

## AKTUELL

Unfallstatistik der  
Transportbetonindustrie

## BETON

Basaltbewehrungen, Carbon-  
und Gradientenbeton

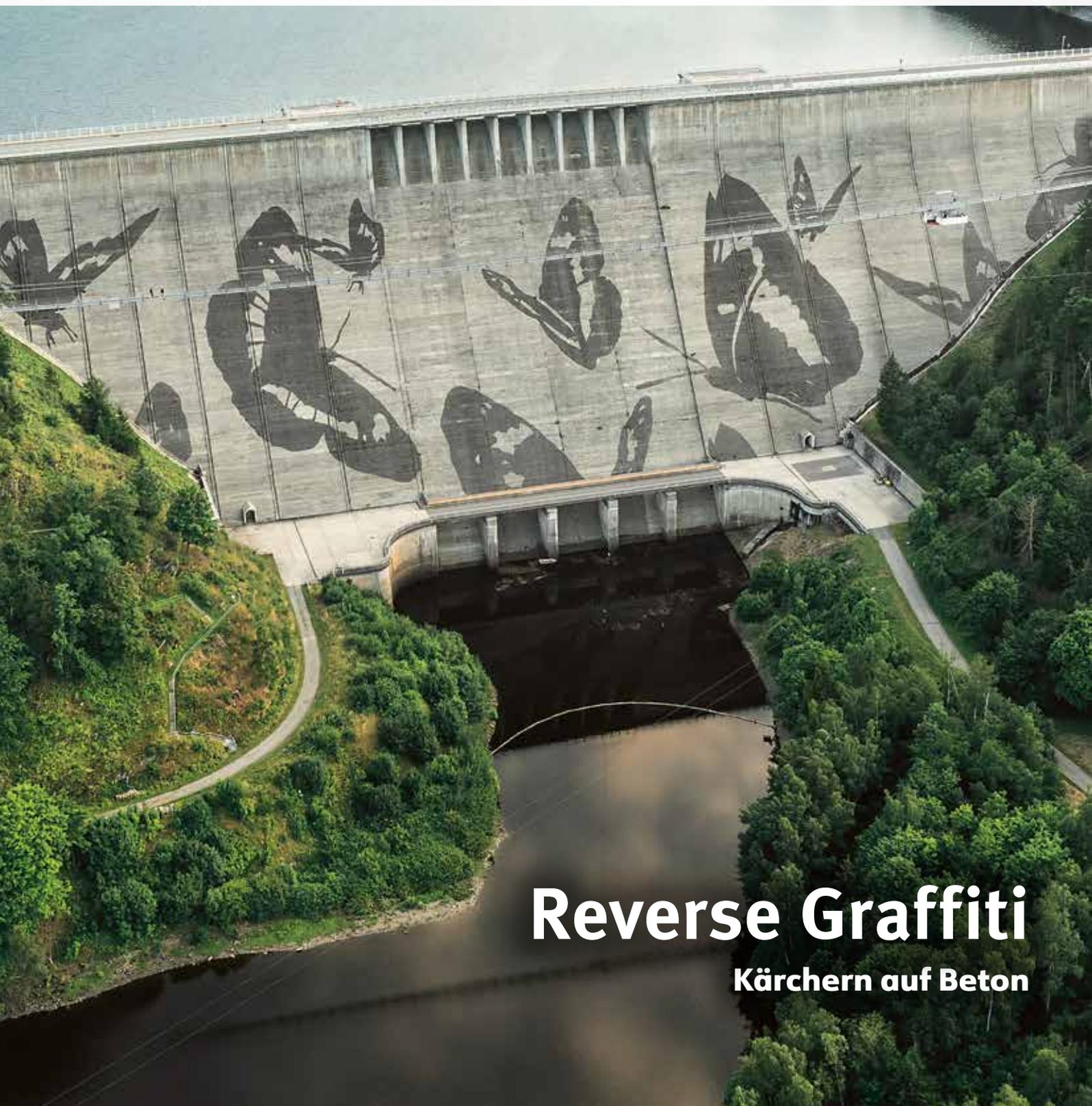
## MARKT

Historisch niedrige  
Betonproduktion

25. Jahrgang | Nr. 97 | Dezember 2024 | 4. Quartal | 6 €

# TB | iNFO

Das Transportbeton-Magazin



## Reverse Graffiti

Kärchern auf Beton

Dauerhaftigkeit von Beton nach dem Performance-Prinzip

## Forschung | Produktions- und Konformitätskontrolle

Insbesondere im Hinblick auf die nachhaltige bzw. effiziente Nutzung von Rohstoffen sowie die Verwendung bisher nicht oder wenig genutzter Ausgangsstoffe bietet ein Performance-basiertes Bemessungskonzept zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Beton Optimierungsmöglichkeiten.

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 (IGF 21826 N) der AiF-Forschungsvereinigung Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V. (FTB) die „Klassifikation der Materialwiderstände, die Produktionskontrolle (PC) sowie Konformitätskriterien und -kontrolle (CC)“ in Bezug auf die dauerhaftigkeitsrelevanten Betoneigenschaften untersucht. Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse zusammengefasst.

### Ausgangssituation

Die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken wird nach den aktuellen Normen [1–3] durch deskriptive Regelungen sichergestellt. Bei Einhaltung der Grenzwerte für die Betonzusammensetzung und die Mindestbetondeckung sowie bei sachgerechtem Einbau und Nachbehandlung des Betons gilt es als nachgewiesen, dass so hergestellte Bauteile die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit für die beabsichtigte Verwendung unter den maßgebenden Umgebungsbedingungen erfüllen und die rechnerische Lebensdauer erreichen.

Verschiedene Normungsaktivitäten, aktuell insbesondere auf nationaler Ebene wie zum Beispiel in Deutschland durch den Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb), zielen darauf ab, diese empirischen Vorgaben, insbesondere für anspruchsvolle Infrastrukturbauwerke, durch ein Performance-basiertes, also leistungsbezogenes Konzept zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Beton- und Stahlbetonbauwerken zu ergänzen. Dieses Konzept basiert auf Modellen zur Prognose der Dauerhaftigkeit von Betonbauteilen und stützt sich auf Prüfverfahren zur Beschreibung der Materialwiderstände bezogen auf die relevanten Einwirkungen. Im Zuge dessen ist eine Einteilung von Betonen in sogenannte Expositionswiderstandsklassen („Expo-

sure Resistance Classes“, ERC) vorgesehen. Diese unterscheiden sich nach Art der Einwirkung. Zu den wesentlichen Einwirkungen auf Betonbauwerke gehören die Karbonatisierung des Betons und der Chlorideintrag in den Beton. In diesem Zusammenhang sind geeignete Ansätze für die Festlegung von Betonzusammensetzungen, die Produktionskontrolle sowie die Konformitätskriterien zu entwickeln.

### Zielsetzung und Vorgehen

Für die Umsetzung des Performance-Prinzips und der damit verbundenen Einteilung von Betonen in Expositionswiderstandsklassen ist eine systematische Klassifizierbarkeit von Betonen nach ihren Eigenschaften erforderlich. Um zu beurteilen, inwieweit neben der Druckfestigkeit auch der Karbonatisierungs- und Chlorideindringwiderstand unter Variation der Ausgangsstoffe im Rahmen der Dosiergenauigkeit bei der Betonherstellung klassifizierbar sind, wurden in diesem Forschungsvorhaben Laboruntersuchungen durchgeführt. Dabei wurden folgende Parameter variiert:

- Einsatz von Zementen unterschiedlicher Art und Herkunft (Hersteller),
- Einsatz von Zementen unterschiedlicher Produktionschargen,
- Variation der Mischungszusammensetzung im Rahmen der zulässigen Dosiergenauigkeit (Wasser und Zement),
- Variation der Kornzusammensetzung sowie Art und Form der Gesteinskörnung bei gleicher Mischungszusammensetzung.

Darauf aufbauend wurde untersucht, welche Instrumente oder Prozesse verfügbar sind, um die Gleichmäßigkeit der Produktion zu steuern und die Konformität des produzierten Betons hinsichtlich einer Expositionswiderstandsklasse nachzuweisen. Dazu wurde zusätzlich zu den Laboruntersuchungen ein Beton in einem Transportbetonwerk an fünf Produktionstagen innerhalb von 3,5 Monaten hinsichtlich seines Karbonatisierungs- und Chlorideindringwiderstands

untersucht und mit einem „Laborbeton“ der gleichen Zusammensetzung verglichen.

**Versuchsumfang und -durchführung**

Für die Herstellung der Laborprobekörper wurden Ausgangsstoffe zentral beschafft, sodass alle Untersuchungen mit diesen Ausgangsstoffen durchgeführt werden konnten. Es wurden fünf Betone untersucht, dabei kamen vier Zemente zum Einsatz, siehe Tabelle 1. Der Wasserzementwert betrug jeweils 0,50 (Referenz), die Gesteinskörnung hatte eine praxisnahe Sieblinie (40 % Sand 0–2 mm, 20 % Kies 2–8 mm, 40 % Kies 8–16 mm). Zur Einstellung der Konsistenzklasse F4 wurde je nach Bedarf bis zu 1,0 M.-% v. Z. Fließmittel hinzugegeben.

Die Zemente wurden jeweils von drei Herstellern aus je drei Herstellungsladungen zur Verfügung gestellt, um den Einfluss der Zementherkunft und der Zementproduktion zu untersuchen. Die Anteile der Zementhauptbestandteile von allen Herstellern für alle Chargen waren bekannt. Diese unterschieden sich innerhalb der nach DIN EN 197-1 [4] erlaubten Grenzwerte maximal um 3 % bei CEM II/A-LL, 5 % bei CEM II/B-S und 11 % bei CEM III/A. Zur Untersuchung des Einflusses der Dosiergenauigkeit von Wasser und Zement wurde der Wasserzementwert ausgehend vom Referenzwert  $w/z = 0,50$  um  $\pm 0,05$  variiert. Dabei ist zu beachten, dass die maximalen  $w/z$ -Wert-Abweichungen vom Zielwert nach DIN 1045-2 [1] auf  $+0,02$  begrenzt sind. Bei den hier untersuchten größeren Abweichungen vom Referenzwert handelt es sich um Versuchsparameter in Laborversuchen, die unter anderem auch genutzt werden sollten, um das Verbesserungspotenzial der Betoneigenschaften durch eine  $w/z$ -Wertabsenkung zu veranschaulichen. Der Einfluss der Gesteinskörnung auf den Karbonatisierungs- und

**Verwendete Zemente**

Bezeichnung	Zementart	Zementgehalt
Z1	CEM I 42,5 R	353 kg/m <sup>3</sup>
Z2	CEM II/A-LL 42,5 N	350 kg/m <sup>3</sup>
Z2 + FA	CEM II/A-LL 42,5 N	304 kg/m <sup>3</sup> + 60 kg/m <sup>3</sup> Flugasche (k = 0,4)
Z3	CEM II/B-S 42,5 N	350 kg/m <sup>3</sup>
Z4	CEM III/A 42,5 N	348 kg/m <sup>3</sup>

Tabelle 1: Verwendete Zemente und Zementgehalte pro m<sup>3</sup> Beton

Chlorideindringwiderstand wurde durch die Verwendung von Kies (Referenz) und Splitt sowie durch die Variation der Fein- und Grobanteile im Rahmen der Dosiergenauigkeit nach DIN 1045-2:2023-08 [1] untersucht. Hierbei wurde eine Kornzusammensetzung mit erhöhtem Feinanteil in die Untersuchung einbezogen, bei der die Einwaage der Kornfraktion 0–2 mm gegenüber der Referenzsieblinie um 3,0 M.-% erhöht und die Einwaage der Kornfraktion 8–16 mm um 3,0 M.-% reduziert wurde. Umgekehrt erfolgte die Einwaageberechnung für eine Kornzusammensetzung mit erhöhtem Grobanteil. Für die Untersuchungen zum Einfluss der Gesteinskörnung wurde Beton mit CEM III/A verwendet.

Alle Versuche zur Bestimmung des Karbonatisierungswiderstands erfolgten nach DIN EN 12390-12 [5]. Der Chlorideindringwiderstand wurde auf Basis von Chloridmigrationsversuchen nach DIN EN 12390-18 [6] bestimmt. Abbildung 1 zeigt die Auswertung der beiden Versuche mittels Indikatorlösung. Aufbauend auf den etablierten Methoden zur Bestimmung des Chlorideindringwiderstands wurde während des Chloridmigrationsversuchs die Stromstärke erfasst und daraus die Spezifische Ladungsflussrate („specific charge flow rate“, SCFR) [7] bestimmt, um die Auswertung der Versuche zu optimieren. Darüber hinaus wurde der elektrolytische Widerstand der Proben >

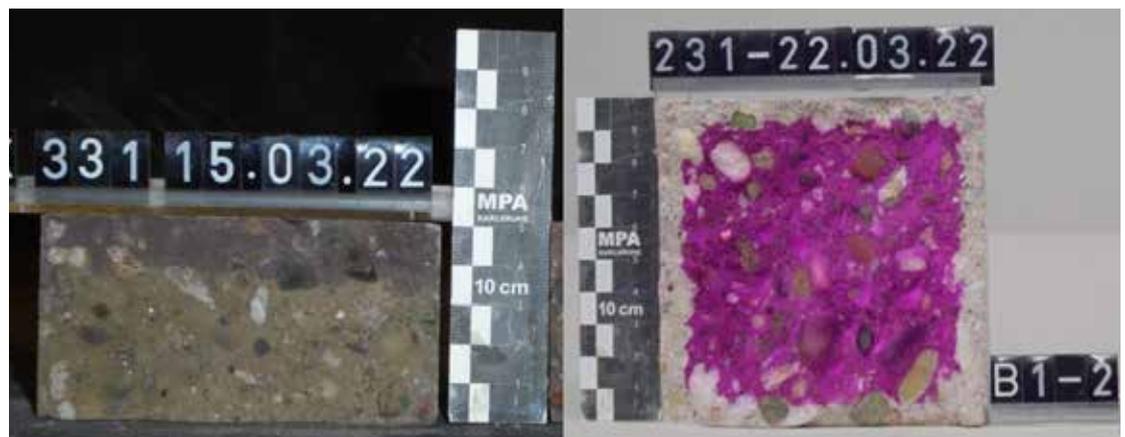


Abbildung 1: Prüfkörper zur Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten (links) und der Karbonatisierung (rechts)

## **i** Ladungsflussrate und Zementart

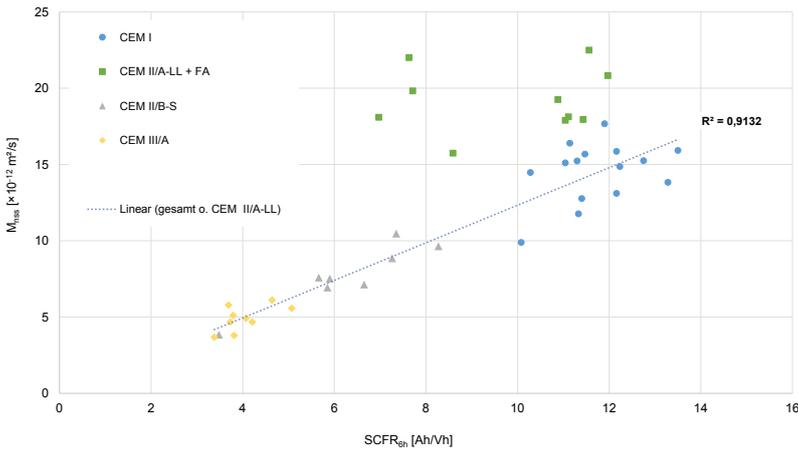


Abbildung 2: Korrelation der Spezifischen Ladungsflussrate mit den Migrationskoeffizienten  $M_{nss}$  in Abhängigkeit von der Zementart

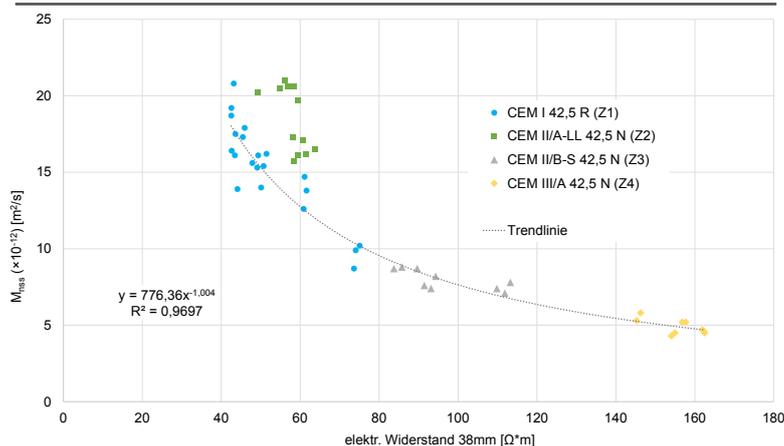
im Versuchsstand bestimmt. Begleitend dazu wurde die Druckfestigkeit der hergestellten Betone nach DIN EN 12390-3 [8] untersucht.

### Versuchsergebnisse

Die Betone mit den Zementen CEM I, CEM II/B-S und CEM III/A erreichten die Druckfestigkeitsklasse C30/37, die Betone mit CEM II/A-LL und CEM II/A-LL + FA erreichten die Druckfestigkeitsklassen C25/30 oder C30/37. Dies zeigt, dass die Druckfestigkeit abhängig von der Menge der reaktiven Zementhauptbestandteile ist, jedoch nicht grundsätzlich von der Zementart. Demgegenüber zeigen die Ergebnisse der Karbonatisierungs- und Chloridmigrationsversuche eine deutlich größere Abhängigkeit von der Zementart. Die höchsten Chloridmigrationskoeffizienten wiesen die Betone mit CEM I und CEM II/A-LL+FA auf, während die hüttensandhaltigen Zemente einen deutlich niedrigeren Chloridmigrationskoeffizienten und damit höheren Chlorideindringwiderstand aufwiesen. Die Ergebnisse der Karbonatisierungsversuche zeigten hohe Streuungen,

Abbildung 3: Korrelation des elektrischen Widerstands bei Prüfung mittels Wenner-Sonde (38 mm Sondenabstand) mit den Migrationskoeffizienten  $M_{nss}$  in Abhängigkeit von der Zementart

## **i** Elektrischer Widerstand und Zementart



dennoch konnte festgestellt werden, dass die hüttensandhaltigen Betone tendenziell einen geringeren Karbonatisierungswiderstand als die CEM I-Betone bei gleichem w/z-Wert aufwiesen. Bei der Gegenüberstellung der Chloridmigrationskoeffizienten und der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone gleicher Zementart von unterschiedlichen Herstellern konnte kein signifikanter Einfluss des Zementherstellers (Klinkerherkunft) und der Herstellungscharge festgestellt werden, sodass auch in den Regelwerken keine differenzierte Berücksichtigung der Zementherkunft und -charge erforderlich ist. Dennoch zeigten die Ergebnisse der Chloridmigrationsversuche, dass eine starke Variation der Massenanteile der Hauptbestandteile des Zements durchaus einen Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten haben kann. So wurden bei den Versuchen mit CEM III-Betonen, bei denen sich der Hüttensandgehalt um bis zu 11 % unterschied, festgestellt, dass ein erhöhter Hüttensandgehalt zu geringeren Chloridmigrationskoeffizienten führt. Nach DIN EN 197-1 [4] sind für CEM III/A Hüttensandgehalte zwischen 36 und 65 M.-% zulässig. Es ist davon auszugehen, dass die Ausnutzung dieser Variationsmöglichkeiten auch zu stärkeren Unterschieden der Dauerhaftigkeitskennwerte der Betone führt.

Die spezifische Ladungsflussrate ist ein weiterer Kennwert zur Bewertung des Chlorideindringwiderstands, der innerhalb der ersten sechs Stunden des RCM-Tests (Rapid Chloride Migration Test) bestimmt wird. Abbildung 2 zeigt die Gegenüberstellung von SCFR-Wert (Specific Charge Flow Rate) und Chloridmigrationskoeffizient. In Abhängigkeit von der Zementart bzw. der Größe des Chlorideindringwiderstands konnte für einen Teil der untersuchten Zemente eine gute Korrelation zwischen dem SCFR-Wert und dem Chloridmigrationskoeffizienten festgestellt werden. Neben dem SCFR-Wert wurde außerdem mit einer Wenner-Sonde der elektrische Widerstand einiger Betone untersucht. Die Ergebnisse zeigten in Abhängigkeit von der Zementart eine gute Korrelation mit dem Chlorideindringwiderstand (Abbildung 3). Eine Anpassung der Wasser- und Zementgehalte führte zu signifikanten Änderungen der Dauerhaftigkeitskennwerte. Eine Verringerung des w/z-Wertes führt bekanntermaßen zu einer Erhöhung der Widerstände. Daraus ergibt sich vor allem für die zukünftige Anwendung von klinkereffizienten Zementen eine zuverlässige Möglichkeit, die Betoneigenschaften zu verbessern.

Im Rahmen der Untersuchungen zum Einfluss der Gesteinskörnung konnte kein signifikanter Einfluss bei Variation der Kornzusammensetzung innerhalb der Dosiergenauigkeit nach DIN 1045-2:2023-08 [1] auf den Chloridmigrationskoeffizienten sowie auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit festgestellt werden. Gleiches gilt für die Karbonatisierungsgeschwindigkeit bei Variation der Gesteinskörnungsart Kies und Splitt. Lediglich der Chloridmigrationskoeffizient zeigte eine Abhängigkeit von den unterschiedlichen Gesteinskörnungsarten, welche sich ferner in der Sieblinie unterschieden.

Zusätzlich zu den Laboruntersuchungen wurde die laufende Produktion eines Transportbetonwerks beprobt. An fünf Herstelltagen, verteilt über einen Zeitraum von dreieinhalb Monaten (Ende März bis Mitte Juli 2022), wurden Proben entnommen und die Frisch- und Festbetoneigenschaften bestimmt. Die im Transportbetonwerk beprobte Betonsorte eines C30/37 wurde mit dem CEM III/A-Zement (Z4) nach Tabelle 1 (gleiches Lieferwerk) hergestellt. Darüber hinaus wurden Proben der Aus-



Abbildung 4:  
Transportbetonwerk;  
Anlieferung von  
Gesteinskörnung und  
Förderung in den Werksturm

gangsstoffe entnommen, um den Beton unter Laborbedingungen zu untersuchen.

Alle Mischungen aus dem Transportbetonwerk und der Laborbeton erreichten eine Anfangskonsistenz (nach 10 Minuten) von F4. Die Konsistenz zu späteren Zeitpunkten wurde von den Außentemperaturen beeinflusst. An den Mischungen aus dem Transportbetonwerk und dem Labor wurde der w/z-Wert mit dem Darr-Versuch bestimmt. Drei von fünf Mischungen aus dem Transportbetonwerk lagen genau im Zielbereich des w/z-Wertes. Zwei von fünf Mischungen aus dem >

# Beton mit hoher Dichte

MagnaDense ist eine schwere Gesteinskörnung auf Basis des natürlich vorkommenden Eisenoxids - Magnetit. Magnetit hat eine hohe Kornrohichte von 4,7 - 5,2 t/m<sup>3</sup>. Es reagiert und korrodiert im Beton nicht. Es entspricht der EN12620 & DIN 6847-2 und eignet sich für eine Vielzahl von Anwendungen, wie zum Beispiel für Beton mit hoher Dichte, Gegengewichte und im Strahlenschutz.

**St Pauli Elbe Tunnel**  
Bei der Sanierung des St. Pauli-Elbtunnels wird MagnaDense-Beton gegen hydrostatischen Auftrieb eingesetzt.  
Erfahren Sie mehr unter: [lkabminerals.com/st-pauli](http://lkabminerals.com/st-pauli) (oder QR code scannen).

**LKAB Minerals**  
[www.lkabminerals.com](http://www.lkabminerals.com)

## Chloridmigrationskoeffizienten

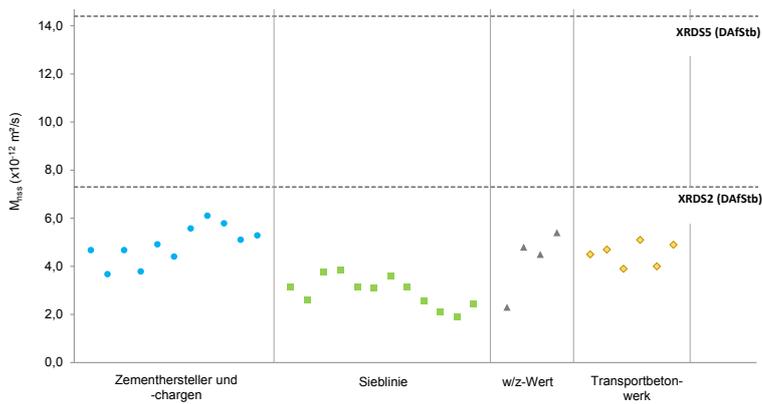


Abbildung 5: CEM III/A (Z4) – Chloridmigrationskoeffizienten der variierten Einflüsse im Labor und im TB-Werk unter Berücksichtigung der XRDS-Klassen nach der ERC-Richtlinie des DAfStb [10]

Transportbetonwerk und der Vergleichs-Laborbeton lagen etwas über dem Zielwert.

Die Druckfestigkeit der Mischungen aus dem Transportbetonwerk schwankte kaum. Der im Labor nachgestellte Beton wies eine geringere Druckfestigkeit als die Mischungen aus dem Transportbetonwerk auf. Die Bestimmung des tatsächlichen w/z-Werts unterliegt unterschiedlichen Prüf- und Umwelteinflüssen. Dennoch konnte durch die Untersuchungen aus dem laufenden Betrieb des Transportbetonwerks gezeigt werden, dass die zu erwartenden Dauerhaftigkeitseigenschaften trotz w/z-Wert-Abweichungen erreicht werden können.

### Einordnung der Versuchsergebnisse

Die Einteilung der Betone in Expositionswiderstandsklassen erfolgte basierend auf den in EN 206-100 Draft 14 [9] vorgeschlagenen Klassengrenzen und unter Berücksichtigung des Entwurfs der Richtlinie „Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken nach dem System der Expositionswiderstandsklassen“ (ERC-Richtlinie) des DAfStb (Stand August 2023) [10]. Die Versuchsergebnisse des CEM III/A-Betons sind in den Abbildungen 4 und 5 exemplarisch in Bezug auf die ERC-Klassen nach ERC-Richtlinie des DAfStb [10] dargestellt. Durch

eine Anpassung des w/z-Wertes konnte eine Verbesserung der Betone von bis zu einer XRC- bzw. XRDS-Klasse für Karbonatisierung und Chloridwiderstand erreicht werden. Alle ermittelten Chloridmigrationskoeffizienten  $M_{nss}$  sowohl der im Labor untersuchten Betone mit den verschiedenen Variationen als auch die Untersuchungen aus der Beprobung eines Transportbetonwerks, konnten in die Expositionswiderstandsklasse XRDS2 eingestuft werden (Abbildung 5).

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Transportbetone sind den Ergebnissen der Variationen im Labor in Abbildung 5 vergleichend gegenübergestellt. Vier der Mischungen aus dem Transportbetonwerk liegen im Bereich von XRC 5, eine Mischung aus dem Transportbetonwerk und der Vergleichs-Laborbeton liegen in der Klasse XRC 7 (gelb). Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone zur Untersuchung der Variation der Gesteinskörnung lagen in der Widerstandsklasse XRC5 (grün). Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone zur Untersuchung des Herkunfts- und Chargeneinflusses des Zements wiesen hohe Streuungen auf (vgl. Abb. 5) und lagen im Bereich der Widerstandsklassen XRC5 und XRC7 (blau). Die Schwankungsbreite der beiden Dauerhaftigkeitskennwerte (Chloridmigration und Karbonatisierung) der Transportbetone ist als gering einzustufen.

### Fazit

Die Einführung der Dauerhaftigkeitsbemessung von Beton nach dem Performance-Prinzip wird die Produktions- (PC) und Konformitätskontrolle (CC) bei der Betonherstellung in Bezug auf den Karbonatisierungs- und Chlorideindringwiderstand erforderlich machen. Für das bisher eingesetzte deskriptive Bemessungskonzept basieren

## Das Forschungsteam



Matthias Mohs (KIT), Katharina Röckrath (VDZ), Nils-Christian Rokoß (HCU), Christoph Langer (HCU), Dr. Stefan Kubens (VDZ), Dr. Michael Vogel (KIT), Prof. Frank Dehn (KIT), Prof. Gesa Kapteina (HCU)

Das Forschungsteam des Verbundforschungsvorhabens des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT), des Vereins Deutscher Zementwerke (VDZ) und der HafenCity Universität Hamburg (HCU)

