bauwerks bemessene Überdeckung der Stahlbewehrung. Hierfür ist ein gut nachbehandelter Beton von geringer Permeabilität notwendig, der durch einen verringerten Wassergehalt und die Verwendung von klinkereffizientem Zement erreicht wird.

## 5. Zusatzmittel für die Zementindustrie

Zementadditive spielen eine entscheidende Rolle bei der Zementherstellung. Sie werden dem Herstellungsmahlprozess hinzugefügt, um die Mahlbarkeit sowie die Festigkeit, Verarbeitbarkeit und weitere Eigenschaften zu verbessern. Insbesondere für die Herstellung klinkereffizienter Zemente bietet die Verwendung von Zementadditiven Lösungen und hat sich zu einer Standardpraxis entwickelt. Neben der Reduzierung des Energieaufwandes für die Mahlung kann durch den Einsatz von Zementadditiven die Mahlfineinheit gezielt optimiert werden, was zu einer Steigerung der Leistungsfähigkeit der Zemente führt und in der Folge eine weitere Reduzierung des Klinkergehalts bei gleichbleibender Zementleistungsfähigkeit ermöglicht. Ein weiterer Fokus liegt auf der Festigkeitsentwicklung von Zementen. Sowohl die Früh- als auch die Endfestigkeit kann durch den Einsatz spezieller Additive erhöht werden. Diese Additive beein-

flussen den Hydratationsprozess des Zements, fördern die Bildung von Calciumsilikathydraten (CSH) und unterstützen die Bildung einer dichteren und dauerhaften Betonmatrix. Zudem können sie den Wasseranspruch der Zemente optimieren und die Verarbeitungseigenschaften im Beton verbessern.

Zementadditive tragen somit zur Dekarbonisierung bei, da sie die weitere Optimierung von Zementen unterstützen. Zementoptimierung bedeutet in diesem Zusammenhang, dass das volle Leistungsspektrum von Klinker und Zement ausgeschöpft wird, indem der Einsatz von weiteren Hauptbestandteilen maximiert und somit die Klinkermenge reduziert wird. Diese Prozesse bergen erhebliches Potenzial zur weiteren Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen.

## 6. Recycling

In Zukunft werden Recyclingmaterialien in der Bauindustrie aus mehreren Gründen eine größere Rolle spielen. Sie sind flächendeckend verfügbar, schonen natürliche Ressourcen (auch bei anteiliger Verwendung im Neubau), können einen erheblichen Beitrag zur Reduzierung der CO<sub>2</sub>-Emissionen leisten und verursachen gleichzeitig weniger Entsorgungs- und Abfallmengen. Sie sind damit eine optimale Lösung für die Anforderungen an die Nachhaltigkeit.

Allerdings haben Recyclingmaterialien spezielle Anforderungen an Betonzusatzmittel. So ist allen Recyclingmaterialien bislang gemein, dass sie einen erhöhten Wasseranspruch haben und zudem einen höheren Anspruch an Fließmittel aufweisen. Diese Problematik kann jedoch mit spezialisierten und leistungsfähigen Fließmittelsystemen erfolgreich gelöst werden.

Die gewünschten neuen Eigenschaften umfassen eine hohe Robustheit gegenüber schwankenden Eigenschaften der Betonausgangsstoffe sowie gegenüber herausfordernden Rohstoffanteilen wie Tonmineralien. Es ist wichtig, dass diese Eigenschaften neben den bisherigen Anforderungen an Konsistenzhalt und Wasserreduktion erfüllt werden. Zudem sollen die neuen Fließmittel umweltschonend produziert werden und einen geringen CO<sub>2</sub>-Footprint aufweisen.

Mehrere Forschungsprojekte beschäftigen sich derzeit mit der vollständigen Aufarbeitung von Beton. Dabei soll aus der Zementsteinmatrix neben der Gesteinskörnung ein reaktives, zementähnliches Material hergestellt werden.

Die mit diesen Rohstoffen hergestellten Betone müssen ebenfalls konkurrenzfähig mit auf dem Markt verfügbaren Betonen sein.

Durch den Einsatz von maßgeschneiderten Zusatzmitteln und Additiven ist es bereits heute möglich, eine identische Verarbeitbarkeit und Festigkeitsentwicklung bei geringeren Bindemittel- bzw. Klinkergehalten mit diesen neuen Rohstoffkomponenten zu erreichen.

Neben Fließmitteln werden auch Erhärtungsbeschleuniger eine zusätzliche Nachfrage erhalten, da die meisten Recyclingbetone, die beispielsweise auch aufgearbeitetes Reaktivmaterial zur Zementklinkersubstitution enthalten, eine niedrigere Festigkeitsentwicklung aufweisen werden. Um diese Betone in eine konkurrenzfähige Position zu bringen, bedarf es Beschleunigersystemen, die eine zumindest ähnliche Festigkeitsentwicklung gewährleisten, wie herkömmliche Betone.

Der Einsatz von Recyclingmaterial und die Entwicklung neuer, spezieller Zusatzmittel für Recyclingbetone befinden sich teilweise noch im Anfangsstadium. Obwohl es Leuchtturmprojekte gibt, findet ein breiter Einsatz von RC-Betonen oder gar RC-Bindemitteln bislang noch nicht statt.

Eine wichtige Grundlage, um den Einsatz von RC-Material zu maximieren, ist auch die Vorbereitung, Bereitstellung und Flexibilisierung der Regelwerke, sofern zuvor die Unbedenklichkeit der Systeme nachgewiesen werden konnte. Ein Beispiel für eine solche normative Weiterentwicklung ist der Teil 6 der Zementnormenreihe EN 197, der die Verwendung von rezyklierten Baustoffen als Hauptbestandteil von Zement regelt.

## 4 | CO<sub>2</sub>-reduzierte Betone in der Praxis

Eine intensive Zusammenarbeit aller Baubeteiligten, der gesamten Wertschöpfungskette von Bauherren, Architekten, Planern, Rohstoffindustrie, Betonherstellern, Beton-technologien und ausführenden Unternehmen ist die Grundlage für die Einführung und Etablierung von CO<sub>2</sub>-optimierten Betonen. Zu den wesentlichen Erfolgsfaktoren zählt unter anderem die frühzeitige Einbindung von beratenden Beton-technologien sowie Untersuchungen im Labor und im Maßstab 1:1. Mittlerweile gibt es aus einigen Projekten Erfahrungen mit CO<sub>2</sub>-optimierten Betonen. Als Beispiele seien hier das Projekt EDGE East Side Berlin und der Neubau eines Museums in Detmold genannt.

Beim Projekt EDGE East Side Berlin wurde ein extrem CO<sub>2</sub>-reduzierter Beton als Ortbetonergänzung auf vorgefertigte Stahlbeton-Fertigteildecken eingesetzt. Dieser Beton setzt neue Maßstäbe in Bezug auf das CO<sub>2</sub>-Äquivalent und gewährleistet gleichzeitig eine hohe Festigkeit und Dauerhaftigkeit. Dieses Konzept wurde erfolgreich umgesetzt, indem ein innovatives Bindemittelkonzept (Anlehnung an CEM X) verwendet und der Zugabewassergehalt signifikant reduziert wurde, während die Verarbeitbarkeit durch neuartige Fließmittelkonzepte erhalten blieb. Der resultierende Beton hat ein CO<sub>2</sub>-Äquivalent von nur etwa 138 kg/m<sup>3</sup> und liegt damit deutlich unter dem Branchenmittel für C 40/50 von 299 kg/m<sup>3</sup> CO<sub>2</sub>-Äquivalent (interpoliert nach [3]).

Im Rahmen des Projekts wurde gezeigt, dass durch den Einsatz von innovativen Betonzusatzmitteln und klinkereffizienten Zementen CO<sub>2</sub>-optimierter Beton auch unter extremen Bedingungen wie hohen Betontemperaturen sowie Pumpstrecken von mehr als 250 m und bis zu 140 m Höhe hergestellt und sicher eingebaut werden kann. Die erfolgreiche Umsetzung erfolgte durch eine reibungslose Zusammenarbeit aller Baubeteiligten sowie die Innovationsbereitschaft der Investoren, Bauherren und des ausführenden Unternehmens.

Ein weiteres Beispiel ist der Neubau eines Eingangs- und Ausstellungsgebäudes im Freilichtmuseum Detmold. Der CO<sub>2</sub>-optimierte Beton wurde außerhalb der gültigen Betonnorm DIN 1045-2 [5] konzipiert, wobei der Mindestzementgehalt unterschritten wurde. Der Einsatz wurde über eine Zulassung im Einzelfall ermöglicht. Es zeigt sich, dass eine Modernisierung der normativen Randbedingungen eine wichtige Grundlage für die weitere Etablierung CO<sub>2</sub>-optimierter Betone ist. Auch das ist eine Voraussetzung die Dekarbonisierung des wichtigsten Baustoffs unserer Zeit, dem Beton, voranzutreiben und Optimierungspotentiale vollständig auszunutzen.

### Beispiel für zementfreien Beton (Geopolymer)

Der Name Geopolymer wurde von dem Chemiker Joseph Davidovits in den 1970er Jahren ins Leben gerufen. Die Polymerstrukturen, die bei diesem Bindemittel entstehen, sind nicht kristalline (amorphe) Si-O-Al Gerüste. Nach Davidovits sind für diese Verwendung Metakaolin und alkalische Aktivatoren notwendig. Als Bindemittel können neben Metakaolin auch weitere latent hydraulische oder puzzolanische Sekundärrohstoffe wie Hüttensandmehl, Flugasche oder Trassmehl verwendet werden.

Zum Erhärten benötigen diese Rohstoffe einen chemischen Anreger. Durch die Verwendung dieser Aktivatoren lassen sich Betonfestigkeitsklassen von bis zu C 50/60 erreichen. Um eine gute Verarbeitbarkeit zu erreichen, werden außerdem neuartige Fließmittel benötigt. Sowohl Anreger als auch Fließmittel sind in der momentan einzigen zementfreien DIBt-Zulassung beschrieben<sup>1</sup>.

Das Abbindeverhalten und die sich dabei ausbildenden Bindungsstrukturen des Geopolymers unterscheiden sich maßgeblich von zementären Bindemitteln, was für den daraus hergestellten Beton eine Reihe von Vorteilen mit sich bringt. Er weist eine hohe Beständigkeit gegenüber chemischen Angriffen auf, sodass ohne zusätzliche Beschichtungen die Anforderungen der Expositionsklasse XA3 erfüllt werden können.

Der Beton weist darüber hinaus eine hohe Hitzebeständigkeit auf und eignet sich aufgrund einer niedrigen Hydrationswärmeentwicklung besonders für die Fertigung von massigen Bauteilen.

Durch die Verwendung dieses Betons lassen sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen um bis zu 75 % senken. Bereits angewandt wurde dieser Beton schon für Pflastersteine, Fertigteile, Rohre und auch schon als Transportbeton für z. B. Sohlen.

Das neueste Beispiel ist hierbei das Hochbauprojekt USB4 in Norderstedt mit einem Betonvolumen von 3.000 m<sup>3</sup>, bei dem vollständig auf Zement verzichtet wurde. Ein weiteres bekanntes Beispiel sind die zementfreien Rohre der Next-Beton Gruppe, die durch die zugelassene Expositionsklasse XA3 des Betons auf eine zusätzliche Beschichtung verzichten können.

<sup>1</sup> | Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (DIBt), Zulassungsnummer Z-3.15-2157 „Wagners EFC Binder“ (2019)

## 5 | Ausblick

Wie gezeigt wurde, werden bereits seit Jahren durch klinker-effiziente Zemente im Transportbeton Einsparungen von ca. 2,8 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Jahr erzielt. Mittelfristig lassen sich durch die Optimierung von

- › Transportbeton mit Hilfe innovativer Fließmittelkonzepte weitere 1,6 bis 1,85 Mio. t CO<sub>2</sub>- und
- › bei Ersatz von CEM I durch CEM II bei Fertigteilen ebenfalls weitere 0,63 Mio. t CO<sub>2</sub>-Emissionen pro Jahr einsparen.

Zu einer weiteren Verringerung der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Betonbau stellen wir die folgenden Aspekte zur Diskussion:

- › Anpassung, Modernisierung bzw. Flexibilisierung der Zement-, Beton- und Betonzusatzmittelnorm, um max. CO<sub>2</sub>-Einsparungen zu ermöglichen.
- › Eine verbesserte Interaktion aller Beteiligten: Bauherren – Planer – Betontechnologen – ausführende Unternehmen – usw. ist als Grundlage zur Erreichung der Ziele erforderlich.
- › Die Frischbetoncharakteristik der Zukunft – bei max. möglicher Wassereinsparung – wird sich von der heutigen Situation unterscheiden. Damit ist eine Änderung der Prozesse (Einbau/Verarbeitung/etc.) am Bau notwendig.
- › Modernisierung der Betonherstellung durch Sensorik und computergestützte Systeme als Basis für die max. CO<sub>2</sub>-Einsparung und Qualitätssicherung herausfordernder Betonkonzepte. Dies kann mittels Digitalisierung der Betonindustrie von der Herstellung im Werk bis zur Baustelle unterstützt werden.
- › Eine perspektivische Änderung der Zusatzmittelsysteme zu flexiblen, steuerbaren, „intelligenten“ Mehrkomponentensystemen. Dafür ist eine Erweiterung des Lager- und Dosierequipments von Betonzusatzmitteln in den Betonwerken notwendig.

- › Eine höhere Variabilität der Bindemittelsysteme und deren zielgerichtete Anwendung nach Anforderung/Expositionen der Betone. Damit ist auch eine Erweiterung des Lager- und Dosierequipments für Zemente und Zusatzstoffe notwendig.
- › Mittelfristig sind bei Bindemitteln und weiteren Zementhauptbestandteilen folgende Entwicklung zu erwarten:
  - › Wegfall der Flugasche bis 2038,
  - › Hüttensand 2.0,
  - › stärkere Verwendung von Recyclingbindemitteln,
  - › Verwendung von natürlichen Puzzolanen und calcinierten Tonen,
  - › Entwicklung neuer Bindemittel.
- › Optimierung der Zusatzmittel- und Bindemittelsysteme für das modulare Bauen

Die skizzierte Entwicklung wird zu einer immer weitergehenden Spezialisierung und Differenzierung der Betonzusatzmittel auf die Beton-Rohstoffkomponenten (Zement, weitere Zementhauptbestandteile, Recyclingmaterial, regionale – ggf. herausfordernder/anspruchsvoller Sand- und Gesteinskörnungsqualitäten) führen, um gleichzeitig eine hohe Zielsicherheit bei der Herstellung und Robustheit der Betone zu erreichen.

Es bleibt uns festzuhalten, dass es für eine noch weitergehende Dekarbonisierung der Betonbauweise notwendig sein wird, dass das beim Klinkerbrand prozessbedingt entstehende, unvermeidbare Kohlenstoffdioxid abgeschieden und eingelagert oder genutzt wird, sodass es dauerhaft gebunden bleibt und nicht zu einem späteren Zeitpunkt in die Atmosphäre gelangt.

## Weiterführende Literatur

- [1] **Jahresbericht 2022/2023**, Deutsche Bauchemie e.V., Frankfurt am Main
- [2] Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.), **Zahlen und Daten 2023 - Zementindustrie in Deutschland**. Monheim: TheissenKoop GmbH, 2023.
- [3] **Concrete Sustainability Council; Technisches Handbuch – CO<sub>2</sub>-Modul**; Herausgeber: Der Bundesverband Transportbeton ist der „Regionale Systembetreiber“ des CSC für Deutschland; Stand 10.01.2022
- [4] **DAfStb SVB-Richtlinie**: Selbstverdichtender Beton (SVB-Richtlinie) – Teil 1: Ergänzungen und Änderungen zu DIN EN 1992-1-1 und DIN EN 1992-1-1/NA – Teil 2: Ergänzungen und Änderungen zu DIN EN 206-1, DIN EN 206-9 und DIN 1045-2 – Teil 3: Ergänzungen und Änderungen zu DIN EN 13670 und DIN 1045-3, Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Berlin, 2012
- [5] **DIN 1045-2**, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton, Beuth-Verlag, Berlin
- [6] **Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (DIBt)**, Zulassungsnummer Z-3.15-2157 „Wagners EFC Binder“ (2019)

## Nachwort

Die vorliegende Informationsschrift „Beitrag der BZM-Industrie zur Dekarbonisierung der Betonbauweise“ wurde vom Arbeitskreis 2.1 „Betonzusatzmittel und Umwelt“ der Deutschen Bauchemie e.V. erarbeitet und im Fachausschuss 2 „Betontechnik“ beraten und verabschiedet. Sie soll der Fachöffentlichkeit zur Information dienen.

### Die Informationsschrift wurde erarbeitet von

#### Sebastian Dittmar

Master Builders Solutions Deutschland GmbH, Staßfurt

#### Matthias Gay

MC-Bauchemie Müller GmbH & Co. KG, Bottrop

#### Jens Herrmann

VDZ Technology gGmbH, Düsseldorf

#### Gerrit Land

Deutsche Bauchemie e.V., Frankfurt am Main

#### Thomas Müller

Sika Deutschland GmbH, Leimen

#### Justin Stolte

CEMEX Admixtures GmbH, Salzkotten

#### Johannes Unseld

Sika Deutschland GmbH, Leimen

Die Deutsche Bauchemie e.V. bittet darum, Erfahrungen und Anmerkungen zu dieser Informationsschrift der Geschäftsstelle in Frankfurt am Main mitzuteilen.

# Impressum

1. Ausgabe, Mai 2024  
Redaktionsschluss: Mai 2024  
Auflage: 1.000 Stück

Copyright 2024

303-IS-D-2024

Alle Rechte, insbesondere das Recht der Vervielfältigung, Verbreitung und Übersetzung, bleiben der Deutschen Bauchemie e.V. vorbehalten.

## **Gestaltung**

Annette Schindler Grafikdesign  
grafikdesign-schindler.de

## **Druck**

AC medienhaus GmbH  
acmedienhaus.de

## **Bildnachweis**

Titelbild: istockphoto.com  
Seite 3: istockphoto.com  
Seite 10: istockphoto.com

**ISBN 978-3-944138-79-4** (Druckversion)

**ISBN 978-3-944138-78-7** (PDF-Version)

Diese Informationsschrift entbindet in keinem Fall von der Verpflichtung zur Beachtung der gesetzlichen Vorschriften. Der Informationsschrift wurde mit großer Sorgfalt erstellt. Dennoch übernimmt die Deutsche Bauchemie e.V. keine Haftung für die Richtigkeit der Angaben, Hinweise, Ratschläge sowie für eventuelle Druckfehler. Aus etwaigen Folgen können deswegen Ansprüche weder gegenüber der Deutschen Bauchemie e.V. noch den Verfassern geltend gemacht werden. Dies gilt nicht, wenn die Schäden von der Deutschen Bauchemie e.V. oder ihren Erfüllungsgehilfen vorsätzlich oder grob fahrlässig verursacht wurden.



**Deutsche Bauchemie e.V.**

Mainzer Landstraße 55  
60329 Frankfurt am Main

T: +49 69 2556-1318

E: [info@deutsche-bauchemie.de](mailto:info@deutsche-bauchemie.de)

[deutsche-bauchemie.de](http://deutsche-bauchemie.de)