

Beitrag der Betonzusatzmittelindustrie zur Dekarbonisierung der Betonbauweise

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, die bei seiner Herstellung anfallenden CO₂-Emissionen zu mindern. Es ist daher eine Aufgabe der gesamten Branche, gemeinsam am Ziel einer Dekarbonisierung der Betonbauweise zu arbeiten. Moderne Betonzusatzmittel leisten schon heute einen wichtigen Beitrag zu einer nachhaltigeren Betonbauweise. Der Artikel zeigt auf, welche Erfolge bei der Minderung der CO₂-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.

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, vom Hochhausbau in Wüstenstaaten über Offshore-Windanlagen in den Meeren bis hin zu Tunnelprojekten in den Alpen. Auch Standardbetone des allgemeinen Hoch- und Ingenieurbaus können durch Betonzusatzmittel verbessert werden.

Im Jahresbericht 2022/23 der Deutschen Bauchemie [1] wurden die Zahlen für Absatz plus Export von Betonzusatzmitteln für Deutschland der vergangenen zwanzig Jahre veröffentlicht (Bild 1). Es ist zu erkennen, dass im Jahr 2017 die Schallmauer von 200000 t 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.

2 Technische Entwicklung der Betonzusatzmittel

Der Einsatz von Betonzusatzmitteln spielt in der Betonindustrie seit vielen Jahren eine große Rolle bei der Optimierung von Betonzusammensetzungen. Dabei geht es einerseits um die ökonomische Optimierung durch Bindemittelreduzierung und andererseits um die Optimierung der Verarbeitbarkeit. Eine Reduzierung des Bindemittelgehalts steht in Zusammenhang mit einer Senkung des Gesamtwassergehalts der Betonzusammensetzung, 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 rd. 30 kg/m³ Beton. Bei einem w/z-Wert von 0,5 kann der anrechenbare Bindemittelgehalt um rd. 60 kg/m³ reduziert werden. Dadurch wird die CO₂-Bilanz beträchtlich verbessert, um rd. -30 kg bis -45 kg CO₂ pro m³ Beton. Bei einem Produktionsvolumen von 52,2 Mio. m³ aus dem Jahr 2022 ergeben sich signifikante Einsparungen von mehr als 2,3 Mio. t CO₂. Dieser Pfad zur Erhaltung der Verarbeitbarkeit bei maximaler Wasserreduktion wird intensiv von der Zusatzmittelbranche verfolgt. Er bildet eine wesentliche Grundlage zur zukünftigen Minimierung des CO₂-Fußabdrucks in Verbindung mit dem Einsatz von Zementen neuer und kommender Generationen mit weiter verringertem Klinkergehalt.

Die deutsche Zementindustrie hat seit jeher den Fokus auf eine klimaneutrale und ressourcenschonende Betonbauweise gelegt. Die spezifische CO₂-Emission des Herstellungsprozesses 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. m³ Transportbeton im Jahr 2022 ergibt sich eine CO₂-Einsparung von rd. 2,8 Mio. t/a. Die spezifische CO₂-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 CO₂-effizienten Zemente am Inlandsversand in Deutschland im aktuellen Berichtsjahr 2022 bereits etwa 75 %.

Die Verwendung von klinkereffizienten Zementen ist ein wichtiger Bestandteil der Dekarbonisierung und Ressourcenschonung im Betonbau. In Deutschland werden hauptsächlich Kalksteinmehl 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 M.-% bzw. 65 M.-% gesteigert. Das erfolgt durch eine Kombination von Kalksteinmehl und/oder Betonrecyclingmehl sowie Hüttensand, Puzzolane bzw. calcinierte Tone in ternären bzw. quartären Systemen. Das Ziel zukünftiger Zemente, insbesondere der so genannten CEM X-Zemente, ist es, den Gehalt an Kalksteinmehl oder Betonrecyclingmehl zu maximieren, während die Zementleistungsfähigkeit aufrechterhalten wird. Solche Zemente können bis zu 80 M.-% andere Hauptbestandteile neben Klinker enthalten.

3 Zukünftige Weiterentwicklung der Betonzusatzmittel

3.1 Optimierungsansätze und Potenziale

Im Prinzip gibt es fünf Möglichkeiten zur Dekarbonisierung von Beton:

- Verwendung erneuerbarer Energie,
- Reduzierung des Klinkergehalts von Zement durch den Einsatz weiterer Hauptbestandteile oder die Verwendung alternativer Bindemittel,
- Verringerung des Klinkeranteils pro Kubikmeter Beton,
- Klimakompensation und CO₂-Abscheidung
- sowie sonstige Maßnahmen wie die Verwendung rezyklierte Gesteinskörnung oder die CO₂-Speicherung im Beton.

Zementadditive und Betonzusatzmittel können zur Dekarbonisierung von Beton die nachfolgenden Beiträge leisten.

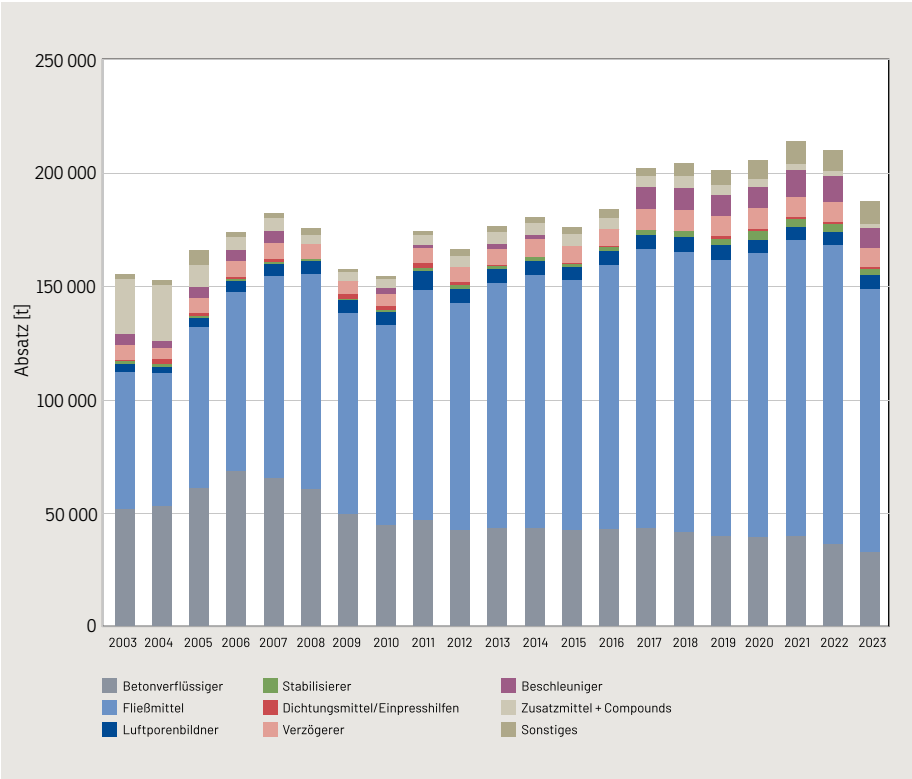


Bild 1: Absatz und Export von Betonzusatzmittel in Deutschland zwischen 2003 und 2023

3.1.1 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.

3.1.2 Klinkerersatzstoffe

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

3.1.3 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.

3.1.4 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

3.2 Fließmittel

Innovative Fließmittelkonzepte bieten das größte Potenzial, um die Verarbeitbarkeit, die Betonrheologie, die Bearbeitungszeit 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. m³ Transportbeton verarbeitet. Durch die Senkung des Mindestzementgehalts von derzeit rd. 280 kg/m³ auf 200 kg/m³ und den Einsatz von Zusatzstoffen sowie neuen, innovativen Fließmittelkonzepten zur Erhaltung der Verarbeitbarkeit bei gleichzeitig reduziertem Gesamtwassergehalt können bis zu 50 kg/m³ CO₂ 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. t/a bis 1,85 Mio. t/a CO₂ erzielen. Bild 4 zeigt die Effekte durch Reduzierung des Mindestzementgehalts bei gleichzeitiger Einhaltung des maximalen w/z-Werts (Beispiel für Expositionsklassen XC4, XF1, XA1).

Alternativ könnte der Nachweis der gleichen Leistungsfähigkeit von Beton (Perfomancetest) 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.

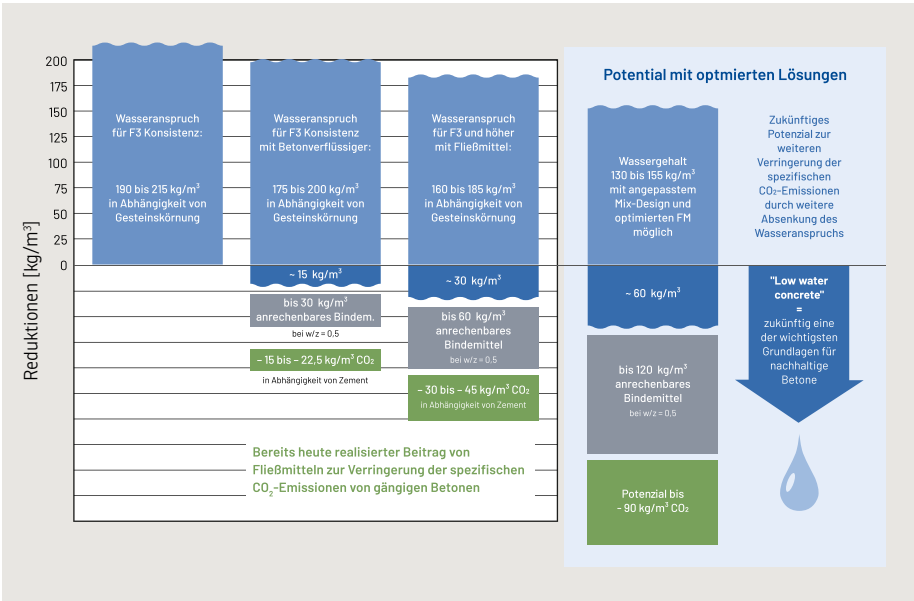


Bild 2: Zukünftiges Potenzial zur weiteren Verringerung der spezifischen CO₂-Emissionen durch weitere Absenkung des Wasseranspruchs

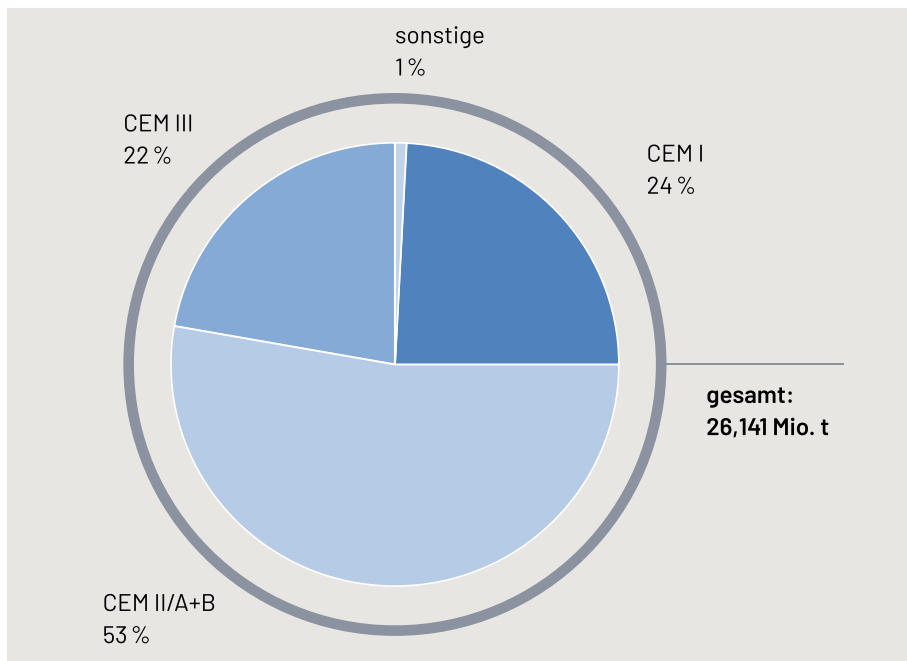


Bild 3: Inlandsversand der VDZ-Verbandsmitglieder in 2022 [2]

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 Puzzolane 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.

3.3 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 CO₂-Emission die Ausschal- bzw. Abhebe-

festigkeit zur gleichen Zeit oder sogar früher erreicht werden. Durch den vollständigen Ersatz der im Jahr 2022 produzierten rd. 6,4 Mio. t Portlandzement CEM I [2] durch CEM II/A-Zemente hätten rd. 0,72 Mio. t CO₂ eingespart werden können. Für die entsprechende Menge an Beschleunigern müssen rd. 0,15 Mio. t/a CO₂-Emissionen veranschlagt werden. Insgesamt ergibt sich immer noch eine Einsparung von 0,57 Mio. t CO₂-Emissionen.

Der nächste Schritt besteht darin, Portlandkompositzemente der Art CEM II/B oder punktuell CEM II/C mit einem Klinkergehalt von mindestens 65 M.-% bzw. 50 M.-% zu etablieren. Die Steuerung der Frühfestigkeit durch Erhärtungsbeschleuniger gewinnt dabei zunehmend an Bedeutung. Es ist zu beachten, dass der CO₂-Eintrag von Erhärtungsbeschleunigern innerhalb der CO₂-Bilanz von Beton signifikant unter den CO₂-Einsparpotenzialen aus der Klinkergehaltsreduzierung liegt. In einer typischen Fertigteilzusammensetzung können durch den Wechsel von CEM I auf CEM II/A etwa 30 kg CO₂ pro m³ Beton eingespart werden. Bei Verwendung von CEM III sind es sogar 130 kg CO₂ pro m³ Beton. Die Gesamtbilanz ist äußerst positiv, da übliche Dosiermengen eines Erhärtungsbeschleunigers zwischen 2,0 M.-% und 4,0 M.-% vom Zement nur einen CO₂-Footprint von rd. 5 kg/m³ bis 15 kg/m³ besitzen.

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. Optimierungspotenziale 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 Lagertemperatur von 10 °C nach einem Tag keine messbaren Druckfestigkeitswerte aufweisen, mit geeigneten Erstarrungsbeschleunigern bereits nach 24 Stunden vergleichbare Festigkeiten wie das unbeschleunigte System bei 20 °C bzw. nach 2 d 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 der Schalungsheizung die Frühfestigkeit erhalten bleiben. Die dargestellten möglichen jährlichen Einsparungen an CO₂ 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 CO₂ abgeschieden und eingelagert oder genutzt wird, sodass es dauerhaft gebunden bleibt.

3.4 Stabilisierer/Viskositätsmodifizierer

Unter Stabilisierern/Viskositätsmodifizierern versteht man Substanzen, die einen andickenden Effekt oder zumindest eine Viskositätserhöhung in zementären Systemen bewirken. Oft werden Cellulosen, Stärken oder andere viskositätsmodifizierende Substanzen verwendet. Anwendungsgebiete sind z.B. Unterwasserbeton, Bohrpfaßbeton, Betonzusammensetzungen, die zum Wasserab-

sondern („Bluten“) neigen, sowie standfeste Spachtel- und Mörtelzusammensetzungen.

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 CO₂-Reduzierung möglich. Betonzusammensetzungen mit geringem Feinanteil bieten in der Regel ein besonders hohes CO₂-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 CO₂-Emissionen als auch mit erheblichen Kosten verbunden ist. 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 CO₂-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-Zusammensetzungen ist es eine große Herausforderung, Wasserabsondern 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 Luftporenbildner (LP-Bildner) und Mikrohohlkugeln beitragen. Durch die Zugabe von Mikrohohlkugeln oder LP-Bildnern bilden sich im Beton stabilisierte, kugelförmige Mikroluftporen, die im Festbeton dem gefrierenden Wasser Expansionsräume bieten. Bei ausreichender Menge und entsprechend geringem Abstand dieser Luftporen untereinander erfolgt das Gefrie-

ren 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

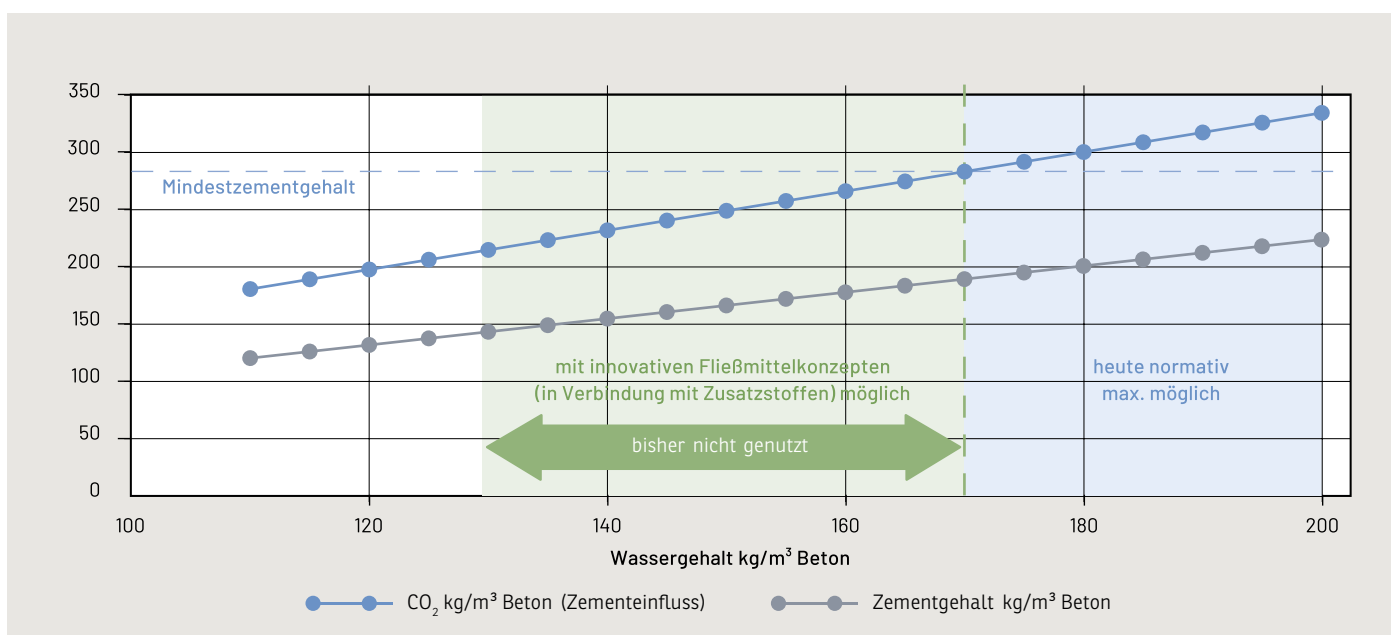


Bild 4: Verringerung der CO₂-Emissionen durch Einsparungen bei der Zugabewassermenge sowie beim Klinker- bzw. Zementgehalt (Beispiel für die drei im Diagramm genannten Expositionsklassen)

während der Zementherstellung dem Mahlprozess 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 beeinflussen den Hydrationsprozess des Zements, fördern die Bildung von Calciumsilikathydraten (C-S-H) 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 CO₂-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 CO₂-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 CO₂-Footprint aufweisen.

Mehrere Forschungsprojekte beschäftigen sich derzeit mit der vollständigen Aufarbeitung von Beton. Dabei soll aus dem Zementstein neben der Gesteinskörnung ein reaktives, zementähnliches Material hergestellt werden. Die mit diesen Rohstoffen hergestellten Betone müssen eben-

falls 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 konkurrenzfähig zu machen, sind Beschleunigersysteme erforderlich, die eine mindestens gleichwertige Festigkeitsentwicklung wie herkömmliche Betone gewährleisten.

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.

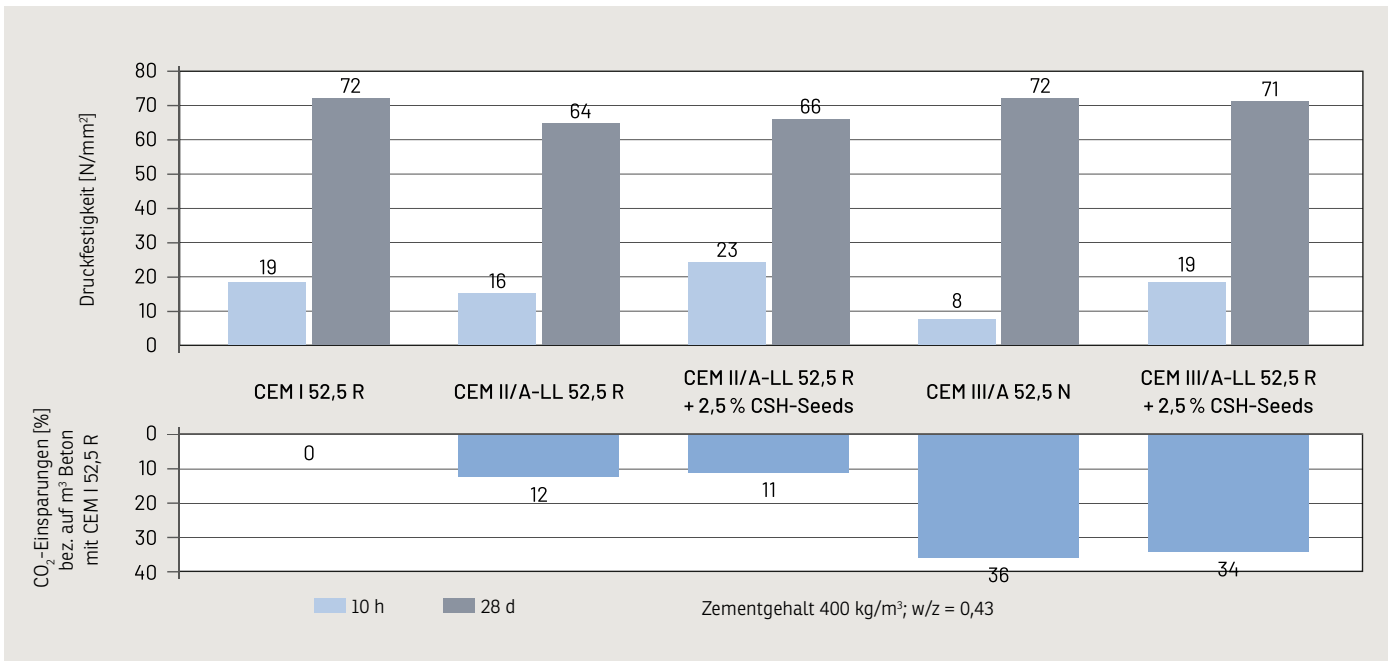


Bild 5: Potenzial der CO₂-Einsparung durch die Verwendung von CEM II/A- bzw. CEM III/A-Zementen in Kombination mit Erhärtungsbeschleunigern

7 CO₂-reduzierte Betone in der Praxis

Eine intensive Zusammenarbeit aller Beteiligten, der gesamten Wertschöpfungskette von Bauherren, Architekten, Planern, Rohstoffindustrie, Betonherstellern, Betontechnologen und ausführenden Unternehmen, ist die Grundlage für die Einführung und Etablierung von CO₂-optimierten Betonen. Zu den wesentlichen Erfolgsfaktoren zählt unter anderem die frühzeitige Einbindung von beratenden Betontechnologen sowie Untersuchungen im Labor und im Maßstab 1:1. Mittlerweile gibt es aus einigen Projekten Erfahrungen mit CO₂-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 CO₂-reduzierter Beton als Ortbetonerfüllung auf vorgefertigte Stahlbeton-Fertigteildecken eingesetzt (siehe **beton** 3/2024, S. 72 ff.). Dieser Beton setzt neue Maßstäbe in Bezug auf das CO₂-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 CO₂-Äquivalent von nur etwa 138 kg/m³ und liegt damit deutlich unter dem Branchenmittel für C 40/50 von 299 kg/m³ CO₂-Äquivalent (interpoliert nach [3]).

Im Rahmen des Projekts wurde gezeigt, dass durch den Einsatz von innovativen Betonzusatzmitteln und klinkereffizienten Zementen CO₂-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 CO₂-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 CO₂-optimierter Betone ist. Auch das ist

eine Voraussetzung die Dekarbonisierung des wichtigsten Baustoffs unserer Zeit, dem Beton, voranzutreiben und Optimierungspotenziale 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 momentanen einzigen zementfreien DIBt-Zulassung beschrieben [6].

Das Erstarrungsverhalten 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 CO₂-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 3000 m³, 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.

8 Ausblick

Wie gezeigt wurde, werden bereits seit Jahren durch klinkereffiziente Zemente

im Transportbeton Einsparungen von rd. 2,8 Mio. t/a CO₂-Emissionen erzielt. Mittelfristig ließen sich durch die Optimierung von

- Transportbeton mithilfe innovativer Fließmittelkonzepte weitere 1,6 Mio. t/a bis 1,85 Mio. t/a CO₂-Emissionen und
- bei Ersatz von CEM I durch CEM II bei Fertigteilen ebenfalls weitere 0,63 Mio. t/a CO₂-Emissionen einsparen.

Zu einer weiteren Verringerung der CO₂-Emissionen im Betonbau stellen die Autoren dieses Beitrags die folgenden Aspekte zur Diskussion:

- Anpassung, Modernisierung bzw. Flexibilisierung der Zement-, Beton- und Betonzusatzmittelnorm, um max. CO₂-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. CO₂-Einsparung und Qualitätssicherung herausfordernderer 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“ durch Umstellung der Hochöfen auf Direktreduktion,
 - 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. herausfordernderer/anspruchsvollerer 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.

Literatur

- [1] Jahresbericht 2022/2023. Deutsche Bauchemie e.V., Frankfurt am Main 2024
- [2] Zahlen und Daten 2023 - Zementindustrie in Deutschland. Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf 2023
- [3] Concrete Sustainability Council Technisches Handbuch – CO₂-Modul. Bundesverband der der Deutschen Transportbetonindustrie, Berlin 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“
- [6] Allgemeine bauaufsichtliche Zulassung (DIBt), Zulassungsnummer Z-3.15-2157 „Wagners EFC Binder“ (2019)

Die Autoren sind Mitglieder des Arbeitskreises 2.1 „Betonzusatzmittel und Umwelt“ und des Fachausschusses 2 „Betontechnik“ der Deutschen Bauchemie e.V.



Der Beitrag ist auch als Download in folgender Broschüre verfügbar:
https://deutsche-bauchemie.de/fileadmin/uploads/tx_ttpproducts/datasheet/DBC_303-IS-D-2024.pdf