

VDZ gGmbH

Konzepte zur Herstellung von ressourcen-effizienten Betonen am Beispiel Zement

Christoph Müller, Düsseldorf

Erhöhte Anforderungen an die Ressourceneffizienz und den Klimaschutz werden die moderne Betonbauweise auch weiterhin vor große Herausforderungen stellen. Da ein Königsweg für deren Bewältigung kurzfristig nicht in Sicht ist, gilt es, die Potenziale aller zur Verfügung stehenden Möglichkeiten gleichermaßen zu heben. Erhebliche Anstrengungen der Zementwerke zur Steigerung der thermischen Energieeffizienz haben dazu geführt, dass dieser Weg der CO₂-Reduzierung in der Zementherstellung mittlerweile weitestgehend ausgeschöpft ist. Die vermehrte Nutzung alternativer Roh- und Brennstoffe, insbesondere CO₂-neutraler Biomasse, ist ein weiterer Baustein. Diese Möglichkeit wird ebenfalls seit vielen Jahren konsequent umgesetzt. Gleichwohl bestehen hier noch gewisse Entwicklungspotenziale. Da die Möglichkeiten der genannten Wege aber ausgeschöpft bzw. limitiert sind, wird nun mit Hochdruck an so genannten „Breakthrough-Technologien“ für den Herstellprozess gearbeitet. Hierbei steht die CO₂-Abscheidung in Zementwerken im Mittelpunkt.

Neben den verfahrenstechnisch geprägten Maßnahmen sind insbesondere auch die bereits bewährten baustofflichen Konzepte weiterzuentwickeln. Hierbei ist als wesentliche Randbedingung zu berücksichtigen, dass Portlandzementklinker auf absehbare Zeit der wesentliche Bestandteil von Zement bleibt. Alternativen in ausreichender technischer Qualität, die den stetig wachsenden globalen Bedarf an Zement decken können, sind bislang nicht in Sicht. Daher bleibt die weitere Steigerung der Klinkereffizienz über die Senkung des Klinker/Zement-Faktors mit den zur Verfügung stehenden Rohstoffen die wesentliche Herausforderung. Es gilt somit, die CO₂-Bilanz des Betons weiter zu verbessern, ohne die technische Leistungsfähigkeit aus den Augen zu verlieren. Im einfachsten Fall ist das wesentliche Leistungsmerkmal neben baustellentauglichen Frischbetoneigenschaften die Druckfestigkeit – stellvertretend für die mechanischen Eigenschaften des Betons. Je nach Anwendungsfeld des Betons steht die Dauerhaftigkeit zusätzlich im Mittelpunkt der Betrachtungen.

Ausgangssituation

Bezieht man den „CO₂-Gehalt“ im Beton auf die erreichte Betondruckfestigkeit und trägt diesen Wert wiederum über der Betondruckfestigkeit auf, so ergibt sich beispielhaft der im Bild 1 dargestellte Zusammenhang. Aus den Ökobilanzen für Betone ver-

schiedener Festigkeitsklassen, die der VDZ im Auftrag des Bundesverbands der Deutschen Transportbetonindustrie e.V. (BTB) und der Fachvereinigung Deutscher Betonfertigteilebau e.V. (FTB) erstellt hat, konnte eine statistisch abgesicherte CO₂-Intensität für die jeweilige Festigkeitsklasse ermittelt werden, die im Bild als „Stand heute“ eingetragen wurde. Diese Daten bilden den Ausgangspunkt für die weiteren Überlegungen.

Erweiterung der Zementnorm EN 197-1

Mit der nächsten Ausgabe der EN 197-1 werden u.a. Zemente mit einem Mindestklinkerhalt von 50 M.-% als CEM II/C genormt sein. Weitere Hauptbestandteile können bis zu 20 M.-% Kalkstein und entweder bis zu 30 M.-% Hüttsand, Flugasche oder natürliches Puzzolan sein. Im VDZ wurden in verschiedenen Forschungsprojekten die Eigenschaften von Mörteln und Betonen unter Verwendung solcher Zemente untersucht. Das Erreichen baupraktisch relevanter Festigkeiten im Beton stellte unter entsprechenden betontechnologischen Randbedingungen keine Hürde für eine Anwendung dar. Ähnliches gilt z.B. für Portlandkalksteinzemente mit Kalksteingehalten von bis zu 30 M.-%. Insofern kann für Innenbauteilbetone, bei denen neben baustellengerechten Frischbetoneigenschaften die Festigkeits- und Verformungseigenschaften relevant sind, der Zusammenhang zwischen CO₂-Intensität und Betondruckfestigkeit – wie in Bild 1 als „CEM II/C-Szenario“ dargestellt – angegeben werden.

Vergleich Druckfestigkeit zu Dauerhaftigkeit

Sobald eine Anwendung im Außenbauteil zu bewerten ist, muss neben der Druckfes-

tigkeit auch die Dauerhaftigkeit betrachtet werden. In einer Studie [1] werden 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 verglichen. Die Anwendungsmöglichkeiten von CEM II/B-LL- und CEM II/C-M (S-LL)-Zementen werden anhand dieser Datenlage abgeschätzt.

Für die Studie wurden Daten aus verschiedenen Quellen sowie anonymisierte Daten aus der Zementindustrie ausgewertet. Die Datenbasis umfasst 25 CEM II/C-M (S-LL)-Zemente sowie 32 CEM II/B-LL-Zemente, die in bis zu vier Betonzusammensetzungen eingesetzt wurden. Zum Vergleich wurden Betone mit CEM I, CEM II/A-LL, CEM II/A- bzw. B-S, CEM III/A sowie CEM II/B-M (S-LL) aus den genannten Quellen herangezogen.

Bei üblichen Außenbauteilen des Hochbaus sind die Expositionsklassen XC3 bzw. XC4/XF1 zu betrachten. Untersuchungen des VDZ weisen darauf hin, dass bei üblichen Wasserzementwerten und einer entsprechenden Betondruckfestigkeit i.d.R. ein ausreichender Carbonatisierungswiderstand sowie Frostwiderstand bei mäßiger Wassersättigung erreicht werden können (Bilder 2 und 3).

Unter diesen Randbedingungen könnte die CO₂-Intensität von etwa 65 % des jährlichen Transportbetonvolumens in Deutschland um rund 25 % verringert werden. Für dieses Szenario steht nach derzeitigen Prognosen auch auf längere Sicht genügend Hüttsand zur Verfügung. In Deutschland sind dies jährlich rund 7 Mio. t [2] Bis zum Jahr 2035 geht der Bundesverband Baustoffe, Steine und Erden (bbs) von rund 6,7 Mio. t

Tafel 1: Eigenschaften der in Bild 4 hervorgehobenen Betone

| Parameter | | Beton | | |
|---------------------------------|-----------------------------------------|-------|-----------|----------|
| | | 1 | 2 | 3 |
| Zementart | | CEM I | CEM III/A | CEM II/C |
| Klinkerintensität | kg/(m ³ ·MPa) | 7,2 | 2,8 | 2,7 |
| Zementgehalt | kg/m ³ | 280 | 320 | 320 |
| w/z | – | 0,65 | 0,50 | 0,50 |
| f _{c,cube} | MPa | 38,9 | 62,1 | 59,9 |
| GWP | kg CO ₂ -Äqu./m ³ | 266 | 183 | 162 |
| t to β = 0.5 (= "service life") | a | 53 | 133 | 57 |

GWP: Global warming potential

β: Reliability index β = 0.5 entspricht einer Wahrscheinlichkeit von 30 %, dass ein Grenzzustand; hier „Depassivierung der Bewehrung“ durch Carbonatisierung in der Expositionsklasse XC3 (DE) erreicht wird

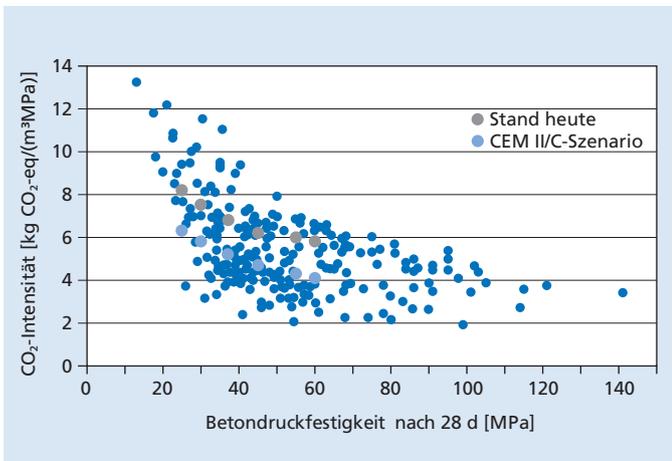


Bild 1: CO₂-Intensität in Abhängigkeit der Betondruckfestigkeit (Datensammlung und Szenarien: VDZ)

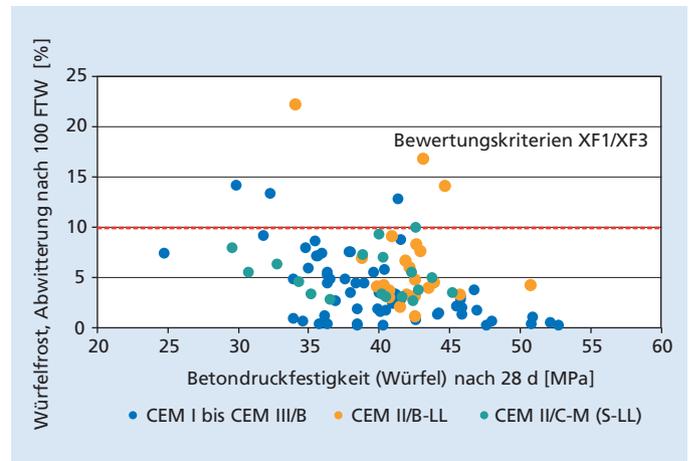


Bild 2: Zusammenhang zwischen Betondruckfestigkeit und dem Masseverlust im Würfelverfahren nach 100 Frost-Tau-Wechseln nach CEN/TS 12390-9 (XF1/XF3-Kriterium: 10 % Masseverlust nach [3, 6]), (Datensammlung: VDZ, Betone mit w/z = 0,60)

im unteren und rund 8,9 Mio. t im oberen Szenario aus [4] Der Zementinlandsversand in Deutschland beträgt derzeit rund 26 Mio. t [5].

Geht man von einer Verwendung des Zements zu rund 60 % in Transportbeton aus, so entspricht dies rund 15 Mio. Tonnen. Auf Innen- und Außenbauteile (XC1 bzw. XF1/XC4) entfallen dabei schätzungsweise rund 65 %, also rund 9,5 Mio. t. Für CEM II/C-M-(S-LL)-Zemente werden in der Grenzzusammensetzung 30 M.-% Hütten sand benötigt (sulfatträgerfrei). Rechnerisch würden also rund 3 Mio. t Hütten sand benötigt, um alle aus Transportbeton hergestellten Innen- und Außenbauteile in Deutschland mit CEM II/C-M-(S-LL)-Zementen herzustellen. Diese Menge wird nach den oben genannten Prognosen auch in mittlerer Zukunft zur Verfügung stehen. Um dieses Ziel zu erreichen, wird man bei den zur Verfügung stehenden Rohstoffen ggf. eine anwendungsbezogene Differenzierung in Kauf nehmen müssen: Zemente und Betone für weite Teile des üblichen Hochbaus auf der einen Seite sowie Zemente und

Betone unter besonderer Beanspruchung auf der anderen Seite.

Ausblick: Vergleich CO₂-Intensität zu Lebensdauer

Die Herausforderung für die Betonbauweise besteht darin, über die gesamte Lebensdauer bzw. Nutzungsdauer eine möglichst geringe CO₂-Intensität zu erreichen. Auch wenn aus Ökobilanzen für Gebäude bekannt ist, dass der Beton nur einen geringen Anteil im Vergleich zu anderen Faktoren wie dem Energiebedarf über die gesamte Lebensdauer hat, können weitere Potenziale gehoben werden. Zur Bewertung des Betons im Hinblick auf seine CO₂-Effizienz könnten Druckfestigkeit und Lebensdauer mit der CO₂-Intensität in Beziehung gesetzt werden [7]. Das Ergebnis einer Berechnung auf Basis von [7] ist in Bild 4 als Beispiel für die Expositions klasse XC3 dargestellt. Die Zeit bis zum Erreichen des Grenzzustands „Depassivierung der Bewehrung“ wurde nach den Grundsätzen des fib-Model-Code „Service Life Design“ berechnet. Es ist anzumerken, dass diese Ansätze unter Fachleuten hinsichtlich

der Übertragbarkeit in Bezug auf die praktische Erfahrung nicht völlig unumstritten sind. An dieser Stelle geht es allerdings um das Prinzip der gleichzeitigen Berücksichtigung von technischer Leistung und CO₂-Intensität.

In dieser Darstellung sind drei Betone hervorgehoben (s. Tafel 1): Beton 1 mit Portlandzement wurde mit w/z = 0,65 hergestellt und erreicht eine rechnerische Lebensdauer von rund 50 Jahren. Beton 2 mit CEM III/A erreicht eine rechnerische Lebensdauer von rund 130 Jahren mit w/z = 0,50, was im Hochbau nur selten nachgewiesen werden muss und wo eine relativ große Menge an Hütten sand (50 M.-%) verwendet wird. Beton 3 mit CEM II/C (30 M.-% Hütten sand, 20 M.-% Kalkstein) in sonst gleicher Zusammensetzung wie Beton 2 erreicht eine rechnerische Lebensdauer von rund 50 Jahren. Wenn eine Lebensdauer von 50 Jahren maßgebend ist, ist Beton 3 unter Berücksichtigung der technischen und ökologischen Leistung die nachhaltigste Lösung. Die Klinkerintensität und damit das Treibhauspotenzial (GWP) sind gering. Die Fes-

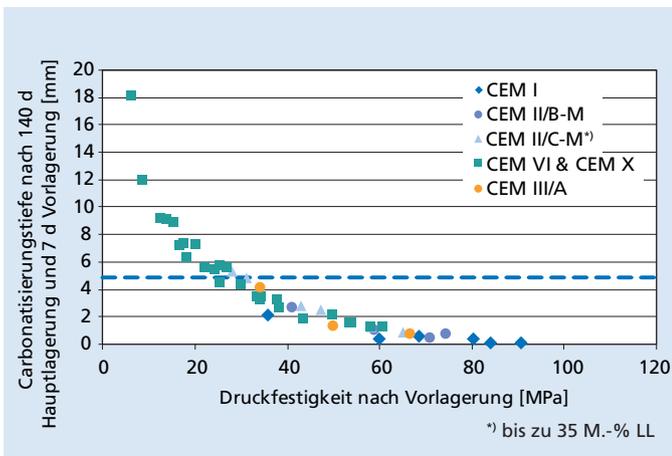


Bild 3: Zusammenhang zwischen der Druckfestigkeit und der Carbonatisierungstiefe (Bewertungskriterium 5 mm Carbonatisierungstiefe nach 140 d Hauptlagerung nach [6]; Daten aus [1])

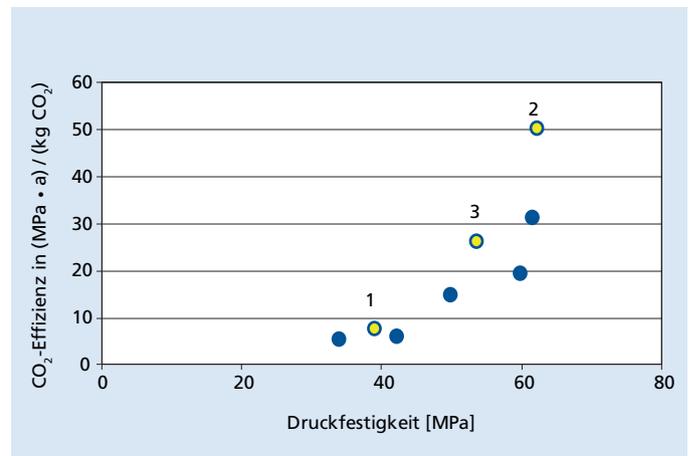


Bild 4: CO₂-Effizienz berechnet nach [7] in Abhängigkeit von der Betondruckfestigkeit



FOKUSSIERT

Die Natur macht es uns vor.

Das Ziel im Fokus. Lösungen für maximale Ergebnisse im Team entwickeln.

Genau wie wir, wenn es um's Bauen geht.

Mit Zement, Beton, Sand und Kies,
Fließestrich und Betonelementen.

www.heidelbergcement.de

HEIDELBERGCEMENT

ECHT. STARK. GRÜN.

tigkeit und die errechnete Lebensdauer sind für den Verwendungszweck ausreichend, insbesondere unter Berücksichtigung, dass bei der Berechnung nur die Zeit bis zur Depassivierung der Bewehrung berücksichtigt wird und innerhalb der Propagationsphase (= Korrosionsphase) eine Reserve besteht.

Literatur

- [1] Müller, C.; Palm, S.; Hermerschmidt, W.: Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen mit CEM II/B-LL und CEM II/C-M (S-LL) – Zementen (in Vorbereitung)
- [2] Schuster, T.; Baetzner, S.; Bolte, G.; Ehrenberg, A.; Neufert, W.; Palm, S.: Stoffliche Potenziale für klinkereffiziente Zemente. Fachtagung „Zementchemie“, Düsseldorf 2019
- [3] Siebel, E.: Frost- und Frost-Tausalz-Widerstand von Beton – Beurteilung mittels Würfelverfahren. Beton 42 (1992) H. 9, S. 496–501
- [4] Die Nachfrage nach Primär- und Sekundärrohstoffen der Steine-und-Erden-Industrie bis 2035 in Deutschland. Bundesverband Baustoffe, Steine und Erden (BBS), Berlin 2016
- [5] Zahlen und Daten. Zementindustrie in Deutschland 2018. Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf 2018
- [6] CEN/TR 16563:2013 “Principles of the equivalent durability procedure”
- [7] Haist et al.: Ansatz zur Quantifizierung der Nachhaltigkeit von Beton auf der Baustoffebene. Beton- und Stahlbetonbau 111 (2016) H. 10

Wirtschaftsverband Mineralische Bauprodukte (WIN) und VGB Powertech

Flugasche bleibt auch im kommenden Jahrzehnt verfügbar – effizienter Einsatz bei voller Leistungsentfaltung

Thomas Kaczmarek, Düsseldorf, und Hans Joachim Feuerborn, Essen

Flugasche wird seit über 50 Jahren in Beton eingesetzt und ist heute für viele Betonanwendungen als Zusatzstoff und Bindemittelkomponente ein unverzichtbarer Baustoff, der aufgrund seiner spezifischen Eigenschaften die Frisch- und Festbetoneigenschaften positiv beeinflusst und die wirtschaftliche Herstellung qualitativ hochwertiger und insbesondere dauerhafter Betone ermöglicht. Der Einsatz als Betonzusatzstoff wurde durch Forschung stetig erweitert, die Anwendungsregeln sind in Normen und Richtlinien beschrieben. Flugasche wird als Nebenprodukt bei der Energieerzeugung in kohlebefeuerten Kraftwerken hergestellt. Die Umweltwirkung bei der Bewertung der Nachhaltigkeit von Bauwerken ist somit gering bzw. vernachlässigbar.

Die Energiewirtschaft steht aufgrund der politischen Vorgaben zur CO₂-Reduzierung vor großen Herausforderungen. Zum einen beim steten Ausbau von Windkraft, Solarfeldern und Leitungsnetz. Zum anderen bei der Sicherstellung der Energieversorgung zu akzeptablen Preisen. Mit dem im Januar 2019 vorgelegten Vorschlag der Bundeskommission „Wachstum, Strukturwandel und Beschäftigung“ wurde neben zahlreichen Maßnahmen zur Energie- und CO₂-Einsparung auch ein Datum für den Kohleausstieg im Jahr 2038 vorgelegt. Inwieweit die Szenarien realisiert werden, bleibt abzuwarten. Die Voraussagen zur Verfügbarkeit von Kraftwerksnebenprodukten werden jedoch schwieriger und die Verfügbarkeit, insbesondere regional, wird zurückgehen. Ein Grund mehr, diese wertvollen Zusatzstoffe künftig und konsequent nur noch dort einzusetzen, wo sie ihre optimale Wirkung entfalten können.

Entwicklung

Im Jahr 1970 wurde die erste allgemeine bauaufsichtliche Zulassung des Landes

NRW erteilt. Diese wurde 1974 durch das Prüfzeichen durch das Institut für Bautechnik (später DIBt) ersetzt. Bis zum Jahr 1995 wurden auf Basis der im Jahr 1980 entwickelten „Richtlinie für die Erteilung von Prüfzeichen für Steinkohlenflugasche“ (später Zulassungsrichtlinie) insgesamt 85 Prüfzeichen für Flugaschen erteilt, später dann allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen. Seit 1994 wird Flugasche nach der DIN EN 450 und nach zweifacher Revision nunmehr nach der DIN EN 450-1:2012.10 hergestellt. Die Herstellung unterliegt einer Eigen- und Fremdüberwachung nach DIN EN 450-2. Da Flugasche als Baustoff sehr stark am Markt nachgefragt ist, wurde der Stoff im Jahr 2010 nach der REACH Ver-

ordnung registriert. Zur Kommunikation der Stoffeigenschaften wurde ein Stoffinformationsblatt (Aufbau und Inhalt wie Sicherheitsdatenblatt) erstellt.

Die Anwendung der genormten Flugasche im Beton wurde seit 1996 in der bauaufsichtlich eingeführten Anwendungsrichtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton „Verwendung von Flugasche nach DIN EN 450 im Betonbau“ geregelt. Der Inhalt der Anwendungsrichtlinie wurde später in die DIN 1045-2 übernommen. Seitdem wurden nach Vorlage neuer Forschungsergebnisse die Anwendungsmöglichkeiten erweitert und im Zuge von Änderungen in die Norm aufgenommen. Die DIN 1045-2 gilt in Verbindung mit der DIN

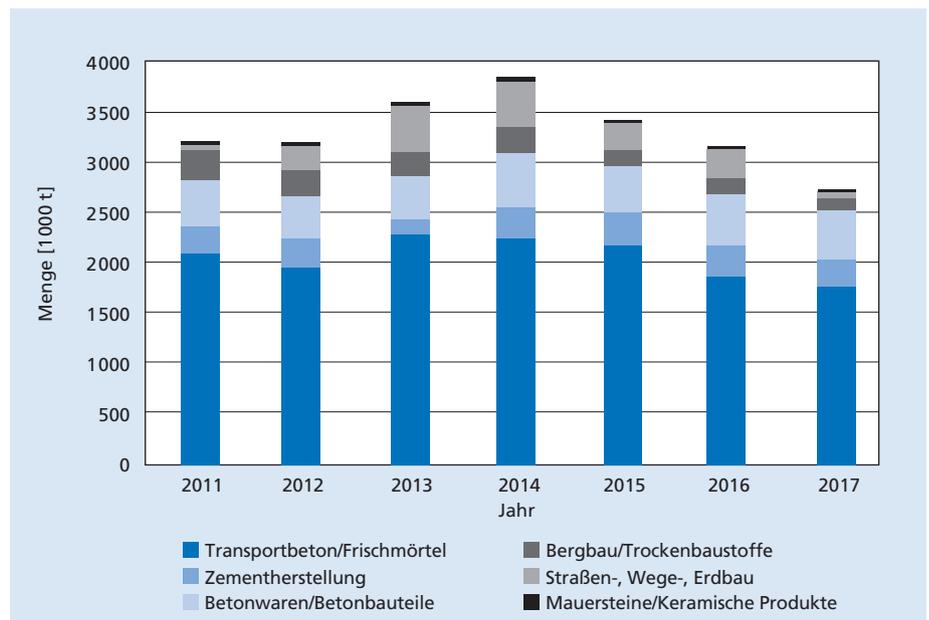


Bild 1: Verwendung von Steinkohlenflugasche in Deutschland in den Jahren 2011 bis 2017

Grafik: VGB PowerTech, Essen