

Technische Hochschule Mittelhessen
Fachbereich Bau, Baustoffkunde & konstruktiver Ingenieurbau
Fachbereich Life Science Engineering, Abfallwirtschaft & Recyclingtechnik

Hering Bau GmbH & Co. KG

SUScon - Sustainable Concrete
Entwicklung hochwertiger Architektur- und
Infrastrukturbetone mit carbonatisierten Produktionsabfällen
und klinkerreduzierten Zementen

Abschlussbericht über ein Forschungsprojekt,
gefördert unter dem Aktenzeichen 35818/01-23 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

B.Eng. Paul Dengler
Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kern
M.Sc. Svenja Vogt
Prof. Dr.-Ing. Harald Weigand
Dipl.-Ing. Reiner Grebe

Burbach, Dezember 2024

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



Az	35818/01-23	Referat	23	Fördersumme	€ 124.974,-
Antragstitel	Entwicklung hochwertiger Architektur- und Infrastrukturbetone mit carbonatisierten Produktionsabfällen und klinkerreduzierten Zementen in der Betonrezeptur				
Stichworte	Hochwertige Architekturbetone, Hochwertige Infrastrukturbetone, carbonatisierte Produktionsabfälle, klinkerreduzierte Zement				
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)		
30 Monate	01.04.2022	30.09.2024			
Zwischenberichte					
Bewilligungsempfänger	Hering Bau GmbH & Co. KG Neuländer 1 57299 Burbach			Tel	02736 27139
				Fax	02736 27256
				Projektleitung	
				Dipl.-Ing. Reiner Grebe	
				Bearbeiter	
				Dipl.-Ing. Reiner Grebe	
Kooperationspartner	Technische Hochschule Mittelhessen Fachbereich Bau, Prof. Dr.-Ing. Rüdiger Kern Fachbereich LSE, Prof. Dr.-Ing. Harald Weigand Wiesenstr. 14 35390 Gießen				

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Ziel des Vorhabens ist die Entwicklung nachhaltiger und hochwertiger Architektur- und Infrastrukturbetone. In den Betonrezepturen sollen Produktionsabfälle (Rezyklierte Gesteinskörnungen und carbonatisierte Betonschlammfraktionen) sowie klinkerreduzierte Zemente eingesetzt werden. Damit ergeben sich drei wesentliche Ansatzpunkte für nachhaltige Betonprodukte: (1) Die Rückführung von Produktionsabfällen in neue Produkte bedingt eine massenäquivalente Einsparung von Abfällen sowie von Primärmaterialien. (2) Die beschleunigte Carbonatisierung der genannten Materialien vor der Einbringung in die Rezeptur bindet einen Teil der produktionsbedingten CO₂-Emissionen langfristig stabil in Form von Calciumcarbonat. (3) Der Einsatz klinkeroptimierter Zemente verbessert die CO₂-Bilanz der Betonprodukte im Bereich der Zementsteinkomponente (energetisch und nicht-energetisch). Mit den drei genannten Aspekten trägt das Vorhaben dazu bei, den wachsenden Markt für nachhaltigere Architektur- und Infrastrukturbetone zu befriedigen und Produktverantwortung wahrzunehmen.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Im Arbeitspaket 1 wurden nachhaltige Ausgangsstoffe für Architektur- und Infrastrukturbetone identifiziert und bewertet. Arbeitspaket 2 diente der Entwicklung und Festlegung einer Carbonatisierungsstrategie unter Berücksichtigung der in AP 1 festgestellten Materialeigenschaften. Arbeitspaket 3 war der Festlegung der Rezepturen unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus AP 1 und AP 2 gewidmet. Entsprechende Prüfkörper wurden unter Einsatz carbonatisierter und nicht-carbonisierter Ersatz-Gesteinskörnung sowie unter Verwendung klinkeroptimierter Zemente hergestellt. An diesen wurden normgerechte Frisch- und Festbetonprüfungen vorgenommen. Arbeitspaket 4 bündelte diejenigen Tätigkeiten, die auf dem Weg der Markteinführung der neuen Produktformulierungen unerlässlich waren. Dies umfasste u.a. die Herstellung von Musterbauteilen. Dabei wurden diejenigen Rezepturen berücksichtigt, die in AP 3 bzw. der Fest- und Frischbetoneigenschaften sowie unter Berücksichtigung der Nachhaltigkeitsaspekte als vorteilhaft gegenüber den Referenzrezepturen bewertet wurden.

Ergebnisse und Diskussion

Von der Zementindustrie werden mittlerweile viele Zemente mit einem reduzierten Anteil von umweltschädlichem Zementklinker angeboten. So lassen sich durch die Verwendung hochwertiger Klinker-Ersatzstoffe wie zum Beispiel Hüttensand aus der Roheisen-Produktion oder Kalksteinmehl CO₂-Emissionen sehr wirksam reduzieren. Nach einer umfassenden Recherche der Experten der Technischen Hochschule Mittelhessen (THM) wurden folgende Zemente für die weiteren Studien ausgewählt.

- CEM II/B-M S-LL 42,5 R (Firma Dyckerhoff)
- CEM III/A 52,5 R Variodur 40 (Firma Dyckerhoff)

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden vier Rezepturen entwickelt, die für die Herstellung von Betonfertigteilen für Bahnsteige verwendet werden können. Es wurden jeweils zwei Betonrezepturen zu jeder der beiden Zementsorten ausgebildet – ohne und mit Recyclingzuschlag (RC-Material). Im Folgenden wurden die Rezepturen hinsichtlich der erforderlichen Betonfestigkeit sowie der Frost-Tausalz-Beständigkeit geprüft.

Da das modulare Bahnsteigsystem von Hering Bau auf Basis einer geprüften Typenstatik sowie einer Anwenderfreigabe der DB AG geplant und ausgeführt wird, müssen die Bahnsteigelemente die Festigkeitsklasse C35/45 (LP) erfüllen. Diese Festigkeitsklasse galt es auch mit den neuen Rezepturen zu erreichen. Die Festigkeitsprüfungen zeigten, dass die Werte der entwickelten Rezepturen, ohne und mit RC-Material, deutlich über den erforderlichen Mindestwerten liegen. Die Festigkeiten der Rezepturen mit RC-Material fallen gegenüber den Rezepturen ohne RC-Material etwas ab.

Frostschäden am Beton werden verstärkt durch Taumittel hervorgerufen und treten als flächige Abplatzungen und Ausbrüche auf. In der Regel wird als Taumittel auf Bahnsteigen Natriumchlorid verwendet, welches auch zu einer Korrosion der Bewehrung führen kann. Daher ist der Nachweis der hinreichenden Frost-Taumittel-Beständigkeit des Betons außerordentlich wichtig. Für die Rezepturen wurden Versuche zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes am Wilhelm Dyckerhoff Institut für Baustofftechnologie in Wiesbaden durchgeführt. Bei allen vier Rezepturen lagen die gemessenen Werte deutlich unterhalb des von der DB AG geforderten Grenzwertes von 800 g/m² (hinreichender Frost-Taumittel-Widerstand). Somit können die neuen nachhaltigen Betonrezepturen als beständig gegen Frost-Taumittel-Einwirkung eingestuft werden.

Nicht zuletzt wurde im Rahmen des Forschungsprojektes eine Bilanzierung der CO₂-Emissionen gemäß ISO 14067 durchgeführt. Dabei wurde die Rohstoffgewinnung der Betonkomponenten wie Zement, Wasser, Gesteinskörnung und Additive ebenso berücksichtigt wie der Transport vom Gewinnungsort bis zum Fertigteilwerk. Aus den durchgeführten Berechnungen lässt sich erkennen, dass eine Reduzierung der schädlichen Emissionen um bis zu 35 % möglich ist. Aktuell beträgt der Transportweg für das RC-Material noch 320 km, was sich negativ auf die Bilanz auswirkt. Der Grund: Derzeit existieren nur wenige Anbieter für zertifiziertes RC-Material. Hier muss das Ziel sein, die Transportstrecke auf maximal 50 km zu reduzieren.

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

In folgenden Fachzeitschriften wurden bereits Artikel über das Forschungsprojekt und die entwickelten Betonrezepturen veröffentlicht.

1. Der Eisenbahningenieur, Ausgabe Mai 2024, Titel „Zukunftsgerechter Bahnsteigbau“
2. BFT International, Ausgabe November 2024, Titel „Zukunftsgerechter Beton für den Bahnsteigbau“

Fazit

Mit den entwickelten neuen Betonrezepturen lässt sich die Nachhaltigkeit von Betonfertigteilen deutlich verbessern – und zwar ohne Abstriche bei der Qualität. Die Rezepturen mit CO₂-reduzierten Zementen sind ohne Verwendung von RC-Material normenkonform und werden von Hering Bau ab sofort für die Produktion von Fertigteilen aus Beton zum Einsatz kommen. Auch in der neuen DIN 1045-2(2023) wird die Anwendung von rezykliertem Gesteinskörnung für die Expositionsclassen XD3 und XM1 noch nicht zugelassen. Aus diesem Grund muss für diesen Anwendungsfall ein spezieller Verwendungsnachweis erbracht werden. Daher wird beabsichtigt, für die RC-Betone eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) zu beantragen. Nach der Erteilung der Genehmigung können dann auch die RC-Betone zur Anwendung kommen – ein entscheidender weiterer Schritt für den Klimaschutz und das nachhaltige Bauen.

Inhaltsverzeichnis

Kapitel 1	Zusammenfassung	5
Kapitel 2	Einleitung	6
Kapitel 3	Charakterisierung und Auswahl der Ausgangsstoffe	8
	Zielparameter.....	8
	Auswahl der Materialien.....	9
	Wahl der Zementsorte	9
	Rezyklierte Gesteinskörnung	10
	Methodik der Probennahme bei der RC Gesteinskörnung	12
	Vorbemerkung.....	12
	Probennahme.....	12
	Materialuntersuchungen.....	13
	Wasseraufnahme	13
	Alkaliempfindlichkeit	15
Kapitel 4	Carbonatisierung ausgewählter Ausgangsstoffe	16
Kapitel 5	Optimierter Bahnsteigbeton	18
	Mischprozess.....	18
	Ausgangsstoffe	19
	Sieblinien der Gesteinskörnung	19
	Zemente und Zusatzmittel	20
	Überblick Varianten	20
	Beprobung der Labormischungen	21
	Verarbeitbarkeit	21
	Festigkeitsentwicklung.....	21
	Frost-Tausalz-Widerstand.....	24
	Packungsdichteoptimierung.....	25
Kapitel 6	Ökobilanz und Wirtschaftlichkeit	26
	Umwelteinwirkungen.....	26
	Kostenschätzung	28
Kapitel 7	Markteinführung	29
Kapitel 8	Literatur	30

Kapitel 1 Zusammenfassung

Aufgrund der großen Mengen an Beton, die weltweit verbaut werden, gepaart mit den immensen Umweltbelastungen, die mit der Herstellung von Beton verbunden sind, ist die Entwicklung nachhaltiger Betone eine zentrale gesellschaftliche Aufgabe, der sich alle am Bau Beteiligten stellen müssen. Neben dem hohen Verbrauch an Rohstoff- und Energieressourcen, der Abfallbeseitigung und Deponierung und gesundheitlichen Aspekten sind dabei insbesondere die hohen CO₂ – Emissionen, die bei der Herstellung der Zemente, genauer des Portlandzementklinkers, entstehen, eine besondere Herausforderung. Es gibt viele Untersuchungen und Ansätze zur Entwicklung neuer und zur Weiterentwicklung bereits vorhandener Bindemittelsysteme mit einem reduzierten Gehalt an Portlandzementklinker bzw. ganz ohne Portlandzementklinker sowie Strategien zu einer effizienteren Verwendung von Portlandzementklinker im Beton. In diesem Projekt werden Untersuchungen zu zwei Lösungsansätzen vorgestellt, die einen Beitrag zur Reduktion der Umweltbelastung von Beton liefern sollen. So wurde ein hybrider Ansatz gewählt, um Betone mit geringer Umweltbelastung für Bahnsteige und Anwendungen in der Architektur mit hohen Dauerhaftigkeitsanforderungen herzustellen. Dieser Ansatz beruht darauf, dass als Bindemittel klinkereffiziente Zemente und als Gesteinskörnungen rezykliertes Material verwendet wird. Es wurden eine grobe rezyklierte Gesteinskörnung (cRCA = coarse Recycled Concrete Aggregate) sowie Betonbrechsand (fRCA = fine Recycled Concrete Aggregate) jeweils als Ersatz für groben gebrochenen Naturstein und Sand im Beton eingesetzt. Die rezyklierten Gesteinskörnungen wurden zusätzlich beschleunigt carbonatisiert, das heißt die rezyklierten Gesteinskörnungen wurden sowohl im Lieferzustand genutzt als auch nach beschleunigter Carbonatisierung.

Zusätzlich diente ein klinkereffizienter Zement als Ersatz für reinen Portlandzementklinker im Mischungsentwurf. Um mögliche nachteilige Auswirkungen der rezyklierten Gesteinskörnungen zu minimieren, wurde deren Wasseraufnahme (WA = Water Absorption) bestimmt und ein mehrstufiges Mischverfahren angewandt. Untersucht wurden die Verarbeitbarkeit, Druckfestigkeitsentwicklung sowie für Bahnsteigelemente der Frost-Tausalz-Widerstand nach dem Capillary suction of deicing solution and freeze-thaw test, kurz CDF – Verfahren.

Für verschiedene Betonrezepturen, die für die Herstellung von Bahnsteig- und Fassadenfertigteile verwendet werden, wurde der Einsatz von aufbereitetem Bauwerksbruch zur Substitution von natürlicher Gesteinskörnung, sowie die Verwendung von klinkerreduzierten Zementen untersucht. Besondere Beachtung galt dem Einfluss auf Festigkeitsentwicklung und Dauerhaftigkeit, sowie der ökobilanziellen Lebenszyklusanalyse und Nachhaltigkeit.

Es zeigte sich, dass dieser Ansatz geeignet ist, hochwertige Bahnsteig- und Architekturbetone herzustellen, die die geforderten hohen technischen Anforderungen erfüllen und zu einer signifikant reduzierten Umweltbelastung führen. Gleichmaßen werden damit zwei Anforderungen an den Umweltschutz berücksichtigt, zum einen die Reduktion von CO₂-Emissionen und zum anderen die Schonung natürlicher Ressourcen.

Kapitel 2 Einleitung

Beton ist aufgrund seiner hohen technischen Leistungsfähigkeit und Wirtschaftlichkeit einer der wichtigsten und am meisten verwendeten Baustoffe auf der Erde. Leider treten bei der Herstellung von Beton große Umweltbelastungen auf, die zusammen mit den enormen Verbrauchszahlen eine große globale Herausforderung sind und für die weltweit Lösungen gesucht werden. Diese gravierenden Umweltbelastungen durch Beton entstehen hauptsächlich durch den hohen Verbrauch an Rohstoff- und Energieressourcen, die Abfallbeseitigung und Deponierung, die gesundheitlichen Belastungen und vor allem durch die sehr hohen CO₂-Emissionen. Die CO₂- bzw. Treibhausgasemissionen (THG) werden als CO₂-Äquivalente (kg CO₂eq) quantifiziert und auch als Global Warming Potential (GWP) bezeichnet. Nachhaltige Betone müssen neben den ökologischen auch den ökonomischen und sozio-kulturellen Ansprüchen (z.B. Nutzerfreundlichkeit, Funktionalität ...) gerecht werden und auch weiterhin eine hohe technische Leistungsfähigkeit aufweisen.

Laut der Roadmap des VdZ konnte der Klinker-Zement-Faktor in den letzten Jahrzehnten durch Einsatz von Kalkstein und anderen Hauptbestandteilen auf 71 % gesenkt werden. Eine weitere Reduktion des Klinkergehalts in Zukunft ist notwendig [1].

Die Verringerung des Zementgehaltes durch Substitutionsstoffe stellt für die Rezeptur einen besonders wirksamen Hebel zur unmittelbaren Reduzierung der Treibhausgasemissionen dar [2, 3]. Eine Verbesserung des CO₂-Fußabdrucks eines Betons ist nur möglich, wenn dieser mit einem Zement hergestellt wird, mit dem die gleiche Festigkeit und auch Dauerhaftigkeit erreicht wird, ohne einen erhöhten Gehalt an Portlandzementklinker im Beton zu erfordern [2].

Durch die Optimierung des Betonentwurfs kann der normative Mindestzementgehalt erreicht oder unterschritten werden – letzteres wird auch als performancebasiertes Design bezeichnet [4]. Die Absenkung des Zementgehalts im Beton auf der einen, und die Absenkung des Klinkergehaltes im Zement auf der anderen Seite, wird auch als „Two-Fold Strategy“ bezeichnet [2]. Beide Ansätze bieten jeweils ein großes Einsparpotential an CO₂.

Der Ersatz von Portlandzementklinker durch Kompositmaterial stellt eine große Herausforderung dar. Die wichtigsten Zementersatzstoffe sind in Deutschland und anderen Industrieländern in erster Linie die industriellen Nebenprodukte Hüttensand und Flugasche, sowie Kalksteinmehl. Die Kompositmaterialien Flugasche und Hüttensand, die wichtige Zusatzstoffe bei der Zement- und wichtige Zusatzstoffe bei der Betonherstellung sind, werden aufgrund des absehbaren Endes der Kohleverstromung bzw. der Umstellung der Roheisenherstellung in Zukunft nicht mehr oder nur noch in geringeren Mengen zur Verfügung stehen. In diesem Zusammenhang geht die Frage der Herstellung nachhaltiger Zemente und Betone mit der Frage nach dem Einsatz geeigneter alternativer Kompositmaterialien einher. Vielversprechende Stoffe sind beispielsweise calcinierte Tone und bearbeitete Stahlwerksschlacken.

Dem Anwender stehen zurzeit neben den bekannten Zementen weitere genormte klinkereffiziente Zemente zur Verfügung. Neben den üblichen Normalzementen CEM II und CEM III sind 2021 mit dem Portlandkompositzement CEM II/C-M und Kompositzement CEM VI weitere klinkereffiziente Zemente dazu gekommen. Diese Zemente sind mit einem Portlandzementklinkergehalt von 50 bis 64 % (CEM II/C-M) und 35 bis 49 % (CEM VI) besonders klinkereffizient, d. h. der Portlandzementklinkergehalt ist gegenüber den sonstigen CEM II - Zementen weiter reduziert und der Anteil an weiteren Hauptbestandteilen dafür erhöht. Eine besondere Rolle spielen bei diesen Zementen die Kompositmaterialien Hüttensand und Kalkstein. Darüber hinaus gibt es genormte und klimaverträgliche Sulfathüttenzemente, die hauptsächlich Hüttensand und Sulfate als reaktive Bestandteile enthalten und viele weitere Bindemittelsysteme, die zum Teil auf bereits bekannten Bindemittelsystemen auf-bauen oder ganz neuartig sind.

Neben der reduzierten CO₂-Bilanz klinkerreduzierter Zemente sind jedoch auch deren technische Eigenschaften im Blick zu behalten. So kann es z.B. zu Abweichungen und Nachteilen beim Dauerhaftigkeitsverhalten solcher Zemente gegenüber Systemen mit Portlandzement kommen [34].

Kapitel 3 Charakterisierung und Auswahl der Ausgangsstoffe

Zielparameter

Im Mittelpunkt der Untersuchungen stand ein modulares Bahnsteigelement der Firma Hering Bau in Fertigteilbauweise (modula® Typ I). Ziel war es, hierfür eine ökologisch optimierte Betonrezeptur zu entwickeln, welche alle Anforderungen zielsicher erfüllt. Bei dem Beton sollte es sich um einen LP-Beton der Druckfestigkeitsklasse C35/45 handeln, der für die Expositionsklassen XC4, XD3, XF4 und XM1 geeignet ist. Die Frühfestigkeit nach 20 Stunden, welche zur Wahrung der Ausschallfrist im FT-Werk entscheidend ist, war dabei von besonderem Interesse.

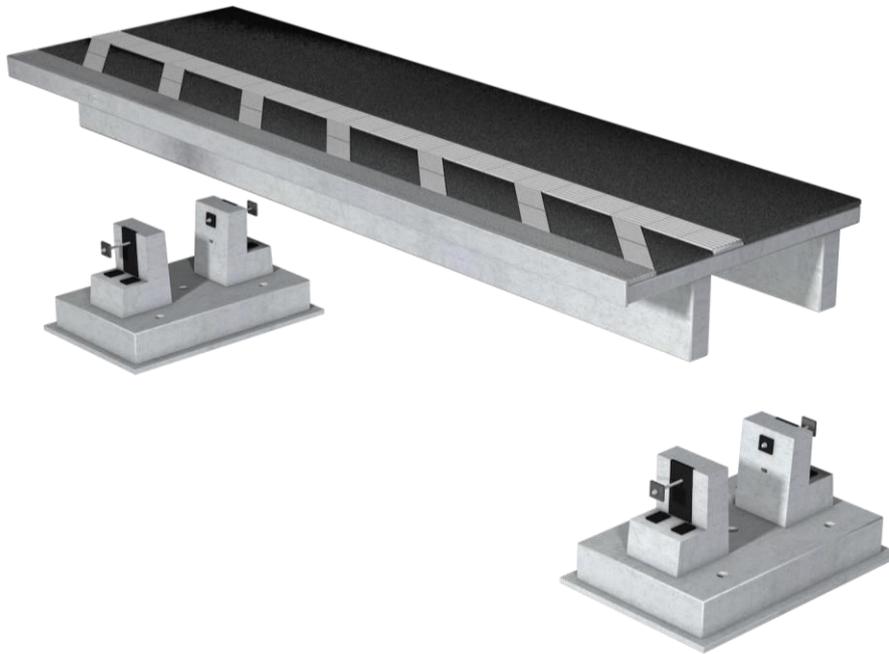


Abbildung 1: Bahnsteigsystem der Firma Hering Bau

Im Rahmen von Arbeitspaket 1 (AP1), wurden folgende, wesentliche Arbeiten durchgeführt:

1. Auswahl klinkerreduzierter Zemente, die geeignet für die vorgegebenen Expositionsklassen sind
2. Untersuchung der rezyklierten Gesteinskörnung (0-2 mm und 2-16 mm) auf relevante Eigenschaften wie Wasseraufnahme und Dichte
3. Zusammenstellung der Vorgaben zum Mischungsverhältnis des Betons
4. Untersuchungen zur Verwendbarkeit von Betonschlämmen
5. Erarbeitung mehrerer Mischungsentwürfe auf Basis von kleinmaßstäblichen Vorversuchen (Beton und Mörtel)

Auswahl der Materialien

Im Rahmen des Arbeitspakets 1 wurden besonders geeignete Ausgangsstoffe für die Optimierung des Betons im Sinne der Nachhaltigkeit gesucht.

Wahl der Zementsorte

Es wurden marktverfügbare Zemente gesucht, die möglichst klinkereffizient sind und die technischen Eigenschaften besitzen, die notwendig sind, um die hohen Anforderungen an einen Bahnsteigbeton sowie einen Architekturbeton zu erfüllen.

Zu beachten ist bei der Wahl eines Zements mit niedrigem Klinkergehalt, dass sich die Dauerhaftigkeit verringern kann. Auch die Frühfestigkeit wird meist ungünstig beeinflusst. Sie sinkt im Allgemeinen mit Herabsetzen des Klinkergehalts.

Im frühen Projektverlauf hat sich auf Empfehlung des Zementherstellers Dyckerhoff ein klinkerarmer Hochleistungszement mit durchschnittlich 40 Prozent Hüttensand „VARIODUR 40“ CEM III/A 52,5 R durchgesetzt. Dieser ist feiner gemahlen als ein üblicher Zement, ist jedoch aufgrund der granulometrischen Optimierung deutlich teurer. Neben diesem Zement wurde daher auch ein kostengünstigerer Portlandkompositzement mit einem höheren Portlandzementklinkeranteil, ein CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R gewählt. Dieser enthält neben Portlandzementklinker als Hauptbestandteile noch Hüttensand und Kalkstein.

Nachfolgende Abbildung zeigt die Vorzüge eines Zements CEM II/B hinsichtlich des Treibhauspotentials in Bezug auf die für ein Fertigteilwerk insbesondere wichtigen Frühfestigkeit.

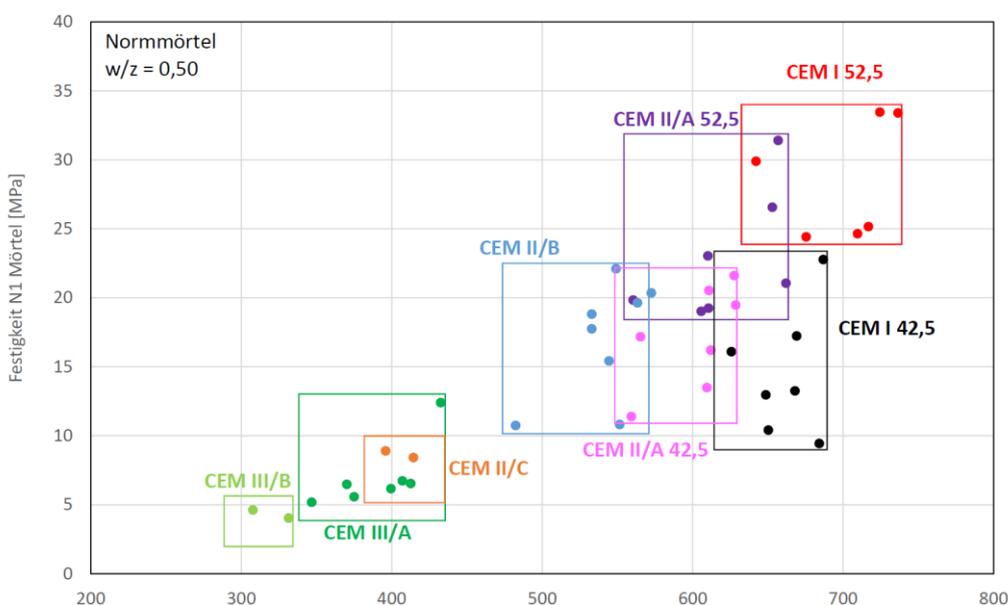


Abbildung 2: Treibhauspotential (GWP) verschiedener Zementarten in Bezug auf die Festigkeit nach 1 Tag (Quelle: Dyckerhoff; Daten beziehen sich auf das Jahr 2023)

Schließlich wurden folgende Zemente für die weiteren Untersuchungen ausgewählt:

- **Dyckerhoff VARIODUR 40: CEM III/A 52,5 R**
- **Dyckerhoff CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R**

Beide gewählte Zemente sind durch die schnelle Festigkeitsentwicklung (Kennzeichnung R = Rapid) für die Anwendung im Fertigteilwerk geeignet. Die Anforderung an die Expositionsklassen XC4, XD3, XF4, XM1 werden von diesen Zementen eingehalten. Der Dyckerhoff VARIODUR 40 erfüllt alle erforderlichen Eigenschaften, ohne gesonderte Zulassung. Der gewählte CEM II/B -M (S-LL) 42,5 R verfügt über eine Allgemeine Bauaufsichtliche Zulassung (abZ) für die hier vorliegenden hohen Expositionsklassen. Beide Zemente eignen sich für Anwendungen im Bereich Bahnsteigbau als auch im Bereich Architekturbeton. Wegen der höheren Endfestigkeiten wurde der CEM III/A vorzugsweise für Bahnsteige ausgewählt, der CEM II/B für Fassaden.

Eine Anwendung des neuen und gegenüber dem CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R klinkerärmeren Zements CEM II/C-M (S-LL) 42,5 N nach DIN 197-5 wurde wegen der langsamen Festigkeitsentwicklung und fehlender Zulassung für den vorliegenden Anwendungsfall ausgeschlossen.

Rezyklierte Gesteinskörnung

Die RC-Materialien für die Versuche wurden von der Firma Heinrich Feess GmbH bezogen. Zur Substitution der groben natürlichen Gesteinskörnung wurde das in nachfolgender Abbildung links gezeigte RC-Material verwendet. Dieses entspricht der Korngröße 2–16 mm und besteht zu über 90 % aus Betonbruch (Typ 1). Der als Sandsubstitut verwendete Brechsand mit der Größe 0–2 mm, in der Abbildung rechts, besteht aus nahezu reinem Betonbruch.



Abbildung 3: Links: Grobe RC-Gesteinskörnung (cRCA)
Rechts: Beton-Brechsand (fRCA)

Das RC-Material „2/16 Typ 1“ der Firma Feess wurde optisch als ein Material mit hohem Ziegelgehalt, nahe dem maximal zulässigen Ziegelgehalt, beurteilt. Durch Dichte- und Wasseraufnahmeprüfungen wurde bestätigt, dass es sich um ein eher leichtes, poröses Recyclingmaterial handelt.

Eine umfangreiche Literaturrecherche zeigte, wie wichtig das Thema Wasseraufnahme der RC-Körnung bei der Herstellung des Betons ist.

In der folgenden Tabelle sind die zulässigen Anteile der groben rezyklierten Gesteinskörnung dargestellt.

Tabelle 1: Zulässige Anteile grober rezyklierten Gesteinskörnungen, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (% Volumenanteil) nach DIN 1045-2 [21]

	1	2	3	4
	<i>Anwendungsbereich</i>		<i>Kategorie der Gesteinskörnung</i>	
	<i>Alkalirichtlinie^a</i>	<i>DIN EN 206 und DIN 1045-2</i>	<i>Typ 1</i>	<i>Typ 2</i>
1	WO	Karbonatisierung XC1	≤ 45 ^b	≤ 35
2	WF	Kein Korrosionsrisiko X0	≤ 45	≤ 35
3		Karbonatisierung XC1 bis XC4		
4		Frostangriff ohne Taumittleinwirkung XF1 und XF3		
5		Beton mit hohem Wassereindringwiderstand nach 5.5.3		
6		Chemischer Angriff XA1 ^d		
7	WA ^c	XD1 und XD2 XS1 und XS2 XF2 und XF4	≤ 30	≤ 20

^a Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkaliaktionen im Beton (DAfStb-Alkali-Richtlinie) sowie zusätzliche Anforderungen siehe E.3.1.3.

^b Es dürfen feine rezyklierte Gesteinskörnungen des Typs 1 ≤ 20 % Volumenanteil der austauschbaren rezyklierten Gesteinskörnung eingesetzt werden, sofern sie aus einer Produktion der verwendeten groben rezyklierten Gesteinskörnung stammen, für die die Anforderungen an die stoffliche Zusammensetzung nach DIN EN 933-11 nachgewiesen wurde. Der Anteil der feinen rezyklierten Gesteinskörnung bezogen auf den Anteil der groben rezyklierten Gesteinskörnung darf dabei nicht größer sein, als der Anteil der gesamten feinen Gesteinskörnung bezogen auf den Anteil der gesamten groben Gesteinskörnung.

^c Die Feuchtigkeitsklasse WA darf nur für rezyklierte Gesteinskörnung mit nachgewiesener Alkaliempfindlichkeitsklasse E I-S nach DAfStb-Alkali-Richtlinie verwendet werden.

^d Die Regelung zum chemischen Angriff ist für XA1 durch die Betonklasse BK-N abgedeckt.

Methodik der Probennahme bei der RC Gesteinskörnung

Vorbemerkung

Die Beschaffenheit der RC-Körnung hat großen Einfluss auf die Eigenschaften des Frisch- und Festbetons. Wichtige Parameter wie z. B. die Wasseraufnahme wurden bestimmt.

Probennahme

Zur Vorbereitung wurde das 2/16er Material einer gleichmäßigen Probenteilung unterworfen, um aussagefähige Ergebnisse zu erhalten. Die Abläufe dazu finden sich in nachfolgender Abbildung.

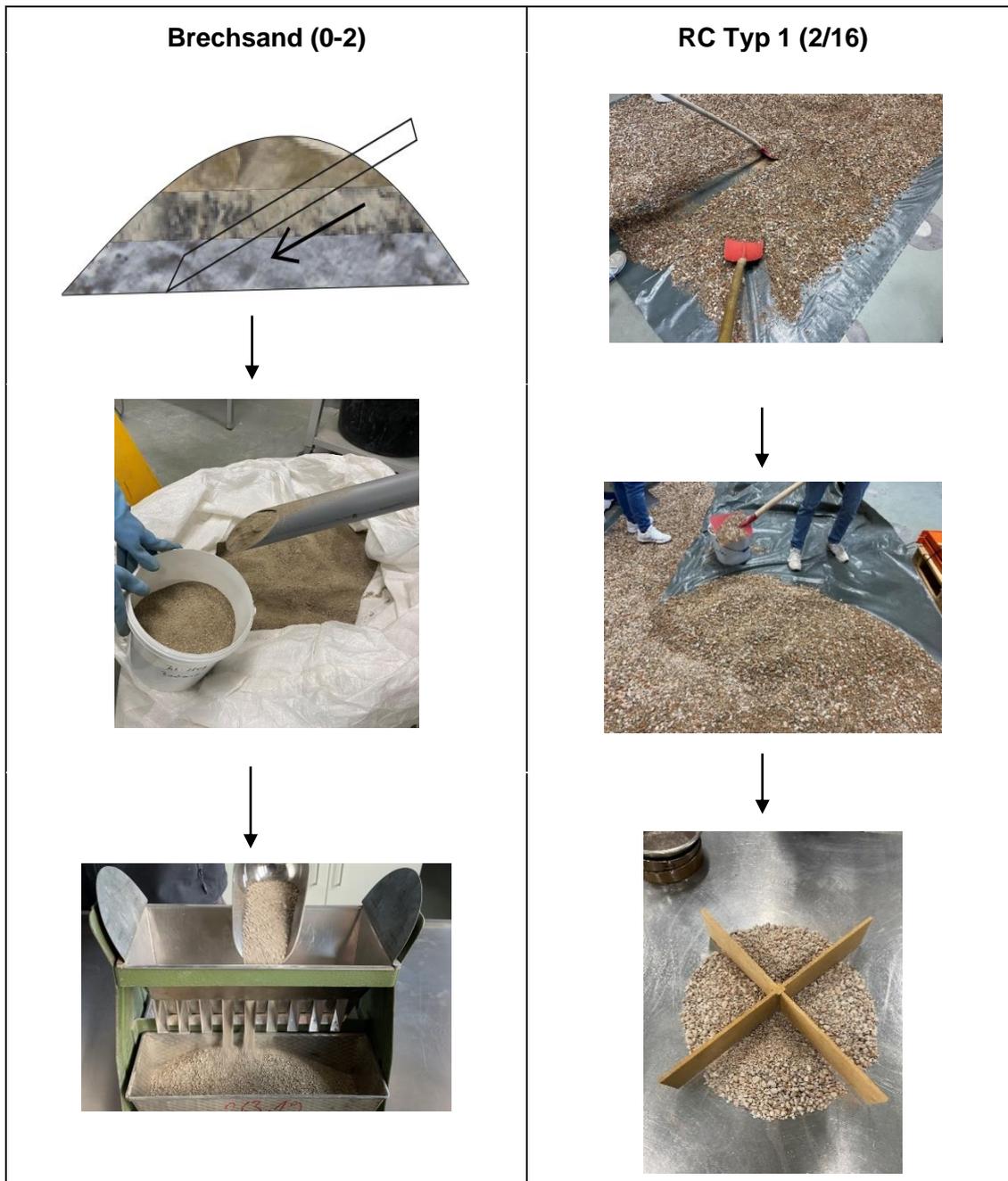


Abbildung 4: Abläufe der Probeentnahmen

Von der Anlieferung im großen Big Bag wurde eine Teilung in möglichst homogene Proben vorgenommen. Die grobe Gesteinskörnung wurde zunächst horizontal ausgebreitet. Dann erfolgte bei beiden Materialien eine Entnahme in luftdichte Eimer mit Schaufeln beim groben und mit einem Probenentnahmespeer beim feinen Material. Das verminderte die ungewünschte natürliche Karbonatisierung und die damit einhergehende Verzerrung der Ergebnisse. Kleinste Mengen wurden falls erforderlich beim Brechsand mit erneutem Einsatz des Speers, und anschließender Teilung mittels Riffelteiler extrahiert. Das grobe Material in den Eimern wurde jeweils so lange mit dem Teilkreuz geteilt, bis die gewünschte Teilmenge erreicht war.

Materialuntersuchungen

Wasseraufnahme

In den Normen gibt es konkrete Vorgaben für die Durchführung von Wasseraufnahmeversuchen an rezyklierter Gesteinskörnung. Grundsätzlich wird eine Kernfeuchte nach unterschiedlichen Zeiten gemessen, und oberflächlich anhaftendes Wasser durch Trocknung entfernt. Unterschiedliche Zustände sind in nachfolgender Abbildung gezeigt.

Die Methode der Wasseraufnahmeprüfung der groben Gesteinskörnung ist für RC-Material in Anhang B, DAfStb Richtlinie [23] und im Anhang E der DIN 1045-2 [21] beschrieben. In Anlehnung daran wurde diese in einem Wasserbad für genau 10 Minuten geflutet, anschließend das Wasser abgelassen. Die Gesteinskörnung wurde dann händisch abgewischt und ggf. mit heißem Luftstrom getrocknet, bis die Oberfläche frei von Wasserfilmen war. Anschließend wurde die Gesteinskörnung gewogen. Diese Methode ist zwar sehr einfach und schnell, jedoch stark von der Erfahrung der ausführenden Person abhängig. Außerdem kann durch das mechanische Bearbeiten der anhaftende Mörtel entfernt werden, was das Ergebnis beeinflussen kann [24]. Es kann zudem leicht zu einem Verlust bei den feinen Anteilen kommen.

Feuchtezustände	Schemaskizze	Beschreibung
Ofen trocken Oven dry (OD)		Die Poren in der Gesteinskörnung sind komplett trocken. Es gibt kein Wasser an der Oberfläche.
Luft trocken Air dry (AD)		Das Innere der Poren in der Gesteinskörnung ist wassergefüllt, während das Äußere der Poren nahe der Oberfläche trocken bleibt. Es gibt kein Wasser an der Oberfläche.
Oberflächensättigung oberflächentrocken Surface saturation surface-dry (SSSD)		Das Innere der Poren in der Gesteinskörnung bleibt trocken, während das Äußere der Poren nahe der Oberfläche wassergefüllt ist. Es gibt kein Wasser an der Oberfläche.
Gesättigt oberflächentrocken Saturated surface-dry (SSD)		Die Poren in der Gesteinskörnung sind wassergefüllt. Es gibt kein Wasser an der Oberfläche.
Übersättigung Over saturation (OS)		Die Poren in der Gesteinskörnung sind wassergefüllt. Es gibt einen Wasserfilm an der Oberfläche.

Abbildung 5: Feuchtezustände von RC-Gesteinskörnung

Für das feine RC-Material gibt es einen auf der DIN EN 1097-6 basierenden Versuch, die sogenannte Pyknometermethode. Dazu wird das Material in ein Pyknometer mit Wasser gelegt, durch Schütteln entlüftet und für 24 Stunden stehen gelassen. Dann wird das Material vom Wasser getrennt und mit einem Heißluftgebläse unter ständigem Umwälzen getrocknet. Gesucht wird hierbei der kerngesättigte, oberflächentrockene Zustand (engl. SSD). Wenn dieser scheinbar erreicht ist, wird das Material in einen Trichter (kegelstumpfförmige Metallform) eingefüllt, und der Trichter abgehoben. Bleibt das Material in einer bestimmten Form stehen, ist der Zustand SSD gefunden. Auch diese Methode ist sehr stark erfahrungsabhängig und unterliegt zusätzlich Unsicherheiten bei der eher vagen Beurteilung der Form [24].

Eine weitere Methode zur Bestimmung der Wasseraufnahme von feinen Gesteinskörnungen ist die elektrische Leitfähigkeitsmessung. Das Prinzip nutzt die plötzliche Verringerung der elektrischen Leitfähigkeit genau im SSD-Zustand bei kontinuierlicher Trocknung.

Ergebnisse der Wasseraufnahmeversuche

Mit der Pyknometer Methode und gemäß der DAfStb Richtlinie für Beton mit rezyklierten Gesteinskörnungen wurde die Wasseraufnahme des Materials bestimmt. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Tabelle dargestellt. Es ist dabei nicht auszuschließen, dass aufgrund der subjektiven Einschätzung der Zustand „Oberflächentrocken, kerngesättigt“ (engl. SSD) tatsächlich etwas höher oder tiefer liegt.

Tabelle 2: Ergebnisse der Wasseraufnahme-Versuche der rezyklierten Gesteinskörnungen

Material	Korngröße (mm)	WA_{10 min} (M.-%)	WA_{24 h} (M.-%)	Methode/Norm
fRCA	0-2	-	11,50	Pyknometer Methode/ DIN EN 1097-6 2001:01 [22]
fRCA (carbonatisiert)	0-2	-	10,21	
cRCA	2-16	6,74	-	Anhang B, DAfStb Richtlinie "Beton mit rezyklierten Ge- steinskörnungen (...)" 2010- 09 [23]
cRCA (carbonatisiert)	2-16	5,64	-	

Alkaliempfindlichkeit

Zur Untersuchung der Alkaliempfindlichkeit der rezyklierten Gesteinskörnung im ursprünglichen nicht carbonatisierten Zustand und nach einer künstlichen Carbonatisierung wurde das Schnellprüfverfahren gemäß Alkali-Richtlinie, Ausgabe Oktober 2013, Anhang B2 an einer ursprünglichen nicht carbonatisierten rezyklierten Gesteinskörnungsprobe und an einer künstlich carbonatisierten Gesteinskörnungsprobe durchgeführt.

Die Untersuchung hinsichtlich Alkalireaktivität erfolgte im Prüflabor der Materialprüfungs- und Versuchsanstalt Neuwied [35]. Die Gesteinskörnung wurde bei der Herstellung der Mörtelproben 10 Minuten vorgegast mit der Menge an Wasser, die sich bei dem Versuch der Wasseraufnahme nach 10 min ergab. Die Wasseraufnahme, die nach 10 min in Anlehnung an DIN EN 1097-6 geprüft wurde, ergab einen Wert von 6,0 % für die nicht carbonatisierte und 6,7 % für die carbonatisierte Probe.

Es zeigte sich, dass nach einer Lagerungsdauer von 13 d bei $80 \pm 2 \text{ °C}$ in Natronlauge, die ursprüngliche nicht carbonatisierte Probe ($w/z = 0,34$) eine Dehnung von 0,88 mm/m aufwies, während die carbonatisierte Probe ($w/z = 0,32$) nur eine Dehnung von 0,57 mm/m aufwies. Nachfolgende Abbildung zeigt die Ergebnisse. Beide Proben liegen dabei unter dem Grenzwert von 1,00 mm/m, so dass eine Einstufung in die Alkaliempfindlichkeitsklasse E-I-S erfolgen kann, d.h. es ergibt sich hier die günstigste Einstufung nach Alkali-Richtlinie für rezyklierte Gesteinskörnungen. Die carbonatisierte Probe weist eine nochmal geringere Alkaliempfindlichkeit als die ursprüngliche nicht carbonatisierte Probe auf.

Tabelle 3: Ergebnisse des Schnellprüfverfahrens nach Alkali-Richtlinie

Kriterium		Ergebnis gemäß Prüfung ²⁾		Bewertung gemäß AKR-Richtlinie	
				Alkaliempfindlichkeitsklasse	
		Serie A („nativ“)	Serie B („carbonatisiert“)	E-I-S	Keine Bewertung ¹⁾
Grenzwerte für die Dehnung ε der Mörtelprismen nach 13 Tagen	[mm/m]	0,88	0,57	$\varepsilon \leq 1,00$	$\varepsilon > 1,00$

1) Zur Bewertung kann ein Betonversuch nach Anhang B.3 der Alkali-Richtlinie [5] angeschlossen werden;

2) Prüfung mittels Schnellprüfverfahren nach Anhang B.2 der Alkali-Richtlinie [5].

Kapitel 4 Carbonatisierung ausgewählter Ausgangsstoffe

Ein weiterer Ansatz eine Verbesserung der ökologischen Qualität des Betons mit rezyklierter Gesteinskörnung zu erzielen, besteht in einer künstlichen Carbonatisierung der rezyklierten Gesteinskörnung. Die Qualität der nach heutigem Stand der Technik hergestellten RC-Gesteinskörnung unterliegt Schwankungen. Außerdem schränken die erhöhte Wasseraufnahme, Porosität, mögliche Alkaliempfindlichkeit und niedrigere Druckfestigkeit deren Anwendung ein. Zu beachten ist weiterhin, dass zu den sich im Beton ausbildenden dünnen Übergangszonen zwischen der Gesteinskörnung und der Zementsteinmatrix, den sogenannten Interfacial Transition Zones (ITZ), die Schwachstellen darstellen, bei RC-Beton weitere ITZ dazukommen. Nämlich diejenigen zwischen der Zementsteinmatrix des Rezyklats und der Gesteinskörnung.

Durch die in diesem Projekt durchgeführte beschleunigte Carbonatisierung der rezyklierten Gesteinskörnung soll neben der ökologischen eine technische Qualitätserhöhung des Rezyklats und damit des Betons erreicht werden. Bei der Carbonatisierung reagiert Kohlendioxid vor allem mit den Hydratationsprodukten im ursprünglichen Betonstein (Calciumhydroxid $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und Calcium-Silikat-Hydrat C-S-H) und wird somit dauerhaft als Calcium Carbonat (CaCO_3) gebunden [36]. Der Vorgang ist in nachfolgender Abbildung links veranschaulicht. Dabei werden Wasseraufnahme und Porosität verringert, und die neue sowie die alte ITZ verbessert [37]. Im Vorhaben wurde die beschleunigte Carbonatisierung in einem Drehrohrreaktor umgesetzt (Abbildung rechts).

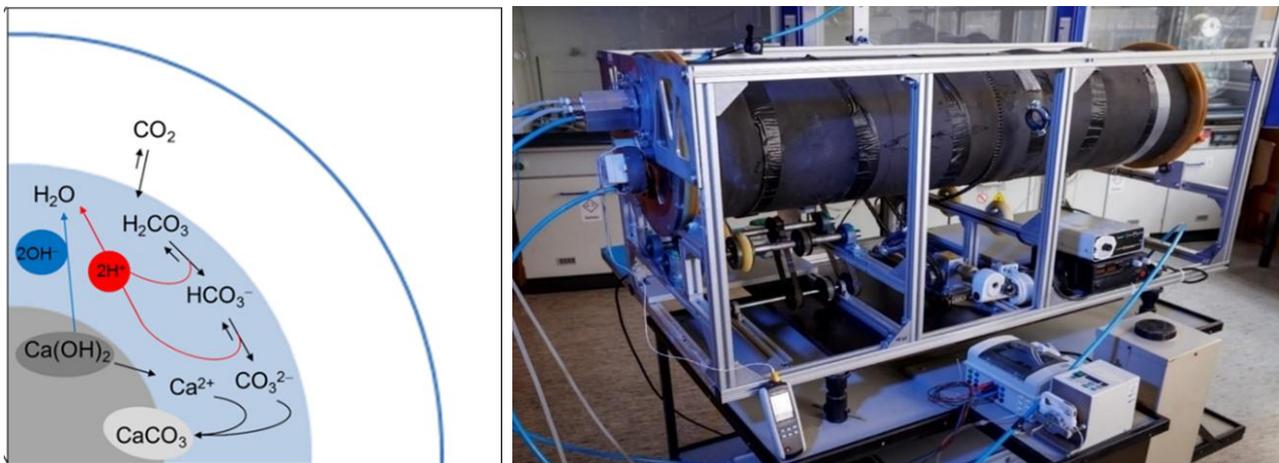


Abbildung 6: Links: Prinzipskizze der Carbonatisierung
Rechts: Drehrohrreaktor zur beschleunigten Carbonatisierung, Bild: Jürgen Henkel

Abhängig von der Bauart des Brechers fallen beim Recycling zwischen 40 und 60 % Brechsand an. Dieser ist nach neuer DIN 1045-2:2023-08 [21] zur Verwendung im Beton prinzipiell zugelassen, seine Anwendung ist aufgrund der technischen Nachteile jedoch stark eingeschränkt. Die Anwendung der beschleunigten Carbonatisierung ist aus den vorgenannten Gründen ein vielversprechender Ansatz, um eine weitreichendere, hochwertige Verwendung von cRCA und fRCA zu ermöglichen.

Da ein Material umso mehr CO₂ in derselben Reaktionszeit aufnehmen kann, je feiner es ist, weist Brechsand ein höheres Carbonatisierungspotenzial als größere RC-Splitte auf und ist daher von besonderem Interesse. Auch das Alter des Materials (Hydratationsgrad, natürliche Carbonatisierung) ist ausschlaggebend. Potenziell lassen sich alle Bestandteile im Betonbruch carbonatisieren und unterschiedlich wieder einsetzen, so ist auch carbonatisierter Filterkuchen aus Betonresten und Spülwasser Teil von Untersuchungen. Dieses Material ist aufgrund der Partikelgröße unter 0,25 mm als Ersatz oder Zusatzstoff für Zement (**S**upplementary **C**ementitious **M**aterial, SCM) Gegenstand von Forschungen, mit welchem sich derzeit intensiv Zementhersteller beschäftigen. Die CO₂ - Aufnahme verschiedener betonbürtiger Abfallströme ist in nachfolgender Abbildung dargestellt. Hier wird deutlich, dass die bisher noch weitgehend unerforschten Betonschlämme, die in erheblichen Mengen bei der Betonherstellung entstehen, ein hohes CO₂ - Aufnahmepotenzial haben und maßgeblich zur Senkung des CO₂ - Fußabdruckes beitragen können.

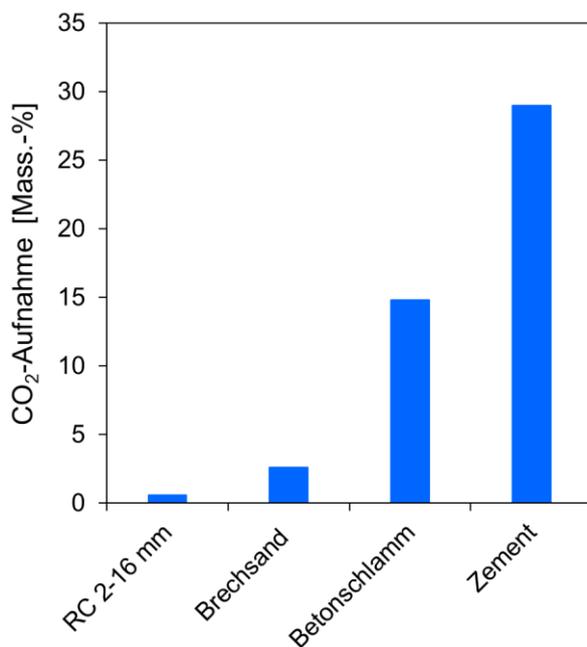


Abbildung 7: CO₂ - Aufnahme verschiedener Betonabfälle durch beschleunigte Carbonatisierung

Kapitel 5 Optimierter Bahnsteigbeton

Dieser Abschnitt behandelt die Festlegung der Zusammensetzung des Betons (Arbeitspaket 3).

Mischprozess

Für Beton mit RC-Gesteinskörnungen gibt es bislang keine allgemein anerkannte Mischtechnik. Zunächst wurde der traditionelle 2-stufige Mischprozess aus dem Fertigteilwerk umgesetzt. Die richtige Zugabe des erforderlichen Saugwassers war entscheidend, um eine geeignete Konsistenz des Betons zu erreichen. Die Erkenntnisse im Laufe des Projekts führten dazu, dass der Mischprozess geändert wurde und schließlich ein 4-stufiger Mischprozess gewählt wurde.

Das Erreichen des vorgesehenen wirksamen Wasser-Zement-Wertes sowie die Verbesserung der Übergangsbereiche zwischen RC-Körnern und Zementmatrix ist maßgeblich von der Mischzeit und dem Feuchtegehalt der eingebrachten RC-Körnung abhängig.

Die Wassermenge einer Referenzmischung aus natürlicher Gesteinskörnung sollte um diejenige Menge an Zusatzwasser erhöht werden, die die rezyklierte Gesteinskörnung (Betonsplitt) innerhalb von 10 Minuten im Pyknometerversuch aufnehmen kann. Maximale Festbetoneigenschaften werden erreicht, wenn die Gesteinskörnung eine Kernfeuchte aufweist, ohne vollständig gesättigt zu sein [26]. Nach [28] ist ein Feuchtegehalt der Gesteinskörnung zwischen 50 – 65 % optimal.

Im Labor wurde versucht, mit ofengetrockneter RC-Gesteinskörnung und Vorsättigung, den in der Literatur empfohlenen optimalen Feuchtegehalt der Gesteinskörnung zwischen 50 – 65 % einzustellen. Ein dreistufiger Mischprozess nach [29] wurde um den Prozess des zuvor genannten labortechnischen Vorsättigens ergänzt. Aus gleicher Quelle geht hervor, dass der Mischprozess mindestens etwa 12 Minuten dauern sollte, um eine homogene Frischbetonmischung zu erreichen. Der gewählte Mischprozess ist in nachfolgender Abbildung dargestellt.

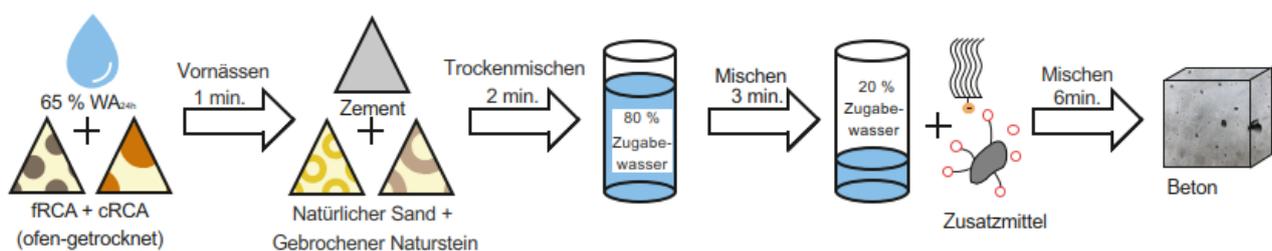


Abbildung 8: Gewählter Mischprozess für RC-Beton in Laborversuchen.

Für die Laborversuche wurde ein programmierbarer Ringtellermischer von Liebherr verwendet. Der Mischablauf war bei allen Versuchen gleich. Einzig am Ende des Mischvorgangs kam es zu kleinen Abweichungen, da der Mischer in kleiner Drehzahl in der „Nachmischzeit“ zum Entleeren weiterlaufen musste. Während dessen wurde ein Ausbreitversuch gemacht, und ggf. Fließmittel nachdosiert, daher variierte die Gesamtmischzeit etwas.

Ausgangsstoffe

Sieblinien der Gesteinskörnung

Die verwendeten Sieblinien für die Betone sind in Abbildung 9 vergleichend dargestellt. Die Referenz (Ausgangsmischung) besteht aus

- Kalksplitt (8–16 mm) und
- Rheinsand (0-2 mm).

Bei der Rezeptur „R30“ wurden 30 Vol.-% grober natürlicher Gesteinskörnung (Kalksplitt) durch RC-Gesteinskörnung der Fraktion 2-16 mm (Typ 1, Fa. Feess) ersetzt. In einer weiteren Variante „R30S8“ wurde zusätzlich der Austausch 8 Vol.-% Rheinsand durch rezyklierten Beton-Brechsand vorgenommen, was die Gesamtsieblinie kaum verändert.

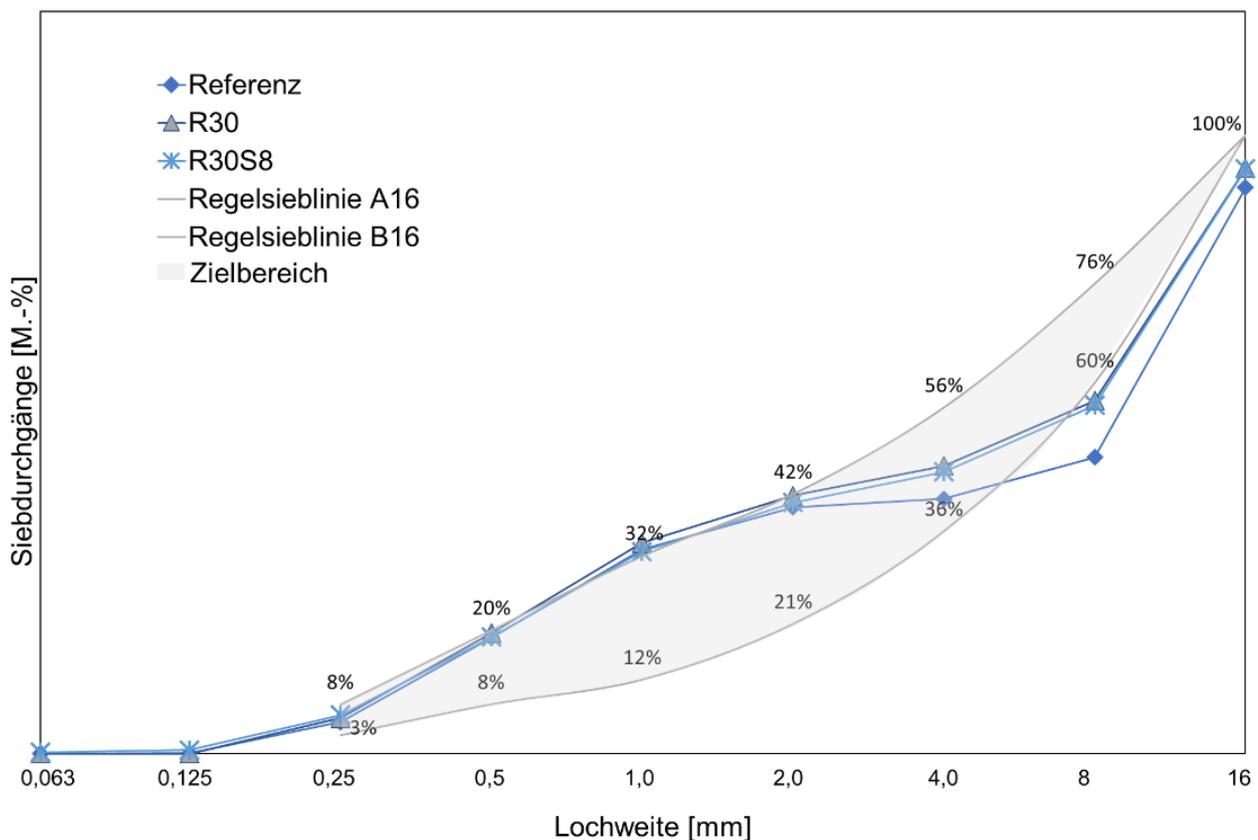


Abbildung 9: Sieblinien Bahnsteigbeton

Zemente und Zusatzmittel

In den Laborversuchen wurden Zusatzmittel entsprechend den Empfehlungen der Zement- bzw. Zusatzmittelhersteller gewählt. Die Auswahl der dabei verwendeten Fließmittel abhängig von der Zementsorte ist in nachfolgender Tabelle dargestellt. In allen Mischungen wurde der gleiche Luftporenbildner (Sika LPS V), in angepassten Dosierungen, verwendet.

Tabelle 4: Zemente und zugehörige Fließmittel in Laborversuchen

a	CEM III/A 52,5 R „VARIODUR 40“	Chryso Fluid Optima 145
b	CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R	Master Builders Solutions ACE 420

Überblick Varianten

Im Rahmen des Forschungsprojektes wurden vier Rezepturen für die unmittelbare Umsetzung nach allen – derzeitigen – Regeln der Technik entwickelt, die zur Herstellung von Betonfertigteilen für Bahnsteige angewendet werden können. Es wurden jeweils zwei Betonrezepturen zu jedem der beiden Zemente entwickelt – ohne und mit grobem Recyclingzuschlag (RC-Material). Zwei weitere Varianten beinhalteten bei gleichem Gehalt an grobem RC-Material zusätzlich feinen Betonbrechsand als Substitut für natürlichen Sand. Bei gleicher Austauschrate sollte dessen Effekt einmal in unbehandeltem Zustand und einmal nach beschleunigter Carbonatisierung sichtbar gemacht werden. Die konkrete Zusammensetzung und die Bestandteile sind in nachfolgender Tabelle dargestellt.

Tabelle 5: Zusammensetzung der Rezepturen

Bezeichnung	Zement	Wasser-Zement-Wert	Gesteinskörnungen			RC-Material		Fließmittel	Luftporenbildner
			0/2	2/8	8/16	0/2	2/16		
B31a	CEM III/A 52,5 R Variodur 40	0,38	Rheinsand	-	Diabas	-	-	PCE	Sika
B31b	CEM III/A 52,5 R Variodur 40	0,38	Rheinsand	-	Diabas	-	Typ 1 nativ	PCE	Sika
B32a	CEM II/B-M S-LL 42,5 R	0,38	Rheinsand	-	Diabas	-	-	PCE	Sika
B32b	CEM II/B-M S-LL 42,5 R	0,38	Rheinsand	-	Diabas	-	Typ 1 nativ	PCE	Sika
B41a	CEM III/A 52,5 R Variodur 40	0,38	Rheinsand	-	Diabas	Typ 1 nativ	Typ 1 nativ	PCE	Sika
B41b	CEM III/A 52,5 R Variodur 40	0,38	Rheinsand	-	Diabas	Typ 1 carbonat	Typ 1 carbonat	PCE	Sika

Die Gewichtsanteile der rezyklierten Gesteinskörnungen sind in nachfolgender Tabelle angegeben.

Tabelle 6: Gewichtsanteil an Recycling-Gesteinskörnungen je m³ Beton.

Material	Einheit	B31.a & B32.a	B31.b & B32.b	B41.a	B41.b
fRCA	(kg/m ³)	-	-	115,6	-
fRCA (carbonatisiert)	(kg/m ³)	-	-	-	118,4
cRCA	(kg/m ³)	-	501,1	501,1	-
cRCA (carbonatisiert)	(kg/m ³)	-	-	-	501,1

Beprobung der Labormischungen

Verarbeitbarkeit

Alle Mischungen wurden mit einem gleichbleibenden Luftporengehalt von $7,5 \pm 0,5$ Vol.-% hergestellt. Der Fließmittelgehalt wurde nicht verändert, das angestrebte Ausbreitmaß von 420-550 mm (Konsistenzklasse F3-F4) wurde bei einzelnen Mischungen unterschritten. Die Mischungen B31a und B32a hatten ein Ausbreitmaß von jeweils 390 und 320 mm. Die Mischung B41a hatte das höchste Ausbreitmaß mit 500 mm. Alle Rezepturen waren stabil und es wurde kein Entmischen festgestellt.

Möglicherweise hat die leichte Veränderung der Sieblinie mit dem RC-Material gegenüber der ursprünglichen Sieblinie zu einer Verbesserung der Verarbeitbarkeit geführt. Das Ausbreitmaß der Mischung B41b war geringer als das der Mischung B41a.

Festigkeitsentwicklung

Da das modulare Bahnsteigsystem von Hering Bau auf Basis einer Typenstatik sowie einer Anwenderfreigabe der DB AG geplant und ausgeführt wird, müssen die Bahnsteigelemente die Festigkeitsklasse C35/45 (LP) erfüllen. Diese Festigkeitsklasse galt es auch mit den neuen Rezepturen zu erreichen. Die Entwicklung der Festigkeit wurde mit Druckfestigkeitsprüfungen an je 3 Proben nach 20 Stunden, sowie 3, 7 und 28 Tagen kontrolliert.

Die Ergebnisse werden in den nachfolgenden Diagrammen gezeigt. Dabei ist festzuhalten: Die 7-Tage-Werte der Rezepturen ohne RC-Material liegen deutlich über den erforderlichen Mindestwerten der 28 Tagen Festigkeit. Die Festigkeiten der Rezepturen mit RC-Material fallen gegenüber den Rezepturen ohne RC-Material etwas ab, wobei die Werte der Rezeptur B32b grenzwertig sind. Fazit: die Rezepturen B31a, B31b und B32a sind für die vorgesehene Anwendung im Bahnsteigbau hinsichtlich der Druckfestigkeit ohne Einschränkung geeignet. Auch die Mischung mit carbonatisiertem Rezyklat (B41b) erreicht die erforderlichen Festigkeiten.

Durch die feine Mahlung des CEM III/A erreicht dieser im durchgeführten Laborversuch die Mindestanforderungen für das Fertigteilwerk sicher. Interessant ist auch der Hinweis darauf, dass die Verwendung von carbonatisierten Gesteinskörnungen die Frühfestigkeiten steigern könnte. Zudem werden die Druckfestigkeitsverluste nach 28 Tagen durch Verwendung von carbonatisiertem RC-Material ausgeglichen.

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen die Verläufe der Festigkeitsentwicklungen.

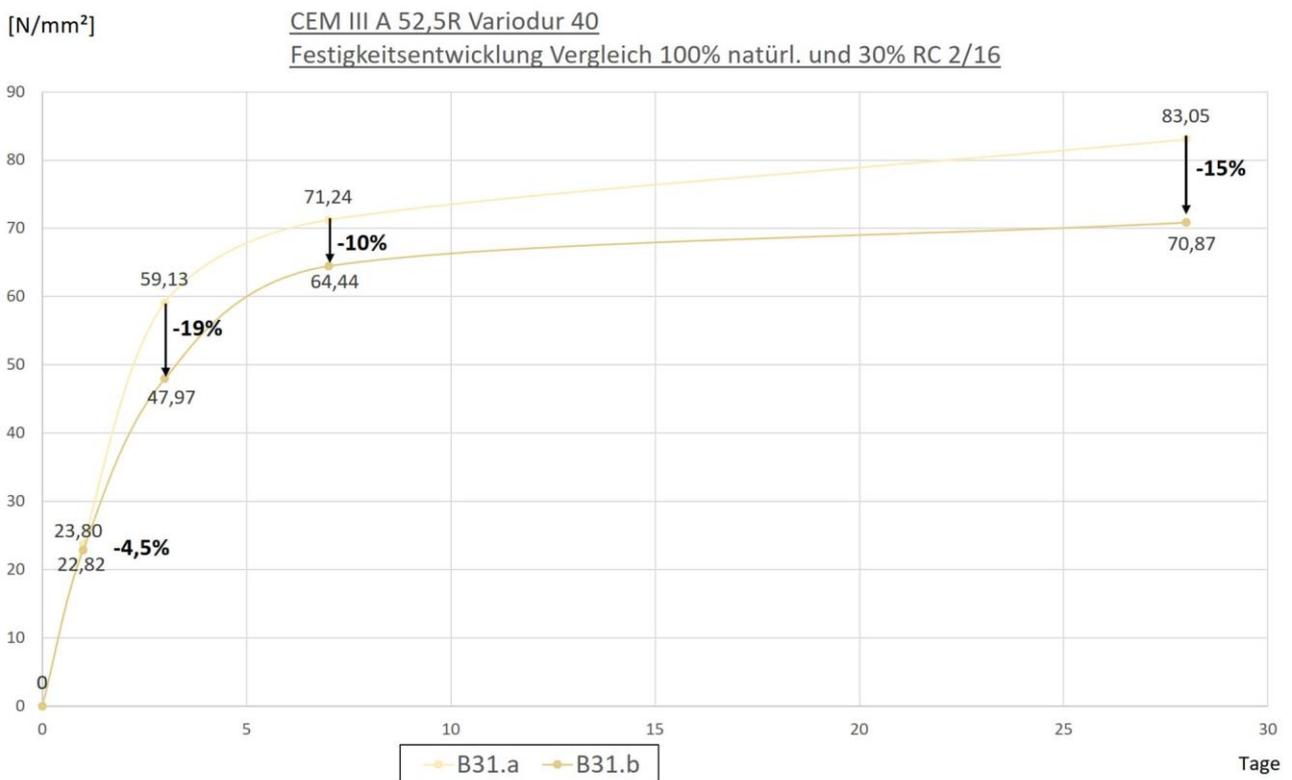


Abbildung 10: Festigkeitsentwicklung B31a und B31b

[N/mm²]

CEM II B-M S-LL 42,5R

Festigkeitsentwicklung Vergleich 100% natürl. und 30% RC 2/16

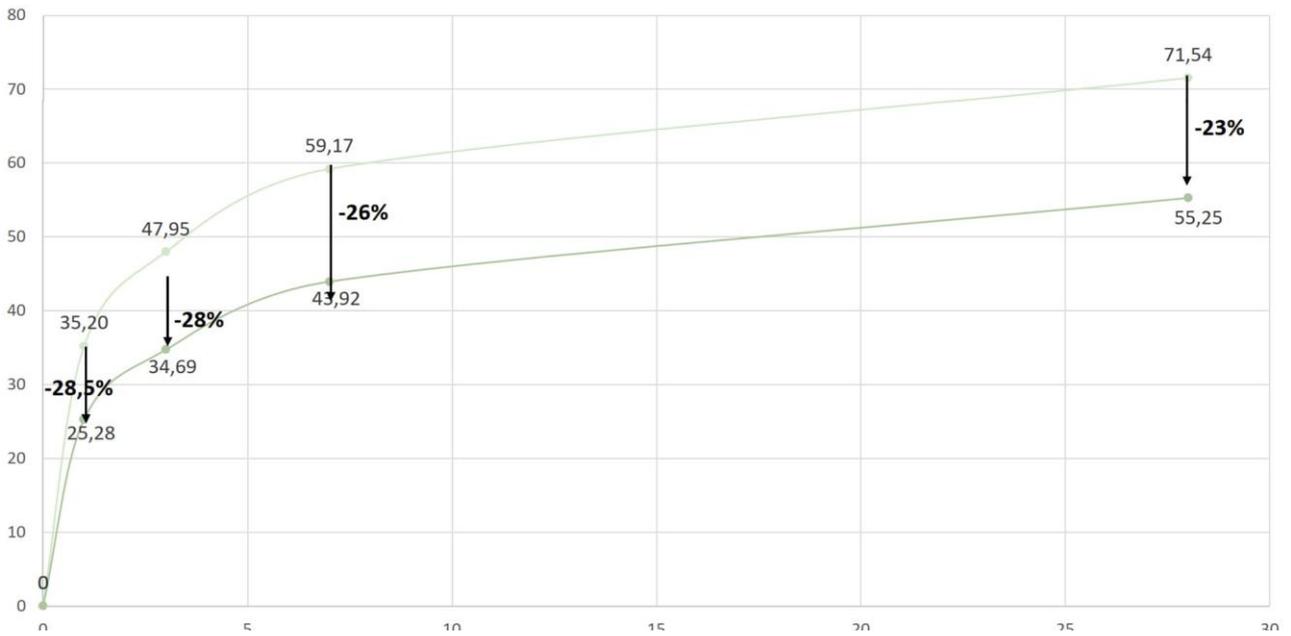


Abbildung 11: Festigkeitsentwicklung B32a und B32b

[N/mm²]

CEM III A 52,5R Variodur 40

Festigkeitsentwicklung Vergleich 30RC+8BS nativ und karbonatisiert

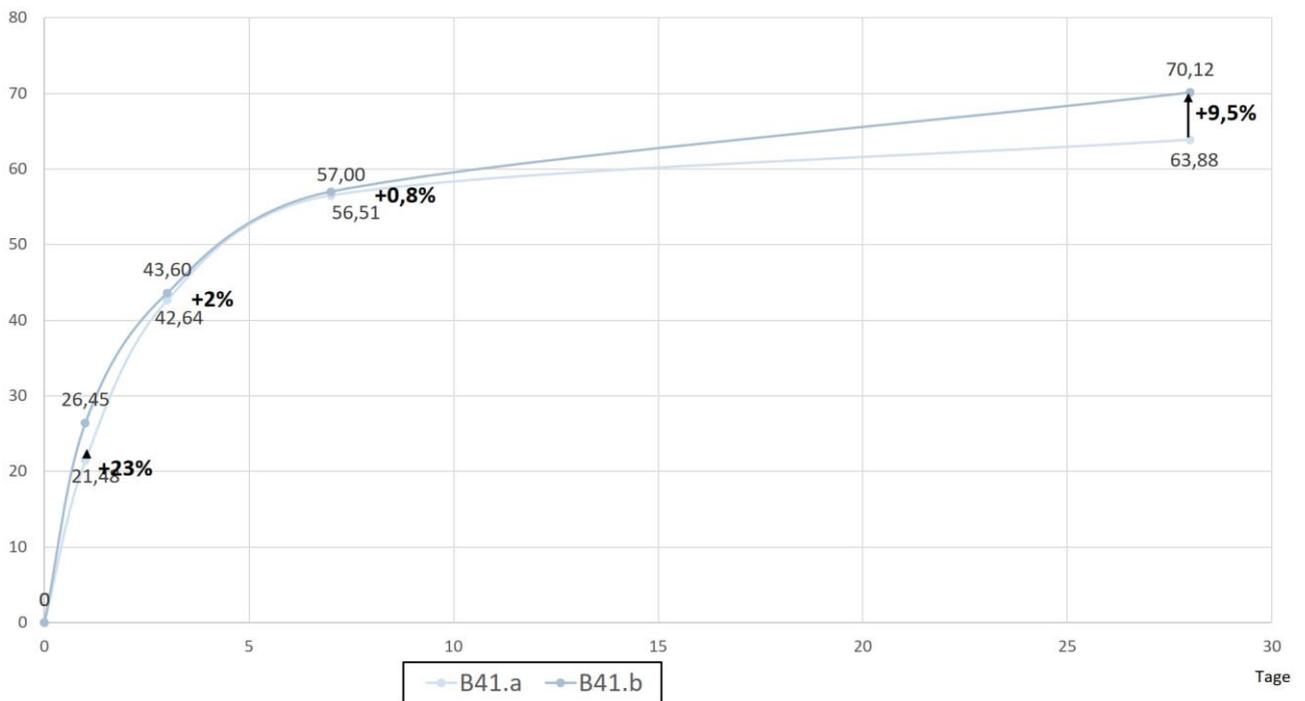


Abbildung 12: Festigkeitsentwicklung B41a und B41b

Frost-Tausalz-Widerstand

Frostschäden am Beton werden verstärkt durch Taumittel hervorgerufen und treten als flächige Abplatzungen und Ausbrüche auf. In der Regel wird als Taumittel auf Bahnsteigen Natriumchlorid verwendet, welches auch zu einer Korrosion der Bewehrung führen kann. Der Nachweis der hinreichenden Frost-Taumittel-Beständigkeit des Betons ist außerordentlich wichtig. Für die Rezepturen wurden Versuche zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstandes am Wilhelm-Dyckerhoff-Institut für Baustofftechnologie in Wiesbaden durchgeführt. Zur Anwendung kam das sogenannte CDF-Verfahren (Capillary suction of de-icing solution and freeze thaw test) nach DIN CEN/TS 12390-9. Hierbei werden fünf Prüfkörper in einer 3%igen NaCl-Lösung gelagert und anschließend 28 Frost-Tau-Zyklen unterzogen. Danach wird die Trockenmasse der abgewitterten Betonstücke ermittelt. Die Ergebnisse sind in nachfolgender Abbildung dargestellt.

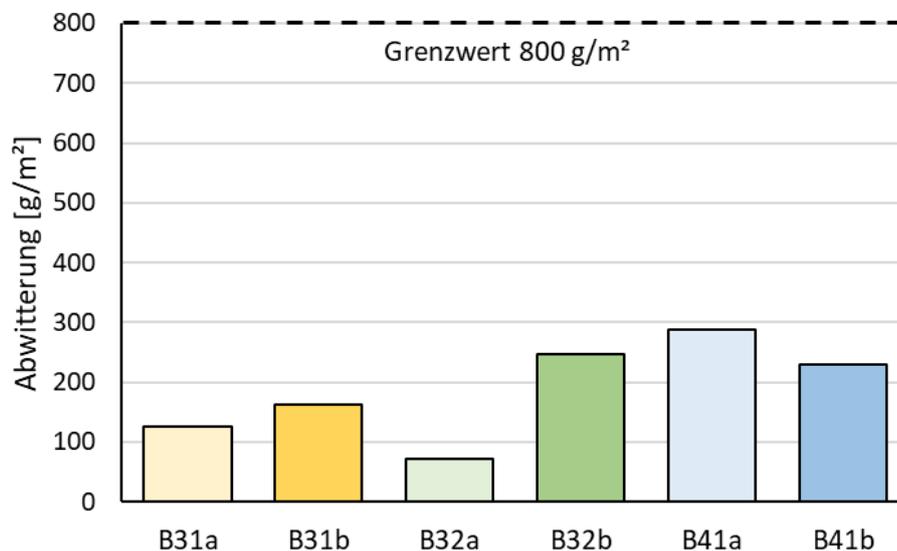


Abbildung 13: Ergebnisse der Frost-Taumittel Prüfungen

Bei allen Rezepturen lagen die gemessenen Werte deutlich unterhalb des von der DB AG geforderten Grenzwertes von 800 g/m², womit ein hinreichender Frost-Taumittel-Widerstand nachgewiesen werden konnte. Somit können die neuen nachhaltigen Betonrezepturen als beständig gegen Frost-Taumittel-Einwirkung eingestuft werden. Zurückzuführen ist das vermutlich unter anderem auf eine sehr gute Gefügedichte aller hergestellten Betone, welche durch Wassereindringversuche bestätigt wurde. Dadurch konnte das Vordringen des Wassers zur Schwachstelle, dem porösen RC-Material, behindert werden, was bei den Frost-Tau-Wechseln zu sehr guter Performance führt. Sofern die Eigenschaften des RC-Materials keinen zu großen Schwankungen unterliegen, wäre dessen Verwendung, unbehandelt oder carbonatisiert in der hohen Widerstandsklasse XF4 durchaus möglich.

Packungsdichteoptimierung

Um eine weitere größere CO₂ Reduzierung zu erreichen, stellt die Methode der Packungsdichteoptimierung einen effektiven Ansatz dar. Dabei wird durch den Einsatz von Gesteinsmehlen unterschiedlicher Größe der Anteil von Portlandzementklinker reduziert. Dieses Konzept des sogenannten Öko Betons nach Juhart verwendet inerte Füllstoffe wie Kalkstein- oder Quarzmehle, sogenannte Eco Füller und Mikro Füller unterschiedlicher Mahlfineinheit, um die Qualität des Betons bei möglichst niedrigem Zementgehalt zu optimieren [4].

Die Untersuchungen zur Packungsdichteoptimierung wurden ausgehend von einem Referenzmörtel vorgenommen, der in Anlehnung an einen Fassadenbeton von Hering Bau einen Wasserzementwert von 0,45 aufwies und einen Zement CEM II/B-M (S-LL) 42,5 R enthielt.

Zur Bestimmung der Packungsdichte wurden experimentell folgende Versuche durchgeführt:

- Versuch zur Bestimmung des Wasseranspruchs nach Puntke [38]
- Verfahren nach Okamura [39]

Ergänzend wurden von der Firma Omya Berechnungen zur Optimierung der Kornzusammensetzung im Feinstbereich durch Annäherung an die Sieblinie durchgeführt.

Als vielversprechend ergab sich aus den Voruntersuchungen zur Packungsdichte ein Mörtel bei dem ein Teil des Zements durch den Eco Füller Omyacarb 130-AL ersetzt wurde. Es zeigte sich, dass mit diesem Öko-Mörtel zwar eine signifikante Senkung des Treibhausgaspotenzials erreicht werden konnte, in derselben Größenordnung lag allerdings auch der Festigkeitsverlust.

Das Thema konnte im Rahmen des Projektes nicht abgeschlossen werden, sodass hierzu keine belastbaren Ergebnisse präsentiert werden können und weitere Untersuchungen, unter Einbeziehung weiterer Füller, notwendig werden.

Kapitel 6 Ökobilanz und Wirtschaftlichkeit

Umwelteinwirkungen

Nicht zuletzt wurde im Rahmen des Forschungsprojektes eine Bilanzierung der CO₂-Emissionen gemäß ISO 14067 durchgeführt. Dabei wurde die Rohstoffgewinnung der Betonkomponenten wie Zement, Wasser, Gesteinskörnung und Additive ebenso berücksichtigt wie der Transport vom Gewinnungsort bis zum Fertigteilwerk. Nachfolgende Abbildung zeigt das sogenannte Global Warming Potential (GWP) der unterschiedlichen Betonsorten – jeweils bezogen auf einen Kubikmeter Beton.

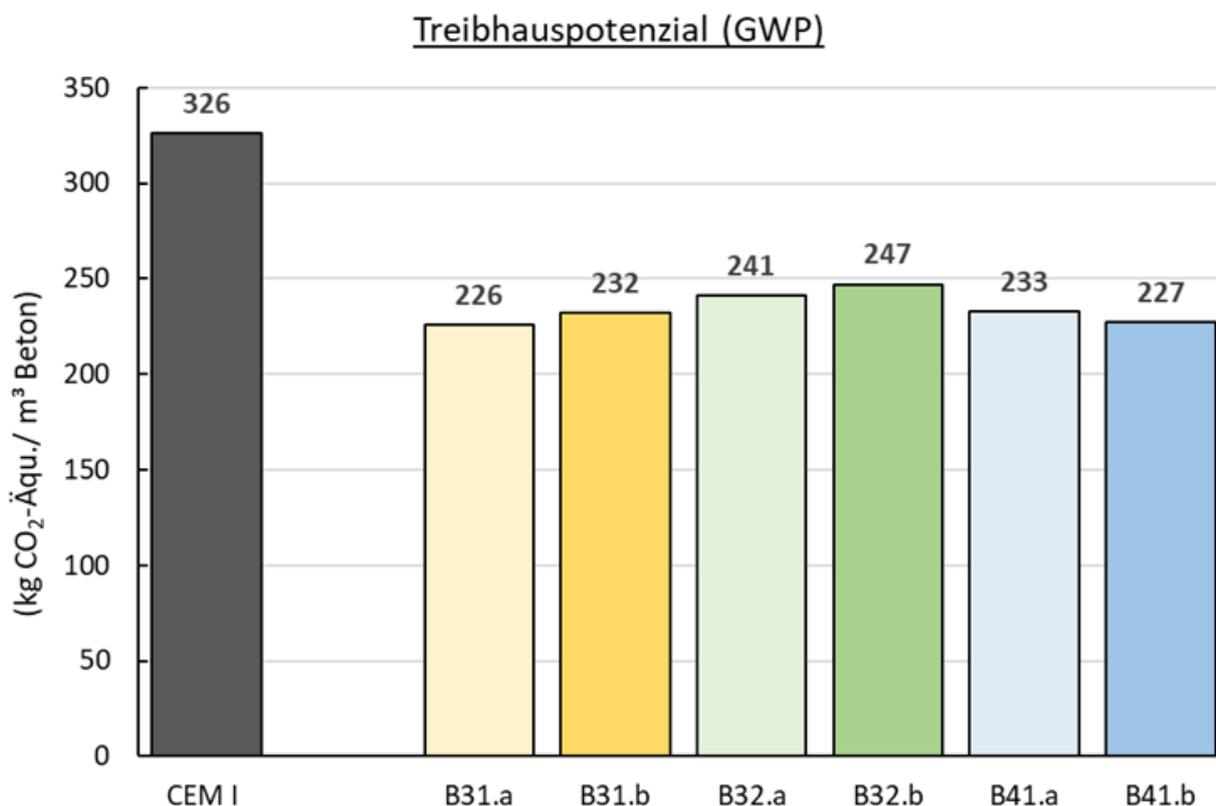


Abbildung 14: Vergleich Global Warming Potential (GWP)

Durch die Reduzierung des Zementgehaltes sowie Verwendung eines klinkereffizienten Zementes kann das GWP deutlich gesenkt werden. Der längere Transportweg des RC-Materials im Vergleich zur natürlichen Gesteinskörnung beeinflusst den GWP-Wert negativ. Das verwendete RC-Material wurde von einem Betrieb in 320 km Entfernung geholt und soll demnächst möglichst von einem lokalen Betrieb bezogen werden. Das Problem ist, dass es derzeit nur wenige Anbieter für zertifiziertes RC-Material gibt. Hier muss das Ziel sein, die Transportstrecke auf maximal 50 km zu reduzieren. Der Hauptanteil der Emissionen wird jedoch durch das Bindemittel – also den Zement – verursacht. Die besten Werte erzielt der CEM III/A, da dessen Zementklinkeranteil am geringsten ist.

Der Ressourcenverbrauch wurde anhand des Indikators Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) berechnet und wird in nachfolgender Abbildung gezeigt.

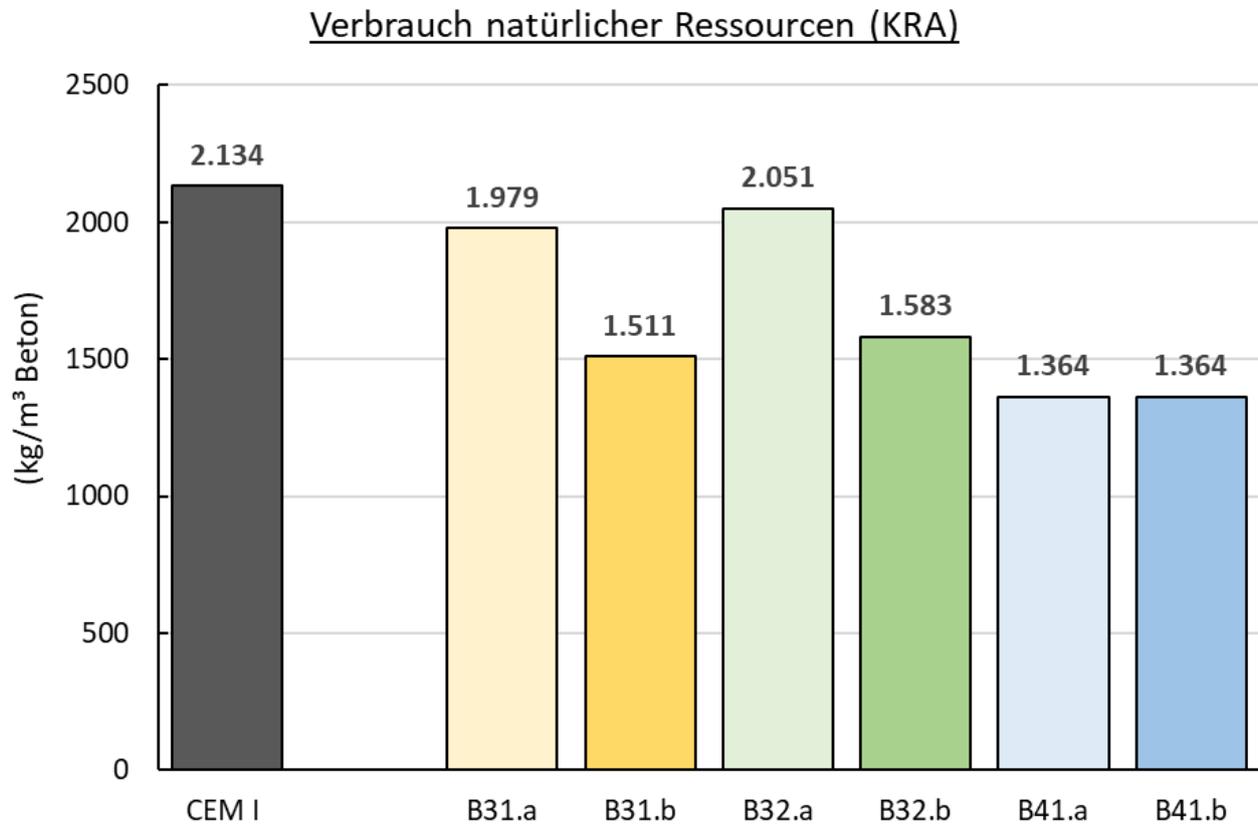


Abbildung 15: Ressourcenverbrauch der getesteten Betonrezepturen

Dem zugrunde liegen als maßgebende Einflussgröße die Kompositzemente. Da der Hüttensand als Abfallprodukt eingestuft wird, wirken sich die unterschiedlichen Hüttensandanteile in den Komposit- und Hochofenzementen auf die KRA der entsprechenden Rezepturen aus. Die Verwendung des CEM III/A sowie des groben RC-Materials senkt den KRA um etwa 29 %. Verwendet man zusätzlich feines RC-Material beträgt die Einsparung gegenüber der Referenz sogar 36 %. Hering Bau wird die Rezepturen B32a und B32b aufgrund der großen Einsparungen sowie deren normbedingten Praxistauglichkeit in naher Zukunft für Fassaden- und andere Architekturbetonprojekte verwenden. Die Rezepturen mit den höheren Festigkeiten, B13a und B31b, werden vorzugsweise im Bereich Bahnsteigbau Verwendung finden. Für die Herstellung des carbonatisierten Rezyklats fehlen derzeit noch die erforderlichen Einrichtungen, sodass die Rezeptur B41a und B41b vorerst nicht verwendet werden können.

Kostenschätzung

In einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung wurden auf Basis aktueller Preislisten die reinen Materialkosten der untersuchten Betone ermittelt und verglichen. Transportkosten wurden hierin der Einfachheit halber außer Acht gelassen.

Nachfolgende Tabelle 7 zeigt die berechneten Kosten der neu entwickelten Betone im Vergleich zum Referenzbeton. Als Referenzbeton wurde ein Bahnsteigbeton, Festigkeitsklasse C35/45 (LP), gewählt. Dieser Beton wird hergestellt mit einem CEM I 52,5 R und einem Zementgehalt von 350 kg/m³.

Tabelle 7: Materialkosten der Betone im Vergleich

Betonsorte	Materialkosten netto [€/m ³]
Referenz	97
B31.a	173
B31.b	188
B32.a	91
B32.b	106
B41.a	167
B41.b	167

Die berechneten Preise lassen sich anhand der großen Preisdifferenz zwischen den beiden Zementsorten in zwei Gruppen aufteilen. Die Kosten der Gruppe der Betone, die mit dem Zement CEM II/B-M S-LL 42,5 R hergestellt wurden, liegen in etwa auf dem Niveau des Referenzbetons. Hingegen liegen die Kosten der Gruppe der Betone, die mit dem CEM III/A 52,5 R (VARIODUR 40) hergestellt wurden, um 70 bis 80 % über den Kosten für den Referenzbeton.

Durch die Verwendung von RC-Material erhöhen sich die Kosten nochmals leicht, zumindest nach derzeitigem Stand der Beschaffungskosten. Es ist allerdings davon auszugehen, dass die Kosten für zertifiziertes RC-Material mittelfristig fallen werden, da mit steigenden Mengen und einer Zunahme der Anbieter zu rechnen ist.

Kapitel 7 Markteinführung

Mit den im Rahmen des „SUScon“-Projekts entwickelten neuen Betonrezepturen lässt sich die Nachhaltigkeit von Betonfertigteilen im Bahnsteigbau und im Bereich Architekturbeton deutlich verbessern – und zwar ohne Abstriche bei der Qualität.

Was die Untersuchungen an der Technischen Hochschule Mittelhessen zudem zeigen: Die beschleunigte Carbonatisierung stellt eine effektive Möglichkeit dar, um in Zukunft durch Carbon Capture and Utilization (CCU) noch größere Mengen RC-Material zu integrieren. Eine signifikante Reduzierung der Emissionen je Kubikmeter Beton ist vorrangig jedoch nur mit dem verwendeten Zement möglich. Daher spielen in Zukunft Zementersatzstoffe eine Schlüsselrolle, um die Emissionen weiter zu senken – diese sind in Bezug auf die Expositionsklasse jedoch mit Bedacht zu wählen.

Die Rezepturen mit CO₂-reduzierten Zementen sind, für bestimmte Anwendungen, schon jetzt normenkonform. Mit diesen Rezepturen wurden schon während des laufenden Projektes erste großformatige Musterbauteile hergestellt. Da die Ergebnisse weitgehend positiv waren, werden die neuen Rezepturen von Hering Bau ab sofort für die Produktion von Fertigteilen zum Einsatz kommen. Im Marktbereich Architekturbeton wurden sogar schon erste Projekte mit den neu entwickelten Betonrezepturen umgesetzt.

Im Bereich Bahnsteigbau bestehen höhere Anforderungen an die Dauerhaftigkeit des Betons, da hier Einwirkungen aus Taumitteln (Chloride) zu berücksichtigen sind. Jedoch wird auch in der neuen DIN 1045-2 (2023) [21] die Anwendung von rezyklierter Gesteinskörnung für die Expositionsclassen XD3 und XM1 sowie die Festigkeitsklasse C35/45 nicht zugelassen. Daher ist geplant, dass in einem ersten Schritt die Rezeptur B31a (CEM III/A ohne rezyklierte Gesteinskörnung) im Rahmen eines Pilotprojektes zum Einsatz kommen soll.

Den Kunden soll aber auch ein Beton mit klinkerreduziertem Zement plus rezyklierter Gesteinskörnung angeboten werden. Für diesen Anwendungsfall muss aber ein spezieller Verwendungsnachweis erbracht werden. Verwendungsnachweise sind sogenannte „Zustimmungen im Einzelfall“ (ZiE) oder „Allgemeine bauaufsichtliche Zulassungen“ (AbZ) bzw. „Allgemeine Bauartgenehmigungen“ (ABg). Daher wird von Hering Bau beabsichtigt, für die RC-Betone eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung beim Deutschen Institut für Bautechnik (DIBt) zu erwirken. Ein entsprechender Antrag wurde inzwischen gestellt und ein erforderliches Gutachten in Auftrag gegeben.

Nach der Erteilung der Genehmigung können auch die RC-Betone für Bauwerke der Infrastruktur, wie zum Beispiel Bahnsteige, zur Anwendung kommen. Ein entscheidender weiterer Schritt für den Klimaschutz und das nachhaltige Bauen.

Kapitel 8 Literatur

- [1] *Verein Deutscher Zementwerke*: Decarbonisation of cement and concrete – Reduction paths and change strategies. A CO₂-roadmap for the german cement industry, 2020, www.vdz-online.de/dekarbonisierung.
- [2] *Zunino, F.*: A two-fold strategy towards low-carbon concrete. *In*: RILEM Technical Letters 8 (2023), S. 45-58. <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2023.179>.
- [3] *Scrivener, K.L.; John, V.M.; Gartner, E.M.*: Eco-efficient cements: Potential economically viable solutions for a low-CO₂ cement-based materials industry, Paris Ausgabe 2017.
- [4] Juhart et al_Beton Kalender 2023_Ökologisierung von Normalbeton.
- [5] *Will Arnold; Paul Astle; Michal Piotr Drewniok et al.*: The efficient use of GGBS in reducing global emissions. Climate Group, MPA The Concrete Centre, UK Low Carbon Concrete Group Ausgabe September 2023.
- [6] *Schubert, M.; Mudersbach, W.; Ehrenberg, A. et al.*: Umweltentlastung durch Schonung von Primärressourcen und Vermeidung von Kohlendioxidemissionen bei der Rohstoffaufbereitung sowie Nutzung des Energieinhaltes von flüssiger Elektroofenschlacke bei gleichzeitiger Vermeidung der Deponierung von Reststoffen durch Umwandlung der schmelzflüssigen Elektroofenschlacke in ein Material mit Klinkereigenschaften – Abschlussbericht DBU Projekt 29689-21/2 Ausgabe März 2016.
- [7] *Concrete Sustainability Council*: Hintergrundbericht – CO₂-Modul Ausgabe Dezember 2021.
- [8] *Boesch, M.E.; Hellweg, S.*: Identifying improvement potentials in cement production with life cycle assessment. *In*: Environmental science & technology, Vol. 44 (2010), Iss. 23, pp. 9143-9149. <https://doi.org/10.1021/es100771k>.
- [9] Schweizer Studie Einsatz-von-Recyclingbeton-im-Hochbau.
- [10] *Dr. Harald Elsner*: Sand und Kies in Deutschland – Band I: Grundlagen, Hannover Ausgabe Dezember 2022.
- [11] *Dr. Matthias Frederichs*: Mineralische Bauabfälle Monitoring 2020 – Bericht zum Aufkommen und zum Verbleib mineralischer Bauabfälle im Jahr 2020. Kreislaufwirtschaft Bau, Berlin Ausgabe Januar 2023.
- [12] *Müller, A.*: Baustoffrecycling. *In*: Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft 63 (2011), 11-12, S. 224-230. <https://doi.org/10.1007/s00506-011-0343-1>.
- [13] *Mostert, C.; Weber, C.; Bringezu, S.*: Modelling and Simulation of Building Material Flows: Assessing the Potential for Concrete Recycling in the German Construction Sector. *In*: Recycling 7 (2022), Heft 2, S. 13. <https://doi.org/10.3390/recycling7020013>.
- [14] *Hu, M.; Kleijn, R.; Bozhilova-Kisheva, K.P. et al.*: An approach to LCSA: the case of concrete recycling. *In*: The International Journal of Life Cycle Assessment 18 (2013), Heft 9, S. 1793-1803. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0599-8>.
- [15] *Elsner, H.; Szurlies, M.*: Gravel - The most important local resource, 2020, https://www.bgr.bund.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Commodity_Top_News/Rohstoffwirtschaft/62_kies.pdf;jsessionid=76D7FAE4BB876227AD2BF87189DFD678.2_cid321?_blob=publicationFile&v=5 [Zugriff am: 13.06.2023].

- [16] *Gelardi, G.; Mantellato, S.; Marchon, D. et al.*: Chemistry of chemical admixtures. *In*: Science and Technology of Concrete Admixtures. Elsevier, 2016, S. 149-218.
- [17] Science and Technology of Concrete Admixtures. Elsevier, 2016.
- [18] *Scrivener, K.; Ben Haha, M.; Juilland, P. et al.*: Research needs for cementitious building materials with focus on Europe. *In*: RILEM Technical Letters 7 (2022). <https://doi.org/10.21809/rilemtechlett.2022.165>.
- [19] *Ben Haha, M.; Termkhajornkit, P.; Ouzia, A. et al.*: Low clinker systems - Towards a rational use of SCMs for optimal performance. *In*: Cement and Concrete Research 174 (2023), S. 107312. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107312>.
- [20] RILEM (Hrsg.): Influence of total and effective water-cement ratio on compressive strength of concretes made with fine recycled concrete aggregates, 2018.
- [21] DIN 1045-2 Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton. Ausgabe August 2023.
- [22] DIN EN 1097-6: Tests for mechanical and physical properties of aggregates. Ausgabe Mai 2022.
- [23] DAfStb-Guideline Concrete according to DIN EN 206-1 and DIN 1045-2 with recycled aggregates based on DIN EN 12620. Ausgabe September 2010.
- [24] *Duan, Z.; Zhao, W.; Ye, T. et al.*: Measurement of Water Absorption of Recycled Aggregate. *In*: Materials (Basel, Switzerland), Vol. 15 (2022), Iss. 15. <https://doi.org/10.3390/ma15155141>.
- [26] *Scheidt, J.*: Determination of the required total water for the production of recycled aggregate concrete with defined w/c ratio. Kaiserslautern, TU Kaiserslautern, Dissertation, 2019.
- [27] *Poon, C.S.; Shui, Z.H.; Lam, L. et al.*: Influence of moisture states of natural and recycled aggregates on the slump and compressive strength of concrete. *In*: Cement and Concrete Research 34 (2004), Heft 1, S. 31-36. [https://doi.org/10.1016/S0008-8846\(03\)00186-8](https://doi.org/10.1016/S0008-8846(03)00186-8).
- [28] *Sun, D.; Huang, W.; Liu, K. et al.*: Effect of the Moisture Content of Recycled Aggregate on the Mechanical Performance and Durability of Concrete. *In*: Materials (Basel, Switzerland), Vol. 15 (2022), Iss. 18. <https://doi.org/10.3390/ma15186299>.
- [29] *Montero, J.; Laserna, S.*: Influence of effective mixing water in recycled concrete. *In*: Construction and Building Materials 132 (2017), S. 343-352. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.12.006>.
- [30] *Ding, Y.; She, A.; Yao, W.*: Investigation of Water Absorption Behavior of Recycled Aggregates and its Effect on Concrete Strength. *In*: Materials (Basel, Switzerland), Vol. 16 (2023), Iss. 13. <https://doi.org/10.3390/ma16134505>.
- [31] *Khoury, E.; Cazacliu, B.; Remond, S.*: Water Migration During Mixing of Recycled Aggregate Concrete, Lissabon, Portugal Ausgabe Oktober 2018.
- [32] *Pico-Cortés, C.; Villagrán-Zaccardi, Y.*: Unraveling the Interplay of Physical-Chemical Factors Impacting the Carbonation Performance of Recycled Aggregate Concrete. *In*: Materials (Basel, Switzerland), Vol. 16 (2023), Iss. 16. <https://doi.org/10.3390/ma16165692>.
- [33] *Bisciotti, A.; Jiang, D.; Song, Y. et al.*: Estimating attached mortar paste on the surface of recycled aggregates based on deep learning and mineralogical models. *In*: Cleaner Materials 11 (2024), S. 100215. <https://doi.org/10.1016/j.clema.2023.100215>.

- [34] H.-M. Ludwig, „Neuartige Bindemittel - Die Zeit nach dem Portlandzement,“ in 14. Symposium Baustoffe und Bauwerkserhaltung - Betone der Zukunft, Karlsruhe, 2018
- [35] Prüfbericht der MPA Neuwied vom 07.08.2023, Prüfzeichen: 6-42/0813/23
- [36] Fang, Xuan, Shen, & Poon, Fast enhancement of recycled fine aggregates properties by wet carbonation, Journal of Cleaner Production 2021
- [37] Kaliyavaradhan & Ling, Potential of CO₂ sequestration through construction and demolition (C&D) waste, Journal of CO₂ Utilization 2017
- [38] Wolfgang Puntke: „Wasseranspruch von feinen Kornhaufwerken“ in Beton (2002), Nr. 5, S. 242-248
- [39] Okamura, H., Ozawa, K.: mix design for selfcompacting concrete, concrete library of JSCE N° 25, 1995, S. 107-120)