

Schlussbericht vom 30.04.2024

zu IGF-Vorhaben Nr. 21826 N

Thema

Dauerhaftigkeit von Beton nach dem Performance-Prinzip – Klassifikation

Materialwiderstände, Produktionskontrolle (PC), Konformitätskriterien und -kontrolle (CC)

Berichtszeitraum

01.05.2021 bis 31.10.2023

Forschungsvereinigung

Forschungsgemeinschaft Transportbeton e.V. – FTB

Kochstraße 6-7

10969 Berlin

Forschungseinrichtung(en)

Forschungseinrichtung 1 (FE 1): Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Institut für Massivbau und Baustofftechnologie

Abteilung Baustoffe und Betonbau

Gotthard-Franz-Straße 3

76131 Karlsruhe





Gefördert durch:



Forschungseinrichtung 2 (FE 2): HafenCity Universität Hamburg

Arbeitsgebiet Baustofftechnologie

Henning-Voscherau-Platz 1

20457 Hamburg

Forschungseinrichtung 3 (FE 3): VDZ Technology gGmbH

Forschungsinstitut der Zementindustrie

Toulouser Allee 71

40476 Düsseldorf

Inhaltsverzeichnis

1 Projektbeschreibung	5
1.1 Projekthintergrund	5
1.2 Ziele	6
1.3 Aufbau	7
2 Stand der Forschung und Entwicklung	17
3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse	21
3.1 Beschaffung und Charakterisierung der Ausgangsstoffe (AP 1)	21
3.1.1 Bindemittel	21
3.1.2 Gesteinskörnung	22
3.1.3 Betonzusatzstoffe	22
3.1.4 Betonzusatzmittel	23
3.2 Experimentelle Untersuchungen	23
3.2.1 Vorversuche zur Einstellung der Betonrezeptur	23
3.2.2 Versuchsrandbedingungen Chloridmigration	24
3.2.3 Versuchsrandbedingungen Karbonatisierung	27
3.2.4 Vorgehen zur statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse	30
3.2.5 Einfluss der Zementherkunft und der Zementcharge auf Chloridmigrationskoeffizienten (AS 1, FE 1)	
3.2.6 Einfluss der Zementherkunft und der Zementcharge auf Karbonatisierungsgeschwindigkeit (AS 1, FE 1)	
3.2.7 Einfluss der Zementhauptbestandteile bei Portlandkompositzementen (AS 2)	45
3.2.8 Einfluss des Zement- und des Wassergehalts (AS 3.1)	55
3.2.9 Probekörper aus Produktion in einem TB-Werk (AS 3.2)	66
3.2.10 Einfluss der Gesteinskörnung – Variation der Gesteinskörnungsart und Kornzusammensetzung (AS 4)	
3.2.11 Hydratationsgradbasierte Kennwerte	86
3.3 Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse aller Forschungseinrichtungen (AP 3	3) 90
3.3.1 Vergleichs- und Wiederholpräzision	90
3.3.2 Gemeinsame Betrachtung	90
3.4 Datenerhebung von Dauerhaftigkeitskennwerten aus der Transportbetonindustrie	93
3.5 Analyse der Instrumente der Produktions- und Konformitätskontrolle (AP 4)	94
3.6 Berichterstattung und Ergebnistransfer (AP 5)	96
4 Zusammenfassung der Ergebnisse	96
5 Empfehlungen für die Regelwerke	98

6 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der er Ergebnisse insbesondere für KMU	
7 Verwendung der Zuwendung	99
7.1 wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans) .	99
7.2 Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)	99
7.2.1 Forschungseinrichtung 1 (KIT):	99
7.2.2 Forschungseinrichtung 2 (HCU):	100
7.2.3 Forschungseinrichtung 3 (VDZ):	100
7.3 Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)	100
7.3.1 Forschungseinrichtung 1 (KIT):	100
7.3.2 Forschungseinrichtung 2 (HCU):	100
7.3.3 Forschungseinrichtung 3 (VDZ):	100
8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit	100
9 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft	101
10 Literatur	103
11 Anhang	106
11.1 Vorversuche und Frischbetoneigenschaften	106
11.2 Versuchsergebnisse zur Chloridmigration und Karbonatisierung (FE 1 und FE 3)	110
11.3 Weitere Tabellen	112
11.4 Begleituntersuchungen bei RCM-Test (FE 1)	113

1 Projektbeschreibung

1.1 Projekthintergrund

Die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken wird nach den aktuellen Normen DIN EN 1992-1-1 [1], DIN EN 206-1 [2] in Verbindung mit DIN 1045-2 [3] durch deskriptive Regelungen für die Betonzusammensetzung und die Mindestbetondeckung sichergestellt. Bei Übereinstimmung des Betons mit den Grenzwerten und bei Einhaltung der Mindestbetondeckung gilt es bei sachgerechtem Einbau und Nachbehandlung als nachgewiesen, dass das Betonbauteil die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit für die beabsichtigte Verwendung unter den maßgebenden Umgebungsbedingungen erfüllt.

Der alternative Nachweis der Dauerhaftigkeit durch leistungsbezogene Entwurfsverfahren gemäß DIN EN 206-1 [2] bzw. DIN 1045-2 [3], Absatz 5.3.3, wird bisher eher selten geführt, da er in Deutschland nur im Zusammenhang mit allgemeinen bauaufsichtlichen Zulassungen oder Europäischen Technischen Bewertungen angewendet werden darf.

Die aktuellen Aktivitäten in der europäischen Normung im Sektor "Beton/Stahlbeton" zielen darauf ab, die bisher empirisch-basierten Vorgaben zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit von Betonund Stahlbetonbauwerken – insbesondere für anspruchsvolle Infrastrukturbauwerke (Brücken, Tunnel) – durch ein Performance-basiertes Konzept abzulösen. Die Basis eines solchen Konzepts bilden Modelle zur Prognose der Dauerhaftigkeit von Bauwerken über die geplante Lebensdauer und Prüfverfahren zur Beschreibung der Materialwiderstände bezogen auf die relevanten Einwirkungen. Der von der Arbeitsgruppe CEN/TC 250/SC 2/WG 1/TG 10 erarbeitete Entwurf für den Abschnitt "Dauerhaftigkeit" der zukünftigen EN 1992-1-1 sieht eine Einteilung von Betonen in Widerstandsklassen ("Exposure Resistance Classes") vor, die nach der Art der Einwirkung differenziert werden (Karbonatisierung, Chlorideindringung, Frost-Tau-Beanspruchung usw.). Die Zuordnung eines Betons zu einer bestimmten Widerstandsklasse erfolgt schlussendlich jeweils national, d. h. in Deutschland in DIN 1045-2 auf der Basis der DIN EN 206-1. In diesem Zusammenhang müssen geeignete Ansätze für die Festlegung von Betonzusammensetzungen, die Produktionskontrolle und die Konformitätskriterien entwickelt werden.

Auf Basis des aktuellen Wissensstands zu den Dauerhaftigkeitseigenschaften von Betonen ist eine sichere und gleichermaßen wirtschaftliche Differenzierung von Betonen in Widerstandsklassen nicht ohne weiteres möglich. Offene Fragen bestehen zum Beispiel bzgl. der Streuung der Materialkennwerte von Betonen mit gleichen Zementarten unterschiedlicher Herkunft bei gleicher Mischungszusammensetzung sowie bei der Produktion einer Betonsorte über einen längeren Zeitraum. Es muss überprüft werden, ob die Materialkennwerte in Abhängigkeit der Betonzusammensetzung systematisch klassifizierbar sind. Darauf aufbauend müssen Instrumente bzw. Verfahrensanweisungen entwickelt werden, um die Gleichmäßigkeit der Produktion hinsichtlich "Dauerhaftigkeitsperformance" zu steuern (production control, PC) sowie die Konformität der Produktion hinsichtlich einer Widerstandsklasse nachzuweisen (conformity control, CC).

Im Hinblick auf die praktische Umsetzung des Performance-basierten Dauerhaftigkeitskonzepts muss ein System entwickelt werden, mit dem die Vorteile des Konzepts für alle Beteiligten effizient nutzbar werden. Insbesondere im Hinblick auf die nachhaltige bzw. effiziente Nutzung von Rohstoffen sowie die Nutzung bisher nicht oder wenig genutzter Ausgangsstoffe bietet ein Performance-basiertes Konzept Optimierungsmöglichkeiten, da verfügbare Ausgangsstoffe ohne Grenzwerte für die Mischungszusammensetzung so kombiniert werden können, dass Betone die

erforderliche "Dauerhaftigkeitsperformance" möglichst exakt erreichen. Dieser Aspekt kann gleichzeitig zu einer erhöhten Wirtschaftlichkeit und Qualität der Betonbauweise beitragen.

1.2 Ziele

Transportbetonhersteller, Betonfertigteilwerke und bauausführende Firmen sind in Deutschland zu großen Teilen kleine oder mittelständische Unternehmen (KMU). Die Einführung eines neuen, Performance-basierten Dauerhaftigkeitskonzepts bedeutet für KMU zunächst einen erhöhten Organisationsaufwand mit Blick auf eine mögliche Umstellung von Betonzusammensetzungen, die Einführung neuer Prüfungen zur Produktionskontrolle, die damit verbundene Schulung der Mitarbeiter u.v.m. Durch die Bereitstellung und die praxisgerechte Aufbereitung von Forschungsergebnissen können aber insbesondere KMU im Bereich der Produktion von Transportbeton und Betonfertigteilen bei der Umstellung der bisherigen Vorgehensweise auf ein neues, Performancebasiertes Dauerhaftigkeitskonzept unterstützt werden. Darüber hinaus bietet die Umsetzung des Konzepts Herstellern von Transportbeton und Betonfertigteilen technische und wirtschaftliche Optimierungsmöglichkeiten in der Rezepturgestaltung. So können beispielsweise lokal verfügbare Ausgangsstoffe in einer optimierten Betonzusammensetzung gezielt so eingesetzt werden, dass die geforderte Performance erreicht wird. Nachweise der individuellen Leistungsfähigkeit einzelner Hersteller und ein Angebot von "maßgeschneiderten" Betonen bzw. Betonfertigteilen bieten zudem Möglichkeiten für eine stärkere Kundenbindung.

In Bezug auf die Nachhaltigkeit der Betonbauweise und die Nutzung von Ausgangsstoffen, für die bisher keine oder wenige Erfahrungen vorliegen, bietet ein Performance-basiertes Konzept nicht nur den am Baugeschehen beteiligten Unternehmen Vorteile, sondern auch einen Nutzen im gesamtgesellschaftlichen Kontext.

Die Ergebnisse des Vorhabens sollen dazu beitragen, eine praxisgerechte Umsetzung des Performance-basierten Dauerhaftigkeitskonzepts in Deutschland zu ermöglichen.

Die Untersuchungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens hatten zum Ziel, die Frage nach der systematischen Klassifizierbarkeit der Materialkennwerte (Karbonatisierungs- und Chlorideindringwiderstand) in Abhängigkeit der Mischungszusammensetzung zu beantworten. Auf Basis eines umfangreichen Prüfprogramms sollte für zwei ausgewählte, standardisierte Prüfverfahren (Karbonatisierung nach DIN EN 12390-12 [4] und Chloridmigration nach DIN EN 12390-18 [5]) untersucht werden, wie stark die Materialkennwerte unter Einfluss der folgenden Parameter varieren:

- Einsatz einer Zementart unterschiedlicher Herkunft
- Einsatz einer Zementart 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

Darüber hinaus war zu untersuchen, welche Instrumente oder Prozesse verfügbar sind, um die Gleichmäßigkeit der Produktion zu steuern (production control, PC) und die Konformität der Produktion hinsichtlich einer Widerstandsklasse nachzuweisen (conformity control, CC).

Die Untersuchungsergebnisse dienten der Ableitung von "deemed to satisfy rules" für die Sicherstellung der Dauerhaftigkeit auf der Grundlage eines Performance-basierten Ansatzes.

1.3 Aufbau

Die Bearbeitungsschritte waren in fünf Arbeitspakete (AP) zusammengefasst:

- AP 1: Beschaffung und Charakterisierung der Ausgangsstoffe
- AP 2: Durchführung experimenteller Untersuchungen (untergliedert in vier Arbeitsschritte AS 1 - AS 4)
- AP 3: Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse
- AP 4: Analyse der Instrumente der Produktions- und Konformitätskontrolle
- AP 5: Berichterstattung und Ergebnistransfer

Die Struktur des Forschungsvorhabens ist in Abbildung 1 dargestellt. Die einzelnen Arbeitsschritte werden nachfolgend erläutert.

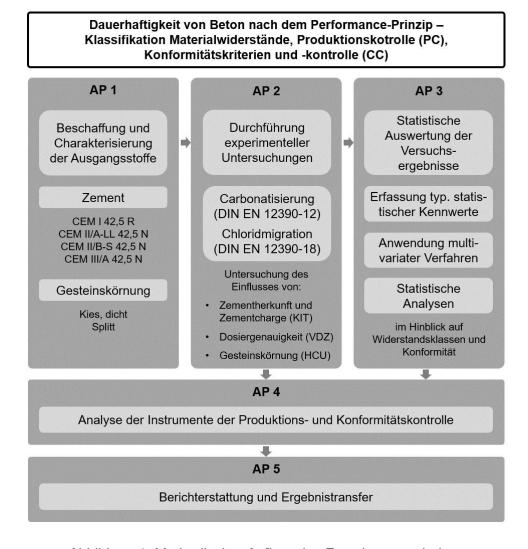


Abbildung 1: Methodischer Aufbau des Forschungsvorhabens

AP 1: Beschaffung und Charakterisierung der Ausgangsstoffe

Im Vorfeld der experimentellen Untersuchungen, die im zweiten Arbeitspaket anstehen, wurden ausgewählte Ausgangsstoffe (Zemente, Gesteinskörnungen) beschafft und an die beteiligten Forschungseinrichtungen verteilt. Angelehnt an das Vorgehen im Projekt 3 des DAfStb-Verbundforschungsvorhabens (AiF 21835) wurden die folgenden vier Zementarten verwendet:

- CEM I 42,5 R
- CEM II/A-LL 42,5 N
- CEM II/B-S 42,5 N
- CEM III/A 42,5 N

Die Auswahl bzw. Festlegung dieser Zementarten erfolgte

- vor dem Hintergrund des aus der Fachliteratur bekannten Zementeinflusses auf die Karbonatisierung und den Chlorideindringwiderstand von Beton sowie
- 2. unter der Maßgabe, dass die Bereitstellung der Zemente nach Art und Umfang über die Projektlaufzeit möglich war.

Im Laufe der Projektbearbeitung wurde zudem anhand einer weiterführenden Recherche durch die beteiligten Forschungseinrichtungen in Kooperation mit der Forschungsvereinigung (FTB) überprüft, welche Zementarten unter besonderer Berücksichtigung der CO₂-Emissionen und des Klimawandels in Zukunft für die Baupraxis relevant sein werden. Auf Basis dieser Recherche wurden drei innovative Zemente (CEM II/C-M (S-LL), CEM V/A (S-P), CEM X 35K-45LL-20S) zur Ermittlung der relevanten Dauerhaftigkeitskennwerte (Chloridmigrationskoeffizient, inverser Karbonatisierungswiderstand) ausgewählt. Die erstgenannten, vier Zementarten wurden von Zementherstellern bezogen, die in der Lage waren, jene Zementarten innerhalb eines Lieferwerks unter Verwendung des gleichen Portlandzementklinkers zur Verfügung zu stellen. Dieses Kriterium wurde gemäß Recherche der Forschungseinrichtung 1 (FE 1) von den drei Herstellern erfüllt, deren Zemente im Forschungsvorhaben verwendet wurden.

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurden die Zemente von diesen Zementherstellern bezogen. Die für die experimentellen Untersuchungen (AP 2) einzusetzenden Zemente werden je Zementart, -hersteller und -charge hinsichtlich ihrer chemisch-mineralogischen Eigenschaften charakterisiert.

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der Gesteinskörnung wurde sowohl natürlich gerundete Gesteinskörnung (Kies) als auch gebrochene Gesteinskörnung (Splitt) eingesetzt. Begleituntersuchungen zur Charakterisierung der Gesteinskörnung (Kornrohdichte, Wasseraufnahme, Anteil der abschlämmbaren Bestandteile) wurden im Rahmen der experimentellen Untersuchungen (AP 2) durchgeführt.

AP 2: <u>Durchführung der experimentellen Untersuchungen</u>

Zur Untersuchung der systematischen Klassifizierbarkeit der relevanten Dauerhaftigkeitskennwerte (Karbonatisierungs- und Chlorideindringwiderstand) wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm aufgestellt, das sich in vier Arbeitsschritte (AS) untergliederte. Die Versuchsplanung erfolgte in enger Abstimmung aller Projektbeteiligten im Hinblick auf die statistische Auswertung der Versuchsdaten (u. a. durch Festlegung der Stichprobenumfänge und Versuchswiederholungen) und die abschließende Identifizierung geeigneter Instrumente für die Produktions- und Konformitätskontrolle.

Im AS 1 wurde durch die Forschungseinrichtung 1 (KIT) untersucht, ob eine Variation der Zementherkunft und der Zementchargen bei gleichbleibender Zementart einen quantifizierbaren bzw. signifikanten Einfluss auf die Materialkennwerte hat.

Im AS 2 untersuchte die Forschungseinrichtung 3 (VDZ), inwiefern ein Austausch der im AS 1 verwendeten Zemente (Z1 bis Z4) gegen zukunftsrelevante klinkerreduzierte Zemente wie Portlandkompositzement CEM II/C-M, Kompositzement CEM V/A und Experimentalzement CEM X 35K-45LL-20S die Materialkennwerte verändert.

Außerdem beleuchtete die Forschungseinrichtung 3 (VDZ) im AS 3 den Einfluss der Dosiergenauigkeit (für Wasser und Zement) unter Einhaltung der Einwaagetoleranzen nach DIN 1045-2 [3]. Diese Untersuchungen wurden sowohl im Labor (gezielte Änderung des w/z-Werts) als auch durch Beprobung im Transportbetonwerk durchgeführt.

Die Forschungseinrichtung 2 (HCU) hat den Einfluss der Variation der Kornzusammensetzung ausgehend von einer typischen Sieblinie innerhalb der zulässigen Grenzabweichungen (Variation innerhalb einer Betonsorte) untersucht. Ferner wurde der Einfluss der Gesteinskörnungsart (Kies/Splitt) berücksichtigt, da hier ein quantifizierbarer Einfluss zu erwarten war. Diese Untersuchungen erfolgten im AS 3.

Den experimentellen Untersuchungen lagen europäisch genormte Prüfverfahren zugrunde. Die Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten erfolgte nach DIN EN 12390-18 [5], die Bestimmung des Karbonatisierungswiderstands nach DIN EN 12390-12 [4]. In beiden Fällen handelte es sich um Schnellprüfverfahren, deren Reproduzierbarkeit im Rahmen des Projekts 3 überprüft wurde. Der Chloridmigrationstest (RCM-Test) nach DIN EN 12390-18 wurde an drei Betonscheiben (Durchmesser: 100 mm, Höhe: 50 mm) je Prüfserie durchgeführt, die – unter Einfluss eines elektrischen Felds – einseitig mit einer 5 %igen NaCl-Lösung beaufschlagt wurden. Im Zuge der Schnellkarbonatisierungsprüfung nach DIN EN 12390-12 wurden zwei prismenförmige Betonprüfkörper (Kantenlänge: 100 mm) je Prüfserie und Auswertezeitpunkt über einen Zeitraum von bis zu 70 Tagen einer CO₂-Konzentration von 3 Vol.-% ausgesetzt.

Während sich das Prüfprozedere der Karbonatisierungsuntersuchungen im Rahmen dieses Forschungsvorhabens strikt an die Vorgaben der DIN EN 12390-12 hielt, wurde das Prüfprozedere der Chloridmigrationsuntersuchungen nach DIN EN 12390-18 um die Ladungsmessung nach Stengel et al. [6] erweitert. Diese Methode ermöglicht eine Alternative zur indikativen und damit fehleranfälligen Auswertung des RCM-Tests.

AS 1: Einfluss Zementherkunft und Zementcharge

Im Arbeitsschritt 1 des zweiten Arbeitspakets wurde mit den vier Zementarten (Z1 bis Z4) jeweils sowohl der Einfluss einer variierenden Zementherkunft (H1 bis H3) als auch der Einfluss variierender Zementchargen bei gleichbleibender Herkunft (Ch1 bis Ch3) untersucht. Die experimentellen Untersuchungen dieses Arbeitsschrittes wurden von der Forschungseinrichtung 1 (KIT) durchgeführt. Die Mischungszusammensetzungen, das Prüfprozedere und der resultierende Probenumfang sind in Abbildung 2 zusammengefasst und werden nachfolgend erläutert.

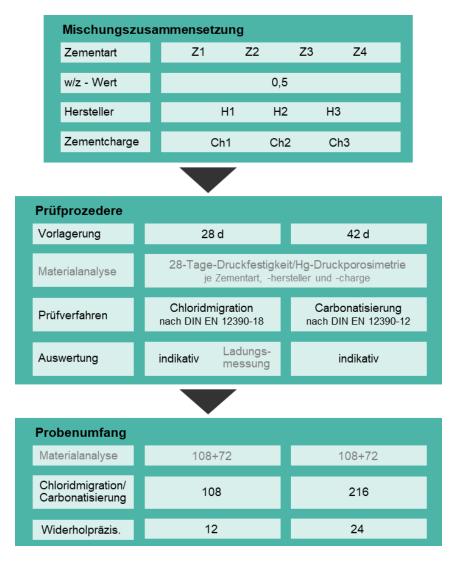


Abbildung 2: Prüfmatrix des AS 1

Das Versuchsprogramm in Abbildung 2 basiert auf vier Betonrezepturen, die sich ausschließlich in der Zementart unterscheiden (Wasserzementwert und Sieblinie sind konstant):

- Z1: CEM I 42,5 R (Referenzzement)
- Z2: CEM II/A-LL 42,5 N
- Z3: CEM II/B-S 42,5 N
- Z4: CEM III/A 42,5 N

Zur Interpretation der Versuchsergebnisse wurden je Zementart, -hersteller und -charge begleitende Materialanalysen (Druckfestigkeitsprüfung an drei Betonwürfeln, Hg-Druckporosimetrie am Betongranulat) durchgeführt.

Damit ergab sich ein Probenumfang von 108 zylindrischen Betonscheiben für die Chloridmigrationsuntersuchungen sowie 12 Probekörpern für die Bestimmung der Wiederholpräzision im Rahmen einer 5-fach-Bestimmung, die an einem Referenzbeton durchgeführt wurde. Für die Karbonatisierungsuntersuchungen wurden durch die Kombination der zu untersuchenden Parameter und jeweils drei Zeitpunkten (7, 28, 70 Tage) 216 Untersuchungsergebnisse erzielt. Diese wurden zur Ermittlung der Wiederholpräzision durch weitere vier Wiederholungen des Prüfverfahrens an

einem Referenzbeton ergänzt. Je Prüfverfahren waren zusätzlich 108 Betonwürfel zur Bestimmung der 28-Tage-Druckfestigkeit und 72 Betongranulatproben für quecksilberdruckporosimetrische Untersuchungen herzustellen.

AS 1.1: Variation der Zementherkunft

Zur Untersuchung des Einflusses einer variierenden Zementherkunft wurden die Zementarten Z1 bis Z4 von drei unterschiedlichen Zementherstellern H1 bis H3 bezogen. Wie bereits unter Arbeitsschritt 1 beschrieben, erfolgte die Wahl der Zementhersteller unter der Maßgabe, dass je Hersteller und Lieferwerk alle vier Zementarten Z1 bis Z4 verfügbar sind. Auf diese Weise konnte sichergestellt werden, dass der Portlandzementklinker jeweils übereinstimmt.

AS 1.2: Variation der Zementcharge

In einem weiteren Bearbeitungsschritt wurde der Einfluss des Produktionszeitraums untersucht, indem je Zementart und je Lieferwerk unterschiedliche Lieferchargen eingesetzt wurden. Zwischen den einzelnen Zementlieferungen mussten unterschiedliche Zeitspannen liegen. Im Rahmen dieses Teilschritts werden je Zementart und je Lieferwerk drei Zementchargen (Ch1 bis Ch3) berücksichtigt.

AS 2: Einfluss der Zementhauptbestandteile bei Portlandkompositzementen

Die Auswahl der Zemente für die Untersuchungen im AS 1 beschränkte sich auf Zementarten, die in den letzten Jahren häufig im Hoch- und Ingenieurbau eingesetzt wurden. Mit Blick auf die zukünftige Rohstoffverfügbarkeit und vor dem Hintergrund der weiteren Minimierung der CO2-Emissionen bei der Zementherstellung ist anzunehmen, dass zukünftig andere Zementarten verstärkt angewendet werden, darunter insbesondere Portlandkompositzement CEM II/C-M. Im Arbeitsschritt 2 sollte untersucht werden, inwieweit sich die Materialkennwerte der in AS 1 untersuchten Betone verändern, wenn ein Austausch des Zements gegen Portlandkompositzement CEM II/C-M, Kompositzement CEM V/A und Experimentalzement CEM X 35K-45LL-20S vorgenommen wird. Dieser Teil des Versuchsprogramms wurde von der Forschungseinrichtung 3 (VDZ) bearbeitet. Die genaue Festlegung der Zemente erfolgte auf Basis der Recherche im Arbeitspaket 1. Geplant war die Auswahl von drei Zementen, mit denen drei Betone hergestellt wurden, die bis auf die Zementart die gleiche Zusammensetzung wie im AS 1 aufwiesen. An den Betonen wurden der Karbonatisierungswiderstand nach DIN EN 12390-12 [4], der Chloridmigrationskoeffizient nach DIN EN 12390-18 [5] sowie die Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen bestimmt. Des Weiteren wurden die hydratationsgradbasierten Kennwerte der Zemente zur Beschreibung der Dauerhaftigkeit analog zu [7] bestimmt.

AS 3: Einfluss Dosiergenauigkeit

Im Arbeitsschritt 3 des Versuchsprogramms wurde der Einfluss von Variationen in einer Betonzusammensetzung bedingt durch die Dosierung der einzelnen Ausgangsstoffe untersucht. Dieser Teil des Versuchsprogramms wurde von der Forschungseinrichtung 3 (VDZ) bearbeitet. Die in Abbildung 3 skizzierte Versuchsmatrix basierte zum einen auf den vier Betonrezepturen (Referenzbetone), die auch im AS 1 verwendet wurden und sich ausschließlich in der Zementart unterscheiden (AS 3.1). Des Weiteren sollte durch die mehrfache Beprobung eines Betons in einem Transportbetonwerk die bei der laufenden Produktion zu erwartenden Veränderungen der Materialkennwerte untersucht werden (AS 3.2).

An allen Betonen wurden (analog zum AS 2) der Karbonatisierungswiderstand nach DIN EN 12390-12, der Chloridmigrationskoeffizient nach DIN EN 12390-18 sowie die Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen bestimmt. Begleitend wurden die hydratationsgradbasierten Kennwerte der Zemente zur Beschreibung der Dauerhaftigkeit analog zu [7] bestimmt.



Abbildung 3: Prüfmatrix des AS 3

AS 3.1: Variation des Zement- und des Wassergehaltes

Die folgenden möglichen Ursachen für Variationen in der Betonzusammensetzung sollten durch die Untersuchungen im Arbeitsschritt 3.1 abgedeckt werden:

- Variation des Zementgehalts zur Aussteuerung der Frisch- und Festbetoneigenschaften (± 15 kg/m³ zulässig gemäß DIN 1045-2 [3], Abschnitt 9.2)
- Toleranzen für das Dosieren der Ausgangsstoffe Wasser und Zement (± 3 M.-% der erforderlichen Menge gemäß DIN 1045-2, Abschnitt 9.7)
- Variationen des Wassergehalts durch Unsicherheiten bei der Bestimmung der Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung

Ausgehend von den vier zuvor definierten Referenzbetonen (eine Referenzzusammensetzung mit vier unterschiedlichen Zementarten) wurden die Mengen von Zement und Wasser je m³ Beton gezielt variiert. Es wurden jeweils die definierte Referenzzusammensetzung sowie zwei Variationen betrachtet:

- Variation V1: Verringerter Zementgehalt und erhöhter Wassergehalt
 (→ erhöhter w/z-Wert)
- Variation V2: Erhöhter Zementgehalt und verringerter Wassergehalt
 (→ verringerter w/z-Wert)

Daraus ergaben sich vier Referenzbetone und acht Variationen, d. h. 12 Versuchsreihen. An einem Referenzbeton wurde zudem eine 5-fach-Bestimmung durchgeführt, um gemeinsam mit den Forschungseinrichtungen 1 und 2 Daten zur Präzision der Prüfverfahren zu erarbeiten. Damit ergaben sich in AS 2.1 16 Versuchsreihen.

Die maximal zulässigen w/z-Wert Schwankungen einer Rezeptur liegen nach DIN 1045-2, Tabelle 25, bei \pm 0,02. Durch ausreizen der Dosiergrenzen nach DIN 1045-2 wird eine maximale Schwankung von \pm 0,05 erzielt. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen werden hinsichtlich ihrer zulässigen und maximalen Abweichungen analysiert.

AS 3.2: Probekörperherstellung aus laufender Produktion in einem TB-Werk

Durch die Untersuchung von Proben aus der laufenden Produktion eines Transportbetonwerks sollten weitere Informationen zur potentiellen Schwankungsbreite der Dauerhaftigkeitskenngrößen gewonnen werden. Hierfür wurden zu mehreren Zeitpunkten Probekörper einer Betonsorte direkt im Transportbetonwerk hergestellt. Die Auswahl der Betonsorte und des Transportbetonwerks erfolgte in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss unter Berücksichtigung typischer Expositionsklassenkombinationen und einer ausreichend geringen Entfernung zwischen Transportbetonwerk und Forschungseinrichtung. Durch die mehrfache, zeitversetzte Beprobung einer Betonsorte wurden sowohl Einflüsse aus der Dosierung der Ausgangsstoffe als auch aus Chargenwechseln der Ausgangsstoffe in die Untersuchungen einbezogen. Parallel wurden Proben der Ausgangsstoffe entnommen und im Labor charakterisiert sowie der Wassergehalt des Frischbetons durch Darren bestimmt. Im Labor wurde aus den Proben der Ausgangsstoffe von einem Zeitpunkt Beton hergestellt, um einen Vergleich zwischen den im Labor und den im Transportbetonwerk hergestellten Probekörpern zu ermöglichen. Daraus ergaben sich sechs weitere Versuchsreihen (5x aus Transportbetonwerk, 1x aus Laborherstellung).

AS 4: Einfluss Gesteinskörnung (GK)

Im Arbeitsschritt 4 wurde der Einfluss einer variierenden Korngrößenverteilung auf den Karbonatisierungs- und den Chlorideindringwiderstand untersucht. Darüber hinaus wurde der Einfluss un-

terschiedlicher Gesteinskörnungsarten (Kies, Splitt) auf die zu prüfenden Materialwiderstände erfasst. Dieser Teil des Versuchsprogramms wurde von der Forschungseinrichtung 2 (HCU) bearbeitet.

AS 4.1: Variation der Kornzusammensetzung

Die Kornzusammensetzung wurde, ausgehend von einer praxisrelevanten Kornzusammensetzung, innerhalb der zulässigen Dosiergenauigkeit bei der Einwaage (vgl. Regelanforderungen nach DIN EN 1045-2) variiert.

Ausgehend von einer mit dem projektbegleitenden Ausschuss abgestimmten Kornzusammensetzung wurde diese so variiert, dass der feine Anteil der groben Gesteinskörnung (im folgenden "GK") innerhalb der vorgegebenen Grenzen zur Dosiergenauigkeit maximal (GK_{fein}) bzw. minimal (GK_{grob}) wurde. Die Konsistenz war ggf. durch Fließmittel so anzupassen, dass eine ausreichende, mit den anderen Betonen vergleichbare Verarbeitbarkeit gegeben war. Um eine repräsentative Strichprobe zu erhalten und vor dem Hintergrund der vorhandenen Laborkapazitäten, wurden die Untersuchungen zur Gesteinskörnungsvariation zunächst an Betonmischungen mit jeweils einem Zement durchgeführt. Die Auswahl dieser beiden Zemente (für die Expositionsklasse XC und XD/XS) aus den vier Zementen (Z1 bis Z4) dieses Projekts erfolgte in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss.

- Variation V 4.1: GK_{fein} –
 feiner Anteil der GK innerhalb der Regelanforderung möglichst maximal
 → erhöhte GK-Oberfläche
- Variation V 4.2: GK_{grob} –
 feiner Anteil der GK innerhalb der Regelanforderung möglichst minimal
 → reduzierte GK-Oberfläche

In einer weiteren Untersuchungsreihe sollte der maximale Einfluss der Gesteinskörnung auf die dauerhaftigkeitsrelevanten Kennwerte erfasst werden. Die Untersuchungen fokussierten sich hierbei auf den Chloridmigrationskoeffizienten, da in früheren Untersuchungen ein gewisser Einfluss der Gesteinskörnungsart auf diesen Kennwert festgestellt wurde [8].

AS 4.2: Variation der Art der Gesteinskörnung

Um den Einfluss der Art der Gesteinskörnung auf die dauerhaftigkeitsrelevanten Kennwerte zu erfassen, wurde neben der Referenzgesteinskörnung (Kies, hier GK1) auch Splitt (hier GK2) eingesetzt. Zur Wahrung eines ausreichend großen Stichprobenumfangs und vor dem Hintergrund der vorhandenen Laborkapazitäten, wurden auch diese Untersuchungen mit jeweils einem Zement durchgeführt. Die Auswahl der Zemente ist in AS 4.1 beschrieben.

Zusammenfassung Prüfprogramm AS 4.1 und AS 4.2

Da zum Einfluss der Gesteinskörnung bisher keine systematischen Untersuchungen vorlagen und der Stichprobenumfang bei Beprobung aller Zemente kapazitätsbedingt relativ klein wäre, wurde im Rahmen dieses Arbeitsschritts jede Variation doppelt beprobt.

Darüber hinaus war für die Bestimmung der Wiederholpräzision eine 5-fach-Bestimmung an einem Referenzbeton durchzuführen. Da im Rahmen dieses Arbeitsschritts ausgesuchte Zemente

im Zusammenhang mit der Gesteinskörnungsvariation untersucht wurden, wurde die 5-fach-Bestimmung, anders als in den Arbeitsschritten AS 1 und AS 3, nicht ergänzend, sondern als komplette 5-fach-Prüfung für die beiden Materialkennwerte geplant.

Aus den in den Arbeitsschritten 4.1 und 4.2 beschriebenen Prüfprogrammen ergab sich die folgende Prüfmatrix in Hinblick auf den Karbonatisierungswiderstand nach DIN EN 12390-12 [4] und den Chloridmigrationskoeffizient nach DIN EN 12390-18 [5], vgl. Abbildung 4.

Untersuchungen	Kornzusammensetzung/ Art der Gesteinskörnung		Kornzusammensetzung/ Art der Gesteinskörnung		Wiederhol- präzision
	XC Expositionsklassenzement [*]		XD, Expositionskla		CEMI
Chloridmigrations- koeffizient (DIN EN 12390-18)			GK1 _{Grob} (2) GK1 _{Mitte} (2) GK1 _{Fein} (2)	GK2 _{Grob} (2) GK2 _{Mitte} (2) GK2 _{Fein} (2)	GK1 _{Mitte} (10)
Karbonatisierungs- widerstand (DIN EN 12390-12)	GK1 _{Mitte} (2)	GK2 _{Grob} (2) GK2 _{Mitte} (2) GK2 _{Fein} (2)			

^{*}in Abstimmung mit dem Projektbegleitenden Ausschuss → CEM III/A (Z4) für Expositionsklassen: XC, XD und XS

- GK1 Rundkorn
- GK1_{Mitte} Referenzzusammensetzung GK1
- GK2_{Mitte} Referenzsieblinie GK2

- GK2 Splitt
- GK1_{Fein} hoher Anteil feine GK1
- GK2_{Fein} hoher Anteil feine GK2
- GK1_{Grob} hoher Anteil grobe GK1
- GK2_{Grob} hoher Anteil grobe GK2

Abbildung 4: Prüfmatrix der FE 2 (HCU) zur Untersuchung des Einflusses der Gesteinskörnung auf den Migrationskoeffizienten und die Karbonatisierungsgeschwindigkeit

Des Weiteren waren Begleituntersuchungen zur Charakterisierung der Gesteinskörnung durchzuführen (Bestimmung der abschlämmbaren Bestandteile, Kornrohdichte, Wasseraufnahme). Darüber hinaus waren die eingesetzten Sieblinien und die Druckfestigkeit im Alter von 28 Tagen an allen untersuchten Betonen zu bestimmen. Damit ergaben sich in Summe 69 Probekörper für die Chloridmigration und 102 Probekörper für die Karbonatisierungsprüfung.

AP 3: Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse

Um die Einflüsse auf den inversen effektiven Karbonatisierungswiderstand und den Chloridmigrationskoeffizienten zu erfassen, war eine multivariate Analyse (u. a. Varianzanalyse) [9] durchzuführen, sodass sich signifikante Einflüsse auf die Kennwertermittlung statistisch abgesichert beschreiben ließen. Dabei wurden die hersteller- und chargenbedingten Streuungen der Zemente, die Streuungen infolge der Dosierungenauigkeiten (w/z-Variation) und die der Gesteinskörnung ausgewertet.

Um die Teilergebnisse aus den einzelnen Arbeitsschritten zusammenführen und die Wiederholstreuung aus den Messergebnissen eliminieren zu können, musste für eine Betonzusammensetzung im Rahmen des AP 2 eine 5-fache Bestimmung des jeweiligen Kennwerts erfolgen. Hierfür
wurden in enger Abstimmung der beteiligten Forschungseinrichtungen je Prüfverfahren ein bis
zwei Zementarten ausgewählt. Die Aufbereitung der Versuchsdaten zur statistischen Auswertung
im Hinblick auf die entsprechenden Variationen (AS 1 bis AS 4 aus AP 2) erfolgte durch die

jeweiligen Projektpartner. Die Zusammenführung der Ergebnisse übernahm die Forschungseinrichtung 2 (HCU) gemäß dem in Abbildung 5 dargestellten Ablauf. Bei der Bestimmung der w/z-Wert-abhängigen Streuung war die Möglichkeit einer Inklusion von Literaturdaten zu prüfen, da dieser Aspekt schon Gegenstand systematischer Untersuchungen war, vgl. [10] und [11]. Für die anderen untersuchten Variationen (Zement, Gesteinskörnung) waren keine derartigen Untersuchungsergebnisse verfügbar. Das Ergebnis dieses Arbeitspakets war die Herleitung einer statistischen Verteilung der beiden Materialkennwerte unter Einbezug der ermittelten Streuungen, vgl. Abbildung 5.

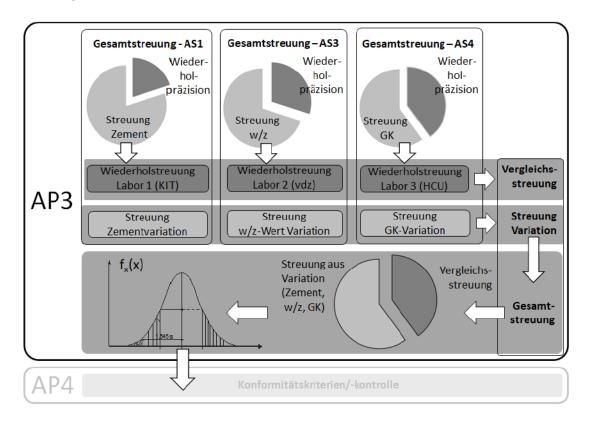


Abbildung 5: Schematischer Ablauf zur statistischen Auswertung der Versuchsdaten

Ein weiteres Ergebnis dieses Arbeitspakets war eine Datenbank in Form einer "Materialliste", die eine systematische Klasseneinteilung der Materialkennwerte in Abhängigkeit z. B. von der Zementart, der Herkunft und den Herstellungsbedingungen ermöglichte. Bereits existierende Daten sollten ebenfalls in der vorgesehenen Datenbank berücksichtigt werden. Dazu erfolgte zusätzlich über eine dritte zu beauftragende Stelle eine deutschlandweite Datenerhebung bei Transportbetonherstellern. Die Daten wurden anonymisiert erhoben und ausgewertet.

Auf Basis dieser Daten sollte überprüft werden, ob eine eindeutige Zuordnung der Betone zu den im Entwurf der zukünftigen EN 1992-1-1 vorgesehenen Widerstandsklassen möglich ist.

AP 4: Analyse der Instrumente der Produktions- und Konformitätskontrolle

Basierend auf den Ergebnissen der Arbeitspakete 2 und 3 sollten Prinzipien für die Produktionskontrolle und die Konformitätsbewertung hinsichtlich Karbonatisierung und Chlorideindringen erarbeitet werden. Es sollte überprüft werden, ob die aktuell in DIN EN 206-1 [2] in Verbindung mit DIN 1045-2 [3] beschriebenen Prinzipien der Konformitätsbewertung mit Mittelwert- und Einzelwertkriterien auch für die Materialkennwerte bzgl. Karbonatisierung und Chlorideindringen anwendbar sind. Hierzu war zunächst eine geeignete Klassifizierung der Materialkennwerte ähnlich wie bei der Druckfestigkeit vorzunehmen. Unter Zuhilfenahme der statistischen Auswertung aus dem AP 3 (vgl. Abbildung 5) sollten Kriterien definiert werden, die eine Prüfung der Konformität von Betonen mit den zuvor festgelegten Klassen ermöglichten. Hierbei waren neben den zulässigen Abweichungen von einem charakteristischen Wert auch die notwendige Anzahl der Prüfergebnisse bzw. die Probennahmehäufigkeit festzulegen.

Darüber hinaus sollte analysiert werden, inwiefern die bekannten Verfahren der Produktionskontrolle angepasst bzw. erweitert werden können bzw. müssen, um die "Dauerhaftigkeitsperformance" gezielt zu steuern. Hierzu waren neben den Ergebnissen der Karbonatisierungs- und Chloridmigrationsversuche auch die Ergebnisse der Begleituntersuchungen, wie z. B. die Prüfung der Druckfestigkeit, der Porenstruktur des Zementsteins und der Eigenschaften der Gesteinskörnung, heranzuziehen.

AP 5: Berichterstattung und Ergebnistransfer

Die Erkenntnisse der Arbeitspakete 1 bis 4 wurden kontinuierlich analysiert und im Zuge der Projekttreffen mit dem projektbegleitenden Ausschuss diskutiert. Das fünfte Arbeitspaket beinhaltete darüber hinaus die Erstellung eines Schlussberichts mit der eingehenden Darstellung und Diskussion der erzielten Ergebnisse.

2 Stand der Forschung und Entwicklung

Die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken kann auf vielfältige Weise beeinträchtigt werden. So müssen z. B. Infrastrukturbauwerke (Brücken, Tunnel) aufgrund zunehmender dauerhaftigkeitsrelevanter Schäden kosten- und zeitintensiv ertüchtigt werden [12, 13]. Eine Zusammenstellung der häufigsten Schadensursachen an Betonbrücken ist in Abbildung 6 gegeben. Aus Abbildung 6 geht hervor, dass die Bewehrungskorrosion für mehr als 70 % der Schäden an Betonbrückenbauwerken verantwortlich ist. In der überwiegenden Mehrheit der Fälle (etwa 66 %) sind die Bauwerksschäden auf die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion zurückzuführen. Doch auch die karbonatisierungsinduzierte Bewehrungskorrosion ist nicht zu vernachlässigen. Nach Schießl und Mayer [14] ist sie für etwa 5 % der Bauwerksschäden an Betonbrücken verantwortlich und liegt damit in der Größenordnung der Bauwerksschäden infolge Frost-Tausalz-Beanspruchung.

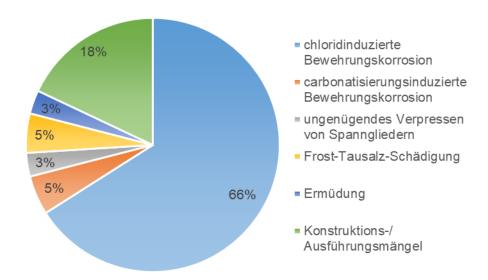


Abbildung 6: Ursachen für Bauwerksschäden an Betonbrücken [14]

Die chloridinduzierte Bewehrungskorrosion tritt typischerweise als Lochfraßkorrosion in Erscheinung. Voraussetzung für das Eintreten der chloridinduzierten Bewehrungskorrosion ist eine (lokale) Depassivierung des Bewehrungsstahls, die dann hervorgerufen wird, wenn der Chloridgehalt im Tausalz- oder Meerwasser-beanspruchten Stahlbeton – unter Anwesenheit von Sauerstoff und eines Elektrolyten – auf Höhe des Bewehrungsstahls einen kritischen, korrosionsauslösenden Chloridgehalt überschreitet. In entsprechender Weise geht der karbonatisierungsinduzierten Bewehrungskorrosion eine karbonatisierungsbedingte Depassivierung des Bewehrungsstahls voraus. Hierbei verursacht die chemische Reaktion des aus der Atmosphäre eindiffundierenden Kohlenstoffdioxids (CO₂) mit den alkalischen Bestandteilen des Zementsteins eine pH-Wert-Senkung der Porenlösung, die in der Tiefe des Bewehrungsstahls zu einer (flächigen) Auflösung der schützenden Passivschicht führt.

Zur sicheren Vermeidung von Korrosionsschäden bei Infrastrukturbauwerken und den damit verbundenen volkswirtschaftlichen Kosten ist eine wirklichkeitsnahe Schädigungsprognose erforderlich. Für die Prognose des Zeitpunktes der chloridinduzierten und der karbonatisierungsinduzierten Depassivierung des Bewehrungsstahls liegen vollprobabilistische Modelle vor, die im Rahmen der Performance-basierten Dauerhaftigkeitsbemessung Anwendung finden. Bei der modelltechnischen Abbildung der karbonatisierungsinduzierten Depassivierung des Bewehrungsstahls stellt der inverse effektive Karbonatisierungswiderstand den maßgebenden Materialkennwert dar, der im Labor mittels Schnellprüfmethode (beschleunigte Karbonatisierung) ermittelt werden kann [4, 15]. Im Fall der chloridinduzierten Depassivierung wird der entsprechende Kennwert durch den Chloriddiffusionskoeffizienten bzw. den Chloridmigrationskoeffizienten beschrieben. Die Parameter können ebenfalls im Labor mittels natürlicher Diffusion [16] oder Schnellprüfmethode (Chloridmigration) [5, 17] ermittelt werden. Diese Materialkennwerte wurden bereits für Betone mit unterschiedlichen Wasserzementwerten und unterschiedlichen Zementarten - im Wesentlichen CEM I- und CEM III-Betone – im Rahmen systematischer Laboruntersuchungen ermittelt, siehe beispielsweise im fib Model Code for Service Life Design [15]. Diverse Erweiterungen der genannten Kennwerte auf CEM II-Betone und CEM I-Betone mit variierenden Zusatzstoffen (z. B. Flugasche, Kalksteinmehl, Puzzolane, Hüttensand) wurden im Zuge verschiedener wissenschaftlicher Arbeiten vorgenommen, die in den Veröffentlichungen von Greve-Dierfeld [18] und Rahimi [19] zusammengetragen wurden.

Aus den Untersuchungen lässt sich sowohl für den inversen effektiven Karbonatisierungswiderstand als auch für den Chloridmigrationskoeffizienten ableiten, dass die Art des Zements bzw. Betonzusatzstoffs sowie der äquivalente Wasserzementwert einen signifikanten Einfluss auf die Materialkennwerte haben [18, 19]. Die Art des Zements bzw. Betonzusatzstoffs entscheidet maßgeblich über das CO₂- bzw. Chloridbindevermögen des Betons. Während Betone mit hohem Klinkergehalt von dem hohen Portlanditgehalt und damit von einer hohen CO₂-Pufferkapazität profitieren, zeichnen sich insbesondere CEM III-Betone durch eine ausgeprägte chemische Bindekapazität gegenüber Chloriden aus. Sowohl der Karbonatisierungswiderstand als auch der Chlorideindringwiderstand des Betons nehmen zu, je geringer der äquivalente Wasserzementwert und die damit verbundene Kapillarporosität ausfallen. Nach Jacobs und Leemann [20] ist der Einfluss der Art des Zements bzw. Betonzusatzstoffs auf den Chloridmigrationskoeffizienten jedoch wesentlich ausgeprägter als der Einfluss des äquivalenten Wasserzementwerts.

Der Einfluss des Bindemittelgehalts (Gehalt Zement + Betonzusatzstoff) auf den Chlorideindringwiderstand des Betons wird unterschiedlich beurteilt. Nach Stark und Wicht [8] nimmt der Chloriddiffusionskoeffizient mit zunehmendem Bindemittelgehalt ab, den Untersuchungsergebnissen von Lay [11] zufolge ist bei Variation des Bindemittelgehalts im praxisüblichen Bereich kein systematischer Zusammenhang erkennbar. Die größten absoluten Streuungen treten nach Lay [11] beim Portlandzement auf, während die Streuungen bei den Bindemitteln mit latent-hydraulischen und puzzolanischen Bestandteilen kaum vorhanden sind.

Auch hinsichtlich des Einflusses der Gesteinskörnung (GK) gibt es unterschiedliche Angaben. Während Lay [11] den Einfluss der Form der Gesteinskörnung auf den Chloridmigrationskoeffizienten als nicht signifikant einschätzt, ist nach Stark und Wicht [8] mit einer signifikanten Beeinflussung des Chlorideintrags bei variierender Sieblinie und Größtkorndurchmesser zu rechnen. Letzteres konnte auch an Mörtelproben ohne Betonzusatzstoffe bestätigt werden, vgl. [21, 22]. Als Ursache hierfür wird die poröse Kontaktzone (ITZ) an der Oberfläche der Gesteinskörnung angeführt, die sich auf den Chloridtransport begünstigend auswirken soll. In diesem Zusammenhang zeigten weitere Untersuchungen an Mörtelproben von Houst et al. [23] und Wiens [21], dass bis zu einem GK-Volumen von rd. 50 Vol.-% der O2- und CO2-Diffusionskoeffizient bzw. der Chloridmigrationskoeffizient infolge des Austauschs diffusionsoffener Matrix durch diffusionsdichte Gesteinskörnung mit zunehmendem GK-Volumen abnahm. Eine weitere Zunahme des GK-Volumens über 50 Vol.-% hinaus führte zu einem Anstieg der Diffusions- und Migrationskoeffizienten, was mit der besseren Vernetzung der Transportwege entlang der Kontaktzonen erklärt wird. Der Einfluss der Kontaktzone ist bei einer dichteren ITZ (z. B. durch puzzolanische Betonzusatzstoffe) deutlich weniger ausgeprägt bis kaum vorhanden, vgl. [21]. Um eine signifikant dichtere ITZ zu erzielen, geht man davon aus, dass mindestens 65 M.-% des Portlandzementklinkers durch Hüttensand oder 20 – 30 M.-% des Portlandzementklinkers durch Flugasche ausgetauscht werden müssen [24].

Bei Variation der Gesteinskörnungsart zeigte sich im Rahmen der Chloridmigrationsversuche von Lay [11] bei einer Wiederholpräzision von rd. 11% (vgl. [10]) ein signifikanter Einfluss der Art der Gesteinskörnung. Beim Einsatz leichter Gesteinskörnung ist nach Stark und Wicht [8] zudem mit einer Steigerung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit zu rechnen.

Weitere, die Mischungszusammensetzung betreffende Einflussgrößen, wie beispielsweise der Luftporen- und Fließmittelgehalt, sind nach Lay [11] für den Chloridmigrationskoeffizienten nicht maßgebend. Auch für den Einfluss des Luftporen- und Fließmittelgehalts auf den Karbonatisierungswiderstand liegen nach Stark und Wicht [8] keine eindeutigen Ergebnisse vor.

Bei den zitierten Untersuchungen wurde nicht beleuchtet, inwieweit die Materialkennwerte bei gleichen Betonausgangsstoffen (z. B. Zementart) unterschiedlicher Herkunft (Lieferwerk) variieren. Darüber hinaus liegen keine Untersuchungsergebnisse zur Veränderung der Materialkennwerte bei Betonausgangsstoffen gleicher Herkunft, die jedoch aus unterschiedlichen Produktionschargen stammen, vor. Untersuchungen von Siebert [25] zur Gleichmäßigkeit von Zementen in ihrer Wechselwirkung mit Betonzusatzmitteln zeigten auf, dass sowohl die Variation der Zementlieferwerke als auch der Zementchargen innerhalb eines Lieferwerks sich zum Teil signifikant auf die rheologischen und die Festbeton-Eigenschaften auswirkten. Die Wirkung von Luftporenbildnern wurde bei Variation der Zementchargen mitunter derart stark beeinflusst, sodass der Frost-Tausalz-Widerstand der LP-Betone im CDF-Versuch deutlich verändert wurde [25].

Auch der Einfluss der Dosiergenauigkeit der Ausgangsstoffe wurde bislang nicht systematisch untersucht. Gemäß DIN EN 206-1 [2] in Verbindung mit DIN 1045-2 [3] beträgt die Toleranz für die Einwaage der Ausgangsstoffe ± 3 M.-%. Zur Aussteuerung der Frisch- und Festbetoneigenschaften dürfen der Zementgehalt sowie die Menge der Flugasche (sofern vorhanden) um ± 15 kg/m³ variiert werden, ohne dass eine erneute Erstprüfung durchgeführt werden muss. Des Weiteren können Unsicherheiten bei der Bestimmung der Oberflächenfeuchte der Gesteinskörnung zu Schwankungen des Wassergehalts führen. Die Auswirkungen dieser Variationen wurden bisher vornehmlich hinsichtlich der Frischbetoneigenschaften untersucht, nicht aber in Bezug auf die Dauerhaftigkeitskennwerte.

Die Konformitäts- bzw. Produktionskontrolle von Beton nach DIN EN 206-1 in Verbindung mit DIN 1045-2 erfordert bisher keine direkten Prüfungen von Dauerhaftigkeitskennwerten (z. B. Karbonatisierungswiderstand oder Chloridmigrationskoeffizienten). Der Nachweis der Konformität basiert für Beton nach Eigenschaften auf dem Einhalten der Anforderungen an die Betonzusammensetzung und der Prüfung der Druckfestigkeit. In der Schweiz sind dagegen seit der Einführung der SN EN 206-1/NE:2013 [26] Dauerhaftigkeitsprüfungen für bestimmte Expositionsklassenkombinationen Bestandteil des Konformitätsnachweises. In Frankreich wurde innerhalb des nationalen Forschungsprogramms "PERFDUB" daran gearbeitet, die Dauerhaftigkeit von Beton bzw. Betonbauwerken mit einem Performance-basierten Ansatz nachzuweisen und diesen Ansatz für die Praxis nutzbar zu machen [27]. Die aktuellen nationalen Anwendungsregeln der einzelnen CEN-Mitgliedsstaaten zur EN 206-1 basieren auf Erfahrungswerten mit lokalen Betonausgangsstoffen unter lokalen klimatischen Bedingungen und unter Berücksichtigung von lokalen Bautraditionen. Um den jeweiligen lokalen Erfahrungsstand weiterhin nutzen zu können, muss ein Performance-basierter Ansatz ebenfalls unter Berücksichtigung der lokalen Gegebenheiten entwickelt werden, sodass eine reine Übertragung von Ansätzen aus anderen Ländern auf Deutschland nur bedingt möglich erscheint.

3 Durchgeführte Arbeiten und Ergebnisse

3.1 Beschaffung und Charakterisierung der Ausgangsstoffe (AP 1)

3.1.1 Bindemittel

3.1.1.1 Beschaffung und Umverteilung

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden, wie im Forschungsantrag vorgesehen, neben ausgewählten innovativen Zementen (z. B. CEM II/C-M und Experimentalzement CEM X 35K-45LL-20S), die folgenden vier festgelegten Zementarten für die experimentellen Untersuchungen verwendet:

- CEM I 42,5 R (Z1),
- CEM II / A-LL 42,5 N (Z2),
- CEM II / B-S 42,5 N (Z3) und
- CEM III / A 42,5 N (Z4).

Diese vier Zementarten wurden nach einer Gesamtkalkulation der erforderlichen Zementmengen von der Forschungseinrichtung 1 (FE 1) beim Zementhersteller H1 für alle drei Forschungseinrichtungen (FE 1-3) bestellt. Im Anschluss daran wurden diese Zemente als Sackware und Big Bags mittels Spedition abgeholt und am KIT zunächst gebündelt angeliefert. Dort mussten die Zemente für den Weitertransport an die Forschungseinrichtungen 2 und 3 bzw. die eigene Einlagerung (FE 1) in großen Teilen umgeschichtet bzw. aus den Big Bags in Eimer umgefüllt werden. Die Sack- und Eimerware wurde anschließend für den Weitertransport vorbereitet und an die Forschungseinrichtungen 2 und 3 geliefert. Die gleichen Zemente (Z1-Z4) wurden auch im IGF-Forschungsvorhaben Nr. 21835 N verwendet und in diesem Zug gemeinsam beschafft und an die beteiligten Forschungseinrichtungen weiterverteilt. Des Weiteren hat das KIT (FE 1) die vier Zementarten der ersten Charge bei Hersteller 2 und bei Hersteller 3 für die experimentellen Untersuchungen zum Einfluss der Zementherkunft und Zementcharge (Arbeitspaket 2, Arbeitsschritt 1) beschafft. Die Beschaffung der vier Zemente Z1-Z4 der zweiten und dritten Herstellungscharge aus den drei genannten Zementwerken erfolgte im weiteren Verlauf des Projekts entsprechend der Bedarfe für die experimentellen Untersuchungen im Juni 2022 und im Oktober 2022.

3.1.1.2 XRD-Analysen

Alle im Rahmen des Forschungsvorhabens untersuchten Zemente wurden mittels Röntgendiffraktometrie (XRD) hinsichtlich ihrer Phasenzusammensetzung untersucht. Qualitative Vergleiche der Phasenzusammensetzung der verschiedenen Zemente und der Zemente von unterschiedlichen Herstellern und aus verschiedenen Produktionschargen stellten somit ein weiteres Hilfsmittel zur Ursachenfindung für Abweichungen der dauerhaftigkeitsrelevanten Kennwerte verschiedener Betone dar. Im Verlauf des Forschungsvorhabens wurde allerdings deutlich, dass die quantitative Zementzusammensetzung nach Herstellerangaben ein weitaus wertvolleres Hilfsmittel zur Bewertung der Untersuchungsergebnisse darstellte.

3.1.1.3 Bestandteile nach Herstellerangaben

Zusätzlich zu den durchgeführten XRD-Untersuchungen wurde die Zementzusammensetzung der Zemente Z1-Z4 bei den Zementherstellern angefragt. Die Portlandzemente bestehen jeweils zu mindestens 95 % aus Klinker, die übrigen Anteile nehmen Nebenbestandteile ein. In Tabelle

1 ist der Gehalt des jeweiligen Hauptbestandteils der Portlandkompositzemente und der Hochofenzemente angegeben. Die übrigen Anteile nehmen wiederum Klinker und maximal 5 % Nebenbestandteile ein.

Tabelle 1: Zusammensetzung der verwendeten Zemente nach Herstellerangaben (Massenanteil [%]) und nach DIN EN 197-1 [28] zulässige Variation der Zusammensetzung

Hersteller	Charge	CEM II/A-LL 42,5 N	CEM II/B-S 42,5 N	CEM III/A 42,5 N
nersteller	Charge	Kalkstein (LL)	Hüttensand (S)	Hüttensand (S)
1	1	14	27	48
1	2	16	30	49
1	3	14	29	51
2	1	15	28	40
2	2	15	28	40
2	3	15	28	40
3	1	17	29	43
3	2	14	27	45
3	3	17	32	48
Nach DIN EN 1	97-1 zulässig	6-20	21-35	36-65

3.1.2 Gesteinskörnung

Die Forschungseinrichtung 1 hat zu Beginn des Forschungsvorhabens auf Grundlage einer Gesamtmengenkalkulation jeweils drei Korngruppen (0/2, 2/8, 8/16) für alle drei Forschungseinrichtungen bei der Philipp & Co. KG aus dem Werk Bad Schönborn beschafft. Die Gesteinskörnungen wurden für alle drei Forschungseinrichtungen in Big Bags bereitgestellt. Diese konnten von den jeweiligen Forschungseinrichtungen mittels Spedition beschafft werden. Aufgrund der zahlreichen Vorversuche musste Gesteinskörnung der Kornfraktionen 0/2 und 8/16 im Laufe des Projekts nachbestellt werden. Die wesentlichen Eigenschaften der jeweiligen Gesteinskörnungen sind in Tabelle 2 angegeben.

Tabelle 2: Wesentliche Kenngrößen der verwendeten Gesteinskörnung

Lieferung	Lieferung Kornfraktion Rohdichte [kg/dm³]		Wasseraufnahme [%]
	0/2	2,65	0,2
1	2/8	2,58	1,8
	8/16	2,61	1,3
	0/2	2,66	0,2
2	2/8	2,58	1,8
	8/16	2,60	1,0

3.1.3 Betonzusatzstoffe

Entsprechend einer Gesamtmengenkalkulation hat die Forschungseinrichtung 1 die erforderlichen Flugaschemengen für alle drei Forschungseinrichtungen beschafft. Diese Beschaffung erfolgte zentral über die Forschungseinrichtung 1 im Rahmen des Vorhabens Nr. 21835 N.

3.1.4 Betonzusatzmittel

Alle drei Forschungseinrichtungen haben über bestehende Industriekontakte ein einheitliches und für die Anforderungen des Forschungsvorhabens geeignetes PCE-Fließmittel zur Betonherstellung für die Einstellung der Konsistenzklasse F4 beschafft.

3.2 Experimentelle Untersuchungen

3.2.1 Vorversuche zur Einstellung der Betonrezeptur

In Vorbereitung der experimentellen Untersuchungen wurden umfangreiche Versuche zur Einstellung der gewünschten Betonrezeptur durchgeführt. Folgende Randbedingungen wurden in enger Absprache der Forschungseinrichtungen mit dem projektbegleitenden Ausschuss angestrebt. Grundsätzlich sollte der im Rahmen dieses Vorhabens zu untersuchende Beton eine hohe Praxisrelevanz aufweisen. Zudem sollte der projektierte Beton ressourcenschonende Eigenschaft besitzen und robust sein. Hierzu waren nachfolgend aufgeführte betontechnologische Vorgaben einzuhalten:

- Wasserzementwert = 0,50,
- Konsistenzklasse F4 (sehr weich),
- Zementgehalt von etwa 320 kg/m³,
- Fließmittelkonzentrationen (max. 1 % der Zementmasse),
- Sieblinie im Bereich A/B 16 (Mitte).

Die Vorversuche an allen drei Forschungseinrichtungen zeigten jedoch, dass die gewünschten Randbedingungen mit den zur Verfügung stehenden Ausgangsstoffen nicht zielsicher erreicht werden konnten. Hierzu wurden verschiedene Vorlagerungsbedingungen (bodentrockene Gesteinskörnungen, vorgefeuchtete Gesteinskörnungen, ofentrockene Gesteinskörnungen) von den Forschungseinrichtungen eingehend untersucht. Es stellte sich heraus, dass die zur Verfügung gestellte Gesteinskörnung zwar den Anforderungen der Eigen- bzw. Fremdüberwachung entspricht, sich allerdings hinsichtlich des Saugverhaltens sehr empfindlich auf die Vorlagerungsbedingungen verhält und damit einen erheblichen Einfluss auf die Verarbeitbarkeit (siehe geforderte Konsistenzklasse) hatte. Um die gewünschten Randbedingungen zu erreichen, wurden unterschiedliche mögliche Einflussfaktoren untersucht und schließlich die Zementgehalte schrittweise erhöht. In Abhängigkeit der Zementdichte und des erforderlichen Leimvolumen (290 l/m³) zur Einstellung einer Konsistenzklasse F4 bei einem Größtkorn von 16 mm nach Tabelle 14.6 der DAfStb-Richtlinie Betonbauqualität als Vorlage für die DIN 1045-2 [3] wurden folgende Zementgehalte festgelegt:

Z1: CEM I 42,5 R
Z2: CEM II/A-LL 42,4 N
Z2 + FA: CEM II/A-LL + 60 kg Flugasche
Z3: CEM II/B-S 42,5 N
Z4: CEM III/A 42,5 N
353 kg/m³
(für Karbonatisierungsversuche)
304 kg/m³ (für Chloridmigrationsversuche)
350 kg/m³
348 kg/m³

Für die Chloridmigrationsversuche wurde in Absprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss für Betone aus CEM II/A-LL ein Teil des Zements durch 60 kg Flugasche pro m³ Beton (Z2 + FA) ersetzt.

Als Fließmittel wird von allen Forschungseinrichtungen ein Fließmittel auf PCE-Basis mit einer maximalen Zugabemenge von 1 % der Zementmasse verwendet. Des Weiteren wurde die Sieblinie dahingehend angepasst, dass die Massenverhältnisse der einzelnen Kornfraktionen folgendermaßen festgelegt wurden:

Sand 0/2 40 %Kies 2/8 20 %Kies 8/16 40 %

Dadurch ergab sich die in Abbildung 7 dargestellte Sieblinie. Für die Festlegung der Betonrezeptur waren insgesamt 94 Betonmischungen erforderlich. Eine Übersicht über die durchgeführten Vorversuche ist in Tabelle A 1 im Anhang gegeben. Aufgrund der anfänglichen Schwierigkeiten mit der Einstellung der Betonrezeptur verständigten sich die Forschungseinrichtungen darauf während der experimentellen Untersuchungen den erzielten w/z-Wert mittels Mikrowellenverfahren oder genormtem Darrverfahren zu bestimmen.

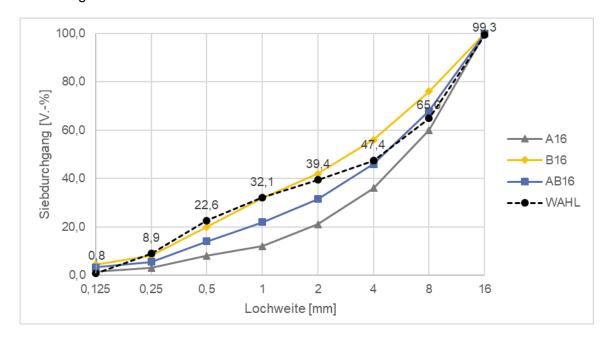


Abbildung 7: gewählte Sieblinie AB 16

Auf Grundlage der vollumfänglichen Voruntersuchungen zur Einstellung der jeweiligen Betone konnte eine Vereinheitlichung der Betonherstellung bei allen drei Forschungseinrichtungen erzielt werden, welche eine Grundlage für erfolgreiche experimentelle Untersuchungen in den Arbeitsschritten 1 bis 4 des Arbeitspakets 2 sowie den Tätigkeiten in allen weiteren Arbeitspaketen darstellt.

3.2.2 Versuchsrandbedingungen Chloridmigration

Die Chloridmigrationsversuche (RCM-Tests) wurden nach DIN EN 12390-18 [5] oder in Anlehnung daran durchgeführt. Die Probekörper wurden entweder als Bohrkerne mit einem Durchmesser von ca. 100 mm aus würfelförmigen Probekörpern entnommen oder in Stahlzylinderschalungen mit 100 mm Durchmesser hergestellt. Anschließend wurden daraus Scheiben mit einer Höhe von ca. 50 mm entnommen, wobei die Randstücke der Ausgangsproben nicht verwendet wurden. Die RCM-Tests fanden jeweils im Alter von 28 Tagen statt, bis zum Prüftermin wurden die Proben

bei ca. 20 °C unter Wasser gelagert. Die Konzentration der NaCl-Lösung betrug 5 %. Die Auswertung der RCM-Tests erfolgte entsprechend DIN EN 12390-18 [5] durch Spalten der Probenscheiben und der anschließenden indikativen Auswertung der Eindringtiefe der Chloride mittels Silbernitratlösung. Ob zusätzlich zur Silbernitratlösung Fluorescein-Lösung verwendet wurde, um den Farbumschlag besser sichtbar zu machen, haben die Forschungseinrichtungen nach spezifischem Bedarf entschieden.

Der Chloridmigrationskoeffizient M_{nss} wird nach DIN EN 12390-18 mittels Gleichung (1) bestimmt.

$$M_{nss} = \frac{RTh}{zFU} \cdot \frac{x_d - 2 \cdot \sqrt{\frac{RTh}{zFU}} erf^{-1} \left(1 - \frac{2c_d}{c_0}\right) \cdot \sqrt{x_d}}{t}$$
 (1)

Mit

R Gaskonstante [J/(K•mol)],

T Mittlere Temperatur der Prüflösungen [K],

h Mittlere Höhe des Probekörpers [m],

z Ionenladung für Chloridionen [-],

F Faraday'sche Konstante [J/V•mol)],

U Absolute Spannung während des Versuchs [V],

 x_d Mittlere Tiefe der Farbumschlagsfront der Silbernitratlösung [m] und erf⁻¹(1-2c_d/c₀) = 1 [-] für 5 %ige NaCl-Lösung.





Abbildung 8: Versuchsaufbau des RCM-Tests und indikative Auswertung der Eindringtiefe

Abbildung 8 zeigt exemplarisch den Versuchsaufbau inklusive des Ladungsmessgeräts sowie die indikative Auswertung mittels Silbernitratlösung. Zusätzlich zu den in DIN EN 12390-18 geforderten Prüfgrößen wurde die während dem Versuch vorliegende Stromstärke kontinuierlich aufgezeichnet, um daraus die spezifische Ladungsflussrate (SCFR – specific charge flow rate) nach Stengel et al. [6] zu bestimmen. Diese Methode bietet eine weitere Möglichkeit zur Auswertung der RCM-Versuche in Abhängigkeit des elektrischen Widerstands den der Probekörper dem Eindringen der Chloridionen entgegensetzt. Das SCFR-Verfahren bietet, durch die Anpassung des Zeitraums über den das Integral nach Gleichung (2) gebildet wird die Möglichkeit, die Versuchsdauer zu verkürzen. Darüber hinaus ist keine indikative Auswertung erforderlich, jedoch sind in der Literatur bislang nur wenige Erfahrungen mit der SCFR-Methode zu finden.

$$SCFR = \frac{Q}{U \cdot t} = \frac{\int_0^{t_{end}} I \cdot 3600 \cdot dt}{U \cdot t_{end}}$$
 (2)

Mit

SCFR Spezifische Ladungsflussrate [As/(Vh)]

I Gemessener Strom [A]

U Absolute Spannung während des Versuchs [V]

t, t_{end} Zeit, bzw. Versuchsdauer [h]

Der nach DIN EN 12390-18 [5] bestimmte Chloridmigrationskoeffizient wird zur Einordnung mit den vorgegebenen XRDS-Klassen verglichen. Hierbei wird auf die Entwurfsfassung 14 der EN 206-100 [29], welche zum Zeitpunkt der Auswertung dem aktuellen Stand entspricht, zurückgegriffen. Die Einstufung erfolgt unter Berücksichtigung des Altersexponenten für unterschiedliche Zementarten. Nach Entwurf 14 der EN 206-100 [29] sind folgende Altersexponenten vorgegeben:

Tabelle 3: Vorläufige Altersexponenten für unterschiedliche Zementarten nach EN 206-100, Entwurf 14 für die Einstufung in XRDS-Klassen

Zementart	Altersexponent
CEM I, CEM II/A mit bis zu 20 % Flugasche, Hüttensand oder Kalkstein	0,3
Zement oder andere Bindemittel mit 8 – 12 % Silikastaub	0,4
Zement oder andere Bindemittel mit 35 – 45 % Hüttensand	
Zement oder andere Bindemittel mit 20 – 24 % Flugasche	0,5
Zement oder andere Bindemittel mit Kombinationen (insgesamt 20 – 45 %) aus Hüttensand, Flugasche und Silikastaub	3,0
Zement oder andere Bindemittel mit ≥ 46 % Hüttensand	0.6
Zement oder andere Bindemittel mit ≥ 25 % Flugasche	0,6

Nach BAW Merkblatt [17] sind folgende Altersexponenten vorgesehen:

Tabelle 4: Altersexponenten für unterschiedliche Zementarten nach BAW Merkblatt (Auszug)

Zementart nach EN 197-1:2014	Altersexponent
CEM I	0,3
CEM II/A-LL	0,3
CEM II/A-LL + ca. 20 % FA	0,55
CEM II/B-S	0,37
CEM III/A	0,4

Vereinfacht werden zur Auswertung der XRDS-Klassen nach DIN EN 206-100 [29] die Altersexponenten der Zemente folgendermaßen festgelegt:

•	CEM I (Z1)	$\alpha_{Z1} = 0.3$
•	CEM II/A-LL (Z2) +FA	$\alpha_{Z2} = 0.5$
•	CEM II/B-S (Z3)	$\alpha_{Z3} = 0.4$
•	CEM III/A (Z4)	$\alpha_{Z4} = 0.5$

Hierbei wird der Altersexponent des CEM II/B-S (Z3) in Anlehnung an das BAW-Merkblatt [17] für die Einordnung in ERC-Klassen zu α_{Z3} = 0,4 angenommen, da eine eindeutige Zuordnung nach Tabelle 3 nicht möglich ist.

Das Ziel der XRDS-Klassen für Beton ist eine Performance-basierte Einstufung von Betonrezepturen anhand ihres tatsächlichen Chlorideindringwiderstandes. In der Entwurfsfassung 14 der EN 206-100 [29] ist als Referenzprüfung der Chloriddiffusionsversuch nach DIN EN 12390-11 [16] vorgesehen. Die Einstufung erfolgt im Rahmen von Erstprüfungen anhand von Mittelwerten aus drei oder mehr Einzelproben in Abhängigkeit des Altersexponenten. Alternativ kann die Bestimmung der XRDS-Klasse durch die Chloridmigrationsprüfung nach DIN EN 12390-18 [5] erfolgen. Die Grenzen der XRDS-Klassen für die Einstufung nach Chloridmigrationsprüfung sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Vorläufige Konformitätskriterien der XRDS-Klassen in [10⁻¹² m²/s] nach Entwurf 14 der EN 206-100

XRDS-Klasse	α ≥ 0 ,3	α ≥ 0,4	α ≥ 0,5	α≥0,6
XRDS 0,5	1	1,5	2	4
XRDS 1	1,5	2	4	7
XRDS 1,5	2	3	5	9
XRDS 2	2	4	7	11
XRDS 3	3	5	9	16
XRDS 4	4	7	11	20
XRDS 5	5	7	11	25
XRDS 6	5	9	16	25
XRDS 8	7	11	20	35
XRDS 10	9	16	25	40
XRDS 15	14	24	38	60
XRDS 25	22	40	63	100
XRDS 50	45	80	130	500

In Deutschland wird derzeit durch den DAfStb an einer Umsetzung des ERC-Konzeptes in Form einer sogenannten ERC-Richtlinie [30] gearbeitet. Die Umsetzung sieht eine Zusammenfassung der Klassen wie folgt vor:

Tabelle 6: Vorläufige Konformitätskriterien der XRDS-Klassen nach ERC-Richtlinie des DAfStb Stand 2023-08 [30]

Expositionswiderstandsklassen	XRDS 2	XRDS 5	XRDS 10
Mittlerer Chloridmigrationskoeffizient M _{nss} , _{28Tage} bestimmt nach DIN EN 12390-18 [10 ⁻¹² m ² /s]	≤ 7,3	> 7,3 und ≤ 14,4	> 14,4 und ≤ 29,4

3.2.3 Versuchsrandbedingungen Karbonatisierung

Die beschleunigten Karbonatisierungsversuche erfolgten nach DIN EN 12390-12 [4] an prismatischen Probekörpern mit einer Querschnittsfläche von 100 x 100 mm². Die Proben wurden in Balkenschalungen hergestellt und nach dem Ausschalen bis zum Alter von 28 Tagen bei ca. 20 °C unter Wasser gelagert. Anschließend wurden die Proben für weitere 14 Tage in Laborluft bei ca.

20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte klimatisiert. Die beschleunigte Karbonatisierung begann im Alter von 42 Tagen und erfolgte bei einer CO_2 -Konzentration von (3 ± 0.5) V.- % bei (20 ± 2) °C und einer relativen Luftfeuchte von (57 ± 3) %. Die Klimabedingungen und die CO_2 -Konzentration wurden während der Versuche kontinuierlich überwacht. Nach 7, 28 und 70 Tagen CO_2 -Exposition wurden aus den Proben jeweils eine ca. 50 mm dicke Scheibe herausgebrochen und an der Bruchfläche durch Aufsprühen von Phenolphtaleinlösung die Tiefe der Karbonatisierungsfront bestimmt. Dafür wurden an jeder Proben insgesamt 20 (5 pro Kante) Einpunkt-Karbonatisierungstiefen $(d_{k,point})$ gemessen, um daraus den Mittelwert, der Karbonatisierungstiefe d_k zu berechnen. Abbildung 9 zeigt exemplarisch die von FE 1 verwendete Karbonatisierungskammer sowie die indikative Auswertung der Tiefe der Karbonatisierungsfront.



Abbildung 9: Karbonatisierungskammer und indikative Auswertung mittels Phenolphtalein

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit K_{AC} berechnet sich durch eine lineare Regression der mittleren Karbonatisierungstiefen d_k über die Wurzel der Beanspruchungsdauer t nach Gleichung (3) und entspricht der Steigung der Regressionsgeraden. Das Bestimmtheitsmaß der Regression solle mindestens 0,95 betragen.

$$d_k = a + K_{AC} \cdot \sqrt{t} \tag{3}$$

Mit

d_k Mittlere Karbonatisierungstiefe [mm]

K_{AC} Karbonatisierungsgeschwindigkeit [mm/Tage^{0,5}]

t Beanspruchungsdauer [Tage]

a = 0 Schnittpunkt mit der y-Achse [mm]. a = 0 bedeutet, dass $d_k(t=0) = 0$.

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit wird zur Einstufung mit den vorgegebenen XRC-Klassen für den beschleunigten Karbonatisierungsversuch verglichen. Hierbei wird auf die Entwurfsfassung 14 der EN 206-100 [29], welche zum Zeitpunkt der Auswertung dem aktuellen Stand entspricht, zurückgegriffen.

Das Ziel der XRC-Klassen für Beton ist eine Performance-basierte Einstufung von Betonrezepturen anhand ihres tatsächlichen Karbonatisierungswiderstandes. In der Entwurfsfassung 14 der

EN 206-100 [29] ist als Referenzprüfung die Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes unter natürlichen Lagerungsbedingungen ("outside protected test") und atmosphärischer Konzentration von Kohlenstoffdioxid nach DIN EN 12390-10 [31] vorgesehen. Die Einstufung erfolgt im Rahmen von Erstprüfungen anhand von Mittelwerten aus drei oder mehr Einzelproben. Unter der Voraussetzung, dass die ermittelte XRC-Klasse nicht vom Ergebnis der Referenzprüfung abweicht, kann die Prüfung außerdem unter Einsatz einer Standard-Karbonatisierungskammer ("chamber test") oder durch das beschleunigte Karbonatisierungsverfahren ("accelerated test") EN 12390-12 [4] erfolgen. Die Einstufung in XRC-Klassen anhand der Referenzprüfung und Anhaltswerte für das beschleunigte Verfahren sind in Tabelle 7 angegeben.

Tabelle 7: Vorläufige Konformitätskriterien der XRC-Klassen nach Entwurf 14 der EN 206-100

XRC-Klasse	EN 12390-10 –outside protected test [mm/(a ^{0,5})]	EN 12390-10 - chamber test [mm/(a ^{0,5})]	EN 12390-12 - acceler- ated test [mm/(Tage ^{0,5})]
XRC 0,5	0,5	0,4	0,14
XRC 1	1,0	0,9	0,3
XRC 2	2,0	1,7	0,6
XRC 3	3,0	2,6	0,9
XRC 4	4,0	3,5	1,2
XRC 5	5,0	4,3	1,4
XRC 6	6,0	5,2	1,7
XRC 7	7,0	6,1	2,0
XRC 9	9,0	7,8	2,6
XRC 12	12,0	10,4	3,4

In Deutschland wird derzeit durch den DAfStb an einer Umsetzung des ERC-Konzeptes in Form einer sogenannten ERC-Richtlinie gearbeitet. Die Umsetzung sieht eine Zusammenfassung der Klassen nach Tabelle 8 vor. Darin sind die Klassengrenzen für die natürliche Karbonatisierung nach dem Entwurf der ERC-Richtlinie des DAfStb [30] sowie die Umrechnung der Werte entsprechend der Angaben [32] für beschleunigte Versuchsrandbedingungen nach DIN EN 12390-12 [4] angegeben.

Tabelle 8: Vorläufige Konformitätskriterien der XRC-Klassen nach dem Entwurf der ERC-Richtlinie des DAfStb Stand 2023-08 [30]

Expositionswiderstandsklassen	XRC5	XRC7	XRC9
Mittlere Karbonatisierungsgeschwindigkeit k _{NACm,140 Tage} nach BAW Merkblatt MDCC, Anlage A, in Verbindung mit DIN EN 12390-10:2019-08	≤ 4,5	> 4,5 und ≤ 7,2	> 7,2 und ≤ 9,0
[mm/(a ^{0,5})]			
Mittlere Karbonatisierungsgeschwindigkeit k _{AC} bei Anwendung der DIN EN 12390-12, Umrechnung der Klassengrenzen nach [32]	≤ 1,41	> 1,41 und ≤ 2,25	>2,25 und ≤ 2,82
[mm/(Tage ^{0,5})]			

3.2.4 Vorgehen zur statistischen Auswertung der Versuchsergebnisse

Dieses Kapitel dient der Erläuterung des Vorgehens zur statistischen Auswertung der in den folgenden Kapiteln dargestellten Versuchsergebnissen. Die eingesetzten statistischen Methoden dienen in diesem Forschungsvorhaben in erster Linie als Entscheidungshilfe zur Bewertung der Ergebnisse der umfangreichen Versuche der einzelnen Forschungseinrichtungen. Die finalen Forschungsaussagen werden auf der Grundlage sachlogischer Überlegungen in Verbindung mit statistischen Auswertungsergebnissen getroffen.

Das arithmetische Mittel \overline{x} stellt die zentrale Größe für die durchgeführten statistischen Analysen dar. Es dient der Informationsverdichtung und fasst die Einzelwerte einer Gruppe von Werten mit nicht zu starker Streuung zusammen (Gl. (4)). Da anhand des Mittelwerts keine Aussage über die Streuung der Einzelwerte möglich ist, wird die Standardabweichung s angegeben. Diese berechnet sich aus den gemittelten Abweichungen der Einzelwerte vom arithmetischen Mittelwert (Gl. (5)).

$$\overline{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i \tag{4}$$

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{n} \left(x - \overline{x}\right)^2}{n-1}} \tag{5}$$

Der Variationskoeffizient *V* gibt das relative Streuungsmaß, also den Quotienten aus Standardabweichung und arithmetischem Mittelwert, an (Gl. (6)) und dient dem Vergleich der Streuungen verschiedener Gruppen unabhängig von der Größe des Mittelwerts. Somit ermöglicht der Variationskoeffizient eine Beurteilung der Streuungen der Versuchsergebnisse in Bezug auf in der Literatur angegebene Werte. Dabei wird insbesondere im Zusammenhang mit Ringversuchen oft zwischen Wiederhol- und Vergleichsbedingungen unterschieden. Von Wiederholbedingungen spricht man, wenn ein Versuch unter identischen Bedingungen im selben Labor wiederholt wird. Von Vergleichsbedingungen spricht man beim Vergleich der Ergebnisse von Versuchen, die unter denselben Randbedingungen aber in verschiedenen Laboren stattfanden.

$$V = \frac{s}{\overline{x}} \tag{6}$$

Eine wesentliche Voraussetzung für die Anwendung dieser statistischen Größen ist die Normalverteilung der Einzelwerte. Es kann angenommen werden, dass die im *fib* Model Code for Service Life Design [15] angegebenen Verteilungsfunktionen auch für die Ergebnisse des vorliegenden Forschungsvorhabens gelten. Dennoch wurde die Normalverteilung der Versuchsergebnisse der RCM-Tests mittels des Kolmogorov-Smirnov-Anpassungstests nachgewiesen. Für den Nachweis der Normalverteilung der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten konnte keine ausreichend große Stichprobe identifiziert werden, sodass die Normalverteilung entsprechend des *fib* MC SLD angenommen wurde.

Zu Beginn des Forschungsvorhabens lag keine ausreichend große Stichprobe der Versuchsergebnisse vor (< 30), um die Normalverteilung der Ergebnisse mittels des Kolmogorov-Smirnov-Tests nachzuweisen. Daher wurde zunächst auf statistische Tests zur Untersuchung möglicher Signifikanzen ausgewichen, die keine Normalverteilung der Grundgesamtheit voraussetzen. Dafür eignet sich unter anderem der Kruskal-Wallis-Test, bei dem allen Versuchsergebnissen der Größe nach Ränge zugeordnet werden, aus denen anhand der unterschiedlichen Gruppen (Hersteller, Charge) Rangsummen gebildet werden können. Mittels des Tests lassen sich anschließend signifikante Unterschiede zwischen den Rangsummen der Gruppen feststellen.

Im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens wurde mit der zunehmenden Anzahl der Versuchsergebnisse auch die Verwendung klassischer Varianzanalysen möglich, da die Normalverteilung der Daten anhand der Versuchsergebnisse aus RCM-Tests mit CEM I-Betonen anhand des Kolmogorov-Smirnov-Tests nachgewiesen werden konnte.

Für die Durchführung von Varianzanalysen (ANOVA) werden zunächst Hypothesen, sogenannte Nullhypothesen aufgestellt, die anschließend mit einer gewählten statistischen Sicherheit, dem Signifikanzniveau α, auf ihre Richtigkeit geprüft werden. Die weitere statistische Auswertung der Versuchsergebnisse erfolgte anhand von einfaktoriellen Varianzanalysen, also Mittelwertvergleichstests und dient als Hilfsmittel um zu beurteilen, inwieweit die untersuchten Parametervariationen (Zementhersteller und -charge, Gesteinskörnung) einen signifikanten Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten und die Karbonatisierungsgeschwindigkeit haben. Die einfaktorielle Varianzanalyse bildet einen Gesamtmittelwert über alle zu untersuchenden Gruppen und prüft anschließend, ob ein Mittelwert einer oder mehrerer Gruppen einen signifikanten Unterschied zum Gesamtmittelwert aufweist. Dabei werden sowohl die Streuungen der Einzelwerte um die Gruppenmittelwerte als auch die Streuungen der Gruppenmittelwerte um das Gesamtmittel berücksichtigt. Ergebnis der Varianzanalyse ist eine Prüfgröße F, die gegen einen kritischen F-Wert geprüft werden kann. Des Weiteren ergibt sich ein P-Wert, der das Wahrscheinlichkeitsmaß für die Erfüllung der geprüften Hypothese darstellt. Ist der P-Wert größer als das Signifikanzniveau ist die Differenz zwischen den Gruppenmittelwerten und dem Gesamtmittel statistisch nicht signifikant, ist der P-Wert kleiner oder gleich α, so liegt ein statistisch signifikanter Unterschied vor. Für die mathematische Durchführung einfaktorieller Varianzanalysen sei auf [33, 34] verwiesen. Das Signifikanzniveau wurde in den vorliegenden Untersuchungen zu $\alpha = 0.05$ (= 5 %) festgelegt.

3.2.5 Einfluss der Zementherkunft und der Zementcharge auf den Chloridmigrationskoeffizienten (AS 1, FE 1)

3.2.5.1 Begleituntersuchungen

Die Druckfestigkeit der verwendeten Betone wurde zu jeder Betonage für AS 1 an mindestens drei Würfeln mit einer Kantenlänge von 150 mm nach DIN EN 12390-3 [35] bestimmt. Die mittleren Druckfestigkeiten sind in Tabelle 9 angegeben.

Tabelle 9: Druckfestigkeiten der für AS 1 verwendeten Betone

Zementart des Betons		Mittlere Druckfestigkeit f _{cm} (Stabw) [MPa]
CEM I 42,5 R		47,6 (3,8)
CEM II/A-LL 42,5 N	(nur für Karbonatisierungsversuche)	39,4 (3,9)
CEM II/A-LL 42,5 N + FA	(nur für Chloridmigrationsversuche)	39,6 (2,5)

CEM II/B-S 42,5 N	45,5 (3,8)
CEM III/A 42,5 N	46,6 (4,0)

Nach dem aufwendigen Entwurf der Betonrezeptur in den Vorversuchen (vgl. Tabelle A 1 im Anhang) wurden bei jeder Betonage das Ausbreitmaß, die Rohdichte und der Luftporengehalt am Frischbeton bestimmt. Die zulässigen Ausbreitmaße wurden bei jeder Betonage mit einer maximalen Abweichung von 10 mm vom Sollmaß für eine Konsistenz F4 durch Zugabe von maximal 1 % Fließmittel erreicht. Der Wassergehalt des Frischbetons wurde durch Darren bestimmt. Bei den Frischbetonuntersuchungen wurden keine nennenswerten Abweichungen von den jeweiligen Zielgrößen festgestellt.

Begleitend zu den Untersuchungen der Dauerhaftigkeitseigenschaften wurden Quecksilberdruckporosimetrien durchgeführt. Dazu wurde Granulat aus Proben entnommen, die identisch zu den Probekörpern für die Chloridmigrations- und Karbonatisierungsproben gelagert wurden. Der Zeitpunkt der Probenahme entsprach jeweils dem Beginn der Exposition durch den RCM-Test, bzw. dem Beginn der CO₂-Beaufschlagung. Zwischen den Proben mit Zement der verschiedenen Hersteller aus den verschiedenen Chargen wurden keine nennenswerten Unterschiede im Porengefüge festgestellt.

Durchführung der RCM-Tests

Zur Untersuchung ob die Variation der Zementherkunft, das heißt die Herkunft der Ausgangsstoffe der Zementherstellung oder die Herstellungscharge einen signifikanten Einfluss auf die Dauerhaftigkeit haben, wurden Probekörper aus Betonen entsprechend Abschnitt 3.2.1 hergestellt. Dabei wurde jede Zementart (Z1-Z4) von drei Herstellern (H1-H3) aus jeweils dem gleichen Zementwerk sowie aus jeweils drei Herstellungschargen (Ch1-Ch3) verwendet.

Die Probekörper für diesen Arbeitsschritt wurden in Stahlzylinderschalungen mit einem Durchmesser von 100 mm hergestellt. Anschließend wurden aus jedem Zylinder drei ca. 50 mm hohe Scheiben durch Sägen entnommen, die anschließend im RCM-Test in Anlehnung an DIN EN 12390-18 [5] geprüft wurden (vgl. Abschnitt 3.2.2).

3.2.5.2 Ergebnisse der RCM-Tests

Die Ergebnisse der RCM-Tests sind in Abbildung 10 bis Abbildung 13 in Form von Mittelwerten aus je drei Chloridmigrationskoeffizienten M_{nss} und der jeweils zugehörigen Standardabweichung als Fehlerindikatoren angegeben. Auf der X-Achse der Balkendiagramme sind jeweils die Variationen des Zementherstellers (H1 – H3) und der Zementcharge (Ch1 – Ch3) aufgetragen. Entsprechend des Forschungsantrags waren für Betone mit Zement 1 eine 5-fach-Bestimmung und für die Betone mit den Zementen 2-4 eine Doppelbestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten, jeweils mit Zement von Hersteller 1 aus Charge 1 vorgesehen. Da zwischen der Erstbestimmung und dem Wiederholungsversuch aber teilweise sehr große, unbegründbare Schwankungen auftraten (insbesondere bei CEM II/B-S, vgl. Abbildung 12) wurden für alle Zemente zwei weitere Wiederholungen mit Zement von Hersteller 1 aus Charge 1 durchgeführt. Anhand dessen könnten verschiedene Einflüsse auf den Chloridmigrationskoeffizienten als Ursache für diese großen Schwankungen ausgeschlossen werden. Die Mehrfachbestimmungen dienten als Hilfestellung zur Feststellung der Ursachen auftretender Schwankungen, insbesondere zur Differenzierung von Streuungen die grundsätzlich beim RCM-Test auftreten und Schwankungen der Versuchsergebnisse, die möglicherweise aus der Variation der Zementherkunft resultieren. Es ist zu beachten, dass der Herstellereinfluss unabhängig von der Charge und die Chargen nur innerhalb eines Herstellers miteinander verglichen werden können, da zwischen zwei Chargen verschiedener Hersteller kein Zusammenhang besteht. So ist beispielsweise ein direkter Vergleich der zweiten Charge von Hersteller 1 und Hersteller 2 nicht zielführend.

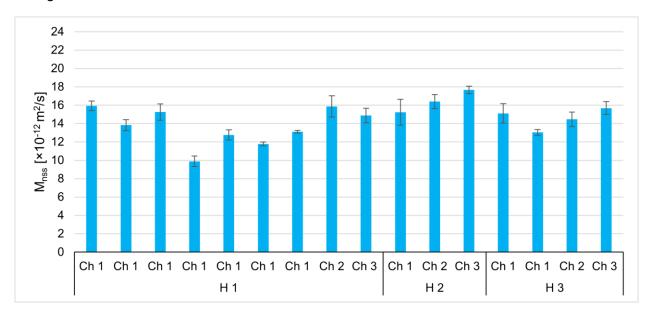


Abbildung 10: Migrationskoeffizient der Betone mit CEM I 42,5 R (Z1)

Abbildung 10 zeigt die Chloridmigrationskoeffizienten von Betonproben aus CEM I. Die Migrationskoeffizienten liegen im Allgemeinen in einer erwartbaren Größenordnung und weisen relativ geringe Standardabweichungen auf. Allerdings sind zwischen den einzelnen Mittelwerten relativ große Streuungen aufgetreten. Im Rahmen des vorliegenden Forschungsvorhabens und in Kombination mit dem AiF-Forschungsvorhaben Nr. 21835 wurde an Probekörpern aus CEM I-Beton des Herstellers 1 aus Charge 1 eine 7-fache Wiederholung durchgeführt. Dies ermöglicht in einem ersten Ansatz die Streuungen der Versuchsergebnisse einzuordnen. In Abbildung 10 wird deutlich, dass auch ohne Variation des Zementherstellers und der Zementcharge (H1, Ch 1) bereits relativ hohe Streuungen aufgetreten sind. Die Unterschiede, die sich zwischen den einzelnen Mittelwerten von Proben mit Zement von Hersteller 1 aus Charge 1 ergeben, sind somit bereits höher als die Unterschiede zwischen den Chargen 1-3 von Hersteller 1. Gleiches gilt für die Unterschiede, die sich zwischen den Chargen der Hersteller 2 und 3 ergeben. Betrachtet man die Chloridmigrationskoeffizienten je Hersteller zusammengefasst über alle Chargen, so fällt auf, dass die Versuche an Beton mit Zement von Hersteller 1 im Mittel niedrigere Werte ergeben als die der Hersteller 2 und 3. Die im Mittel höchsten Chloridmigrationskoeffizienten weist Beton mit Zement von Hersteller 2 auf. Dennoch liegen auch die Unterschiede zwischen den drei Herstellern in einer ähnlichen Größenordnung wie die Unterschiede, die sich ohne Variation von Zementhersteller und -charge beobachten lassen.

Die Migrationskoeffizienten der Betone mit CEM II/A-LL 42,5 N + FA (Abbildung 11) zeigen ähnlich große Streuungen, wobei die Streuungen der Mehrfachbestimmung hier geringer ausfallen. Zusätzlich zur Mehrfachbestimmung an Betonproben mit Zement von Hersteller 1 wurden Doppelbestimmungen an Betonen mit Zement von Hersteller 2 und 3, jeweils aus Charge 1 durchgeführt. Diese zeigen insbesondere bei Hersteller 3 deutliche Unterschiede. Somit sind keine systematisch höheren Unterschiede zwischen Chloridmigrationskoeffizienten durch die Variation der Zementcharge erkennbar. Die über alle Chargen gemittelten Chloridmigrationskoeffizienten der drei Hersteller weisen nur unwesentliche Unterschiede auf.

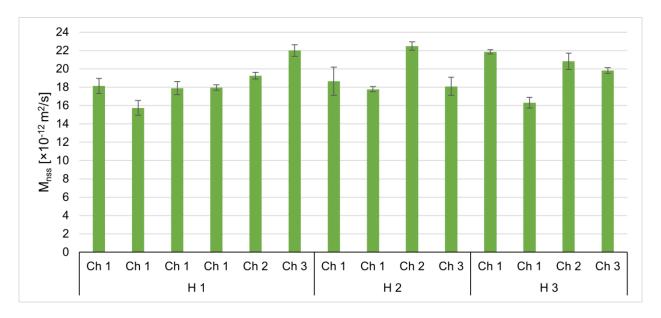


Abbildung 11: Migrationskoeffizient der Betone mit CEM II/A-LL 42,5 N (Z2)

Bei Betonen mit den Zementen Z1, Z2 und Z4 ergaben die zusätzlich durchgeführten Wiederholungsversuche relativ ähnliche Chloridmigrationskoeffizienten. Bei den zusätzlichen Versuchen mit CEM II/B-S (Z3) ergaben sich allerdings Chloridmigrationskoeffizienten, die weder dem Ergebnis des Erstversuchs noch dem Ergebnis der ersten Wiederholung ähneln (vgl. Abbildung 12). Die Ursache für diese enormen Schwankungen beim Beton mit CEM II/B-S (H1, Ch1), konnte nicht abschließend geklärt werden. Auf Basis des Vergleichs der Ergebnisse der RCM-Tests an Proben mit dem gleichen Zement von allen drei Herstellern und aus allen Chargen sollte das Ergebnis der ersten Wiederholung (M_{nss} < 4 ■ 10⁻¹² m²/s) als Ausreißer gewertet werden. Mittels des Dean-Dixon Tests auf Ausreißer auf Basis der Versuchsergebnisse von FE 1 und FE 3 konnte dieser Wert auch mathematisch als Ausreißer identifiziert werden. Er wird in der weiteren Betrachtung nicht berücksichtigt.

Auch ohne die Berücksichtigung des Ausreißers sind zwischen den Chloridmigrationskoeffizienten an Proben mit Zement von Hersteller 1 aus Charge 1 deutlichere Unterschiede vorhanden, als bei der Variation der Herstellungscharge. Die Unterschiede zwischen den Chlorismigrationskoeffizienten der Chargen 1 bis 3 von Hersteller 2 und 3 sind ebenfalls geringer als die Unterschiede, die sich bereits ohne Variation der Charge ergeben. Beim chargenübergreifenden Vergleich wird deutlich, dass die mittleren Chloridmigrationskoeffizienten der Proben mit Zement von Hersteller 1 und 2 relativ nah beieinander aber deutlich höher als jene an Proben mit Zement von Hersteller 3 liegen. Die dabei festzustellenden Unterschiede liegen dennoch in einer ähnlichen Größenordnung wie die Unterschiede, die ohne Variation von Zementhersteller und -charge auftreten.

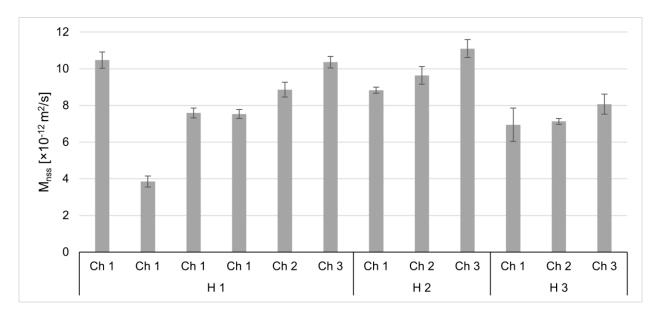


Abbildung 12: Migrationskoeffizient der Betone mit CEM II/B-S 42,5 N (Z3)

Abbildung 13 zeigt die Ergebnisse der Chloridmigrationsversuche am Beton mit CEM III/A. Die Migrationskoeffizienten schwanken auch hier relativ stark. Mit Ausnahme eines Ausreißers liegen die Werte im Allgemeinen dennoch in einer für CEM III/A-Betone erwartbaren Größenordnung. Das Ergebnis des RCM-Tests an Betonproben mit CEM III/A, von Hersteller 2 aus Charge 3 (M_{nss} > 8 • 10⁻¹² m²/s) wird im Nachgang der Berichtserstellung wiederholt, im Folgenden aber vorerst als Ausreißer behandelt und auch in der nachfolgenden statistischen Auswertung nicht berücksichtigt. Entsprechend des Vorgehens bei Betonen mit Z1 bis Z3 zur vergleichenden Einordnung der Schwankungen der Chloridmigrationskoeffizienten sind auch bei Betonen mit CEM III/A keine systematischen Zusammenhänge auf Basis der Variation von Zementhersteller und -charge und den ermittelten Chloridmigrationskoeffizienten festzustellen Bei der Betrachtung der Chloridmigrationskoeffizienten in Verbindung mit den Anteilen der Zementhauptbestandteile ist jedoch festzustellen, dass der niedrigste Hüttensandanteil (Hersteller 2, vgl. Tabelle 1) zu erhöhten Chloridmigrationskoeffizienten führt. Dies spiegelt sich auch in Zeile 4 von Tabelle 10 wieder.

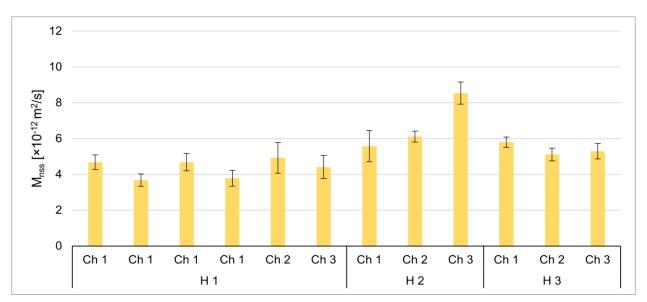


Abbildung 13: Migrationskoeffizient der Betone mit CEM III/A 42,5 N (Z4)

Die Mittelwerte sowie die zugehörigen Standardabweichungen der Ergebnisse sind im Anhang in Tabelle A 6 angegeben.

In Ergänzung zur Auswertung der RCM-Versuche nach DIN EN 12390-18 [5] wurden die Spezifische Ladungsflussrate (SCFR) nach [6] sowie der elektrolytische Widerstand der Probekörper ermittelt und mit den Chloridmigrationskoeffizienten ins Verhältnis gesetzt. Das Verhältnis der SCFR_{24h}-Auswertung zum Chloridmigrationskoeffizienten stellt für die Betone mit CEM II/A-LL, CEM II/B-S und CEM III/A eine gute lineare Korrelation mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,933 dar. Bei gleichzeitiger Betrachtung von CEM I-Betonen verschlechtert sich die Korrelation und es ergibt sich ein Bestimmtheitsmaß von 0,769. Zur Untersuchung des Einflusses der Versuchsdauer für die SCFR-Auswertung wurde die spezifische Ladungsflussrate über 24 Stunden und über 6 Stunden einander gegenübergestellt. Daraus ergab sich eine lineare Korrelation mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,998. Die Gegenüberstellung des im RCM-Versuchsstand bestimmten spezifischen Elektrolytwiderstands der Proben mit den Chloridmigrationskoeffizienten führt bei der Regression mit einer Potenzfunktion zu einem Bestimmtheitsmaß von 0,84. Die Ergebnisse der Begleituntersuchungen zu AS 1 sind im Anhang in Abbildung A 1 bis A 4 dargestellt.

3.2.5.3 Statistische Auswertung und Bewertung der Signifikanz

Die statistische Einordnung der Versuchsergebnisse dient als Hilfsmittel zur sachlogischen Bewertung der Ergebnisse. Dabei ist sowohl die jeweils geringe Stichprobengröße zu berücksichtigen, als auch die bekanntermaßen hohen Versuchsstreuungen bei Chloridmigrationsversuchen [5]. Aufgrund des großen Versuchsumfangs des Forschungsvorhabens wurden die Probekörper für die Chloridmigrationsversuche in diesem Arbeitsschritt in Stahlzylinderschalungen hergestellt, anschließend drei Bohrkernscheiben aus einem Zylinder entnommen und in Anlehnung an DIN EN 12390-18 [5] geprüft. Die gemeinsame Herstellung der Probekörper, aus deren Ergebnissen des RCM-Tests sich ein Mittelwert berechnet, führt zu sehr geringen herstellungsbedingten Streuungen (Standardabweichung, vgl. Fehlerbalken in Abbildung 10 bis Abbildung 13) der drei Einzelwerte. Die herstellungsbedingten Streuungen treten stattdessen fast ausschließlich zwischen den Mittelwerten der einzelnen RCM-Versuche auf. Das erschwert die Differenzierung von herstellungs- und versuchsbedingten Streuungen von Schwankungen der Chloridmigrationskoeffizienten, die sich möglicherweise aus der Variation von Zementhersteller und -charge ergeben könnten. Bezogen auf die statistische Auswertung mittles Varianzanalysen führt das zu scheinbar höherer Präzision der Einzelwerte innerhalb eines Merkmals verglichen mit der Schwankung zwischen den Merkmalen und bewirkt somit in der Varianzanalyse eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von nichtzutreffenden Nullhypothesen.

Die Statistische Auswertung basiert auf Varianzanalysen, für die folgende Hypothesen sowie ein Signifikanzniveau von $\alpha = 0.05$ festgelegt wurde:

"Es besteht kein Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten durch die Variation des Herstellers des verwendeten Zements."

"Es besteht kein Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten durch die Variation der Herstellungscharge des verwendeten Zements."

Bei der Durchführung der Varianzanalysen zur Untersuchung des Hersteller- und Chargeneinflusses des Zements auf den Chloridmigrationskoeffizienten wurden zunächst der Herstellereinfluss (Zeile 1-4 in Tabelle 10) und anschließend der Chargeneinfluss separat je Hersteller (Zeile 5-16 in Tabelle 10) untersucht. Die vier verwendeten Zementarten wurden dabei ebenfalls separat betrachtet.

Tabelle 10: Ergebnisse der Varianzanalysen zur Untersuchung signifikanter Einflüsse der Zementherkunft und -charge auf den Chloridmigrationskoeffizienten Mnss

Nr.	0-Hypothese: Kein statistisch signifi- kanter (α=0,05) Einfluss auf M _{nss} durch:	Betrachtet		P-Wert	Ergebnis: 0-Hypothese	
1	Zementhersteller	CEM I		0,001	trifft nicht zu	
2	Zementhersteller	CEM II/A-LL		0,217	trifft zu	
3	Zementhersteller	CEM II/B-S		0,000*)	trifft nicht zu	
4	Zementhersteller	CEM III/A		0,000*)	trifft nicht zu	
5	Herstellungscharge	0=144	H 1	0,072	trifft zu	
6	Herstellungscharge	CEM I	H 2	0,055	trifft zu	
7	Herstellungscharge		H 3	0,258	trifft zu	
8	Herstellungscharge	051411/411	H 1	0,000	trifft nicht zu	
9	Herstellungscharge	CEM II/A-LL	H 2	0,000	trifft nicht zu	
10	Herstellungscharge		H 3	0,391	trifft zu	
11	Herstellungscharge	051411/0-0	H 1	0,004	trifft nicht zu	
12	Herstellungscharge	CEM II/B-S	H 2	0,001	trifft nicht zu	
13	Herstellungscharge		H 3	0,132	trifft zu	
14	Herstellungscharge	0514111/4	H 1	0,218	trifft zu	
15	Herstellungscharge	CEM III/A	H 2	0,872*)	trifft zu	
16	Herstellungscharge		H 3	0,134	trifft zu	
*) oh	*) ohne Berücksichtigung der benannten Ausreißer					

Anhand der Varianzanalysen konnte festgestellt werden, dass bei drei von vier Zementarten ein statistisch signifikanter ($\alpha=0.05$) Unterschied zwischen den Chloridmigrationskoeffizienten der Proben mit Zementen verschiedener Hersteller vorliegt (Nullhypothese trifft nicht zu). In Tabelle 11 sind die Ergebnisse der Varianzanalyse nochmals angegeben und mit den Variationskoeffizienten der statistisch untersuchten Mittelwerte in Zusammenhang gesetzt. Darüber hinaus sind die aus dem Chlortest-Projekt [36] bekannten Variationskoeffizienten in Abhängigkeit der Höhe des mittleren Chloridmigrationskoeffizienten angegeben. Trotz der nichtzutreffenden Nullhypothesen liegen alle Variationskoeffizienten unter den aus der Literatur bekannten Werten.

Die Varianzanalysen zur Untersuchung des Chargeneinflusses des Zements ergaben nur in vier Fällen einen statistisch signifikanten Einfluss auf die Chloridmigrationskoeffizienten. Da CEM II/A-LL (Zeile 8 und 9 in Tabelle 11) verglichen mit anderen Zementen eine geringen Chlorideindringwiderstand aufweist und somit für Chlorid-beanspruchte Bauteile in der Praxis nicht eingesetzt wird, sind hier keine Literaturangaben zu Variationskoeffizienten angegeben.

Tabelle 11: Ergebnisse der Varianzanalyse in Relation zu den Variationskoeffizienten

Nr.	0-Hypothese: Kein statistisch signi- fikanter Einfluss auf M _{nss} durch:	Betrachtet		Ergebnis: Nullhypo- these	Variations- koeffizient der MW [%]	Variations- koeffizient Chlortest- Projekt [36]
1	Zementhersteller	CEM I		trifft nicht zu	9,7	21,9
2	Zementhersteller	CEM II/A-LL		trifft zu	3,5	-
3	Zementhersteller	CEM II/B-S		trifft nicht zu	14,0*)	21,6
4	Zementhersteller	CEM III/A		trifft nicht zu	15,8*)	16,6
5	Herstellungscharge	CEM I	H 1	trifft zu	9,6	21,9
6	Herstellungscharge		H 2	trifft zu	7,4	16,7
7	Herstellungscharge		H 3	trifft zu	5,1	21,9
8	Herstellungscharge	CEM II/A-LL	H 1	trifft nicht zu	11,6	-
9	Herstellungscharge		H 2	trifft nicht zu	12,6	-
10	Herstellungscharge		H 3	trifft zu	7,2	-
11	Herstellungscharge	CEM II/B-S	H 1	trifft zu	16,7	21,6
12	Herstellungscharge		H 2	trifft nicht zu	11,7	21,6
13	Herstellungscharge		H 3	trifft zu	7,4	21,6
14	Herstellungscharge	CEM III/A	H 1	trifft zu	8,3	16,6
15	Herstellungscharge		H 2	trifft zu	0,3*)	21,6
16	Herstellungscharge		H 3	trifft zu	6,6	16,6
*) oh	ne Berücksichtigung der b	enannten Ausre	ißer			

3.2.5.4 Fazit

Anhand der deskriptiven und der statistischen Auswertung in Relation zu den aus der Literatur bekannten Variationskoeffizienten ist auf Basis der vorliegenden Versuchsergebnisse keine systematische Abhängigkeit der Chloridmigrationskoeffizienten von der Zementherkunft (Hersteller) und der Zementcharge festzustellen. Für tiefergehende Untersuchungen und eine aussagekräftigere statistische Auswertung sind umfangreichere Untersuchungen erforderlich.

Abbildung 14 zeigt die Einordnung der Chloridmigrationskoeffizienten in die XRDS-Klassen nach EN 206-100 Draft 14 [29] in Abhängigkeit der zementartbezogenen Altersexponenten (vgl. Kapitel 3.2.2) sowie die Einordnung in die XRDS-Klassen nach dem Entwurf der ERC-Richtlinie des DAfStb [30]. Je Zementart liegen die meisten Ergebnisse unabhängig von Zementhersteller und -charge in einer Expositionswiderstandsklasse nach dem Entwurf der ERC-Richtlinie des DAfStb [30], mit Ausnahme des CEM I-Betons, dessen Chloridmigrationskoeffizienten sich auf Klassen XRDS 5 und XRDS 10 verteilen. Dabei ist darauf hinzuweisen, dass die Druckfestigkeiten der Betone und die Ergebnisse weiterer Begleituntersuchungen (Frischbeton) unabhängig von der Zementart in sehr ähnlichen Bereichen lagen (CEM II/A-LL-Proben zeigten etwas geringere Druckfestigkeiten). Lediglich die benannten Ausreißer bei CEM II/B-S- und CEM III/A-Betonen liegen deutlich außerhalb der übrigen Ergebnisse und damit deutlich in anderen Expositionswiderstandsklassen. In Bezug auf die Klasseneinteilung nach EN 206-100 Draft 14 (hellgraue Grenzen in Abbildung 14) liegen die Chloridmigrationskoeffizienten je verwendeter Zementart verteilt über zwei bis vier Expositionswiderstandsklassen (ohne die Ausreißer bei CEM II/B-S und CEM III/A).

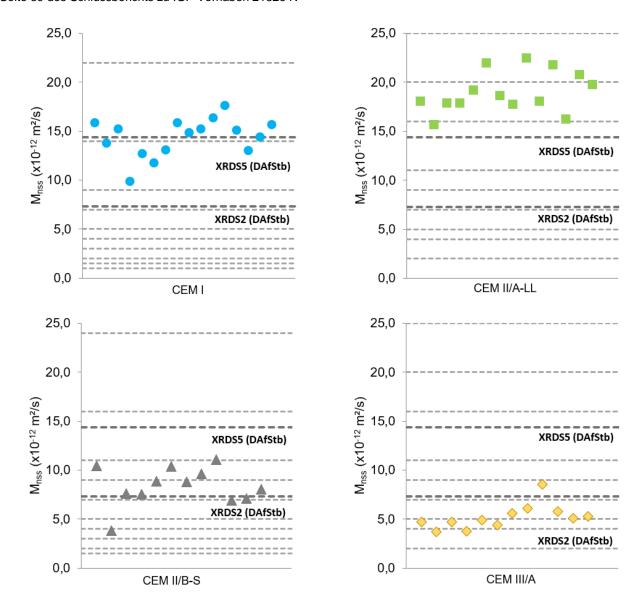


Abbildung 14: Einordnung der Chloridmigrationskoeffizienten in die Expositionswiderstandsklassen XRDS nach EN 206-100 Draft 14 (hellgraue Linien) und ERC-Richtlinie des DAfStb [30] (dunkelgraue Linien)

In Abbildung 14 und den folgenden gleichartigen Abbildungen zur Einordnung der Versuchsergebnisse in die XRDS- und XRC-Klassen sind die Klassengrenzen nach EN 206-100 Draft 14 [29] als hellgrau gestrichelte Linien eingezeichnet. Die Klassengrenzen nach dem Entwurf der ERC-Richtlinie des DAfStb Stand 2023-08 [30] sind dunkler hervorgehoben und benannt. Auf die Benennung der übrigen Klassengrenzen nach EN 206-100 Draft 14 wird zugunsten der Übersichtlichkeit der Diagramme verzichtet. Die zugehörigen Werte der Klassengrenzen können Tabelle 5 für die XRDS-Klassen und Tabelle 7 für die XRC-Klassen entnommen werden.

3.2.6 Einfluss der Zementherkunft und der Zementcharge auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit (AS 1, FE 1)

3.2.6.1 Durchführung

Die Untersuchung des Einflusses von Zementhersteller und -charge erfolgte an jeweils zwei Balken mit einer Querschnittsfläche von 100 x 100 mm². Die Balken wurden in einer Schalung hergestellt, anschließend mittig durch einen Sägeschnitt getrennt und im Folgenden wie in Abschnitt 3.2.3 vorbereitet und geprüft. Die Ergebnisse der zugehörigen Druckfestigkeitsprüfungen sind in Abschnitt 3.2.5.1 angegeben.

3.2.6.2 Ergebnisse

Die in Abbildung 15 bis Abbildung 18 dargestellten Versuchsergebnisse sind jeweils die mittleren Karbonatisierungsgeschwindigkeiten K_{AC}, die an jeweils zwei Probekörpern durch die Bestimmung der Eindringtiefe der Karbonatisierungsfront nach 7, 28 und 70 Tagen berechnet wurden. Die Ergebnisse sind auf der Abszisse nach Merkmal, also je Hersteller und Charge sowie für die Wiederholungen der Karbonatisierungsversuche einzeln dargestellt. Die jeweiligen Mittelwerte weisen in den meisten Fällen relativ geringe Standardabweichungen (vgl. Fehlerindikatoren) auf, schwanken untereinander jedoch deutlich, auch ohne Variation von Zementhersteller und Zementcharge (vgl. z.B. Z1, H1, Ch1). Bei der Beurteilung der Versuchsergebnisse und deren Schwankungen sind die relativ geringe Stichprobengröße je Merkmal und die bekanntermaßen hohen Streuungen bei Karbonatisierungsversuchen [18] zu berücksichtigen.

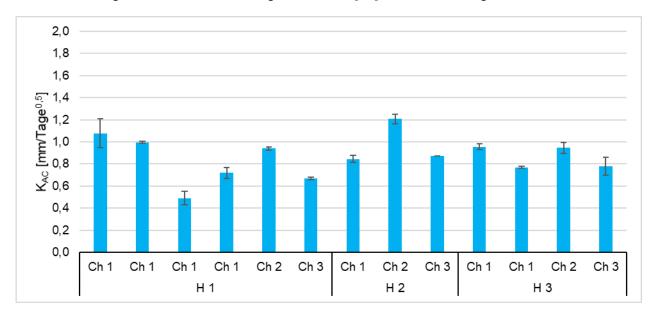


Abbildung 15: Karbonatisierungsgeschwindigkeit K_{AC} der Betone mit CEM I 42,5 R (Z1)

Abbildung 15 zeigt die mittleren Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Probekörper mit CEM I. Hier wurde für die Proben mit Zement des Herstellers 1 aus Charge 1 eine 5-Fach-Bestimmung entsprechend des Projektantrags vorgenommen. Aufgrund eines fehlgeschlagenen Versuchs sind im Diagramm nur vier Werte angegeben. Diese Abweichung von der vorgesehenen Anzahl der Ergebnisse stellt keine relevante Beeinflussung der Aussagekraft der Versuchsergebnisse dar. Darüber hinaus wurde mit dem Zement von Hersteller 3 aus Charge 1 eine Doppelbestimmung vorgenommen. Die Ergebnisse der 4-Fach-Bestimmung zeigen bereits deutliche Unterschiede zwischen den Karbonatisierungsgeschwindigkeiten des Betons mit Zement von Herstel-

ler 1 aus Charge 1, die größer sind als die Unterschiede, die sich bei der Variation der Zementcharge von Hersteller 1 ergeben. Vergleicht man die Größe der Schwankungen über alle Versuchsergebnisse wird deutlich, dass die Unterschiede der 4-Fach-Bestimmung bereits höher ausfallen, als es durch eine Variation von Zementcharge oder Zementhersteller der Fall ist. So sind auch die Unterschiede zwischen den einzelnen Chargen von Hersteller 1 geringer. Bei den Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Proben mit Zement von Hersteller 1 fällt auf, dass sich lediglich Charge 2 deutlich von den anderen beiden Chargen unterscheidet. Auch dieser Unterschied fällt geringer aus als die Schwankungen der 4-Fach-Bestimmung. Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten bei Beton mit CEM I von Hersteller 3 zeigen bei Variation der Herstellungscharge des Zements relativ geringe Schwankungen. Bei zusammenfassender Betrachtung der Chargen der jeweiligen Hersteller wird deutlich, dass sich zwischen den Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone mit Zement der verschiedenen Hersteller nur relativ geringe Schwankungen ergeben.

In Abbildung 16 sind die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone mit CEM II/A-LL dargestellt. Eine Doppelbestimmung hat an Probekörpern mit Zement des Herstellers 1 aus Charge 1 stattgefunden. Ähnlich wie bei den Karbonatisierungsgeschwindigkeiten an CEM I-Betonen treten auch hier deutliche Schwankungen zwischen den einzelnen Mittelwerten und damit zwischen den Merkmalen Zementhersteller und -charge auf. Diese liegen jedoch in der Regel im Bereich der Größenordnung der Schwankungen der Doppelbestimmung. Die Ergebnisse der Betone mit Zement von Hersteller 2 zeigen im Vergleich die größten Schwankungen zwischen den einzelnen Chargen, während bei Hersteller 3 vergleichsweise geringe Schwankungen zwischen den Chargen festzustellen sind. Beim chargenübergreifenden Vergleich der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der einzelnen Hersteller ist festzustellen, dass die Schwankungen deutlich ausgeprägter sind als bei CEM I-Betonen. Hierbei ist jedoch zu berücksichtigen, dass sich die Schwankungen zwischen den Chargen innerhalb der jeweiligen Hersteller befinden.

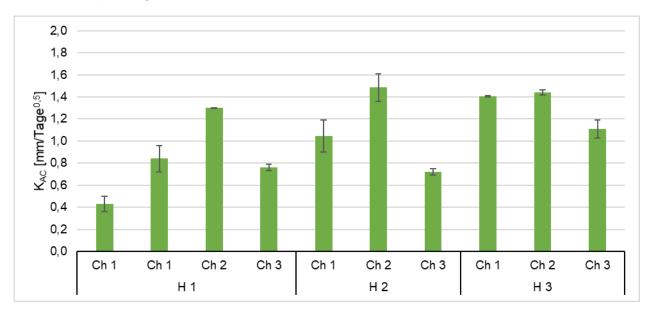


Abbildung 16: Karbonatisierungsgeschwindigkeit K_{AC} der Betone mit CEM II/A-LL 42,5 N (Z2)

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Proben mit CEM II/B-S-Betonen sind in Abbildung 17 dargestellt. Die Versuchsergebnisse zeigen relativ geringe Schwankungen sowohl zwischen den Herstellungschargen einzelner Hersteller als auch zwischen den Herstellern. Die Streuungen

der Versuchsergebnisse liegen in der Größenordnung der Streuung der Doppelbestimmung an Proben mit Zement von Hersteller 1 aus Charge 1.

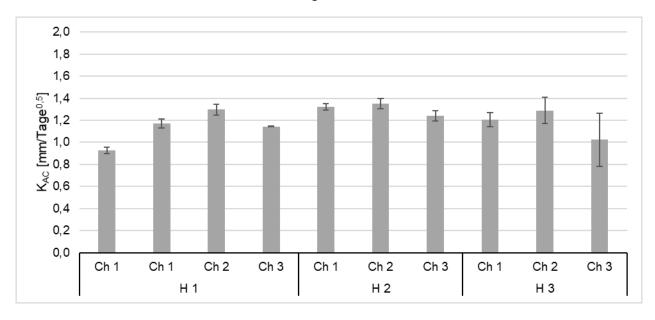


Abbildung 17: Karbonatisierungsgeschwindigkeit K_{AC} der Betone mit CEM II/B-S 42,5 N (Z3)

Die Streuungen der Doppelbestimmung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit fällt bei den Versuchen an CEM III/A-Betonen, wie in Abbildung 18 dargestellt, relativ gering aus. Die übrigen Schwankungen sind größer. Die Darstellung der Hersteller und Chargen erfolgte in der festgelegten Reihenfolge. Dass die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten in dieser Reihenfolge von Charge 1 zu Charge 3 bei allen Herstellern zunehmen, ist rein zufällig. Zwischen den Chargen der Hersteller besteht untereinander kein Zusammenhang.

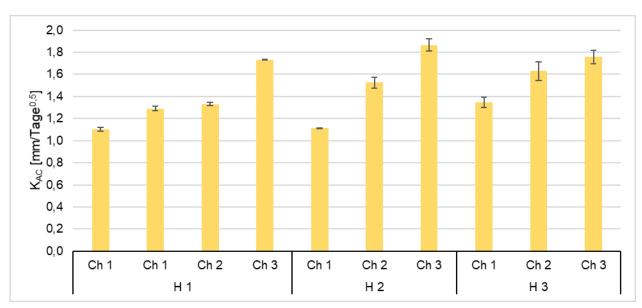


Abbildung 18: Karbonatisierungsgeschwindigkeit K_{AC} der Betone mit CEM III/A 42,5 N (Z4)

3.2.6.3 Statistische Auswertung und Bewertung der Signifikanz

Die statistische Einordnung der Versuchsergebnisse dient als Hilfsmittel zur sachlogischen Bewertung der Ergebnisse. Dabei ist die jeweils geringe Stichprobengröße zu berücksichtigen.

Aufgrund des großen Prüfumfangs wurden die beiden Probekörper analog zu den Probekörpern für die RCM-Versuche pro Merkmal (Zementhersteller und -charge) jeweils in einer Schalung hergestellt. Somit sind diese beiden Probekörper homogener als Proben die in unterschiedlichen Schalungen separat hergestellt werden. Die herstellungsbedingten Streuungen in Bezug auf die Festbetoneigenschaften sind daher zwischen den beiden Einzelwerten, aus denen sich die einzelnen Mittelwerte zusammensetzten deutlich geringer, als die herstellungsbedingten Streuungen zwischen mehreren Mittelwerten. Dieser größere Unterschied wird bei den Mehrfachbestimmungen im Vergleich zur Standardabweichung (dargestellt als Fehlerindikator) in Abbildung 15 bis Abbildung 18 deutlich und schlägt sich auch auf den Vergleich der Karbonatisierungsgeschwindigkeit von Betonen mit Zement von verschiedenen Herstellern und aus verschiedenen Chargen nieder. Die statistische Folge daraus ist eine scheinbar höhere Präzision der Einzelwerte innerhalb eines Merkmals verglichen mit der Schwankung zwischen den Merkmalen. Dieser Unterschied bewirkt in der Varianzanalyse eine Erhöhung der Wahrscheinlichkeit des Auftretens von nichtzutreffenden Nullhypothesen.

Als Nullhypothese für die Varianzanalyse wurde analog zu Abschnitt 3.2.5.3 festgelegt:

"Es besteht kein Einfluss auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit durch die Variation des Herstellers des verwendeten Zements."

"Es besteht kein Einfluss auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit durch die Variation der Herstellungscharge des verwendeten Zements."

In Tabelle 12 sind die Ergebnisse der Varianzanalysen angegeben. Die statistische Untersuchung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit ergibt nur in einem Fall (Zeile 2) einen statistisch signifikanten Unterschied durch die Variation des Zementherstellers. Bei der Abhängigkeit der Karbonatisierungsgeschwindigkeit von der Zementcharge wurden fünf von zwölf Nullhypothesen als zutreffend identifiziert. In diesen Fällen liegt beim Signifikanzniveau von α=0,05 kein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten vor. Bei den weiteren sieben Varianzanalysen liegt ein statistisch signifikanter Unterschied zwischen den Mittelwerten vor. Ob dieser Unterschied durch die Variation der Zementcharge hervorgerufen wird oder durch herstellungsbedingte Unterschiede zwischen den Probekörpern kann aufgrund der geringen Stichprobengröße nicht beurteilt werden. Betrachtet man die in Tabelle 12 angegebenen Variationskoeffizienten der Mittelwerte, so wird deutlich, dass diese bei zutreffenden Nullhypothesen in der Regel deutlich niedriger sind als bei nicht zutreffenden Nullhypothesen. Dies liegt am Zusammenhang der Varianzanalyse mit den Streuungen der Versuchsergebnisse, liefert jedoch keine weiteren Erkenntnisse zur Ursache der höheren Streuungen. Vergleichsuntersuchungen mit acht europäischen Laboren ergaben für einen Beton aus CEM II/A-LL 42,5 R einen Variationskoeffizienten von 9,12 % [37]. Die Variationskoeffizienten der zutreffenden Varianzanalysen liegen in der Regel in dieser Größenordnung.

Tabelle 12: Ergebnisse der Varianzanalyse in Relation zu den Variationskoeffizienten

Nr.	0-Hypothese: Kein statistisch signifi- kanter (α=0,05) Einfluss auf M _{nss} durch:	Betrachtet		P-Wert	Ergebnis: 0-Hypothese	Variati- onskoef- fizient der MW [%]
1	Zementhersteller	CEM I		0,246	trifft zu	9,8
2	Zementhersteller	CEM II/A-LL		0,027	trifft nicht zu	22,6
3	Zementhersteller	CEM II/B-S		0,085	trifft zu	7,4
4	Zementhersteller	CEM III/A		0,328	trifft zu	7,3
5	Herstellungscharge		H 1	0,513	trifft zu	16,5
6	Herstellungscharge	CEMI	H 2	0,002	trifft nicht zu	20,7
7	Herstellungscharge		H 3	0,480	trifft zu	10,2
8	Herstellungscharge		H 1	0,028	trifft nicht zu	39,4
9	Herstellungscharge	CEM II/A-LL	H 2	0,015	trifft nicht zu	35,2
10	Herstellungscharge		H 3	0,008	trifft nicht zu	24,7
11	Herstellungscharge		H 1	0,131	trifft zu	10,6
12	Herstellungscharge	CEM II/B-S	H 2	0,158	trifft zu	4,3
13	Herstellungscharge		H 3	0,355	trifft zu	11,6
14	Herstellungscharge		H 1	0,002	trifft nicht zu	19,6
15	Herstellungscharge	CEM III/A	H 2	0,001	trifft nicht zu	25,0
16	Herstellungscharge	1	H 3	0,018	trifft nicht zu	13,4

3.2.6.4 Fazit

Zur Einordnung der Streuungen dient die 4-Fach-Bestimmung am CEM I von Hersteller 1 aus Charge 1. Hier treten auch ohne Variation von Zementhersteller und -charge Prüfergebnisse auf, die sich mit einem Faktor von ca. 2 unterscheiden. Somit sind die hohen Streuungen zwischen den Mittelwerten der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten nicht unbedingt auf die Variation der Zementcharge zurückzuführen. Einen weiteren Indikator, der gegen eine Chargenabhängigkeit spricht, bieten die in Tabelle 1 angegebenen Zementzusammensetzungen. Diese unterscheiden sich zwischen den Chargen je Hersteller nur sehr geringfügig, sodass nicht von einem maßgeblichen Einfluss der Zementzusammensetzung auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit ausgegangen werden muss.

Abbildung 19 zeigt die Einordnung der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone für alle verwendeten Zemente in das Konzept der Expositionswiderstandsklassen nach Entwurf 14 der prEN 206-100 [29] und dem Entwurf der ERC-Richtlinie des DAfStb [30]. Dafür wurden die Klassengrenzen für natürliche Karbonatisierungsbedingungen gemäß [30] anhand der Angaben aus [32] so umgerechnet, dass sie den Klassengrenzen für die Karbonatisierungsbedingungen nach DIN EN 12390-12 [4] entsprechen (vgl. auch Tabelle 8) Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit steigt mit geringerem Klinkergehalt des verwendeten Zements an. Die Ergebnisse der Betone mit den Zementen CEM I, CEM II/A-LL sowie CEM II/B-S liegen in der Expositionswiderstandsklasse XRC 5 beziehungsweise am Übergang zu XRC 7 nach dem Entwurf der ERC-Richtlinie des DAfStb (XRC 5 und XRC 7, dunkelgraue gestrichelte Linien in Abbildung 19). Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten von Beton mit CEM III/A liegen ca. zwischen 1,0 und 2,0 mm/Tage^{0,5} und somit im Bereich der Expositionswiderstandsklassen XRC 5 und 7. In Bezug auf die Expositionswiderstandsklassen nach EN 206-100 Draft 14 (hellgraue und dunkelgraue gestrichelte Linien in

Abbildung 19) liegen die Ergebnisse je Zementart verteilt in bis zu fünf Expositionswiderstandsklassen.

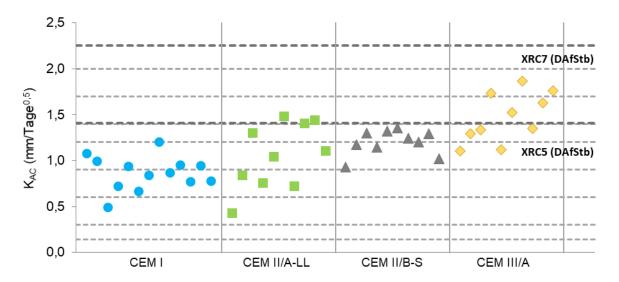


Abbildung 19: Einordnung der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten K_{AC} der Betone zu den Expositionswiederstandsklassen nach EN 206-100 Draft 14 (hellgraue Linien) und ERC-Richtliniedes DAfStb (dunkelgraue Linien)

3.2.7 Einfluss der Zementhauptbestandteile bei Portlandkompositzementen (AS 2)

3.2.7.1 Vorgehen und Materialien

Zur Untersuchung des Einflusses unterschiedlicher Zementhauptbestandteile wurden drei sogenannte "Zukunftszemente" in das Versuchsprogramm aufgenommen. Diese Zemente zeichnen sich durch einen reduzierten Klinkergehalt aus (siehe Tabelle 13). Es handelt sich hierbei um einen Portlandkompositzement (CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N), einen Kompositzement (CEM V/A (S-P) 42,5 N) und einen Experimentalzement CEM X 35K-45LL-20S mit einem Klinkergehalt von 35 %, einem Hüttensandgehalt von 20 % und einem Kalksteinmehlanteil von 45 %.

Tabelle 13: Zusammensetzung der Zemente in AS 2

Bezeichnung	FZ1	FZ2	FZ3
Zementart	CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N	CEM V/A (S-P) 42,5 N	CEM X 35K-45LL-20S
Herkunft	Nordrhein-Westfalen	Rheinland-Pfalz	Nordrhein-Westfalen
Klinkergehalt (%)	50-64	50-64	35
Hüttensand (%)	16-44	18-26	20
Kalksteinmehl (%)	6-20	-	45
Rheinischer Trass (%)	-	18-24	-

Die Auswahl der Zemente für AS 2 erfolgte nach Rücksprache mit dem projektbegleitenden Ausschuss. Mit den Zementen wurden zwei Betonserien hergestellt, die sich in ihren w/z-Werten unterschieden (siehe Tabelle 14).

Tabelle 14: Eckdaten von Betonen in AS 2

Bezeichnung	050	040
Wasser-Zement-Wert	0,50	0,40
Wassergehalt (I/m³)	175	156
Leimgehalt (I/m³)	292-296	290-291

Mit den Zukunftszementen sollten, genauso wie im Hauptteil des Forschungsvorhabens, baustellentaugliche Betone der Konsistenzklasse F4 hergestellt werden.

3.2.7.2 Frischbetoneigenschaften

Die Ausbreitmaße der Betone mit Zukunftszementen sind in Abbildung 20 gegeben. Es ist erkennbar, dass Betone mit CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N zwischen 10 und 60 Minuten den geringsten Rückgang der Verarbeitbarkeit aufwiesen. Der Experimentalzement CEM X 35K-45LL-20S zeigte im gleichen Zeitraum ein deutliches Rücksteifen.

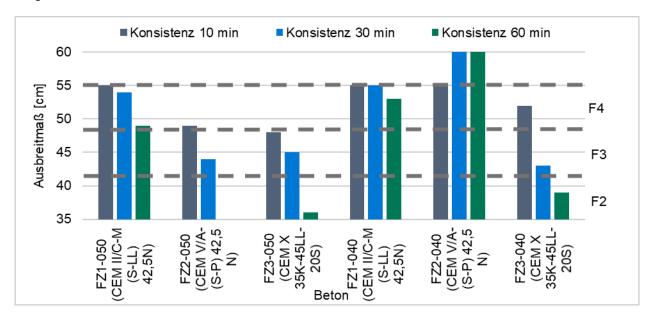


Abbildung 20: Ausbreitmaße der Betone mit Zukunftszementen

Unmittelbar nach dem Mischende wurde der Wassergehalt einer Teilprobe in der Mikrowelle bestimmt. Hieraus wurde der w/z-Wert nach Darren berechnet. Die Kernfeuchte der Gesteinskörnung wurde hierbei berücksichtigt. Die Ergebnisse der w/z-Werte nach Darren sind in Abbildung 21 gegeben. Die w/z-Werte der Betone mit den Experimentalzementen lagen unterhalb des Zielwertes. Dies sollte bei der weiteren Betrachtung beachtet werden. Die Ursache für die relativ niedrigen w/z-Werte mit dem Zukunftszement FZ3 (CEM X) konnte nicht gefunden werden. Schwankende Eigenschaften der Ausgangsstoffe (Rohdichten und Feuchtegehalte der Gesteinskörnung) könnten eine Ursache für die im Vergleich zur Mischungsberechnung zu geringen w/z-Werte sein.

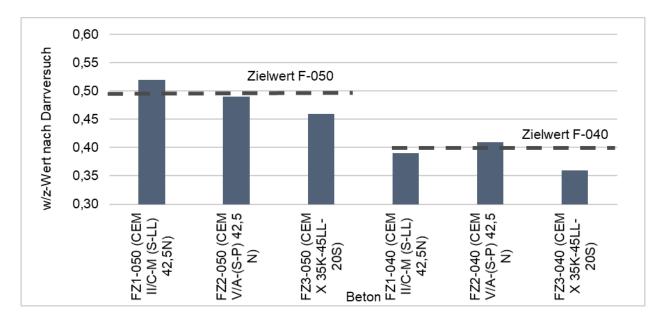


Abbildung 21: w/z-Werte nach Darren

Die Frischbetonrohdichten der Mischungen aus AS 2 sind in Abbildung 22 gegeben. Die Werte liegen im Bereich von Normalbeton.

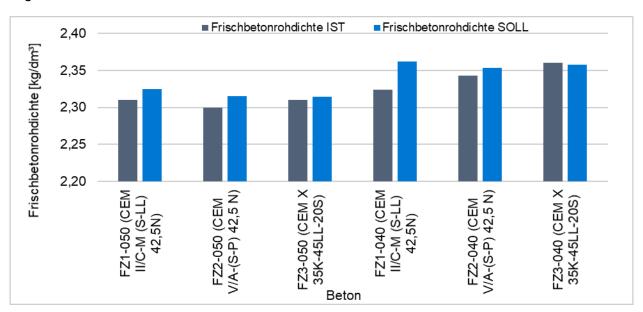


Abbildung 22: Frischbetonrohdichten der Betone aus AS 2

Die Luftporengehalte der Betone aus AS 2 sind in Abbildung 23 gegeben. Die Luftporengehalte IST liegen geringfügig über dem rechnerischen Luftporengehalt SOLL von 1,5 Vol.-%.

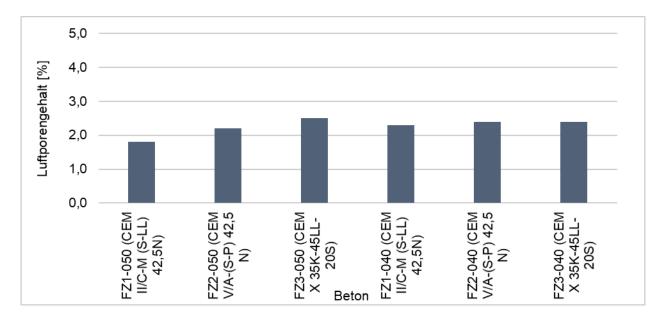


Abbildung 23: Luftporengehalte der Betone aus AS 2

Die Zusatzmittelgehalte der Betone aus AS 2 sind in Abbildung 24 dargestellt. Es ist erkennbar, dass der Experimentalzement den höchsten Zusatzmittelanspruch aufwies. Möglicherweise ist der hohe Zusatzmittelanspruch in Mischungen mit Experimentalzement CEM X 35K-45LL-20S auch auf die relativ niedrigen w/z-Werte (ermittelt im Darrversuch) dieser Mischungen zurückzuführen.

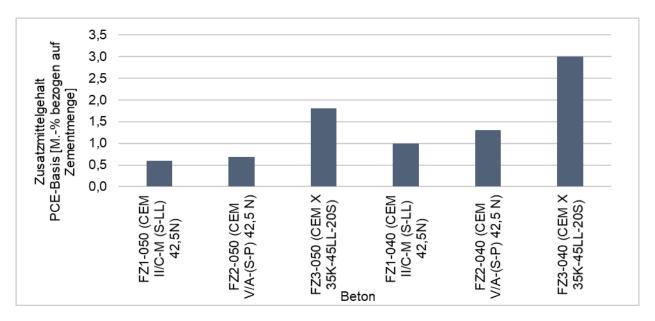


Abbildung 24: Zusatzmittelgehalte der Betone aus AS 2

3.2.7.3 Festbetoneigenschaften

Die Druckfestigkeiten der Zukunftszemente aus den beiden Betonserien sind in Abbildung 25 gegeben. Es ist erkennbar, dass der Experimentalzement CEM X 35K-45LL-20S aufgrund des geringeren Klinkergehalts niedrigere Festigkeiten erreicht als der CEM II/C-M (S-LL) und der CEM V/A (S-P). Durch die Absenkung des w/z-Wertes von 0,50 auf 0,40 wurden mit den Zementen aus AS 2 um 15 bis 16 MPa höhere Druckfestigkeiten erzielt (siehe Abbildung 25).

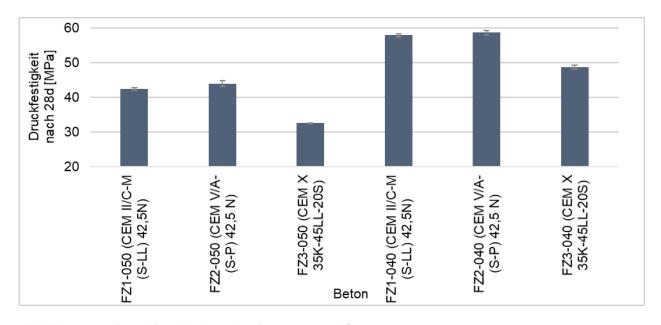


Abbildung 25: Druckfestigkeiten der Betone aus AS 2

In Tabelle 15 ist die statistische Auswertung der Druckfestigkeiten aus AS 2 gegeben. Die Standardabweichung liegt zwischen 0,1 und 0,8 MPa. Der Variationskoeffizient liegt zwischen 0,8 und 1,7 % innerhalb der Serien. Es sind keine Ausreißer erkennbar.

Tabelle 15: Statistische Auswertung Druckfestigkeit der Betone in AS 2

Beton	Einzelwert (MPa)	Einzelwert (MPa)	Einzelwert (MPa)	Mittelwert (MPa)	Standard- abwei- chung (MPa)	Variations- koeffizient (%)
FZ1-050	42,3	42,1	42,8	42,4	0,4	0,9
FZ2-050	44,7	43,2	44,1	44,0	0,8	1,7
FZ3-050	32,6	32,6	32,5	32,6	0,1	0,2
FZ1-040	57,5	58,4	57,7	57,9	0,5	0,8
FZ2-040	59,3	58,7	57,9	58,6	0,7	1,2
FZ3-040	48,1	49,2	48,8	48,7	0,6	1,1

Abbildung 26 stellt die relative Druckfestigkeit der Betone aus AS 2 dar. Als Referenz wurden die Mischungen mit w/z-Wert 0,50 genommen. Die Absenkung des w/z-Wertes von 0,50 auf 0,40 ergab einen Anstieg der Druckfestigkeiten um 33 bis 49 %. Der größte Anstieg wurde mit dem Experimentalzement CEM X 35K-45LL-20S beobachtet. Die hier beobachteten Festigkeitszuwächse lagen deutlich über dem Erwartungswert von ca. 25 % für Zemente der Festigkeitsklasse 42,5 nach den Walz-Kurven.

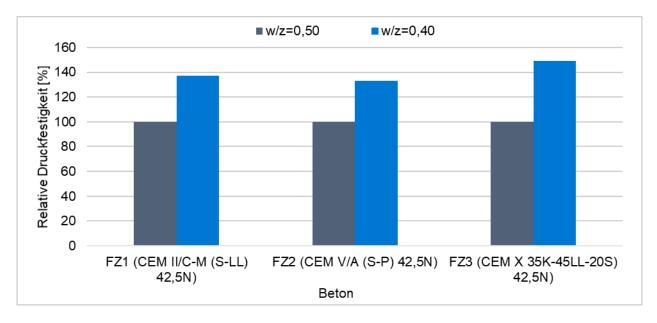


Abbildung 26: Relative Druckfestigkeiten der Betone aus AS 2

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten K_{AC} (mm/ \sqrt{T} age) der Betone aus AS 2 sind in Abbildung 27 gegeben. Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten von Zukunftszementen FZ1 (CEM II/C-M (S-LL)) und FZ2 (CEM V/A (S-P)) waren vergleichbar mit den Zementen Z3 (CEM II/B-S) und Z4 (CEM III/A) aus der Hauptserie. Die Verringerung des w/z-Wertes von 0,50 auf 0,40 führt bei den Zukunftszementen zu Karbonatisierungsgeschwindigkeiten, die denen eines CEM I entsprachen (CEM I aus AS 3.1 mit 0,87 mm/ \sqrt{T} age).

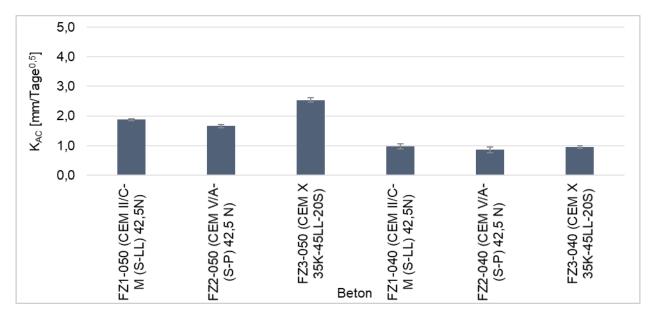


Abbildung 27: Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone aus AS 2

In Tabelle 16 ist die statistische Auswertung der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten aus AS 2 gegeben. Die Standardabweichung liegt zwischen 0,0 und 0,1 mm/ \sqrt{T} agen. Der Variationskoeffizient liegt zwischen 0,8 und 13,3 % innerhalb der Serien. Es sind keine Ausreißer erkennbar.

Tabelle 16: Statistische	Auswertung Karbonat	isierunasaeschwindiake	it der Betone in AS 2

Beton	Einzelwert (mm/√Tage)	Einzelwert (mm/√Tage)	Einzelwert (mm/√Tage)	Mittelwert (mm/√Tage)	Standard- abweichung (mm/√Tage)	Variations- koeffizient (%)
FZ1-050	1,9	1,9	1,9	1,9	0,0	0,0
FZ2-050	1,6	1,6	1,7	1,6	0,1	3,5
FZ3-050	2,6	2,5	2,5	2,5	0,1	2,3
FZ1-040	1,1	0,9	0,9	1,0	0,1	11,9
FZ2-040	1,0	0,8	0,8	0,9	0,1	13,3
FZ3-040	0,9	0,9	1,0	0,9	0,1	6,2

Abbildung 28 stellt die relativen Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone aus AS 2 dar. Die Referenzwerte (100 %) sind Mischungen mit w/z-Wert 0,50. Die Absenkung des w/z-Wertes von 0,50 auf 0,40 führte zu einer Reduzierung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit von 47 bis 60 %. Der größte Rückgang wurde mit dem Experimentalzement CEM X 35K-45LL-20S beobachtet.

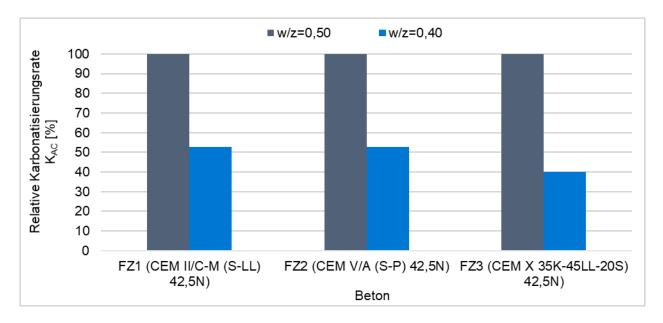


Abbildung 28: Relative Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone aus AS 2

In Abbildung 29 sind die Chloridmigrationskoeffizienten M_{nss} (x 10^{-12} m²/s) der Betone aus AS 2 dargestellt. Der CEM X 35K-45LL-20S weist den höchsten Chloridmigrationskoeffizienten auf. Dies ist wahrscheinlich auf den relativ hohen Kalksteingehalt des Experimentalzements zurückzuführen.

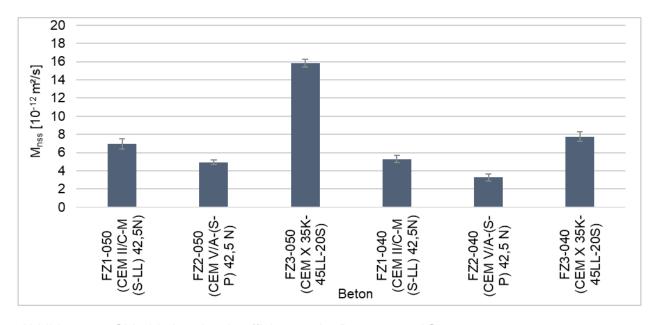


Abbildung 29: Chloridmigrationskoeffizienten der Betone aus AS 2

In Tabelle 17 ist die statistische Auswertung der Chloridmigrationskoeffizienten aus AS 2 gegeben. Die Standardabweichung liegt zwischen 0,3 und 0,6 x 10⁻¹² m²/s. Der Variationskoeffizient liegt zwischen 2,6 und 11,6 % innerhalb der Serien. Ausreißer sind nicht erkennbar.

Tabelle 17: Statistische Auswertung Chloridmigrationskoeffizienten der Betone in AS 2

Beton	Einzelwert (10 ⁻¹² m ² /s)	Einzelwert (10 ⁻¹² m ² /s)	Einzelwert (10 ⁻¹² m ² /s)	Mittelwert (10 ⁻¹² m ² /s)	Standard- abweichung (10 ⁻¹² m ² /s)	Variations- koeffizient (%)
FZ1-050	7,6	6,5	6,8	7,0	0,6	8,2
FZ2-050	5,2	4,9	4,7	4,9	0,3	5,1
FZ3-050	15,7	16,3	15,5	15,8	0,4	2,6
FZ1-040	5,4	5,6	4,9	5,3	0,4	6,8
FZ2-040	3,0	3,1	3,7	3,3	0,4	11,6
FZ3-040	8,0	7,2	8,1	7,8	0,5	6,4

Die relativen Chloridmigrationskoeffizienten sind in Abbildung 30 beschrieben. Die Referenzwerte (100 %) sind Mischungen mit w/z-Wert 0,50. Die Absenkung des w/z-Wertes von 0,50 auf 0,40 führte zu einem Rückgang der Chloridmigrationskoeffizienten um 24 bis 51 %. Der größte Rückgang wurde mit dem Experimentalzement CEM X 35K-45LL-20S beobachtet.

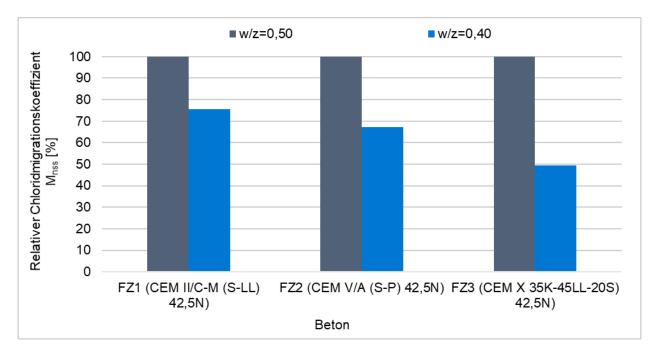


Abbildung 30: Relative Chloridmigrationskoeffizienten der Betone aus AS 2

3.2.7.4 Fazit

Im Arbeitsschritt 2 wurden drei Zemente mit reduzierten Klinkeranteilen (sogenannte "Zukunftszemente") in zwei Betonrezepturen verwendet, die sich im w/z-Wert unterschieden (w/z 0,50 und w/z 0,40). Bei gleichen w/z-Werten waren die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Zukunftszemente FZ1 (CEM II/C-M (S-LL)) und FZ2 (CEM V/A (S-P)) vergleichbar mit den Zementen Z3 (CEM II/B-S) und Z4 (CEM III/A) aus der Hauptserie (siehe Kapitel 3.2.5 und Abbildung 31). Der Experimentalzement FZ3 (CEM X 35K-45LL-20S) wies, wie zu erwarten, die höchsten Karbonatisierungsgeschwindigkeiten auf.

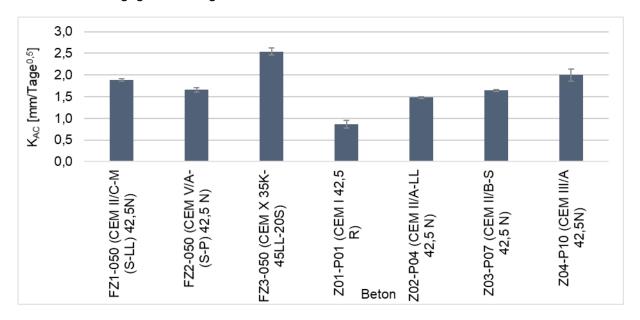


Abbildung 31: Karbonatisierungsraten der Betone aus AS 2 und AS 3.1

Bei gleichen w/z-Werten waren die Chloridmigrationskoeffizienten von FZ1 und FZ2 vergleichbar mit denen von Z3 und Z4 aus der Hauptserie (siehe Kapitel 3.2.5 und Abbildung 32). Der Chloridmigrationskoeffizient von FZ3 lag im Bereich eines CEM I.

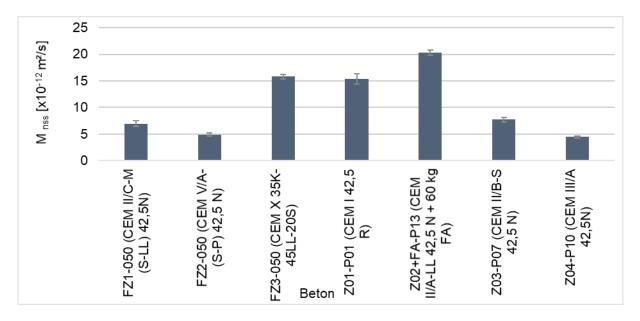


Abbildung 32: Chloridmigrationskoeffizienten der Betone aus AS 2 und AS 3.1

Die Absenkung des w/z-Wertes von 0,50 auf 0,40 führte in Betonen mit den Zukunftszementen zu einer Reduzierung der Chloridmigrationskoeffizienten um 24 bis 51 % und zu einer Reduzierung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit um 47 bis 60 %. Bei w/z-Werten von 0,40 zeigten Betone mit FZ1, FZ2 und FZ3 Karbonatisierungsgeschwindigkeiten, die denen eines CEM I entsprachen.

Abbildung 33 zeigt die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone aus AS 2 unter Berücksichtigung der Expositionswiderstandsklassen XRC. Bei w/z-Werten von 0,50 liegen die drei Zukunftszemente im Bereich von XRC 7 bis XRC 9. Die Absenkung des w/z-Wertes von 0,50 auf 0,40 führt dazu, dass alle Zukunftszemente innerhalb der Widerstandsklasse XRC 5 liegen.

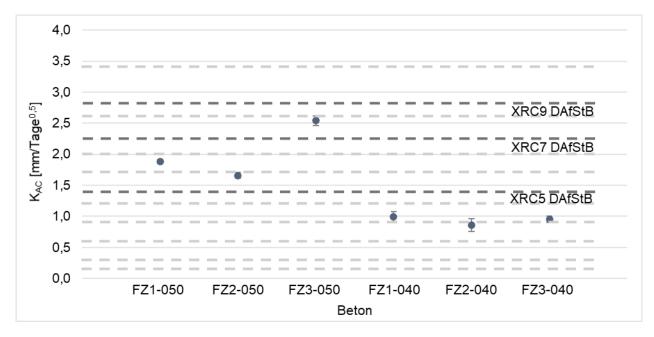


Abbildung 33: Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone aus AS 2 unter Berücksichtigung der Expositionswiderstandsklassen XRC nach EN 206-100 Draft 14

Die Chloridmigrationskoeffizienten der Betone aus AS 2 unter Berücksichtigung der Expositionswiderstandsklassen XRDS sind in Abbildung 34 dargestellt. Bei w/z-Werten von 0,50 liegen die drei Mischungen mit Zukunftszementen in den drei Klassen XRDS 2 bis XRDS 10. Durch die Reduzierung der w/z-Werte von 0,50 auf 0,40 liegen die Betone mit den Zukunftszementen innerhalb der beiden Klassen XRDS 2 und XRDS 5.

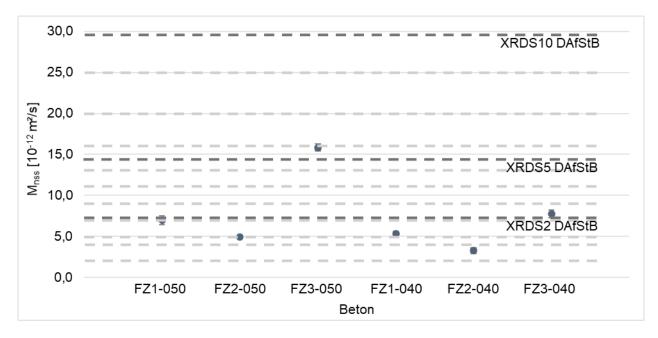


Abbildung 34: Chloridmigrationskoeffizienten der Betone aus AS 2 unter Berücksichtigung der Expositionswiderstandsklassen XRDS nach EN 206-100 Draft 14

3.2.8 Einfluss des Zement- und des Wassergehalts (AS 3.1)

3.2.8.1 Allgemein

Im AS 3.1 wurden durch die Forschungseinrichtung 3 (VDZ) Versuche zum Einfluss der Dosiergenauigkeit nach DIN 1045-2 [3] und DIN EN 206-1 [2] auf die Dauerhaftigkeit der Betone durchgeführt. Die maximale Abweichung ergibt sich durch die zugelassene Toleranz bei der Einwaage der Ausgangsstoffe von ± 3 M.-% und der möglichen Aussteuerung der Frischbetoneigenschaften durch Anpassung des Zementgehalts bzw. der Flugasche um ± 15 kg/m³. Dadurch ergibt sich für jede untersuchte Zementart (Z1-Z4) eine Referenzmischung und je eine Mischung mit erhöhtem oder verringertem w/z-Wert. Für die Zementart Z2 wurden zwischen zwei Mischungen unterschieden. Zur Prüfung des Chloridmigrationskoeffizienten wurden dem Zement 60 kg/m³ Flugasche zugegeben. Eine Übersicht der Betonmischungen ist in Tabelle 18 dargestellt.

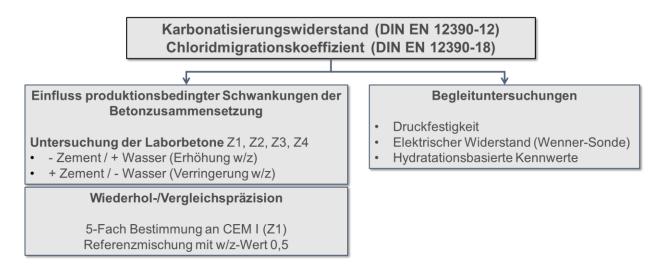


Abbildung 35: Prüfmatrix VDZ – Arbeitsschritt 3.1: Einfluss der Dosiergenauigkeit

Durch Anwendung der nach DIN 1045-2 zugelassenen maximalen Abweichungen ergibt sich eine w/z-Wert Spannweite von ± 0,5. Die nach DIN 1045-2 maximal zulässige w/z-Wert Abweichung vom Zielwert ist auf + 0,02 begrenzt. Bei der Ausreizung der zulässigen Grenzen über die zulässigen w/z-Wert-Schwankungen hinaus handelt es sich um eine experimentelle Betrachtung und soll eine Einschätzung ermöglichen inwiefern die Materialwiderstände durch Absenkung des w/z-Wertes optimiert werden können. Eine Übersicht über die Betonmischungen mit gezielten w/z-Wert-Abweichungen ist in Tabelle 18 gegeben. Die Ergebnisse der Frischbetonuntersuchungen und Druckfestigkeitsprüfungen sind zusammen mit den Einzelwerten der Chloridmigrationsund Karbonatisierungsversuchen in Tabelle A 3 und in Tabelle A 5 im Anhang dargestellt.

Tabelle 18: Übersicht der Betonmischungen mit gezielten w/z-Wert-Abweichungen

Nummer [-]	Bindemittelart [-]	Bindemittelgehalt z [kg/m³]	w/z-Wert [-]
P01 ¹⁾		353	0,50
P02	CEM I 42,5 R (Z1)	338	0,55
P03		368	0,45
P04 ³⁾		350	0,50
P05 ³⁾	CEM II/A-LL 42,5 N (Z2)	335	0,55
P06 ³⁾		365	0,45
P07		350	0,50
P08	CEM II/B-S 42,5 N (Z3)	335	0,55
P09		365	0,45
P10		348	0,50
P11	CEM III/A 42,5 N (Z4)	333	0,55
P12		363	0,45
P13 ⁴⁾	051411/4 11 40 5 11 (70)	328 ²⁾	0,50
P14 ⁴⁾	CEM II/A-LL 42,5 N (Z2) + FA	313 ²⁾	0,55
P15 ⁴⁾	717	3432)	0,45

- 1) zusätzlich Wiederholmischungen zur 5-fach Bestimmung
- 2) Bindemittelgehalt errechnet zu z+k*f mit k=0,40
- 3) Z2 für Karbonatisierungswiderstand nach DIN EN 12390-12 [4]
- 4) Z2+FA für Chloridmigrationskoeffizient nach DIN EN 12390-18 [5]

3.2.8.2 Aussteuerung des w/z-Wertes

Zur Charakterisierung der Gesteinskörnungsfraktionen wurde der Wassergehalt je Fraktion im kernfeuchten, oberflächentrockenen Zustand bestimmt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 19 dargestellt. Im Vorfeld jeder Betonage wurde außerdem die Eigenfeuchte der Gesteinskörnungsfraktionen durch Darren bestimmt. Die so ermittelten Wassergehalte der einzelnen Fraktionen über den Versuchszeitraum sind in Abbildung 36 dargestellt. Durch den Vergleich des Zustandes "kernfeucht" mit der durch Darren ermittelten Eigenfeuchte vor Beginn der Betonagen wurde dann die nötige Menge Zugabewasser zum Erreichen des Soll-w/z-Wertes errechnet. Dieses Vorgehen soll eine möglichst genaue Aussteuerung des w/z-Wertes ermöglichen und ein starkes Saugverhalten oder einen Eintrag von zusätzlicher Feuchte in die Mischung durch die Gesteinskörnung verhindern.

Labelle 19: Wassergehalt	der kernteuchten	Gesteinskörnung
--------------------------	------------------	-----------------

Korn- fraktion	Rohdichte [kg/dm³]	Wassergehalt kernfeucht [M%]
0/2	2,61	1,20
2/8	2,58	1,72
8/16	2,58	1,69

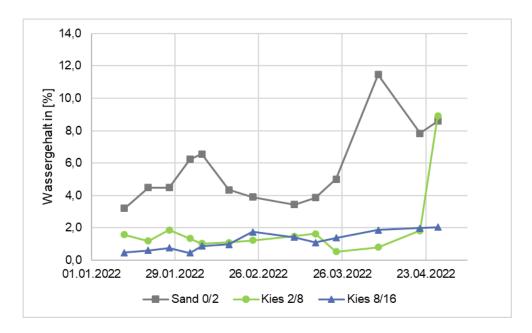


Abbildung 36: Wassergehalt [%] der Gesteinskörnungsfraktionen über den Prüfzeitraum

Bei jeder Betonage wurden die Ist-w/z-Werte durch Mikrowellendarren bestimmt. Hierzu wurden ca. 1,5 kg des frischen Betons in einer Mikrowelle in 4-Minuten Intervallen bis zur Massekonstanz getrocknet. Zwischen den Darrvorgängen wurde der frische Beton jeweils aufgerührt, um ein ungehindertes Entweichen des Wassers sicherzustellen. Zur Berechnung der Ist-w/z-Werte wird davon ausgegangen, dass die Kernfeuchte der Gesteinskörnung während des Darrvorgangs vollständig entweicht. Der Ist-w/z-Wert ergibt sich durch Abzug der Kernfeuchte der Gesteinskörnungsfraktionen, dargestellt in Tabelle 19, vom durch Darren ermittelten w/z-Wert der jeweiligen Mischungen. Die Ergebnisse der Darrversuche unter Berücksichtigung der Kernfeuchte der Gesteinskörnungen sind in Tabelle 20 dargestellt. Zur Auswertung der Versuchsergebnisse wird die

absolute Abweichung der Ist-w/z-Werte vom Referenzwert w/z = 0,5 herangezogen. Es ist davon auszugehen, dass mit dem Darrversuch in Verbindung mit der Annahme, dass zum Zeitpunkt der Betonage eine optimal kernfeuchte Gesteinskörnung vorliegt nur Näherungswerte des Ist-w/z-Wertes bestimmt werden können. Die größte Fehlerquelle bei der Berechnung der w/z-Werte entsteht nicht durch den Darrvorgang, sondern durch die angesetzte Eigen- beziehungsweise Kernfeuchte der Gesteinskörnungsfraktionen. Diese hat einen signifikanten Einfluss auf den errechneten w/z-Wert. Die Absolutwerte der Ist-w/z-Werte unterliegen daher einer gewissen Unsicherheit, jedoch können die relativen Verhältnisse zwischen den Mischungen näherungsweise abgebildet werden. Die Frischbetonrohdichte und der LP-Gehalt wurden nach DIN EN 12350-6 bzw. DIN EN 12350-7 bestimmt. Zwischen der Frischbetonrohdichte und dem ermittelten w/z-Wert konnte keine eindeutige Korrelation festgestellt werden. Daher eignet sie sich hier nicht als alternatives Mittel zur Auswertung. Informationen zum Darrversuch und den Frischbetoneigenschaften sind im Anhang in Tabelle A 3 dargestellt.

Tabelle 20: Ist - w/z-Werte nach Darrverfahren unter Berücksichtigung der Kernfeuchte

Nummer [-]	Art [-]	Frischbetonroh- dichte [kg/m³]	w/z-Wert (Ist) ¹⁾ [-]	Differenz REF ²⁾
P01		2309	0,47	-0,03
P01(1)		2294	0,49	-0,01
P01(2)		2329	0,54	+0,04
P01(3)		2302	0,50	0,00
P01(4)	CEM I 42,5 R (Z1)	2335	0,53	+0,03
P02 ³⁾		2318	0,57	+0,07
P02(1)		2326	0,57	+0,07
P03 ³⁾		2319	0,45	-0,05
P03(1)		2339	0,43	-0,07
P04	CEM II/A-LL 42,5 N (Z2)	2306	0,56	+0,06
P04(1)		2300	0,49	-0,01
P05		2320	0,59	+0,09
P06		2312	0,48	-0,02
P07	05M H/D 0 40 5 M	2309	0,53	+0,03
P08	CEM II/B-S 42,5 N (Z3)	2319	0,58	+0,08
P09	(20)	2334	0,47	-0,03
P10		2314	0,57	+0,07
P11	CEM III/A 40 E N (74)	2284	0,62	+0,12
P12	CEM III/A 42,5 N (Z4)	2308	0,50	+0,00
P12(1)		2303	0,42	-0,08
P13		2317	0,54	+0,04
P13(1)	CEM II/A-LL 42,5 N	2317	0,49	-0,01
P14	(Z2) + FA	2309	0,60	+0,10
P15		2309	0,49	-0,01

¹⁾ nach Darren abzüglich Kernfeuchte GK

²⁾ nach Darren gegenüber Referenz von 0,5

³⁾ Zementgehalt 353 kg/m³

3.2.8.3 Einfluss des w/z-Wertes auf den Chloridmigrationskoeffizienten

Abbildung 37 bis Abbildung 40 zeigen die mittleren Chloridmigrationskoeffizienten von je drei Proben der Betone mit Z1 bis Z4 in Abhängigkeit vom w/z-Wert (nach Darren) in absteigender Reihenfolge. Die Standardabweichung wird über den Fehlerindikator angegeben.

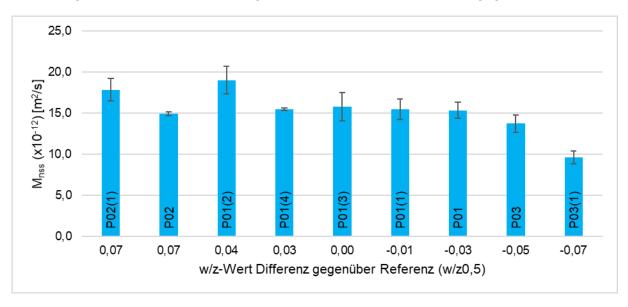


Abbildung 37: Migrationskoeffizienten der Betone mit CEM I 42,5 R (Z1) nach w/z-Wert Differenz (absteigend)

In Abbildung 37 sind die Chloridmigrationskoeffizienten der Betone mit Z1 dargestellt. An dieser Mischung wurde zur Einordnung der Prüfschwankungen eine 5-fach-Bestimmung durchgeführt. Auffällig ist hierbei, dass bereits innerhalb einer Prüfung größere Schwankungen, dargestellt durch die Standardabweichung als Fehlerindikatoren, auftreten. Keine der ermittelten Prüfstreuungen liegt außerhalb der Wiederholpräzision von 11 %. Wie zu erwarten, sinkt der Chloridmigrationskoeffizient mit abnehmendem w/z-Wert. Ein Zusammenhang zwischen der Streubreite innerhalb einer Prüfung und dem w/z-Wert lässt sich jedoch nicht erkennen.

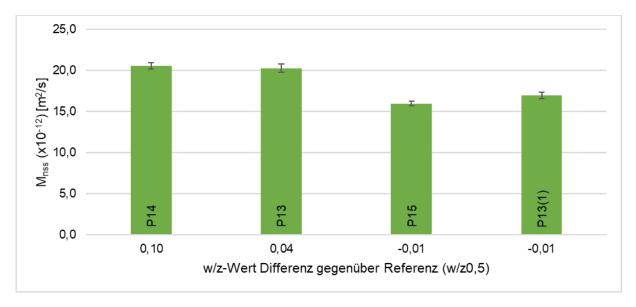


Abbildung 38: Migrationskoeffizienten der Betone mit CEM II/A-LL 42,5 N (Z2+FA) nach w/z-Wert Differenz (absteigend)

Die Betone mit Z2+FA, dargestellt in Abbildung 38, weisen deutlich geringere Prüfstreuungen als die Z1-Betone auf. Auffällig ist bei dieser Prüfreihe der nahezu identische Chloridmigrationskoeffizient der Proben P14 und P13, trotz einer ermittelten w/z-Wert-Differenz von +0,06. Die Migrationskoeffizienten der Proben P15 und P13(1) sind bei identischen w/z-Werten sehr ähnlich und liegen untereinander innerhalb der Prüfungenauigkeit.

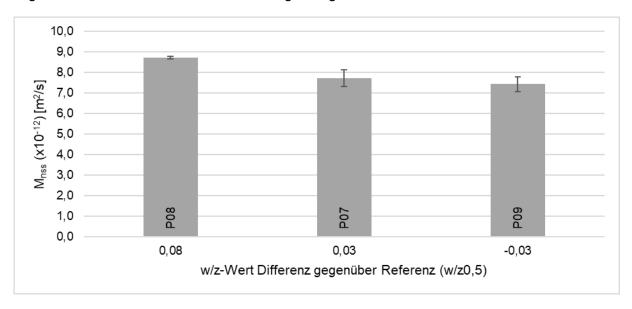


Abbildung 39: Migrationskoeffizienten der Betone mit CEM II/B-S 42,5 N (Z3) nach w/z-Wert Differenz (absteigend)

Die Chloridmigrationskoeffizienten der Betone mit Z3 sind in Abbildung 39 dargestellt. Je geringer der w/z-Wert, desto geringer ist auch der ermittelte Chloridmigrationskoeffizient. Die Streuungen der Probe P08 dieser Prüfreihe sind sehr gering aber auch die Streuungen der Proben P07 und P09 liegen innerhalb der vorgegebenen Wiederholpräzision.

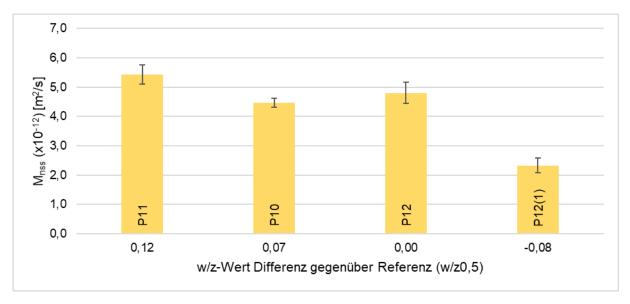


Abbildung 40: Migrationskoeffizienten der Betone mit CEM III/A 42,5 N (Z4) nach w/z-Wert Differenz (absteigend)

In Abbildung 40 sind abschließend die Chloridmigrationskoeffizienten der Betone mit Z4 dargestellt. Die Proben der Mischung P10 weisen trotz eines größeren w/z-Wertes einen geringeren

Migrationskoeffizienten als P12 auf, liegen aber innerhalb er Prüfstreuung der Proben P12. Der errechnete w/z-Wert der Proben P12(1) liegt mit -0,08 deutlich unterhalb der Referenzprobe mit w/z = 0,5, was sich wiederum in dem deutlich verringerten Migrationskoeffizienten widerspiegelt.

Zusätzlich zum Chloridmigrationskoeffizienten wurde die spezifische Ladungsflussrate SCFR nach Stengl [6] entsprechend Abschnitt 3.2.2 ermittelt. Der aus der angelegten Prüfspannung errechnete SCFR-Wert ist in Abbildung 41 dem Chloridmigrationskoeffizienten gegenübergestellt. In die Ermittlung der spezifischen Ladungsflussrate gehen die Versuchsdauer, die angelegte Spannung und die mittlere Stromstärke ein. Betone mit CEM I 42,5 R (Z1) wurden fast ausschließlich mit einer Spannung von 15 V geprüft, die angelegte Spannung der übrigen Prüfungen lagen zwischen 20 V und 30 V. Gleichzeitig wurden ähnliche Stromstärken gemessen, was dazu führt, dass die ermittelten SCFR-Werte von denen der Betone mit Zementen Z2 bis Z4 abweichen. Daher wurden bei Ermittlung der Trendlinie die Ergebnisse der Betone mit Z1 nicht berücksichtigt.

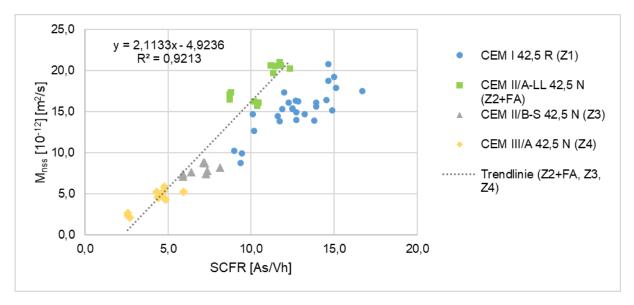


Abbildung 41: Spezifische Ladungsflussrate nach Stengl [6]

Als alternative Baustellenprüfung stellt Stengl den spezifischen Elektrolytwiderstand R'_{TEM} vor, der mithilfe der Zweielektrodenmethode (TEM) bestimmt und dem Chloridmigrationskoeffizient M_{nss} gegenübergestellt wird. In diesen Versuchsreihen wurde zusätzlich zum spezifischen Elektrolytwiderstand der elektrische Widerstand mittels Wennersonden-Messung mit einem Elektrodenabstand von 38 mm bestimmt. Die Ergebnisse sind in Abbildung 42 dargestellt. Für die Zementarten Z2+FA, Z3 und Z4 wurde eine gute Korrelation festgestellt. Die Trendlinien wurden auf Basis der Betone mit Z2+FA, Z3 und Z4 erstellt.

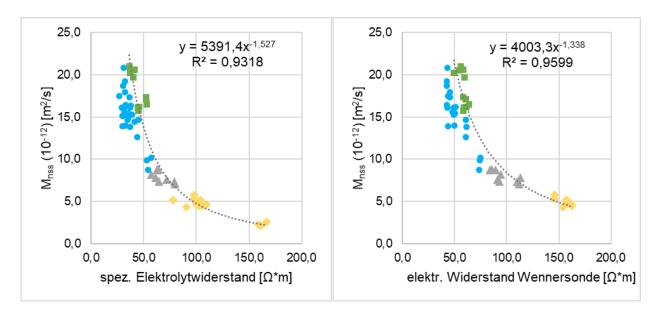


Abbildung 42: Spezifischer Elektrolytwiderstand und elektrischer Widerstand

In Abbildung 43 sind die Chloridmigrationskoeffizienten aller Betone (Z1 bis Z4) nach Exposure Resistance Classes aus Entwurf 14 der prEN 206-100 [29] und nach der ERC-Richtlinie des DAfStb [30] kategorisiert. Der Vergleich innerhalb einer Betonsorte macht den Einfluss der prüfungsbedingten Schwankungen und die Optimierungsmöglichkeiten über einen abgesenkten w/z-Wert deutlich. Die bisher vorgesehenen Klassen nach dem Entwurf der ERC-Richtlinie des DAfStb [30] ermöglichen hier den Verbleib einer Betonsorte innerhalb einer XRDS-Klasse, sofern die zulässigen Schwankungen in der Mischungszusammensetzung eigenhalten werden.

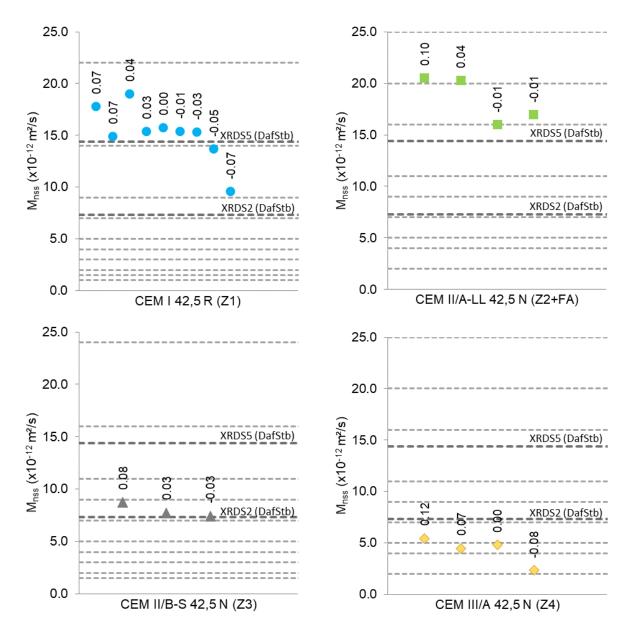


Abbildung 43: Einordnung der Betone mit Z1 – Z4 in Exposure Resistance Classes nach EN 206-100 Draft 14 [29] (hellgraue Linien) und ERC-Richtlinie des DAfStb [30] (dunkelgraue Linien) nach Zementart und w/z-Wert Differenz (absteigend) in Abhängigkeit vom Altersexponenten

3.2.8.4 Einfluss des w/z-Wertes auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit

Abbildung 44 bis Abbildung 47 zeigen die mittlere Karbonatisierungsgeschwindigkeit von je drei Proben der Betone Z1 bis Z4 in Abhängigkeit vom w/z-Wert (nach Darren) in absteigender Reihenfolge. Die Standardabweichung wird über den Fehlerindikator angegeben.

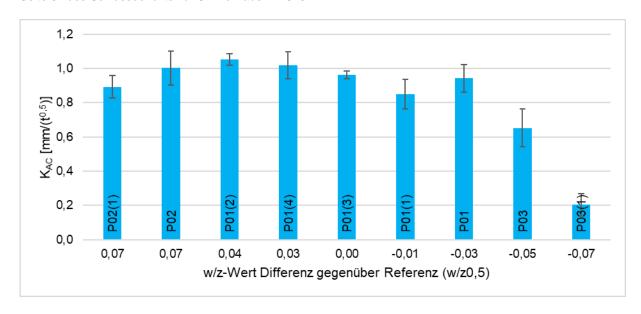


Abbildung 44: Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone mit CEM I 42,5 R (Z1) nach w/z-Wert Differenz (absteigend)

An den Betonen mit CEM I 42,5 R (Referenz) wurde zur Einordnung der Prüfschwankungen eine 5-fach-Bestimmung durchgeführt. Die Ergebnisse der Karbonatisierungsversuche sind in Abbildung 44 dargestellt. Auffällig ist hierbei, dass bereits innerhalb einer Prüfung größere Schwankungen, dargestellt durch die Standardabweichung als Fehlerindikatoren, auftreten. Wie zu erwarten, sinkt die Karbonatisierungsgeschwindigkeit mit abnehmendem w/z-Wert. Ein Zusammenhang zwischen der Streubreite innerhalb einer Prüfung und dem w/z-Wert lässt sich jedoch nicht erkennen. Die Streuungen der Proben P01(1), P03 und P03(1) liegen außerhalb der zulässigen Widerholstreuungen von 10 %.

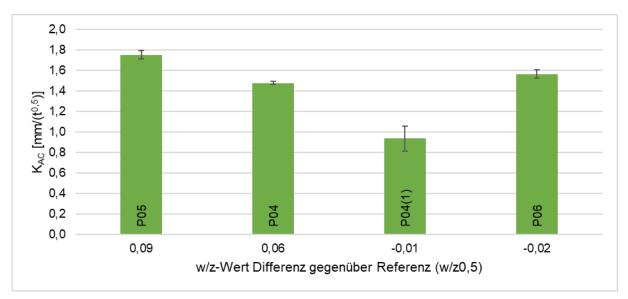


Abbildung 45: Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone mit CEM II/A-LL 42,5 N (Z2+FA) nach w/z-Wert Differenz (absteigend)

Die Betone mit Z2 weisen deutlich geringere Prüfstreuungen als die Z1-Betone auf. Die Ergebnisse sind in Abbildung 45 dargestellt. Die vergleichsweise große Karbonatisierungsgeschwin-

digkeit der Proben P06 ist gegebenenfalls auf Ungenauigkeiten in der Bestimmung des tatsächlichen w/z-Wertes zurückzuführen. Die Streuungen den Proben P04(1) liegen außerhalb der zulässigen Widerholstreuungen.

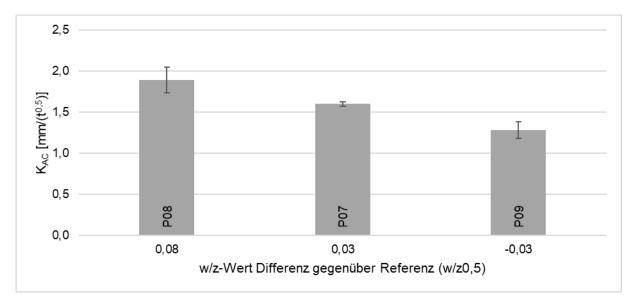


Abbildung 46: Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone mit CEM II/B-S 42,5 N (Z3) nach w/z-Wert Differenz (absteigend)

Die Karbonatisierungsgeswindigkeiten der Betone mit Z3 sind in Abbildung 46 dargestellt. Je geringer der w/z-Wert, desto geringer ist auch die ermittelte Karbonatisierungsgeschwindigkeit. Die Streuungen liegen alle innerhalb der zulässigen Widerholstreuungen.

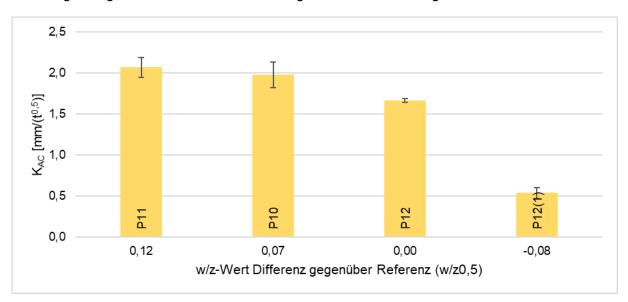


Abbildung 47: Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone mit CEM III/A 42,5 N (Z4) nach w/z-Wert Differenz (absteigend)

In Abbildung 47 sind die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten der Betone mit Z4 dargestellt. Die Streuungen der Proben P12(1) liegen außerhalb der zulässigen Prüfstreuungen, was hauptsächlich auf den deutlich geringeren Mittelwert zurückzuführen ist.

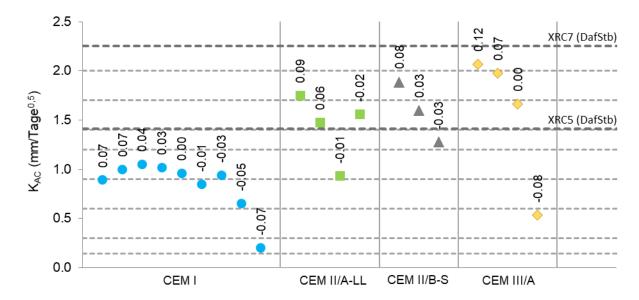


Abbildung 48: Einordnung der Betone mit Z1 – Z4 in Exposure Resistance Classes nach EN 206-100 Draft 14 (hellgraue Linien) und ERC-Richtlinie des DAfStb (dunkelgraue Linien) [30] nach w/z-Wert Differenz (absteigend)

In Abbildung 48 sind die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten aller Betone (Z1 bis Z4) nach Exposure Resistance Classes aus Entwurf 14 der prEN 206-100 und nach dem Entwurf der ERC-Richtlinie des DAfStb [30] in Verbindung mit der Umrechnung der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten von natürlichen auf beschleunigte Bedingungen nach [32] kategorisiert. Der Vergleich innerhalb einer Betonsorte macht den Einfluss der prüfungsbedingten Schwankungen und die Optimierungsmöglichkeiten über einen abgesenkten w/z-Wert deutlich. Wie bei den XRDS-Klassen, kann in der Regel, innerhalb der zulässigen Schwankungen der Mischungszusammensetzung, auch hier je Betonzusammensetzung eine XRC-Klasse nach dem Entwurf der ERC-Richtlinie die DAfStb eingehalten werden.

3.2.9 Probekörper aus Produktion in einem TB-Werk (AS 3.2)

3.2.9.1 Vorgehen und Materialien

In Arbeitsschritt 3.2 wurden Probekörper während der laufenden Produktion eines Transportbetonwerks hergestellt. Ziel dieser Untersuchung war es, eine Aussage zur möglichen Schwankungsbreite der dauerhaftigkeitsrelevanten Kenngrößen machen zu können. Hierzu wurde ein Transportbetonwerk ausgewählt, in dem u. a. eine Betonsorte mit Zement 4 (CEM III/A) aus der Hauptserie des Forschungsvorhabens produziert wird. Die Probenahme fand zu fünf Herstellzeitpunkten statt. Die Zeitpunkte der Probenahme waren über 3,5 Monate (Ende März 2022 bis Mitte Juli 2022) verteilt. Somit konnten Einflüsse aus Dosierung, Chargenwechsel und Witterung/Temperaturen erfasst werden. Im Transportbetonwerk wurden die Frischbetoneigenschaften und die w/z-Werte (Darrversuch) bestimmt, sowie die Probekörper hergestellt. Die Rezeptur ist in Tabelle 21 gegeben. Beim Darrversuch im TB-Werk wurde eine Probenmenge von 5 kg in einer Darrpfanne über einem Gasofen getrocknet. Die Kernfeuchte der Gesteinskörnung wurde hierbei berücksichtigt. Die Probe wurde solange gedarrt bis auf einer über der Darrprobe befindlichen Glasplatte kein Kondensat mehr zu beobachten war. Das Gewicht der abgekühlten Probe wurde mit einer Waage bestimmt. Die Ergebnisse der Darrversuche sind auch im Anhang in Tabelle A4 gegeben.

Tabelle 21: Betonzusammensetzung der Rezeptur 1.6542.109 aus AS 3.2

Bestandteile	Rezeptur 1.6542.109			
Expositionsklassen	XC4, XD1, XF1, XA1, XM1			
Druckfestigkeitsklasse	C 30/37			
Konsistenzklasse	F4			
Zementart	CEM III/A 42,5 N			
Zementgehalt (kg/m³)	350			
Wasser (kg/m³)	171			
Rheinsand 0/2 (kg/m³)	714			
Rheinsand 2/8 (kg/m³)	362			
Rheinsand 8/16 (kg/m³)	722			
Zusatzmittel BV (kg/m³)	2,8			
w/z-Wert	0,49			

Im Transportbetonwerk wurden Proben der Ausgangsstoffe entnommen. Damit wurde im Labor ein Beton nach Rezeptur (siehe Tabelle 21) hergestellt. In AS 3.2 wurden damit insgesamt sechs Herstellzeitpunkte beprobt. Die Bezeichnung der Herstellzeitpunkte und das Datum der Probenahme sind in Tabelle 22 gegeben.

Tabelle 22: Datum der Probenahme bzw. Herstellzeitpunkte der Mischungen aus AS 3.2

Bezeichnung	Datum der Probenahme bzw. La- borherstellung			
Z04-TB1	31.03.2022			
Z04-TB2	13.04.2022			
Z04-TB3	05.05.2022			
Z04-TB4	08.06.2022			
Z04-TB5	13.07.2022			
Z04-TB-Lab	17.05.2022			

3.2.9.2 Frischbetoneigenschaften

Die Ausbreitmaße der fünf Herstellzeitpunkte aus dem Transportbetonwerk und der Laborbeton sind in Abbildung 49 dargestellt. Die Herstellzeitpunkte aus dem Transportbetonwerk und der Laborbeton lagen 10 Minuten nach Mischbeginn allesamt im Konsistenzbereich F4. Je höher die Frischbetontemperaturen aufgrund der Witterung war, desto schneller verlor der Beton an Verarbeitbarkeit (z.B. Z04-TB4 und Z04-TB5 in Abbildung 49).

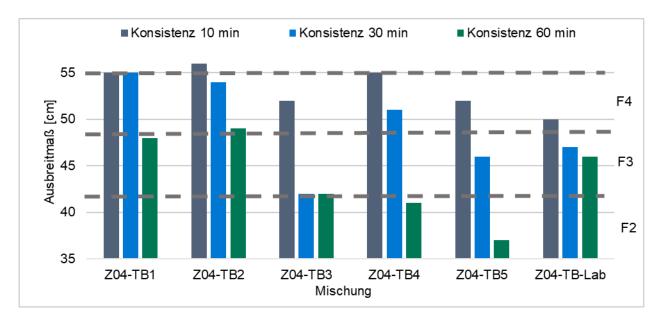


Abbildung 49: Ausbreitmaße der Mischungen aus AS 3.2

In Tabelle 23 ist die statistische Auswertung der Konsistenz nach 10 Minuten aus AS 3.2 gegeben. Die hier ausgewerteten Mischungen waren gleich zusammengesetzt. Der Mittelwert der Konsistenzmessung nach 10 Minuten liegt bei 533 mm bei einer Standardabweichung von 23 mm. Der Variationskoeffizient beträgt 4,4 %.

Tabelle 23: Statistische Auswertung der Konsistenz nach 10 Minuten von Mischungen in AS 3.2

Parameter	Z04-TB1	Z04-TB2	Z04-TB3	Z04-TB4	Z04-TB5	Z04-TB- Lab
Ausbreitmaß nach 10 Minuten (mm)	550	560	520	550	520	500
Mittelwert (mm)	533					
Standardabwei- chung (mm)	23					
Variationskoeffi- zient (%)			4	,4		

Die Frischbetontemperaturen der Mischungen aus AS 3.2 sind in Abbildung 50 gegeben. Aus dem Diagramm geht hervor, dass sich die Frischbetontemperaturen von Ende März 2022 (Z04-TB1) bis Mitte Juli 2022 (Z04-TB5) fast verdoppelt haben.

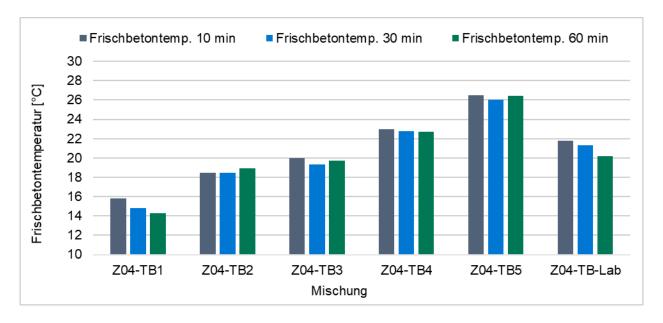


Abbildung 50: Frischbetontemperaturen der Mischungen aus AS 3.2

Abbildung 51 zeigt die mit dem Darrversuch bestimmten w/z-Werte an Mischungen aus AS 3.2. An drei von fünf Herstellzeitpunkten (Z04-TB2, Z04-TB3 und Z04-TB5) lagen die w/z-Werte genau im Zielbereich. Bei zwei Herstellzeitpunkten (Z04-TB1 und Z04-TB4) und dem Laborbeton (Z04-TB-Lab) lagen die w/z-Werte über dem Zielbereich. Die relativ hohen w/z-Werte von Z04-TB1 und Z04-TB4 hätten sich auf die Druckfestigkeit und die Frischbetonrohdichte auswirken müssen. Dies konnte jedoch nicht beobachtet werden. Eine mögliche Erklärung für die hohen w/z-Werte der beiden Herstellzeitpunkte könnte sein, dass die Teilprobe für den Darrversuch nicht repräsentativ für die gesamte Probe war. Zu berücksichtigen ist auch, dass die Genauigkeit des Darrversuches, auch bei strikter Einhaltung aller Randbedingungen (gleiches Equipment, gleicher Laborant, gleiches Vorgehen), nicht immer ausreichend ist.

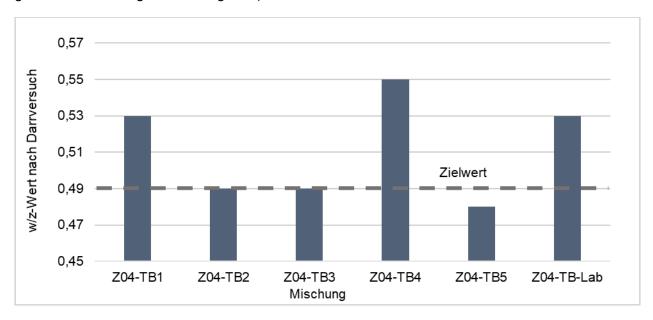


Abbildung 51: w/z-Werte (Darrversuch) der Mischungen aus AS 3.2

Tabelle 24 zeigt die statistische Auswertung der w/z-Werte (Darrversuch) aus AS 3.2. Die Mischungen hatten die gleiche Zusammensetzung. Die ersten fünf Mischungen (Z04-TB1 bis Z04-

TB5) wurden im TB-Werk hergestellt. Die sechste Mischung (Z04-TB-Lab) wurde im Labor hergestellt. Der Mittelwert für den w/z-Wert beträgt 0,51 bei einer Standardabweichung von 0,03. Der Variationskoeffizient beträgt 5,6 %.

Tabelle 24: Statistische Auswertung der w/z-Werte im Darrversuch von Mischungen aus AS 3.2

Parameter	Z04-TB1	Z04-TB2	Z04-TB3	Z04-TB4	Z04-TB5	Z04-TB- Lab	
w/z-Wert	0,53	0,49	0,49	0,55	0,48	0,53	
Mittelwert	0,51						
Standardabwei-	Standardabwei- 0,03						
chung	0,00						
Variationskoeffi-	5,6						
zient (%)	5,0						

Die Frischbetonrohdichte der Mischungen aus AS 3.2 ist in Abbildung 52 dargestellt. Die Frischbetonrohdichten liegen im Bereich von Normalbeton. Die Schwankungsbreite der Frischbetonrohdichte ist als gering einzustufen. Die Frischbetonrohdichten geben keinen Hinweis auf zu hohe w/z-Werte. Üblicherweise führen hohe Wassergehalte im Frischbeton zu einer Abnahme der Frischbetonrohdichte. Dies konnte an Mischungen mit w/z-Werten über dem Zielbereich (Z04-TB1 und Z04-TB4) nicht beobachtet werden. Die Frischbetonrohdichten deuten darauf hin, dass die Teilproben für den Darrversuch von Z04-TB1 und Z04-T4 wahrscheinlich nicht repräsentativ für die Gesamtprobe waren.

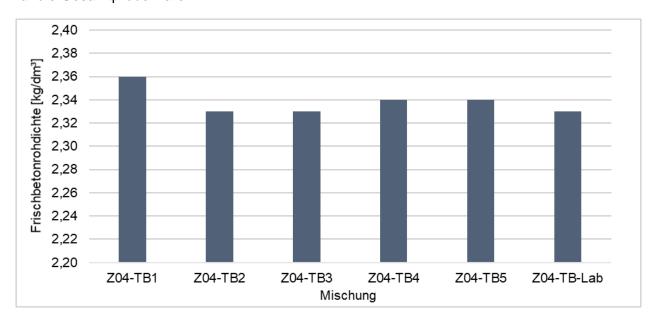


Abbildung 52: Frischbetonrohdichte der Mischungen aus AS 3.2

Der Luftporengehalt der Mischungen aus AS 3.2 ist in Abbildung 53 gegeben. Die Luftporengehalte der Mischungen aus dem Transportbetonwerk lagen zwischen 2 und 2,6 Vol.-%. Der Laborbeton lag mit 1,8 Vol.-% etwas darunter.

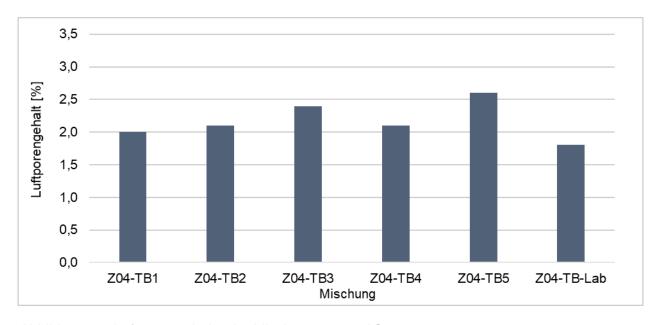


Abbildung 53: Luftporengehalte der Mischungen aus AS 3.2

3.2.9.3 Festbetoneigenschaften

Die Druckfestigkeiten der sechs Mischungen aus AS 3.2 sind in Abbildung 54 gegeben. Die fünf Mischungen aus dem Transportbetonwerk liegen relativ nah beieinander. Die mit denselben Ausgangsstoffen im Labor nachgefahrene Mischung wies eine niedrigere Festigkeit auf. Ungewöhnlich ist, dass die Schwankungen beim w/z-Wert (siehe Abbildung 51) keinerlei Einfluss auf die Druckfestigkeit hatten.

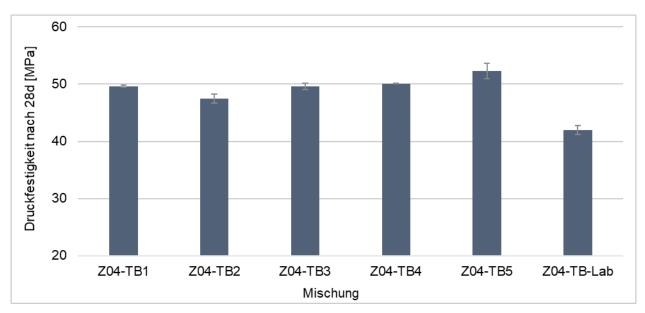


Abbildung 54: Druckfestigkeiten der Mischungen aus AS 3.2

In Tabelle 25 ist die statistische Auswertung der Druckfestigkeiten aus AS 3.2 gegeben. Die Standardabweichung innerhalb der Einzelserien liegt zwischen 0,1 und 1,3 MPa. Der Variationskoeffizient liegt zwischen 0,1 und 2,5 % innerhalb der Serien. Der Gesamtmittelwert aller sechs Betone beträgt 48,5 MPa bei einer Gesamtstandardabweichung von 3,7 MPa. Der Gesamtvariationskoeffizient liegt bei 7,6 %.

Tabelle 25: Statistische Auswertung der Druckfestigkeit von Mischungen in AS 3.2

Beton	Einzelwert (MPa)	Einzelwert (MPa)	Einzelwert (MPa)	Mittelwert (MPa)	Standard- abwei- chung (MPa)	Variati- onskoeffi- zient (%)
Z04-TB1	49,7	49,5	49,8	49,7	0,2	0,3
Z04-TB2	48,2	46,6	47,5	47,4	0,8	1,7
Z04-TB3	50,2	49,1	49,5	49,6	0,6	1,1
Z04-TB4	50,2	50,1	50,1	50,1	0,1	0,1
Z04-TB5	53,2	53,0	50,8	52,3	1,3	2,5
Z04-TB-Lab	41,9	41,2	41,9	41,7	0,4	1,0
Gesamtmittelwert (MPa)	48,5					
Gesamtstandardab- weichung (MPa)	3,7					
Gesamtvariationsko- effizient (%)	7,6					

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten K_{AC} (mm/ \sqrt{T} age) der Mischungen aus AS 3.2 sind in Abbildung 55 zusammengefasst. Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit schwankt an den fünf Produktionstagen zwischen 1,1 und 1,5 mm/ \sqrt{T} age. Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit des Laborbetons beträgt 1,5 mm/ \sqrt{T} age. Die Schwankungsbreite der Mischungen aus dem Transportbetonwerk ist als gering einzustufen. Die Schwankungen des w/z-Werts (siehe Abbildung 51) haben offensichtlich keinen großen Einfluss auf den Karbonatisierungswiderstand der hier geprüften Betonsorte.

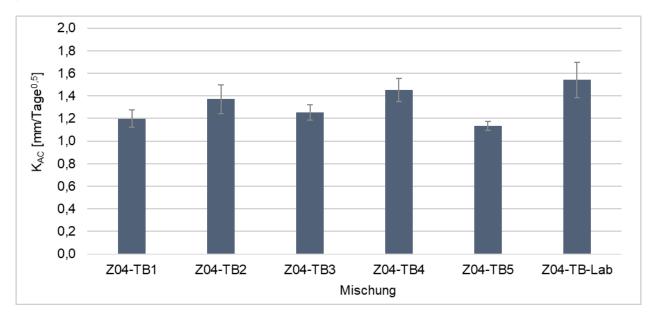


Abbildung 55: Karbonatisierungsgeschwindigkeit der Mischungen aus AS 3.2

In Tabelle 26 ist die statistische Auswertung der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten aus AS 3.2 gegeben. Die Standardabweichung innerhalb der Einzelserien liegt zwischen 0,1 und 0,2 mm/ \sqrt{T} age. Der Variationskoeffizient liegt zwischen 3,6 und 10,5 % innerhalb der Serien. Der Gesamtmittelwert aller sechs Betone beträgt 1,3 mm/ \sqrt{T} age bei einer Gesamtstandardabweichung von 0,2 mm/ \sqrt{T} age. Der Gesamtvariationskoeffizient liegt bei 11,9 %.

Tabelle 26: Statistische Auswertung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit von Mischungen aus AS 3.2

Beton	Einzel- wert (mm/ √Tage)	Einzel- wert (mm/ √Tage)	Einzel- wert (mm/ √Tage)	Mittel- wert (mm/ √Tage)	Standard- abweichung (mm/√Tage)	Variations- koeffizient (%)
Z04-TB1	1,2	1,2	1,1	1,2	0,1	6,3
Z04-TB2	1,5	1,3	1,4	1,4	0,1	9,6
Z04-TB3	1,3	1,2	1,2	1,3	0,1	5,3
Z04-TB4	1,5	1,5	1,3	1,5	0,1	6,9
Z04-TB5	1,2	1,1	1,1	1,1	0,0	3,6
Z04-TB-Lab	1,4	1,6	1,7	1,5	0,2	10,5
Gesamtmittelwert (mm/√Tage)				1,3		
Gesamtstandardabwei- chung (mm/√Tage)	0,2					
Gesamtvariationskoeffi- zient (%)				11,9		

Die Chloridmigrationskoeffizienten M_{nss} (10^{-12} m²/s) der Mischungen aus AS 3.2 sind in Abbildung 56 gegeben. Die Chloridmigrationskoeffizienten der Mischungen aus dem Transportbetonwerk liegen zwischen 3,9 und 5,1 x 10^{-12} m²/s. Der Chloridmigrationskoeffizient des Laborbetons liegt bei 4,9 x 10^{-12} m²/s.

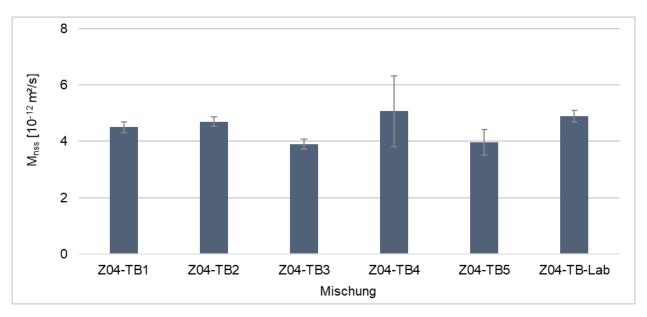


Abbildung 56: Chloridmigrationskoeffizienten der Mischungen aus AS 3.2

Berücksichtigt man die w/z-Werte aus dem Darrversuch (siehe Abbildung 51), so zeigt sich, dass der Herstellzeitpunkt mit dem höchsten w/z-Wert (Z04-TB4) auch den höchsten Einzel- und Mittelwert unter den Chloridmigrationskoeffizienten hervorruft (siehe Abbildung 56), bzw. der Herstellzeitpunkt mit dem niedrigsten w/z-Wert (Z04-TB5) auch den niedrigsten Einzelwert unter den Chloridmigrationskoeffizienten aufweist. Die Schwankungsbreite der Mischungen aus dem TB-Werk ist als gering einzuordnen.

In Tabelle 27 ist die statistische Auswertung der Chloridmigrationskoeffizienten aus AS 3.2 gegeben. Die Standardabweichung innerhalb der Einzelserien liegt zwischen 0,2 und 1,3 x 10^{-12} m²/s. Der Variationskoeffizient liegt zwischen 3,7 und 24,7 % innerhalb der Serien. Der Gesamtmittelwert aller sechs Betone beträgt 4,5 x 10^{-12} m²/s bei einer Gesamtstandardabweichung von 0,5 x 10^{-12} m²/s. Der Gesamtvariationskoeffizient liegt bei 10,7 %.

Tabelle 27: Statistische Auswertung der Chloridmigrationskoeffizienten von Mischungen aus AS 3.2

Beton	Einzel- wert (10 ⁻¹² m²/s)	Einzel- wert (10 ⁻¹² m²/s)	Einzel- wert (10 ⁻¹² m²/s)	Mittel- wert (10 ⁻¹² m²/s)	Standard- abweichung (10 ⁻¹² m ² /s)	Variations- koeffizient (%)
Z04-TB1	4,7	4,3	4,5	4,5	0,2	4,4
Z04-TB2	4,6	4,9	4,6	4,7	0,2	3,7
Z04-TB3	4,0	4,0	3,7	3,9	0,2	4,4
Z04-TB4	5,1	3,8	6,3	5,1	1,3	24,7
Z04-TB5	4,0	4,4	3,5	4,0	0,5	11,4
Z04-TB-Lab	5,1	4,9	4,7	4,9	0,2	4,1
Gesamtmittelwert (10 ⁻¹² m ² /s)		4,5				
Gesamtstandardabwei- chung (10 ⁻¹² m²/s)	0,5					
Gesamtvariationskoeffi- zient (%)				10,7		

3.2.9.4 Fazit

Im Arbeitsschritt 3.2 wurde die laufende Produktion eines Transportbetonwerks beprobt. An fünf Herstelltagen, verteilt über einen Zeitraum von 3,5 Monaten, wurden Proben entnommen. An den Proben wurden die Frisch- und Festbetoneigenschaften bestimmt. Darüber hinaus wurden Proben der Ausgangsstoffe entnommen, um damit im Labor den Beton nachzufahren.

Es zeigte sich, dass alle Mischungen aus dem Transportbetonwerk und der Laborbeton eine Anfangskonsistenz (nach 10 Minuten) von F4 erreichten. Die Konsistenz zu späteren Zeitpunkten wurde erkennbar 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 TB-Werk lagen genau im Zielbereich des w/z-Wertes. Zwei von fünf Mischungen aus dem TB-Werk und der Laborbeton lagen über dem Zielbereich.

Die Druckfestigkeit der Mischungen aus dem Transportbetonwerk schwankte kaum. Der im Labor nachgefahrene Beton wies eine geringere Druckfestigkeit als die Mischungen aus dem TB-Werk auf. Der Chloridmigrationskoeffizient M_{nss} der Mischungen aus dem Transportbetonwerk lag zwischen 3,9 und 5,1 x 10^{-12} m²/s. Die Karbonatisierungsgeschwindigkeit der Mischungen aus dem TB-Werk lag zwischen 1,1 und 1,5 mm/ \sqrt{T} age. Die Schwankungsbreite von Chloridmigrationskoeffizient und Karbonatisierungsgeschwindigkeit ist als gering einzustufen.

Der Vergleich der Mischungen aus AS 3.2 mit den aktuellen Grenzwerten für Expositionswiderstandsklassen XRC [29] (Abbildung 57) zeigt, dass vier der Mischungen aus dem TB-Werk im Bereich von XRC 5 liegen sowie eine Mischung aus dem TB-Werk und der Laborbeton innerhalb der Klasse XRC 7.

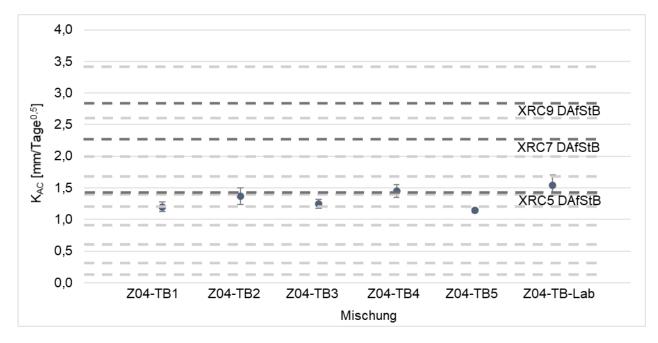


Abbildung 57: Karbonatisierungsgeschwindigkeit der Mischungen aus AS 3.2 unter Berücksichtigung der Expositionswiderstandsklassen XRC nach EN 206-100 Draft 14

Die Einordnung der Ergebnisse aus AS 3.2 nach den aktuellen Grenzwerten für Expositionswiderstandsklassen XDRS ist in Abbildung 58 dargestellt. Alle Mischungen aus dem Transportbetonwerk und der Laborbeton entsprechen der Widerstandsklasse XRDS 2.

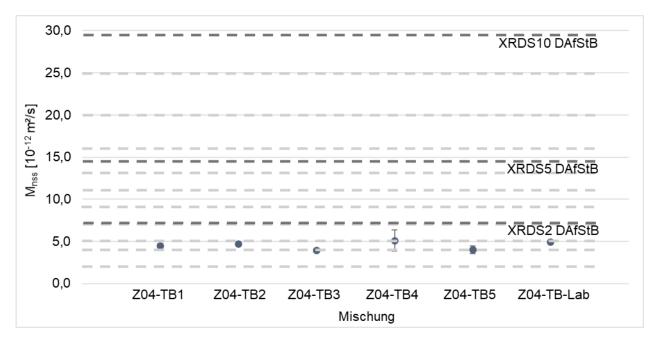


Abbildung 58: Chloridmigrationskoeffizienten der Mischungen aus AS 3.2 unter Berücksichtigung der Expositionswiderstandsklassen XRDS nach EN 206-100 Draft 14

3.2.10 Einfluss der Gesteinskörnung – Variation der Gesteinskörnungsart und der Kornzusammensetzung (AS 4)

3.2.10.1 Durchführung der Versuche

Der Untersuchungsgegenstand der FE 2 (HCU) umfasst den Einfluss der Gesteinskörnung auf den Migrationskoeffizienten und die Karbonatisierungsgeschwindigkeit. Der Abbildung 59 sind die Laboruntersuchungen der FE 2 zu entnehmen, die die Variation der Kornzusammensetzung unter Verwendung von zwei Gesteinskörnungsarten (Rundkorn/Splitt) umfasst. Die Betonagen zur Ermittlung des Einflusses der Kornzusammensetzung erfolgten stets am CEM III/A (Zement Z4, w/z 0,5). Der Zement für diese Untersuchungen wurde in Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss festgelegt. Hintergrund der Wahl ist, dass ein Bindemittel zum Einsatz kommen sollte, welches üblicherweise auch in dieser Expositionsklasse zur Anwendung kommt. Aus diesem Grund wird in diesem Zusammenhang auch der Begriff "Expositionsklassenzement" verwendet.

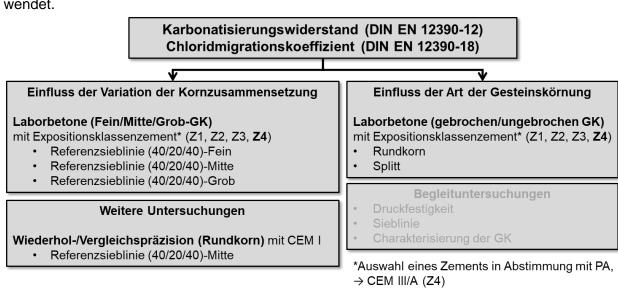


Abbildung 59: Laboruntersuchungen der FE 2 (HCU)

Als Gesteinskörnungsart wurde eine natürliche (Rundkorn, Rheinkies) und eine gebrochene (Splitt, Granodiorit) Gesteinskörnung gewählt. Beide Arten erfüllen die Anforderungen der DIN EN 12620 [38]. Im Rahmen des Arbeitspaktes 1 (AP1) wurden eigene Analysen zu den Gesteinskörnungen durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 28 dargestellt. Es sei darauf hingewiesen, dass der ermittelte Feinanteil der gebrochenen Gesteinskörnung von der Regelanforderung der DIN 1045-2 (Anhang U, Tabelle U.1, Zeile 4d) abweicht.

Tabelle 28: Analysen zur verwendeten Gesteinskörnung (Rundkorn und Splitt)

Gesteinskörnungsanalysen		Einheit	Rundkorn			Splitt		
			(0/2)	(2/8)	(8/16)	(0/2)	(2/8)	(8/16)
Rohdichte Pssd	DIN EN 1097- 6:2013-09	[kg/dm ³]	2,58	2,56	2,58	2,78	2,72	2,76
abschlämm- bare Bestandteile	in Anlehnung an DIN EN 933- 1:2012-03	[M%]	0,53	0,11	0,17	4,24	2,31	1,64
	Absetzverfahren (Messzylinder)	[M%]	0,50			4,59		
Wasserauf- nahme	DIN EN 1097- 6:2013-09	[%]	1,18	1,93	1,34	0,30	0,27	1,56

In Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss wurde die folgende Kornzusammensetzung als Referenz (GK – Mitte) definiert:

- 40 Vol.-% (0/2)
- 20 Vol.-% (2/8)
- 40 Vol.-% (8/16).

Ausgehend von dieser Referenzzusammensetzung (welche sich nach dem Vorgehen in der Praxis orientiert) wurden die Fein- (0/2 mm) und Grobanteile (8/16 mm) im Rahmen der Dosiergenauigkeit nach DIN-Fachbericht 100:2010 [39], Tabelle 21, variiert. Hierzu wurde für die Kornzusammensetzung "Fein" die Einwaage der Kornfraktion 0/2 mm um 3,0 M.-% erhöht und die Einwaage der Kornfraktion 8/16 mm um 3,0 M.-% reduziert. Umgekehrt erfolgte die Einwaageberechnung für die Zusammensetzung "Grob". Die resultierenden Sieblinien der Zusammensetzungen "Fein", "Mitte", "Grob" sind in Abbildung 60 dargestellt.

Zu den Untersuchungen des Einflusses der Gesteinskörnungen auf den Chloridmigrationskoeffizienten wurden ferner Versuche zur Bestimmung der Wiederhol- und Vergleichspräzision durchgeführt. Diese erfolgten unter Verwendung des Rundkorns mit der Sieblinie "Mitte" und dem CEM I (Z1) als Bindemittel (w/z 0,5).

Für alle Betone wurden im Rahmen der Konformitätsprüfung die 28-Tage-Druckfestigkeit an drei Begleitprüfkörpern bestimmt.

Die genaue Prüfmatrix der FE2-Untersuchungen ist in Abbildung 4 wiedergegeben. Zur anschließenden statistischen Auswertung wurden Doppelbestimmungen der Migrationskoeffizienten und des Karbonatisierungswiderstands durchgeführt. Die Wiederholpräzisionsversuche (CEM I) des Chloridmigrationskoeffizienten erfolgte mittels 10-fach-Bestimmung.

Zusätzlich zum Referenzverfahren gemäß DIN EN 12390-18 wurden die RCM-Versuche mit einem Chloridgehalt von 10,0 M.-% in 0,2 M KOH durchgeführt, um die in diesem Projekt generierten Daten mit der Literatur abgleichen können.

Siebdurchgänge [Vol.-%]

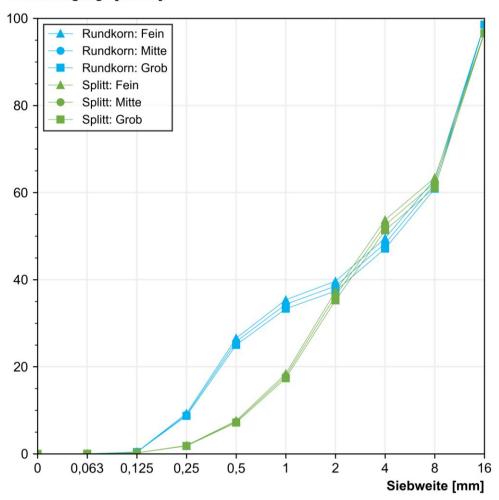


Abbildung 60: Sieblinien der Kornzusammensetzungen "Grob", "Mitte", "Fein" für die Gesteinskörnungsart Rundkorn und Splitt

3.2.10.2 Darstellung der Ergebnisse

Sämtliche Ergebnisse des Schnellmigrationstests nach DIN EN 12390-18 und des beschleunigten Karbonatisierungsverfahrens sind der Tabelle 29 zu entnehmen. Es folgt eine statistische Auswertung der Daten in diesem Kapitel.

Tabelle 29: Ergebnisse der RCM- (M_{nss}) und Karbonatisierungs- (K_{AC}) versuche in Hinblick auf Gesteinskörnungsart (Splitt, Kies) unter Angabe der Standardabweichung für M_{nss}

Nr.	Zement	Gestein	skörnung	NaCl			
			_	[M%]		-	[mm/√d]
		Art	Zusammen-		Mittel- wert	Stabw.	Mittel- wert
1	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Rundkorn	setzung Grob	10%	5,06	1,1	1,2
2	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Rundkorn	Grob	10%	4,89	0,5	1,3
3	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Rundkorn	Mitte	10%	3,72	0,2	1,1
4	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Rundkorn	Mitte	10%	4,01	0,6	1,2
5	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Rundkorn	Fein	10%	4,19	0,5	1,2
6	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Rundkorn	Fein	10%	4,17	0,0	1,1
7	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Splitt	Mitte	10%	2,44	2,1	n.v.
8	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Splitt	Mitte	10%	3,40	0,3	n.v.
9	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Splitt	Grob	10%	2,53	0,3	1,2
10	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Splitt	Grob	10%	2,65	0,3	1,1
11	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Splitt	Fein	10%	3,94	0,4	1,1
12	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Splitt	Fein	10%	3,92	0,1	1,1
13	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Splitt	Mitte	5%	2,55	0,2	1,1
14	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Splitt	Mitte	5%	2,12	0,0	1,1
15	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Splitt	Fein	5%	1,90	0,1	n.v.
16	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Splitt	Fein	5%	2,45	0,6	n.v.
17	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Splitt	Grob	5%	3,60	0,0	n.v.
18	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Splitt	Grob	5%	3,15	0,2	n.v.
19	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Rundkorn	Mitte	5%	3,78	0,3	n.v.
20	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Rundkorn	Mitte	5%	3,86	0,4	n.v.
21	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Rundkorn	Fein	5%	3,10	0,0	n.v.
22	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Rundkorn	Fein	5%	3,13	0,2	n.v.
23	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Rundkorn	Grob	5%	3,15	0,1	n.v.
24	CEM III/A 42,5 N (Z4)	Rundkorn	Grob	5%	2,59	0,1	n.v.
25	CEM I 42,5 R (Z1)	Rundkorn	Mitte	5%	14,51	1,4	n.v.
26	CEM I 42,5 R (Z1)	Rundkorn	Mitte	5%	13,60	1,7	n.v.
27	CEM I 42,5 R (Z1)	Rundkorn	Mitte	5%	14,88	0,5	n.v.
28	CEM I 42,5 R (Z1)	Rundkorn	Mitte	5%	13,48	0,7	n.v.
29	CEM I 42,5 R (Z1)	Rundkorn	Mitte	5%	15,90	0,9	n.v.
30	CEM I 42,5 R (Z1)	Rundkorn	Mitte	5%	14,40	0,8	n.v.
31	CEM I 42,5 R (Z1)	Rundkorn	Mitte	5%	14,24	0,7	n.v.
32	CEM I 42,5 R (Z1)	Rundkorn	Mitte	5%	13,15	1,0	n.v.
33	CEM I 42,5 R (Z1)	Rundkorn	Mitte	5%	15,35	1,3	n.v.
34	CEM I 42,5 R (Z1)	Rundkorn	Mitte	5%	14,34	0,5	n.v.

3.2.10.3 Statistische Auswertung der Schnellmigrationstests

Der Tabelle 30 ist die statistische Auswertung des Einflusses der Kornzusammensetzung zu entnehmen. Werden die Daten in Hinblick auf den Chloridmigrationskoeffizienten nach Art der Gesteinskörnung getrennt ausgewertet, ergibt sich für das Rundkorn die Reihenfolge "Grob" > "Fein" > "Mitte", wohingegen sich für den Splitt diese zu "Fein" > "Mitte" > "Grob" ergibt.

Während für das Rundkorn der höchste Chloridmigrationswiderstand in der Zusammensetzung "Grob" ermittelt wurde, wies für den Splitt die Zusammensetzung "Fein" den höchsten Widerstand auf. Eine eindeutige Aussage auf den Einfluss der Kornzusammensetzung kann auf Grundlage der aufgestellten Hierarchie der ausgewerteten Stichproben nicht getroffen werden. Im Rahmen einer einfaktoriellen Varianzanalyse bestand die Nullhypothese, ob ein signifikanter Einfluss der Kornzusammensetzung gemäß der gesetzten Definition "Grob", "Mitte", "Fein" auf den Migrationskoeffizienten besteht. Als Signifikanzniveau gilt $\alpha = 0,05$. Die Ergebnisse der Analysen sind getrennt nach Rundkorn und Splitt der Tabelle 30 zu entnehmen.

Tabelle 30: Statistische Auswertung der Chloridmigrationskoeffizienten in 5 M.-% NaCl-Lösung und der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten mittels einfaktorieller Varianzanalyse (CEM III/A, w/z 0,5)

Gesteir	skörnung Chloridmigrationskoeffizient		Karbonatisierungsgeschwind		chwindigkeit		
	Zu-	M _{nss}	Mittelwert	P-Wert	K _{AC}	Mittelwert	P-Wert
Art	sammen- setzung	[10 ⁻¹² m ² /s]	[10 ⁻¹² m ² /s]	[-]	[mm/√d]	[mm/ \sqrt{d}]	[-]
	Grob	3,15	2,87		1,2	1,3	
	GIOD	2,59	2,07	0,053	1,3	1,3	0,385
Rund-	Mitto	3,78	2.02	$> \alpha = 0.05$	1,1	4.0	$> \alpha = 0.05$
korn	Mitte	3,86	3,82	kein Unter-	1,2	1,2	kein Unter-
	Fein	3,13	3,12	schied	1,2	4.0	schied
	rein	3,10	3,12		1,1	1,2	
	Grob	3,60	3,75	0.000	1,2	1,2	0.050
	GIOD	3,15	3,73	$0,069$ > $\alpha = 0,05$	1,1	1,∠	$0,650$ > $\alpha = 0,05$
Colist	Mitto	2,55	2.24	u = 0,00	1,1	4.4	u = 0,00
Splitt	Mitte	2,12	2,34	kein Unter-	1,1	1,1	kein Unter-
	Fein	1,90	2.10	schied	1,1	1.2	schied
	reiii	2,45	2,18		1,2	1,2	

Für das Rundkorn sowie den Splitt überschreitet der P-Wert stets das definierte Signifikanzniveau. In diesem Zuge wurde der Einfluss der Kornzusammensetzung auf den Chloridmigrationskoeffizienten als nicht signifikant gewertet.

Mit der Erkenntnis, dass die Kornzusammensetzung keinen signifikanten Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten hat, werden die Materialvariablen ("Grob", "Mitte", "Fein") für die jeweilige Gesteinskörnungsart einer Grundgesamtheit zugeordnet.

Die Abbildung 61 visualisiert das Streuverhalten des Chloridmigrationskoeffizienten der untersuchten Betone (CEM III/A, w/z 0,5) in Abhängigkeit der Gesteinskörnungsart. Im Mittel ist der Chloridmigrationskoeffizient des Rundkorns um ca. 25 % höher als der Koeffizient des Splitts. Dieser deutliche Einfluss wurde auch durch die einfaktorielle Varianzanalyse bestätigt, vgl. Tabelle 31. Der P-Wert der Analyse beläuft sich auf 0,011 und unterschreitet demnach deutlich das

festgelegte Signifikanzniveau von α = 0,05. Der Einfluss der Gesteinskörnungsart. (Vergleich Rundkorn und Splitt) auf den Chloridmigrationskoeffizienten ist infolgedessen als signifikant zu werten.

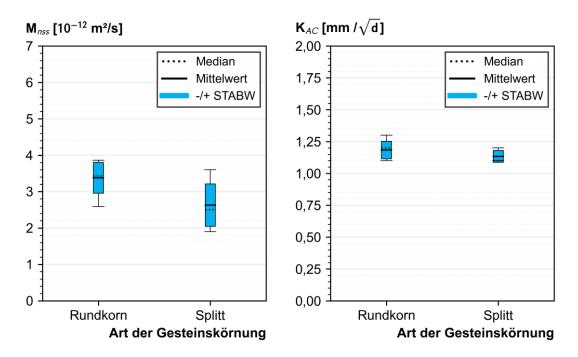


Abbildung 61: Streuverhalten des Migrationskoeffizienten (links) und der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten (rechts) des CEM III/A (w/z 0,5) in Abhängigkeit der Gesteinskörnungsart

Tabelle 31: Gesteinskörnungsart | Statistische Auswertung der Migrationskoeffizienten und der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten mittels einfaktorieller Varianzanalyse

Gesteins-	Chloridmigrationskoeffizient			Karbonat	isierungsge	schwindigkeit
körnungs-	M _{nss}	Mittelwert	P-Wert	K _{AC}	Mittelwert	P-Wert
art	[10 ⁻¹² m ² /s]	[10 ⁻¹² m ² /s]	[-]	[mm/√d]	[mm/√d]	[-]
	3,15			1,2		
	2,59			1,3		
Rund-	3,78	3,27		1,1	1,2	
korn	3,86	3,21	0,011	1,2	1,2	0,209
	3,13		$< \alpha = 0.05$	1,2		$> \alpha = 0.05$
	3,10			1,1		
	3,60			1,2		kein
	3,15		Unter- schied!	1,1		Unter-
Splitt	2,55	2,63	Somean	1,1	1,1	schied
Spillt	2,12	2,03		1,1] ','	
	1,90			1,1		
	2,45			1,2		

An dieser Stelle sei vermerkt, dass die Festlegung der volumetrischen Kornzusammensetzung (40 Vol.-% (0/2) / 20 Vol.-% (2/8) / 40 Vol.-% (8/16)) als Referenzzusammensetzung einen Unterschied der Sieblinien zwischen Rundkorn und Splitt verursacht. Für das Rundkorn ist demnach

ein höherer Anteil an feiner Gesteinskörnung in der Fraktion zwischen 0,125 mm und 2 mm festzustellen, vgl. Abbildung 60. Generell können höhere Chloridmigrationskoeffizienten nachgewiesen werden, je höher der Feinanteil des Betons ist (vgl. auch Mörtel und Betonproben z.B. [40]). Demnach kann der festgestellte signifikante Einfluss der Gesteinskörnungsart auch Einflüsse der abweichenden Sieblinien beinhalten.

Weiterhin wurde in einer gesonderten Versuchsdurchführung der Einfluss des erhöhten Feinstanteils des Splitts auf die Chloridmigration untersucht. Hierfür wurden weitere Probekörper für zwei Versuchsreihen mit Splitt und der Kornzusammensetzung "Mitte" untersucht. Dafür wurden Probekörper unter Verwendung der beschriebenen Kornzusammensetzung und mit einer modifizierten Kornzusammensetzung Splitt "Mitte" hergestellt. Für die Modifizierung wurde die gesamte gebrochene Gesteinskörnung gemäß DIN EN 933-1 über einem 0,063-mm-Analysesieb gewaschen. An den Probekörpern beider Versuchsreihen ("gewaschen"/"ungewaschen") wurden nach jeweils 28 und 91 Tagen (Betonalter) Chloridmigrationsversuche in Anlehnung an DIN EN 12390-18 durchgeführt. Abweichend von der Norm, wurde die Chlorideindringtiefe nicht mittels Silbernitratmessung ermittelt, sondern ein Chloridprofil mit Hilfe der laserinduzierten Plasmaspektroskopie (LIBS) bestimmt. Die hierüber gewonnenen Profile geben Auskunft über den Chloridgehalt [M.-%] (freie sowie gebundene Chloride) in Bezug auf die Zementsteinmatrix über die Probekörpertiefe. Der Chloridgehalt wird in diesem Zuge mit der Einheit [M.-%/Z*] versehen, um zu verdeutlichen, dass sich die ermittelten Chloridgehalte auf die erhärtete Bindemittelmatrix beziehen, welche chemisch gebundenes und expositionsbedingt auch freies Wasser enthält. Eine Umrechnung dieser Werte auf den Zementgehalt ist mit einem Umrechnungsfaktor für die gesättigte Bindemittelmatrix von 2 möglich [41]. Die infolge des Chloridmigrationsversuchs sich ergebenen Chloridprofile für die einzelnen Probekörper (PK), sowie die gemittelten Profile sind in Abbildung 62 dargestellt.

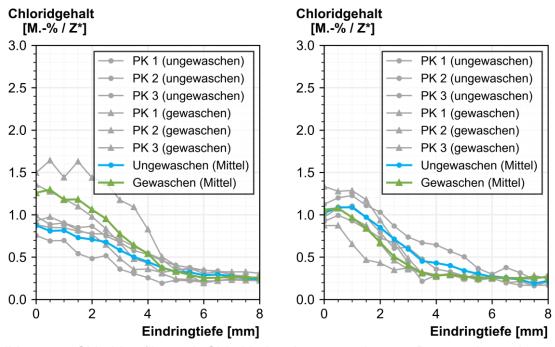


Abbildung 62: Chloridprofile nach Chloridmigrationsversuchen an Betonproben mit gewaschenem und ungewaschenem Splitt (CEM III/A, w/z 0,5), Betonalter bei Migrationsbeginn: 28 Tage (links) und 91 Tage (rechts)

Im Vergleich der gemittelten Chloridprofile beider Versuchsserien nach dem Migrationsversuch ("gewaschen" und "ungewaschen") sind keine deutlichen Tendenzen zu erkennen. Dies gilt insbesondere auch unter Einbezug des Betonalters. Während die Chloridgehalte der Betonproben mit gewaschenem Splitt zum Betonalter von 28 Tagen stets höher sind, bewegen sich die Chloridprofile zum Betonalter von 91 Tagen in einer vergleichbaren Bandbreite. Die maximale Chlorideindringtiefe unterscheidet sich in der 28-Tage Migration nur marginal; in der 91-Tage-Migration zeigt sich beim ungewaschenen Splitt eine geringfügig höhere Eindringtiefe (gewaschen: 6 mm, ungewaschen: 4 mm). Die Ergebnisse können den nachweislich signifikanten Unterschied der Migrationskoeffizienten des Rundkorns und Splitts nicht eindeutig auf Unterschiede im Feinstanteil zurückführen.

Da ein signifikanter Unterschied zwischen den Migrationsergebnissen von Kies und Splitt festgestellt werden konnte, fließen die Verteilungen der Migrationskoeffizienten differenziert zwischen Rundkorn und Splitt in die folgenden statistischen Auswertungen ein. Weiterhin werden die Verteilungen als normalverteilt angenommen. In Abbildung 63 ist die Normalverteilungen der Migrationskoeffizienten in Abhängigkeit der Gesteinskörnungsart Rundkorn (links) und Splitt (rechts) dargestellt, welche aus den Stichproben (n=6) abgeleitet wurden.

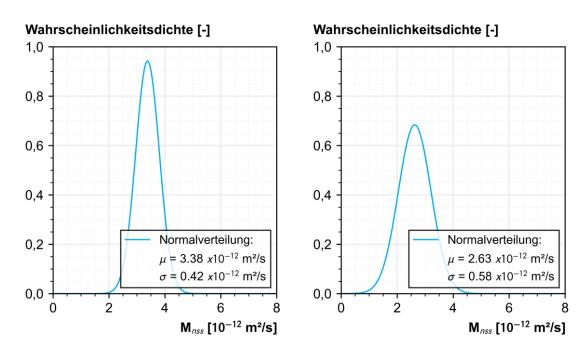


Abbildung 63: Ermittelte Normalverteilung der Migrationskoeffizienten in Abhängigkeit der Gesteinskörnungsart Rundkorn (links) und Splitt (rechts))

Neben Migrationsversuchen mit 5 M.-% NaCl-Prüfflüssigkeit wurden auch Begleitversuche mit 10 M.-% NaCl-Prüfflüssigkeit zum Abgleich mit Literaturwerten durchgeführt, vgl. auch Kapitel 3.2.10.1. Untersuchungen von Fischer [40] haben gezeigt, dass bei Verwendung einer 10 M.-% NaCl-Prüfflüssigkeit rund 8 % höhere Migrationskoeffizienten ermittelt wurden, als mit einer 5 M.-% NaCl-Prüfflüssigkeit (CEM I, w/z 0,5). Hierbei ist anzumerken, dass bei diesem Vergleich die geänderte Chloridkonzentration in der Formel zur Berechnung des Migrationskoeffizienten berücksichtigt wurde. Diese Tendenz spiegelt sich in den eigenen Versuchsergebnissen wider. Für den untersuchten CEM III/A-Beton (w/z 0,5) sind die Koeffizienten der Migration mit 10 M.-% NaCl-Prüfflüssigkeit rund 30 % höher als die Koeffizienten mit 5 M.-% NaCl-Prüfflüssigkeit.

3.2.10.4 Ergebnisse des beschleunigten Karbonatisierungsverfahrens

Analog zu den Ergebnissen der Chloridmigration, kann der Tabelle 29 die Karbonatisierungsgeschwindigkeit im beschleunigten Karbonatisierungsverfahren gemäß der vorgestellten Prüfmatrix entnommen werden. Werden, wie in der Tabelle dargestellt, einfaktorielle Varianzanalysen zum Einfluss der Kornzusammensetzung in Abhängigkeit der Gesteinskörnungsart durchgeführt, beträgt der P-Wert des Rundkorns 0,385 und für den Splitt 0,065. Das festgelegte Signifikanzniveau von 0,05 wird demnach deutlich überschritten, was bedeutet, dass kein signifikanter Einfluss der Kornzusammensetzung innerhalb der Toleranzen der Dosiergenauigkeit festzustellen ist.

Die einfaktoriellen Varianzanalysen erfassen keinen signifikanten Unterschied der Karbonatisierungsgeschwindigkeiten von Rundkorn und Splitt. Der P-Wert von 0,209 übersteigt deutlich das Signifikanzniveau von 0,05 (vgl. Tabelle 31).

In diesem Zuge werden für die Karbonatisierungsgeschwindigkeit keine signifikanten Einflüsse der Kornzusammensetzung und Gesteinskörnungsart innerhalb der Dosiergenauigkeit nach DIN-Fachbericht 100:2010, Tabelle 21 angenommen, weshalb alle Ergebnisse einer Grundgesamtheit zugeordnet werden können. Auf der Grundlage dieser Stichprobe (n=12) wurde die eine Normalverteilung abgeleitet, vgl. Abbildung 64.

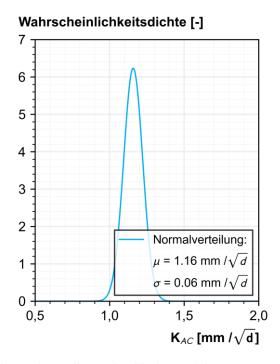


Abbildung 64: Ermittelte Normalverteilung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit für Rundkorn und Splitt

3.2.10.5 Bewertung der Ergebnisse im Hinblick auf eine Einordnung in Expositionswiderstandsklassen

Werden die ermittelten Migrationskoeffizienten in die Expositionswiderstandsklassen zur Bestimmung des Widerstandes von Beton gegen Bewehrungskorrosion verursacht durch Chloride (XRDS) (siehe Abbildung 65) eingestuft, streuen alle Chloridmigrationskoeffizienten innerhalb der Klasse XRDS2 gemäß EN 206-100 (Draft 14) [29]. Für das Rundkorn entspricht das 95 %-Quantil einem Migrationskoeffizienten von 3,87·10⁻¹² m²/s. Für den Splitt beträgt das 95 %-Quantil

3,58·10⁻¹² m²/s. Beide Quantile überschreiten nicht die Grenze von der XRDS2-Klasse (EN 206-100 (Draft 14)).

Die Abbildung 66 stuft die ermittelten Karbonatisierungswiderstände der Expositionswiderstandsklassen XRC ein. Sowohl für das Rundkorn, als auch für den Splitt streuen die Werte unterhalb der Klassengrenze für XRC5 gemäß EN 206-100 (Draft 14). Das 95 %-Quantil der ermittelten Normalverteilung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit liegt bei 1,3 mm, was der Expositionswiderstandsklasse XRC5 entspricht.

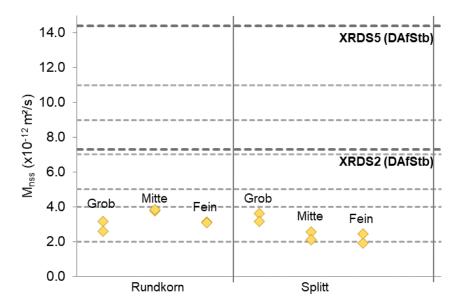


Abbildung 65: Einordnung der ermittelten Migrationskoeffizienten in die Expositionswiderstandsklassen XRDS nach EN 206-100 Draft 14 (hellgraue Linien) und ERC-Richtlinie des DAfStb (dunkelgraue Linien)

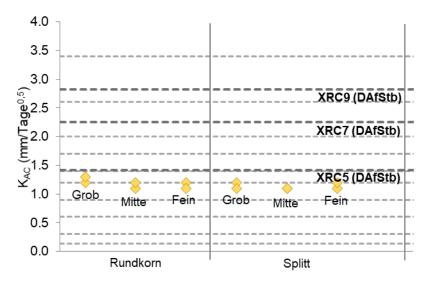


Abbildung 66: Einordnung der ermittelten Karbonatisierungsgeschwindigkeiten in die Expositionswiderstandsklassen XRC nach EN 206-100 Draft 14 (hellgraue Linien) und ERC-Richtlinie DAfStb (dunkelgraue Linien)

3.2.11 Hydratationsgradbasierte Kennwerte

3.2.11.1 Vorgehen und Materialien

Aus einem zurückliegenden AiF-Forschungsvorhaben (IGF-Vorhaben 187 EN DURAFOR) war bekannt, dass bestimmte Kennwerte für die Prognose des Karbonatisierungs- und Chlorideindringwiderstands einer Betonmischung genutzt werden können. Die Kennwerte zur Bestimmung des Materialwiderstandes werden in den ersten 28 Tagen der Hydratation bestimmt. Daher werden diese Kennwerte als Hydratationsgradbasierte Kennwerte bezeichnet. Die Hydratationsgradbasierten Kennwerte setzen sich zusammen aus: dem chemisch gebundenen Wasser in Zementleim nach 2, 7 und 28 Tagen, dem w/z-Wert der Betone, der Porosität und Porenradienverteilung von Normmörteln nach 28 Tagen, der Betondruckfestigkeit nach 28 Tagen und dem Anteil von Klinker und Kalksteinmehl.

3.2.11.2 Chemisch gebundenes Wasser und Porenradienverteilung

Das chemisch gebundene Wasser wurde an Zementleimproben nach 2, 7 und 28 Tagen bestimmt. Hierzu wurde die Hydratation des Zementleims durch Mörsern in Aceton, Waschen mit Diethylether und anschließender Vakuumtrocknung gestoppt. Die Proben wurden anschließend mit Hilfe der Differenz-Thermoanalyse auf ihren Gehalt an chemisch gebundenem Wasser untersucht. Abbildung 67 zeigt das chemisch gebundene Wasser in Zementleimen mit Zementen aus der Hauptserie Z1-Z4 sowie die Zukunftszemente F1-F3.

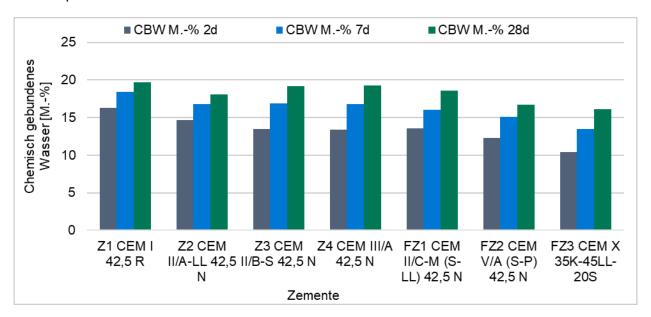


Abbildung 67: Chemisch gebundenes Wasser an Zementleimen mit Z1-Z4 und F1-F3

Weitere Parameter zur Bestimmung der Hydratationsgradbasierten Kennwerte sind die Anteile bestimmter Porenradien und die Gesamtporosität (Normmörtel bei w/z 0,50) nach 28 Tagen (siehe Abbildung 68). Die Gesamtporosität und die Verteilung der Porenradien wird mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie bestimmt. Die große Bandbreite der Bindemittelzusammensetzung spiegelt sich in den unterschiedlichen Porositäten wider.

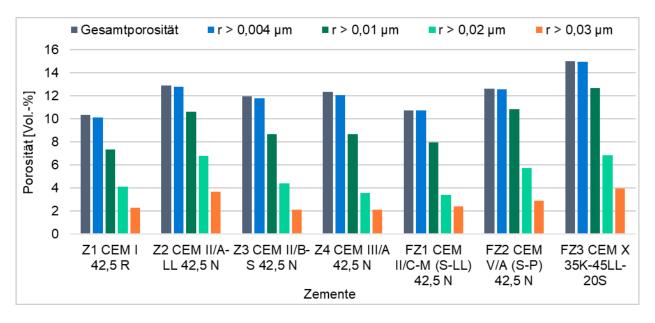


Abbildung 68: Gesamtporosität und Anteil der Porenradien an Normmörteln mit Z1-Z4 und F1-F3

3.2.11.3 Berechnung der Hydratationsgradbasierten Kennwerte

Der Hydratationsgradbasierte Kennwert zur Vorhersage der Karbonatisierungstiefe berücksichtigt den w/z-Wert des Betons, das chemisch gebundene Wasser nach 2 Tagen Hydratation und die Gesamtporosität (siehe Gleichung (7)).

$$K_{Karbo} = \left(\frac{0.5}{wz - Wert\ Beton}\right) * \left(\frac{CBW\ nach\ 2\ Tagen}{Gesamtporosit\"{a}t}\right)$$
 (7)

Zur Vorhersage des Chlorideindringwiderstandes können zwei Hydratationsgradbasierte Kennwerte genutzt werden. Der erste Hydratationsgradbasierte Kennwert setzt sich aus dem w/z-Wert des Betons, dem Klinker- und Kalksteinanteil und einem Quotienten aus Porenraum $r > 0,01~\mu m$ und Gesamtporosität zusammen.

$$\mathsf{K}_{\mathsf{Chloride 1}} = \left(\frac{0.5}{wz - Wert \, Reton}\right) / \left(\left(K + LL\right) * \left(\frac{Porosit at > 0.01}{Gesamt porosit at}\right)\right) \tag{8}$$

Der zweite Hydratationsgradbasierte Kennwert zur Vorhersage des Chlorideindringwiderstandes setzt sich aus dem chemisch gebundenen Wasser nach 7 Tagen, dem w/z-Wert des Betons, dem Klinker- und Kalksteingehalt und der Gesamtporosität zusammen.

$$\mathsf{K}_{\mathsf{Chloride}\,2} = (\mathit{CBW}\,\,nach\,\,7\,\,Tagen) * (\frac{0.5}{wz - wert\,\,Beton}) / ((K + LL) * \mathit{Gesamtporosit\"{a}t}) \tag{9}$$

3.2.11.4 Vorhersage des Karbonatisierungswiderstandes

Mit dem Kennwert zur Prognose des Karbonatisierungswiderstandes (siehe Gleichung (7)) waren ähnlich gute Vorhersagen möglich wie im IGF-Vorhaben 187 EN DURAFOR. Abbildung 69 zeigt den Zusammenhang zwischen im Labor gemessenen Karbonatisierungstiefen und den berechneten Kennwerten. Die blauen Punkte und die daraus abgeleitete Kurve wurden an Betonen aus

dem zurückliegenden IGF-Vorhaben 187 EN bestimmt. Die grünen Punkte und die daraus abgeleitete Kurve wurden an Betonen von Projekt 4 ermittelt. In IGF-Vorhaben 187 EN wurden die Probekörper in einer CO₂-Konzentration von 1 % gelagert. Die Versuche in Projekt 4 fanden bei einer CO₂ -Konzentration von 3 % statt. Durch die höhere CO₂ -Konzentration in Projekt 4 kam es zu einer Verschiebung der Werte nach rechts (siehe blaue und grüne Kurve in Abbildung 69). Die Bestimmung der Korrelationsfaktoren ergab für beide Projekte einen ähnlich guten Zusammenhang zwischen den im Labor bestimmten Messwerten und den berechneten Kennwerten. In IGF-Vorhaben 187 EN wurden 42 Betone untersucht, in Projekt 4 wurden 18 Betone untersucht.

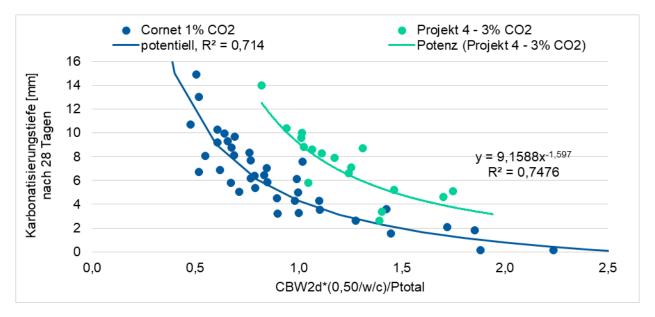


Abbildung 69: Hydratationsgradbasierter Kennwert zur Vorhersage des Karbonatisierungswiderstandes (blau = Cornet/IGF 187 EN, grün = Projekt 4)

3.2.11.5 Vorhersage des Chlorideindringwiderstandes

Zur Vorhersage des Chlorideindringwiderstandes wurden zwei Kennwerte genutzt. Der Zusammenhang zwischen dem ersten Kennwert (siehe Gleichung 3.2.9.3.2) und den im Labor gemessenen Chlorideindringwiderstand ist in Abbildung 70 dargestellt. Der erste Kennwert setzt sich zusammen aus dem w/z-Wert des Betons, einem Quotienten aus Porenvolumen r > 0,01 µm und Gesamtporosität sowie einem Faktor aus Klinker- und Kalksteinanteil. Die Betone aus Projekt 4 (grüne Punkte) liegen im gleichen Bereich wie die Betone aus dem Vorhaben IGF 187 EN (blaue Punkte). Es zeigt sich, dass der erste Kennwert gut für die Vorhersage des Chlorideindringwiderstandes genutzt werden kann. Der Chlorideindringwiderstand der Betone aus dem IGF-Vorhaben 187 EN/CORNET wurde nach DIN EN 12390-11 (Diffusion) bestimmt. In Projekt 4 wurde der Chloridmigrationskoeffizient nach DIN EN 12390-18 geprüft.

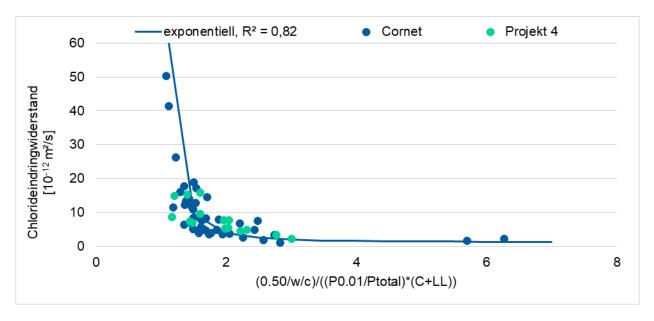


Abbildung 70: Erster Hydratationsgradbasierter Kennwert zur Vorhersage des Chlorideindringwiderstandes (blau = Cornet/IGF 187 EN, grün = Projekt 4)

Der Zusammenhang zwischen dem zweiten Kennwert und den im Labor gemessenen Chlorideindringwiderstand ist in Abbildung 71 gegeben. Der zweite Kennwert zur Vorhersage des Chlorideindringwiderstandes berücksichtigt das chemisch gebundene Wasser nach 7 Tagen, den w/z-Wert des Betons, die Gesamtporosität und einen Faktor aus Klinker- und Kalksteinanteil. Bei der Auswertung der Ergebnisse von IGF 187 EN und Projekt 4 zeigte sich, dass die Betonmischungen mit CEM I nicht den übrigen Betonen entsprachen (siehe gelbe und orange Punkte in Abbildung 71). Mit dem zweiten Kennwert konnte für alle Mischungen (ohne CEM I) eine gute bis zufrieden stellende Vorhersage des Chlorideindringwiderstandes erzielt werden.

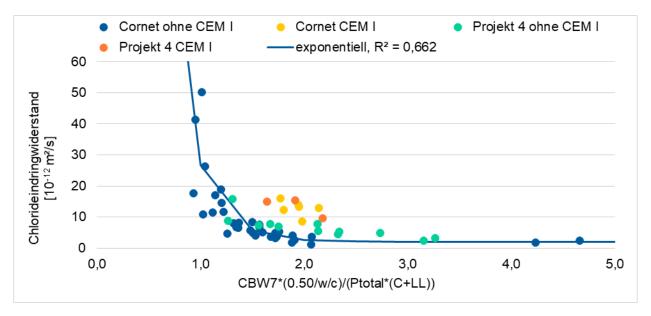


Abbildung 71: Zweiter Hydratationsgradbasierter Kennwert zur Vorhersage des Chlorideindringwiderstandes (blau = Cornet/IGF 187 EN ohne CEM I, grün = Projekt 4 ohne CEM I, gelb = Cornet/IGF 187 EN nur CEM I, orange = Projekt 4 nur CEM I)

3.2.11.6 Fazit

Die Untersuchungen in Zusammenhang mit den Hydratationsgradbasierten Kennwerten ergaben, dass die Kennwerte sowohl für die Vorhersage des Karbonatisierungswiderstandes als auch für die Prognose des Chlorideindringwiderstandes genutzt werden können. Der aus einem vorangegangenen Vorhaben (1 % CO₂ -Konzentration) ermittelte Kennwert für den Karbonatisierungswiderstand konnte auch für Betone aus Projekt 4 (3 % CO₂ -Konzentration) genutzt werden. Die beiden Kennwerte zur Vorhersage des Chlorideindringwiderstandes lieferten für die Betone aus Projekt 4 ähnlich gute Zusammenhänge wie im vorangegangenen IGF-Vorhaben.

3.3 Statistische Auswertung der Versuchsergebnisse aller Forschungseinrichtungen (AP 3)

3.3.1 Vergleichs- und Wiederholpräzision

In der Tabelle 32 ist die ermittelte Wiederhol- und Vergleichspräzision der beteiligten Forschungseinrichtungen gemäß DIN ISO 5725-2 [42] dargestellt. Die Nummerierung der Labore erfolgte zufällig. Alle Standardabweichungen und Variationskoeffizienten liegen innerhalb der Grenzen der DIN EN 12390-18 [5]. Die Grenzen der Vergleichspräzision werden deutlich unterschritten. Diese ist nur halb so groß wie maximal zugelassen.

Tabelle 32: Wiederhol- und Vergleichspräzision gemäß DIN ISO 5725-2 der beteiligten Forschungseinrichtungen beim Chloridmigrationsversuch

	Wiederholpr	äzision	Vergleichspräzision		
	Stabw [10 ⁻¹² m ² /s]	CV [%]	Stabw [10 ⁻¹² m ² /s]	CV [%]	
Labor 1	0,8	5,9			
Labor 2	1,5	11,2	1,5	10,3	
Labor 3	1,6	9,7			

3.3.2 Gemeinsame Betrachtung

Im Sinne der internen Validität wurden die Einflüsse des Zementherstellers und -charge, der Zement- und Wasserdosierung sowie der Gesteinskörnung univariat untersucht. Da in der Praxis die Dosiertoleranzen der Ausgangsstoffe gleichzeitig wirken, erfolgt in diesem Kapitel eine gemeinsame Betrachtung der Untersuchungsgegenstände auf statistischer Ebene.

Grundlegend werden die Ergebnisse der untersuchten Einflüsse weiterhin als normalverteilt angenommen. Konnten durch die dargestellten Untersuchungen signifikante Einflüsse identifiziert werden (Zementart, Dosierung Wasser- und Zementgehalt, Gesteinskörnungsart (Migration)), wurden die zugehörigen Versuchsergebnisse nicht als normalverteilt zusammengefasst, sondern differenziert betrachtet. Hieraus folgt ein in Abbildung 72 dargestelltes Schema, das die mögliche Kombination der Versuchsergebnisse zur gemeinsamen Betrachtung der Einflüsse beschreibt.

Von diesem Schema ausgehend sind Normalverteilungen für die Variation der Zementhersteller und -charge sowie der Kornzusammensetzung/-(art) zu kombinieren, die für eine bestimmte Zementart, Wasserzementwert sowie Gesteinskörnungsart (Migration) ermittelt wurden. In diesem Forschungsvorhaben findet sich diese Konstellation für einen CEM III/A, w/z 0,5 unter Verwen-

dung des Rundkorns (Migration) wieder. Die angesetzten Eingangswerte (Mittelwert, Standardabweichung) der jeweiligen Normalverteilung sind in der Tabelle 33 für den Chloridmigrationskoeffizienten sowie für die Karbonatisierungsgeschwindigkeit wiedergegeben.

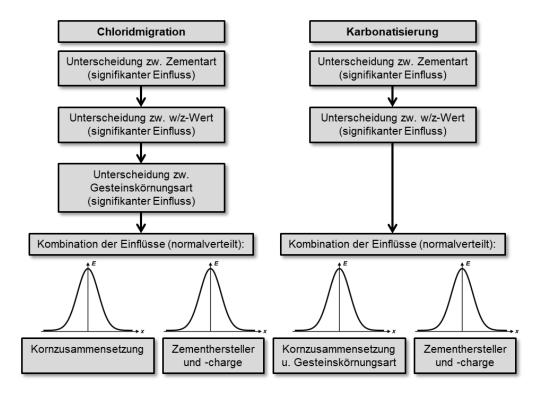


Abbildung 72: Schema einer gemeinsamen Betrachtung der untersuchten Einflüsse

Die folgende Kombination der normalverteilten Einflüsse (Tabelle 33) beruht auf Grundlage einer Monte-Carlo-Simulation, die ein numerisches Verfahren der Wahrscheinlichkeitstheorie darstellt. Über die Simulation werden Zufallsstichproben der Wahrscheinlichkeitsverteilungen gezogen und miteinander verknüpft und eine Gesamtwahrscheinlichkeit mithilfe des Gesetzes der großen Zahl gebildet. Vorteil des Ansatzes einer Monte-Carlo-Simulation ist, dass eine gemeinsame Betrachtung der Einflüsse mit beliebig vielen normalverteilten Einflüssen erfolgen kann.

Tabelle 33: Angesetzte Normalverteilungen der untersuchten Einflüsse als Eingangsgrößen für die Monte-Carlo-Simulation für einen CEM III/A, w/z 0,5, Rundkorn

	Normalverteilung						
Einfluss		onskoeffizient m²/s]	Karbonatisierungsgeschwindigkeit [mm/√d]				
	Mittelwert	Stabw.	Mittelwert	Stabw.			
Zementhersteller und -charge	5,25	1,37	1,47	0,27			
Kornzusammensetzung (Migration: Rundkorn)	3,38	0,42	1,16	0,06			

Für die Chloridmigrationkoeffizienten und die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten sind jeweils zwei normalverteilte Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen p_i gegeben:

$$p_1 = N(\mu_1, \sigma_1) \tag{10}$$

$$p_2 = N(\mu_2, \sigma_2) \tag{11}$$

Mit

 μ Erwartungswert,

σ Standardabweichung

Die Simulation wertet die Wahrscheinlichkeitsdichtefunktionen an n zufälligen Stellen aus, so dass für jede Wahrscheinlichkeitsverteilung ein eindimensionaler Vektor X_i mit n Einträgen zur Verfügung steht. Die Verteilungen werden anschließend wie folgt zu einer globalen Verteilung \overline{X} kombiniert:

$$\bar{X} = \frac{1}{i} \sum_{i=1}^{i} X_i \tag{12}$$

Mit

i Anzahl der zu kombinierenden Normalverteilungen

X Vektor der Zufallsstichproben

Die resultierenden n Einträge des eindimensionalen Vektors \overline{X} können wiederum als normalverteilt angenommen werden. Hierbei ist auf die Wahl einer genügend hohen Anzahl der n Iterationen zu achten. Die resultierenden Normalverteilungen für n=10.000 ist für die Chloridmigration (CEM III/A, w/z 0,5, Rundkorn) und die Karbonatisierungsgeschwindigkeit (CEM III/A, w/z 0,5) in Abbildung 73 dargestellt. Der Tabelle 34 sind die zugehörigen Mittelwerte, Standardabweichungen und 95 %-Quantilswerte zu entnehmen. Demnach lässt sich das 95 %-Quantil des Choridmigrationskoeffizienten der Expositionswiderstandsklasse XRDS2 und die Karbonatisierungsgeschwindigkeit der Klasse XRC6 zuordnen (EN 206-100 - Draft 14).

Tabelle 34: Resultierende Normalverteilungen durch Kombination der untersuchten Einflüsse mittels Monte-Carlo-Simulation für einen CEM III/A, w/z 0,5, Rundkorn

	Chloridmigrationskoeffizient [10 ⁻¹² m²/s]	Karbonatisierungsgeschwindigkeit [mm/√d]
Mittelwert	4,31	1,31
Stabw.	0,72	0,14
95 %-Quantil	5,49	1,54

Wahrscheinlichkeitsdichte [-]

0,2

0,0

2

1,0 Normalverteilung: $\mu = 4.31 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 0,8 $\sigma = 0.72 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 0,6 $\sigma = 0.72 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$

4

Wahrscheinlichkeitsdichte [-]

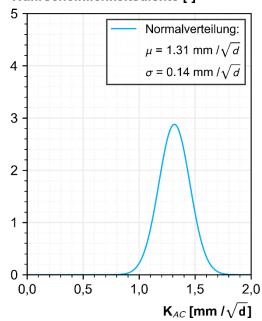


Abbildung 73: Resultierende Normalverteilung der kombinierten Einflüsse auf die Chloridmigrationskoeffizienten (links) und die Karbonatisierungsgeschwindigkeit (rechts) für einen CEM III/A, w/z 0,5, Rundkorn

10

8

 M_{nss} [10⁻¹² m²/s]

3.4 Datenerhebung von Dauerhaftigkeitskennwerten aus der Transportbetonindustrie

Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde durch die in puncto Transportbeton GmbH eine Datenabfrage bei Unternehmen und Werken der Transportbetonindustrie durchgeführt. Die Datenerhebung erfolgte über die Organisationsstruktur des Bundesverbandes der Deutschen Transportbetonindustrie e. V. sowie der Forschungsgemeinschaft Transportbeton e. V.. Die Datenerhebung umfasste neben den detaillierten Betonzusammensetzungen die Frisch- und Festbetoneigenschaften der Betone sowie Kennwerte zu deren Chlorid- und Karbonatosierungswiderstand. Die Ergebnisse wurden den Forschungseinrichtungen anonymisiert zur Verfügung gestellt und sind in Tabelle 35 zusammengefasst.

Tabelle 35: Zusammenfassung der Ergebnisse der Datenerhebung aus der Transportbetonindustrie

Versuchsart	Angewendetes Verfah- ren	Datenanzahl	Abweichung zu den Verfahren der FE1 – FE3
gesamt		224	
	NT Build 492	14	10 % NaCl
Chloridmigration	ibac-Verfahren	4	50 mm BK, 10 % NaCl
Chloridmigration	NT Build 492	34	10 % NaCl
	BAW MCL/MDCC	27	10 % NaCl
	DIN EN 12390-12	101	3 % CO ₂ , 50 % rel. Feuchte
Karbonatisierung	DIN CEN/TR 16563	16	natürliche Karbonatisierung
	DIN EN 12390-12	7	3 % CO ₂ , 57 % rel. Feuchte

Insgesamt wurden bei den Unternehmen und Werken der Transportindustrie 224 Datensätze erhoben. Von vielen potentiellen Teilnehmern der Umfrage wurde im Zuge der Datenerhebung mitgeteilt, dass in ihren Unternehmen oder Werken keine Dauerhaftigkeitskennwerte der Betone bestimmt werden.

Die Datenerhebung ergab darüber hinaus, dass eine Vielzahl verschiedener Untersuchungsverfahren angewendet werden. Die Chloridmigrationsversuche wurden von den Forschungseinrichtungen nach DIN EN 12390-18 durchgeführt. Diese Verfahren wurde von keinem der teilnehmenden Unternehmen durchgeführt. Die Karbonatisierungsversuche wurden von den Forschungseinrichtungennach DIN EN 12390-12 mit 3 % CO₂ bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 57 % durchgeführt. Nur sieben Datensätze aus der Datenerhebung entsprechen diesen Prüfrandbedingungen.

Da die Ergebnisse der Laborprüfverfahren mit unterschiedlichen Randbedingungen nicht oder nur indirekt miteinander vergleichbar sind, ist die Verwertung in Rahmen dieses Forschungsvorhabens nicht umsetzbar. Das IGF-Vorhaben 21835 N befasst sich im Detail mit der Vergleichbarkeit verschiedener Laborprüfverfahren. In Abstimmung mit dem projektbegleitenden Ausschuss werden die Ergebnisse der Datenerhebung insbesondere im Rahmen dieser Untersuchungen verwendet.

Dennoch ist die Datenerhebung auch für das vorliegende Forschungsvorhaben relevant, da sie deutlich macht, dass der Umstieg auf ein Performance-basiertes Dauerhaftigkeitskonzept mit einem im Vergleich zum heutigen Stand deutlich erhöhtem Prüfaufwand für die Betonindustrie verbunden ist.

3.5 Analyse der Instrumente der Produktions- und Konformitätskontrolle (AP 4)

Die Produktions- und Konformitätskontrolle der Eigenschaften Karbonatisierungsgeschwindigkeit K_{AC} [mm/Tag^{0,5}] und Chloridmigrationskoeffizient M_{nss} [10⁻¹² m²/s] wird üblicherweise an im Labor hergestellten Probekörpern erfolgen. Die Konformitätsprüfung ist eine Prüfung, die vom Hersteller durchgeführt wird, um die Konformität des Produkts nachzuweisen. Der Hersteller muss also sicherstellen, dass der Beton einen bestimmten Karbonatisierungs- und/oder Chlorideindringwiderstand aufweist. Die anschließende Konformitätsbewertung ist eine systematische Überprüfung, die klärt, in welchem Umfang ein Produkt die festgelegten Anforderungen erfüllt. Die Konformitätskontrolle ist Bestandteil der Produktionskontrolle.

Die Produktionskontrolle umfasst alle Maßnahmen, die für die Aufrechterhaltung der Konformität des Betons mit den festgelegten Anforderungen erforderlich sind. Nach DIN EN 206-1 fallen hierunter: die korrekte Baustoffauswahl, der Betonentwurf, die Betonherstellung, die Überwachung und Prüfungen, die Verwendung der Prüfergebnisse im Hinblick auf Ausgangsstoffe, Frisch- und Festbeton und Einrichtungen und die Konformitätskontrolle.

In DIN EN 206-1 und DIN 1045-2:2023-08 sind keine Konformitätskriterien oder Hinweise bezüglich des Chlorideindringwiderstandes nach DIN EN 12390-18 und des Karbonatisierungswiderstandes nach DIN EN 12390-12 enthalten.

Die EN 206-1 wird auch in der Schweiz verwendet. In dem Schweizer Dokument aus dem Jahr 2013 sind Vorgaben zur Prüfung des Karbonatisierungs- und Chloridwiderstandes enthalten (siehe Tabelle 36). Die Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes nach SIA 262/1 Anhang I

wird bei 4 Vol.-% CO₂ durchgeführt. Im Forschungsvorhaben wurde der Karbonatisierungswiderstand bei 3 Vol.-% CO₂ geprüft.

Tabelle 36: Auszug aus SN EN 206-1/NE:2013 Tabelle NA.9

	Karbonatisierungwiderstand	Chloridwiderstand
Prüfung gemäß Norm SIA 262/1	Anhang I	Anhang B
Prüfung ist durchzuführen bei den Expositionsklassen	XC3, XC4, XD1, XD2a, XF1	XD2b, XD3
Prüfung ist durchzuführen bei den Betonsorten gemäß Tabelle NA2	Sorte B, C, D und E	Sorte F und G
Grenzwert für Mittelwert	K _N ≤ 5,0 [mm/Jahre ^{0,5}]	D _{Cl} ≤ 10 x 10 ⁻¹² m ² /s
Grenzwert für Mittelwert + Grenzabweichung	K _N ≤ 5,5 [mm/Jahre ^{0,5}]	D _{Cl} ≤ 13 x 10 ⁻¹² m ² /s
Prüfhäufigkeit für Betonhersteller <u>ohne</u> ausreichende Erfahrung	Mind. 4 pro Jahr oder alle 500 m³ ab 4000 m³ alle 1000 m³ ab 30000 m³ alle 1500 m³	Mind. 4 pro Jahr oder alle 125 m³ ab 1000 m³ alle 250 m³ ab 2000 m³ alle 500 m³
Prüfhäufigkeit für Betonhersteller <u>mit</u> ausreichender Erfahrung	Mind. 2 pro Jahr oder alle 1000 m³ ab 4000 m³ alle 2000 m³ ab 30000 m³ alle 3000 m³	Mind. 2 pro Jahr oder alle 250 m³ ab 1000 m³ alle 500 m³ ab 2000 m³ alle 1000 m³

Ein Vorschlag zum Konformitätsnachweis bei der Prüfung des Karbonatisierungswiderstandes nach DIN EN 12390-12 und Chlorideindringwiderstandes nach DIN EN 12390-18 ist in Tabelle 37 enthalten. Aus wirtschaftlichen Gründen wird vorgeschlagen, das Prinzip der Betonfamilien (bekannt aus der Druckfestigkeitsprüfung), auch auf die Konformitätsprüfung zum Nachweis des Karbonatisierungswiderstandes und Chlorideindringwiderstandes zu übertragen. Der Begriff "Betonfamilie" stammt aus DIN EN 206-1 und beschreibt eine Gruppe von Betonzusammensetzungen, für die ein verlässlicher Zusammenhang zwischen maßgebenden Eigenschaften festgelegt und dokumentiert ist. Betone können in Betonfamilien zusammengefasst werden, wenn Zement gleicher Art, Festigkeitsklassen und Herkunft, Gesteinskörnung gleicher Art, Festigkeitsklasse und Herkunft, wasserreduzierende/verflüssigende Betonzusatzmittel, gesamter Bereich der Konsistenzklassen und ein begrenzter Bereich von Festigkeitsklassen berücksichtigt werden. Die Anforderungen an die Betonsorten B, C, D, E, F und G (siehe Tabelle 36) sind im Anhang in Tabelle A 7 gegeben.

Der Umstieg vom deskriptiven Ansatz zu einem leistungsorientierten Ansatz wird nicht von heute auf morgen geschehen. Anfangs wird der Prüfaufwand hoch sein (siehe Tabelle 37). Sobald jedoch ein gewisses Erfahrungsniveau erreicht wurde, halbiert sich die Prüfhäufigkeit.

In Tabelle 37 wird bei der Prüfhäufigkeit nach Betonherstellern mit ausreichender Erfahrung und ohne ausreichende Erfahrung unterschieden. In der Schweiz gelten Betonhersteller, die Beton für eine bestimmte Expositionsklasse herstellen und die bisherigen Prüfvorgaben nachweislich über die letzten 36 Monate eingehalten haben, als Betonhersteller mit ausreichender Erfahrung. Betonhersteller, die diese Anforderungen nicht erfüllen, gelten als Betonhersteller ohne ausreichende Erfahrung. Hier ist die Prüfhäufigkeit zu verdoppeln.

Tabelle 37: Vorschlag für Konformitätskriterien und Prüfhäufigkeit zum Nachweis des Karbonatisierungswiderstandes und Chlorideindringwiderstandes

	Karbonatisierungwiderstand	Chloridwiderstand
Prüfung gemäß Norm	DIN EN 12390-12	DIN EN 12390-18
Prüfung ist durchzuführen bei den ERC-Klassen	XRC	XRD
Grenzwert für Mittelwert	XRC 5: $K_{AC} \le 1,4$ [mm/Tage 0,5] XRC 7: $K_{AC} \le 2,0$ [mm/Tage 0,5] XRC 9: $K_{AC} \le 2,6$ [mm/Tage 0,5] > XRC 9: -	XRDS 2: $M_{nss} \le 7.3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ XRDS 5: $M_{nss} \le 14.4 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ XRDS 10: $M_{nss} \le 29.4 \times 10^{-12}$ m^2/s > XRDS 10: -
Prüfhäufigkeit für Betonhersteller ohne ausreichende Erfahrung	Mind. 4 pro Jahr oder alle 500 m³ ab 4000 m³ alle 1000 m³ ab 30000 m³ alle 1500 m³	Mind. 4 pro Jahr oder alle 125 m³ ab 1000 m³ alle 250 m³ ab 2000 m³ alle 500 m³
Prüfhäufigkeit für Betonhersteller <u>mit</u> ausreichender Erfahrung	Mind. 2 pro Jahr oder alle 1000 m³ ab 4000 m³ alle 2000 m³ ab 30000 m³ alle 3000 m³	Mind. 2 pro Jahr oder alle 250 m³ ab 1000 m³ alle 500 m³ ab 2000 m³ alle 1000 m³

3.6 Berichterstattung und Ergebnistransfer (AP 5)

Die im Rahmen des Forschungsvorhabens durchgeführten und im Nachgang geplanten Maßnahmen zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft sind in Kapitel 9 dargestellt.

4 Zusammenfassung der Ergebnisse

Der von FE 1 (KIT) durchgeführte Arbeitsschritt 1 umfasst die Untersuchung des Einflusses der Zementherkunft (Hersteller) und der Zementherstellungscharge auf den Cloridmigrationskoeffizienten und die Karbonatisierungsgeschwindigkeit. Basierend auf den im RCM-Test bestimmten Chloridmigrationskoeffizienten, konnten in der Regel keine systematischen Unterschiede zwischen Betonen mit Zementen von verschiedenen Herstellern oder aus verschiedenen Chargen festgestellt werden. Jedoch zeigte sich, dass größere Unterschiede in der Zusammensetzung der Zementhauptbestandteile durchaus einen relevanten Einfluss auf den Chlorideindringwiderstand haben können. So führten die niedrigsten Hüttensandanteile bei CEM III/A (40 M.-% bei Hersteller 2) zu erhöhten Chloridmigrationskoeffizienten im Vergleich zu den übrigen Hochofenzementen mit Hüttensandanteilen von 45-51 M.-%. Nach DIN EN 197-1 [28] sind für CEM III/A Hüttensandanteile von 36-65 M.-% zulässig. Es ist davon auszugehen, dass durch eine Ausnutzung dieser zulässigen Variation der Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten zunimmt. Gleiches gilt für die Ausnutzung der nach DIN EIN 197-1 zulässigen Variationen der Zementhauptbestandteile von CEM II/A-LL und CEM II/B-S. Auch hier sind deutlich größere Variationen zulässig als die in diesen Forschungsvorhaben verwendeten Zemente aufwiesen (vgl. Tabelle 1).

Die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten weisen auch unabhängig von der Variation des Zementherstellers oder der Zementcharge hohe Streuungen auf, sodass eine Differenzierung von herstellungs- und versuchsbedingten Streuungen von den Schwankungen der Karbonatisierungsgeschwindigkeit, die möglicherweise aus der Variation von Zementhersteller oder Zementcharge resultieren, deutlich erschwert wird. Basierend auf der Betrachtung der durchgeführten Versuche konnte jedoch keine systematische Beeinflussung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit durch die Variation der Zementherkunft oder -charge festgestellt werden.

Im Arbeitsschritt 2 wurden drei Zemente mit reduziertem Klinkeranteil (sogenannte Zukunftszemente) in zwei Betonmischungen geprüft. Die Mischungen unterschieden sich in ihren w/z-Werten (0,50 und 0,40). Die Zukunftszemente FZ1 (CEM II/C-M (S-LL)) und FZ2 (CEM V/A (S-P)) wiesen Karbonatisierungsgeschwindigkeiten und Chloridmigrationskoeffizienten auf, die vergleichbar waren mit denen der Zemente Z3 (CEM II/B-S) und Z4 (CEM III/A) aus dem Forschungsvorhaben. Der Experimentalzement FZ3 (CEM X/35K-45LL-20S) wies die höchste Karbonatisierungsgeschwindigkeit auf. Der Chloridmigrationskoeffizient von FZ3 lag im Bereich eines CEM I. Die Absenkung des w/z-Wertes von 0,50 auf 0,40 führte in Betonen mit den Zukunftszementen zu einer Reduzierung der Chloridmigrationskoeffizienten um 24 bis 51 % und zu einer Reduzierung der Karbonatisierungsgeschwindigkeit um 47 bis 60 %. Bei w/z-Werten von 0,40 zeigten Betone mit FZ1, FZ2 und FZ3 Karbonatisierungsgeschwindigkeiten, die denen eines CEM I bei w/z 0,50 entsprachen.

Die FE 3 (VDZ) hat im Arbeitsschritt 3.1 den Einfluss der Dosiergenauigkeit bezüglich der Einwaagetoleranzen nach DIN 1045-2 untersucht. Hierzu wurden sowohl der Zementgehalt als auch der Wassergehalt innerhalb der zulässigen Grenzen von 15 kg/m³ beziehungsweise ±3 % angepasst. Die sich ergebenden w/z-Wert Schwankungen liegen außerhalb der zulässigen Grenze von +0,02 und dienen der theoretischen Betrachtung. Die Versuche haben gezeigt, dass eine Reduktion des w/z-Wertes zu deutlich verbesserten Dauerhaftigkeitseigenschaften führen kann. Insbesondere im Rahmen der 5-fachen Prüfung der Referenzmischung konnte gezeigt werden, dass ebenfalls eine Abweichung von +0,02 vom Ziel-w/z-Wert zu deutlichen Unterschieden führen kann. Eine Abweichung innerhalb der zulässigen Grenzen von +0,02 vom Zielwert des w/z-Werts führte in diesem Versuchsprogramm in der Regel zu keiner Änderung der ermittelten ERC-Klassen nach dem Entwurf der ERC-Richtlinie des DAfStb.

Im Arbeitsschritt 3.2 wurden zu fünf Zeitpunkten, verteilt über einen Zeitraum von 3,5 Monaten, Proben aus einem TB-Werk entnommen. Es wurden die Frisch- und Festbetoneigenschaften geprüft. Weiterhin wurden Proben der Ausgangsstoffe entnommen, um damit einen Laborbeton herzustellen. Alle Mischungen erreichten 10 min nach Wasserzugabe die Zielkonsistenz F4. Die weitere Verarbeitbarkeit wurde durch die Frischbetontemperaturen beeinflusst. Die Druckfestigkeit, der Chloridmigrationskoeffizient und die Karbonatisierungsgeschwindigkeit der Betone aus dem Transportbetonwerk schwankte kaum.

Die FE 2 (HCU) hat den Einfluss der Kornzusammensetzung innerhalb der Dosiertoleranzen des DIN Fachberichts 100:2010, Tabelle 21, und der Gesteinskörnungsart (Rundkorn/Splitt) auf den Chloridmigrationskoeffizienten (DIN EN 12390-18 [5]) sowie die Karbonatisierungsgeschwindigkeit (DIN EN 12390-12 [4]) untersucht. Im Hinblick auf die Kornzusammensetzung konnten keine signifikanten Einflüsse auf beide Materialwiderstände festgestellt werden. Dies gilt auch für den Einfluss der Gesteinskörnungsart (Rundkorn/Splitt) innerhalb des beschleunigten Karbonatisierungsverfahrens. Bei der Chloridmigration zeigte die statistische Auswertung der Versuchsergebnisse einen signifikanten Einfluss der Gesteinskörnungsart. Ein erhöhter Feinstanteil beim Splitt sowie Abweichungen in der Sieblinie zwischen Splitt und Rundkorn stellen hierbei mögliche Einflussfaktoren dar, welche z.B. über die Kennwerte der Gesteinskörnung wie die Körnungsziffer oder der Anteil der abschlämmbaren Bestandeile erfasst werden könnten.

Die aus einem früheren IGF-Vorhaben (IGF 187 EN DURAFOR) bekannten Hydratationsgradbasierten Kennwerte zur Vorhersage des Karbonatisierungswiderstandes und des Chloriddiffusionswiderstandes wurden an den Zementen Z1 bis Z4 und FZ1 bis FZ3 bestätigt. Der ermittelte Kennwert für den Karbonatisierungswiderstand bei 1 Vol.-% CO₂-Konzentration konnte auch für

Betone aus Projekt 4 bei 3 Vol.-% CO₂-Konzentration genutzt werden. Die beiden Kennwerte zur Vorhersage des Chlorideindringwiderstandes lieferten für die Betone aus Projekt 4 ähnlich gute Zusammenhänge wie im vorangegangenen IGF-Vorhaben.

Mit Hilfe einer Monte-Carlo-Simulation konnten die Ergebnisse der untersuchten Einflüsse exemplarisch für einen CEM III/A (w/z 0,5, Rundkorn) miteinander kombiniert werden. Die Simulation lieferte für die Chloridmigration und die Karbonatisierungsgeschwindigkeit jeweils eine Normalverteilung. Hierbei ließ sich das 95 %-Quantil des Choridmigrationskoeffizienten der Expositionswiderstandsklasse XRDS2 und das 95 %-Quantil der Karbonatisierungsgeschwindigkeit der Klasse XRC6 zuordnen.

Für die beteiligten Forschungseinrichtungen wurden die Wiederhol- und Vergleichspräzision des Migrationsversuches bestimmt. Alle Standardabweichungen und Variationskoeffizienten liegen innerhalb der Grenzen der DIN EN 12390-18 [5]. Die Vergleichspräzions lag deutlich unterhalb der geforderten Grenzen.

5 Empfehlungen für die Regelwerke

Basierend auf den durchgeführten Untersuchungen konnte kein systematischer Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten sowie die Karbonatisierungsgeschwindigkeiten durch die Variation des Zementherstellers oder der Zementcharge festgestellt werden. Daraus folgt, dass auch in den Regelwerken keine differenzierte Berücksichtigung der Zementherkunft und -charge erforderlich ist.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass die Variation der Kornzusammensetzung innerhalb der Dosiertoleranzen des DIN-Fachberichts 100:2010, Tabelle 21, keinen signifikanten Einfluss auf den Chloridmigrationskoeffizienten sowie die Karbonatisierungsgeschwindigkeit hat. Daher müssen innerhalb der Regelwerke keine differenzierten Anforderungen diesbezüglich formuliert werden.

Für die Variation der Gesteinskörnungsart konnte beim Karbonatisierungswiderstand kein signifikanter Einfluss festgestellt werden, wohingegen sich ein signifikanter Einfluss auf die Chloridmigration gemäß DIN EN 12390-18 zeigte. Eine Änderung der Gesteinskörnungsart innerhalb einer Betonzusammensetzung bedarf nach DIN-Fachbericht 100:2010 einer erneuten Erstprüfung. Abweichungen der Materialeigenschaften aufgrund von Änderungen der Ausgangsstoffe werden hierüber erfasst und Konformitäten kontrolliert.

Die Bestimmung des tatsächlich vorhandenen w/z-Wertes stellt wegen der unterschiedlichen Prüf- und Umwelteinflüsse sowohl im Labor als auch in der Praxis eine Herausforderung dar. Die Ergebnisse der Untersuchungen aus dem laufenden Betrieb eines Transportbetonwerks haben jedoch gezeigt, dass die zu erwartenden Dauerhaftigkeitseigenschaften trotz Abweichungen des w/z-Werts erreicht werden können.

Aufgrund der im Forschungsvorhaben gewonnenen Erkenntnisse wird empfohlen, die Grenzen der Expositionswiderstandsklassen für Karbonatisierung XRC und für Chloride XRDS nicht zu eng abzustufen. Die ERC-Klasseneinteilung entsprechend der ERC-Richtlinie des DAfStb Stand 2023-08 (vgl. Tabelle 6 und Tabelle 8) stellen auf Basis der vorliegenden Versuchsergebnisse eine sinnvolle Einteilung dar.

6 Darstellung des wissenschaftlich-technischen und wirtschaftlichen Nutzens der erzielten Ergebnisse insbesondere für KMU

Von den hier erzielten Ergebnissen profitieren vor allem kleine und mittelständische Unternehmen (KMU), da diese nicht über die zeitlichen und personellen Ressourcen für das hier durchgeführte Forschungsvorhaben verfügen. Transportbetonhersteller, Betonfertigteilwerke und Baufirmen sind in Deutschland zu großen Teilen kleine oder mittelständische Unternehmen. Das Forschungsvorhaben beleuchtet das Performance-basierte Dauerhaftigkeitskonzept anhand der beiden Parameter Karbonatisierungswiderstand und Chlorideindringwiderstand.

Aus Sicht eines kleineren oder mittelständischen Transportbetonwerks sind die Ergebnisse aus AS 3.2 (siehe Kapitel 3.2.9) relevant, da sie zeigen, dass die im normalen Produktionsalltag auftretenden Schwankungen offenbar keinen großen Einfluss auf die dauerhaftigkeitsrelevanten Festbetoneigenschaften Karbonatisierungswiderstand und Chlorideindringwiderstand haben.

Das Forschungsvorhaben stellte auch die Frage, ob die Materialkennwerte in Abhängigkeit von der Betonzusammensetzung systematisch klassifiziert werden können. Das Forschungsvorhaben zeigte, dass die Zementart, neben dem w/z-Wert, den größten Einfluss auf den Karbonatisierungswiderstand und Chlorideindringwiderstand hat. Eine Klassifizierung, bspw. nach Betonfamilien, muss daher primär die beiden Parameter Zementart und w/z-Wert berücksichtigen.

Zukünftige Zemente (siehe AS 2 in Kapitel 3.2.7) werden niedrigere Klinkergehalte und höhere Anteile weiterer Hauptbestandteile als heute übliche Zemente aufweisen. Dies kann zu einer relativ großen Bandbreite an Karbonatisierungswiderständen und Chlorideindringwiderständen führen. In AS2 wurde gezeigt, dass die Zemente der Zukunft mit Hilfe abgesenkter w/z-Werte im Beton sehr gute Materialwiderstände erreichen können.

7 Verwendung der Zuwendung

7.1 wissenschaftlich-technisches Personal (Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans)

Porconalaucaabon	Gesamte Personenmonate im Forschungsvorhaben					
Personalausgaben	KIT (FE 1)	HCU (FE 2)	VDZ (FE 3)			
Wissenschaftlich-technisches Personal (HPA-Gruppe A)	13,0	8,5	6,42			

7.2 Geräte (Einzelansatz B des Finanzierungsplans)

7.2.1 Forschungseinrichtung 1 (KIT):

Gemäß Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans sind keine Ausgaben für die Gerätebeschaffung vorgesehen. Im Berichtszeitraum wurden keine Ausgaben zur Gerätebeschaffung getätigt.

7.2.2 Forschungseinrichtung 2 (HCU):

Im Berichtszeitraum wurde ein Darrgerät zur alternativen Bestimmung des w/z-Werts beschafft. Die Kosten betrugen ca. 550 €.

7.2.3 Forschungseinrichtung 3 (VDZ):

Gemäß Einzelansatz A.1 des Finanzierungsplans sind keine Ausgaben für die Gerätebeschaffung vorgesehen. Im Berichtszeitraum wurden keine Ausgaben zur Gerätebeschaffung getätigt.

7.3 Leistungen Dritter (Einzelansatz C des Finanzierungsplans)

7.3.1 Forschungseinrichtung 1 (KIT):

Gemäß Einzelansatz C des Finanzierungsplans sind Ausgaben für Leistungen Dritter zur eine Datenerhebung bei Unternehmen und Werken der Transportbetonindustrie vorgesehen. Ein Angebot sowie eine Begründung zur Auswahl des durchführenden Unternehmens liegen vor. Die Beauftragung erfolgte im Berichtszeitraum und umfasst Kosten von 12.500,00 €.

7.3.2 Forschungseinrichtung 2 (HCU):

Gemäß Einzelansatz C des Finanzierungsplans sind keine Ausgaben für Leistungen Dritter vorgesehen. Im Berichtszeitraum wurden keine Ausgaben für Leistungen Dritter getätigt.

7.3.3 Forschungseinrichtung 3 (VDZ):

Gemäß Einzelansatz C des Finanzierungsplans sind keine Ausgaben für Leistungen Dritter vorgesehen. Im Berichtszeitraum wurden keine Ausgaben für Leistungen Dritter getätigt.

8 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Im Berichtszeitraum wurden, wie im Forschungsantrag vorgesehen, die Arbeitspakete 1 bis 5 bearbeitet. Die geleistete Arbeit war zur Erreichung der Forschungsziele notwendig und angemessen.

9 Plan zum Ergebnistransfer in die Wirtschaft

Tabelle 38: Durchgeführte Transfermaßnahmen während der Laufzeit des Forschungsvorhabens

Maßnahme	Ziel	Ort/Rahmen	Durchgeführt:
Informationen auf VDZ-Homepage	Ergebnistransfer in die Wirtschaft	Information über das IGF-Vorhaben	2021
Information über das Projekt sowie Planung weiterer Arbeits- schritte	Technisch-wissen- schaftliche Beglei- tung des Projekts	Sitzungen des projekt- begleitenden Ausschus- ses (persönlich und on- line)	1. Sitzung am 02.07.2021 2. Sitzung am 18.01.2022 3. Sitzung am 26.10.2022 4. Sitzung am 23.03.2023 5. Sitzung am 28.09.2023 6. Sitzung am 05.03.2023
Information über das Projekt und Diskus- sion der erzielten Er- gebnisse	Ergebnistransfer in die Wirtschaft, Dis- kussion des Projekts	FTB-Forschungsbeirat/ FTB Betreuungsgruppe Dauerhaftigkeits-be- messung,	2 Sitzungen am 03.11.2021 und 23.12.2021
Kurzveröffentlichung zu den Projektinhalten und -zielen	Information der BTB- Mitglieds-unterneh- men	TB-iNFO	TB-iNFO Nr. 83 06/2021
Vorstellung und Dis- kussion der Ergeb- nisse beim DAfStb	Berücksichtigung der Ergebnisse in zu- künftigen Nor- men/Richtlinien	Sitzung der DAfStb-Ko- ordinierungsgruppe DauPerf	1. Sitzung am 22.06.2021 2. Sitzung am 28.04.2022 3. Sitzung am 10.11.2022 4. Sitzung am 04.05.2023
Masterarbeit innerhalb des Forschungsvor- habens	Vermitteln wissen- schaftlicher Kennt- nisse und Methoden	Abschlussarbeit Nikita Gula "Dauerhaftigkeit von Beton nach dem Performance-Prinzip – Einfluss von w/z-Wert- schwankungen auf die Parameter Chloridein- dring- und Karbonatisie- rungswiderstand"	19.11.2021 bis 19.05.2022
Masterarbeit innerhalb des Forschungsvor- habens	Vermitteln wissen- schaftlicher Kennt- nisse und Methoden	Abschlussarbeit Konstantin Strähle: "Untersuchung des Chlorideindringwiderstands herkömmlicher und ressourcenoptimierter Betone"	16.05.2022 bis 16.11.2022
Bachelorarbeit inner- halb des Forschungs- vor-habens	Vermitteln wissen- schaftlicher Kennt- nisse und Methoden	Abschlussarbeit Bur- kard Binder: "Zuverläs- sigkeit der Bestimmung des Chlorideindringwi- derstands von Beton unter Anwendung des RCM-Tests	02.11.2022 bis 02.02.2023

Tabelle 39: Geplante Transfermaßnahmen nach Abschluss des Forschungsvorhabens

Maßnahme	Ziel	Beschreibung	Zeit- raum
Veröffentlichungen der Ergebnisse im Internet	Information der Wirtschaft über die Ergebnisse	Kurzdarstellung auf den Homepages der Forschungseinrichtungen	2023
Veröffentlichungen in (Fach)Zeitschriften	Information der Wirtschaft über die Ergebnisse	z.B. TB-iNFO, "Beton" und/oder "Beton- und Stahlbetonbau"	2023
Veröffentlichungen der Ergebnisse auf Tagungen	Information der Wirtschaft über die Ergebnisse	z. B. 21. ibausil, Transportbeton- Tage, Ulmer Betontage	ab 2024
Aufnahme der Ergebnisse in Veranstaltungen des VDZ- Weiterbildungswerks	Wissensvermittlung für Unternehmen	Seminare, Webinare	ab 2024
Vorstellung der Ergebnisse in DAfStb- und Normungsgremien	Berücksichtigung der Ergebnisse in zukünftigen Normen / Richtlinien	Sitzungen der relevanten DAfStb-, DIN-, CEN-Gremien	ab 2023
Darstellung/Diskussion der Ergebnisse im Rahmen von Fachtagungen/Symposien	Information eines breiten Fachpublikums über rele- vante Forschungsergeb- nisse	ausgewählte Veranstaltungsorte (je nach Lage evtl. in Form von Webina- ren); Deutschland, Europa und au- ßereuropäisches Ausland	ab 2023
Darstellung/Diskussion der Ergebnisse im Rahmen von internen, universitären Veranstaltungen	Information eines regiona- len Fachpublikums über relevante Forschungser- gebnisse	Seminarräume des KIT, z. B. "Kollo- quium Konstruktiver Ingenieurbau" und Symposium des IMB"	ab 2024

10 Literatur

- [1] DIN EN 1992-1-1 Bemessung und Konstruktion von Stahlbeton- und Spannbetontragwerken: Teil 1-1: Allgemeine Regeln – Regeln für Hochbauten, Brücken und Ingenieurbauwerke, Okt. 2021.
- [2] DIN EN 206-1 Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität, Jul. 2001
- [3] DIN 1045-2, Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton: Teil 2: Beton, Aug. 2023.
- [4] DIN EN 12390-12 Prüfung von Festbeton Teil 12: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstandes von Beton Beschleunigtes Karbonatisierungsverfahren, Okt. 2018.
- [5] DIN EN 12390-18 Prüfung von Festbeton Teil 18: Bestimmung des Chloridmigrationskoeffizienten, Nov. 2018.
- [6] T. Stengel, A. Schließl-Pecka, J. Feuerecker und K. Himsel, "Modifizierung der RCM-Tests zur Optimierung der Messpräzision, Versuchsdauer und Wirtschaftlichkeit: Entwicklung praxisgerechter Labor- und Baustellenprüfungen zum Nachweis der Konformität von Beton für chloridexponierte Bauteile," *Beton- und Stahlbeton*, Jg. 2019, Nr. 114, S. 1–10, doi: 10.1002/best.201900054.
- [7] C. Müller, S. Palm, A. Wolter und T. Bohne, "Characteristic values based on degree of hydration for predicting the durability of concrete," *Cement International*, Nr. 14, S. 80–85, 2016.
- [8] J. Stark und B. Wicht, *Dauerhaftigkeit von Beton*, 2. Aufl. Berlin: Springer-Verlag, 2013.
- [9] K. Backhaus, B. Erichson, W. Plinke und R. Weiber, *Multivariate Analysemethoden*. Springer Gabler Verlag, 2018.
- [10] C. Gehlen, "Probabilistische Lebensdauerbemessung von Stahlbetonbauwerken Zuverlässigkeitsbetrachtungen zur wirksamen Vermeidung von Bewehrungskorrosion," *Schriftenreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, 510, Dissertation, 2000.
- [11] S. Lay, "Abschätzung der Wahrscheinlichkeit tausalzinduzierter Bewehrungskorrosion. Baustein eines Systems zum Lebenszyklusmanagement von Stahlbetonbauwerken," Dissertation, Technische Universität München, 2006.
- [12] Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Hg. *Bauwerksprüfung nach DIN 1076 Bedeutung, Organisation, Kosten*, Dokumentation 2013.
- [13] A. Westendarp *et al.*, "Erhaltung und Instandsetzung von massiven Verkehrswasserbauwerken," *Beton-Kalender*, S. 187–246, 2015.
- [14] P. Schießl und T. F. Mayer, "Lebensdauermanagementsystem Teilprojekt A2: Schlussberichte zur ersten Phase des DAfStb/BMBF-Verbundforschungsvorhabens "Nachhaltig Bauen mit Beton," Schriftenreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Heft 572, S. 49–100, 2007.
- [15] *Model code for service life design* (Bulletin / International Federation for Structural Concrete Model code 34). Lausanne: fib, 2006.
- [16] DIN EN 12390-11 Prüfung von Festbeton Teil 11: Bestimmung des Chloridwiderstands von Beton einseitig gerichtete Diffusion, Nov. 2015.
- [17] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), "BAW-Merkblatt: Dauerhaftigkeitsbemessung und bewertung von Stahlbetonbauwerken bei Carbonatisierung und Chlorideinwirkung (MDCC)," Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe, 2019.
- [18] S. Greve-Dierfeld, "Bemessungsregeln zur Sicherstellung der Dauerhaftigkeit XC-exponierter Stahlbetonbauteile," Dissertation, Technische Universität München, 2015.

- [19] A. Rahimi, "Semiprobabilistisches Nachweiskonzept zur Dauerhaftigkeitsbemessung und bewertung von Stahlbetonbauteilen unter Chlorideinwirkung," Dissertation, Technische Universität München, 2016.
- [20] F. Jacobs und A. Leemann, Hg. Betoneigenschaften nach SN EN 206- 1: ASTRA Report VSS Nr. 615, 2007.
- [21] U. Wiens, "Zur Wirkung von Steinkohlenflugasche auf die chloridinduzierte Korrosion von Stahl in Beton," (Dissertation) *Schriftenreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Nr. 551, 2005.
- [22] R. Härdtl, "Veränderung des Betongefüges durch die Wirkung von Steinkohlenflugasche und ihr Einfluß auf die Betoneigenschaften," *Schriftenreihe Deutscher Ausschuss für Stahlbeton*, Nr. 448, 1995.
- [23] Y. F. Houst, H. Sadouki und F. H. Wittmann, "Influence of Aggregate Concentration on the Diffusion of CO2 and O2," *Interfaces in Cementitious Composites. Proceedings of the International Conference held by RILEM, Toulouse, 21-23 October 1992, (Maso, J.C. (Ed.))*, S. 279–288, 1992.
- [24] D. Heinz und A. Heisig, "Flugasche und Hüttensand Zusatzstoffe mit Zukunft?,"
- [25] B. Siebert, Untersuchungen zur Gleichmäßigkeit von Zementen über längere Produktionszeiträume, insbesondere hinsichtlich ihrer Wechselwirkungen mit Betonzusatzmitteln (Bauforschung Band T 3116), 2006.
- [26] SN EN 206-1/NE:2013, Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität: Nationale Elemente NE zur Norm SN EN 206-1:2000, 2013.
- [27] F. Moro, B. Godart und X. Guillot, "PERFDUB: A four-years Research Project to make a performance-based approach operational in France,"
- [28] DIN EN 197-1 Zement Teil 1: Zusammensetzung, Anforderungen und Konformitätskriterien von Normalzement, Nov. 2011.
- [29] EN 206-100 Concrete Part 100: Exposure Resistance Class Concrete Specification, conformity criteria and guidance, Draft 14.
- [30] DAfStb UA Dauerhaftigkeit, "D 255: ERC-Richtlinie Teil 2," Dez. 2023.
- [31] DIN EN 12390-10 Prüfung von Festbeton Teil 10: Bestimmung des Karbonatisierungswiderstands von Beton bei atmosphärischer Konzentration von Kohlenstoffdioxid, Aug. 2019.
- [32] S. Greve-Dierfeld, "Backround Document for FprEN 1992-1-1, CEN/TC 250/SC 2 N2087: Eurocode 2 Design of concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings, bridges and civil engineering structures," S. 78 S. 111, Mrz. 2023.
- [33] J. Hedderich und L. Sachs, *Angewandte Statistik*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2016.
- [34] H. Schiefer und F. Schiefer, *Statistik für Ingenieure: Eine Einführung mit Beispielen aus der Praxis*. Springer Vieweg, 2018.
- [35] DIN EN 12390-3 Prüfung von Festbeton Teil 3: Druckfestigkeit von Probekörpern; deutsche Fassung, Okt. 2019.
- [36] "CHLORTEST EU Funded Research Project Resistance of concrete to chloride ingress -From laboratory tests to in-field performance, WP5 Report - Final evaluation of test methods. Deliverables D16-19," 2015.
- [37] CEN/TR 17172 Validierungsprogramm für genormte Prüfverfahren der Chlorideindringung und der Karbonatisierung.
- [38] DIN EN 12620 Gesteinskörnung für Beton; Deutsche Fassung EN 12620:2002+A1:2008, Jun. 2008.
- [39] DIN Fachbericht 100:2010-03: Beton Zusammenstellung von DIN EN 206-1 Beton Teil 1: Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität und DIN 1045-2 Tragwerke aus

- Beton, Stahlbeton und Spannbeton Teil 2: Beton; Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität; Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1.
- [40] C. Fischer und H. Drenkard, "Einflussfaktoren auf den Rapid Chloride Migration Test zut Bewertung des Chloridwiderstands von Beton," *ce/papers*, Nr. 6, 2023.
- [41] DGZfP-Fachausschuss für Zerstörungsfreie Prüfung im Bauwesen, Unterausschuss LIBS, Merkblatt B 14 Quantifizierung von Chlorid in Beton mit der laserinduzierten Plasmaspektroskopie (LIBS), 2023.
- [42] DIN ISO 5725-2 Genauigkeit (Richtigkeit und Präzision) von Messverfahren und Messergebnissen: Teil 2: Grundlegende Methode für die Ermittlung der Wiederhol- und Vergleichpräzision eines vereinheitlichten Messverfahrens, Mai. 2022.

11 Anhang

11.1 Vorversuche und Frischbetoneigenschaften

Tabelle A 1: Vorversuche zur Einstellung des Mischungsentwurfs durch FE 1

	Zer	ment		Zu-	Fließmitt	Kon-	w/z		
Beto- nage	Art	Gehalt [kg/m³]	Siebli- nie	stand GK	Art	Gehalt [M% v.Z.]	sis- tenz- klasse	Inkl. Kern- feuchte	Ohne Kern- feuchte
1	Z1	320	A/B 16	F	1	1,00	F2	n.b.	n.b.
2	Z1	320	A/B 16	ОТ	1	1,00	F2	n.b.	n.b.
3	Z1	320	A/B 16	ОТ	1	1,40	F3	n.b.	n.b.
4	Z2	320	A/B 16	ОТ	1	1,20	F3	n.b.	n.b.
5	Z2+FA	320	A/B 16	ОТ	1	1,40	F4	n.b.	n.b.
6	Z3	320	A/B 16	ОТ	1	1,40	F4	n.b.	n.b.
7	Z3	320	A/B 16	ОТ	1	1,20	F4	n.b.	n.b.
8	Z1	320	A/B 16	OT	1	1,80	F3	n.b.	n.b.
9	Z1	320	A/B 16	ОТ	1	1,40	F3	n.b.	n.b.
10	Z1	320	A/B 16	ОТ	1	1,00	F2	n.b.	n.b.
11	Z1	320	A/B 16	F	1	1,0	F4	n.b.	n.b.
12	Z1	320	A/B 16	ОТ	2	1,00	F3	n.b.	n.b.
13	Z1	320	A/B 17	ОТ	1	0,70	F2	n.b.	n.b.
14	Z4	320	A/B 16	ОТ	1	1,00	F2	0,51	n.b.
15	Z1	352	A/B 16	ОТ	3	0,00	F1	n.b.	n.b.
16	Z1	352	A/B 16	ОТ	3	1,10	F2	n.b.	n.b.
17	Z1	320	A/B 16	LT	3	0,00	X	0,50	n.b.
18	Z1	320	40/20/40	LT	3	0,00	X	0,53	n.b.
19	Z1	320	40/20/40	LT	3	1,40	X	n.b.	n.b.
20	Z1	320	40/20/40	LT	3	0,90	X	0,53	n.b.
21	Z1	352	40/20/40	LT	3	0,90	F2	n.b.	n.b.
22	Z1	352	40/20/40	LT	3	0,90	F3	n.b.	n.b.
23	Z1	352	40/20/40	MF	3	0,90	F6	n.b.	n.b.
24	Z1	330	40/20/40	LT	3	1,90	F2	n.b.	n.b.
25	Z1	350	40/20/40	LT	3	1,20	F3	n.b.	n.b.
26	Z1	330	40/20/40	LT	4	1,00	k.Z.	n.b.	n.b.
27	Z1	350	40/20/40	LT	4	1,00	F4	n.b.	n.b.
28	Z1	320	40/20/40	LTF	3	1,35	F2	n.b.	n.b.
29	Z1	320	40/20/40	LTF	3	0,45	F4	0,63	0,56
30	Z1	320	40/20/40	LT	3	0,90	X	n.b.	n.b.
31	Z1	320	40/20/40	LT	3	0,90	X	n.b.	n.b.
32	Z1	350	40/20/40	LT	3	0,90	F1	n.b.	n.b.
33	Z1	350	40/20/40	LT/OF	4	1,00	F1	n.b.	n.b.
34	Z1	350	40/20/40	LT/OF	3	0,90	F5	0,82	n.b.
35	Z1	350	40/20/40	LT/OF	3	0,00	F4	0,58	n.b.
36	Z1	350	40/20/40	OF	3	1,80	F3	0,59	0,50
37	Z1	320	40/20/40	OF LT/OF	3	0,90	F2	n.b.	n.b.
38	Z1	350	40/20/40	LT/OF	3	1,80	F3	0,52	0,45
39	Z1	320	40/20/40	OTKS	3	1,35	F3	n.b.	n.b.
40	Z1	350	40/20/40	OTKS	3	0,90	F4	0,55	0,47
41	Z1	350	40/20/40	OTKS	3	0,70	F4	n.b.	n.b.
42	Z1	350	40/20/40	OTKS	3	0,70	F3	0,54	0,45
43	Z2	350	40/20/40	OTKS	3	0,70	>F6	n.b.	n.b.

Tabelle A 2: Betonagen zur Untersuchung der Einflüsse der Gesteinskörnung durch FE 2 (HCU)

	Z	ement		GK	H₂O [M.	-%]	Fließmit-	Kon-	w	/z	Druck-
Beto- nage	Art	Gehalt [kg/m³]	Sieblinie	0/2	2/8	8/16	telgehalt [M% v.Z.]	sis- tenz- klasse	Inkl. Kern- feuchte	Ohne Kern- feuchte	festig- keit [N/mm²]
1	Z4	348	Mitte (Rundkorn)	0,82	0,53	0,51	0,75	F4	0,69	0,65	45,9
2	Z4	348	Grob (Rundkorn)	1,88	0,77	0,54	0,65	F4	0,49	0,50	46,0
3	Z4	348	Fein (Rundkorn)	2,66	0,49	0,62	0,55	F4	0,56	0,57	47,8
4	Z4	348	Mitte (Splitt)	0,44	0,11	0,10	0,90	F3	0,52	0,52	49,2
5	Z4	348	Grob (Splitt)	0,48	0,12	0,07	0,90	F4	0,53	0,53	55,4
6	Z4	348	Fein (Splitt)	0,11	0,06	0,08	1,20	F4	0,51	0,51	55,6
7	Z4	348	Mitte (Splitt)	0,10	0,08	0,06	1,65	F4	0,52	0,52	61,3
8	Z4	348	Grob (Splitt)	0,10	0,08	0,06	0,70	F4	0,57	0,57	52,8
9	Z4	348	Mitte (Splitt)	0,15	0,08	0,13	0,90	F4	0,46	0,46	58,2
10	Z4	348	Fein (Splitt)	0,11	0,06	0,08	0,90	F4	0,52	0,52	57,8
11	Z4	348	Grob (Splitt)	0,11	0,09	0,06	0,90	F4	0,56	0,56	57,9
12	Z4	348	Mitte (Rundkorn)	0,23	0,57	0,36	0,40	F4	0,58	0,56	45,8
13	Z4	348	Fein (Rundkorn)	2,66	0,49	0,62	0,55	F4	0,56	0,57	50,0
14	Z4	348	Grob (Rundkorn)	1,22	1,22	0,63	0,40	F4	0,59	0,57	45,4
15	Z4	348	Fein (Splitt)	0,11	0,06	0,08	0,80	F4	0,50	0,50	55,2
16	Z4	348	Mitte (Splitt)	0,09	0,09	0,09	0,90	F4	0,51	0,51	51,1
17	Z4	348	Grob (Splitt)	0,09	0,09	0,09	0,90	F4	0,52	0,52	54,6
18	Z1	352	Mitte (Rundkorn)	0,23	0,39	0,45	0,40	F4	0,54	0,53	37,1
19	Z1	352	Mitte (Rundkorn)	0,30	0,51	0,44	0,40	F4	0,54	0,53	37,8
20	Z1	352	Mitte (Rundkorn)	1,92	0,36	1,10	0,60	F4	0,54	0,57	35,6
21	Z1	352	Mitte (Rundkorn)	0,67	0,36	0,38	0,60	F4	0,57	0,56	39,5
22	Z1	352	Mitte (Rundkorn)	0,28	0,33	0,30	0,60	F4	0,56	0,55	40,7
23	Z2	304	Mitte (Rundkorn)	0,22	0,38	0,43	0,80	F4	0,52	0,51	30,4
24	Z4	348	Grob (Rundkorn)	0,25	0,40	0,35	0,40	F4	0,59	0,54	50,0

Tabelle A 3: Frischbetoneigenschaften FE3 (VDZ)

Beto-	Zement		GK H ₂ O [M%]			FM-Gehalt [M% v.Z.]		Frischbe- tonroh- dichte	LP- Gehalt [%]	Darrv	ersuch	w/z ¹⁾	
nage	Art	Gehalt [kg/m³]	0/2	2/8	8/16	und Kor tenzkla		[kg/m3]	[,0]	Ein- waage [g]	Wasser- gehalt [%]	Inkl. Kern- feuchte	Ohne Kern- feuchte
P01	Z1	353	3,20	1,57	0,46	0,34	F4	2309	2,5	1676	8,41	0,55	0,47
P01(1)	Z1	353	4,49	1,19	0,61	0,45	F4	2294	2,0	1382	8,76	0,57	0,49
P01(2)	Z1	353	6,22	1,34	0,46	-	F4	2329	0,6	1446	9,39	0,62	0,54
P01(3)	Z1	353	4,36	1,09	0,97	0,23	F4	2302	2,2	1448	8,84	0,58	0,50
P01(4)	Z1	353	3,43	1,47	1,41	0,22	F4	2335	2,0	1670	9,08	0,60	0,53
P02	Z1	353	3,20	1,57	0,46	-	F4	2318	0,7	1539	9,78	0,64	0,57
P02(1)	Z1	338	11,46	0,80	1,86	-	F4	2326	1,4	1742	9,41	0,65	0,57
P03	Z1	353	4,49	1,19	0,61	0,90	F3	2319	2,6	1615	8,05	0,53	0,45
P03(1)	Z1	368	11,46	0,80	1,86	0,90	F2	2339	2,8	2038	7,90	0,50	0,43
P04	Z2	350	4,47	1,87	0,75	0,23	F4	2306	2,0	1230	9,67	0,64	0,56
P04(1)	Z2	350	7,84	1,82	1,98	0,34	F3	2300	3,0	1381	8,60	0,57	0,49
P05	Z2	335	4,47	1,87	0,75	-	F4	2320	1,1	1618	9,71	0,67	0,59
P06	Z2	365	6,22	1,34	0,46	0,45	F5	42312	1,9	1462	8,75	0,55	0,48
P07	Z3	350	6,55	1,03	0,87	-	F4	2309	0,4	1181	9,10	0,60	0,53
P08	Z3	335	6,55	1,03	0,87	-	F4	2319	1,0	1366	9,54	0,66	0,58
P09	Z3	365	4,36	1,09	0,97	0,45	F5	2334	3,0	1296	8,54	0,54	0,47
P10	Z4	348	3,91	1,23	1,75	-	F4	2314	1,3	1224	9,68	0,64	0,57
P11	Z4	333	3,91	1,23	1,75	-	F5	2284	3,0	1186	10,07	0,70	0,62
P12	Z4	363	3,87	1,64	1,09	-	F4	2308	0,7	3890	9,02	0,58	0,50
P12(1)	Z4	363	8,59	8,93	2,04	0,90	F1	2303	2,5	746	7,64	0,49	0,42
P13	Z2+ FA	328 ²⁾	3,87	1,64	1,09	-	F4	2317	1,2	3203	8,77	0,62	0,54
P13(1)	Z2+ FA	3282)	8,59	8,93	2,04	0,20	F4	2317	0,7	777	9,01	0,63	0,49
P14	Z2+ FA	313 ²⁾	5,01	0,52	1,37	-	F5	2309	2,3	1497	9,32	0,69	0,60
P15	Z2+ FA	343 ²⁾	5,01	0,52	1,37	0,10	F4	2309	0,7	1652	8,52	0,57	0,49

nach Darrversuch (Mikrowellendarren)
 Zementgehalt errechnet zu z+k*f mit k=0,40

Seite 109 des Schlussberichts zu IGF-Vorhaben 21826 N

Tabelle A 4: Darrversuche in AS 2 und AS 3.2 durch FE3 (VDZ)

Mischung	Darrver- fahren	Frisch- beton- roh- dichte (kg/m³)	Masse der Probe nass (kg)	Masse der Probe trocken (kg)	Wasser- gehalt der Probe (kg)	Kern- feuchte Ge- stein (kg)	Ze- ment- gehalt (kg/m³)	w/z- Wert SOLL	w/z- Wert IST
FZ1-050	Mikrowelle	2,308	1,1257	1,0233	0,1024	0,0165	350	0,50	0,52
FZ2-050	Mikrowelle	2,300	1,1627	1,0628	0,0999	0,0133	350	0,50	0,49
FZ3-050	Mikrowelle	2,307	1,1984	1,1006	0,0978	0,0141	350	0,50	0,46
FZ1-040	Mikrowelle	2,324	1,0576	0,9758	0,0818	0,0124	395	0,40	0,39
FZ2-040	Mikrowelle	2,343	1,0461	0,9657	0,0804	0,0122	390	0,40	0,41
FZ3-040	Mikrowelle	2,358	1,2886	1,202	0,0866	0,0141	390	0,40	0,36
Z04-TB1	Gas	2,335	5,000	4,560	0,440	0,043	350	0,49	0,53
Z04-TB2	Gas	2,330	5,080	4,660	0,420	0,044	350	0,49	0,49
Z04-TB3	Gas	2,330	5,000	4,580	0,420	0,043	350	0,49	0,49
Z04-TB4	Gas	2,320	5,000	4,600	0,460	0,043	350	0,49	0,55
Z04-TB5	Gas	2,343	5,000	4,600	0,400	0,043	350	0,49	0,48
Z04-TB-Lab	Gas	2,340	1,313	1,196	0,116	0,011	350	0,49	0,53

11.2 Versuchsergebnisse zur Chloridmigration und Karbonatisierung (FE 1 und FE 3)

Tabelle A 5: Druckfestigkeiten, Mittelwerte der Chloridmigrationsprüfung und Mittelwerte der Karbonatisierungsprüfung FE3 (VDZ)

Beto-	Druckfestigkeit fcm [MPa]				Imigration zient M _{nss} 10 ⁻¹²) [m ² /s		Karbonatisierungsgeschwindigkeit K _{AC} [mm/Tage ^{0,5}]			
nage	MW	Stabw	CoV	MW	Stabw	CoV	MW	Stabw	CoV	R ²
P01	46,10	1,74	3,78	15,33	0,95	6,20	0,94	0,08	8,50	0,91
P01(1)	47,03	4,63	9,85	15,43	1,24	8,05	0,85	0,09	10,19	0,94
P01(2)	41,99	0,58	1,37	19,00	1,67	8,79	1,05	0,03	3,05	0,96
P01(3)	42,23	1,33	3,15	15,77	1,72	10,94	0,96	0,02	2,16	0,98
P01(4)	41,74	0,72	1,73	15,43	0,15	0,99	1,02	0,08	7,66	0,98
P02	40,65	0,72	1,77	14,90	0,20	1,34	1,00	0,10	9,83	0,91
P02(1)	41,77	0,35	0,83	17,83	1,40	7,86	0,89	0,07	7,45	0,99
P03	49,76	4,26	8,57	13,70	1,05	7,69	0,65	0,11	16,79	0,91
P03(1)	60,21	0,98	1,62	9,60	0,79	8,27	0,20	0,07	32,75	0,60
P04	36,06	0,39	1,08	-	-	-	1,48	0,02	1,03	0,99
P04(1)	40,18	0,82	2,05	-	-	-	0,93	0,12	13,09	0,89
P05	31,10	0,85	2,74	-	-	-	1,75	0,04	2,29	1,00
P06	38,71	0,54	1,39	-	-	-	1,56	0,04	2,66	0,97
P07	39,83	0,36	0,90	7,73	0,42	5,38	1,60	0,03	1,58	0,99
P08	33,66	0,14	0,41	8,73	0,06	0,66	1,89	0,16	8,25	0,98
P09	42,14	0,19	0,44	7,43	0,35	4,72	1,28	0,10	7,92	0,99
P10	40,67	2,08	5,12	4,47	0,15	3,42	1,98	0,16	7,94	0,97
P11	32,34	0,46	1,43	5,43	0,32	5,92	2,07	0,12	5,77	0,98
P12	48,52	1,18	2,42	4,80	0,36	7,51	1,66	0,02	1,25	0,96
P12(1)	66,65	0,87	1,30	2,33	0,25	10,79	0,53	0,07	12,48	0,89
P13	31,18	0,42	1,34	20,30	0,52	2,56	-	-	-	-
P13(1)	31,92	0,48	1,49	16,97	0,42	2,45	-	-	-	-
P14	29,48	1,51	5,11	20,57	0,40	1,97	-	-	-	-
P15	34,56	0,56	1,61	16,00	0,26	1,65	-	-	-	-

Tabelle A 6: Ergebnisse der Chloridmigrations- und Karbonatisierungsversuche durch FE 1

Zementart	Her-	Charge	Chloridmigrati [10 ⁻¹²		Karbonatisierun keit kac [m	
	steller		Mittelwert	Stabw.	Mittelwert	Stabw.
CEM I 42,5 R	1	1	15,92	0,52	1,08	0,13
CEM I 42,5 R	1	1	13,83	0,60	0,99	0,01
CEM I 42,5 R	1	1	15,25	0,90	0,49	0,06
CEM I 42,5 R	1	1	9,89	0,56	0,72	0,05
CEM I 42,5 R	1	1	12,77	0,56	-	-
CEM I 42,5 R	1	1	11,77	0,21	-	-
CEM I 42,5 R	1	1	13,11	0,15	-	-
CEM I 42,5 R	1	2	15,86	1,16	0,94	0,02
CEM I 42,5 R	1	3	14,87	0,79	0,67	0,01
CEM I 42,5 R	2	1	15,23	1,41	0,84	0,03
CEM I 42,5 R	2	2	16,39	0,77	1,21	0,05
CEM I 42,5 R	2	3	17,67	0,41	0,87	0,00
CEM I 42,5 R	3	1	15,11	1,05	0,96	0,02
CEM I 42,5 R	3	1	13,03	0,33	0,77	0,01
CEM I 42,5 R	3	2	14,47	0,79	0,95	0,05
CEM I 42,5 R	3	3	15,68	0,70	0,78	0,08
CEM II/A-LL 42,5 N	1	1	18,13	0,82	0,43	0,07
CEM II/A-LL 42,5 N	1	1	15,74	0,80	0,84	0,12
CEM II/A-LL 42,5 N	1	1	17,89	0,72	-	-
CEM II/A-LL 42,5 N	1	1	17,95	0,31	_	-
CEM II/A-LL 42,5 N	1	2	19,25	0,37	1,30	0,00
CEM II/A-LL 42,5 N	1	3	22,00	0,63	0,76	0,03
CEM II/A-LL 42,5 N	2	1	18,65	1,55	1,05	0,14
CEM II/A-LL 42,5 N	2	1	17,77	0,29	1,05	-
CEM II/A-LL 42,5 N	2	2		0,47		
CEM II/A-LL 42,5 N	2	3	22,49	-	1,49	0,12
CEM II/A-LL 42,5 N	3	1	18,09	0,99 0,23	0,72	0,03
		1	21,85		1,41	0,01
CEM II/A-LL 42,5 N	3		16,31	0,58		
CEM II/A-LL 42,5 N	3	2	20,82	0,90	1,44	0,02
CEM II/A-LL 42,5 N		3	19,82	0,32	1,11	0,08
CEM II/B-S 42,5 N	1	1	10,47	0,45	0,93	0,03
CEM II/B-S 42,5 N	1	1	3,85	0,30	1,17	0,04
CEM II/B-S 42,5 N	1	1	7,59	0,27	-	-
CEM II/B-S 42,5 N	1	1	7,53	0,24	- 4.00	-
CEM II/B-S 42,5 N	1	2	8,86	0,4	1,30	0,05
CEM II/B-S 42,5 N	1	3	10,36	0,31	1,14	0,00
CEM II/B-S 42,5 N	2	1	8,83	0,17	1,32	0,03
CEM II/B-S 42,5 N	2	2	9,64	0,48	1,35	0,05
CEM II/B-S 42,5 N	2	3	11,1	0,49	1,24	0,05
CEM II/B-S 42,5 N	3	1	6,94	0,91	1,20	0,06
CEM II/B-S 42,5 N	3	2	7,13	0,16	1,29	0,12
CEM II/B-S 42,5 N	3	3	8,07	0,55	1,02	0,24
CEM III/A 42,5 N	1	1	4,68	0,40	1,10	0,02
CEM III/A 42,5 N	1	1	3,68	0,35	1,29	0,02
CEM III/A 42,5 N	1	1	4,68	0,48	-	-
CEM III/A 42,5 N	1	1	3,79	0,44	-	-
CEM III/A 42,5 N	1	2	4,92	0,86	1,33	0,01
CEM III/A 42,5 N	1	3	4,41	0,64	1,73	0,00
CEM III/A 42,5 N	2	1	5,58	0,87	1,12	0,00
CEM III/A 42,5 N	2	2	6,11	0,31	1,53	0,05
CEM III/A 42,5 N	2	3	8,54	0,62	1,87	0,05
CEM III/A 42,5 N	3	1	5,79	0,30	1,35	0,05
CEM III/A 42,5 N	3	2	5,11	0,35	1,63	0,09
CEM III/A 42,5 N	3	3	5,29	0,43	1,76	0,06

11.3 Weitere Tabellen

Tabelle A 7: Anforderungen an Betonsorten aus SN EN 206

Bezeich- nung	Sorte B	Sorte C	Sorte D	Sorte E	Sorte F	Sorte G
Anwendung	Hochbau	Hochbau	Tiefbau	Tiefbau	Tiefbau	Tiefbau
Druckfestig- keitsklasse	C25/30	C30/37	C25/30	C25/30	C30/37	C30/37
Expositions- klasse	XC3 (CH)	XC4 (CH) XF1 (CH)	XC4 (CH) XD1 (CH) XF2 (CH)	XC4 (CH) XD1 (CH) XF2 (CH)	XC4 (CH) XD3 (CH) XF2 (CH)	XC4 (CH) XD3 (CH) XF4 (CH)
Nennwert Grösstkorn	D max 32	D max 32	D max 32	D max 32	D max 32	D max 32
Chloridge- haltsklasse	CI 0,10	CI 0,10	CI 0,10	CI 0,10	CI 0,10	CI 0,10
Frost- Tausalz-Wi- derstand	nein	nein	mittel	hoch	mittel	hoch
Max. w/z- Wert	0,60	0,50	0,50	0,50	0,45	0,45
Mindestze- mentgehalt (kg/m³)	280	300	300	300	320	320
Dauerhaftig- keitsprüfun- gen	KW	KW	KW, FT	KW, FT	CW, FT	CW, FT

11.4 Begleituntersuchungen bei RCM-Test (FE 1)

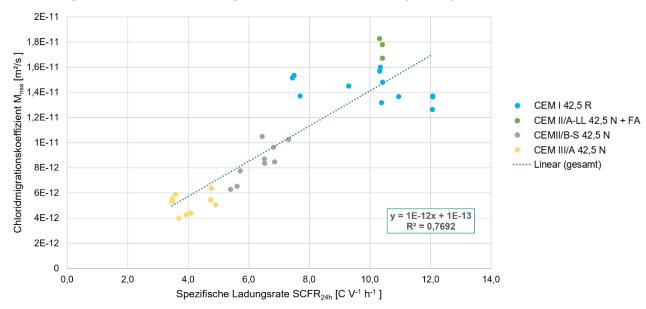


Abbildung A 1: Chloridmigrationskoeffizient im Verhältnis zur Spezifischen Ladungsrate (FE 1)

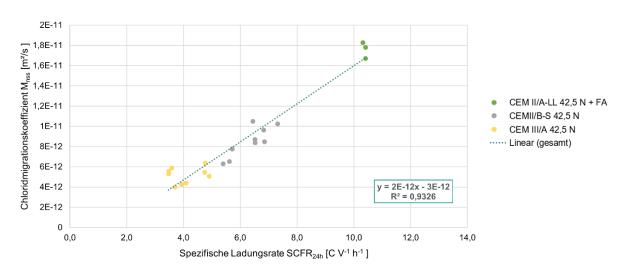


Abbildung A 2: Chloridmigrationskoeffizient im Verhältnis zur Spezifischen Ladungsrate (FE 1) ohne CEM I-Betone

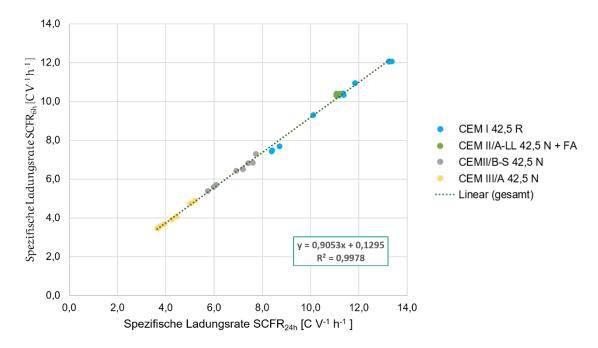


Abbildung A 3: Gegenüberstellung der spezifischen Ladungsrate ermittelt über 6 h Versuchsdauer und 24 h Versuchsdauer

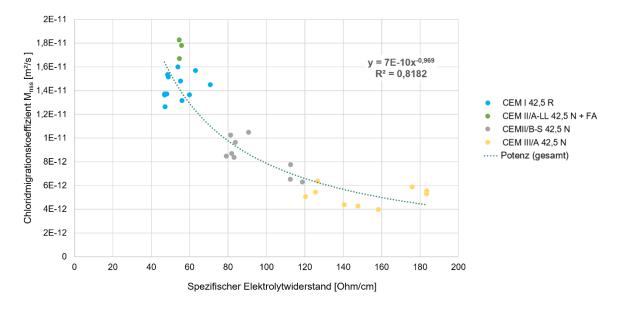


Abbildung A 4: Gegenüberstellung der Chloridmigrationskoeffizienten und des spezifischen Elektrolytwiderstand der Proben im RCM-Test