

Einsatz klinkerreduzierter Zemente

Neue Zemente im Spannungsfeld zwischen Ressourcenverfügbarkeit und Dauerhaftigkeit

Thomas Sievert, Stefan Hainer, Julia Scheidt, Wiesbaden, Werner Remarque, Lengerich

Die Betonbauweise ist derzeit weltweit noch für rd. 5 % bis 7 % der Treibhausgasemissionen verantwortlich. Eine deutliche Reduzierung dieser Emissionen gelingt durch die Absenkung des Klinkergehalts im Zement. Als Klinkerersatz wird verstärkt Kalkstein genutzt, weil die Verfügbarkeit anderer Zementhauptbestandteile, wie z.B. Flugasche oder Hüttensand, langfristig nicht gesichert ist. Basierend auf den Erfahrungen mit bereits am Markt verfügbaren Portlandkompositzementen wurden die Regelwerke um neue klinkerreduzierte Zemente wie CEM II/C-M und CEM VI erweitert. Aus der Abwägung zwischen Ressourcenverfügbarkeit und der Notwendigkeit zur CO₂-Minderung kann das Verlassen des „One-fits-all“ Prinzips (ein Zement für Betone aller Expositionsklassen) einen Lösungsansatz darstellen. Dyckerhoff hat hierzu für mehrere Standorte entsprechende Zulassungen beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) für CEM II/C-M-Zemente erhalten. Ende 2020 wurde bereits mit dem Einsatz im Transportbeton gestartet, um Erfahrungen bzgl. Zusatzmittelverträglichkeit aber auch zur Kombinierbarkeit mit anderen Zementen zu sammeln.

1 Einleitung

Bis zum Jahr 2050 will die Europäische Union klimaneutral werden, d.h. es darf nur so viel CO₂ emittiert werden, wie auch gebunden werden kann. Für die Zementindustrie bedeutet dies, dass der Portlandzementklinkergehalt der Zemente weiter reduziert und das bei der Herstellung des Portlandzementklinkers anfallende CO₂ abgetrennt und anschließend gespeichert oder industriell genutzt werden muss.

Klinkerreduzierte Zemente sind in Westeuropa keine Besonderheit. Bereits seit mehr als 100 Jahren werden Hochofenzemente hergestellt und verwendet. Flugasche und andere Zusatzstoffe werden seit vielen Jahren erfolgreich im Beton eingesetzt. Derzeit ist jedoch unklar, welche Rohstoffe in Zukunft in welchen Mengen für die Zement- und Betonherstellung zur Verfügung stehen werden. Steinkohlenflugaschen werden mit dem Auslaufen der Kohleverstromung nicht mehr anfallen. Nach aktuellen Konzeptstudien zur Dekarbonisierung der Eisen- und Stahlindustrie ist davon auszugehen, dass sich die lokal verfügbaren Hüttensande in ihren Eigenschaften drastisch verändern werden. Ob diese dann als Zementhauptbestandteil geeignet sind, muss noch geprüft werden.

Die eingeschränkte Verfügbarkeit der bisher verwendeten Rohstoffe wird voraussichtlich zu einem vermehrten Einsatz von Portlandkompositzementen sowohl im Bereich der Transportbetonindustrie als auch für das Segment der Betonwaren- und Betonfertigteilindustrie führen.

Bei der Überarbeitung der neuen Generation der Normenwerke für Zement und Beton wurden die Aspekte der Rohstoffverfügbarkeit bereits berücksichtigt. Die bisherige Reihe der Portlandkompositzemente

wurde um die Gruppe der CEM II/C-M-Zemente sowie die Gruppe der Kompositzemente CEM VI erweitert.

Basierend auf den Normentwürfen der DIN EN 197-5 und den bisher guten Erfah-

Die Autoren:

Dr.-Ing. Stefan Hainer studierte Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Darmstadt. Von 2010 bis 2015 war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Massivbau der Technischen Universität Darmstadt, wo er auch promovierte. Der Themenschwerpunkt seiner Dissertation lag auf der Dauerhaftigkeit von Betonen mit geringem Klinkergehalt. Seit 2015 ist Stefan Hainer in der Abteilung Qualität und Technische Beratung der Dyckerhoff GmbH in Wiesbaden tätig und seit 2020 Leiter der Anwendungstechnik.

Dr.-Ing. Julia Scheidt studierte Bauingenieurwesen an der Technischen Universität Kaiserslautern. Von 2014 bis 2019 war sie wissenschaftliche Mitarbeiterin im Fachgebiet Werkstoffe im Bauwesen an der Technischen Universität Kaiserslautern, wo sie auch promovierte. Der Themenschwerpunkt ihrer Dissertation lag auf der Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung im Beton. Von 2016 bis 2019 arbeitete sie im Arbeitsausschuss Gesteinskörnungen des DIN Normenausschuss Bauwesen (NABau) mit. Seit 2019 ist Julia Scheidt in der Abteilung Qualität und Technische Beratung der Dyckerhoff GmbH in Wiesbaden tätig, zunächst in der Anwendungstechnik und seit 2021 als Bauberaterin.

Dr.-Ing. Thomas Sievert absolvierte zunächst eine Ausbildung zum Baustoffprüfer bei der Dyckerhoff AG im Werk Neubeckum. Im Anschluss studierte er Steine und Erden an der TU Clausthal. Seit 2000 ist er in verschiedenen Funktionen der heutigen Dyckerhoff GmbH tätig. Berufsbegleitend promovierte er an der TU Clausthal. Seit 2014 ist er Leiter der Abteilung Qualität und Technische Beratung. Thomas Sievert ist Mitglied diverser Arbeitskreise und Ausschüsse des VDZ sowie BTB.

Dr.-Ing. Werner Remarque studierte Metallurgie und Werkstofftechnik an der RWTH Aachen. Nach dem Studium war er wissenschaftlicher Mitarbeiter im Lehrgebiet Herstellung mineralischer Baustoffe der RWTH Aachen. 2003 folgte ein Wechsel in die Niederlande, wo er in verschiedenen Ingenieurbüros als Berater für die Betonfertigteilindustrie tätig war. Von 2007 bis 2016 war er Application Engineer bei der Cemex WestZement GmbH (ab 2015 Holcim WestZement GmbH), Schwerpunkt Niederlande und Belgien. Seit 2017 ist er Bauberater der Dyckerhoff GmbH. Werner Remarque ist Mitglied diverser Arbeitskreise und Ausschüsse beim VDZ, der FGSV und dem Betonhuis sowie Mitglied der Normkommissionen für Zement und Beton beim NEN (Stichting Koninklijk Nederlands Normalisatie Instituut).

rungerungen mit den Portlandkompositzementen der Zementart CEM II/B-M wurden im Hause Dyckerhoff frühzeitig CEM II/C-M (S-LL)-Zemente entwickelt und bereits vor Veröffentlichung der DIN EN 197-5 über Zulassungen des DIBt eingeführt und in den eigenen Transportbetonwerken verwendet. Die CEM II/C-M-Zemente dürfen über entsprechende Anwendungszulassungen im Beton verwendet werden. Aktuell ist der Einsatz dieser Zemente in den Expositionsklassen XF2 bis XF4, basierend auf dem Entwurf der DIN 1045-2, ausgeschlossen. Über eine entsprechende Zulassungsprüfung könnten die Zemente auch für diese Expositionsklassen freigegeben werden.

2 Umweltwirkungen

Die Umweltwirkungen eines Betons werden in erster Linie vom Zementgehalt und der Zementart beeinflusst. Je höher der Anteil an Portlandzementklinker im Zement, desto höher der CO₂-Fußabdruck des Betons (GWP). Zur Reduzierung des GWP von Beton können Zemente mit mehreren Hauptbestandteilen, wie z.B. Portlandkompositzemente oder Hochofenzemente, verwendet oder ein Teil der Zementmenge durch Füller, wie z.B. Flugasche ersetzt werden.

Die industriellen Nebenprodukte Hüttensand und Flugasche werden heute bei der GWP-Berechnung nicht mehr mit Null bewertet, sondern ein Teil des CO₂, das bei der Herstellung des Hauptprodukts Eisen bzw. Strom entsteht, wird dem Hüttensand bzw. der Flugasche mitgegeben (Allokation). Für Hüttensande liegt der mitzurechnende CO₂-Anteil aktuell bei 50 kg/t, für Flugasche sogar bei 200 kg/t [1]. Die Allokation führt dazu, dass Portlandkompositzemente der Kategorie CEM II/C-M auf ein vergleichbares GWP kommen, wie z.B. CEM III/A-Zemente (Bild 1).

Im Bereich der Transportbetonindustrie, wo der Fokus überwiegend auf der 28-Tage-Festigkeit liegt, können CEM II/C-M-Zemente einen guten Beitrag leisten, den CO₂-Fußabdruck von Beton positiv zu beeinflussen, ohne den Bauprozess zu beeinträchtigen. Ein weiterer Vorteil von CEM II/C-M-Zementen liegt darin, dass sie eine effiziente Nutzung geringer Mengen der wertvollen Ressourcen wie Hüttensand und Flugasche ermöglichen. Nicht in allen Bauteilen ist es sinnvoll, Betone mit hohen Hüttensand- oder Flugaschegehalten zu verwenden. Diese Ressourcen sollten dort zum Einsatz kommen, wo sie die Produkteigenschaften des Betons positiv beeinflussen, wie z.B. Betone mit geringer Wärmeentwicklung oder Betone mit erhöhtem Säurewiderstand.

Der Einfluss von Zementart und Flugasche auf das GWP von Beton ist in Tafel 1

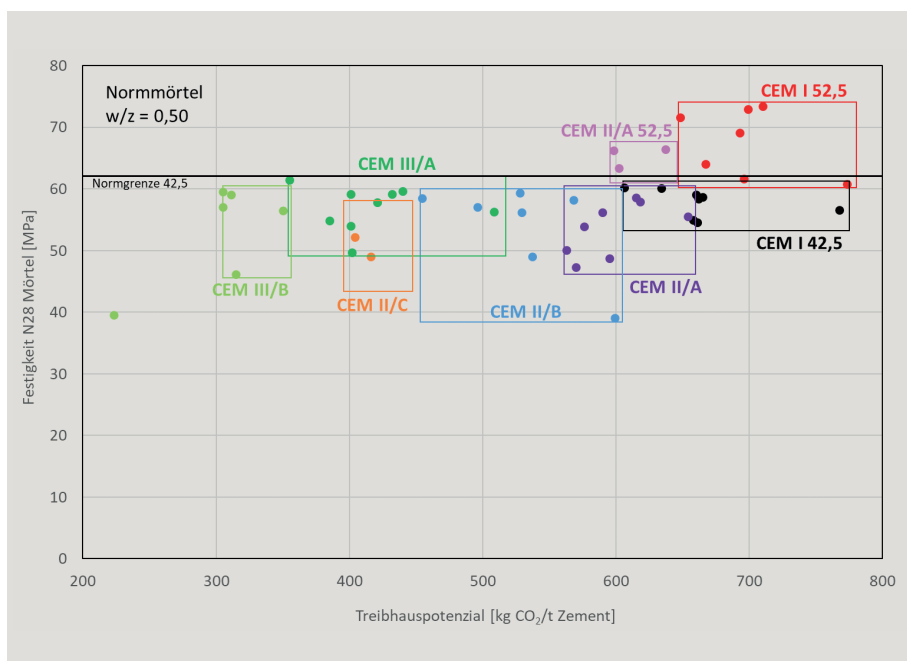


Bild 1: Netto-Treibhauspotenzial (GWP) verschiedener Zementarten in Bezug auf die Leistungsfähigkeit nach 28 d

exemplarisch für verschiedene Betone bis zur Festigkeitsklasse C30/37 dargestellt.

Anhand der Beispielrechnungen lassen sich folgende Schlüsse ziehen:

- CEM II/C-M-Zemente können das GWP von Betonen der unteren Festigkeitsklassen verbessern.
- Die Verwendung von Flugasche führt zu keiner weiteren Absenkung des GWP von Betonen, die mit klinkerreduzierten Zementen hergestellt werden.

3 Anwendungen in der Praxis

Zemente mit eingeschränkten Anwendungsbereichen erfordern ein Umdenken, vor allem im Bereich der Transportbetonindustrie. Die Silokapazität im Betonwerk ist oftmals eingeschränkt und es wird versucht, mit einem Zement alle Betonzusammensetzungen bzw. Anwendungsfälle abzudecken. Gut 80 % des Transportbetons wird in den Festigkeitsklassen bis C30/37 hergestellt [2]. Interne Auswertungen zeigen, dass der Anteil an Betonen mit den Expositionsklassen

Tafel 1: GWP von Beispielbetonen bis zur Festigkeitsklasse C30/37 mit CEM III/A 42,5 N und CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N im Vergleich. Beide Zemente stammen aus demselben Zementwerk.

Beton	Zementart	Zementgehalt [kg/m ³]	Flugasche [kg/m ³]	GWP (Netto)
C20/25	CEM III/A 42,5 N	275	–	150
	CEM III/A 42,5 N	260	35	150
	CEM III/A 42,5 N	245	65	149
	CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	275	–	140
	CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	260	35	141
C25/30	CEM III/A 42,5 N	300	–	161
	CEM III/A 42,5 N	275	50	160
	CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	310	–	154
	CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	290	35	153
C30/37	CEM III/A 42,5 N	305	–	173
	CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	340	–	167
	CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	325	35	167

XF2 bis XF4 bei einem durchschnittlichen Transportbetonwerk nur rd. 10 % der produzierten Betonmenge beträgt. Die Leistungsfähigkeit der heutigen CEM II/C-M-Zemente mit optimiertem CO₂-Fußabdruck ist so eingestellt, dass Betone in den Festigkeitsklassen bis C30/37 zielsicher, ohne enorme Überfestigkeiten, hergestellt werden können. Die Zusammensetzung sorgt für gute Verarbeitungseigenschaften und eine höhere Sedimentationsstabilität auch ohne die Zugabe von weiteren Füllern, wie z.B. Flugasche.

In der bisherigen Praxis werden Betone der geringeren Festigkeitsklassen oftmals mit Betonzusatzstoffen (BZS) hergestellt. Das vor allem, um zum einen die Verarbeitungseigenschaften bei reduziertem Zementgehalt zu gewährleisten, zum anderen aus Kostengründen. Hier ist die Flugasche sicherlich hervorzuheben.

Vor Verwendung der Flugasche als BZS im Beton wurde die Verarbeitbarkeit des Betons über einen ausreichend hohen Zementgehalt, evtl. in Kombination mit einem einfachen Zusatzmittel, realisiert. Verwendet wurden überwiegend Zemente bis zur Festigkeitsklasse 35, heute 32,5.

Leistungsfähige Zusatzmittel in Kombination mit hohen Gehalten an BZS haben dazu geführt, dass die Zementindustrie das Produktportfolio in Richtung höherer Zementfestigkeitsklassen verschoben hat. So beträgt der Anteil der Zemente in der Festigkeitsklasse 32,5 heute gerade noch gut 16 % [3]. Entsprechend werden ein Großteil der Betone in den unteren Festigkeitsklassen mit sehr leistungsstarken Zementen hergestellt, die entsprechend ihrer Normfestigkeit durchaus auch als Zemente der Festigkeitsklasse 52,5 L eingestuft werden könnten.

Diese Entwicklung hat dazu beigetragen, dass Betone in den unteren Festigkeitsklassen mittlerweile nur noch mit dem normativen Mindestzementgehalt hergestellt werden. Auch wenn gerade mal keine Betonzusatzstoffe vorhanden sind.

Derart zusammengesetzte Betone wirken auf den ersten Blick verarbeitungsfreundlich, neigen jedoch oftmals zum Wasserabsondern und reagieren sensibler gegenüber Schwankungen des Wassergehalts. Auch das Nachbearbeiten solcher Betone kann sich als schwierig darstellen. Die mit dem Wasserabsondern verbundene Sedimentation wird durch den Verarbeiter oftmals als Ansteifen des Betons interpretiert. Die Folgen sind dann in der Qualität der Oberfläche erkennbar. Einzige vernünftige Maßnahme ist hier ein robuster Aufbau des Betons, durch eine gute Abstimmung von Zement, Wasser und Zusatzmittel auf die erforderlichen Betoneigenschaften. Eine Erhöhung des Zementgehalts zur Verbesserung der Verarbeitungseigenschaften alleine reicht oftmals nicht

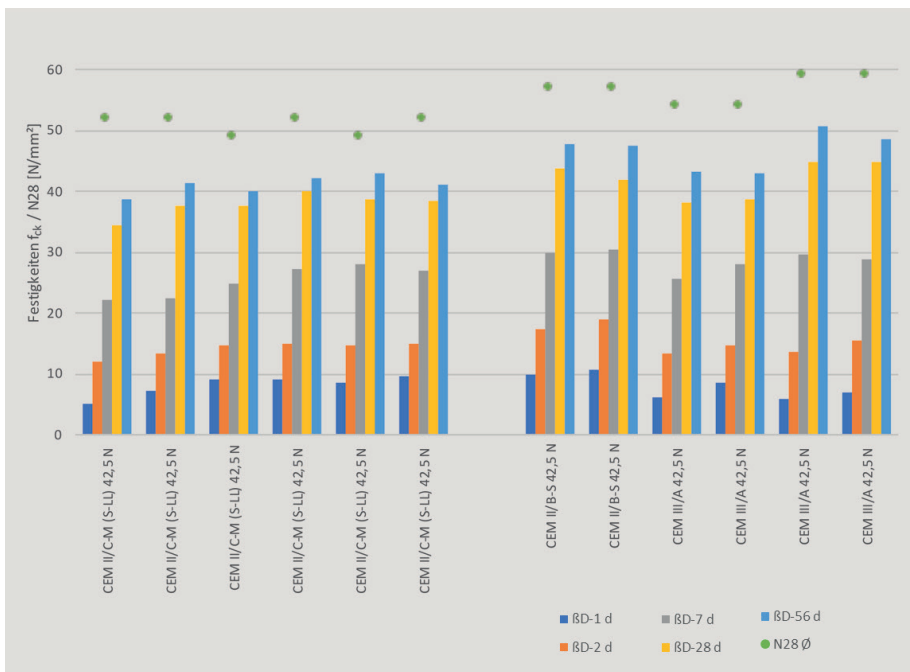


Bild 2: Betondruckfestigkeit f_{ck} von Laborbetonen, hergestellt mit Zementen unterschiedlicher Leistungsfähigkeit

aus. Sinnvoll ist in diesem Fall die Verwendung eines optimierten Zements, da sonst die Gefahr besteht, dass die Festigkeit des Betons die geforderte Festigkeitsklasse deutlich überschreitet.

Das ist beispielhaft in Bild 2 gezeigt. Dargestellt ist der Festigkeitsverlauf von Laborbetonen der Festigkeitsklasse C25/30 unter Verwendung von Zementen unterschiedlicher Leistungsfähigkeit. Allen Betonen liegt der gleiche Zementgehalt von 300 kg sowie ein konstanter Wasserzementwert von $w/z = 0,6$ zugrunde. Vor allem bei Verwendung der bisher etablierten Zemente CEM II/B-S sowie CEM III/A, mit Normdruckfestigkeiten an der Obergrenze der Festigkeitsklasse, sind vermehrt Überfestigkeiten im Betonalter von 28 d festzustellen. Zur Orientierung sind die mittleren 28-d-Normdruckfestigkeiten der untersuchten Zemente nach EN 196-1 als N28 Ø im Diagramm integriert.

Die grundsätzlichen Zusammenhänge zwischen Zementleimgehalt und Konsistenzverhalten, aber auch die Wirksamkeit von Betonzusatzmitteln im Beton, wurden ausführlich in [4] untersucht. Auch im aktuellen Entwurf der DIN 1045-2 wurde dem Leimgehalt mehr Aufmerksamkeit gewidmet. So sind künftig Mindestleimgehalte im Beton in Abhängigkeit von dem verwendeten Größtkorn sowie der deklarierten Konsistenzklasse vorgeschrieben (Tafel 2). Vor diesem Hintergrund wird es sich künftig noch mehr lohnen, die bisherige Zementstrategie zu überdenken, und eine anwendungsorientierte sowie leistungsgerechte Optimierung der Betonzusammensetzung in Abhängigkeit von der verwendeten Zement- bzw. Leimgehalte im Beton führen in der Regel zu schlechteren Verarbeitungseigenschaften und einem weniger robusten Beton.

Tafel 2: Mindestwerte für das Leimvolumen ab der Festigkeitsklasse C25/30 [5]

Größtkorn D_{max}	Mindestwert für Leimvolumen ^{1, 2, 3)} [L/m ³]			
	F3	F4	F5	F6
32	270	280	290	300
22	275	285	295	305
16	280	290	300	310
8	295	305	315	325

¹⁾ Besondere Gesteinskörnungen (z.B. gebrochene Gesteinskörnungen) können ein höheres Leimvolumen erfordern.

²⁾ Gilt nicht für Betone nach DAfStb-Richtlinie Massenbeton.

³⁾ Das Leimvolumen ist aus den volumetrischen Anteilen von Zement, Zusatzstoffen und dem wirksamen Wassergehalt zu berechnen.

Vor diesem Hintergrund wurden bereits während der Entwicklung der CEM II/C-M-Zemente Untersuchungen zur Zusatzmittelverträglichkeit durchgeführt. Bei den Untersuchungen wurde eine breite Palette an Zusatzmitteln und Wirkstoffgruppen geprüft. Zusätzlich wurden vergleichende Untersuchungen mit anderen Zementen, die üblicherweise zur Herstellung von Transportbeton verwendet werden, durchgeführt. Zusammenfassend lassen sich die Eigenschaften von CEM II/C-M-Zementen wie folgt beschreiben:

- Konsistenzverlauf vergleichbar mit anderen TB-Zementen (Hauptbestandteile K, S, LL bekannt)
- Teilweise leicht höhere Zusatzmittelgehalte im Vergleich zu Betonen mit Hochofenzementen der Kategorie CEM III/A (keine neuen Zusatzmittel/ Wirkstoffgruppen notwendig)
- Kalksteinanteil im Zement sorgt für geschmeidige und stabile Betone

Bild 3 zeigt den Konsistenzverlauf einer Standardbetonzusammensetzung, die mit unterschiedlichen Standardzementen für die Anwendung Transportbeton und mit CEM II/C-M-Zementen hergestellt wurde.

Bei sommerlichen Temperaturen ist die Zugabe eines Konsistenzhalters zu empfehlen. Das gilt jedoch nicht nur für Betone mit CEM II/C-M-Zementen, sondern empfiehlt sich generell für alle Betone bei sommerlichen Temperaturen.

4 Fazit und Perspektive

Seit Einführung der Zementart CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N bei der Dyckerhoff GmbH Ende 2020 wurden bereits mehrere hunderttausend Kubikmeter Beton mit diesen Zementen hergestellt und in verschiedensten Bauteilen zur Anwendung gebracht. Die Bandbreite der hergestellten Betonsorten reicht vom einfachen C12/15 bis zum C30/37 sowie vom erdfeuchten Beton bis zum Beton in der Konsistenzklasse F4.

Mit CEM II/C-M-Zementen lassen sich gut 70 % bis 80 % aller Betone im Segment Transportbeton herstellen, auch wenn eine generelle Anwendung für die Expositionsklasse XF2 bis XF4 nicht zulässig ist. Ergänzt um einen Zement, der auch in den Expositionsklassen XF2 bis XF4 sowie in höheren Festigkeitsklassen ab C35/45 eingesetzt werden kann, sind Transportbetonwerke somit auch künftig sehr gut aufgestellt und können die vorhandene Silokapazität weiterhin sinnvoll nutzen.

Die bisherigen Erfahrungen zeigen, dass die Portlandkompositzemente CEM II/C-M mit den heute gängigen PCE-haltigen Zusatzmitteln gut verträglich sind. Umgewöhnen müssen sich möglicherweise Beton-

hersteller, die bisher ihre Betone ausschließlich mit CEM III/A-Zementen hergestellt haben. Im Vergleich zu diesen kann der Zusatzmittelbedarf bei Verwendung eines kalksteinhaltigen Zementes leicht erhöht sein. Das ist jedoch von mehreren Faktoren abhängig und entsprechend vor Verwendung zu prüfen.

sind bereits angelaufen. Aufgrund der unsicheren Zukunft der Zementhauptbestandteile Hüttensand und Flugasche wurden normativ noch nicht festgelegte Zemente mit Kalksteingehalten bis zu 70 % untersucht. Die Ergebnisse wurden 2014 durch Müller et al. veröffentlicht [6]. Bei Anpassung der Betonzusammensetzung, vor allem

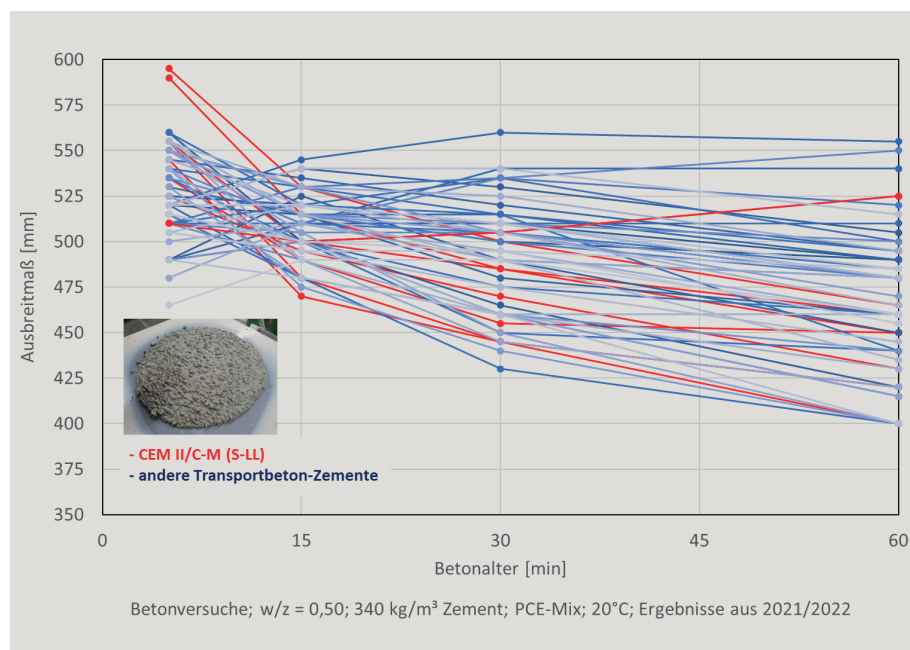


Bild 3: Konsistenzverlauf von Laborbetonen mit unterschiedlichen Standardzementen und mit CEM II/C-M-Zementen

Aufgrund der Zusammensetzung haben CEM II/C-M-Zemente einen geringen wirksamen Alkaligehalt. Somit können diese Zemente über den entsprechenden Nachweis als (na) bzw. NA-Zemente eingestuft werden.

Der Weg in die Klimaneutralität wird dazu führen, dass der Gehalt an Portlandzementklinker in den Zementen immer weiter reduziert werden muss. Das ist für die kommenden Jahre die einzige Möglichkeit, den CO₂-Fußabdruck von Beton nennenswert zu reduzieren. Das Abscheiden von CO₂ aus dem Abgasstrom des Zementwerkes wird derzeit erprobt. Bis zur großtechnischen Umsetzung werden jedoch ein paar Jahre vergehen. Erste Studien lassen erwarten, dass die Kosten für die Abscheidung des CO₂ signifikant hoch sein werden. Daher ist davon auszugehen, dass auch künftig mit dem vermehrten Einsatz von Zementen mit geringen Klinkergehalten zu rechnen ist. Neben den CEM II/C-M-Zementen sind in der DIN EN 197-5 auch CEM VI-Zemente definiert. Dabei handelt es sich um Kompositzemente mit einem sehr geringen Klinkergehalt von 35 M.-% bis 49 M.-%. Erste Untersuchungen zur Leistungsfähigkeit dieser Zemente

durch reduzierte Wassermenge, sind auch dauerhafte Betone mit hohen Kalksteingehalten möglich.

Die Ausführungen zeigen, dass besonders CO₂-effiziente Zemente speziell dann von Vorteil sind, wenn der Fokus der Anwendung auf der Endfestigkeit nach 28 d oder später liegt. Das erfordert jedoch auch eine entsprechende Nachbehandlung des Betons.

Insgesamt kann damit gerechnet werden, dass die Herstellung von Beton in den kommenden Jahren aufgrund der dynamischen Ressourcenverfügbarkeit und politischen Rahmenbedingungen komplexer wird.

Literatur

- [1] Concrete Sustainability Council Hintergrundbericht – CO₂-Modul, Stand 08.12.2021
- [2] Große Aufgaben – gemeinsame Lösungen. Jahresbericht 2022 Bundesverband der Deutschen Transportbetonindustrie e.V., Berlin 2023
- [3] Zahlen und Daten 2021 – Zementindustrie in Deutschland. Verein Deutscher Zementwerke e.V., Düsseldorf 2022
- [4] Thielen, G.; Spanka, G.; Grube, H.: Regelung der Konsistenz von Beton durch Fließmittel. beton 47 (1997) H. 8, S. 470–475
- [5] DIN 1045-2 „Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton, Teil 2 Beton“. Entwurf, Juli 2022
- [6] Müller, C.; Palm, S.; Graubner, C.; Proske, T.; Hainer, S.; Rezvani, M.; Neufert, W.; Reuken, I.: Zemente mit hohen Kalksteingehalten Dauerhaftigkeit und praktische Umsetzbarkeit. beton 64 (2014) H. 1+2, S. 43–50