

25. Jahrgang | Nr. 95 Juni 2024 | 2. Quartal | 6 €

AKTUELL

Neues FTB-Projekt zu R-Beton

BETON

Start-up: Beton als CO₂-Speicher

FORSCHUNG

Dauerhaftigkeit nach dem
Performance-Prinzip

TB iNFO

Das Transportbeton-Magazin



Corporate Identity
als Kunst

Dauerhaftigkeit von Beton nach dem Performance-Prinzip

Forschung | Annahme- und Abnahmeprüfungen

Gefördert vom Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF), hat ein Forschungsvorhaben der AiF-Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. (FTB) die dauerhaftigkeitsrelevanten Betoneigenschaften zum Zeitpunkt der „Lieferung und Annahme des Betons auf der Baustelle bzw. zum Zeitpunkt der Abnahme am Bauwerk nach Bauausführung“ untersucht. Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

Der Lehrstuhl für Baustofftechnik der Ruhr-Universität Bochum (Projektleitung: Prof. Rolf Breitenbücher, Sachbearbeitung: David Ov) und der Lehrstuhl für Werkstoffe und Werkstoffprüfung im Bauwesen der Technischen Universität München (Projektleitung: Prof. Christoph Gehlen, Dr. Thomas Kränkel, Sachbearbeitung: Juan Mauricio Lozano Valcarcel) haben in diesem Forschungsvorhaben die dauerhaftigkeitsrelevanten Betoneigenschaften zum Zeitpunkt der „Lieferung und Annahme des Betons auf der Baustelle bzw. zum Zeitpunkt der Abnahme am Bauwerk nach Bauausführung“ untersucht.

Ausgangssituation

Die Dauerhaftigkeit von Beton- und Stahlbetonbauwerken wird gegenwärtig in den einschlägigen Regelwerken [1-3] durch deskriptive Anforderungen sichergestellt. Dabei werden für die zugehörigen Expositionsklassen zum einen Grenzwerte für die Betonzusammensetzung (z. B. maximal zulässiger Wasserzementwert, Mindestzementgehalt, Mindestdruckfestigkeit) und zum anderen einzuhaltende Mindestbetondeckungen festgelegt. Werden diese deskriptiven Vorgaben zusammen mit den Bemessungsregeln und den Anforderun-

gen an die Bauausführung eingehalten, kann mit einer Nutzungsdauer der Bauwerke von 50 Jahren gerechnet werden.

Dieser deskriptive Ansatz stößt jedoch mitunter an gewisse Grenzen, da die Anforderungen nicht auf der Grundlage validierter Dauerhaftigkeitsbemessungsmodelle basieren, sondern auf empirischen Erfahrungen aus jahrzehntelanger Praxis mit portlandzement-basierten Betonen [4]. Im Hinblick auf eine bessere Umweltbilanz werden die verwendeten Betonzusammensetzungen derzeit fortlaufend optimiert. So werden zunehmend neue, klinkerreduzierte Bindemittel im Austausch für Portlandzement eingesetzt. Fraglich bleibt dabei, ob die bisherigen empirisch-basierten Anforderungsprofile auch für solche modernen Betone ohne Langzeiterfahrungen gültig sind. Dabei beruht die Aufnahme neuer Zemente in die DIN 1045-2 [2] auf allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen (abZ) und Zulassungen im Einzelfall (ZiE) beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt). Weiterhin werden mit der deskriptiven Herangehensweise die relevanten Dauerhaftigkeitseigenschaften des Betons (bspw. Karbonatisierungswiderstand, Chlorideindringwiderstand) nicht direkt erfasst. Nach aktuellem Stand wird ein ent-

Bild 1: Lieferung eines Transportbetons aus dem Betonmischfahrzeug



Bild 2: Verarbeitung des Transportbetons auf einer Baustelle



Bild 3: Demonstrator-Pfeiler



sprechender Nachweis neben der Überprüfung der Grenzwerte für die Zusammensetzung indirekt anhand der Druckfestigkeit des Betons erbracht.

Vor diesem Hintergrund könnte die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauwerken zukünftig durch ein Performance-Konzept sichergestellt werden. Die Basis bilden leistungsbezogene Prüfverfahren zur expliziten Ermittlung der Materialkennwerte mit Bezug auf die relevanten Einwirkungen (Karbonatisierung, Chlorideindringung) sowie Prognosemodelle für die Dauerhaftigkeit der Bauwerke. Dabei wird angestrebt, dass alle

dauerhaftigkeitsrelevanten Betoneigenschaften direkt klassifizierbar sind. Diese Klassifizierungen werden auf probabilistischer Basis erfolgen, ähnlich wie bei den bereits bewährten Betondruckfestigkeitsklassen. Somit zielen diese Ansätze vielmehr leistungsbezogen auf die Betoneigenschaften ab und setzen weniger eine bestimmte einzuhaltende Zusammensetzung voraus.

Motivation und Zielstellung

Die Umsetzung eines Performance-Prinzips zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Beton- und Stahlbetonbauwerken wird für die Praxis eine >

Auseinandersetzung mit dem neuen System bedeuten. Betroffen davon sind einerseits die Transportbetonhersteller sowie die Hersteller von Betonfertigteilen und andererseits die bauausführenden Unternehmen, wobei letztere insbesondere deren Überwachungslabore mit einschließen.

Das vorliegende Forschungsvorhaben soll im ersten Ansatz die Umsetzung der neuen Regelungen in die Praxis unterstützen bzw. das dafür notwendige „Werkzeug“ bereitstellen. Ein Ziel war daher, leistungsbezogene Bewertungsansätze zu definieren, um die dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften zum Zeitpunkt der Lieferung und der Annahme des Betons auf der Baustelle bzw. zum Zeitpunkt der Abnahme des Bauwerks entsprechend verifizieren zu können. Zur präzisen Ermittlung der dauerhaftigkeitsrelevanten Betoneigenschaften wurden direkte Prüfverfahren im Rahmen des Performance-Konzeptes angewendet. Parallel dazu sollten an den gleichen Betonen auch dauerhaftigkeitsrelevante Materialkennwerte mit indirekten Schnellprüfverfahren (z. B. Wenner-Sonde) ermittelt werden. Um entsprechende Bewertungsansätze für An- bzw. Abnahmeprüfungen abzuleiten, wurden die Prüfungen hauptsächlich im Betonalter von 28 Tagen durchgeführt. Durch eine vergleichende Gegenüberstellung der generierten Ergebnisse sollten unter anderem Korrelationen zwischen den direkten und indirekten Prüfverfahren abgeleitet werden.

Untersuchte Baustellen und Betone

Über einen Zeitraum von zwei Jahren untersuch-

ten die Forschenden insgesamt 19 repräsentative Transportbetone unter Einbezug der dauerhaftigkeitsrelevanten Expositionsklassen XD (Chloride), XC (Karbonatisierung) und XF (Frost mit/ ohne Taumittel). Dabei sollten sich die Betone, die größtenteils im Bereich des Hochbaus, Tiefbaus oder Ingenieurbaus angesiedelt waren, u. a. in ihrer Zementart und Druckfestigkeitsklasse unterscheiden.

Herstellung und Präparation

Es wurden zum einen separat hergestellte Proben und zum anderen Demonstrator-Bauteile zur späteren Entnahme von Bauteilproben angefertigt. Die Demonstrator-Bauteile wurden stets mit der gleichen Betonlieferung hergestellt wie die separat hergestellten Proben. Um mögliche Variationen in der Betonzusammensetzung und die daraus resultierende Streuung der Eigenschaften zu erfassen, wurden je Transportbeton bis zu zwei zusätzliche Serien separat hergestellter Proben aus anderen Chargen entnommen und geprüft.

Die separat hergestellten Proben wurden auf der Baustelle aus dem angelieferten Transportbeton entnommen und mit einem konventionellen Rütteltisch verdichtet. Für die vorgesehenen Prüfungen wurden Standardwürfel mit 150 mm Kantenlänge verwendet. Im Anschluss an die Herstellung wurden die separaten Proben nach 24 Stunden von der Baustelle in die Laboratorien transportiert, entformt und danach direkt unter Wasser bis zu einem Alter von 28 Tagen gelagert. Parallel wurden auf den Baustellen – je nach



Eine Übersicht über die Zusammensetzungen der einzelnen Transportbetone ist – aufgrund des Umfangs – dem Abschlussbericht dieses Forschungsvorhabens zu entnehmen. Dort finden sich auch weitere Herstellungsdetails zu den Demonstrator-Bauteilen.

Mittlere Druckfestigkeit und Zieldruckfestigkeitsklassen

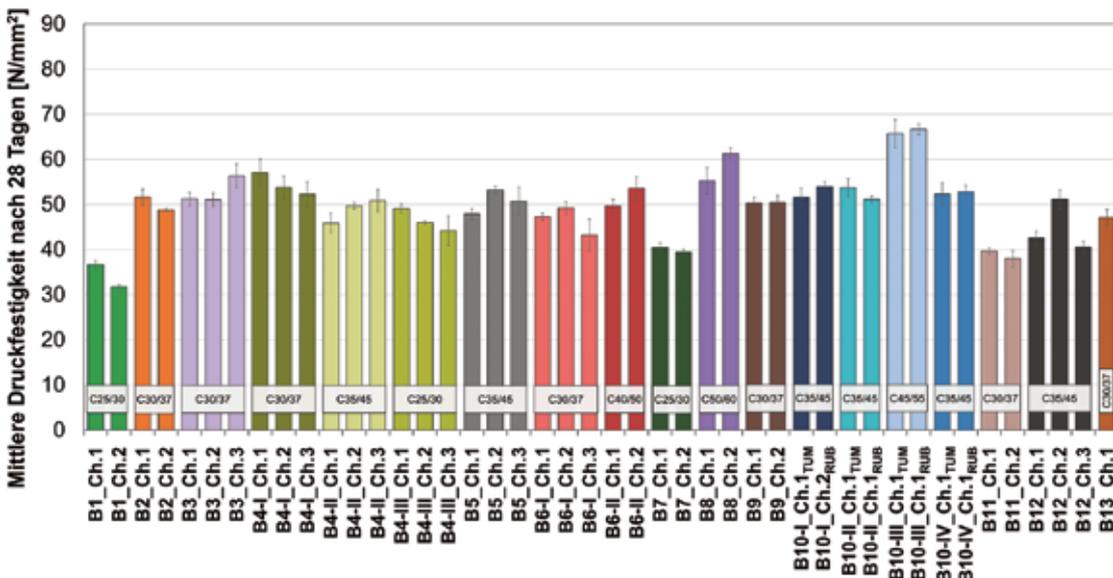


Bild 4: Mittlere Druckfestigkeit nach 28 Tagen an separat hergestellten Proben einzelner Chargen der Transportbetone mit Angabe der jeweiligen Zieldruckfestigkeitsklasse

f Chloridmigrationskoeffizient und Zementsorten

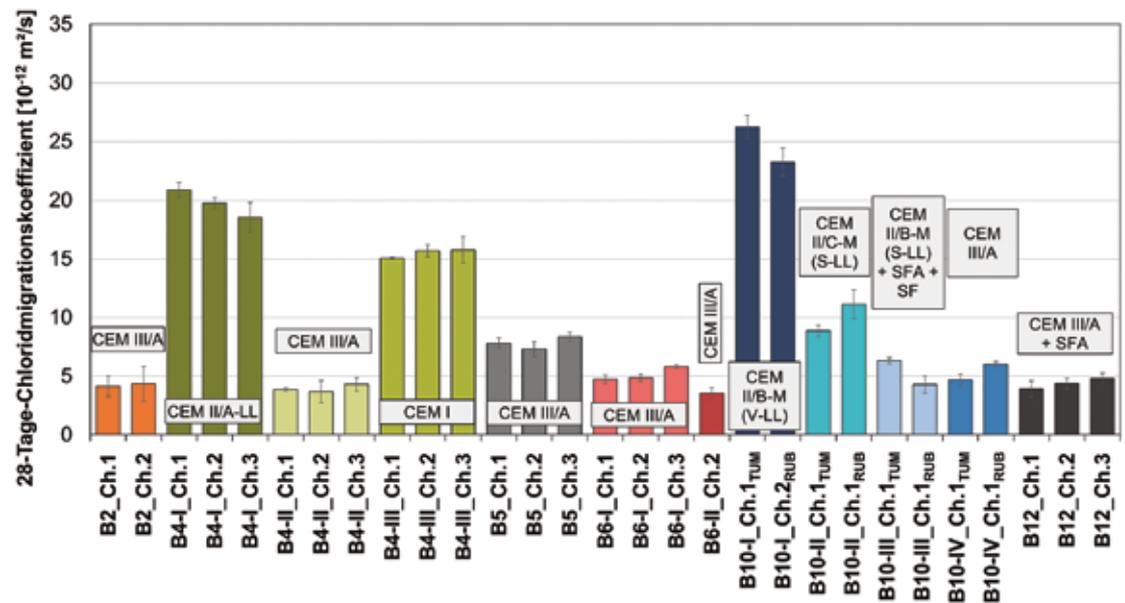


Bild 5:
Chloridmigrationskoeffizient (D_{RCM}) im Alter von 28 Tagen (an separat hergestellten Proben) mit Angabe der jeweils verwendeten Zementsorte

Verfügbarkeit und Möglichkeit – entweder Demonstrator-Wände ($B \times H \times T = 2,0 \times 2,0 \times 0,25 \text{ m}^3$), Demonstrator-Platten ($B \times L \times H = 2,0 \times 2,0 \times 0,30 \text{ m}^3$) oder Demonstrator-Pfeiler ($L \times B \times H = 1,2 \times 6,0 \times 6,0 \text{ m}^3$) hergestellt, um u. a. den Einfluss der Bauausführung und der Umgebungsbedingungen auf die Qualität des Betons im Bauteil zu untersuchen, vgl. Bild 3. Dafür wurden an den Demonstrator-Bauteilen entsprechende Bohrkerne gezogen.

Charakterisierung der Betone

Zur Charakterisierung der Transportbetone wurden – wie im Rahmen einer Annahmeprüfung – die klassischen Frischbetoneigenschaften (Luft- und Frischbetontemperatur, Konsistenz des Frischbetons, Frischbetonrohddichte und ggf. Luftgehalt) nach den geltenden Normen [5–7] bestimmt.

Die Annahme aller gelieferten Betone erfolgte sowohl an kälteren (bei etwa 3,0 °C Lufttemperatur) als auch an wärmeren (bis zu 29,0 °C Lufttemperatur) Betonierzeitpunkten. Bezüglich der Verarbeitbarkeit wiesen alle Transportbetone eine Konsistenzklasse zwischen F2 und F6 auf, wobei die meisten Betone in der Konsistenzklasse F3 vertreten waren. Bei der Rohddichte lagen alle Betone mit 2.200 bis 2.480 kg/m³ in der Größenordnung von typischen Normalbetonen.

In diesem Teil der Untersuchungen konnte festgehalten werden, dass alle Transportbetone ihre geforderten Frischbetoneigenschaften bei der Lieferung auf der Baustelle eingehalten hatten.

Druckfestigkeit

Die Prüfung der Druckfestigkeit erfolgte nach DIN EN 12390-3 [8] sowohl an den separat hergestellten Proben (Würfel mit 150 mm Kantenlänge) als auch an den präparierten Bauteilproben aus den Demonstratoren.

Nachstehend werden, zur Einschätzung der Streuungen in den jeweiligen Baustellenbetonen, die Druckfestigkeiten der einzelnen Lieferchargen (Ch.1, Ch.2 und Ch.3) der separat hergestellten Proben betrachtet, s. Bild 4. Daraus wird ersichtlich, dass trotz unterschiedlicher Chargen die Druckfestigkeiten der jeweiligen Baustellenbetone in einer vergleichbaren Größenordnung liegen. Dies deutet somit auf eine geringe Streuung in der Druckfestigkeit und damit einhergehend auf eine gleichmäßige Qualität der einzelnen Transportbetone hin.

Chloridmigration

Die Prüfung des Widerstandes von Beton gegenüber Chlorideindringen erfolgte mit dem Schnellchloridmigrationstest bzw. „Rapid Chloride Migration Test“ (RCM-Test) nach BAW-Merkblatt MDCC [9].

Analog zur Druckfestigkeit werden die einzelnen Chargen (Ch.1 bis Ch.3) der untersuchten Baustellenbetone betrachtet, s. Bild 5. Auch hier zeigt sich, dass die ermittelten Chloridmigrationskoeffizienten bei allen Chargen einer Betonzusammensetzung in einer ähnlichen Größenordnung liegen.



Die Abweichungen der Druckfestigkeit und des Chloridmigrationskoeffizienten zwischen den separat hergestellten Proben und den Bauteilproben können dem Abschlussbericht entnommen werden.

Die Art des Bindemittels hat dabei einen erheblichen Einfluss auf den Chlorideindringwiderstand des Betons. Die untersuchten Transportbetone mit Portlandzement oder Portlandkalksteinzement verzeichnen die höchsten Chloridmigrationskoeffizienten und somit die geringsten Widerstände gegenüber Chloriden. Demgegenüber weisen die Betone unter Verwendung von Hochofenzement (CEM III/A) erwartungsgemäß die höchsten Chlorideindringwiderstände auf (die mit den niedrigsten Chloridmigrationskoeffizienten). Bei der Bewertung des Chloridmigrationskoeffizienten zeigten die Bauteilproben eine Abweichung von mehr als 30–50 % im Vergleich zu den separat hergestellten Proben, was auf eine wesentlich schwächere Performance im Demonstrator-Bauteil hindeutete. Dabei spielte der Einfluss der Nachbehandlungsdauer am Bauteil eine wesentliche Rolle.

Zusammenhänge zwischen den Festbetonkennwerten

Nach den derzeitigen Regelwerken wird die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken mit den Grenzwerten der Betonzusammensetzung nachgewiesen. Die Druckfestigkeit dient als Nachweis der Gleichmäßigkeit. Nachfolgend werden die Ergebnisse des Chloridmigrationskoeffizienten D_{RCM} der 28-Tage-Druckfestigkeit gegenübergestellt, s. Bild 6. Zwischen dem Chloridmigrationskoeffizienten

D_{RCM} und der Druckfestigkeit gibt es, wie in Bild 6 zu sehen, keinen Zusammenhang. Andere Faktoren stehen vielmehr im Vordergrund wie z. B. die Bindemittelart. Daher ist es umso wichtiger, die Dauerhaftigkeit des Baustoffs Beton gesondert zu bewerten. Ein Nachweis nur aufgrund der Druckfestigkeit ist nicht möglich.

Im Rahmen eines performance-basierten Konzeptes wäre die direkte Prüfung der Materialwiderstände mit einem hohen Aufwand verbunden. Um die dauerhaftigkeitsrelevanten Betoneigenschaften auf der Baustelle dennoch zuverlässig und präzise bewerten zu können, können alternativ indirekte Schnellprüfungen vorgenommen werden. Diese wären in engeren Zeitabständen durchführbar und somit auch baustellengerecht.

In Bild 7 ist daher der funktionale Zusammenhang zwischen den gemessenen Elektrolytwiderständen (Wenner-Sonde an Würfel mit 150 mm Kantenlänge, P_{W150}) und den ermittelten Chloridmigrationskoeffizienten D_{RCM} für die separat hergestellten Proben (SHP) im Alter von 28 Tagen abgebildet.

Wie die Ergebnisse zeigen, lässt sich hierbei eine Korrelation feststellen, bei der höhere Werte des Elektrolytwiderstands tendenziell mit niedrigen Chloridmigrationskoeffizienten einhergehen. Dieses Ergebnis deckt sich mit Erkenntnissen aus [10] und legt nahe, dass künftig der Elektrolytwiderstand als „Ersatzgröße“ für die Beurteilung des Chlorideindringwiderstandes von Beton verwendet werden könnte.

Chloridmigrationskoeffizient vs. Druckfestigkeit

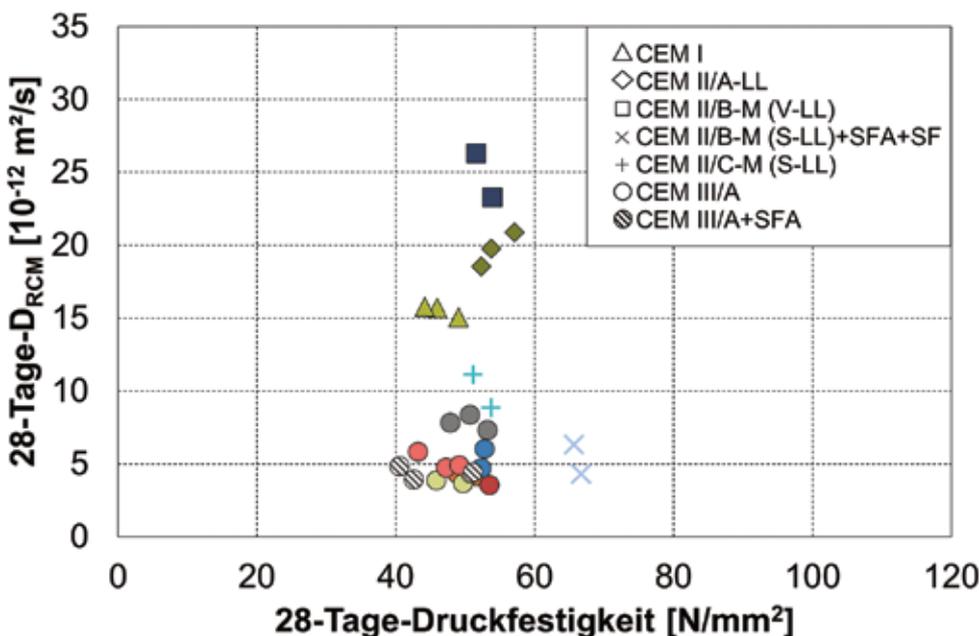


Bild 6: Chloridmigrationskoeffizient (D_{RCM}) vs. Druckfestigkeit separat hergestellter Proben im Alter von 28 Tagen, die verschiedenen Baustellen und deren einzelne Chargen sind farblich gekennzeichnet

f Chloridmigrationskoeffizient und Elektrolytwiderstand

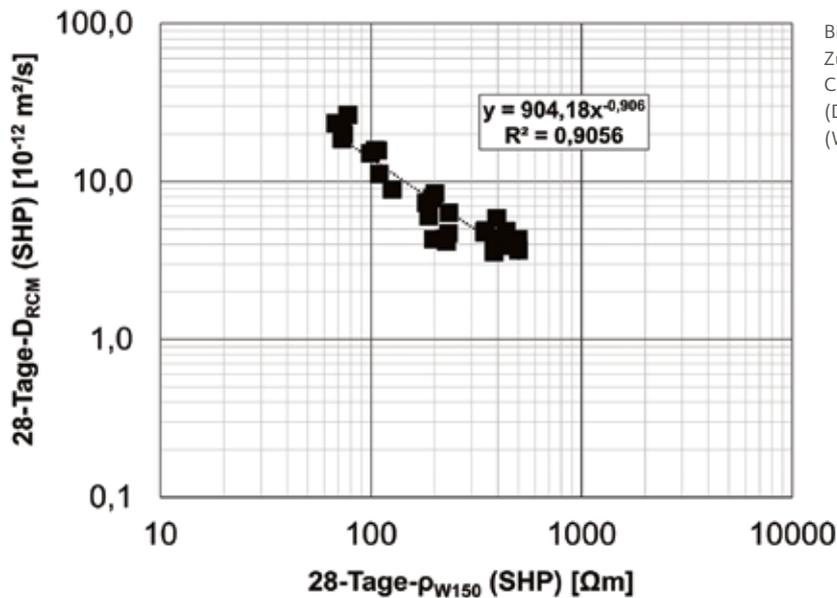


Bild 7: Funktionaler Zusammenhang zwischen Chloridmigrationskoeffizient (D_{RCM}) und Elektrolytwiderstand (Wenner) nach 28 Tagen

Bezüglich der Karbonatisierung konnte während der Untersuchungen verschiedener Betone festgestellt werden, dass Karbonatisierungsversuche unter beschleunigten Bedingungen (3,0 Vol.-%

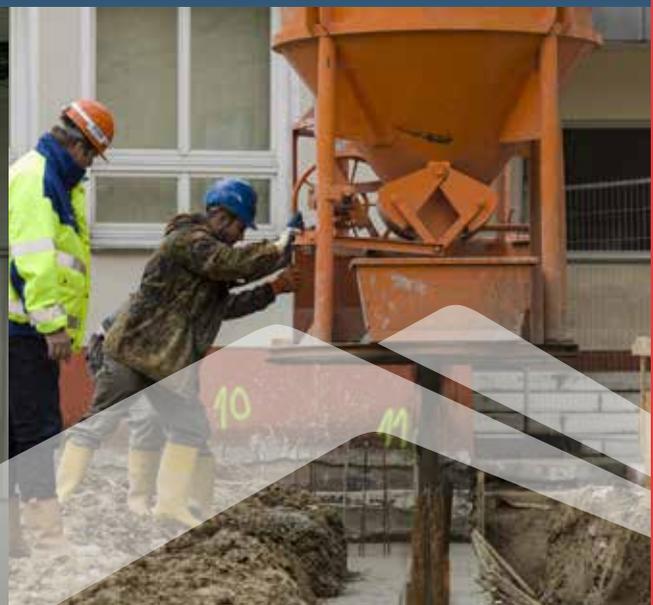
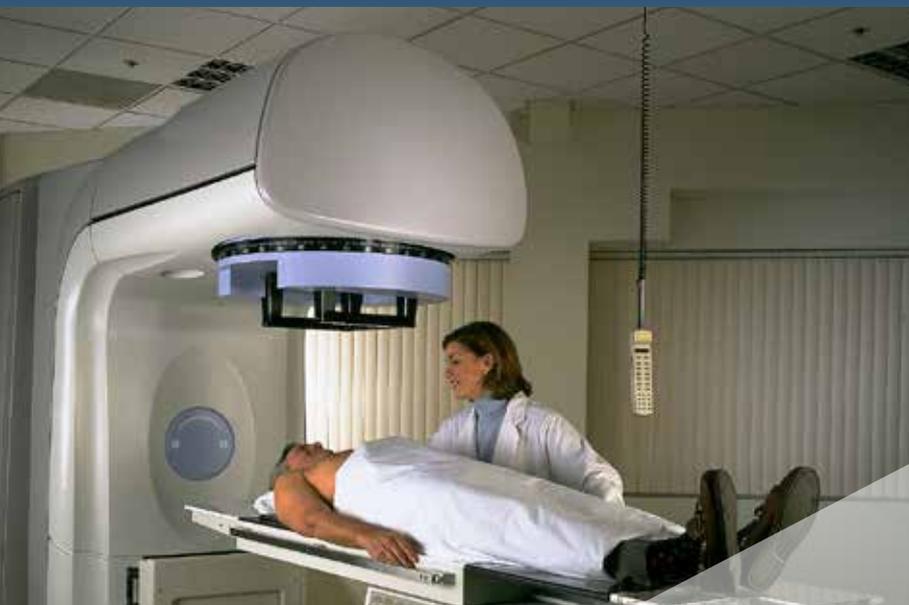
CO_2) grundsätzlich auf natürliche Bedingungen (0,05 Vol.-% CO_2) übertragen werden können, wodurch sich auch die Prüfzeit erheblich verkürzt.



LKAB Minerals

MagnaDense Beton Einsatz im Strahlenschutz

Der Einsatz von Schwerbeton mit der Gesteinskörnung MagnaDense in Krankenhäusern, Forschungseinrichtungen und zum Verpacken von Atommüll, erlaubt hohe Dichten bei gleichzeitiger Reduzierung des Betonvolumens. Wir haben eine langjährige Erfahrung mit vielfältigen Projekten in Deutschland und Europa. Für nähere Informationen schicken Sie uns eine E-Mail an minerals.germany@lkab.com.





Weitere Untersuchungsergebnisse und die einzelnen Hinweise können dem Abschlussbericht entnommen werden.

Fazit

Für dauerhafte Bauwerke ist die Qualität des eingebauten Betons von Bedeutung. Allerdings werden die dauerhaftigkeitsrelevanten Betoneigenschaften derzeit nicht direkt erfasst und bewertet, sondern indirekt über die Grenzwerte der Zusammensetzung. Für die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit nach dem Performance-Prinzip sind noch Bewertungskriterien zu definieren.

Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens konnte bei allen untersuchten Transportbetonen im Rahmen der Annahmeprüfung des gelieferten Betons festgestellt werden, dass die Abweichungen zwischen den einzelnen Chargen einer Betonzusammensetzung relativ gering sind. Dies deutete auf eine gleichmäßige Qualität der Betonherstellung bei den hier untersuchten Transportbetonen hin.

Die Ergebnisse zeigten zudem, dass die Dauerhaftigkeit nicht mit der Druckfestigkeit bewertet werden kann. Eine direkte Prüfung der dauerhaftigkeitsrelevanten Eigenschaften ist jedoch mit einem hohen Aufwand verbunden, so dass schnelle, indirekte Prüfverfahren (z. B. Wenner-Sonde) die Annahme- bzw. Abnahmeprüfung deutlich erleichtern können.

Auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse wurden im Forschungsvorhaben folglich Hinweise für die Baupraxis zur leistungsbezogenen Annahmeprüfung auf der Baustelle und Abnahmeprüfung am Bauwerk ausgearbeitet. Die einzelnen Hinweise können dem Abschlussbericht entnommen werden.

Download

Den ausführlichen Abschlussbericht zu diesem Projekt finden Sie online: www.transportbeton.org/forschung

Danksagung

Die in diesem Beitrag vorgestellten Ergebnisse sind Teil des Verbundforschungsvorhabens „Dauerhaftigkeit von Beton nach dem Performance-Prinzip“, konkret aus dem „Projekt 5: Annahmeprüfungen auf der Baustelle / Abnahmeprüfung

LITERATUR

- [1] DIN EN 206 (2021): Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; deutsche Fassung EN 206:2013+A2:2021. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [2] DIN 1045-2 (2023): Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [3] DIN EN 1992-1-1 (2011): Eurocode 2: Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken – Teil 1-1: Allgemeine Bemessungsregeln und Regeln für den Hochbau; deutsche Fassung EN 1992-1-1:2004 + AC:2010. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [4] Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e. V. (2008): Positionspapier des DAfStb zur Umsetzung des Konzepts von leistungsbezogenen Entwurfsverfahren unter Berücksichtigung von DIN EN 206 1, Anhang J. Beton- und Stahlbetonbau, Heft 12, S. 837-839.
- [5] DIN EN 12350-5 (2019): Prüfung von Frischbeton – Teil 5: Ausbreitmaß; deutsche Fassung EN 12350-5:2019. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [6] DIN EN 12350-6 (2019): Prüfung von Frischbeton – Teil 6: Frischbetonrohddichte; deutsche Fassung EN 12350-6:2019. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [7] DIN EN 12350-7 (2022): Prüfung von Frischbeton – Teil 7: Luftgehalt – Druckverfahren; deutsche Fassung EN 12350-7:2019 + AC:2022. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [8] DIN EN 12390-3 (2019): Prüfung von Festbeton – Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; deutsche Fassung EN 12390-3:2019. Beuth Verlag GmbH, Berlin.
- [9] BAW-Merkblatt (2019): Dauerhaftigkeitsbemessung und -bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC). Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe.
- [10] Gehlen, C. (2000): Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken – Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion. Dissertation, RWTH Aachen, DAfStb Heft 510, Beuth Verlag GmbH, Berlin.

am Bauwerk“ (IGF-Vorhaben Nr. 21823 N). Die Autoren danken der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. (FTB) sowie dem Projektbegleitenden Ausschuss P5 für die wertvolle Zusammenarbeit und Unterstützung im Vorhaben. ●

Das Forschungs- und Autorenteam



David Ov, Juan M. Lozano Valcarcel, Dr. Thomas Kränkel, Prof. Christoph Gehlen, Prof. Rolf Breitenbücher