

Professur Werkstoffe des Bauens
Bauhaus-Universität Weimar

Weiterentwicklung der Karbonatisierung von rezyklierten Zuschlägen aus Altbeton (2. Phase: Prozessoptimierung im Labormaßstab und Technologieentwurf)

Abschlussbericht über ein Entwicklungsprojekt,
gefördert unter dem Az: 23689/02 von der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt

von

Dipl.-Ing. Marko Seidemann
Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller
Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig

Weimar, den 30. November 2015

Projektkennblatt
der
Deutschen Bundesstiftung Umwelt



AZ	23689/02	Referat	23	Fördersumme	190.000 €
----	-----------------	---------	-----------	-------------	------------------

Antragstitel Weiterentwicklung der Karbonatisierung von rezyklierten Zuschlägen aus Altbeton (2. Phase: Prozessoptimierung im Labormaßstab und Technologieentwurf)

Stichworte Abfall, Recycling

Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)
38 Monate	01.07.2012	31.08.2015	1

Zwischenberichte

Bewilligungsempfänger	Bauhaus-Universität Weimar Fakultät Bauingenieurwesen Professur Werkstoffe des Bauens Arbeitsgruppe Recycling Coudraystr. 7 99423 Weimar	Tel. 03643-584606 Fax 03643-584631
		Projektleitung Herr Prof. Dr.-Ing. Horst-Michael Ludwig
		Bearbeiter Dipl.-Ing. Marko Seidemann

Kooperationspartner	Hauptverwaltung der CEMEX Deutschland AG Theodorstraße 178 • 40472 Düsseldorf Herr Dr.-Ing. Michael Müller-Pfeiffer; CEMEX OstZement GmbH, Werk Rüdersdorf Tel.: 0211 / 4470 – 1122 Fax: 0211 / 4471 – 1940 Baustoff Aufbereitung Frankfurt (Oder) GmbH Eisenhüttenstädter Chaussee 35 • 15236 Frankfurt/Oder Herr Dipl.-Ing. (TU) Wolfgang Jacob Tel.: 0335 5004996 Fax: 0335 535228
----------------------------	---

Zielsetzung und Anlass des Vorhabens

Ziel des beantragten Forschungsprojektes ist es, die Karbonatisierung von rezyklierten Gesteinskörnungen aus Altbeton zu nutzen, um die Qualität dieser Gesteinskörnungen zu verbessern und gleichzeitig einen Beitrag zur CO₂-Minderung zu leisten. Als konkrete Zielparameter werden ein zu erreichender Karbonatisierungsgrad des Zementsteins von durchschnittlich 80 % und eine Restporosität der karbonatisierten Rezyklate von < 5 % definiert. Die Randbedingungen der Versuche sind so zu variieren, dass die optimalen Einstellungen für den Versuchsablauf gefunden und wissenschaftlich begründet werden können. Als Haupteinflussgrößen sind dabei die Proben- und Reaktionsgasfeuchte, die Partikelgröße und die Temperatur zu variieren. Der CO₂-Gehalt des Reaktionsgases soll auf Werte, die für Rauchgas aus Verbrennungsanlagen typisch sind, eingestellt werden.

Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden

Aufbauend auf den vorhandenen Ergebnissen sollen folgende Arbeitspakete bearbeitet werden:

Schwerpunkt A: Prozessoptimierung unter Verwendung definierter Zementsteine

Arbeitspaket 1: Untersuchungen zum Wasserhaushalt während der Karbonatisierung von Zementsteinen

Um den Einfluss der Probenfeuchte zu analysieren, wird diese vor der Reaktorbehandlung auf Werte zwischen „trocken“ und „wassergesättigt“ eingestellt. Der erreichbare Karbonatisierungsgrad wird gemessen. Als weiterer Parameter wird der Wasserdampfgehalt des Reaktionsgases variiert, indem dieses Gas über geeignete Salzlösungen geleitet wird.

Arbeitspaket 2: Untersuchungen zum Einfluss der Zementart auf die Karbonatisierung

Beton, der heute abgebrochen wird, wurde mit Zementen aus dem zum Zeitpunkt der Bauwerkserrichtung gültigen Sortiment - in der Hauptsache also mit Portlandzementen und Hochofenzementen - hergestellt. Die Untersuchungen zur Zementart beschränken sich auf diese beiden Arten. Die Karbonatisierungsgrade bei sonst gleichen Versuchsbedingungen sollen ermittelt werden.

Arbeitspaket 3: Untersuchungen zur Beschleunigung der Karbonatisierung durch erhöhte Temperaturen unter Verwendung definierter Zementsteine

Bei den meisten chemischen Reaktionen lässt sich durch eine Temperaturerhöhung eine Reaktionsbeschleunigung erreichen. Bei der Karbonatisierung kann diese Beschleunigung unter Umständen dadurch aufgehoben werden, dass die Löslichkeit von CO₂ im Wasser mit zunehmender Temperatur abnimmt. Welcher Einfluss überwiegt, soll experimentell überprüft werden. Dazu ist ein beheizbarer Rohrreaktor zu entwerfen und zu bauen und in den vorhandenen Versuchsstand einzupassen.

Arbeitspaket 4: Untersuchungen der Karbonatisierung an Fraktionen und Körnungsgemischen von Zementsteinen

Bei den bisher durchgeführten Versuchen an Zementsteinquadern 40x40x40 mm³ wurden die erwarteten Unterschiede im Karbonatisierungsgrad zwischen den äußeren Schichten und dem Inneren festgestellt. Bei den Untersuchungen mit verschiedenen Kornfraktionen war der Einfluss der Partikelgröße dagegen wenig ausgeprägt. Diese gegensätzlichen Befunde sollen an Kornfraktionen überprüft werden, wobei die Probenfeuchte als wichtige Randbedingung möglichst konstant gehalten werden muss.

Arbeitspaket 5: Zusammenfassung der Ergebnisse an Zementstein und Ableitung eines kinetischen Modells als Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Reaktors und die Bemessung.

Die Ergebnisse der Arbeitspakete 1 – 4 werden zusammengefasst und mit der formulierten Zielstellung, einen Karbonatisierungsgrad von durchschnittlich 80 % zu erreichen, verglichen. Es wird ein Modell für die Karbonatisierung von Zementstein abgeleitet, mit welchem die benötigte Verweilzeit in Abhängigkeit von den Bedingungen während der Karbonatisierung und den Merkmalen des Ausgangsmaterials bestimmt werden kann.

Schwerpunkt B: Übertragung der Ergebnisse auf Labor- und Praxisbetone

Arbeitspaket 6: Nachweis der Qualitätsverbesserungen an Rezyklaten aus Laborbetonen

Die Porosität des zu karbonatisierenden Ausgangsbetons wird den Ablauf der Karbonatisierung beeinflussen. Dichte Betone werden langsamer karbonatisieren als poröse, welche dem Eindringen des CO₂ wenig Widerstand entgegensetzen. Bei einheitlichen Karbonatisierungsbedingungen sollte deshalb der Karbonatisierungsgrad der porösen Betone höher als der der dichten Betone sein. Als Folge könnten die Rohdichten und Wasseraufnahmen der porösen Betone stärker verbessert werden als die der dichten Betone, so dass es insgesamt zu einer Vergleichmäßigung der bautechnischen Eigenschaften kommt.

Arbeitspaket 7: Herstellung größerer Mengen an karbonatisierten Rezyklaten aus Abbruchbetonen sowie ausführliche bautechnische Charakterisierung

Um den Nachweis der Qualitätsverbesserung zu führen, sind die bautechnischen Parameter wie Rohdichte, Porosität und Wasseraufnahme von ausgewählten Proben im Vergleich zum Ausgangsmaterial zu bestimmen. Eine größere Menge an karbonatisierten Rezyklaten ist herzustellen, um erweiterte Prüfungen, z.B. zur Kornfestigkeit, zur Abriebfestigkeit etc.

durchzuführen. Mit Hilfe einer Dichteanalyse, welche die Dichteverteilung einer Körnung in Abhängigkeit von der Partikelgröße angibt, soll ermittelt werden, ob die Partikelheterogenität vermindert werden kann.

Arbeitspaket 8: Mörtelherstellung aus den karbonatisierten Rezyklaten

Aus den karbonatisierten Rezyklaten sollen Mörtel hergestellt werden und deren Frisch- und Festmörteleigenschaften ermittelt werden. Zum Vergleich werden Mörtel, die aus nicht karbonatisierten, rezyklierten Gesteinskörnungen bzw. aus natürlichen Gesteinskörnungen hergestellt wurden, herangezogen.

Arbeitspaket 9: Zusammenfassung der Ergebnisse an Betonen, Überprüfung des kinetischen Modells und Technologieentwurf

Auf der Grundlage des anhand der Betonversuche validierten kinetischen Modells soll ein erster Technologieentwurf erarbeitet werden.

Arbeitspaket 10: Zusammenstellung eines Konsortiums für die halbtechnischen Versuche

Die Ergebnisse der Studie und der Technologieentwurf werden möglichen Projektpartnern für die Umsetzung vorgestellt.

Ergebnisse und Diskussion

- Entwicklung und Herstellung eines zweiten Reaktors
- Erweiterung und Betrieb der Versuchsanlage
- Ermittlung der optimalen Probenfeuchte
- Nachweis zum Einfluss der Zementart auf die gezielte Karbonatisierung
- experimentelle Bestimmung des Temperaturbereichs für den optimalen Ablauf der gezielten Karbonatisierung
- Nachweis zum Einfluss der Partikelgröße auf die gezielte Karbonatisierung
- Charakterisierung der Gesteinskörnung vor und nach der Behandlung
- dauerhafte Bindung von CO₂ in der rezyklierten Gesteinskörnung
- Steigerung der Betondruckfestigkeit bei karbonatisiert rezyklierter Gesteinskörnung aus Portlandzementbeton
- erfolgreich durchgeführte Praxisversuche mit einem realen Rauchgas

Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation

- Vortrag und Veröffentlichung im Tagungsband auf der Fachtagung 1. Wissenschaftskongress Abfall- Ressourcenwirtschaft in Staßfurt am 29. und 30. März 2011, ISBN 978-3-940364-16-6
- Vortrag und Veröffentlichung im Tagungsband auf der Fachtagung Aufbereitung und Recycling in Freiberg am 09. und 10. November 2011
- Vortrag auf dem 15. Seminar Beschichtungen und Bauchemie in Kassel am 29. und 30. November 2011
- Veröffentlichung in der Fachzeitschrift „Farbe und Lack“ 03/2012, 118. Jahrgang, ISSN 0014-7699, Seite 29-32, „Gezielte Karbonatisierung – Verbesserte Qualität von Betonrezyklaten durch Bindung von Kohlendioxid“
- Vortrag und Veröffentlichung im Tagungsband auf der 18. Internationalen Baustofftagung in Weimar (ibausil) am 12.-15. September 2012, ISBN 978-3-00-034075-8
- Vortrag und Veröffentlichung im Tagungsband auf dem 2. Darmstädter Ingenieurkongress – Bau und Umwelt in Darmstadt am 12.-13. März 2013, ISBN 978-3-8440-1747-2
- Vortrag und Veröffentlichung im Tagungsband auf der Fachtagung 12. Baustoffkolloquium in Berlin am 12.-13. März 2013
- Vortrag und Veröffentlichung im Tagungsband auf der internationalen Fachtagung International Solid Waste, Water and Wastewater Congress 2013 in Istanbul (Türkei) am 22.-24. Mai 2013, ISBN 978-605-6326-912
- Vortrag und Veröffentlichung im Tagungsband auf der Fachtagung Recycling R`13 in Weimar am 19. und 20. September 2013
- Vortrag und Veröffentlichung im Tagungsband auf der Berliner Konferenz Mineralische Nebenprodukte & Abfälle in Berlin am 04. und 05. Mai 2015, ISBN 978-3-944310-21-3

- Vortrag auf dem 7. Netzwerkforum „Praktische Ressourcenschonung – mit weniger mehr erreichen“ in Berlin am 19. Mai 2015
- Vortrag und Veröffentlichung im Tagungsband auf dem III. International Rilem Conference on Progress of Recycling in the built Environment 2015 in Sao Paulo (Brasilien) am 03.-05. August 2015
- Vortrag und Veröffentlichung im Tagungsband auf der 19. Internationalen Baustofftagung in Weimar (ibausil) am 16.-18. September 2015, ISBN 978-3-00-050225-5

Fazit

- Anhand der Versuchsergebnisse ist es möglich den Prozess der gezielten Karbonatisierung zu optimieren.
- Die wissenschaftlich begründeten Einstellungen bewirken eine Verringerung der Karbonatisierungszeit.
- Verbesserung der Betondruckfestigkeiten durch den Einsatz von karbonatisiert rezyklierter Gesteinskörnung aus Portlandzementbeton wurde nachgewiesen.
- Ein Technologieentwurf wurde erarbeitet in Abhängigkeit von der anfallenden Betonbruchmenge und dem anstehenden Rauchgasstrom.
- Weiterführende Ziele:
 - Umfangreiche Versuche mit einem realen Rauchgas
 - Optimierung des Versuchsablaufs im Praxismaßstab
 - Anlagenkonzept im Praxismaßstab erweitern
 - Aufbau und Betrieb einer Anlage beim Rauchgaserzeuger
 - Labortechnische Versuche mit Körnungsgemischen 0 bis 2 mm durchführen
 - Betonversuche mit karbonatisierter RC-Sandkörnung

Deutsche Bundesstiftung Umwelt ● An der Bornau 2 ● 49090 Osnabrück ● Tel 0541/9633-0 ● Fax 0541/9633-190 ●

<http://www.dbu.de>

Inhaltsverzeichnis

Projektkennblatt	2
Inhaltsverzeichnis	6
Verzeichnis von Bildern und Tabellen	8
Verzeichnis von Begriffen und Definitionen	10
1 Zusammenfassung	12
2 Einleitung	14
3 Schwerpunkt A: Prozessoptimierung unter Verwendung definierter Zementsteine	17
3.1 Untersuchungen zum Wasserhaushalt während der Karbonatisierung ..	17
3.1.1 Ermittlung der optimalen Probenfeuchte	18
3.1.2 Ermittlung der Karbonatisierungsgrade bei optimaler Probenfeuchte	20
3.2 Untersuchungen zum Einfluss der Zementart auf die Karbonatisierung	21
3.3 Untersuchungen zur Beschleunigung der Karbonatisierung durch erhöhte Temperaturen	22
3.3.1 Erweiterung der Versuchsanlage	23
3.3.2 Gezielte Karbonatisierung bei verschiedenen Temperaturen	24
3.4 Untersuchungen der Karbonatisierung an Fraktionen und Körnungsgemischen	28
3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse an Zementstein und Ableitung eines kinetischen Modells als Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Reaktors und die Bemessung	29
4 Schwerpunkt B: Übertagung der Ergebnisse auf Labor- und Praxisbetone	32
4.1 Nachweis der Qualitätsverbesserungen an Rezyklaten aus Laborbetonen.....	34
4.1.1 Charakterisierung der Gesteinskörnung.....	34
4.2 Herstellung größerer Mengen an karbonatisierten Rezyklaten aus Labor- und Abbruchbetonen	42
4.3 Betonherstellung aus den karbonatisierten Rezyklaten	43
4.3.1 Frischbetonuntersuchungen.....	44
4.3.2 Festbetonuntersuchungen	47
4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse an Betonen, Überprüfung des kinetischen Modells und Technologieentwurf.....	49

4.5	Ergebnisse möglichen Projektpartnern für die Umsetzung vorstellen	52
5	Fazit.....	54
6	Literatur	56
	Anhang A (Versuchsergebnisse).....	58

Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Bild 1: Durchführungsschema für die Untersuchung zum Wasserhaushalt.....	19
Bild 2: Relative Massezunahme in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Probe	20
Bild 3: Karbonatisierungsgrad in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Probe ..	21
Bild 4: Erweiterte Versuchsapparatur.....	24
Bild 5: Löslichkeit von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in H_2O und Diffusionskoeffizient von CO_2	24
Bild 6: Durchführungsschema für die Untersuchung zur Beschleunigung der Karbonatisierung durch erhöhte Temperaturen	25
Bild 7: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von der Temperatur (CEM I, 2/4)	26
Bild 8: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von der Temperatur (CEM III, 2/4)	26
Bild 9: Thermische Analyse von ZS-2/4 (CEM I) bei 6h und 20 % CO_2	27
Bild 10: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von der Temperatur (CEM I, 2/4 und 4/8)	28
Bild 11: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von der Temperatur (CEM III, 2/4 und 4/8)	29
Bild 12: Differentiales Porenvolumen von sekundärer und karbonatisierter sekundärer Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,50)	37
Bild 13: Differentiales Porenvolumen von sekundärer und karbonatisierter sekundärer Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,60)	37
Bild 14: Thermische Analyse von sekundärer und karbonatisierter sekundärer Gesteinskörnung (TG-Thermogravimetrische Kurve, DTG-Differenz-Thermo-gravimetrische Kurve) (w/z-Wert = 0,50)	38
Bild 15: Thermische Analyse von sekundärer und karbonatisierter sekundärer Gesteinskörnung (TG-Thermogravimetrische Kurve, DTG-Differenz-Thermo-gravimetrische Kurve) (w/z-Wert = 0,60)	39
Bild 16: Rasterelektronenmikroskopie der n.c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,50), (5000-fach)	42
Bild 17: Rasterelektronenmikroskopie der c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,50), (5000-fach)	42
Bild 18: Dichteverteilung über die Korngrößen 2/4, 4/8 und 8/16	42
Bild 19: Ausbreitmaß der Betone (CEM I 42,5 R).....	45
Bild 20: Ausbreitmaß der Betone (CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA)	46
Bild 21: Vergleich der Druckfestigkeiten (CEM I 42,5 R).....	47
Bild 22: Vergleich der Druckfestigkeiten (CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA)	48
Bild 23: Verfahrensablauf der gezielten Karbonatisierung	49
Bild 24: Festbettreaktor in Silobauweise	52
Bild 25: Festbettreaktor im Praxisversuch.....	53

Tabelle 1: Veränderung der Dichte und der Porosität durch die Karbonatisierung	22
Tabelle 2: Klassifizierung der Gesteinskörnung anhand der Rohdichte [15]	32
Tabelle 3: Klassifizierung der Gesteinskörnung anhand der Korngröße [15]	32
Tabelle 4: Stoffliche Zusammensetzung der Liefertypen [17]	33
Tabelle 5: Kornrohichte und Wasseraufnahme [17]	33
Tabelle 6: zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnung > 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (Vol.-%) [16]	34
Tabelle 7: Rohdichten, Reindichten und Porositäten	35
Tabelle 8: Wasseraufnahme und Massezunahme	36
Tabelle 9: Porosität vor und nach der Karbonatisierung in Abhängigkeit vom w/z-Wert	36
Tabelle 10: Calciumhydroxid- und Calciumcarbonatgehalte	40
Tabelle 11: Mineralphasen der n.c. und der c. Gesteinskörnung	41
Tabelle 12: Bezeichnung und Bedeutung der Betone	44
Tabelle 15: CO ₂ -Gehalt nach der Karbonatisierung (CEM I).....	50
Tabelle 16: CO ₂ -Gehalt nach der Karbonatisierung (CEM III).....	51

Verzeichnis von Begriffen und Definitionen

Formeln der Chemie/Zementchemie

C_3S	-	Tricalciumsilicat
C_2S	-	Dicalciumsilicat
C_3A	-	Tricalciumaluminat
C_4AF	-	Tetracalciumaluminatferrit
$Ca(OH)_2$	-	Calciumhydroxid
CaO	-	Calciumoxid
$CaCO_3$	-	Calciumcarbonat
CO_2	-	Kohlenstoffdioxid
H_2CO_3	-	Kohlensäure
SiO_2	-	Siliziumdioxid
SO_3	-	Schwefeltrioxid
MgO	-	Magnesiumoxid
Na_2O	-	Dinatriumoxid
K_2O	-	Dikaliumoxid

Analysemethoden

DTA	-	Differenzthermoanalyse
TG	-	Thermogravimetrie
BET	-	spezifische Oberfläche nach Brunauer, Emmett und Teller
MIP	-	Quecksilberdruckporosimetrie

Symbole

A	-	Austauschfläche
BT	-	Bewitterungstemperatur
BZ	-	Bewitterungszeit
c.	-	karbonatisiert
D	-	Diffusionskonstante
vD	-	Diffusionsgeschwindigkeit
GV	-	Glühverlust
GK	-	Gesteinskörnung
dc/dx	-	Konzentrationsgradient
KG	-	Korngröße
m_{400}	-	Masse der Probe in mg bei 400 °C
m_{500}	-	Masse der Probe in mg bei 500 °C
m_{550}	-	Masse der Probe in mg bei 550 °C
m_{750}	-	Masse der Probe in mg bei 750 °C
MZ	-	Massezunahme
n.c.	-	nicht karbonatisiert
PZ	-	Portlandzement
TM	-	Trockenmasse

WA	-	Wasseraufnahme
WG	-	Wassergehalt
w/z	-	Wasserzementwert
ZS	-	Zementstein

1 Zusammenfassung

Aufbauend auf die vorangegangene Forschungsarbeit, bei der die gezielte Karbonatisierung von rezyklierten Gesteinskörnungen zum ersten Mal untersucht wurde, zielen die weiterführenden Untersuchungen speziell auf die technischen Randbedingungen ab. Diese wurden dabei in verschiedene Richtungen variiert, so dass die optimalen Einstellungen für den Versuchsablauf gefunden und wissenschaftlich begründet werden konnten.

Anders als bei der 1. Projektbearbeitung sollte die Reduzierung des anthropogenen Treibhauseffekts dadurch erfolgen, dass die Abnahme der CO₂-Konzentration direkt beim Erzeuger erfolgt. Dadurch wird der natürliche CO₂-Kreislauf nicht bzw. nur teilweise mit einem anthropogen erzeugten CO₂ belastet. Die Vorgehensweise der Reduzierung von CO₂ im Rauchgas könnte dem Klimawandel entgegenwirken. Der Einsatz von karbonatisierter rezyklierter Gesteinskörnung würde zu dem die Ressourcen schonen.

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit befasste sich im ersten Teil mit der Prozessoptimierung der gezielten Karbonatisierung. Dabei lag der Fokus auf dem Einfluss der Probenfeuchte, der Zementart, der Umgebungstemperatur und der Partikelgröße der Körnungsgemische. Für die Untersuchungen wurde die vorhandene Versuchsanlage genutzt und um einen zweiten Reaktor erweitert, damit der Einfluss der Temperatur mit untersucht werden konnte. Nach Abschluss der verschiedenen Versuchsreihen konnten die optimalen Versuchsbedingungen wissenschaftlich begründet werden. Die optimalen Einstellungen bewirkten eine Verringerung der Karbonatisierungszeit und eine gleichzeitige Erhöhung des Karbonatisierungsgrades.

Der zweite Teil dieser Arbeit beschäftigte sich mit der Übertragung der Ergebnisse auf Labor- und Praxisbetone. Hier kam es zur Karbonatisierung von größeren Mengen von rezyklierten Gesteinskörnungen. Mit diesem Material wurden im Anschluss umfangreiche Betonversuche durchgeführt. Bei allen karbonatisierten Gesteinskörnungen konnte die gezielte Karbonatisierung nachgewiesen werden. Durch den Einsatz von karbonatisierter rezyklierter Gesteinskörnung aus Portlandzementbeton konnten primärstoffvergleichbare Betondruckfestigkeiten erreicht werden. Im Anschluss an diese Versuche wurde ein Technologieentwurf erarbeitet und erste Versuche unter realen Bedingungen durchgeführt.

Auf der Grundlage der gewonnenen Ergebnisse und der ersten praktischen Versuche, sollte in einer weiterführenden Projektbearbeitung die praktische Umsetzung vorangetrieben werden. Hierfür muss anhand der praktischen Randbedingungen ein angepasstes Versuchsprogramm beim Rauchgasproduzent durchgeführt werden. Für diese Versuchsreihen ist es erforderlich, eine Karbonatisierungsstrecke von mehreren Reaktoren aufzubauen, damit größere Mengen Rezyklat karbonatisiert werden können. Durch diese Versuchsanordnung ist es auch erst möglich, aus der anstehenden Rauchgasmenge CO₂ effektiv zu eliminieren.

Parallel zu der praktischen Weiterführung dieser Forschungsarbeit, sollten mit der Sandfraktion, welche bei der Aufbereitung entsteht, Karbonatisierungsversuche durchgeführt werden. Die Versuche beginnen wie in den ersten beiden Projektphasen mit reinem Zementstein der Korngröße 0 bis 2 mm und werden dann auf Modell- und Praxisbetone ausgeweitet. Im Anschluss an die Karbonatisierungsversuche werden mit der karbonatisierten Sandfraktion umfangreiche Mörtel- bzw. Betonversuche durchgeführt. In einem weiteren Schritt erfolgt die Karbonatisierung mit einem realen Rauchgas. Hier ist es zu prüfen, ob der Einsatz eines Wirbelschichtreaktors die gezielte Karbonatisierung positiv beeinflusst.

Die Autoren danken der Deutschen Bundesstiftung Umwelt (DBU) für die Unterstützung im Rahmen des Forschungsprojektes (AZ: 23689/02).

2 Einleitung

Durch die stetig steigende Produktion in den hochindustrialisierten Gesellschaften, kommt es zwangsläufig gleichzeitig zu einem schnelleren Konsumverhalten [1]. Hierbei spielen die Schwellen- und Entwicklungsländer in naher Zukunft eine entscheidende Rolle, da es hier zu einem stetigen Anstieg des Energiebedarfes kommt, durch die Industrialisierung und die Steigerung der Lebensbedürfnisse [2]. Dies wiederum führt zu einem rasanten Ausstoß von Kohlenstoffdioxid in unsere Atmosphäre. Der damit verbundene anthropogene Treibhauseffekt, führt gleichzeitig zu einer Gefährdung der Permafrostböden, wo ungefähr 950 Milliarden Tonnen Kohlenstoff durch den anhaltenden Dauerfrost gebunden sind. Sollte der prognostizierte Erwärmungstrend anhalten, kann die Schmelze des Permafrosts den Kohlenstoff in Form von Kohlendioxid freigeben und so den momentan anhaltenden anthropogenen Treibhauseffekt um ein vielfaches erhöhen. Neben den großen Kohlenstofflagerstätten in den Dauerfrostgebieten befinden sich mehrere Milliarden Tonnen Methan in den Permafrostböden. Sobald die Freisetzung dieser gewaltigen Methanmengen beginnt, könnte sich die Erwärmung unserer Atmosphäre um ein vielfaches erhöhen, da Methan die 25-fache Heizkraft von Kohlenstoffdioxid entwickelt. Die dauerhafte Bindung von Kohlenstoffdioxid und die Herabsetzung der Kohlenstoffdioxidemissionen ist die einzige Möglichkeit, die anthropogene Erderwärmung zu bremsen und den Prozess des Tauens der Permafrostböden aufzuhalten [3].

Weltweit ist die Bauwirtschaft eine der ressourcenintensivsten Sparten. Gleichzeitig kommt es in diesem Sektor, durch den stetig wachsenden Bauwerksbestand, zu einem enormen Anstieg des anthropogenen mineralischen Lagers. Seit Beginn der Industrialisierung ist die Nutzung von mineralischen Rohstoffen kontinuierlich angestiegen. Die statistischen Auswertungen prognostizieren für das Jahr 2030 einen Verbrauch von 100 Mrd. t an mineralischen Rohstoffen [4]. Beton spielt hierbei eine entscheidende Rolle, da er der meistverwendete Baustoff unserer Zeit ist und in naher Zukunft bleiben wird. Dies zeigt auch der gegenwärtige Anteil an Beton in der Bauwirtschaft, der in Wohngebäuden bei ca. 50 Prozent und bei gewerblichen Hochbauten bei ca. 90 Prozent liegt [5]. Weltweit werden jährlich mehr als 10 Milliarden t Beton hergestellt, davon ca. 200 bis 250 Mio. t in Deutschland. Gleichzeitig entstehen große Mengen von Betonbruch, die wiederum einen nicht unerheblichen Materialstrom darstellen. Angesichts dieses fortschreitenden Rohstoffbedarfs und der steigenden Betonbruchmenge, ist den Grundsätzen der Nachhaltigkeit Rechnung zu tragen, mit dem Ziel eine „Echte Kreislaufwirtschaft“ zu etablieren [6]. Die Prognose für Deutschland geht davon aus, dass bis 2020 jährlich ca. 100 Mio. t Betonbruch entstehen kann [7], [8].

Nach dem neuen Kreislaufwirtschaftsgesetz werden Anforderungen an die Hochwertigkeit der Verwertung gestellt. Das Ziel besteht darin, dass es zu keiner fortschreitenden Verschlechterung bei der stofflichen Verwertung kommt. Das bedeutet, dass die sekundären Materialien in ihrem ursprünglichen primären Einsatzgebiet wieder verwendet werden sollten [9]. Eine zentrale Herausforderung der Kreislaufwirtschaft ist es somit, auf höchstem Niveau zu recyceln

und dadurch eine ressourceneffiziente Rückgewinnung zu gewährleisten. Dadurch kommt es zu einer Stärkung der Wirtschaft, durch die Schaffung von zusätzlichen Rohstofflieferanten. Derzeitig werden in der deutschen Wirtschaft 14 Prozent der Rohstoffe aus Sekundärmaterial gewonnen. Damit kann sich ein Wirtschaftswachstum einstellen, welches nicht mehr vorrangig von der Ressourcennutzung abhängig ist [10], [11].

In der Neufassung der Bundes-Bodenschutz- und Altlastenverordnung (BBodSchV) wird eine Zielstellung im Sinne des Kreislaufwirtschaftsgesetzes festgelegt, die die Anforderungen an Materialien und deren Verwendung beschreibt. Hierbei ist ein ausreichender Schutz des Bodens vor schädlichen Modifikationen zu gewährleisten. Diese Argumentation wirft gewisse Fragestellungen auf, ob der bisherige Verwertungsweg von mineralischen Abfällen weiterhin durch Verfüllung bestritten werden darf. Durch die Überarbeitung der Ersatzbaustoffverordnung und der BBodSchV wird es zu einer Veränderung der Verwertungswege für mineralische Abfälle kommen. Die anfallenden mineralischen Abfälle stehen somit nicht mehr für die Verfüllung zur Verfügung und müssten stattdessen deponiert werden. Diese Veränderungen hätten einen negativen Einfluss auf die derzeit relativ hohe Verwertungsquote. Der dadurch bedingte Rückgang der Verwertungsquote kann nur mit neuen und hochwertigen Verwertungswegen kompensiert werden. Durch das Gebot der Ressourcenschonung muss es zu einem vermehrten Einsatz von hochwertig aufbereiteten mineralischen Abfällen in der Bauwirtschaft kommen.

Das Ziel der Forschungsarbeit ist es, die gezielte Karbonatisierung von rezyklierten Gesteinskörnungen zu nutzen, um die Qualität dieser Rezyklate zu verbessern und gleichzeitig einen Beitrag zur CO₂-Minderung zu leisten. Dabei sind die Randbedingungen der Versuche so zu variieren, dass die optimalen Einstellungen für den Versuchsablauf gefunden und wissenschaftlich begründet werden können. Als Haupteinflussgrößen sind dabei die Probenfeuchte, die Partikelgröße und die Temperatur zu variieren. Der CO₂-Gehalt des Reaktionsgases soll auf Werte, die für Rauchgas aus Verbrennungsanlagen typisch sind, eingestellt werden.

Für die Karbonatisierungsversuche bei erhöhten Temperaturen ist es erforderlich, dass die vorhandene Versuchsanlage um einen weiteren Reaktor erweitert und umgebaut wird, damit die Temperatur in den Versuchen variiert werden kann. Am Ende der labortechnischen Auswertung sollten die Grundlagen für den Entwurf und die Bemessung einer Anlage, die mit technischem Rauchgas betrieben werden kann, vorliegen. Parallel sind ausreichende Mengen an karbonatisierten Körnungen herzustellen, um Betonversuche durchführen zu können.

Aufbauend auf den vorhandenen Ergebnissen aus der Projektphase 1 soll in der zweiten Projektphase das Augenmerk auf die Prozessoptimierung und die Übertragung der Ergebnisse auf Labor- und Praxisbetone gelegt werden.

Der chemische Vorgang der Karbonatisierung ist stark von der Probenfeuchte abhängig. Deshalb ist es erforderlich den Einfluss der Probenfeuchte zu analysieren. Dazu wird diese vor der Reaktorbehandlung auf Werte zwischen „trocken“ und „wassergesättigt“ eingestellt. Der erreichbare Karbonatisierungsgrad wird bestimmt. Weiterhin werden Untersuchungen zum Einfluss der Zementart,

der Probengröße und der Bedeutung der Temperatur auf die Karbonatisierung durchgeführt. Damit der Stellenwert der Temperatur wissenschaftlich begründet werden kann, ist es erforderlich, die Versuchsanlage um einen weiteren Reaktor zu erweitern.

Im zweiten Teil der Projektbearbeitung ist es notwendig größere Mengen an karbonatisierten Rezyklaten herzustellen, damit umfangreiche Betonversuche durchgeführt werden können und im Vorfeld eine Charakterisierung der Rezyklate erfolgen kann. Bei der Ermittlung der vielfältigen Parameter werden zunächst zwei Referenzbetone als Drei-Stoff-Systeme konzipiert. Diese unterscheiden sich hinsichtlich der verwendeten Zementart, wobei ein Portlandzement und ein Hochofenzement bezüglich der späteren Karbonatisierung der Rezyklate verglichen werden sollen. Die Referenzbetone werden in ausreichendem Umfang hergestellt, sodass die Gewinnung von rezyklierten Gesteinskörnungen gewährleistet ist. Davon wird die Hälfte gezielt in einem Rohrreaktor mit Kohlenstoffdioxid bewittert. Damit soll erreicht werden, dass eine dauerhafte Bindung von CO_2 im Zementstein durch die Umwandlung von Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat realisiert wird. Anschließend wird rezyklierte oder karbonatisiert rezyklierte Gesteinskörnung bei der Betonherstellung eingesetzt. Auf der Grundlage des anhand der Betonversuche validierten kinetischen Modells soll ein erster Technologieentwurf erarbeitet werden. Die Ergebnisse der Studie und der Technologieentwurf werden möglichen Projektpartnern für eine Umsetzung vorgestellt, damit die Übertragung der Ergebnisse auf den halbtechnischen Maßstab erfolgen kann.

3 Schwerpunkt A: Prozessoptimierung unter Verwendung definierter Zementsteine

3.1 Untersuchungen zum Wasserhaushalt während der Karbonatisierung

Die Karbonatisierung der Zementsteinmatrix wird durch verschiedene Faktoren beeinflusst. Dabei nimmt die Feuchtigkeit eine entscheidende Rolle ein, da die chemischen Umwandlungsprozesse während der Karbonatisierung nur unter Teilnahme von Wasser ablaufen.

Bei der natürlichen Karbonatisierung von Beton unter atmosphärischen Bedingungen kommt es durch die Permeation zu einem konstanten Eindringen von Wasserdampf und Kohlenstoffdioxid in die Betonmatrix. Durch den Konzentrationsunterschied zwischen Atmosphäre und Porenraum verläuft der Prozess der Permeation kontinuierlich, um so per Diffusion Feuchte in Form von Wasserdampf in den Porenraum zu transportieren.

Der Karbonatisierungsvorgang unterteilt sich in 3 Hauptphasen. In der ersten Phase kommt es zur Diffusion von Kohlenstoffdioxid in die Kapillarporen der Zementsteinmatrix. Parallel zu diesem Vorgang geht Ca(OH)_2 im Porenwasser in Lösung. Die zweite Phase beschreibt den Lösungsvorgang von CO_2 im Wasserfilm. Die eigentlichen Karbonatisierungsreaktionen laufen dann in der dritten Phase ab, wo es z. B. zur Neutralisation von Ca(OH)_2 durch H_2CO_3 kommt. Als Reaktionsprodukte entstehen Calciumcarbonat und Wasser.

Die Untersuchungen zum Wasserhaushalt während der Karbonatisierung sind dahingehend von entscheidender Bedeutung, da die erste Karbonatisierungsphase durch die Anwesenheit von Wasser behindert werden kann. In den darauffolgenden Phasen ist es jedoch erforderlich, dass ausreichend Wasser vorhanden ist.

Durch die Neutralisation der Dissoziationsprodukte von Ca(OH)_2 kommt es zu einem stetigen Lösungsvorgang von Ca(OH)_2 im Porenwasser. Das wiederum bedeutet, dass die Karbonatisierungsphasen nach Beginn der Diffusionsvorgänge parallel ablaufen. Diese überlagerten Prozesse machen es erforderlich, den Wassergehalt der Zementsteinmatrix so einzustellen, dass zum einen die Diffusion von CO_2 nicht behindert wird und zum anderen genügend Wasser für die gesamte Karbonatisierungszeit zur Verfügung steht.

Durch den physikalischen Prozess der Diffusion bewegt sich Wasserdampf aus Bereichen mit hoher Luftfeuchtigkeit in Bereiche mit niedriger Luftfeuchtigkeit. Während der gezielten Karbonatisierung besteht die Herausforderung darin, diesen Diffusionsvorgang an die Karbonatisierungsdauer anzupassen. Durch das Diffusionsgesetz können verschiedene Aussagen zur Erhöhung der Diffusionsgeschwindigkeit getroffen werden. Dabei ist vD die Diffusionsgeschwindigkeit, D die Diffusionskonstante, A die Austauschfläche und dc/dx der Konzentrationsgradient. Die Diffusionsgeschwindigkeit kann durch folgende Formel errechnet werden:

$$vD = -D \cdot A \cdot dc/dx \quad (3.1)$$

Anhand der Formel 3.1 ist ersichtlich, dass die Diffusionsgeschwindigkeit durch die Erhöhung der Austauschfläche A und / oder des Konzentrationsgradienten dc/dx gesteigert werden kann.

3.1.1 Ermittlung der optimalen Probenfeuchte

Die gezielte Karbonatisierung verfolgt die Absicht, die Karbonatisierungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von der Zeit zu steigern. Dabei ist ein notwendiger Reaktionspartner die Feuchtigkeit in dem Kapillarporensystem. Da die Diffusion von CO_2 im Gasraum etwa 10000 mal schneller verläuft als die Diffusion in Wasser [12], ist es erforderlich die optimale Probenfeuchte experimentell zu bestimmen, bei der die Diffusion von CO_2 in das Porensystem nicht behindert wird. Für diese Untersuchungen wurden definierte Zementsteine hergestellt und nach einer Hydratationsdauer von 28 Tagen entsprechend aufbereitet. Vor und nach der gezielten Karbonatisierung wurde das Probematerial im Trockenschrank bei $105\text{ }^\circ\text{C}$ bis zur Massekonstanz getrocknet, damit eine Aussage über die karbonatisierungsbedingte Massenveränderung getroffen werden konnte.

In der ersten Projektphase wurde im Karbonatisierungsreaktor mit Hilfe einer Salzlösung eine definierte relative Luftfeuchtigkeit eingestellt, damit es zu einem Austausch der Feuchtigkeit zwischen Reaktoratmosphäre und Porenraum im Probenmaterial kommen konnte. Diese Vorgehensweise erwies sich nach mehreren Versuchen nicht als zielführend, da die Diffusionsgeschwindigkeit im Reaktor nicht an die Karbonatisierungszeit angepasst werden konnte. Über eine ausreichende Vorlagerung des Probenmaterials in einer definierten relativen Luftfeuchtigkeit konnte dem entgegengewirkt werden. Damit jedoch diese Vorbehandlung des Probenmaterials auf ein Minimum begrenzt werden konnte, wurde in den darauffolgenden Versuchen auf eine Wasseraufnahme durch Diffusion verzichtet. Die rezyklierte Körnung wurde vor der gezielten Karbonatisierung mit einer definierten Wassermenge in Kontakt gebracht, um so den Wassergehalt der Probe einstellen zu können.

Die entsprechenden Aufbereitungsschritte zeigt die schematische Darstellung in Bild 1. Wie aus dem Schema zu entnehmen ist, wurde der Wassergehalt der Probe variiert, um den Einfluss der Feuchtigkeit auf die Karbonatisierung sichtbar zu machen. Dabei wurden Wassergehalte von 0 bis ca. 26 M.-% im Probenmaterial eingestellt. In der **Ermittlung der optimalen Probenfeuchte**

Tabelle A 1, Tabelle A 2, Tabelle A 3 und Tabelle A 4 im Anhang sind alle Ergebnisse dieser Versuchsreihe zusammengestellt. In 81 Einzelproben wurden verschiedene Wassergehalte kalibriert, um den optimalen Wassergehalt für die gezielte Karbonatisierung experimentell bestimmen zu können. In Bild 2 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt. Dabei wurde nur der Wassergehalt des Probenmaterials variiert. Die CO_2 Konzentration und die Bewitterungsdauer sind bei dieser Versuchsreihe nicht verändert wurden. Die Ergebnisse sollten Aufschluss über die relative Massezunahme, die durch die Karbonatisierung verursacht wird, in Abhängigkeit von der Probenfeuchte geben.

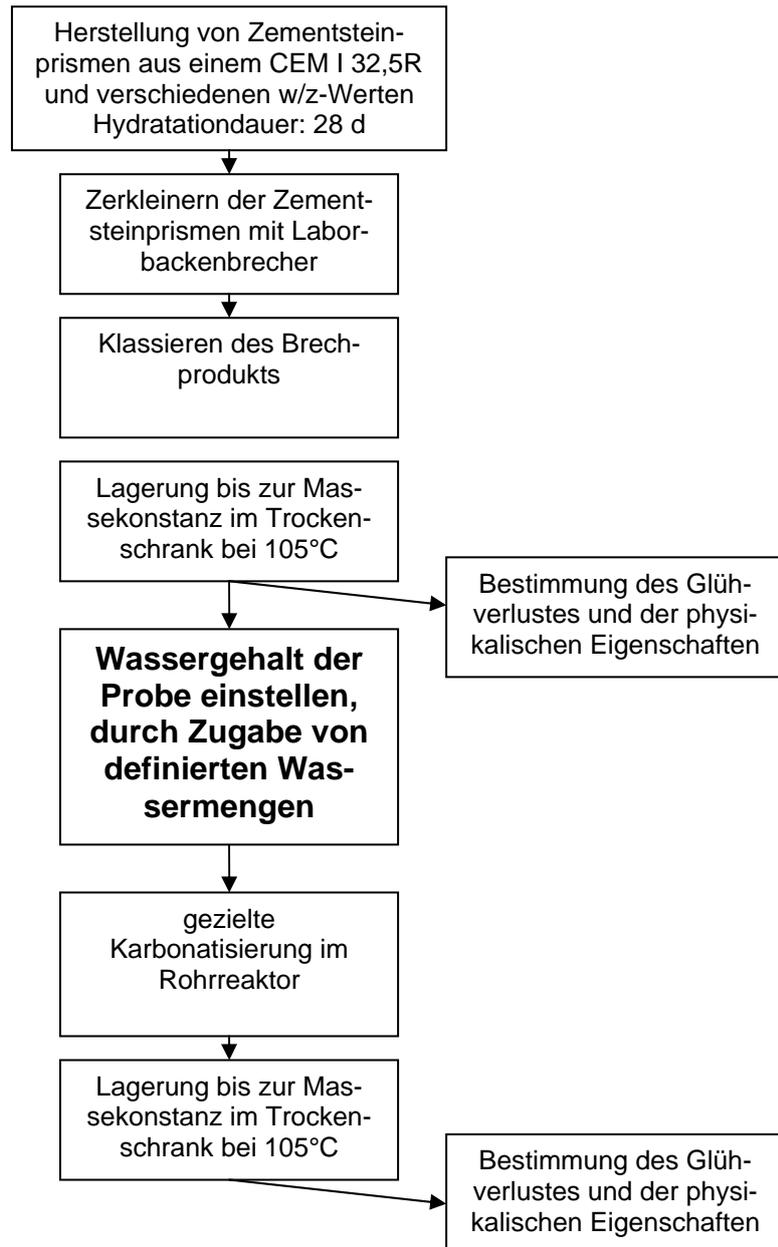


Bild 1: Durchführungsschema für die Untersuchung zum Wasserhaushalt

Die erste Versuchsreihe beinhaltete 21 Einzelversuche mit insgesamt 81 Proben. Es wurde darauf geachtet, dass die Versuchsbedingungen bei allen Versuchen identisch sind. Im Anschluss an die Versuche wurden die physikalischen Eigenschaften bestimmt.

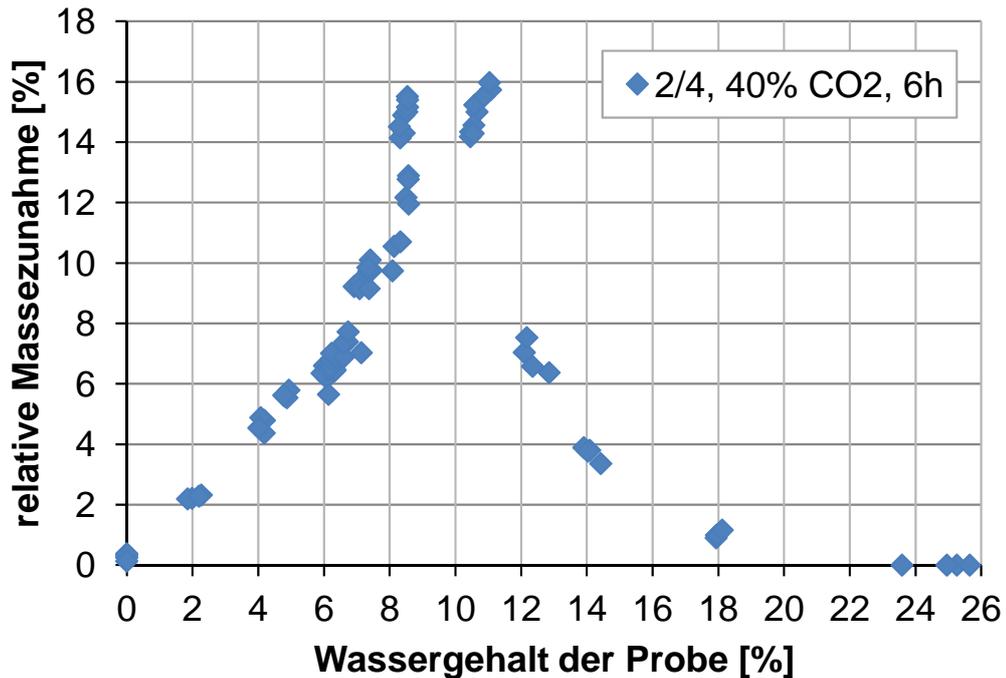


Bild 2: Relative Massezunahme in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Probe

Die Resultate der Versuche mit rezykliertem Zementstein der Korngröße 2/4 sind in Bild 2 und im Anhang A zu sehen.

Die Versuchsreihe startete mit einem Wassergehalt von 0 % und wurde schrittweise um ca. 2 % erhöht. Hierbei ist zu erkennen, dass bei einer trockenen Probe keine Karbonatisierungsreaktionen ablaufen und es dadurch auch zu keiner Massezunahme kommt. Mit der Erhöhung des Wassergehaltes kommt es zu einem linearen Anstieg der Massezunahme. Dieser Verlauf setzt sich bis zu einem Wassergehalt von ca. 7 % fort. Danach kommt es zu einem exponentiellen Anstieg, der bei ca. 10 % Wassergehalt endet. Werden die Wassergehalte weiter erhöht, fällt die Massezunahme exponentiell ab. Ab einem Wassergehalt von größer 20 % kommt es zu einem vollständigen Erliegen der Karbonatisierungsreaktionen.

Der Wassergehalt im Probenmaterial wurde zwischen den Werten „trocken“ und „wassergesättigt“ eingestellt. Dabei konnte gezeigt werden, dass bei trockenen und wassergesättigten Proben keine Massezunahme während der Behandlung erfolgt. Somit kann die Karbonatisierung bei diesen Wassergehalten vernachlässigt werden. Die Versuche gaben Aufschluss darüber, dass die Diffusion von CO₂ und der damit verbundene chemische Vorgang der Karbonatisierung bei Wassergehalten von ca. 9 bis 11 % am effektivsten verlaufen.

3.1.2 Ermittlung der Karbonatisierungsgrade bei optimaler Probenfeuchte

Durch die vorangegangenen experimentellen Versuche zur Bestimmung der optimalen Probenfeuchte, konnten Wassergehalte von ca. 9 bis 11 % als ideal bestimmt werden. Mit diesen gewonnenen Randbedingungen wurden die ent-

sprechenden Karbonatisierungsgrade errechnet. Die Ergebnisse sind im Anhang A tabellarisch aufgelistet.

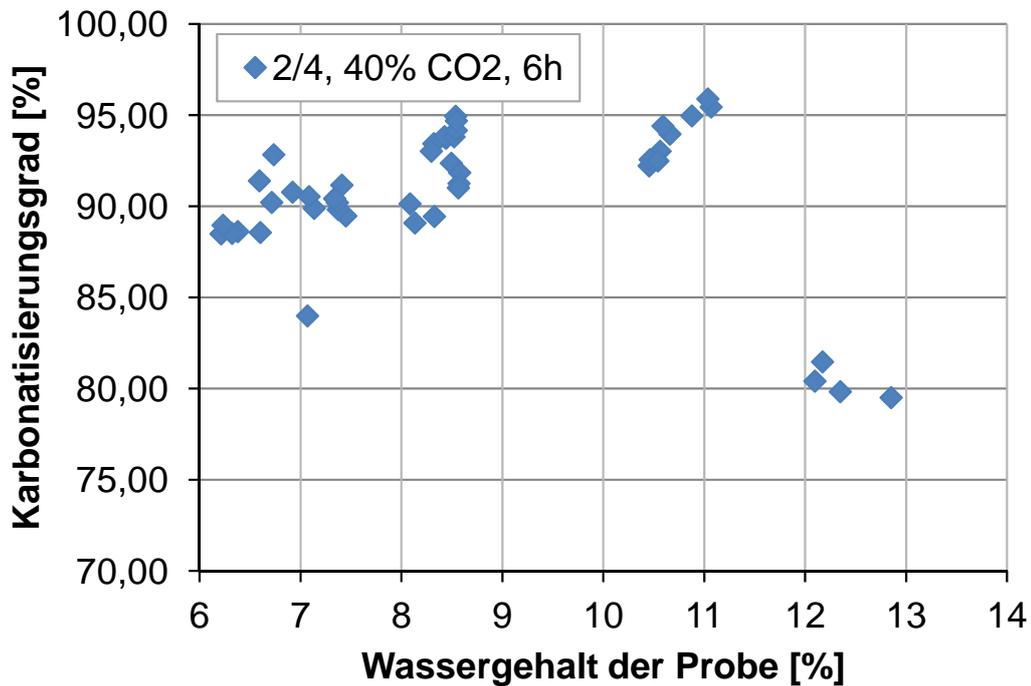


Bild 3: Karbonatisierungsgrad in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Probe

In der Grafik (Bild 3) ist der Karbonatisierungsgrad in Abhängigkeit vom Wassergehalt der Probe abgebildet. Hierbei erfolgte die Berechnung für die optimalen Wassergehalte und die unmittelbar angrenzenden Bereiche. Wie in den Grafiken (Bild 2 und Bild 3) eindeutig zu sehen ist, korreliert die Massezunahme mit dem Karbonatisierungsgrad. Bei einer maximalen Massezunahme stellt sich ein Karbonatisierungsgrad von ca. 96 % ein. Dieser oberste Grenzwert wird mit einem Wassergehalt von ca. 11 % erreicht.

Wie die durchgeführten Versuche in Abschnitt 3.1 zeigen, ist der Anfangswassergehalt der Zementsteinmatrix von ausschlaggebender Bedeutung für das Karbonatisierungsergebnis. Die nachträgliche Befeuchtung während der Karbonatisierung mit Hilfe von entsprechenden Salzlösungen im Reaktorraum kann nicht für eine ausreichende Feuchtigkeit im Kapillarporenraum der Zementsteinmatrix sorgen.

3.2 Untersuchungen zum Einfluss der Zementart auf die Karbonatisierung

Der Karbonatisierungsfortschritt wird von der Zementart entscheidend beeinflusst, da die bei der Hydratation entstehende Menge von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ die zu bindende CO_2 Menge bestimmt [12]. Weiterhin bilden diese neuen Phasen insgesamt ein größeres Volumen als die ursprünglich vorhandenen. Dadurch kommt es zu einer Veränderung bzw. Verringerung der Porosität in den karbonatisierten Bereichen [13]. Dies gilt jedoch nur für Portlandzemente (CEM I).

Für die Untersuchungen kamen ein Portlandzement und ein Hochofenzement zum Einsatz. Mit diesen Zementen wurden Betone hergestellt, die nach einer Hydratationszeit von 28 Tagen und einer anschließenden Aufbereitung in die Kornklassen 2/4 und 4/8 klassiert wurden. Anhand der Ergebnisse aus den Massezunahmen, welche im Anhang A hinterlegt sind, ist zu erkennen, dass es bei dem Zementstein aus Hochofenzement teilweise zu größeren Massezunahmen kommt, was darauf hindeutet, dass der Karbonatisierungsfortschritt und damit der Karbonatisierungsgrad über dem des Zementsteins aus Portlandzement liegt. Dies ist damit zu erklären, dass durch die Verdünnung des Klinkeranteils sich nach der Hydratation ein geringerer Calciumhydroxidgehalt in der Zementsteinmatrix einstellt.

Inwieweit es zu einer Veränderung des Porengefüges durch die Karbonatisierung gekommen ist, wurde mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie bestimmt.

Tabelle 1: Veränderung der Dichte und der Porosität durch die Karbonatisierung

		Dichte [g/cm ³]	Porosität [%]
CEM I	nicht karbonatisiert	2,17	12,17
	karbonatisiert	2,34	6,90
CEM III/B	nicht karbonatisiert	1,99	15,67
	karbonatisiert	2,28	15,22

In der Tabelle 1 sind die Messwerte dargestellt, welche durch die Quecksilberdruckporosimetrie ermittelt wurden. Weiterhin sind im Anhang A die Porenradienverteilungen in entsprechenden Grafiken dargestellt.

Die im Anhang A befindliche Porenradienverteilung von Portlandzementbeton und die Werte aus Tabelle 1 zeigen, dass sich eine Abnahme der Porosität einstellt, da es sowohl zu einer Reduktion der Gesamt- als auch der Kapillarporosität kommt. Das Porenvolumen ist durch die Karbonatisierung von Ca(OH)₂ insgesamt zurückgegangen, da hier während der Karbonatisierung eine Volumenvergrößerung hervorgerufen wird.

Bei der Karbonatisierung des Hochofenzementbetons kommt es sehr schnell zur Karbonatisierung der CSH-Phasen, was zur Bildung von poröser Kieselsäure führt. Die Gesamtporosität bleibt nahezu unverändert. Die Bildung der porösen Kieselsäure führt allerdings zu einer Vergrößerung unterhalb der Kapillarporen. Der Anteil an Hüttensand spielt dabei eine ausschlaggebende Rolle. Der verwendete CEM III/B Zement hatte einen Hüttensandanteil von ca. 68 %, was dazu führt, dass es durch die Karbonatisierung zu einer sehr signifikanten Verschiebung zu größeren Poren kommt.

3.3 Untersuchungen zur Beschleunigung der Karbonatisierung durch erhöhte Temperaturen

Die Karbonatisierungsreaktionen unter natürlicher Atmosphäre laufen in einem engen Temperaturspektrum ab, was nur zu bedingten Aussagen auf eine mögliche Reaktionsbeschleunigung durch eine Temperaturerhöhung führt.

Welchen Einfluss die Temperatur auf den Karbonatisierungsvorgang hat, wurde mit Hilfe einer Anlagenerweiterung untersucht. Dazu wurde ein zweiter Rohrreaktor in die bestehende Anlage mit eingebunden.

3.3.1 Erweiterung der Versuchsanlage

Um die Zementsteinpasten und rezyklierten Gesteinskörnungen bei verschiedenen Temperaturen gezielt karbonatisieren zu können, war es erforderlich, die bestehende Versuchsanlage zu erweitern.

Der Ausbau der Versuchsanlage sollte derart geplant werden, dass mit Hilfe eines zweiten Reaktors die Temperatur in den Reaktionsverlauf mit eingebunden werden kann.

Der Aufbau des zweiten Reaktors erfolgte in einer komplexeren Bauweise als der erste Reaktor, bedingt durch den angestrebten Temperaturbereich 25 °C bis 400 °C, welcher in verschiedenen Versuchen durchlaufen werden sollte. Im Anhang A sind verschiedene Zeitpunkte der Reaktorfertigung optisch festgehalten, die den Aufbau des Reaktors zeigen.

Die planerischen Vorgaben, welche bei der Fertigung des ersten Reaktors Beachtung fanden, wurden auch bei der Umsetzung des zweiten Reaktors berücksichtigt. Zusätzlich zu diesen Randbedingungen war es erforderlich, den Reaktor so zu konstruieren, dass sich während der gesamten Bewitterungszeit eine konstante Temperatur im Reaktorinneren einstellt. Über ein entsprechendes Steuergerät und eine dazugehörige Messsonde ist eine Temperatursteuerung während des Karbonatisierungsprozesses möglich. Der Mantel des Reaktorinneren ist mit einem feuerfesten Dämmmaterial umhüllt, damit es im Reaktorinneren zu keinen Temperaturschwankungen kommt. Zusätzlich wurden die Gaseinström- und Gasausströmleitungen spiralförmig ausgebildet, damit eine Temperaturübertragung auf das Schlauchsystem verhindert werden konnte.

Nach der Fertigstellung des zweiten Reaktors wurde dieser in die bestehende Anlage mit eingebunden. Das Bild 4 zeigt die erweiterte Anlage mit beiden Reaktoren. Mit dem Einbau von verschiedenen Absperrventilen ist es möglich zwei Reaktoren über eine Versuchsstrecke laufen zu lassen, ohne dass dabei zusätzlichen Steuerungselemente installiert werden müssen.

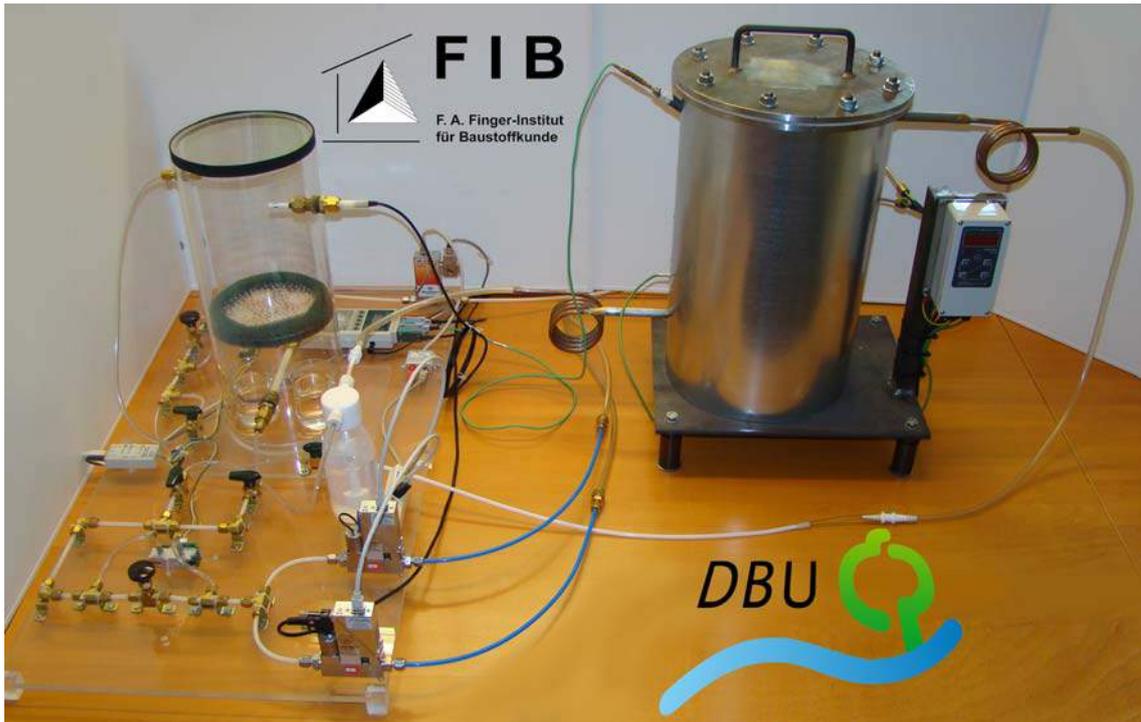


Bild 4: Erweiterte Versuchsanlage

3.3.2 Gezielte Karbonatisierung bei verschiedenen Temperaturen

Die Wirkung der Temperatur auf den Karbonatisierungsverlauf lässt sich in den folgenden Versuchsreihen beobachten. Die Temperaturänderung hat dabei einen entscheidenden Einfluss auf die Löslichkeit von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in Wasser. Weiterhin kommt es zu einer Veränderung der CO_2 -Diffusion durch den Temperatureinfluss. Die verschiedenen Abhängigkeiten sind in Bild 5 dargestellt.

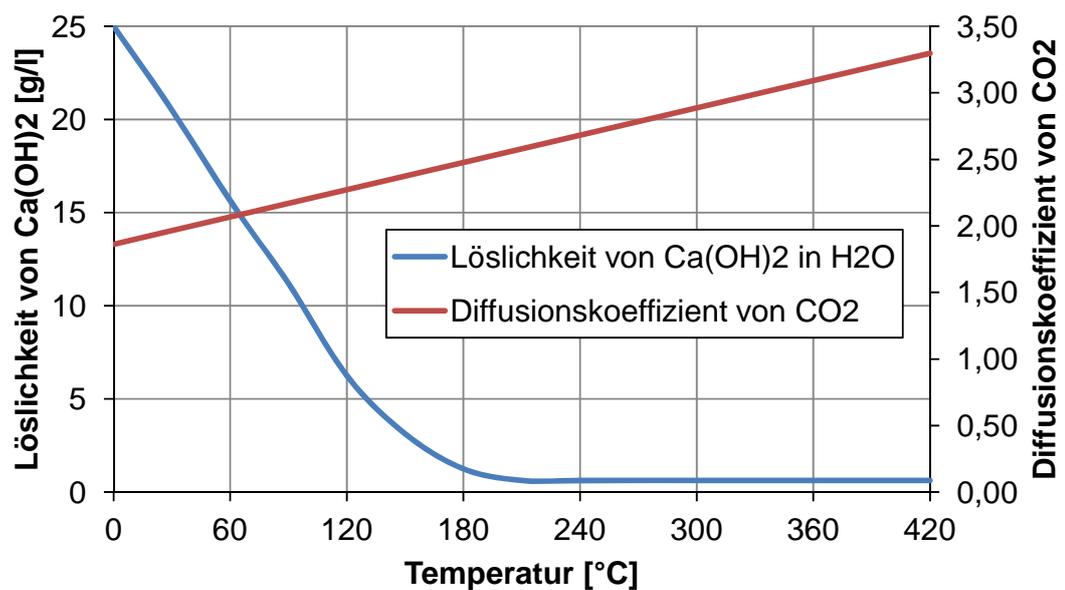


Bild 5: Löslichkeit von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in H_2O und Diffusionskoeffizient von CO_2 in Abhängigkeit von der Temperatur

Damit der Einfluss der Temperatur auf die Karbonatisierungsgeschwindigkeit und den Karbonatisierungsgrad festgestellt werden konnte, wurden mehrere Versuchsreihen durchgeführt, bei denen die Temperatur zwischen 25 °C und 400 °C variierte. Für die Versuche wurden Zementsteinprismen mit einem CEM I und einem CEM III hergestellt. Die im Anschluss der Herstellung durchgeführten Aufbereitungsschritte zeigt die schematische Darstellung im Bild 6. Die Versuche wurden bei den Temperaturen 25 °C, 50 °C, 100 °C, 150 °C, 200 °C und 400 °C bei unterschiedlichen Bewitterungszeiten und bei einer konstanten CO₂-Konzentration durchgeführt. Die Ergebnisse sollten Aufschluss über die relative Massezunahme, welche mit dem Karbonatisierungsgrad korreliert, in Abhängigkeit von der Temperatur geben.

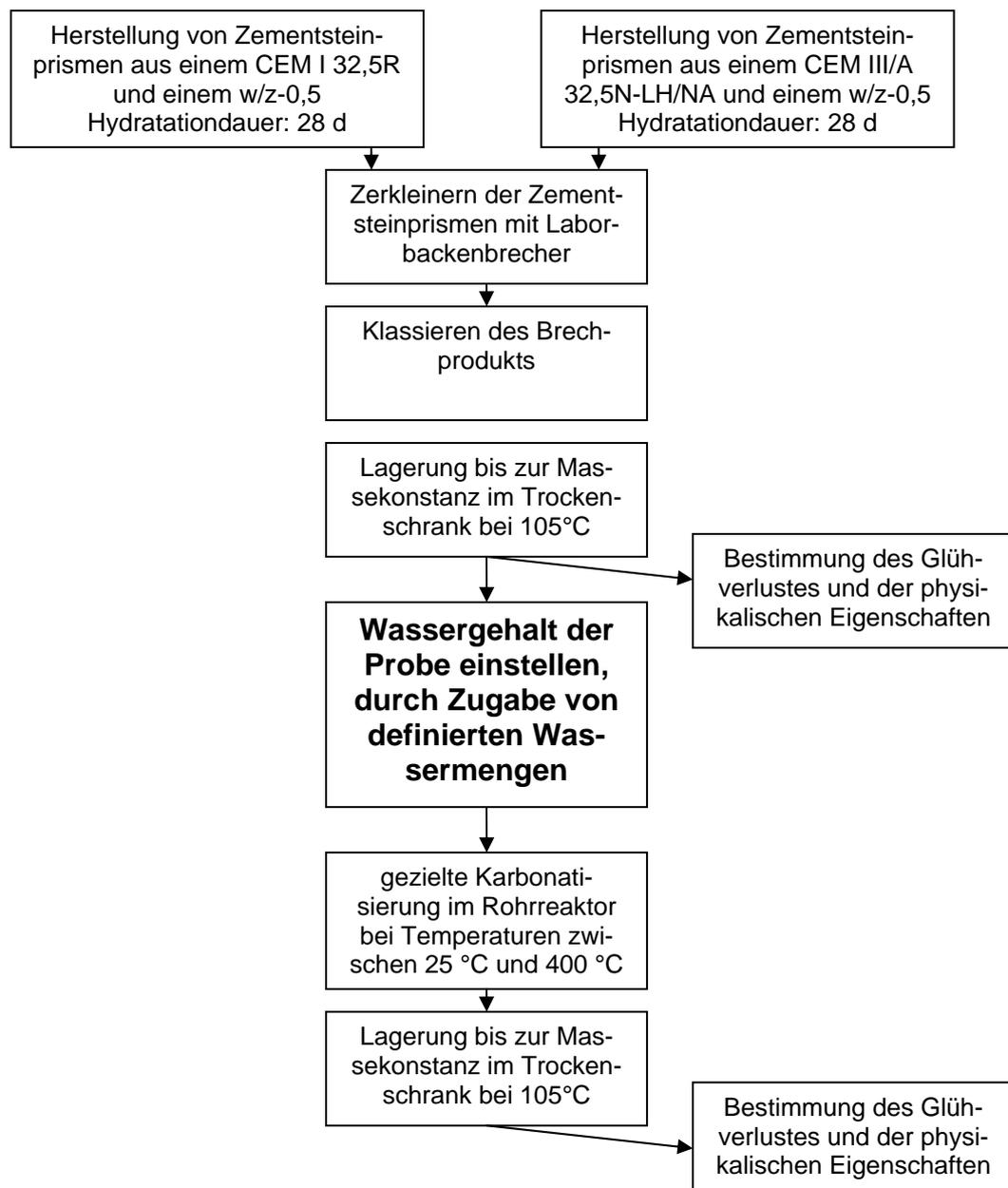


Bild 6: Durchführungsschema für die Untersuchung zur Beschleunigung der Karbonatisierung durch erhöhte Temperaturen

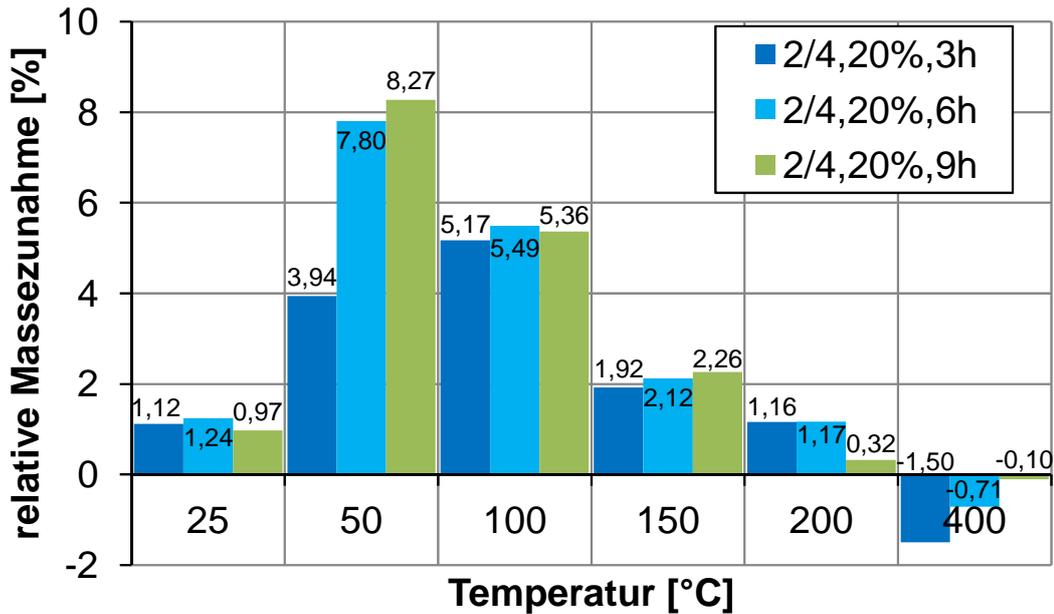


Bild 7: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von der Temperatur (CEM I, 2/4)

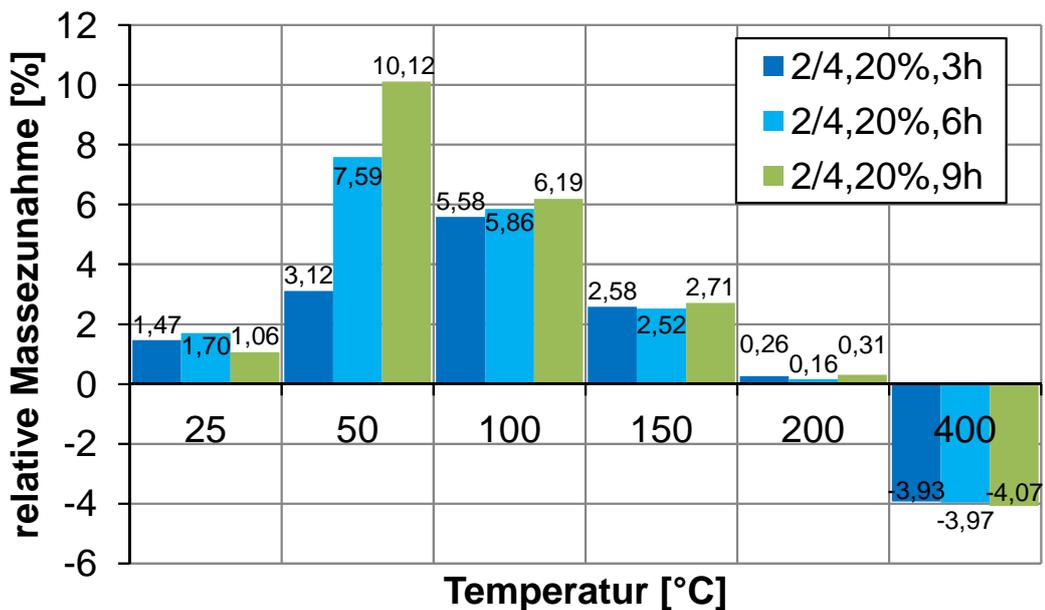


Bild 8: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von der Temperatur (CEM III, 2/4)

In den Grafiken (Bild 7 und Bild 8) ist die Abhängigkeit der Karbonatisierung von der Temperatur dargestellt. Die entsprechenden Messwerte sind im Anhang A hinterlegt.

In beiden Diagrammen (Bild 7 und Bild 8) zeigt sich eine Verteilung der relativen Massezunahme über die entsprechenden Temperaturbereiche. Dabei fallen verschiedene Effekte auf.

Nach den Versuchen und der Auswertung der Ergebnisse hat sich herausgestellt, dass sich in dem Temperaturbereich zwischen 50 °C und 100 °C eine

maximale Massezunahme einstellt. Dabei ist zu erkennen, dass sich bei einer Bewitterungstemperatur von 50 °C ein maximaler Peak bei einer langen Bewitterungszeit von 9 h. Im Gegensatz hierzu stellen sich diese Effekte bei einer Karbonatisierungstemperatur von 100 °C nicht mehr so eindeutig dar. Hier ist der Einfluss der Bewitterungsdauer von untergeordneter Bedeutung.

Insgesamt kann festgestellt werden, dass maximale Massezunahmen bei längerer Bewitterungsdauer bei 50 °C erreicht werden können. Bei 100 °C können hingegen bereits nach kurzer Bewitterungsdauer starke Massezunahmen detektiert werden, die durch eine Verlängerung der Expositionszeit nicht mehr erhöht werden können.

Bei Temperaturen größer 100 °C kommt es zu einem deutlichen Abfall der relativen Massezunahme bezogen auf die Bewitterung bei 50 °C bzw. 100 °C. Bei 200 °C ist kaum noch eine Massezunahme zu verzeichnen. Diese Ergebnisse lassen sich teilweise mit der Grafik in Bild 5 erklären. Durch den Abfall der Löslichkeit von Ca(OH)_2 in Wasser bei erhöhten Temperaturen, kommt es ab einer Temperatur von 200 °C zum Erliegen der Karbonatisierungsreaktionen. Wird die Temperatur weiterhin erhöht kommt es laut Sui [14] ab einer Temperatur von 300 °C zu einer Versprödung des Zementsteins. Ab 400 °C beginnt die Zersetzung von Ca(OH)_2 , bei der chemisch gebundenes Wasser abgespalten wird. Dies kann zu einem zusätzlichen Masseverlust von 24 % führen.

Inwieweit es zu einer Umsetzung von Ca(OH)_2 zu CaCO_3 durch den Aufenthalt im Reaktor gekommen ist, wurde mit Hilfe einer thermischen Analyse nachgewiesen.

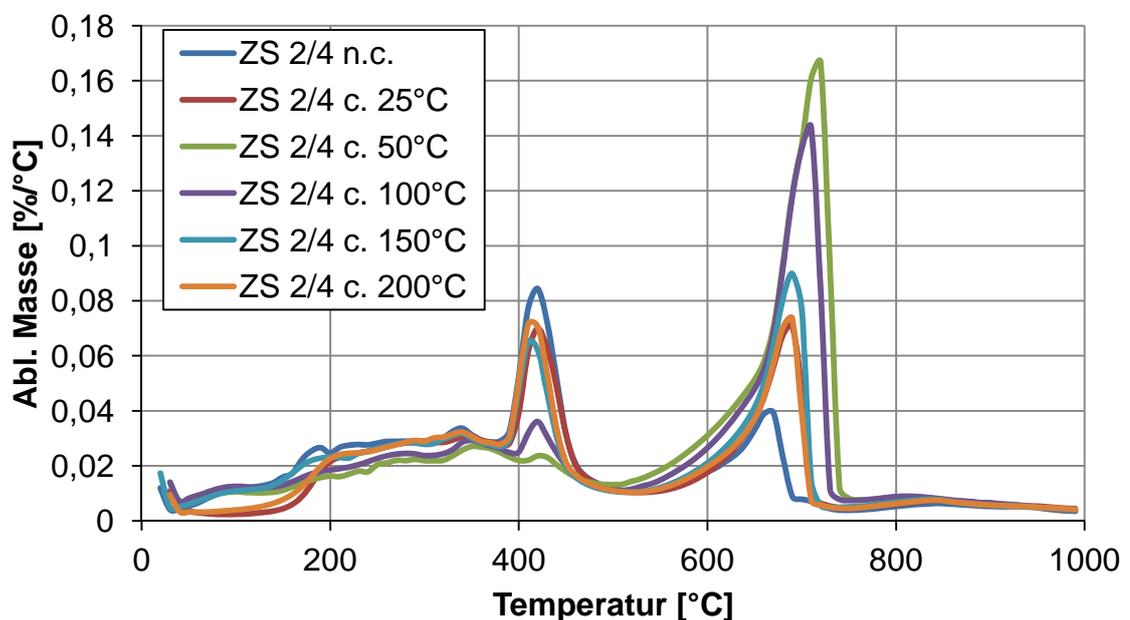


Bild 9: Thermische Analyse von ZS-2/4 (CEM I) bei 6h und 20 % CO_2

Bild 9 zeigt die thermischen Analysen der Zementsteinproben vor und nach der gezielten Karbonatisierung bei einer Bewitterungsdauer von 6 h und unterschiedlichen Temperaturen. Wie schon die Ergebnisse aus den relativen Massezunahmen gezeigt haben, kommt es bei 50 °C zu einer maximalen Umsetzung von Ca(OH)_2 zu CaCO_3 . Der erste Peak zwischen 400 °C und 500 °C bildet die Zersetzung von Ca(OH)_2 ab. Daran ist zu erkennen, dass bei Karbonatisierungstemperaturen zwischen 50 °C und 100 °C ein Maximum von

Ca(OH)₂ umgesetzt wird. Der zweite Peak zwischen 600 °C und 800 °C zeigt die Zersetzung von Carbonat. Der Calciumcarbonatgehalt ist bei den Proben am höchsten, die bei 50 °C bzw. bei 100 °C karbonatisiert wurden. Die errechneten Ca(OH)₂ und CaCO₃ Gehalte vor und nach der Karbonatisierung sind im Anhang A in entsprechenden Tabellen aufgelistet.

3.4 Untersuchungen der Karbonatisierung an Fraktionen und Körnungsgemischen

In den vorangegangenen Abschnitten erfolgten die Untersuchungen an Korngrößen 2 bis 4 mm. Für die nachfolgenden Versuche wurde das Spektrum der Partikelgröße erweitert, um den Einfluss während der Karbonatisierung auf die Partikelgröße besser beurteilen zu können.

Die schon mit einer Korngröße 2/4 absolvierten Versuchsreihen, wurden mit den gleichen Randbedingungen nochmals mit Probenmaterial 4 bis 8 mm durchgeführt. Die Grafiken (Bild 10 und Bild 11) zeigen die Ergebnisse mit verschiedenen Kornfraktionen. Die Versuche erfolgten ebenfalls für die Zementsteine aus CEM I und CEM III.

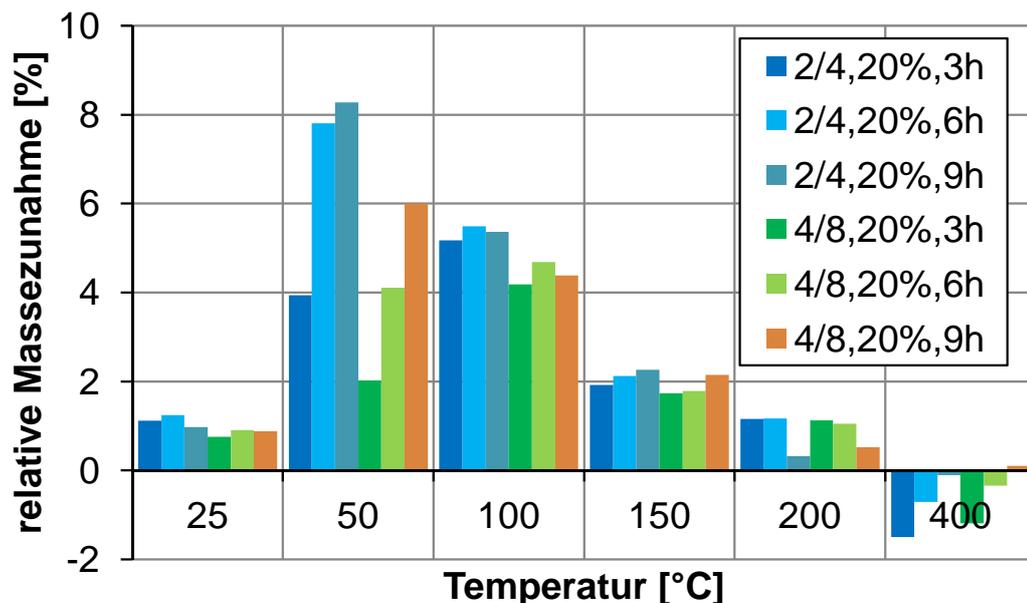


Bild 10: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von der Temperatur (CEM I, 2/4 und 4/8)

Die Resultate der Versuche mit CEM I Zementstein der Korngröße 2/4 und 4/8 sind in Bild 10 und im Anhang A zu sehen. Die Grafiken zeigen bei 50 °C einen kontinuierlichen Anstieg der Massezunahme bezogen auf die zeitliche Lagerung im Reaktor. Bei dieser Temperatur ist der Einfluss der Partikelgröße auf die Massezunahme eindeutig zu erkennen. Die Massezunahme ist bei der Korngröße 2/4 stärker ausgeprägt als bei der Korngröße 4/8. Die gezielte Karbonatisierung ist bei Körnungen 2/4 in den ersten 6 h am effektivsten, da es hier zu einer raschen Umsetzung von Portlandit zu Calcit kommt. Bei Kornfraktionen 4/8 kommt es zu geringeren Massezunahmen, da die verringerte Oberfläche die Zufuhr von Reaktionspartnern begrenzt. Auch oberhalb und unterhalb

der Temperaturmarke von 50 °C ist die Bedeutung der Korngröße noch abschätzbar, allerdings nicht mehr so signifikant. Auch die Bewitterungszeiten spielen in diesen Temperaturbereichen nur eine untergeordnete Rolle.

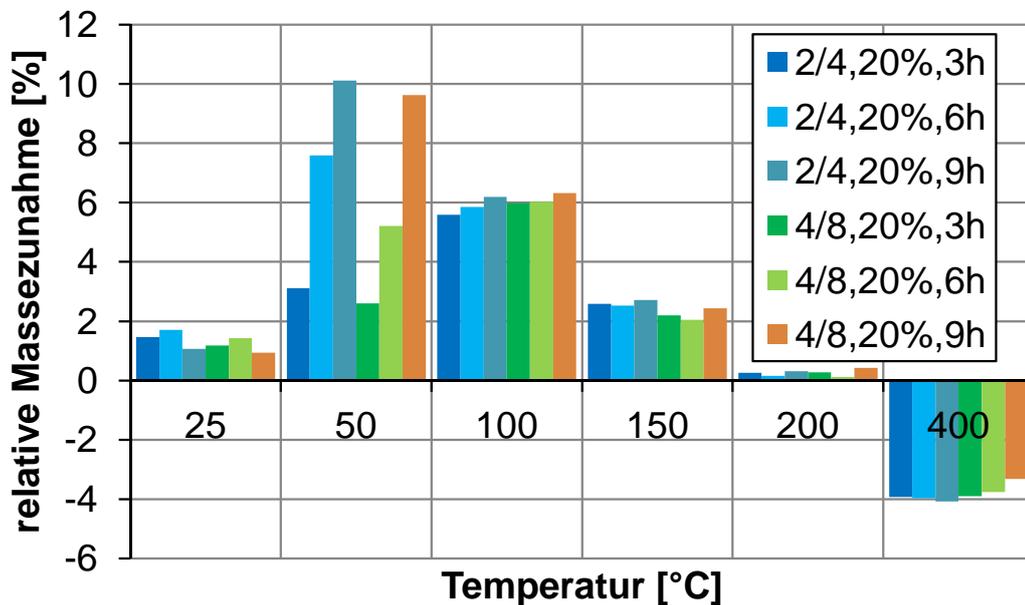


Bild 11: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von der Temperatur (CEM III, 2/4 und 4/8)

In Bild 11 sind die Ergebnisse der CEM III Zementsteine abgebildet, die dazugehörigen Wertepaare finden sich im Anhang A. Die Grafiken der CEM III Zementsteine zeigen bei Reaktionstemperaturen von 50 °C ähnliche Verläufe wie die Grafiken der CEM I Zementsteine. Auch hier nimmt die Partikelgröße Einfluss auf den Karbonatisierungsgrad. Mit steigenden und fallenden Temperaturen ist die Bedeutung der Korngröße des Probenmaterials nicht mehr eindeutig herauszustellen.

Durch die gezielte Karbonatisierung kam es zu einer Umwandlung bzw. Reduzierung der Hydratphasen und es hat sich Calcit gebildet. Der Nachweis wurde über thermische Analysen erbracht. Die entsprechenden Tabellen im Anhang A zeigen den Portlandit- und Calcitgehalt vor und nach der Karbonatisierung. Es kommt zu einer Abnahme des Portlanditgehaltes und gleichzeitig zu einem Anstieg der Calcitmenge.

3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse an Zementstein und Ableitung eines kinetischen Modells als Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Reaktors und die Bemessung

In den vorangegangenen Versuchsreihen wurden verschiedene Randbedingungen untersucht, die Einfluss auf die Karbonatisierung der Zementsteinmatrix haben. Eine Reihe dieser Faktoren fördert die Karbonatisierung in definierten Grenzbereichen. Es wurde hierbei speziell der Feuchtegehalt des Probenmaterials, die Zementart, die Temperatur und die Korngröße untersucht.

Der Feuchtegehalt des Probenmaterials spielt für den Ablauf der Karbonatisierung eine entscheidende Rolle, da für die Reaktionen gelöste Ionen vorliegen müssen. Feuchtigkeit ist somit eine notwendige Voraussetzung für die Reaktion. Gleichzeitig muss jedoch CO_2 in die Matrix eindiffundieren. Hier kann zu viel Feuchtigkeit die Diffusion behindern. Die Versuche haben gezeigt, dass bei Wassergehalten von ca. 9 bis 11 % die Karbonatisierungsreaktionen am effektivsten ablaufen und dadurch die größten Karbonatisierungsgrade bis zu 96 % erreicht werden. Die Befeuchtung des Probenmaterials muss dabei im Vorfeld der Karbonatisierung erfolgen, da durch die kurzen Karbonatisierungszeiten ein Feuchteausgleich während der Karbonatisierung nicht in ausreichendem Maße stattfinden kann.

Die Zementart hat einen entscheidenden Einfluss auf den Karbonatisierungsfortschritt. Damit diese Bedeutung versuchstechnisch hinterlegt werden konnte, wurden Betone mit Portland- und Hochofenzement hergestellt und nach einer Hydratationsdauer von 28 Tagen aufbereitet. Nach der gezielten Karbonatisierung der Kornklassen 2/4 und 4/8, konnten anhand der relativen Massezunahmen und der Porositäten vor und nach der Karbonatisierung folgende Erkenntnisse getroffen werden. Die Massezunahme der Hochofenzementbetone liegt teilweise über denen von Portlandzementbetonen, was wiederum auf einen höheren Karbonatisierungsgrad schließen lässt. Eine Verringerung der Kapillarporosität stellt sich dagegen nur bei dem Portlandzementbeton ein, da hier im wesentlichen Ca(OH)_2 karbonatisiert wird. Bei dem verwendeten Hochofenzement mit einem Hüttensandanteil von ca. 68 % kommt es bedingt durch den geringen Anteil von Ca(OH)_2 sehr schnell zur Karbonatisierung der CSH-Phasen, was in der Porenverteilung zu einer gröberen Porenstruktur führt.

Die Relevanz der Temperatur während der Karbonatisierung ist dahingehend von Interesse, dass sich die Löslichkeit von Ca(OH)_2 in Wasser und die CO_2 -Diffusion bei verschiedenen Temperaturen gegenläufig verändern. Die Versuche wurden zwischen 25 °C und 400 °C durchgeführt. Die Ergebnisse haben gezeigt, dass sich in dem Temperaturbereich zwischen 50 °C und 100 °C maximale Massezunahmen einstellen. Bei einer Reaktionstemperatur von 50 °C und einer Bewitterungszeit von 9 h kommt es zu einer maximalen relativen Massezunahme. Wird die Temperatur auf 100 °C erhöht, kann im Gegenzug die Bewitterungszeit bis auf 3 h herabgesetzt werden. Ab einer Temperatur von 200 °C stellt sich eine Stagnation der Karbonatisierung ein, da die Löslichkeit von Ca(OH)_2 in Wasser gegen Null geht.

Mit der Partikelgröße kann die Reaktionsoberfläche des Probenmaterials variiert werden. Welchen Stellenwert diese Randbedingung im Verlauf der Karbonatisierung einnimmt, wurde mit der Korngröße 2/4 und 4/8 untersucht. Bei einer Reaktionstemperatur von 50 °C ist der Einfluss der Partikelgröße auf die Massezunahme eindeutig zu erkennen. Bei dem Probenmaterial mit einer Korngröße 2/4 kommt es zu einer schnelleren Umsetzung der Hydratphasen durch den Karbonatisierungsvorgang. Bei höheren und niedrigeren Temperaturen ist die Bedeutung nur noch bei Portlandzementbetonen zu erfassen. Bei Hochofenzementbetonen mit einem Hüttensandanteil von ca. 68 % spielt die Partikelgröße oberhalb und unterhalb der Temperaturmarke von 50 °C keine entscheidende Rolle mehr.

Zusammenfassend ist festzustellen, dass mit den gewonnen Erkenntnissen ein kinetisches Modell für die gezielte Karbonatisierung formuliert werden kann, was die Grundlage für halbtechnische Versuche darstellt. Aus den oben genannten Untersuchungen lassen sich folgende Randbedingungen für eine gezielte Karbonatisierung ableiten.

Damit eine gezielte Karbonatisierung am effektivsten verläuft, sollte das Probenmaterial im Vorfeld auf einen Feuchtegehalt von ca. 10 % eingestellt werden. Die Karbonatisierungszeit kann in Abhängigkeit der Partikelgröße zwischen 3 und 9 h betragen. Die Temperatur während des Karbonatisierungsprozesses sollte oberhalb von 50 °C und unterhalb von 100 °C liegen. Bei Korngrößen kleiner 4 mm sollte die Bewitterungstemperatur um die 50 °C liegen. Steigt die Korngröße des Probenmaterials über 4 mm, kann die Temperatur im Reaktor auf bis zu 100 °C erhöht werden.

Die gewonnen Ergebnisse und die daraus geschaffenen Randbedingungen wurden auf nationalen und internationalen Tagungen vorgestellt und entsprechend diskutiert. Parallel dazu kam es zu zahlreichen Publikationen.

4 Schwerpunkt B: Übertagung der Ergebnisse auf Labor- und Praxisbetone

Gesteinskörnungen nehmen großen Einfluss auf die Frisch- und Festbetoneigenschaften, da sie einen wesentlichen Volumenanteil des Verbundbaustoffes Beton ausfüllen. Die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit eines Betonbauwerkes ist in großem Maße von der Qualität der verwendeten Gesteinskörnung abhängig. Hier spielen die physikalischen und chemischen Eigenschaften der Gesteinskörnung eine ausschlaggebende Rolle. Die Einteilung der Gesteinskörnungen kann anhand von verschiedenen Kriterien vorgenommen werden. Die Tabelle 2 zeigt die Klassifizierung mithilfe der Rohdichte. In Tabelle 3 erfolgt die Unterteilung nach der Korngröße und der Aufbereitungsart.

Tabelle 2: Klassifizierung der Gesteinskörnung anhand der Rohdichte [15]

Bezeichnung der Gesteinskörnung	Kornrohichte [kg/dm ³]
schwere Gesteinskörnung	> 3,0
normale Gesteinskörnung	2,6 – 3,0
leichte Gesteinskörnung	< 2,0

Tabelle 3: Klassifizierung der Gesteinskörnung anhand der Korngröße [15]

Korngröße	nicht gebrochene Körnung	gebrochene Körnung
< 0,25 mm	Feinstsand	Feinstbrechsand
< 1 mm	Feinsand	Feinbrechsand
1 – 4 mm	Grobsand	Grobbrechsand
4 – 32 mm	Kies	Splitt
> 32 mm	Grobkies	Schotter

Durch den selektiven Rückbau von Bauwerken ist es möglich, sortenreine Recyclingmaterialien zu gewinnen. Der dadurch gewonnene Altbeton kann durch verschiedene Aufbereitungstechniken für die Herstellung von sekundärer Gesteinskörnung genutzt werden. Damit die rezyklierte Gesteinskörnung die gewünschte Korngröße und Kornform erhält, kommt es häufig zur mehrmaligen Anwendung von Aufbereitungstechniken. Durch die Aufbereitung entsteht auch immer ein nicht unwesentlicher Feinanteil ≤ 2 mm. In dieser Fraktion reichert sich im Wesentlichen der sekundäre Zementstein an, was zur Folge hat, dass die Korngruppe 0/2 für die Verwendung in Betonen entsprechend einer Richtlinie vom Deutschen Ausschuss für Stahlbeton keine Berücksichtigung findet [16].

Die Einteilung der sekundären Gesteinskörnung erfolgt in vier Liefertypen. Die Merkmale der verschiedenen Liefertypen unterscheiden sich in ihrer stofflichen Zusammensetzung, wie aus Tabelle 4 ersichtlich ist. Die Tabelle 5 und 6 gehen

auf Anforderungen bezüglich Kornrohdichte, Wasseraufnahme und Anwendungsbereiche in Abhängigkeit vom Liefertyp ein.

Tabelle 4: Stoffliche Zusammensetzung der Liefertypen [17]

Bestandteile	Zusammensetzung [M.-%]			
	Typ 1 (Betonsplitt/-brechsand)	Typ 2 (Bauwerksplitt/-brechsand)	Typ 3 (Mauerwerksplitt/-brechsand)	Typ 4 (Mischsplitt/-brechsand)
Beton und Gesteinskörnungen nach DIN 4226-1	≥ 90	≥ 70	≤ 20	≥ 80
Klinker, nicht porosierter Ziegel	≤ 10	≤ 30	≥ 80	
Kalksandstein			≤ 5	
Andere mineralische Bestandteile ^a	≤ 2	≤ 3	≤ 5	≤ 20
Asphalt	≤ 1	≤ 1	≤ 1	
Fremdbestandteile ^b	≤ 0,2	≤ 0,5	≤ 0,5	≤ 1
a	Andere mineralische Bestandteile sind zum Beispiel: porosierter Ziegel, Leichtbeton, Porenbeton, haufwerksporiger Beton, Putz, Mörtel, poröse Schlacke, Bimsstein.			
b	Fremdbestandteile sind zum Beispiel: Glas, Keramik, NE-Metallschlacke, Stückgips, Gummi, Kunststoff, Metall, Holz, Pflanzenreste, Papier, sonstige Stoffe.			

Tabelle 5: Kornrohdichte und Wasseraufnahme [17]

Kornrohdichte und Wasseraufnahme	Rezyklierte Gesteinskörnung			
	Typ 1 (Betonsplitt/-brechsand)	Typ 2 (Bauwerksplitt/-brechsand)	Typ 3 (Mauerwerksplitt/-brechsand)	Typ 4 (Mischsplitt/-brechsand)
Minimale Kornrohdichte [kg/m ³]	2000		1800	1500
Schwankungsbreite Kornrohdichte [kg/m ³]	± 150			Keine Anforderungen
Maximale Wasseraufnahme nach 10 min [M.-%]	10	15	20	Keine Anforderungen

Tabelle 6: zulässige Anteile rezyklierter Gesteinskörnung > 2 mm, bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung (Vol.-%) [16]

Anwendungsbereich		Kategorie der Gesteinskörnung	
Alkalirichtlinie	DIN EN 206-1 und DIN 1045-2	Typ 1 (Betonsplitt/-brechsand)	Typ 2 (Bauwerksplitt/-brechsand)
W0 (trocken)	Carbonatisierung (XC1)	≤ 45	≤ 35
WF (feucht)	Kein Korrosionsrisiko (X0) Carbonatisierung (XC1 bis XC4)		
	Frostangriff ohne Taumittleinwirkung (XF1 und XF3) und in Beton mit hohem Wassereindringwiderstand	≤ 35	≤ 25
	Chemischer Angriff (XA1)	≤ 25	≤ 25

4.1 Nachweis der Qualitätsverbesserungen an Rezyklaten aus Laborbetonen

Damit der Nachweis der Qualitätsverbesserung an Rezyklaten aus Laborbetonen erbracht werden konnte, wurden zwei verschiedene Betone gefertigt. Alle Betone wurden mit einem Portlandzement CEM I 42,5 R hergestellt. In den Betonrezepturen wurde lediglich der w/z-Wert variiert. Im Anhang A ist tabellarisch die Mischungsrezeptur detailliert beschrieben. Damit die Einflüsse auf die Rezyklate minimal gehalten werden konnten, wurde die Betonrezeptur auf ein Drei-Stoff-System beschränkt. Weiterhin kam bei allen Rezepturen die Sieblinie AB 16 zum Einsatz [18]. Die Laborbetone dienten nach einer Hydratationszeit von 28 Tagen als Ausgangsmaterial für die gebrochene Gesteinskörnung. Aufgrund dieser Prozessreihenfolge konnte gewährleistet werden, dass in der rezyklierten und rezyklierten karbonatisierten Gesteinskörnung die Zusammensetzung bekannt war.

Die rezyklierte Gesteinskörnung wurde in einem Rohrreaktor (Bild 4) bei Atmosphärendruck und einem definierten CO₂-Gasgemisch 3 Stunden behandelt. Die Verweilzeit und die CO₂-Konzentration konnten dabei im durchströmten Rohrreaktor beliebig variiert werden. Dadurch war es möglich, die sekundäre Gesteinskörnung gezielt zu karbonatisieren. Die bei den Versuchen eingestellte CO₂-Konzentration von 20 Vol.-% und einer Bewitterungstemperatur von 100 °C ist mit realen Kraftwerksabgasen vergleichbar.

4.1.1 Charakterisierung der Gesteinskörnung

Damit eine Beurteilung der gezielten Karbonatisierung der sekundären Gesteinskörnungen erfolgen konnte, wurden verschiedene Untersuchungen der unbehandelten und behandelten Gesteinskörnung durchgeführt. Analysiert wurden dabei die Rein- und Rohdichte, die Wasseraufnahmefähigkeit und die Porosität mithilfe der Quecksilberdruckporosimetrie. Hinzu kamen die Thermi-

sche Analyse, die Röntgendiffraktometrie und Untersuchungen mit Hilfe der Rasterelektronenmikroskopie.

Rohdichten, Reindichten und Porositäten

Tabelle 7 zeigt die Rohdichten, Reindichten und die daraus errechneten Porositäten.

Tabelle 7: Rohdichten, Reindichten und Porositäten

GK	KG	w/z-Wert = 0,50			w/z-Wert = 0,60		
		Rohdichte [kg/m ³]	Reindichte [kg/m ³]	Porosität [%]	Rohdichte [kg/m ³]	Reindichte [kg/m ³]	Porosität [%]
n.c.	2/4	2,50	2,88	13,2	2,24	2,87	22,0
c.		2,52	2,89	12,8	2,27	2,81	19,2
n.c.	4/8	2,58	2,91	11,3	2,34	2,84	17,6
c.		2,61	2,94	11,2	2,40	2,83	15,2
n.c.	8/16	2,72	2,93	7,2	2,39	2,84	15,8
c.		2,75	2,95	6,8	2,42	2,83	14,5

Innerhalb aller Korngruppen kommt es zu einem Anstieg der Rohdichte nach der Behandlung der Rezyklate. Gleichzeitig verringert sich die Porosität der behandelten Gesteinskörnung. Dies legt den Schluss nahe, dass durch die Beaufschlagung mit CO₂ eine Karbonatisierung in der Zementsteinmatrix stattgefunden haben muss, die das Gefüge verdichtet hat. Bedingt durch die unterschiedlichen w/z-Werte bilden sich bei der Hydratation unterschiedliche Gesamtporositäten in der Zementsteinmatrix aus. Dies wiederum wirkt sich auf die Karbonatisierung aus.

Der dichtere Beton mit einem w/z-Wert = 0,50 karbonatisiert langsamer, als der Beton mit einem w/z-Wert = 0,6. In der poröseren Betonmatrix kommt es zu einer stärkeren Abnahme der Porosität und damit auch zu einem höheren Karbonatisierungsgrad. Als Folge werden die Rohdichten und Wasseraufnahmen der porösen Betone stärker verbessert als die der dichteren Betone (siehe Tabelle 7 und Tabelle 8).

Wasseraufnahme und Massezunahme

Für den Vergleich der Wasseraufnahmefähigkeit wurden sowohl Proben der rezyklierten, als auch der rezyklierten karbonatisierten Gesteinskörnung charakterisiert. Die Untersuchungen wurden in Anlehnung an DIN EN 1097-6 [19] durchgeführt. In Tabelle 8 sind die Ergebnisse zusammengestellt.

Tabelle 8: Wasseraufnahme und Massezunahme

GK	KG	w/z-Wert = 0,50		w/z-Wert = 0,60	
		Wasseraufnahme [kg/m ³]	Massezunahme [%]	Wasseraufnahme [kg/m ³]	Massezunahme [%]
n.c.	2/4	5,7	-	5,9	-
c.		4,9	1,3	4,8	1,9
n.c.	4/8	4,7	-	5,0	-
c.		4,5	1,0	3,9	1,6
n.c.	8/16	4,0	-	4,5	-
c.		3,8	0,6	3,4	1,4

Bei der Gegenüberstellung der ermittelten Wasseraufnahmen ist erkennbar, dass durch die gezielte Karbonatisierung die Wasseraufnahme der rezyklierten karbonatisierten Gesteinskörnung in allen Kornklassen abnimmt.

Durch die Untersuchungen konnte nachgewiesen werden, dass die Randbedingungen nach DIN 4226-100 [17] (siehe Tabelle 5) bezüglich der Wasseraufnahmefähigkeit eingehalten wurden.

Zusätzlich ist die Massezunahme für jede Kornklasse ermittelt wurden. Dabei konnte festgestellt werden, dass mit steigender Korngröße innerhalb einer Kornklasse die Massezunahme im Vergleich von rezyklierter zu rezyklierter karbonatisierter Gesteinskörnung geringer verlief. Der Grund dafür ist, dass mit steigender Korngröße der Anteil an Zementstein abnimmt (bedingt durch den Aufbereitungsprozess), sodass die Karbonatisierung bei dieser Gesteinskörnung eine geringere Wirkung, bezogen auf einen gleichen Volumenanteil, hat. Weiterhin ist auch bei diesen Untersuchungen zu sehen, dass der Beton mit einem höheren w/z-Wert die größere Massezunahme erzielt, da die Bildung der Kapillarporen von dem w/z-Wert abhängt und die Karbonatisierung über das Kapillarporensystem erfolgt.

Quecksilberdruckporosimetrie

Für eine genaue Bestimmung der Porosität und der Porengrößenverteilung wurde die Quecksilberdruckporosimetrie (MIP) angewendet. Die zugrundeliegenden Daten sind im Anhang A aufgelistet. Die Tabelle 9 und die Abbildung 1 zeigen die daraus gewonnenen Ergebnisse.

Tabelle 9: Porosität vor und nach der Karbonatisierung in Abhängigkeit vom w/z-Wert

GK	w/z-Wert = 0,50	w/z-Wert = 0,60
	Porosität [%]	Porosität [%]
n.c.	13,1	14,6
c.	10,3	10,2

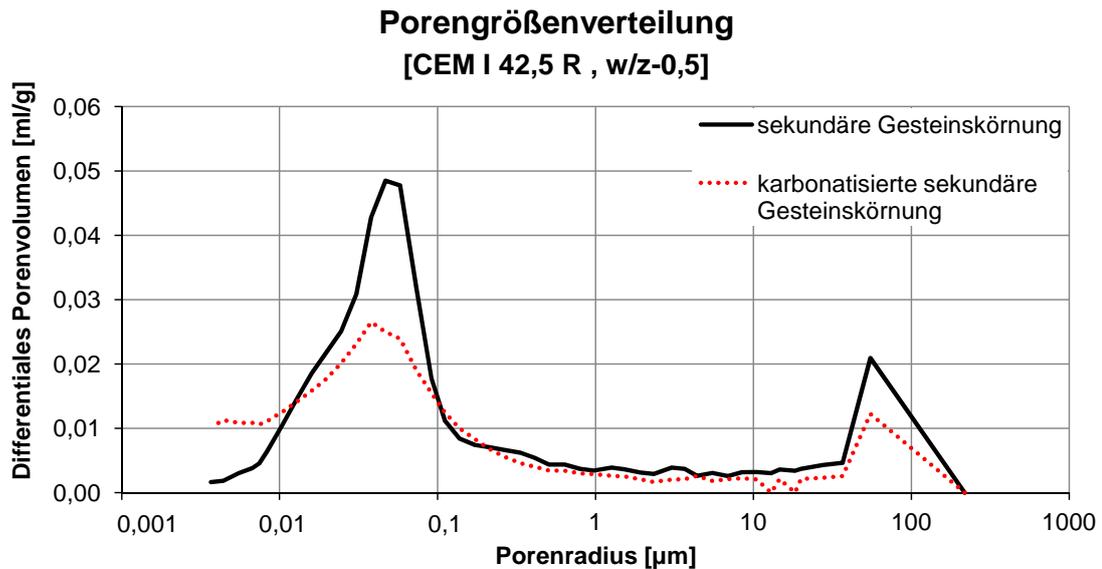


Bild 12: Differenciales Porenvolumen von sekundärer und karbonatisierter sekundärer Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,50)

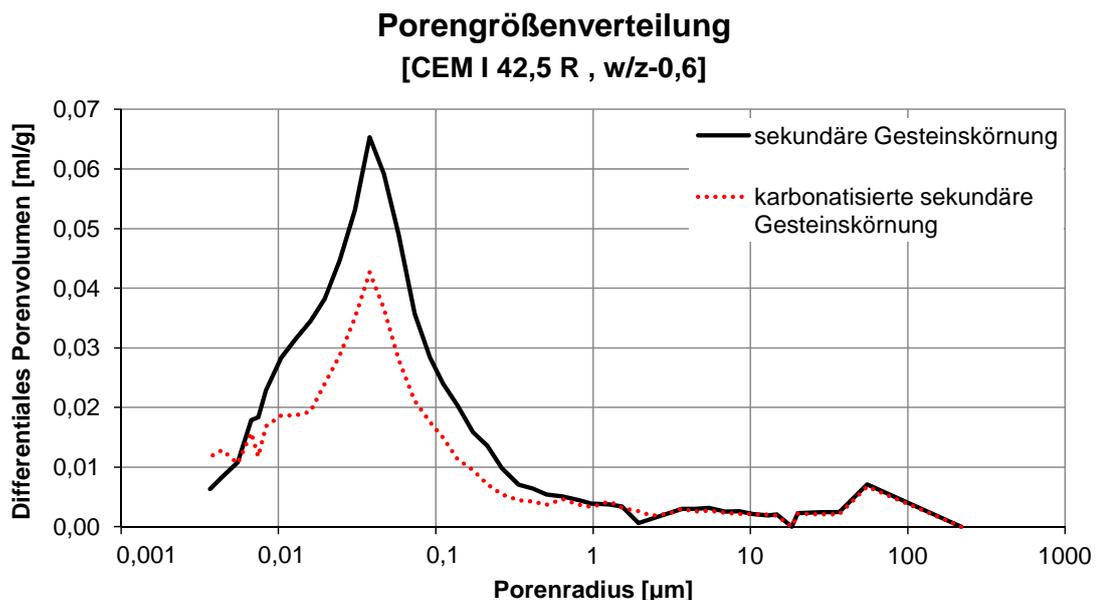


Bild 13: Differenciales Porenvolumen von sekundärer und karbonatisierter sekundärer Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,60)

Beim Vergleich der differentialen Porenvolumina in Bild 12 und Bild 13 ist ebenfalls zu erkennen, dass zwischen der rezyklierten und rezyklierten karbonatisierten Gesteinskörnung eine Veränderung stattgefunden hat. Bei einem w/z-Wert = 0,5 kommt es über den gesamten Porenradienbereich zu einer Verringerung der Porosität, wobei die umfangreichste Veränderung im Bereich der Kapillarporosität stattfand. Bei der Betonmatrix welche mit einem w/z-Wert = 0,6 hergestellt wurde erfolgt die Reduzierung der Porosität ausschließlich im Bereich der Porenradien 10 nm bis 5 μm . In diesem Bereich befinden sich die Kapillarporen. Das bedeutet, dass es durch die Behandlung zu einer Reduzierung der Kapillarporosität gekommen ist. Dies wiederum wirkt sich maßgebend

auf die Druckfestigkeit des Zementsteins aus, da die Kapillarporosität ein wesentlicher Einflussfaktor für die Druckfestigkeit ist [20]. Desweiteren kann davon ausgegangen werden, dass auch die Dauerhaftigkeit durch die reduzierte Kapillarporosität ansteigt.

Thermische Analyse

Für die weitere Charakterisierung wurde für die Kornklasse 2/4 eine simultane Thermoanalyse durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Bild 14 und Bild 15 aufgetragen. Die dazugehörigen Messdaten sind im Anhang A in Tabellen hinterlegt.

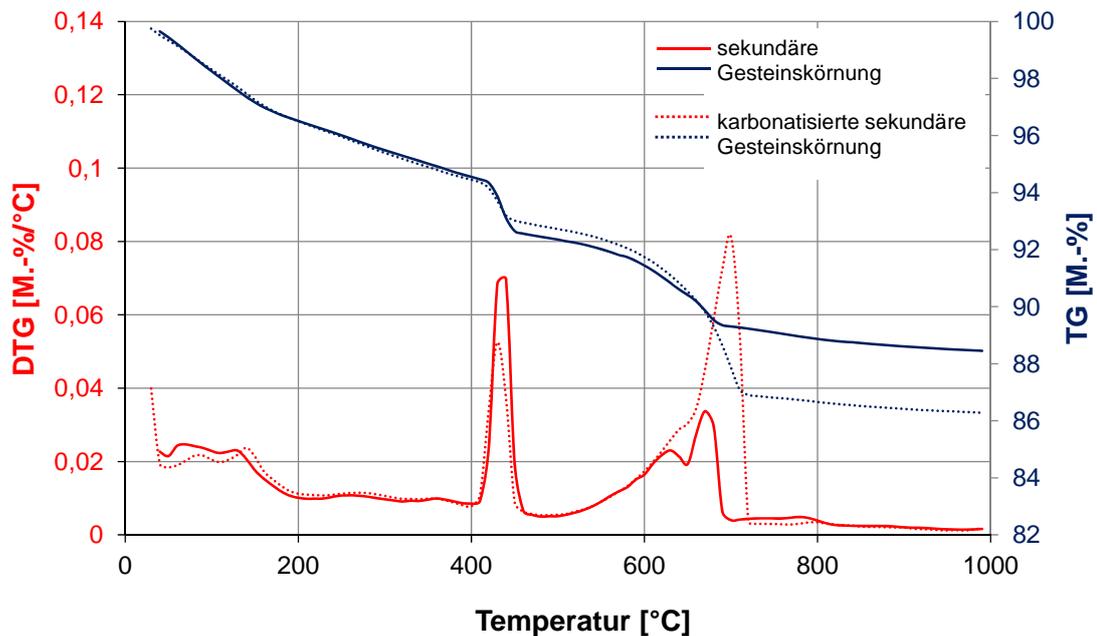


Bild 14: Thermische Analyse von sekundärer und karbonatisierter sekundärer Gesteinskörnung (TG-Thermogravimetrische Kurve, DTG-Differenz-Thermogravimetrische Kurve) (w/z-Wert = 0,50)

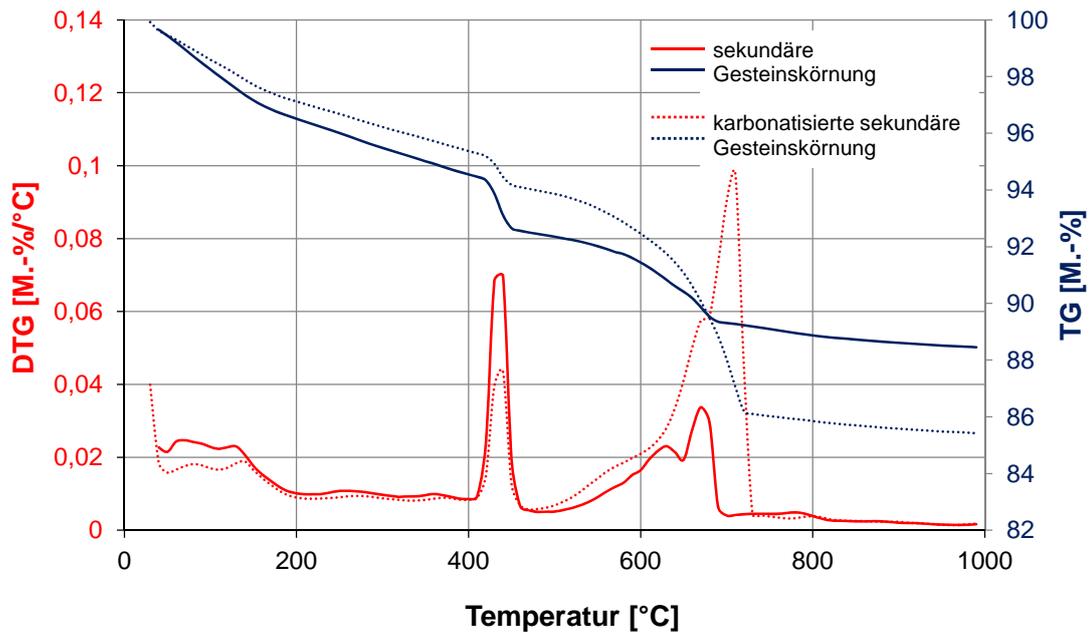
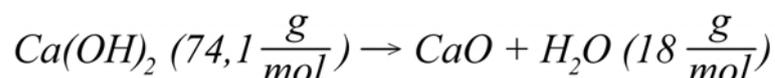


Bild 15: Thermische Analyse von sekundärer und karbonatisierter sekundärer Gesteinskörnung (TG-Thermogravimetrische Kurve, DTG-Differenz-Thermogravimetrische Kurve) (w/z-Wert = 0,60)

Die thermischen Analysen (Bild 14, Bild 15) zeigen bei der sekundären und bei der karbonatisierten sekundären Gesteinskörnung zwei ausgeprägte Peaks in den Verläufen der TG- und DTG-Kurven. Der erste Peak befindet sich bei ca. 430 °C. In diesem Temperaturbereich kommt es zur Dehydratation des Portlandits ($\text{Ca}(\text{OH})_2$). Der zweite Peak liegt bei ca. 650 bis 700 °C. Hier ist im Verlauf der thermischen Analyse eine deutliche Massenänderung der Probe ersichtlich, was auf die Zersetzung von Carbonat (CaCO_3) zu Calciumoxid und Kohlendioxid zurückzuführen ist. Es kommt in diesem Temperaturbereich zur Abspaltung von Kohlenstoffdioxid [13], [21]. Aus den Ergebnissen geht hervor, dass es durch die gezielte Karbonatisierung der sekundären Gesteinskörnung zu einer Umwandlung von Calciumhydroxid zu Calciumcarbonat kommt. In der karbonatisierten sekundären Gesteinskörnung kommt es gegenüber der sekundären Gesteinskörnung zu einem deutlichen Anstieg des Calciumcarbonatgehaltes in der Zementsteinmatrix. Die Umsetzung von Portlandit zu Calcit ist bei der sekundären Gesteinskörnung, welche aus einem Beton mit einem w/z-0,6 gewonnen wurde, stärker ausgeprägt, da hier der Konzentrationsausgleich mit der Reaktoratmosphäre schneller ablaufen kann, bedingt durch die erhöhte Kapillarporosität.

Mit Hilfe der thermischen Analysen wurden die Massen vor und nach den Peaks in der unbehandelten und behandelten Probe bestimmt. Die dabei gewonnenen Werte bilden die Grundlage für die Bestimmung der Calciumhydroxid- und Calciumcarbonatgehalte. Die Berechnung erfolgte mit den Gleichungen 4.1 und 4.2 [22].

$$\text{Ca}(\text{OH})_2 = \frac{m_{400} - m_{500}}{m_{500}} \cdot \frac{74,1}{18} \quad (4.1)$$



$$CaCO_3 = \frac{m_{550} - m_{750}}{m_{750}} \cdot \frac{100,1}{44} \quad (4.2)$$

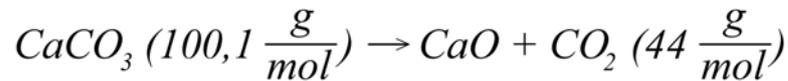


Tabelle 10: Calciumhydroxid- und Calciumcarbonatgehalte

GK	Ca(OH) ₂ [%]		CaCO ₃ [%]	
	w/z-Wert = 0,50	w/z-Wert = 0,60	w/z-Wert = 0,50	w/z-Wert = 0,60
n.c.	9,8		7,4	
c.	7,8	6,6	14,6	19,4

In Tabelle 10 sind die errechneten Werte gegenübergestellt. Es kommt durch die gezielte Karbonatisierung zu einer Reduzierung des Calciumhydroxidgehaltes. Dabei verringert sich der Gehalt bei einem w/z-Wert = 0,50 um ca. 20 % und bei einem w/z-Wert = 0,60 um ca. 30 %. Gleichzeitig steigt der Calciumcarbonatgehalt um den Faktor 2 bzw. 2,6. Die sekundäre Gesteinskörnung aus dem dichteren Beton (w/z-Wert = 0,50) karbonatisiert bei gleichen Karbonatisierungsbedingungen langsamer. Deshalb ist der Karbonatisierungsgrad der sekundären Gesteinskörnung aus dem poröseren Beton (w/z-Wert = 0,60) höher.

Röntgendiffraktometrie

Einen weiteren Nachweis für die stattgefundenene Karbonatisierung brachte die Röntgendiffraktometrie. Hier wurden die vorhandenen Mineralphasen analysiert. Die Ergebnisse sind in Tabelle 11 ersichtlich. Die Röntgendiffraktogramme der Proben sind im Anhang A enthalten.

Tabelle 11: Mineralphasen der n.c. und der c. Gesteinskörnung

Mineralphase [M.-%]	n.c.		c.	
	w/z-Wert = 0,50	w/z-Wert = 0,60	w/z-Wert = 0,50	w/z-Wert = 0,60
C3S	2,1		1,5	1,3
C2S	5,0		4,5	3,7
C3A	0,7		0,5	0,5
C4AF	0,9		0,5	0,5
Calcit	3,2		11,2	13,7
Portlandit	6,6		4,7	3,7
Quarz	57,3		54,3	56,2
Kalifeldspat	2,4		1,9	2,0
Hellglimmer	0,6		0,6	0,7
Plagioklas	1,6		1,4	1,4
Periklas	0,3		0,4	0,3

Bei der Betrachtung der Ergebnisse in Tabelle 11 und der Röntgendiffraktogramme im Anhang A zeigt sich, dass durch die Karbonatisierung der Gehalt an $\text{Ca}(\text{OH})_2$ abgebaut wird und gleichzeitig der CaCO_3 Gehalt ansteigt. Der Effekt wird durch eine höhere Kapillarporosität verstärkt. Diese Ergebnisse korrelieren mit den bisher festgestellten Erkenntnissen aus den vorangegangenen Untersuchungen.

Rasterelektronenmikroskopie

Die Rasterelektronenmikroskopie sollte Aufschluss darüber geben, inwiefern optisch eine Modifizierung der Gesteinskörnung erkennbar ist. Für diese Charakteristik wurden identische Messstellen vor und nach der Karbonatisierung untersucht. Die entsprechenden Aufnahmen mit einer 5000-fachen Vergrößerung sind in Bild 16, Bild 17 und im Anhang A hinterlegt. Die Darstellungen können belegen, dass eine Karbonatisierung im untersuchten Messbereich stattgefunden hat. Das tafelige Calciumhydroxid wurde in Calciumcarbonat umgewandelt. Darüber hinaus sind einige Bereiche mit C-S-H-Phasen durch ihre feine Nadelstruktur sichtbar, die nach der Karbonatisierung so nicht mehr erkennbar sind, was auch hier auf eine erfolgreiche Karbonatisierung zurückzuführen ist.

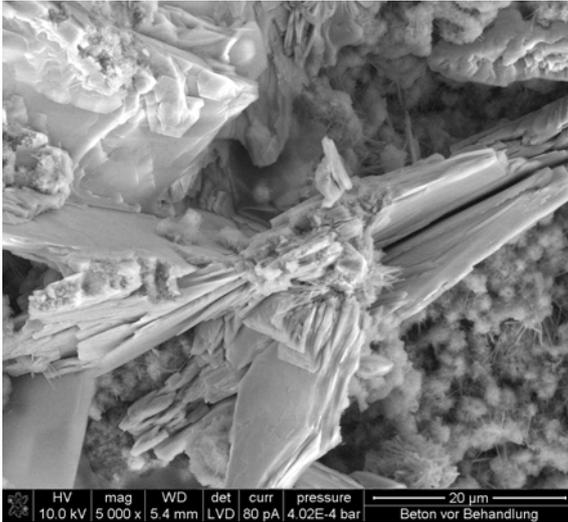


Bild 16: Rasterelektronenmikroskopie der n.c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,50), (5000-fach)



Bild 17: Rasterelektronenmikroskopie der c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,50), (5000-fach)

4.2 Herstellung größerer Mengen an karbonatisierten Rezyklaten aus Labor- und Abbruchbetonen

Für die umfangreichen Untersuchungen, welche in Abschnitt 4.1 durchgeführt wurden, war es erforderlich schon an diesem Punkt der Projektbearbeitung eine größere Menge an karbonatisierten Rezyklaten herzustellen. Weiterhin erfolgte in diesem Abschnitt eine ausführliche bautechnische Charakterisierung der behandelten und unbehandelten Rezyklate. Dabei konnte der Nachweis der Qualitätsverbesserung mittels gezielter Karbonatisierung durch die homogenere Verteilung der Rohdichten über die Kornklassen eindeutig erbracht werden.

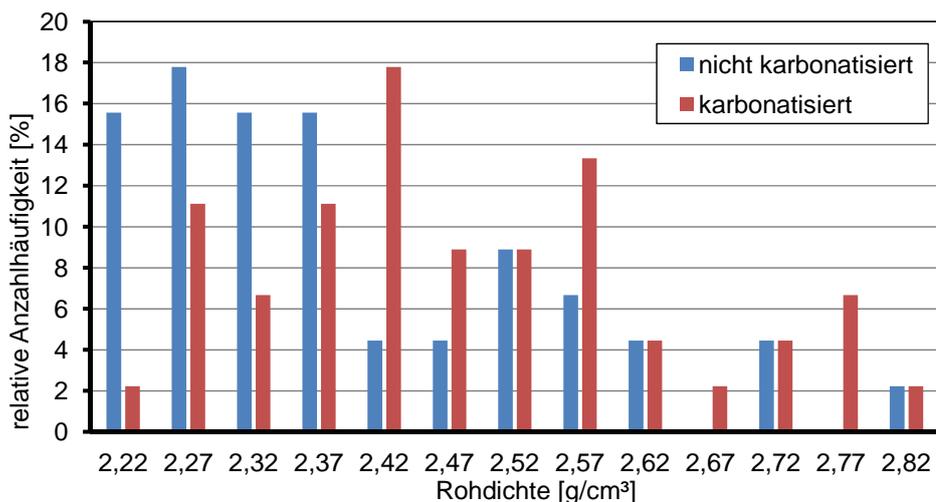


Bild 18: Dichteverteilung über die Korngrößen 2/4, 4/8 und 8/16

Mit Hilfe der Dichteanalyse über die Korngrößen 2/4, 4/8 und 8/16 konnte eine Dichteverteilung (Bild 18) vor und nach der Karbonatisierung ermittelt werden. Die entsprechenden Messwerte sind im Anhang A tabellarisch hinterlegt. Die Dichteverteilung von natürlicher und rezyklierter Gesteinskörnung unterscheiden sich dahingehend, dass die Betonrezyklate bedingt durch den anhaftenden Zementstein eine breitere Verteilung einnehmen. Werden diese Betonrezyklate gezielt karbonatisiert, kommt es zu einer Verschiebung der Dichteverteilung (Bild 18) in den Bereich der primären Gesteinskörnung. Diese Verschiebung lässt darauf schließen, dass durch die gezielte Karbonatisierung die Partikelheterogenität vermindert werden kann.

4.3 Betonherstellung aus den karbonatisierten Rezyklaten

Als Recyclingbeton wird laut DAfStb-Richtlinie [16] ein Beton bezeichnet, der einen Anteil rezyklierter Gesteinskörnung von mindestens 25 M.-% und höchstens 45 M.-% enthält. Für hochwertige Recyclingbetone, welche auch im konstruktiven Betonbau eingesetzt werden können, empfiehlt der Deutsche Ausschuss für Stahlbeton nur die Liefertypen 1 und 2 zu verwenden.

Die recycelte Gesteinskörnung ersetzt die natürliche Gesteinskörnung teilweise. Die Dauerhaftigkeitskriterien und die Druckfestigkeit der Recyclingbetone hängen dabei im wesentlichen von der Qualität der rezyklierten Gesteinskörnung ab.

Damit der Einfluss der karbonatisierten sekundären Gesteinskörnung auf die Eigenschaften von Recyclingbeton besser beurteilt werden konnte, wurde sich in der Forschungsarbeit dafür entschieden, das laut Normen und Regelwerken maximale Volumen von 45 Vol.-% sekundärer Gesteinskörnung ≥ 2 mm bei den Betonversuchen einzusetzen. Abweichend von den entsprechenden Regelwerken erfolgten weiterhin Betonversuche mit einem Gehalt an 100 Vol.-% rezyklierter Gesteinskörnung ≥ 2 mm. Die sekundäre und karbonatisierte sekundäre Gesteinskörnung wurde in dem Kornbereich 2 bis 16 mm der Sieblinie A/B16 so eingesetzt, dass es zu einer gleichmäßigen Verteilung in Anlehnung an die primäre Gesteinskörnung kam.

Für die entsprechenden Frisch- und Festbetonuntersuchungen wurden verschiedene Betone hergestellt. Die Betonzusammensetzung aus Gesteinskörnung, Zement und Wasser wurde dabei bewusst einfach gewählt, um weitere Einflüsse auf ein geringes Maß zu reduzieren. Es wurden 5 Betone mit einem CEM I 42,5 R und 5 Betone mit einem CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA und einem Wasserzementwert von 0,50 hergestellt, die sich in der Zusammensetzung ihrer Gesteinskörnung unterscheiden. In Tabelle 12 sind die Betone mit den verschiedenen Gesteinskörnungen aufgelistet. Im Anhang A ist tabellarisch die Mischungsrezeptur der Betone, die Partikelgrößenverteilung und die chemische Zusammensetzung der Zemente detailliert beschrieben. Die dabei verwendete Gesteinskörnung wurde entsprechend Sieblinie A/B16 zusammengesetzt [18]. Lediglich die Korngruppen 2/8 und 8/16 wurden entsprechend der DAfStb-Richtlinie [16] zu 45 Vol.-% bzw. 100 Vol.-% durch RC-Material ersetzt.

Tabelle 12: Bezeichnung und Bedeutung der Betone

Zementart	Bezeichnung	Bedeutung
CEM I 42,5 R	RFBI	Referenzbeton mit natürlicher Gesteinskörnung
	RBI/45	Recyclingbeton mit 45 Vol.-% sekundärer RFBI-Gesteinskörnung ≥ 2 mm
	RBKI/45	Recyclingbeton mit 45 Vol.-% karbonatisierter sekundärer RFBI-Gesteinskörnung ≥ 2 mm
	RBI/100	Recyclingbeton mit 100 Vol.-% sekundärer RFBI-Gesteinskörnung ≥ 2 mm
	RBKI/100	Recyclingbeton mit 100 Vol.-% karbonatisierter sekundärer RFBI-Gesteinskörnung ≥ 2 mm
CEM III/B 42,5 L – LH/SR/NA	RFBIII	Referenzbeton mit natürlicher Gesteinskörnung
	RBIII/45	Recyclingbeton mit 45 Vol.-% sekundärer RFBIII-Gesteinskörnung ≥ 2 mm
	RBKIII/45	Recyclingbeton mit 45 Vol.-% karbonatisierter sekundärer RFBIII-Gesteinskörnung ≥ 2 mm
	RBIII/100	Recyclingbeton mit 100 Vol.-% sekundärer RFBIII-Gesteinskörnung ≥ 2 mm
	RBKIII/100	Recyclingbeton mit 100 Vol.-% karbonatisierter sekundärer RFBIII-Gesteinskörnung ≥ 2 mm

Nach dem Aufbrechen der Betonprobekörper mit einem Backenbrecher wurde die sekundäre Gesteinskörnung in die Korngruppen 2/4, 4/8 und 8/16 klassiert. Auf weitere Aufbereitungsschritte wurde gezielt verzichtet, um keinen zusätzlichen Zementstein von der Gesteinskörnung zu entfernen. 50 Prozent der so entstandenen sekundären Gesteinskörnung wurde im Anschluss gezielt im Reaktor mit CO₂ beaufschlagt. Die Parameter CO₂-Konzentration und die Temperatur des Gasgemisches sind bedingt durch den Praxisbezug vorgegeben. Für die Versuche wurde sich an einem Abgasstrom in einem Zementwerk orientiert, welcher eine CO₂-Konzentration von ca. 20 Vol.-% und eine Temperatur von ca. 100 °C besitzt. Die Bewitterungszeit wurde anhand der vorangegangenen Versuche auf ein Maximum von 9 Stunden festgelegt.

Wie auch bei der unbehandelten Körnung wurde nach der Modifikation des Rezyklates, die Korngruppen entsprechend der Sieblinie A/B 16 wieder zusammengeführt und entsprechend in den Betonmischungen (Tabelle 12) verwendet.

4.3.1 Frischbetonuntersuchungen

Für die Charakterisierung der Frischbetonkennwerte wurden das Konsistenzverhalten, die Frischbetonrohichten und die Luftporengehalte unter Laborbedingungen an den verschiedenen Betonen ermittelt.

Konsistenzverhalten

Das Konsistenzverhalten der Betone wurde über das Ausbreitmaß zu verschiedenen Zeitpunkten bestimmt. Die entsprechenden Ergebnisse sind in Bild 19, Bild 20 und im Anhang A hinterlegt.

Durch den Einsatz von sekundärer Gesteinskörnung kommt es zu einer Verschlechterung der Konsistenzklasse gegenüber des Referenzbetons. Die karbonatisierte sekundäre Gesteinskörnung kann diesen Effekt nicht rückgängig machen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass die beiden Ausgangsrezepturen die Konsistenzklasse F3 „weich“ aufweisen. Im Vergleich dazu sinkt die Konsistenz bei den RC-Betonen auf die Klasse F2 „plastisch“. Somit kann der Einfluss von unbehandelter und behandelter Gesteinskörnung als gering eingeschätzt werden. Zwar ändert sich die Konsistenzklasse bei Austausch der Körnung, aber die Differenz beträgt nicht mehr als 40 mm. Die übliche Spannweite innerhalb einer Konsistenzklasse umfasst 60 mm. Eine optimale Einstellung der Kernfeuchte der Gesteinskörnung scheint ein übermäßiges Saugen der Rezyklate annähernd zu unterbinden.

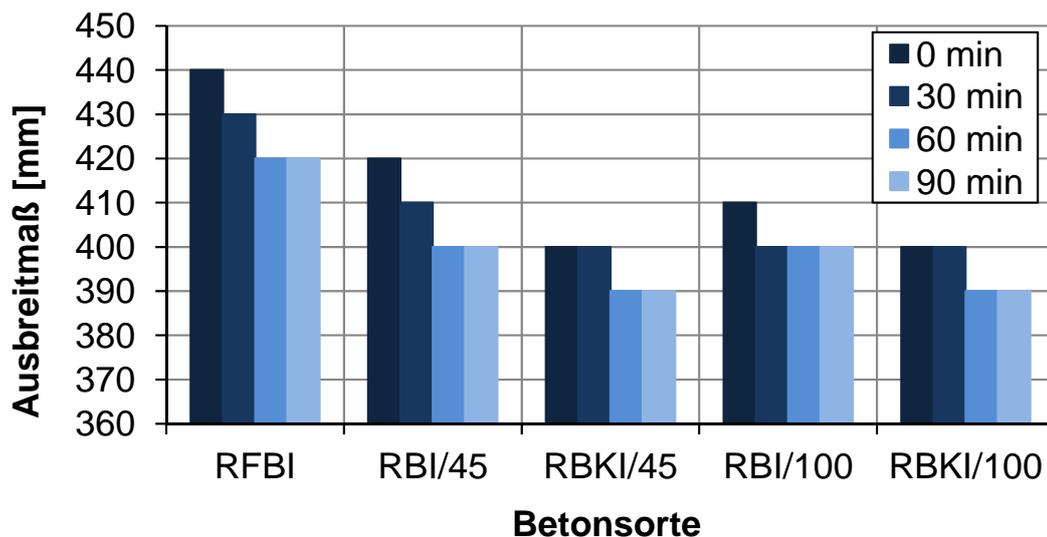


Bild 19: Ausbreitmaß der Betone (CEM I 42,5 R)

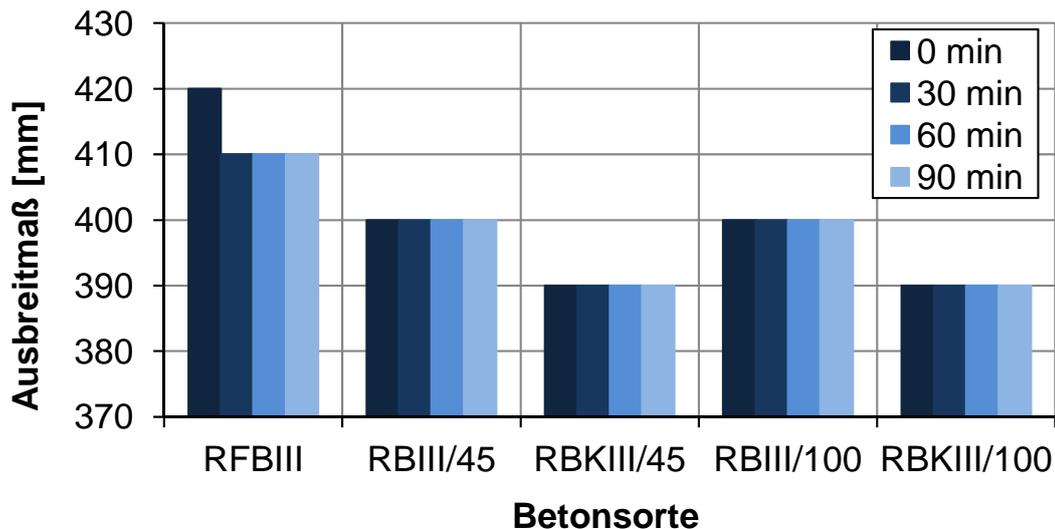


Bild 20: Ausbreitmaß der Betone (CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA)

Frischbetonrohichte

Mit der Bestimmung der Frischbetonrohichte lassen sich erste Rückschlüsse auf die zu erwartende Betondruckfestigkeit ziehen. Die gemessenen Werte der entsprechenden Frischbetondichten sind im Anhang A hinterlegt. Dabei ist zu erkennen, dass die Frischbetonrohichte mit dem Rezyklatanteil sinkt, bedingt durch den steigenden Wasser- und Porengehalt. Bei beiden Zementen nimmt die Frischbetondichte, wenn auch in einem sehr geringem Ausmaß, nach der Behandlung der Rezyklate ab.

Luftporengehalt

Die Bestimmung des Luftporengehaltes erfolgte mit dem LP-Topf. Die Beschaffenheit des Rezyklates machte die Bestimmung eines Korrekturfaktors erforderlich. Damit der Einfluss der porösen Gesteinskörnung auf den LP-Gehalt minimiert werden konnte, wurde zunächst der Luftporengehalt der Körnung bestimmt. Um eine gewisse Vergleichbarkeit zu gewährleisten, entsprach die Zusammensetzung den jeweiligen Anteilen der Betonrezeptur. Im Anschluss wurde dieser Korrekturwert von dem LP-Gehalt des Betons subtrahiert. Dieses Vorgehen ist Teil der DIN EN 12350-7 [23].

Die im Anhang A abgebildeten Diagramme verdeutlichen den Einfluss der rezyklierten und der karbonatisiert rezyklierten Gesteinskörnung auf den Luftporengehalt. Dabei fällt zunächst auf, dass der Gehalt an Luftporen unter Verwendung des aufbereiteten Materials sinkt. Betrachtet man zunächst den Portlandzement, kommt es zu einem minimalen Anstieg des LP-Gehaltes hervorgerufen durch die Karbonatisierungsreaktion. Eine grundsätzliche Aussage lässt sich daraus jedoch nicht ableiten, da sich der Unterschied zu gering darstellt und im Rahmen der Prüfstreuung liegt. Ähnlich verhält es sich bei dem Hochofenzement. Hierbei lässt sich keine Differenz zwischen rezyklierter und karbonatisiert rezyklierter Gesteinskörnung erkennen.

4.3.2 Festbetonuntersuchungen

Die Druckfestigkeit ist einer der wichtigsten Parameter des Betons. Aufgrund dessen wurde dieser aussagekräftige Kennwert zur Bewertung der RC-Betone herangezogen. Die Bestimmung der Druckfestigkeiten erfolgte nach DIN EN 12390-3 [24].

Festbetonrohichte

Die im Vorfeld der Druckfestigkeit ermittelten Festbetonrohichten zeigen ähnliche Tendenzen wie die ermittelten Frischbetonrohichten. Die Betone bei denen rezyklierte bzw. karbonatisiert rezyklierte Gesteinskörnung eingesetzt wurde, liegen in ihrer Rohdichte unterhalb der Referenzbetone. Da die Betone bis zum siebten Tag unter Wasser gelagert wurden, besitzen diese tendenziell eine leicht erhöhte Rohdichte. Differenzen ab dem 14. Tag lassen sich durch die Abwesenheit des Wassers erklären, welches nun vermindert die Kapillarporen ausfüllt. Wie auch bei den Frischbetonrohichten lässt sich hieraus keine Aussage über die gezielte Karbonatisierung treffen bzw. ableiten. Die entsprechenden Kennwerte finden sich im Anhang A wieder.

Druckfestigkeit

Die Kennwerte der Druckfestigkeiten wurden nach 2, 7, 14 und 28 Tagen bestimmt. Die entsprechenden Druckfestigkeiten sind im Bild 21, Bild 22 und Anhang A zusammengestellt.

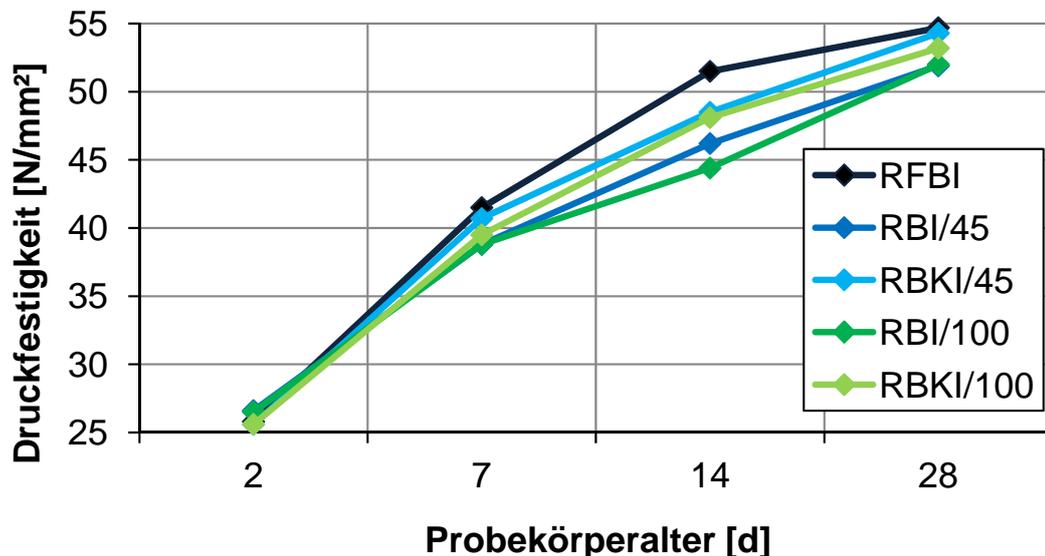


Bild 21: Vergleich der Druckfestigkeiten (CEM I 42,5 R)

Die Ergebnisse in Bild 21 verdeutlichen, dass alle Betone nach 28 d eine Druckfestigkeit $> 50,0 \text{ N/mm}^2$ erzielen. Dabei erreichen der Referenzbeton und die Betone mit karbonatisierter Gesteinskörnung jeweils die höchsten Festigkeiten. Durch den Einsatz von unbehandelter rezyklierter Gesteinskörnung kommt es

zu einer Verringerung der Druckfestigkeit, da die Rezyklate gegenüber der natürlichen Gesteinskörnung eine geringere Rohdichte aufgrund des anhaftenden Zementsteins besitzen. Grund hierfür stellt der Porenraum (insbesondere Kapillarporen) des Zementsteins dar. Der anhaftende Zementstein bringt zusätzliche Hohlräume in die neu entstehende Zementsteinmatrix, was zu einer Zunahme des Gesamtporenvolumens führt. Durch die Karbonatisierung der sekundären Gesteinskörnung kommt es zu einer Erhöhung der Rohdichte und einer Abnahme des Kapillarporenanteils, was sich positiv auf die Betondruckfestigkeit auswirkt.

Bei einem karbonatisierten Rezyklatanteil von 45 Vol.-% ist nach 28 Tagen eine Festigkeitssteigerung von 4,6 % gegenüber dem Beton mit unbehandeltem Rezyklat zu erkennen. Durch die Steigerung des Rezyklatanteils auf 100 Vol.-% kommt es zu einer Festigkeitssteigerung von 2,3 % nach 28 Tagen.

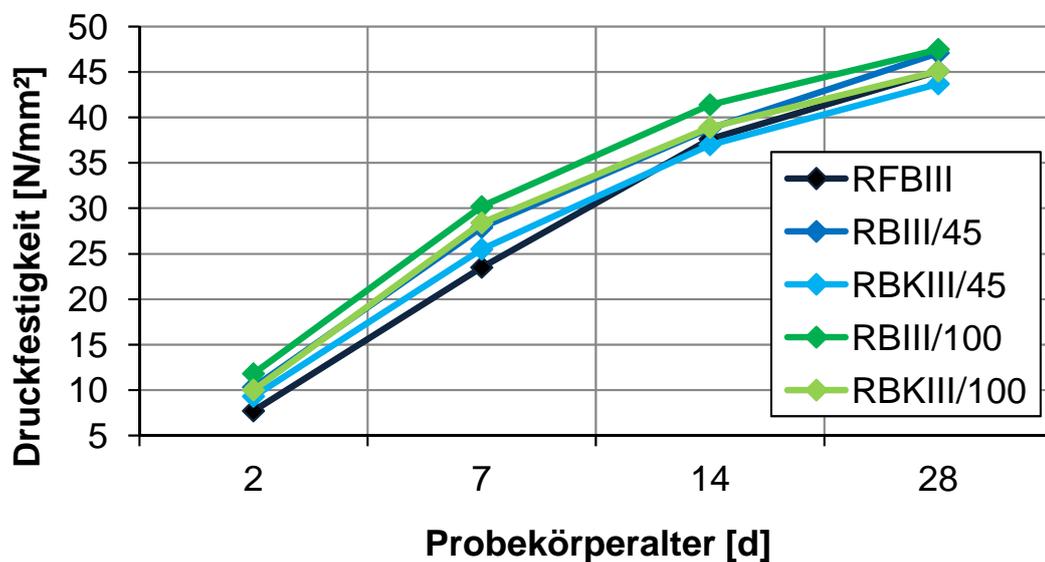


Bild 22: Vergleich der Druckfestigkeiten (CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA)

Die Druckfestigkeiten in Bild 22 zeigen, dass der Hüttensandanteil von ca. 68 % dazu führt, dass die 28 d – Festigkeiten gegenüber dem Beton mit Portlandzement herabgesetzt sind. Dadurch ist der Anstieg der Druckfestigkeit über die Zeit geringer. Durch den Einsatz von rezyklierter und rezyklierter karbonatisierter Gesteinskörnung kommt es zu einer Anhebung der Reaktionsfähigkeit, was sich positiv auf die Anfangsfestigkeiten auswirkt. Mit der Erhöhung des Rezyklatanteils wird dieser Einfluß verstärkt. Die Endfestigkeiten der Betone mit unbehandelter rezyklierter Gesteinskörnung liegen über der des Referenzbetons. Durch die Karbonatisierung der Gesteinskörnung kommt es zu keiner zusätzlichen Festigkeitssteigerung. Es tritt ein gegenteiliger Effekt ein, der die Festigkeiten wieder abfallen lässt. Das lässt sich damit erklären, dass in der Zementsteinmatrix relativ wenig Ca(OH)_2 vorhanden ist, was dazu führt, dass es sehr schnell zur Karbonatisierung der CSH-Phasen kommt. Die Karbonatisierungsprodukte aus diesen Reaktionen sind unter anderem ein poröses Kieselgel.

4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse an Betonen, Überprüfung des kinetischen Modells und Technologieentwurf

Die Erkenntnisse aus den Betonversuchen haben gezeigt, dass durch den Einsatz von karbonatisierter rezyklierter Gesteinskörnung die Betoneigenschaften verbessert werden können. Für eine praxisrelevante Anwendung ist es jedoch erforderlich, die gezielte Karbonatisierung in den Praxismaßstab zu überführen. Bild 23 zeigt einen technologischen Entwurf mit verschiedenen Verfahrensschritten. In diesem Fließschema sind markante Aufbereitungsschritte dargestellt. Der Verfahrensablauf beginnt mit der Bestückung des Aufgabebunkers mit entsprechendem Betonbruch. Der Betonbruch wird kontinuierlich einem Brecher zugeführt. Nach der Zerkleinerungsstufe wird das Material klassiert und ausreichend befeuchtet. Das Betonrezyklat wird in einen Festbettreaktor eingebracht. Nachdem der Reaktor vollständig gefüllt ist, wird dieser verschlossen. Über eine definierte Bewitterungszeit wird der Reaktor vertikal mit einem Rauchgas durchströmt. Nach der gezielten Karbonatisierung wird der Reaktor entleert und im Anschluss wieder befüllt. Damit es bei der Anlage zu keinen Stillstandszeiten kommt, ist es erforderlich, dass mehrere Festbettreaktoren parallel betrieben werden. Die Reaktoren werden dabei zeitversetzt bestückt, damit die Anlage fortlaufend arbeiten kann.

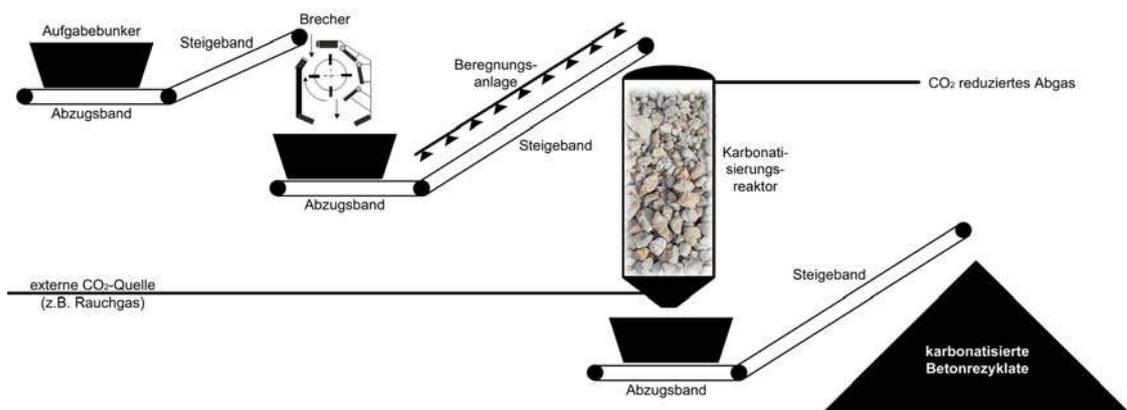


Bild 23: Verfahrensablauf der gezielten Karbonatisierung

Bei der Auswahl des Reaktortyps wurde sich stark an den Laborversuchen orientiert und ein Festbettreaktor favorisiert. Da Korngrößen bis 32 mm im Reaktor karbonatisiert werden sollen, erfolgt eine ruhende Lagerung im Reaktor, damit kein zusätzlicher Energieaufwand in den Prozess eingetragen werden muss.

Für eine externe CO₂-Quelle stehen auf dem Markt verschiedene Erzeuger zur Verfügung, wie z.B. Biomassekraftwerke, Kleinkraftwerke, Zementwerke usw.. Schon während der Laboruntersuchungen wurden verschiedene Varianten diskutiert und entsprechende Kraftwerke in Betracht gezogen. Letztendlich fiel die Wahl auf ein Zementwerk, da bei der Herstellung von Klinker genügend Abgasmenge pro Stunde anfällt und die CO₂-Konzentration für eine gezielte Karbonatisierung ausreichend ist. Die sich dadurch ergebenden Randbedingungen wurden in den Laborversuchen berücksichtigt.

Die anfallende Rauchgasmenge und das damit verbundene CO₂-Angebot in dem Zementwerk Rüdersdorf (CEMEX) lassen sich aus folgenden Mengen- und Detailangaben berechnen:

Klinkerherstellung : 220 t Klinker/h = gesamte Rauchgasmenge
 Rauchgasmenge : 2,2 m³/kg Klinker = **484000** m³/h

Rauchgastemperatur : 100 °C
 CO₂-Konzentration im Rauchgas : 20 Vol.-%
 Dichte von CO₂ bei 100°C und 1013,25 mbar : 1,441060125 kg/m³

Menge an CO₂ im Rauchgas

$$484000 \text{ m}^3/\text{h} \cdot 0,2 \text{ m}^3 \text{ CO}_2 = 96800 \text{ m}^3 \text{ CO}_2/\text{h}$$

$$M=\rho \cdot V = 1,441 \text{ kg/m}^3 \cdot 96800 \text{ m}^3 \text{ CO}_2/\text{h} = \mathbf{139,5 \text{ t CO}_2/\text{h}}$$

Der Bilanzierungsvorgang der Karbonatisierung kann mit Hilfe der Resultate aus Abschnitt 3.3.2, der dazugehörigen Tabellen in Anhang A, der Tabelle 13 und der Tabelle 14 vorgenommen werden.

Tabelle 13: CO₂-Gehalt nach der Karbonatisierung (CEM I)

Portlandzement						
Bewitterungstemperatur	Bewitterungszeit	Partikelgröße	Probenmasse (Thermoanalyse)	Masse CaCO ₃	Masse CO ₂	CO ₂ Gehalt
[°C]	[h]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]
100 °C	3	2/4	20,12	10,37	4,56	22,65
		4/8	21,63	8,30	3,65	16,87
	6	2/4	20,62	10,89	4,79	23,21
		4/8	20,33	8,68	3,82	18,77
	9	2/4	20,79	10,41	4,58	22,01
		4/8	19,28	8,86	3,89	20,20
Mittelwert						20,62

Tabelle 14: CO₂-Gehalt nach der Karbonatisierung (CEM III)

Hochofenzement						
Bewitterungstemperatur	Bewitterungszeit	Partikelgröße	Probenmasse (Thermoanalyse)	Masse CaCO ₃	Masse CO ₂	CO ₂ Gehalt
[°C]	[h]	[mm]	[g]	[g]	[g]	[%]
100 °C	3	2/4	21,27	10,14	4,46	20,96
		4/8	21,14	9,43	4,15	19,61
	6	2/4	21,58	10,12	4,45	20,61
		4/8	22,80	9,13	4,01	17,61
	9	2/4	22,22	10,08	4,43	19,94
		4/8	21,60	9,74	4,28	19,82
Mittelwert						19,76

Die Ergebnisse der Thermoanalyse und der stöimetrischen Berechnungen haben ergeben, dass ca. 20 % CO₂ in der Zementsteinmatrix durch gezielte Karbonatisierung dauerhaft gebunden werden kann, bei einer Bewitterungszeit von 3 bis 9 Stunden, einer Bewitterungstemperatur von 100 °C, einer CO₂-Konzentration von 20 Vol.-% und bei einer Korngröße von 2 bis 8mm. Überträgt man diese Ergebnisse in die Praxis auf Beton bzw. auf rezyklierte Gesteinskörnung, so kann 1 m³ Beton ca. 74 kg CO₂ aufnehmen, bei einer Zementmenge von 300 kg/m³ Beton. Die Berechnungsgrundlage bildet ein vollständig hydratisierter Zement, der im Mittel ca. 0,23 g H₂O/g Zement enthält [20].

Im Jahr 2012 betrug die anfallende Menge an Betonbruch ca. 20 Mio.m³. Dieser Wert setzt sich aus den Recyclingbaustoffen Bauschutt (40,4 Mio.t) und Straßenaufbruch (14,8 Mio.t) zusammen [10]. Bei dieser anfallenden Menge an Betonbruch wäre es möglich 1,48 Mio.t CO₂ pro Jahr durch Karbonatisierung dauerhaft in rezyklierter Gesteinskörnung chemisch zu binden.



Bild 24: Festbettreaktor in Silobauweise

Die Reaktorgröße könnte sich an marktüblichen Silos orientieren (siehe Bild 24). Das Fassungsvermögen würde ca. 35 m^3 betragen. Damit könnte ein Reaktor ca. 87 t rezyklierte Gesteinskörnung aufnehmen. Diese Menge an Betonbruch kann ca. 2,6 t CO_2 binden. Bei einer Bewitterungszeit von einer Stunde müssten ca. 54 Reaktoren in Reihe geschaltet werden, um den Abgasstrom vollständig von CO_2 zu reinigen. Da diese hohe Anzahl von Reaktoren schwer parallel zu betreiben ist und eine höhere Verweilzeit im Reaktor angestrebt werden sollte, ist es sinnvoll, einen entsprechenden Teilstrom aus dem Abgasstrom zu entnehmen. Bei einer Anzahl von 7 Reaktoren und einer Verweilzeit des Gasgemisches in der gesamten

Reaktoranlage von einer Stunde (abhängig von der Strömungsgeschwindigkeit), würde ein Achtel des Gesamtgasstromes genügen. In einem Bewitterungszeitraum könnten ca. 600 t rezyklierte Gesteinskörnung in 7 Reaktoren gezielt karbonatisiert werden. Damit während der Befüllung und der Entleerung der Reaktoren der anstehende Abgasstrom weiter genutzt werden kann, ist es empfehlenswert, eine zweite Karbonatisierungsstrecke parallel zu betreiben. Dieser wechselseitige Betrieb ermöglicht ein kontinuierliches Arbeiten.

4.5 Ergebnisse möglichen Projektpartnern für die Umsetzung vorstellen

Die Ergebnisse der Forschungsarbeit wurden möglichen Projektpartnern vorgestellt, unter anderem dem Zementhersteller CEMEX Deutschland AG. Daraufhin wurde sich entschlossen, einen Versuchsreaktor zu bauen, mit dem kleinere Mengen rezyklierte Gesteinskörnung im Abgasstrom karbonatisiert werden können.



Bild 25: Festbettreaktor im Praxisversuch

Bild 25 zeigt den Reaktor in unmittelbarer Nähe des Abgasstroms. Die Versuchsanlage wurde dabei direkt an die CO₂-Quelle angeschlossen. Mit Hilfe von Rohrleitungen wird ein Teil der Gasmenge durch den Reaktor geleitet und es kommt zu einer kontinuierlichen Durchströmung, bei der die rezyklierte Gesteinskörnung mit CO₂ beaufschlagt wird. Erste Vorversuche zeigen, dass es zu einer gezielten Karbonatisierung kommt und die Laborversuche in die praktische Anwendung überführt werden können. Für umfassendere Aussagen ist es jedoch erforderlich, mehrere Versuchsreihen durchzuführen, die auf den Laborergebnissen aufbauen. Die Übertragung der Ergebnisse in den halbertechnischen Maßstab bildet die

Voraussetzung für die Umsetzung einer großtechnischen Versuchsanlage.

5 Fazit

Nach Abschluss der Projektphase 1 haben sich aus den gewonnenen Versuchsergebnissen weitere Fragestellungen ergeben, welche nun in der 2. Projektphase aufgegriffen wurden. Dabei wurde der Schwerpunkt im ersten Teil der Projektbearbeitung auf die gezielte Karbonatisierung der Zementsteinmatrix gelegt, da eine Karbonatisierung der rezyklierten Gesteinskörnung nur in diesem Bereich erfolgen kann. Erst wenn die Randbedingungen für einen optimal verlaufenden Karbonatisierungsprozess an reinem Zementstein wissenschaftlich hinterlegt sind, können diese Versuchsbedingungen auf Modell- und Praxisbetone übertragen werden. Nach Abschluss dieser Untersuchungen ist dann eine Durchführung unter praktischen Voraussetzungen sinnvoll.

Bei der Umsetzung der Projektphase 2 wurde der erste Schwerpunkt auf die Prozessoptimierung unter Verwendung definierter Zementsteine gelegt. In diesem Abschnitt der Bearbeitung wurden Zementsteinproben dahingehend gezielt karbonatisiert, dass immer nur eine Randbedingung variiert wurde. So konnte der Einfluss dieser Variablen wissenschaftlich begründet werden und die anschließende Einstellung in Abhängigkeit von dem Karbonatisierungsverlauf vorgenommen werden. Die Untersuchungen beschränkten sich auf den Einfluss der Probenfeuchte, die Zementart, die Partikelgröße und die Bedeutung der Temperatur auf die gezielte Karbonatisierung. Die umfangreichen Versuche haben gezeigt, dass alle Parameter einen starken Einfluss auf den Ablauf der Karbonatisierung haben. Zwei Parameter sind dabei jedoch von ausschlaggebender Bedeutung. Es handelt sich zum einen um die Probenfeuchte und die Temperatur während der Karbonatisierung.

In der Zementsteinmatrix muss vor dem Karbonatisierungsprozess der richtige Feuchtegehalt eingestellt werden, da sonst die chemischen Reaktionen nicht bzw. nur bedingt ablaufen können. Dieser optimale Feuchtegehalt wurde aus über 80 Einzelproben festgestellt. Mit der dabei ermittelten optimalen Feuchte, kann die stärkste Karbonatisierung erreicht werden. Aber auch die Temperatur spielt bei Diffusions- und Lösungsvorgängen und chemischen Reaktionen eine entscheidende Rolle. Die Temperatur wurde in den zahlreichen Versuchen zwischen 25 °C und 400 °C variiert und in Abhängigkeit von der Bewitterungszeit, der Korngröße und der Massezunahme untersucht. Dabei lässt sich der optimale Temperaturbereich für die Karbonatisierung sehr genau abgrenzen. Aber auch die Partikelgröße und die Zementart nehmen einen gewissen Stellenwert in dem Karbonatisierungsprozess ein. Alle Versuchsergebnisse in dieser Phase der Projektbearbeitung zeigen, dass mit den optimalen Einstellungen der Randbedingungen der Karbonatisierungsgrad gesteigert werden kann und es dadurch zu einer Verbesserung der Materialeigenschaften kommt.

Der zweite Schwerpunkt der Forschungsarbeit beschäftigte sich mit der Übertragung der Ergebnisse auf Labor- und Praxisbetone. In diesem Teil der Arbeit war es erforderlich, eine größere Menge an karbonatisierten Rezyklaten herzustellen, damit mit diesem Material ausführliche Versuche durchgeführt werden konnten. Es erfolgten Versuchsreihen bei denen die Rezyklate vor und nach der Behandlung ausführlich bautechnisch charakterisiert wurden. Die Ergebnisse der Charakterisierung zeigen den Erfolg der gezielten Karbonatisierung. Die

Materialeigenschaften der Rezyklate verbessern sich und gleichzeitig kommt es zu einer dauerhaften Bindung von CO₂. Im Anschluss an die bautechnischen Untersuchungen wurden mit den unbehandelten und behandelten Proben Betonversuche durchgeführt. Es konnte dabei gezeigt werden, dass sich durch den Einsatz von gezielt karbonatisierter RC-Gesteinskörnung aus Portlandzementbeton die Betondruckfestigkeit erhöht im Vergleich zu unbehandelter RC-Gesteinskörnung. Nachdem die Auswertung der Ergebnisse der Betonversuche abgeschlossen war, wurde ein erster Technologieentwurf erarbeitet, der die Grundlage für halbtechnische Versuche bildet. Mit Hilfe des Zementwerkes (CEMEX) in Rüdersdorf wurde ein Reaktor gebaut und dieser an den Rauchgasstrom angebunden. Die ersten Versuche zeigen, dass es zu chemischen Umwandlungsprozessen in der Zementsteinmatrix kommt (unter dem Einfluss eines realen Rauchgas). Die Ergebnisse wurden mit den Verantwortlichen im Zementwerk ausführlich diskutiert.

In einer dritten Projektphase sollte der Forschungsschwerpunkt auf zwei Bereichen liegen. Zum einen ist der Focus weiterhin in der praktischen Durchführung zu sehen. Hier ist eine Vielzahl von Versuchsreihen abzuleisten, die sich an den praktischen Gegebenheiten orientieren. Die Grundlage für diese Versuche bilden die Ergebnisse aus dem Laborbereich. Der zweite Schwerpunkt sollte sich mit der gezielten Karbonatisierung von RC-Sanden < 2 mm befassen. Bis jetzt darf dieses Material nicht als RC-Körnung eingesetzt werden. Dadurch ergeben sich enorme Verwertungsdefizite. Die Sandfraktion ist aber von großer Bedeutung, da sich bedingt durch die Aufbereitung der Zementstein besonders in den Sandfraktionen anreichert.

6 Literatur

- [1] *Reller, A., Tuma, A., Wagner, B., Soentgen, J.:* WZU_Jahresbericht_2008. WZU Jahresbericht (2008).
- [2] *Müller, L.:* Handbuch der Elektrizitätswirtschaft. Technische, wirtschaftliche und rechtliche Grundlagen ; [inkl. Karte der Verbundnetze in Europa]. Berlin, Heidelberg, New York, Barcelona, Hongkong, London, Mailand, Paris, Singapur, Tokio: Springer 2001.
- [3] *Walter Anthony, K.:* Zeitbombe Permafrost. Spektrum der Wissenschaft (2010), S. 80–88.
- [4] *Abramjuk, M., Püschel, D.:* Umweltgerechte Baustoffe. Graue Energie und Nachhaltigkeit von Gebäuden. Stuttgart: Fraunhofer IRB Verl. 2013.
- [5] *Becker, N.:* Ressourceneffizienz der Tragwerke (2013).
- [6] *Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit:* Abfall ist Rohstoff - Informationen zur Briefmarke mit dem Plus 2012 (2012).
- [7] *Rahlwes, K.:* Recycling von Stahlbeton- und Stahlverbundkonstruktionen - Ansätze zu einer umweltökologischen Bewertung. Vorträge auf dem Deutschen Betontag 1991 DBV, Wiesbaden (1991), S. 215–247.
- [8] *Zilch, K.:* Handbuch für Bauingenieure. Technik, Organisation und Wirtschaftlichkeit. Heidelberg: Springer 2012.
- [9] *Heußner, M., Motz, H.:* Schlacken aus der Metallurgie, Band 2. Ressourceneffizienz und Stand der Technik. Neuruppin: TK-Verlag 2012.
- [10] *Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e. V.:* Monitoring-Bericht der ARGE KWTB 2012 (2015).
- [11] *Bundesministerium für Umwelt:* Abfallwirtschaft in Deutschland 2013 - Fakten, Daten, Grafiken. Publikation des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit (2012).
- [12] *Stark, J., Wicht, B.:* Dauerhaftigkeit von Beton. Berlin, Heidelberg: Imprint: Springer Vieweg 2013.
- [13] *Bier, T. A.:* Karbonatisierung und Realkalisierung von Zementstein und Beton. Karlsruhe, Karlsruhe: Inst. für Massivbau u. Baustofftechnologie 01.01.1988.
- [14] *Sui, Y.:* Untersuchungen zu den Einflussgrößen der thermisch-mechanischen Behandlung für das Recycling von Altbeton sowie Charakterisierung der entstehenden Produkte. Berlin: dissertation.de 2011.

- [15] *Wendehorst, R., Neroth, G.:* Baustoffkunde. Grundlagen, Baustoffe, Oberflächenschutz. Wiesbaden: Vieweg + Teubner 2011.
- [16] DAfStb-Richtlinie Beton nach DIN EN 206-1 und DIN 1045-2 mit rezyklierten Gesteinskörnungen nach DIN EN 12620. Teil 1: Anforderungen an den Beton für die Bemessung nach DIN 1992-1-1. Berlin [u.a.]: Beuth 2010.
- [17] Gesteinskörnungen für Beton und Mörtel. Teil 100. Rezyklierte Gesteinskörnungen. Berlin: Beuth 2002.
- [18] 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. Berlin: Beuth 2008.
- [19] Bestimmung der Rohdichte und der Wasseraufnahme. Berlin [u.a.]: Beuth 2005.
- [20] *Locher, F. W.:* Zement. Grundlagen der Herstellung und Verwendung. Düsseldorf: Verlag Bau und Technik 2000.
- [21] *Lehnhäuser, W.:* Differentialthermoanalyse im nichtmetallisch-anorganischen Bereich. S 891-897, Sprechsaal 106 1973.
- [22] *Weerdt, K. de, Haha, M. B., Le Saout, G., Kjellsen, K. O., Justnes, H., Lothenbach, B.:* Hydration mechanisms of ternary Portland cements containing limestone powder and fly ash. Cement and Concrete Research 41 (2011), S. 279–291.
- [23] DIN EN 12350-7 Prüfung von Frischbeton. Berlin: Beuth 2000.
- [24] DIN EN 12390-3 Prüfung von Festbeton. Berlin: Beuth 2009.

Anhang A (Versuchsergebnisse)

Tabelle A 1: MZ in Abhängigkeit vom WG (Probe 1 bis 24)	60
Tabelle A 2: MZ in Abhängigkeit vom WG (Probe 25 bis 48)	61
Tabelle A 3: MZ in Abhängigkeit vom WG (Probe 49 bis 69)	62
Tabelle A 4: MZ in Abhängigkeit vom WG (Probe 70 bis 81)	63
Tabelle A 5: Karbonatisierungsgrad in Abhängigkeit vom WG	64
Tabelle A 6: Karbonatisierungsgrad in Abhängigkeit vom WG	65
Tabelle A 7: relative Massezunahme in Abhängigkeit von der Temperatur (CEM I)	68
Tabelle A 8: relative Massezunahme in Abhängigkeit von der Temperatur (CEM III)	69
Tabelle A 9: Ca(OH) ₂ und CaCO ₃ Gehalte (CEM I)	70
Tabelle A 10: Ca(OH) ₂ und CaCO ₃ Gehalte (CEM III)	70
Tabelle A 11: Mischungsrezepturen der Betone	71
Tabelle A 12: MIP – Differentiales Porenvolumen (w/z-Wert = 0,50)	72
Tabelle A 13: MIP – Differentiales Porenvolumen (w/z-Wert = 0,60)	73
Tabelle A 14: Thermische Analyse - Messdaten (w/z-Wert = 0,50)	74
Tabelle A 15: Thermische Analyse - Messdaten (w/z-Wert = 0,60)	76
Tabelle A 16: Dichteanalyse Korngröße 2/4	82
Tabelle A 17: Dichteanalyse Korngröße 4/8	83
Tabelle A 18: Dichteanalyse Korngröße 8/16	84
Tabelle A 19: Mischungsrezeptur unter Verwendung von CEM I 42,5 R	85
Tabelle A 20: Mischungsrezeptur unter Verwendung von CEM III/B 42,5 L/LH/SR/NA	86
Tabelle A 21: Zusammensetzung des CEM I 42,5 R	89
Tabelle A 22: Zusammensetzung des CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA	90
Bild A 1: Porenradienverteilung von CEM I, ZS 4/8 vor und nach der Karbonatisierung	66
Bild A 2: Porenradienverteilung von CEM III, ZS 4/8 vor und nach der Karbonatisierung	66
Bild A 3: Fertigungsprozess Phase 1	67
Bild A 4: Fertigungsprozess Phase 2	67
Bild A 5: Fertigungsprozess Phase 3	67
Bild A 6: Fertigungsprozess Phase 4	67
Bild A 7: Fertigungsprozess Phase 5	67
Bild A 8: Fertigungsprozess Phase 6	67
Bild A 9: Röntgendiffraktogramm der n.c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,50 und w/z-Wert = 0,60)	78
Bild A 10: Röntgendiffraktogramm der c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,50) ..	79

Bild A 11: Röntgendiffraktogramm der c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,60) ..	80
Bild A 12: Rasterelektronenmikroskopie der n.c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,50), (5000-fach)	81
Bild A 13: Rasterelektronenmikroskopie der c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,50), (5000-fach)	81
Bild A 14: Rasterelektronenmikroskopie der n.c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,60), (5000-fach)	81
Bild A 15: Rasterelektronenmikroskopie der c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,60), (5000-fach)	81
Bild A 16: Partikelgrößenverteilung des CEM I 42,5 R	87
Bild A 17: Partikelgrößenverteilung des CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA	88
Bild A 18: Ausbreitmaß der Betone (CEM I 42,5 R)	91
Bild A 19: Ausbreitmaß der Betone (CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA)	91
Bild A 20: Frischbetondichte der Betone (CEM I 42,5 R)	92
Bild A 21: Frischbetondichte der Betone (CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA)	92
Bild A 22: Luftporengehalt der Betone (CEM I 42,5 R)	93
Bild A 23: Luftporengehalt der Betone (CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA)	93
Bild A 24: Festbetonrohichte der Betone (CEM I 42,5 R)	94
Bild A 25: Festbetonrohichte der Betone (CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA)	94
Bild A 26: Druckfestigkeiten der Betone mit natürlicher GK (RFBI)	95
Bild A 27: Druckfestigkeiten der Betone mit unbehandelter GK (RBI/45)	95
Bild A 28: Druckfestigkeiten der Betone mit karbonatisierter GK (RBKI/45)	96
Bild A 29: Druckfestigkeiten der Betone mit unbehandelter GK (RBI/100)	96
Bild A 30: Druckfestigkeiten der Betone mit karbonatisierter GK (RBKI/100)	97
Bild A 31: Druckfestigkeiten der Betone mit natürlicher GK (RFBIII)	97
Bild A 32: Druckfestigkeiten der Betone mit unbehandelter GK (RBIII/45)	98
Bild A 33: Druckfestigkeiten der Betone mit karbonatisierter GK (RBKIII/45)	98
Bild A 34: Druckfestigkeiten der Betone mit unbehandelter GK (RBIII/100)	99
Bild A 35: Druckfestigkeiten der Betone mit karbonatisierter GK (RBKIII/100)	99

Ermittlung der optimalen Probenfeuchte

Tabelle A 1: MZ in Abhängigkeit vom WG (Probe 1 bis 24)

Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert [g]	Masse nach Wasser- aufnahme [g]	Wassergehalt der Probe [%]	Trockenmasse karbonatisiert [g]	relative Masse- zunahme [g]	relative Masse- zunahme auf das Glühbeständige [%]
1 _{VV1}	4,786	4,786	0,00	4,799	0,013	0,32
2 _{VV1}	5,013	5,013	0,00	5,023	0,010	0,25
3 _{VV1}	4,885	4,885	0,00	4,901	0,016	0,38
4 _{VV1}	4,935	4,935	0,00	4,940	0,005	0,13
1 _{VV2}	5,028	5,128	1,99	5,119	0,091	2,21
2 _{VV2}	4,982	5,095	2,27	5,078	0,096	2,32
3 _{VV2}	4,862	4,952	1,85	4,952	0,090	2,19
4 _{VV2}	5,006	5,116	2,20	5,100	0,094	2,28
1 _{V45}	4,897	5,102	4,19	5,095	0,198	4,79
2 _{V45}	4,947	5,154	4,18	5,129	0,182	4,37
3 _{V45}	5,052	5,258	4,08	5,260	0,208	4,88
4 _{V45}	5,003	5,204	4,02	5,194	0,191	4,54
1 _{V46}	4,962	5,201	4,82	5,195	0,233	5,59
2 _{V46}	4,965	5,207	4,87	5,197	0,232	5,54
3 _{V46}	4,986	5,232	4,93	5,229	0,243	5,79
4 _{V46}	5,109	5,353	4,78	5,350	0,241	5,62
1 _{V47}	5,018	5,320	6,02	5,297	0,279	6,60
2 _{V47}	5,519	5,855	6,09	5,806	0,287	6,20
3 _{V47}	5,015	5,313	5,94	5,283	0,268	6,35
4 _{V47}	5,066	5,377	6,14	5,305	0,239	5,65
1 _{V48}	4,912	5,222	6,31	5,177	0,265	6,42
2 _{V48}	5,077	5,399	6,34	5,353	0,276	6,46
3 _{V48}	5,179	5,498	6,16	5,461	0,282	6,48
4 _{V48}	5,017	5,328	6,20	5,294	0,277	6,56

Tabelle A 2: MZ in Abhängigkeit vom WG (Probe 25 bis 48)

Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert [g]	Masse nach Wasser- aufnahme [g]	Wassergehalt der Probe [%]	Trockenmasse karbonatisiert [g]	relative Masse- zunahme [g]	relative Masse- zunahme auf das Glühbeständige [%]
1 _{V49}	5,118	5,436	6,21	5,411	0,293	6,81
2 _{V49}	4,985	5,303	6,38	5,272	0,287	6,85
3 _{V49}	4,998	5,314	6,32	5,287	0,289	6,88
4 _{V49}	5,166	5,488	6,23	5,471	0,305	7,01
1 _{V50}	4,989	5,324	6,71	5,300	0,311	7,39
2 _{V50}	5,089	5,425	6,60	5,384	0,295	6,89
3 _{V50}	4,990	5,319	6,59	5,299	0,309	7,34
4 _{V50}	4,974	5,309	6,74	5,299	0,325	7,72
1 _{V54}	5,042	5,391	6,92	5,434	0,392	9,22
2 _{V54}	4,877	5,225	7,14	5,161	0,284	7,03
3 _{V54}	4,908	5,255	7,07	5,297	0,389	9,37
4 _{V54}	4,898	5,245	7,08	5,276	0,378	9,15
1 _{V55}	4,940	5,308	7,45	5,349	0,409	9,76
2 _{V55}	4,882	5,242	7,37	5,259	0,377	9,15
3 _{V55}	4,845	5,204	7,41	5,261	0,416	10,10
4 _{V55}	4,874	5,233	7,37	5,276	0,402	9,73
1 _{V56}	4,851	5,207	7,34	5,255	0,404	9,85
2 _{V56}	4,935	5,334	8,09	5,341	0,406	9,74
3 _{V56}	4,942	5,344	8,13	5,385	0,443	10,55
4 _{V56}	4,840	5,243	8,33	5,281	0,441	10,70
1 _{V57}	4,909	5,326	8,49	5,414	0,505	12,17
2 _{V57}	4,920	5,342	8,58	5,416	0,496	11,95
3 _{V57}	4,889	5,308	8,57	5,424	0,535	12,89
4 _{V57}	4,846	5,261	8,56	5,371	0,525	12,77

Tabelle A 3: MZ in Abhängigkeit vom WG (Probe 49 bis 69)

Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert [g]	Masse nach Wasser- aufnahme [g]	Wassergehalt der Probe [%]	Trockenmasse karbonatisiert [g]	relative Masse- zunahme [g]	relative Masse- zunahme auf das Glühbeständige [%]
1 _{V58}	4,892	5,305	8,44	5,481	0,589	14,30
2 _{V58}	4,903	5,311	8,32	5,487	0,584	14,14
3 _{V58}	4,925	5,340	8,43	5,546	0,621	14,89
4 _{V58}	4,918	5,326	8,30	5,520	0,602	14,51
1 _{V59}	4,952	5,374	8,52	5,576	0,624	15,00
2 _{V59}	4,928	5,349	8,54	5,557	0,629	15,16
3 _{V59}	4,896	5,314	8,54	5,538	0,642	15,51
4 _{V59}	4,939	5,361	8,54	5,581	0,642	15,40
1 _{V60}	4,925	5,450	10,66	5,549	0,624	15,00
2 _{V60}	5,008	5,537	10,56	5,621	0,613	14,56
3 _{V60}	4,910	5,430	10,59	5,542	0,632	15,23
1 _{V61}	4,945	5,462	10,46	5,532	0,587	14,18
2 _{V61}	4,090	4,518	10,46	4,582	0,492	14,34
3 _{V61}	4,943	5,464	10,54	5,536	0,593	14,29
1 _{V62}	4,978	5,529	11,07	5,642	0,664	15,73
2 _{V62}	4,946	5,484	10,88	5,595	0,649	15,53
3 _{V62}	4,920	5,463	11,04	5,586	0,666	15,97
1 _{VV3}	4,867	5,468	12,35	5,139	0,272	6,58
2 _{VV3}	4,927	5,523	12,10	5,218	0,291	7,04
3 _{VV3}	4,798	5,382	12,17	5,109	0,311	7,53
4 _{VV3}	4,863	5,488	12,85	5,126	0,263	6,37

Tabelle A 4: MZ in Abhängigkeit vom WG (Probe 70 bis 81)

Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert [g]	Masse nach Wasser- aufnahme [g]	Wassergehalt der Probe [%]	Trockenmasse karbonatisiert [g]	relative Masse- zunahme [g]	relative Masse- zunahme auf das Glühbeständige [%]
1 _{VV4}	5,019	5,726	14,09	5,176	0,157	3,80
2 _{VV4}	4,968	5,659	13,91	5,129	0,161	3,89
3 _{VV4}	5,118	5,836	14,03	5,274	0,156	3,77
4 _{VV4}	4,867	5,569	14,42	5,006	0,139	3,36
1 _{VV5}	4,951	5,839	17,94	4,988	0,037	0,90
2 _{VV5}	4,859	5,731	17,95	4,900	0,041	0,99
3 _{VV5}	5,107	6,025	17,97	5,148	0,041	1,00
4 _{VV5}	5,068	5,986	18,12	5,116	0,048	1,16
1 _{VV6}	4,759	5,961	25,26	4,760	0,001	0,00
2 _{VV6}	4,824	5,962	23,59	4,823	-0,001	0,00
3 _{VV6}	4,953	6,189	24,95	4,955	0,002	0,00
4 _{VV6}	4,885	6,138	25,65	4,883	-0,002	0,00

Ermittlung der Karbonatisierungsgrade bei optimaler Probenfeuchte

Tabelle A 5: Karbonatisierungsgrad in Abhängigkeit vom WG
(Probe 25 bis 48)

Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert [g]	Masse nach Wasser- aufnahme [g]	Wassergehalt der Probe [%]	Trocken- masse karbonatisiert [g]	Masse nach dem Glühen [g]	Hydratations- grad [%]	Karbonati- sierungsgrad [%]
1 _{V49}	5,118	5,436	6,21	5,411	4,3061	93,44	88,49
2 _{V49}	4,985	5,303	6,38	5,272	4,1897	93,54	88,61
3 _{V49}	4,998	5,314	6,32	5,287	4,2065	93,41	88,51
4 _{V49}	5,166	5,488	6,23	5,471	4,3307	93,78	88,97
1 _{V50}	4,989	5,324	6,71	5,300	4,1373	94,80	90,21
2 _{V50}	5,089	5,425	6,60	5,384	4,2811	93,45	88,56
3 _{V50}	4,990	5,319	6,59	5,299	4,0829	96,08	91,40
4 _{V50}	4,974	5,309	6,74	5,299	4,0199	97,28	92,83
1 _{V54}	5,042	5,391	6,92	5,434	4,2157	94,03	90,77
2 _{V54}	4,877	5,225	7,14	5,161	4,0433	94,83	89,89
3 _{V54}	4,908	5,255	7,07	5,297	4,4413	86,88	83,99
4 _{V54}	4,898	5,245	7,08	5,276	4,1039	93,83	90,54
1 _{V55}	4,940	5,308	7,45	5,349	4,2101	92,25	89,47
2 _{V55}	4,882	5,242	7,37	5,259	4,1231	93,09	89,82
3 _{V55}	4,845	5,204	7,41	5,261	4,0641	93,72	91,16
4 _{V55}	4,874	5,233	7,37	5,276	4,1194	93,02	90,20
1 _{V56}	4,851	5,207	7,34	5,255	4,0927	93,18	90,42
2 _{V56}	4,935	5,334	8,09	5,341	4,1729	92,97	90,14
3 _{V56}	4,942	5,344	8,13	5,385	4,2568	91,27	89,09
4 _{V56}	4,840	5,243	8,33	5,281	4,1579	91,51	89,44
1 _{V57}	4,909	5,326	8,49	5,414	4,1279	93,49	92,36
2 _{V57}	4,920	5,342	8,58	5,416	4,1528	93,14	91,84
3 _{V57}	4,889	5,308	8,57	5,424	4,1859	91,82	91,25
4 _{V57}	4,846	5,261	8,56	5,371	4,1560	91,67	91,01

Tabelle A 6: Karbonatisierungsgrad in Abhängigkeit vom WG
(Probe 49 bis 69)

Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert [g]	Masse nach Wasser- aufnahme [g]	Wassergehalt der Probe [%]	Trocken- masse karbonatisiert [g]	Masse nach dem Glühen [g]	Hydratations- grad [%]	Karbonati- sierungsgrad [%]
1 _{V58}	4,892	5,305	8,44	5,481	4,1179	93,39	93,73
2 _{V58}	4,903	5,311	8,32	5,487	4,1355	93,21	93,44
3 _{V58}	4,925	5,340	8,43	5,546	4,1627	93,01	93,82
4 _{V58}	4,918	5,326	8,30	5,520	4,1790	92,52	93,02
1 _{V59}	4,952	5,374	8,52	5,576	4,1860	93,00	93,81
2 _{V59}	4,928	5,349	8,54	5,557	4,1559	93,22	94,16
3 _{V59}	4,896	5,314	8,54	5,538	4,1079	93,70	94,94
4 _{V59}	4,939	5,361	8,54	5,581	4,1509	93,54	94,69
1 _{V60}	4,925	5,450	10,66	5,549	4,1590	93,10	93,96
2 _{V60}	5,008	5,537	10,56	5,621	4,2555	92,52	93,02
3 _{V60}	4,910	5,430	10,59	5,542	4,1342	93,37	94,40
1 _{V61}	4,945	5,462	10,46	5,532	4,2245	92,02	92,22
2 _{V61}	4,090	4,518	10,46	4,582	3,4861	92,24	92,56
3 _{V61}	4,943	5,464	10,54	5,536	4,2151	92,19	92,49
1 _{V62}	4,978	5,529	11,07	5,642	4,1629	94,01	95,44
2 _{V62}	4,946	5,484	10,88	5,595	4,1493	93,71	94,96
3 _{V62}	4,920	5,463	11,04	5,586	4,1025	94,28	95,89
1 _{VV3}	4,867	5,468	12,35	5,139	4,5331	84,41	79,84
2 _{VV3}	4,927	5,523	12,10	5,218	4,5698	84,76	80,41
3 _{VV3}	4,798	5,382	12,17	5,109	4,4162	85,41	81,47
4 _{VV3}	4,863	5,488	12,85	5,126	4,5402	84,21	79,51

Untersuchungen zum Einfluss der Zementart auf die Karbonatisierung

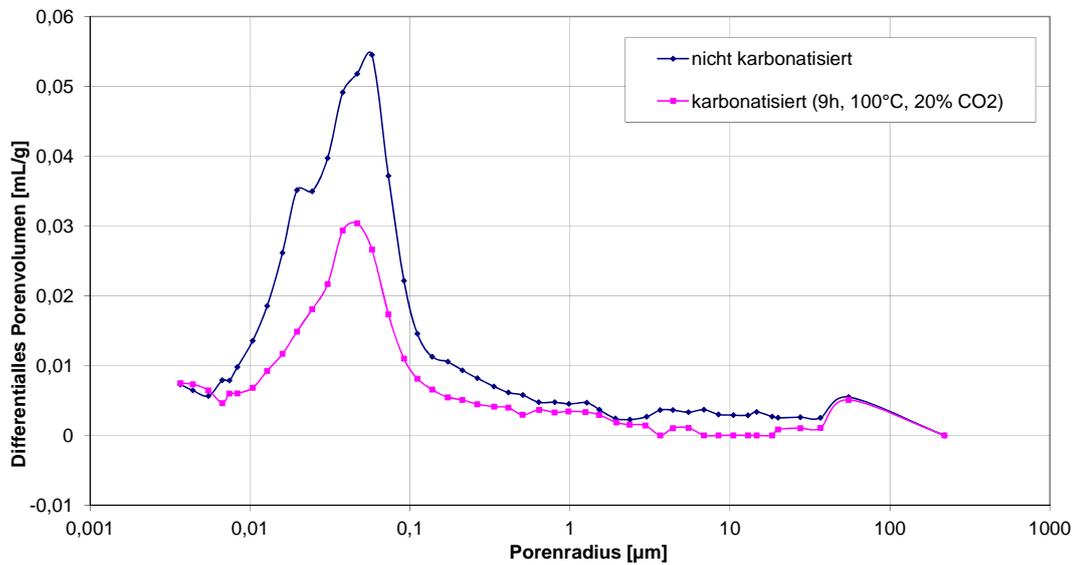


Bild A 1: Porenradienverteilung von CEM I, ZS 4/8 vor und nach der Karbonatisierung

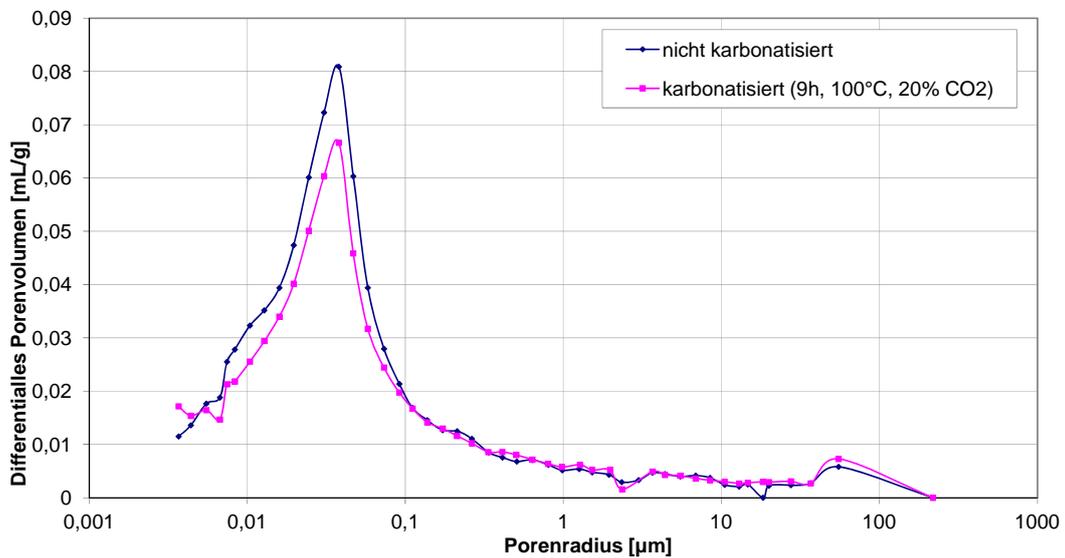


Bild A 2: Porenradienverteilung von CEM III, ZS 4/8 vor und nach der Karbonatisierung

Erweiterung der Versuchsanlage



Bild A 3: Fertigungsprozess Phase 1



Bild A 4: Fertigungsprozess Phase 2



Bild A 5: Fertigungsprozess Phase 3



Bild A 6: Fertigungsprozess Phase 4



Bild A 7: Fertigungsprozess Phase 5



Bild A 8: Fertigungsprozess Phase 6

Gezielte Karbonatisierung bei verschiedenen Temperaturen

Tabelle A 7: relative Massezunahme in Abhängigkeit von der Temperatur (CEM I)

Korn- klasse [mm]	CO ₂ Konzentration [Vol.-%]	Referenz		Wassergehalt der Probe n.c. [%]	relative Massezunahme (MZ) [kg Massezunahme/100kg Aufgabematerial] [%]	22,50	16,41	1,5896	2,5768	38,31
		Bewitterungs- zeit (BZ) [h]	Bewitterungs- temperatur (BT) [°C]							
2/4	20	3	25	22,24	1,12	21,95	16,84	1,5686	2,5465	38,40
			50	22,51	3,94	21,42	19,10	1,6141	2,5226	36,01
			100	22,39	5,17	20,51	20,16	1,6330	2,5444	35,82
			150	22,35	1,92	21,46	19,42	1,5926	2,5460	37,45
			200	22,41	1,16	20,86	17,34	1,5800	2,6991	41,46
			400	22,76	-1,50	17,76	16,39	1,6064	2,6718	39,88
		6	25	21,59	1,24	21,45	17,05	1,5551	2,5585	39,22
			50	22,93	7,80	19,73	21,89	1,6628	2,5849	35,67
			100	22,79	5,49	20,53	20,27	1,6261	2,5473	36,16
			150	22,36	2,12	21,70	16,61	1,5863	2,5530	37,87
			200	22,79	1,17	20,90	17,52	1,5709	2,6996	41,81
			400	22,96	-0,71	16,96	17,46	1,6417	2,6883	38,93
9	25	22,51	0,97	22,38	22,15	1,6846	2,6728	36,97		
	50	22,34	8,27	18,64	16,81	1,5982	2,6205	39,01		
	100	22,67	5,36	20,38	20,15	1,6341	2,6113	37,42		
	150	22,73	2,26	21,42	17,79	1,6083	2,6395	39,07		
	200	22,58	0,32	21,75	17,12	1,5764	2,5541	38,28		
	400	22,37	-0,10	15,98	17,83	1,6635	2,6932	38,23		

Tabelle A 8: relative Massezunahme in Abhängigkeit von der Temperatur (CEM III)

Korn- klasse [mm]	CO ₂ Konzentration [Vol. %]	Bewitterungs- zeit (BZ) [h]	Referenz		relative Massezunahme (MZ) [kg Massezunahme/100kg Aufgabematerial] [%]	Wasseraufnahme (WA) [%]	Glühverlust (GV) [bezogen auf das Glühbeständige] [%]	1,3934	2,7507	49,34
			Bewitterungs- temperatur (BT) [°C]	Wassergehalt der Probe n.c. [%]						
2/4	20	3	25	32,41	1,47	31,28	100,00	1,3522	2,5497	46,97
			50	32,01	3,12	29,91	100,00	1,4051	2,5948	45,85
			100	32,14	5,58	28,78	100,00	1,4484	2,5963	44,21
			150	31,59	2,58	30,60	100,00	1,4499	2,5881	43,98
			200	31,55	0,26	31,24	100,00	1,4002	2,5651	45,41
			400	32,78	-3,93	27,68	100,00	1,4323	2,6836	46,63
		6	25	32,29	1,70	31,06	100,00	1,3683	2,3558	41,92
			50	31,90	7,59	26,48	100,00	1,5025	2,6310	42,89
			100	31,78	5,86	28,26	100,00	1,4639	2,6356	44,46
			150	32,12	2,52	30,42	100,00	1,3980	2,5383	44,92
			200	31,10	0,16	31,15	100,00	1,4042	2,5455	44,84
			400	32,83	-3,97	27,56	100,00	1,4484	2,3556	38,51
9	25	32,37	1,06	31,86	100,00	1,3947	2,6905	48,16		
	50	32,64	10,12	25,60	100,00	1,5355	2,6521	42,10		
	100	32,59	6,19	28,86	100,00	1,4636	2,5612	42,85		
	150	32,80	2,71	30,90	100,00	1,3924	2,6374	47,21		
	200	32,60	0,31	32,04	100,00	1,3746	2,6130	47,39		
	400	32,49	-4,07	27,22	100,00	1,4475	2,7269	46,92		

Tabelle A 9: Ca(OH)₂ und CaCO₃ Gehalte (CEM I)

Bewitterungszeit [h]	Partikelgröße [mm]	nicht karbonatisiert		Bewitterungstemperatur																				
				25°C			50°C			100°C			150°C			200°C								
				Ca(OH) ₂ [g]	CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ [g]	CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ [g]	CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ [g]	CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ [g]	CaCO ₃ [g]							
3	2/4	4,11	3,90	3,84	5,74	2,59	8,73	2,27	10,37	3,07	6,98	3,48	5,98	4,17	3,22	4,60	3,39	5,99	2,82	8,30	3,47	5,91	3,74	5,25
	4/8	4,17	3,22	4,17	4,60	3,39	5,99	2,82	8,30	3,47	5,91	3,74	5,25	4,11	3,90	6,04	1,82	13,01	2,16	10,89	3,10	7,08	3,40	6,03
6	2/4	4,11	3,90	3,65	6,04	1,82	13,01	2,16	10,89	3,10	7,08	3,40	6,03	4,17	3,22	4,53	2,77	8,41	2,73	8,68	3,56	6,18	3,72	5,21
	4/8	4,17	3,22	4,18	4,53	2,77	8,41	2,73	8,68	3,56	6,18	3,72	5,21	4,11	3,90	13,38	1,53	14,56	2,45	10,41	3,06	7,30	3,62	6,21
9	2/4	4,11	3,90	1,71	13,38	1,53	14,56	2,45	10,41	3,06	7,30	3,62	6,21	4,17	3,22	4,14	2,31	10,51	2,92	8,86	3,50	6,40	4,00	5,38
	4/8	4,17	3,22	4,13	4,14	2,31	10,51	2,92	8,86	3,50	6,40	4,00	5,38											

Tabelle A 10: Ca(OH)₂ und CaCO₃ Gehalte (CEM III)

Bewitterungszeit [h]	Partikelgröße [mm]	nicht karbonatisiert		Bewitterungstemperatur																					
				25°C			50°C			100°C			150°C			200°C									
				Ca(OH) ₂ [g]	CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ [g]	CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ [g]	CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ [g]	CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ CaCO ₃ [g]	Ca(OH) ₂ [g]	CaCO ₃ [g]								
3	2/4	1,87	4,30	1,73	5,24	1,94	8,41	1,96	10,14	1,88	8,32	1,82	6,83	2,04	3,41	1,84	7,66	1,89	9,43	1,85	7,02	1,78	5,80	1,87	6,62
	4/8	2,04	3,41	1,84	5,62	1,97	7,66	1,89	9,43	1,85	7,02	1,78	5,80	2,04	3,41	1,96	5,45	1,82	10,12	1,81	7,41	1,78	6,62	1,87	6,56
6	2/4	1,87	4,30	1,96	5,45	1,94	11,40	1,82	10,12	1,81	7,41	1,78	6,62	2,04	3,41	2,16	4,87	1,81	9,13	1,80	6,89	1,74	6,56	1,87	6,83
	4/8	2,04	3,41	2,16	4,87	1,93	9,04	1,81	9,13	1,80	6,89	1,74	6,56	2,04	3,41	1,83	6,29	1,94	10,08	1,84	7,46	1,80	6,83	1,87	6,83
9	2/4	1,87	4,30	1,83	6,29	1,97	12,14	1,94	10,08	1,84	7,46	1,80	6,83	2,04	3,41	1,87	5,70	1,97	9,74	1,84	7,01	1,91	6,24	1,87	6,24
	4/8	2,04	3,41	1,87	5,70	1,97	10,68	1,92	9,74	1,84	7,01	1,91	6,24												

Übertragung der Ergebnisse auf Labor- und Praxisbetone

Tabelle A 11: Mischungsrezepturen der Betone

Ausgangsstoff	RFB/0,5 [kg/m³]	RFB/0,6 [kg/m³]
natürliche Gesteinskörnung 0/2	555,1	555,1
natürliche Gesteinskörnung 2/8	737,3	737,3
natürliche Gesteinskörnung 8/16	555,1	555,1
Zement CEM I 42,5 R	350	350
Wasser	175	210

Tabelle A 12: MIP – Differentiales Porenvolumen (w/z-Wert = 0,50)

w/z-Wert = 0,50			
sekundäre Gesteinskörnung		karbonatisierte sekundäre Gesteinskörnung	
Porenradius [µm]	dV/dlogR Pore Volume [ml/g]	Porenradius [µm]	dV/dlogR Pore Volume [ml/g]
218,013	0,000	218,013	0,000
55,098	0,021	55,098	0,012
36,717	0,005	36,717	0,003
27,529	0,004	27,529	0,002
20,023	0,004	20,023	0,002
18,354	0,003	18,354	0,000
14,684	0,004	14,684	0,002
12,954	0,003	12,954	0,000
10,489	0,003	10,489	0,002
8,474	0,003	8,474	0,002
6,873	0,003	6,873	0,002
5,500	0,003	5,500	0,002
4,397	0,003	4,397	0,003
3,665	0,004	3,665	0,002
3,032	0,004	3,021	0,002
2,343	0,003	2,310	0,002
1,920	0,003	1,940	0,002
1,528	0,004	1,541	0,003
1,266	0,004	1,270	0,003
0,977	0,003	0,984	0,003
0,798	0,004	0,804	0,003
0,637	0,004	0,641	0,003
0,507	0,004	0,506	0,003
0,411	0,005	0,410	0,004
0,335	0,006	0,336	0,005
0,263	0,007	0,263	0,006
0,212	0,007	0,212	0,007
0,172	0,007	0,172	0,008
0,138	0,008	0,138	0,010
0,111	0,011	0,111	0,012
0,092	0,018	0,092	0,015
0,073	0,032	0,073	0,019
0,058	0,048	0,058	0,024
0,047	0,048	0,047	0,025
0,038	0,043	0,038	0,027
0,031	0,031	0,031	0,023
0,024	0,025	0,024	0,020
0,020	0,022	0,020	0,018
0,016	0,019	0,016	0,016
0,013	0,015	0,013	0,014
0,010	0,010	0,010	0,013
0,008	0,006	0,008	0,011
0,007	0,005	0,007	0,011
0,007	0,004	0,007	0,011
0,006	0,003	0,006	0,011
0,004	0,002	0,004	0,011
0,004	0,002	0,004	0,010

Tabelle A 13: MIP – Differentiales Porenvolumen (w/z-Wert = 0,60)

w/z-Wert = 0,60			
sekundäre Gesteinskörnung		karbonatisierte sekundäre Gesteinskörnung	
Porenradius [µm]	dV/dlogR Pore Volume [ml/g]	Porenradius [µm]	dV/dlogR Pore Volume [ml/g]
218,365	0,000	218,365	0,000
55,159	0,007	55,159	0,007
36,761	0,002	36,761	0,002
27,538	0,002	27,538	0,002
20,042	0,002	20,042	0,002
18,355	0,000	18,355	0,000
14,691	0,002	14,691	0,002
12,959	0,002	12,959	0,002
10,497	0,002	10,497	0,002
8,477	0,003	8,477	0,002
6,875	0,003	6,875	0,002
5,501	0,003	5,501	0,003
4,398	0,003	4,398	0,003
3,666	0,003	3,666	0,003
1,945	0,001	3,032	0,002
1,526	0,003	2,362	0,002
1,262	0,004	1,964	0,003
0,981	0,004	1,553	0,003
0,799	0,005	1,272	0,004
0,637	0,005	0,982	0,003
0,506	0,005	0,805	0,004
0,413	0,006	0,640	0,005
0,336	0,007	0,506	0,004
0,264	0,010	0,412	0,004
0,212	0,014	0,336	0,004
0,172	0,016	0,263	0,005
0,138	0,020	0,212	0,007
0,111	0,024	0,172	0,010
0,092	0,028	0,138	0,011
0,073	0,036	0,111	0,015
0,058	0,049	0,092	0,018
0,047	0,059	0,073	0,021
0,038	0,065	0,058	0,028
0,031	0,053	0,047	0,037
0,024	0,045	0,038	0,043
0,020	0,038	0,031	0,035
0,016	0,034	0,024	0,029
0,013	0,031	0,020	0,024
0,010	0,028	0,016	0,019
0,008	0,023	0,013	0,019
0,007	0,018	0,010	0,019
0,007	0,018	0,008	0,017
0,006	0,011	0,007	0,012
0,004	0,008	0,007	0,016
0,004	0,006	0,006	0,011
		0,004	0,013
		0,004	0,012

Tabelle A 14: Thermische Analyse - Messdaten (w/z-Wert = 0,50)

Probe: ZS 2/4 n. c. Probenmenge: 20,0330mg			Probe: ZS 2/4 w/z- 0,50 Probenmenge: 19,9960mg 3h carbonatisiert bei 20% CO ₂ und 100°C		
Temperatur [°C]	Masse [%]	Abl. Masse [%/°C]	Temperatur [°C]	Masse [%]	Abl. Masse [%/°C]
0			0		
10			10		
20			20		
30			30	99,75	0,03989
40	99,65	0,02269	40	99,52	0,01937
50	99,44	0,02149	50	99,33	0,01844
60	99,21	0,02429	60	99,15	0,01897
70	98,97	0,02467	70	98,95	0,02022
80	98,72	0,0242	80	98,74	0,02158
90	98,48	0,02373	90	98,52	0,02162
100	98,25	0,02285	100	98,31	0,02046
110	98,02	0,0223	110	98,11	0,01983
120	97,8	0,02279	120	97,91	0,02053
130	97,57	0,02297	130	97,7	0,02186
140	97,35	0,02069	140	97,47	0,02374
150	97,16	0,0176	150	97,24	0,02128
160	96,99	0,01532	160	97,05	0,01738
170	96,85	0,01355	170	96,88	0,01525
180	96,72	0,01189	180	96,74	0,0134
190	96,61	0,01069	190	96,62	0,01196
200	96,51	0,01013	200	96,5	0,01122
210	96,41	0,009849	210	96,39	0,01097
220	96,31	0,009892	220	96,28	0,01082
230	96,21	0,009924	230	96,17	0,01074
240	96,11	0,01043	240	96,07	0,01094
250	96	0,0107	250	95,96	0,01118
260	95,9	0,0108	260	95,84	0,01142
270	95,79	0,01068	270	95,73	0,01147
280	95,68	0,01045	280	95,61	0,01141
290	95,58	0,01008	290	95,5	0,01106
300	95,48	0,009678	300	95,39	0,01063
310	95,39	0,009431	310	95,29	0,01019
320	95,29	0,009115	320	95,19	0,009821
330	95,2	0,009318	330	95,09	0,009812
340	95,11	0,009263	340	94,99	0,009729
350	95,01	0,009625	350	94,9	0,009876
360	94,92	0,009942	360	94,8	0,00987
370	94,82	0,009615	370	94,7	0,009421
380	94,72	0,009123	380	94,61	0,008772
390	94,63	0,008658	390	94,53	0,008092
400	94,55	0,008555	400	94,45	0,007811
410	94,46	0,009301	410	94,36	0,01095
420	94,34	0,02355	420	94,16	0,03395
430	93,87	0,06848	430	93,71	0,05251
440	93,11	0,06971	440	93,2	0,03725
450	92,65	0,01932	450	93,02	0,008905
460	92,56	0,006616	460	92,95	0,00635
470	92,5	0,005473	470	92,89	0,005704
480	92,45	0,005011	480	92,83	0,005354
490	92,4	0,005079	490	92,78	0,005393
500	92,35	0,005106	500	92,72	0,00549
510	92,29	0,005549	510	92,67	0,005722
520	92,24	0,006062	520	92,61	0,006341
530	92,17	0,006838	530	92,54	0,006965
540	92,1	0,007794	540	92,47	0,007857
550	92,02	0,009087	550	92,38	0,009041
560	91,92	0,01055	560	92,28	0,01034

Probe: ZS 2/4 n. c. Probenmenge: 20,0330mg			Probe: ZS 2/4 w/z- 0,50 Probenmenge: 19,9960mg 3h carbonatisiert bei 20% CO ₂ und 100°C		
Temperatur [°C]	Masse [%]	Abl. Masse [%/°C]	Temperatur [°C]	Masse [%]	Abl. Masse [%/°C]
570	91,81	0,01184	570	92,17	0,01177
580	91,74	0,013	580	92,05	0,01324
590	91,6	0,0151	590	91,91	0,01522
600	91,44	0,01647	600	91,74	0,01734
610	91,26	0,01947	610	91,56	0,01993
620	91,05	0,02175	620	91,34	0,02281
630	90,83	0,02303	630	91,1	0,02585
640	90,6	0,02137	640	90,83	0,02873
650	90,41	0,01935	650	90,53	0,03042
660	90,18	0,02768	660	90,21	0,03467
670	89,86	0,03374	670	89,82	0,04529
680	89,53	0,0296	680	89,3	0,05885
690	89,35	0,006344	690	88,64	0,07248
700	89,31	0,004023	700	87,86	0,08126
710	89,27	0,004174	710	87,1	0,05495
720	89,23	0,004362	720	86,91	0,003722
730	89,18	0,004501	730	86,87	0,003089
740	89,14	0,004547	740	86,84	0,002992
750	89,09	0,004481	750	86,81	0,002976
760	89,05	0,004475	760	86,79	0,002868
770	89	0,004721	770	86,76	0,002847
780	88,95	0,004894	780	86,73	0,003078
790	88,91	0,004585	790	86,7	0,003396
800	88,86	0,003889	800	86,66	0,003427
810	88,83	0,003165	810	86,63	0,003062
820	88,8	0,002698	820	86,6	0,002812
830	88,77	0,002584	830	86,57	0,002615
840	88,75	0,002498	840	86,55	0,002542
850	88,72	0,002437	850	86,52	0,002273
860	88,7	0,002427	860	86,5	0,002194
870	88,67	0,002465	870	86,48	0,002147
880	88,65	0,002425	880	86,46	0,00206
890	88,63	0,002251	890	86,44	0,002019
900	88,6	0,002054	900	86,42	0,002038
910	88,58	0,00198	910	86,4	0,00168
920	88,56	0,001936	920	86,38	0,00158
930	88,54	0,001793	930	86,37	0,001463
940	88,53	0,001651	940	86,35	0,001301
950	88,51	0,001501	950	86,34	0,001207
960	88,5	0,001497	960	86,33	0,001303
970	88,48	0,001436	970	86,31	0,001161
980	88,47	0,00148	980	86,3	0,001479
990	88,45	0,001632	990	86,28	0,001785
1000			1000		

Tabelle A 15: Thermische Analyse - Messdaten (w/z-Wer = 0,60)

Probe: ZS 2/4 n. c. Probenmenge: 20,0330mg			Probe: ZS 2/4 w/z- 0,60 Probenmenge: 20,9890mg 3h carbonatisiert bei 20% CO ₂ und 100°C		
Temperatur [°C]	Masse [%]	Abl. Masse [%/°C]	Temperatur [°C]	Masse [%]	Abl. Masse [%/°C]
0			0		
10			10		
20			20		
30			30	99,92	0,03988
40	99,65	0,02269	40	99,62	0,01849
50	99,44	0,02149	50	99,46	0,01581
60	99,21	0,02429	60	99,3	0,01662
70	98,97	0,02467	70	99,12	0,01756
80	98,72	0,0242	80	98,95	0,01814
90	98,48	0,02373	90	98,77	0,01779
100	98,25	0,02285	100	98,59	0,017
110	98,02	0,0223	110	98,43	0,0166
120	97,8	0,02279	120	98,26	0,01715
130	97,57	0,02297	130	98,08	0,01838
140	97,35	0,02069	140	97,89	0,01887
150	97,16	0,0176	150	97,71	0,01649
160	96,99	0,01532	160	97,56	0,01434
170	96,85	0,01355	170	97,43	0,01252
180	96,72	0,01189	180	97,31	0,01084
190	96,61	0,01069	190	97,21	0,0096
200	96,51	0,01013	200	97,12	0,008978
210	96,41	0,009849	210	97,03	0,008667
220	96,31	0,009892	220	96,94	0,008636
230	96,21	0,009924	230	96,85	0,008728
240	96,11	0,01043	240	96,77	0,008844
250	96	0,0107	250	96,68	0,009029
260	95,9	0,0108	260	96,59	0,009304
270	95,79	0,01068	270	96,49	0,009416
280	95,68	0,01045	280	96,4	0,009328
290	95,58	0,01008	290	96,31	0,00907
300	95,48	0,009678	300	96,22	0,008751
310	95,39	0,009431	310	96,13	0,008508
320	95,29	0,009115	320	96,05	0,008328
330	95,2	0,009318	330	95,97	0,00811
340	95,11	0,009263	340	95,89	0,00815
350	95,01	0,009625	350	95,8	0,008325
360	94,92	0,009942	360	95,72	0,008663
370	94,82	0,009615	370	95,63	0,008895
380	94,72	0,009123	380	95,54	0,008773
390	94,63	0,008658	390	95,46	0,008367
400	94,55	0,008555	400	95,37	0,008386
410	94,46	0,009301	410	95,29	0,00895
420	94,34	0,02355	420	95,19	0,0148
430	93,87	0,06848	430	94,92	0,03961
440	93,11	0,06971	440	94,46	0,04355
450	92,65	0,01932	450	94,18	0,01251
460	92,56	0,006616	460	94,1	0,006879
470	92,5	0,005473	470	94,04	0,005686
480	92,45	0,005011	480	93,98	0,005814
490	92,4	0,005079	490	93,92	0,006173
500	92,35	0,005106	500	93,86	0,006822
510	92,29	0,005549	510	93,79	0,007813
520	92,24	0,006062	520	93,7	0,009011
530	92,17	0,006838	530	93,6	0,01059
540	92,1	0,007794	540	93,49	0,01245
550	92,02	0,009087	550	93,35	0,01419
560	91,92	0,01055	560	93,2	0,01599

Probe: ZS 2/4 n. c. Probenmenge: 20,0330mg			Probe: ZS 2/4 w/z- 0,60 Probenmenge: 20,9890mg 3h carbonatisiert bei 20% CO ₂ und 100°C		
Temperatur [°C]	Masse [%]	Abl. Masse [%/°C]	Temperatur [°C]	Masse [%]	Abl. Masse [%/°C]
570	91,81	0,01184	570	93,04	0,01741
580	91,74	0,013	580	92,86	0,01851
590	91,6	0,0151	590	92,66	0,01978
600	91,44	0,01647	600	92,46	0,02099
610	91,26	0,01947	610	92,24	0,02248
620	91,05	0,02175	620	92,01	0,02471
630	90,83	0,02303	630	91,75	0,02806
640	90,6	0,02137	640	91,44	0,0336
650	90,41	0,01935	650	91,07	0,04122
660	90,18	0,02768	660	90,61	0,0502
670	89,86	0,03374	670	90,07	0,05751
680	89,53	0,0296	680	89,48	0,05875
690	89,35	0,006344	690	88,84	0,07329
700	89,31	0,004023	700	88,02	0,09031
710	89,27	0,004174	710	87,06	0,09788
720	89,23	0,004362	720	86,21	0,04492
730	89,18	0,004501	730	86,1	0,004401
740	89,14	0,004547	740	86,06	0,004081
750	89,09	0,004481	750	86,02	0,003754
760	89,05	0,004475	760	85,99	0,00348
770	89	0,004721	770	85,95	0,003221
780	88,95	0,004894	780	85,92	0,003295
790	88,91	0,004585	790	85,89	0,003684
800	88,86	0,003889	800	85,85	0,00382
810	88,83	0,003165	810	85,81	0,003575
820	88,8	0,002698	820	85,78	0,002983
830	88,77	0,002584	830	85,75	0,002712
840	88,75	0,002498	840	85,72	0,002586
850	88,72	0,002437	850	85,7	0,002498
860	88,7	0,002427	860	85,67	0,002518
870	88,67	0,002465	870	85,65	0,002361
880	88,65	0,002425	880	85,62	0,002301
890	88,63	0,002251	890	85,6	0,002289
900	88,6	0,002054	900	85,58	0,002314
910	88,58	0,00198	910	85,56	0,002042
920	88,56	0,001936	920	85,54	0,001948
930	88,54	0,001793	930	85,52	0,001837
940	88,53	0,001651	940	85,5	0,001666
950	88,51	0,001501	950	85,48	0,001508
960	88,5	0,001497	960	85,47	0,001392
970	88,48	0,001436	970	85,46	0,001428
980	88,47	0,00148	980	85,44	0,001629
990	88,45	0,001632	990	85,42	0,00179
1000			1000		

Bild A 9: Röntgendiffraktogramm der n.c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,50 und w/z-Wert = 0,60)

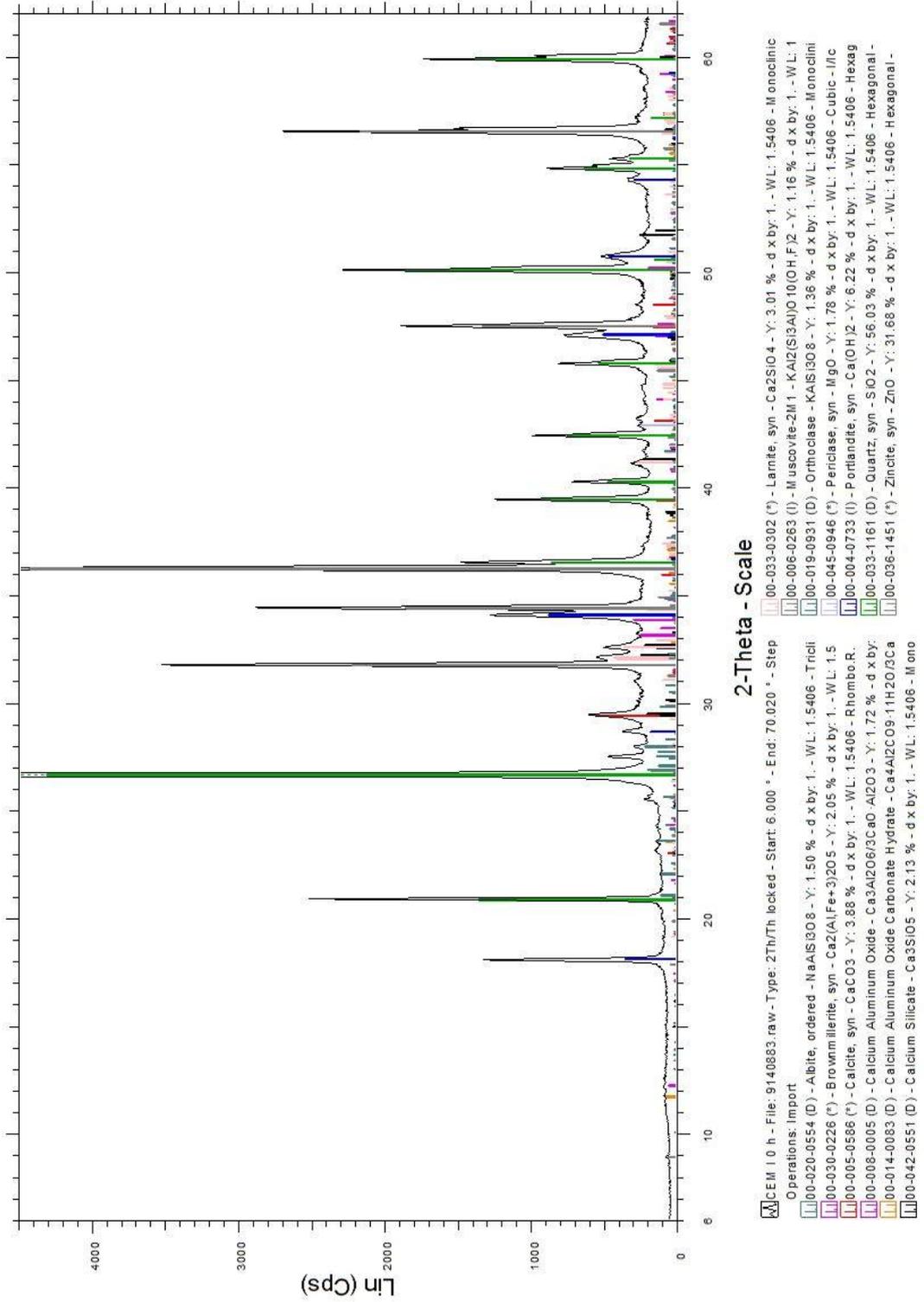


Bild A 10: Röntgendiffraktogramm der c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,50)

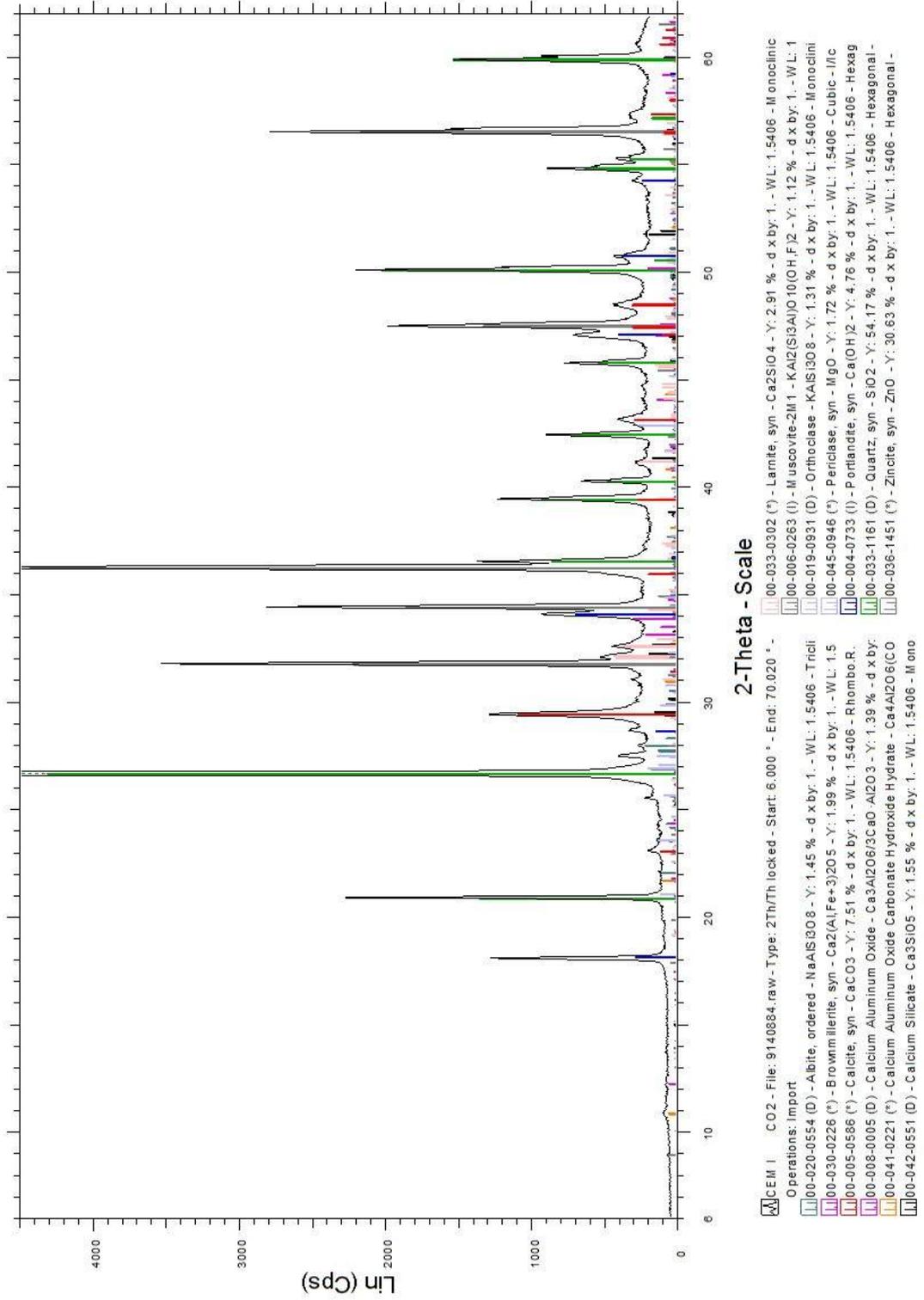
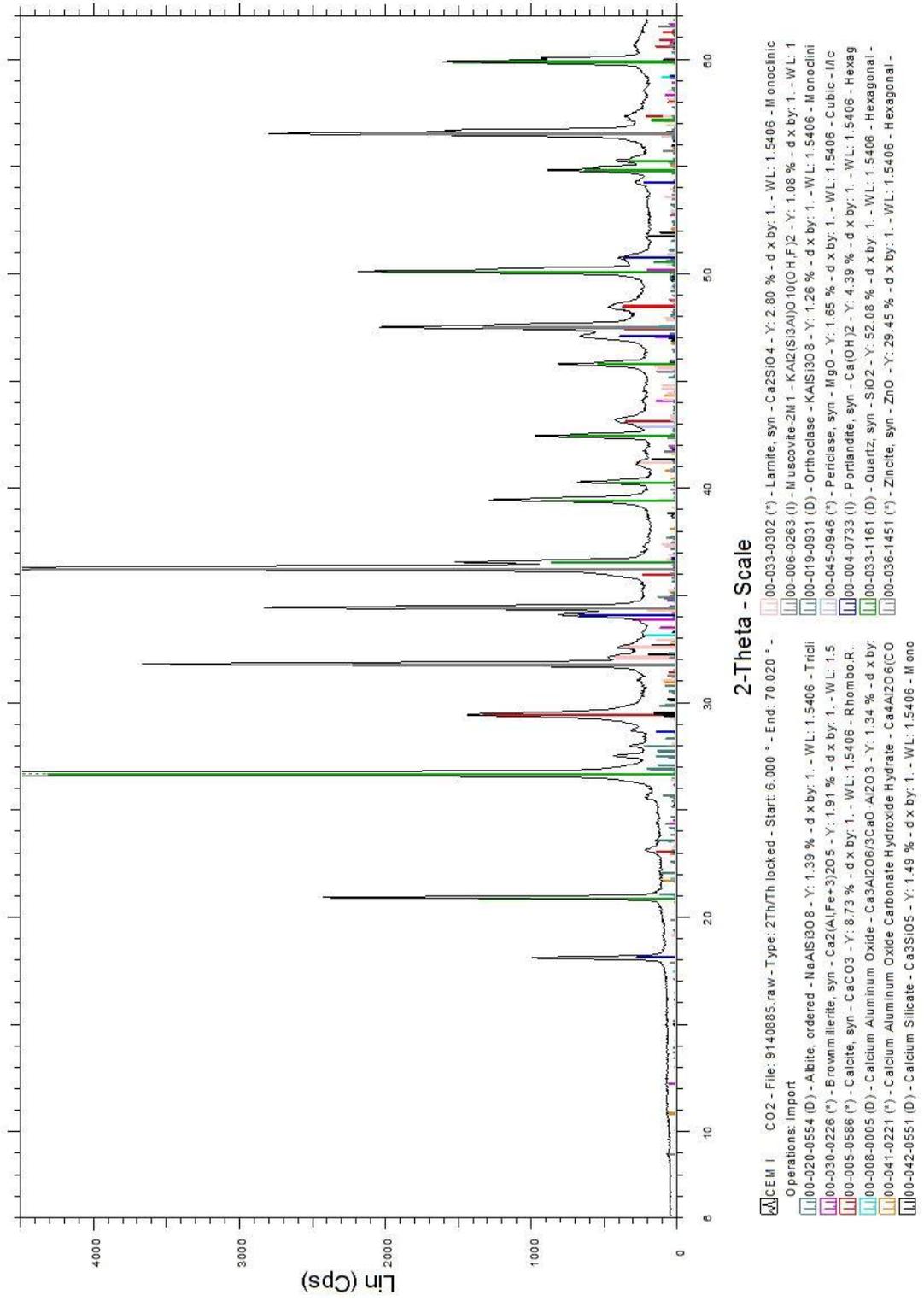


Bild A 11: Röntgendiffraktogramm der c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,60)



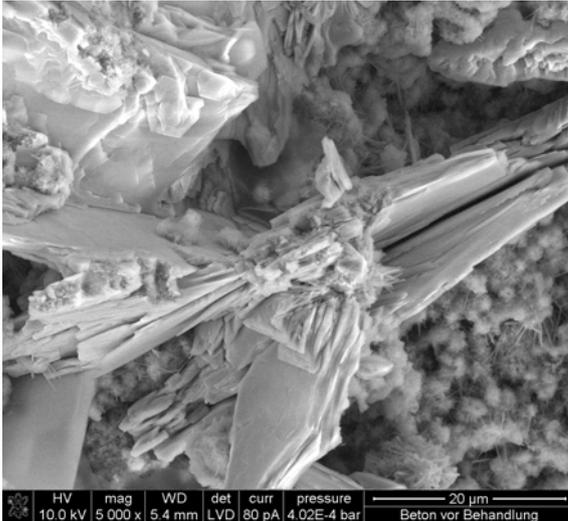


Bild A 12: Rasterelektronenmikroskopie der n.c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,50), (5000-fach)

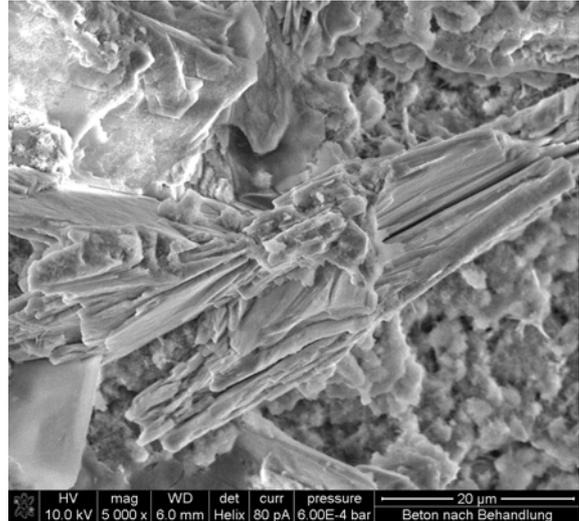


Bild A 13: Rasterelektronenmikroskopie der c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,50), (5000-fach)

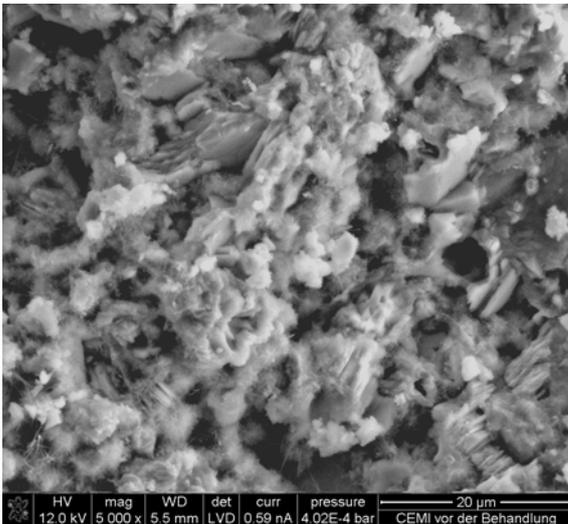


Bild A 14: Rasterelektronenmikroskopie der n.c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,60), (5000-fach)

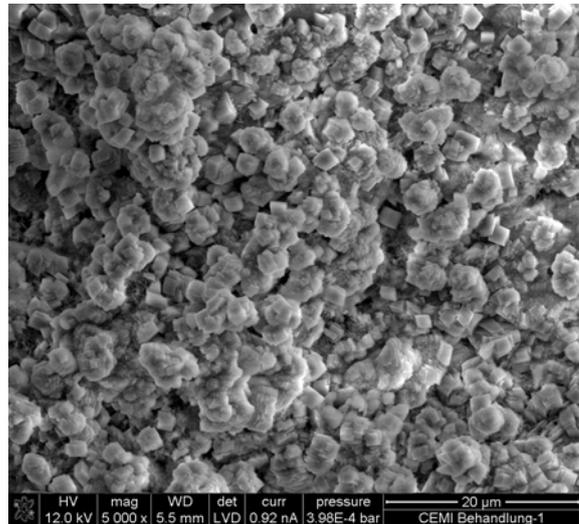


Bild A 15: Rasterelektronenmikroskopie der c. Gesteinskörnung (w/z-Wert = 0,60), (5000-fach)

Tabelle A 18: Dichteanalyse Korngröße 8/16

Klassen	8/16				8/16				8/16								
	Klassenmittelwert	absolute Häufigkeit	relative Häufigkeit	Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung	Dichte der natürlichen GK	Klassen	Klassenmittelwert	absolute Häufigkeit	relative Häufigkeit	Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung	Dichte der sekundäre GK	Klassen	Klassenmittelwert	abs. Häufigkeit	rel. Häufigkeit	Wahrscheinlichkeitsdichteverteilung	Dichte der karbo. sekundären GK
2,60 - 3,00	2,80	2	0,50	1,25	2,64	2,20 - 2,24	2,22	1	0,07	1,67	2,24	2,20 - 2,24	2,22	0	0,00	0,00	2,40
3,01 - 3,41	3,21	2	0,50	1,25	2,65	2,25 - 2,29	2,27	2	0,13	3,33	2,27	2,25 - 2,29	2,27	0	0,00	0,00	2,40
3,42 - 3,82	3,62			0,00	3,08	2,30 - 2,34	2,32	3	0,20	5,00	2,28	2,30 - 2,34	2,32	0	0,00	0,00	2,42
					3,09	2,35 - 2,39	2,37	4	0,27	6,67	2,30	2,35 - 2,39	2,37	0	0,00	0,00	2,45
						2,40 - 2,44	2,42	1	0,07	1,67	2,31	2,40 - 2,44	2,42	3	0,20	5,00	2,46
						2,45 - 2,49	2,47	0	0,00	0,00	2,32	2,45 - 2,49	2,47	3	0,20	5,00	2,49
						2,50 - 2,54	2,52	0	0,00	0,00	2,35	2,50 - 2,54	2,52	1	0,07	1,67	2,53
						2,55 - 2,59	2,57	0	0,00	0,00	2,39	2,55 - 2,59	2,57	1	0,07	1,67	2,59
						2,60 - 2,64	2,62	1	0,07	1,67	2,39	2,60 - 2,64	2,62	1	0,07	1,67	2,64
						2,65 - 2,69	2,67	0	0,00	0,00	2,39	2,65 - 2,69	2,67	0	0,00	0,00	2,70
						2,70 - 2,74	2,72	2	0,13		2,42	2,70 - 2,74	2,72	2	0,13	3,33	2,73
						2,75 - 2,79	2,77	0	0,00		2,64	2,75 - 2,79	2,77	3	0,20	5,00	2,75
						2,80 - 2,84	2,82	1	0,07		2,70	2,80 - 2,84	2,82	1	0,07	1,67	2,75
						2,85 - 2,89	2,87				2,72	2,85 - 2,89	2,87				2,77
					4						2,81						2,83
					4						15						15
					4						15						15

Betonherstellung aus den karbonatisierten Rezyklaten

Tabelle A 19: Mischungsrezeptur unter Verwendung von CEM I 42,5 R

Ausgangsstoff	RFBI [kg/m³]	RBI/45 [kg/m³]	RBKI/45 [kg/m³]	RBI/100 [kg/m³]	RBKI/100 [kg/m³]
natürliche Gesteinskörnung 0/2	552,4	552,4	552,4	552,4	552,4
natürliche Gesteinskörnung 2/8	730,9	402,0	402,0	-	-
natürliche Gesteinskörnung 8/16	548,2	301,5	301,5	-	-
sekundäre Gesteinskörnung 2/4	-	106,1	-	235,9	-
sekundäre Gesteinskörnung 4/8	-	182,5	-	405,5	-
sekundäre Gesteinskörnung 8/16	-	225,3	-	500,6	-
karbonatisierte sekundäre Gesteinskörnung 2/4	-	-	108,9	-	242,1
karbonatisierte sekundäre Gesteinskörnung 4/8	-	-	184,8	-	410,6
karbonatisierte sekundäre Gesteinskörnung 8/16	-	-	226,4	-	503,1
Zement CEM I 42,5 R	350	350	350	350	350
Wasser	175	175	175	175	175

Tabelle A 20: Mischungsrezeptur unter Verwendung von CEM III/B 42,5 L/LH/SR/NA

Ausgangsstoff	RFBIII [kg/m³]	RBIII/45 [kg/m³]	RBKIII/45 [kg/m³]	RBIII/100 [kg/m³]	RBKIII/100 [kg/m³]
natürliche Gesteinskörnung 0/2	552,4	552,4	552,4	552,4	552,4
natürliche Gesteinskörnung 2/8	730,9	402,0	402,0	-	-
natürliche Gesteinskörnung 8/16	548,2	301,5	301,5	-	-
sekundäre Gesteinskörnung 2/4	-	106,1	-	235,9	-
sekundäre Gesteinskörnung 4/8	-	182,5	-	405,5	-
sekundäre Gesteinskörnung 8/16	-	225,3	-	500,6	-
karbonatisierte sekundäre Gesteinskörnung 2/4	-	-	108,9	-	242,1
karbonatisierte sekundäre Gesteinskörnung 4/8	-	-	184,8	-	410,6
karbonatisierte sekundäre Gesteinskörnung 8/16	-	-	226,4	-	503,1
Zement CEM III/B 42,5 L/LH/SR/NA	350	350	350	350	350
Wasser	175	175	175	175	175

Bild A 16: Partikelgrößenverteilung des CEM I 42,5 R



Partikelgrößenverteilung – CEM I 42,5 R, Z 608

Messgerät: **LS Partikelgrößenanalysator
 COULTER LS 13320 mit PIDS**

Ausgewählte Datenpunkte der
 Verteilung - Klasseneinteilung
 nach R5 gewählt:

Messprinzip: Laserbeugung und PIDS-Technologie
 im Submikronbereich
 Messbereich: 0,04...2000 µm mit insgesamt 116 Größenklassen
 Messflüssigkeit: Isopropanol
 Dispergierung: 2 min interner Ultraschall

Partikelgröße [µm]	Durchgang [Vol-%]
0,04	0,00
0,063	0,06
0,1	0,52
0,16	1,54
0,25	2,97
0,4	4,99
0,63	7,47
1	10,59
1,6	14,54
2,5	19,17
4	25,33
6,3	33,41
10	44,54
16	58,23
25	73,05
40	89,34
63	98,10
100	99,54
125	99,81
140	99,92
160	99,98
250	100,00

Statistische Auswertung:

Anzahl der Messungen: 2

mittlere Korngröße	Modalwert	Median- wert	Partikelgröße bei 10 % Durchgang	Partikelgröße bei 90 % Durchgang	Lage- para- meter	Steig- ungs- maß
X_m [µm]	X_{mod} [µm]	X_{50} [µm]	X_{10} [µm]	X_{90} [µm]	X' [µm]	n [-]
17,50	28,70	12,15	0,92	40,97	17,80	0,82

- X_m = mittlere Partikelgröße berechnet als gewogenes arithmetisches Mittel
 - X_{mod} = Partikelgröße, die am häufigsten vorhanden ist
 - X_{50} = Maximum der Häufigkeitsfunktion
 - X_{10} = Partikelgröße bei 50 % Durchgang
 - X_{10} = Partikelgröße bei 10 % Durchgang
 - X_{90} = Partikelgröße bei 90 % Durchgang
 - X' = Lageparameter der RRSB - Verteilung
 - n = Steigungsmaß der RRSB - Verteilung
- Die Parameter der RRS - Verteilung wurden durch lineare Regression mit PMP-Compact berechnet.

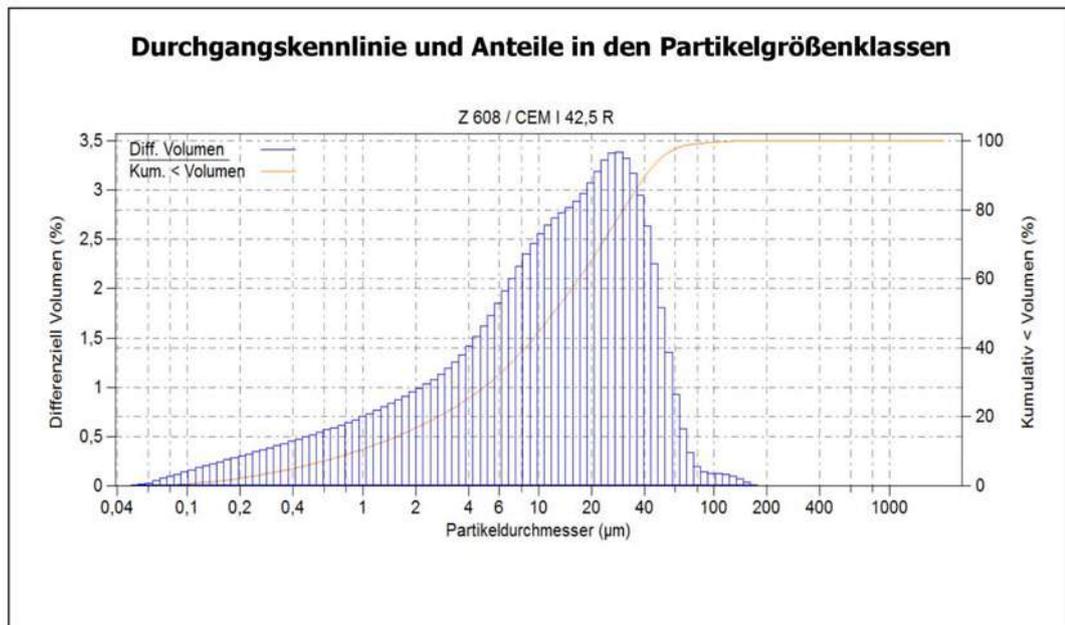


Bild A 17: Partikelgrößenverteilung des CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA



Partikelgrößenverteilung – CEM III/B 42,5 L LH/SR/NA, Z 609

Messgerät: **LS Partikelgrößenanalysator
COULTER LS 13320 mit PIDS**

Ausgewählte Datenpunkte der Verteilung - Klasseneinteilung nach R5 gewählt:

Messprinzip: Laserbeugung und PIDS-Technologie im Submikronbereich
 Messbereich: 0,04...2000 µm mit insgesamt 116 Größenklassen
 Messflüssigkeit: Isopropanol
 Dispergierung: 4 min interner Ultraschall

Partikelgröße [µm]	Durchgang [Vol-%]
0,04	0,00
0,063	0,05
0,1	0,51
0,16	1,51
0,25	2,98
0,4	5,15
0,63	8,01
1	11,90
1,6	17,15
2,5	23,46
4	31,35
6,3	40,42
10	51,26
16	63,32
25	75,87
40	89,58
63	97,36
100	98,97
125	99,55
140	99,78
160	99,94
250	100,00

Statistische Auswertung:

Anzahl der Messungen: 2

mittlere Korngröße	Modalwert	Medianwert	Partikelgröße bei 10 % Durchgang	Partikelgröße bei 90 % Durchgang	Lageparameter	Steigungsmaß
X_m [µm]	X_{mod} [µm]	X_{50} [µm]	X_{10} [µm]	X_{90} [µm]	X' [µm]	n [-]
16,57	26,14	9,51	0,81	40,71	15,09	0,76

- X_m = mittlere Partikelgröße berechnet als gewogenes arithmetisches Mittel
 - X_{mod} = Partikelgröße, die am häufigsten vorhanden ist
 - X_{50} = Maximum der Häufigkeitsfunktion
 - X_{10} = Partikelgröße bei 50 % Durchgang
 - X_{90} = Partikelgröße bei 10 % Durchgang
 - X_{90} = Partikelgröße bei 90 % Durchgang
 - X' = Lageparameter der RRSB - Verteilung
 - n = Steigungsmaß der RRSB - Verteilung
- Die Parameter der RRS - Verteilung wurden durch lineare Regression mit PMP-Compact berechnet.

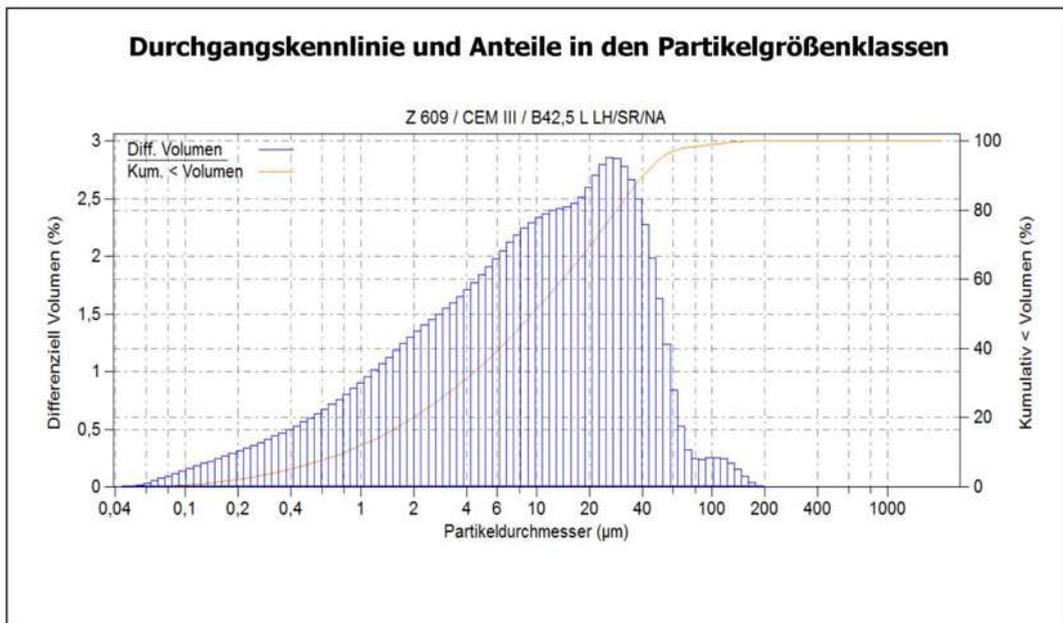


Tabelle A 21: Zusammensetzung des CEM I 42,5 R

Hersteller	Rüdersdorf / CEMEX Ostzement		
Proben-Nr.	Z 608		
Liefertermin	12.03.2015		
Dichte		g/cm ³	3,111
Spez.Oberfläche	AO	cm ² /g	3760
Erstarren Beginn	EB	h:min	02:30
Erstarren Ende	EE	h:min	03:30
Wasseranspruch	WA	%	28,8
Raumbeständigkeit		mm	1,75
Druckfestigkeit	RD 2d	N/mm ²	33,0
	RD 7d	N/mm ²	45,4
	RD 28d	N/mm ²	53,3
Biegezugfest.	RBZ 2d	N/mm ²	6,2
	RBZ 7d	N/mm ²	7,2
	RBZ 28d	N/mm ²	8,7
Trockenverlust	TV	%	0
Glühverlust	GV	%	2,7
SiO ₂		%	20,3
Al ₂ O ₃		%	5,3
Fe ₂ O ₃		%	2,4
CaO		%	62,5
MgO		%	2,1
MnO		%	0,03
TiO ₂		%	0,22
K ₂ O-gesamt		%	0,98
K ₂ O-wasserlöslich		%	0,70
Na ₂ O-gesamt		%	0,32
Na ₂ O-wasserlöslich		%	0,14
SO ₃		%	3,3
S		%	
wl. Cl		%	0,035
CaO frei		%	1,3
Cr ⁶⁺		%	
CaCO ₃		%	3,34
Kalkstandard	KSt I		94
Kalkstandard (+Kor. CaO frei)	KSt Ia		92
Silikatmodul	SM		2,6
Tonerdemodul	TM		2,2
Sulfatisierungsg.	SG		
Natriumäquivalent	N		0,96
			nach Bogue
C ₃ S		%	46,4
C ₂ S		%	23,2
C ₃ A		%	10,0
C ₄ AF		%	7,3

Tabelle A 22: Zusammensetzung des CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA

Zement			CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA
Hersteller			Rüdersdorf / CEMEX Ostzement
Proben-Nr.			Z 609
Liefertermin			12.03.2015
Dichte		g/cm ³	2,971
Spez. Oberfläche	AO	cm ² /g	4910
Erstarren Beginn	EB	h:min	03:20
Erstarren Ende	EE	h:min	05:05
Wasseranspruch	WA	%	30,0
Raumbeständigkeit		mm	1,75
Druckfestigkeit	RD 2d	N/mm ²	12,7
	RD 7d	N/mm ²	33,9
	RD 28d	N/mm ²	49,7
Biegezugfest.	RBZ 2d	N/mm ²	3,2
	RBZ 7d	N/mm ²	6,9
	RBZ 28d	N/mm ²	8,8
Trockenverlust	TV	%	0,2
Glühverlust	GV	%	0,8
SiO ₂		%	30,3
Al ₂ O ₃		%	9,1
Fe ₂ O ₃		%	1,1
CaO		%	48,6
MgO		%	6,6
MnO		%	0,11
TiO ₂		%	0,5
K ₂ O-gesamt		%	0,65
K ₂ O-wasserlöslich		%	0,28
Na ₂ O-gesamt		%	0,40
Na ₂ O-wasserlöslich		%	0,08
SO ₃		%	2,1
S		%	0,66
wl. Cl		%	0,019
CaO frei		%	0,0
Cr ⁶⁺		%	

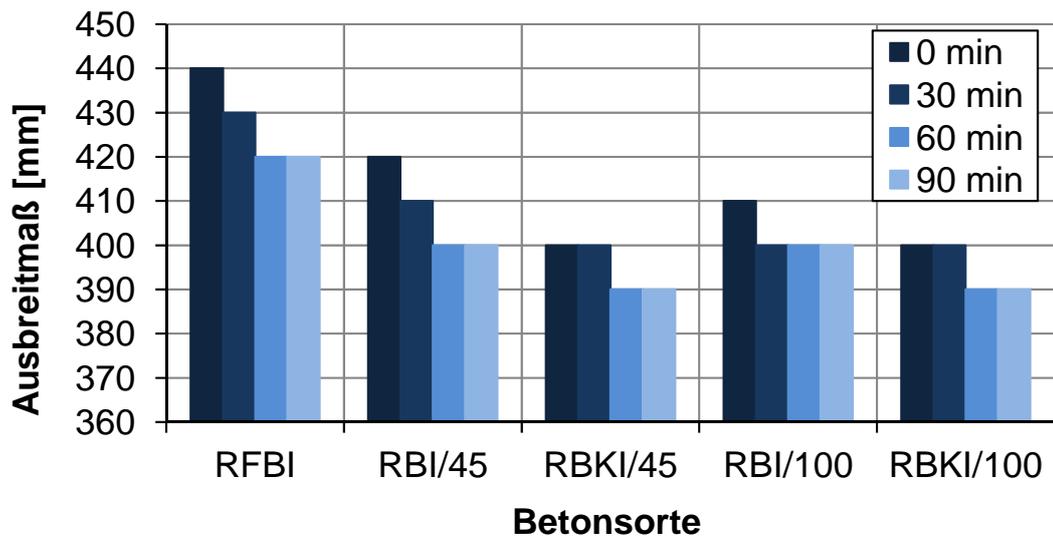


Bild A 18: Ausbreitmaß der Betone (CEM I 42,5 R)

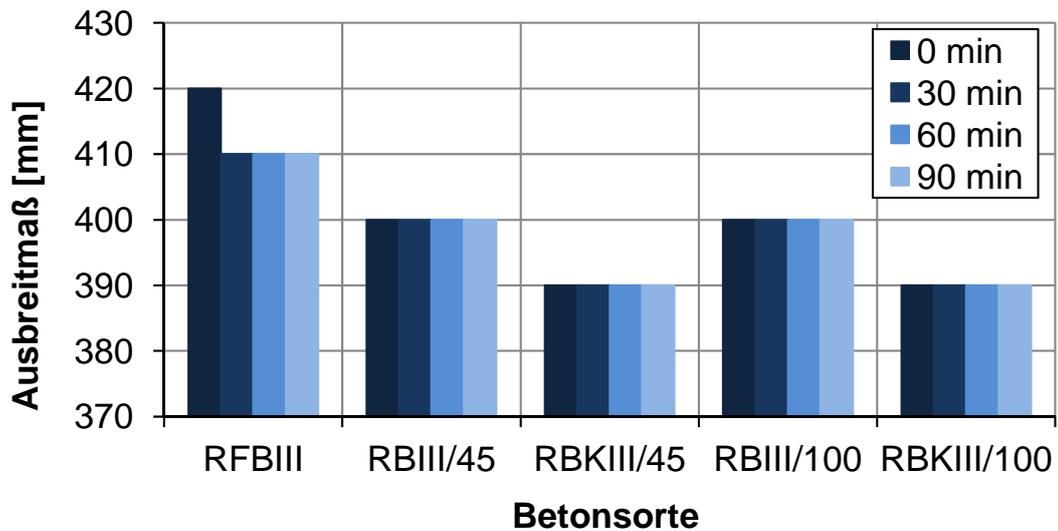


Bild A 19: Ausbreitmaß der Betone (CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA)

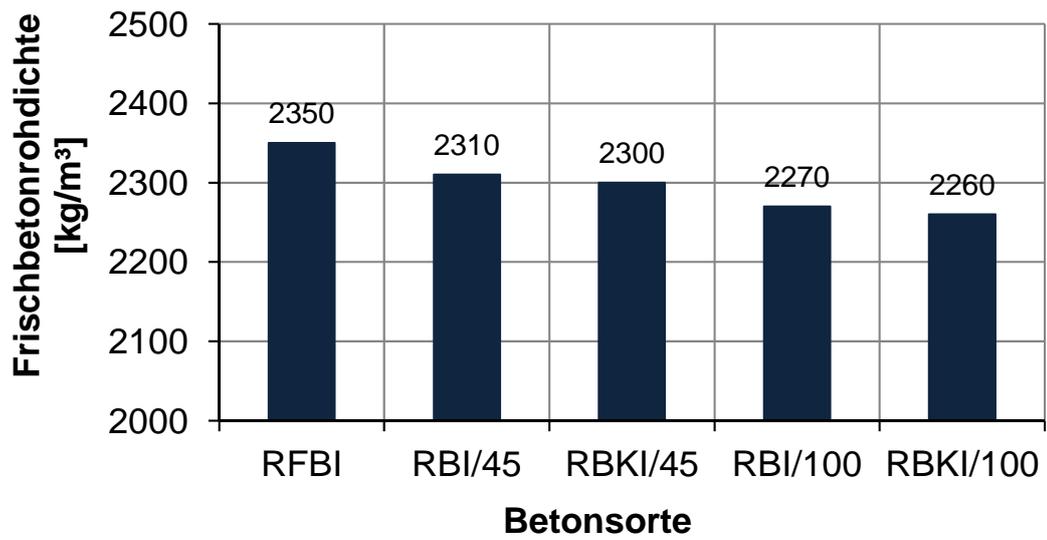


Bild A 20: Frischbetondichte der Betone (CEM I 42,5 R)

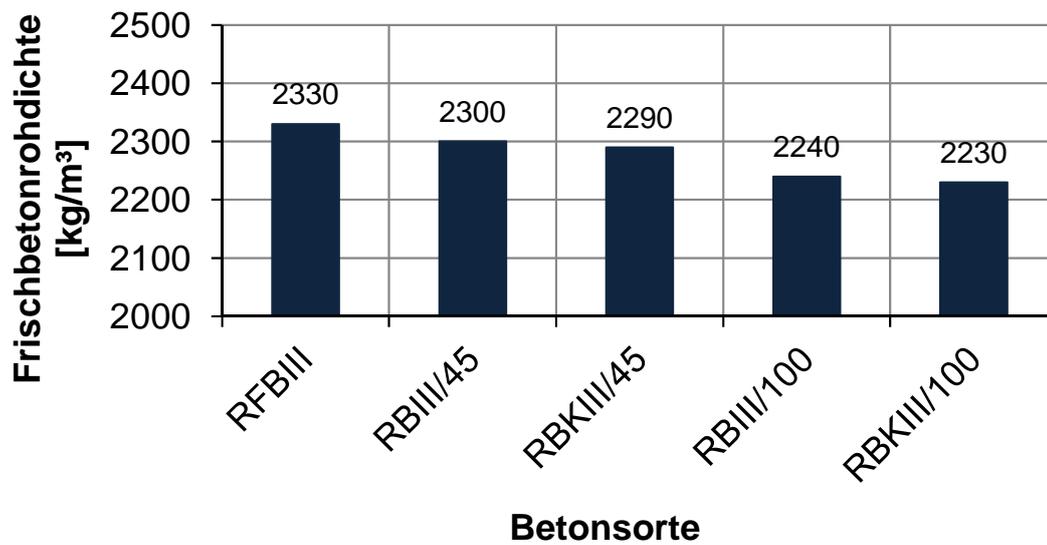


Bild A 21: Frischbetondichte der Betone (CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA)

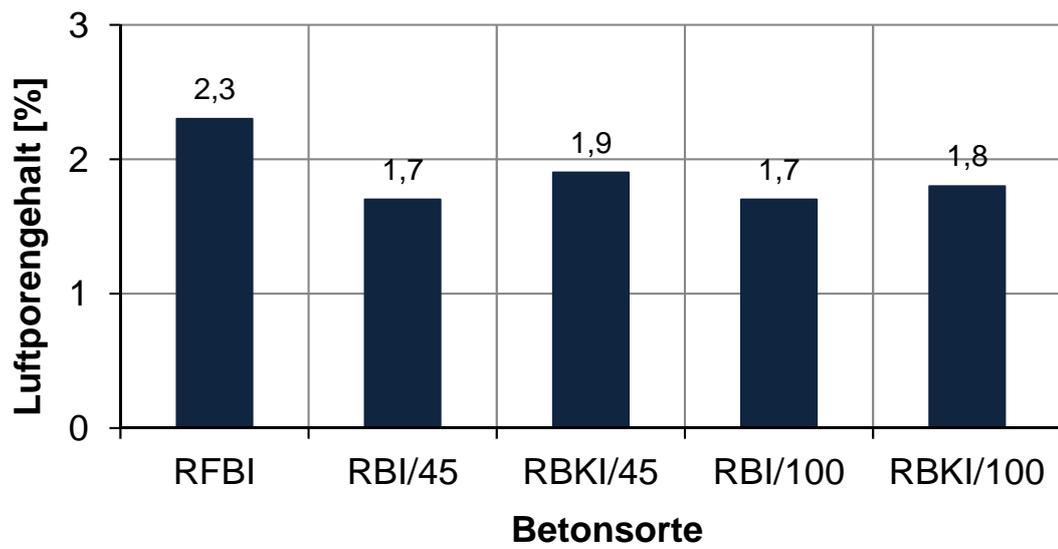


Bild A 22: Luftporengehalt der Betone (CEM I 42,5 R)

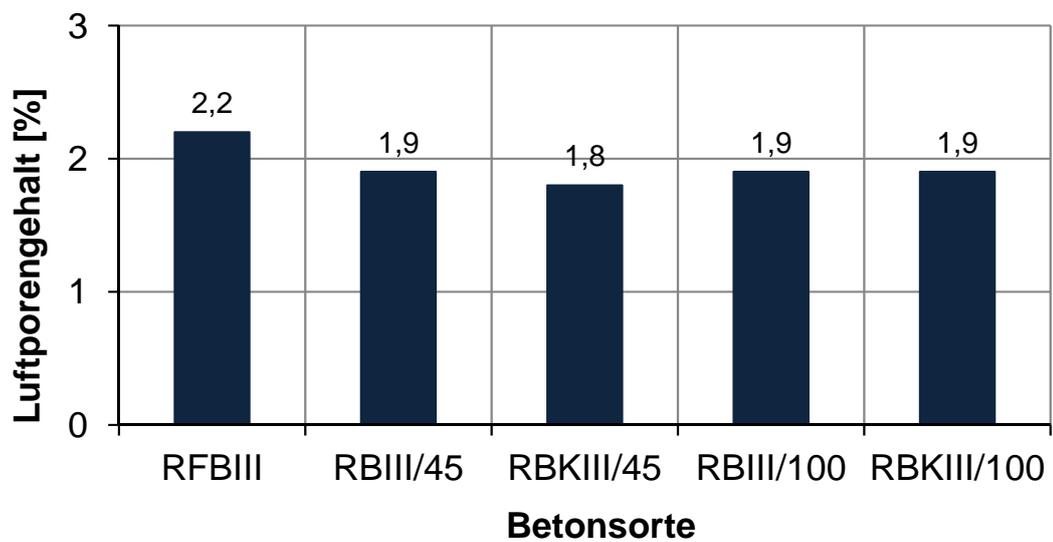


Bild A 23: Luftporengehalt der Betone (CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA)

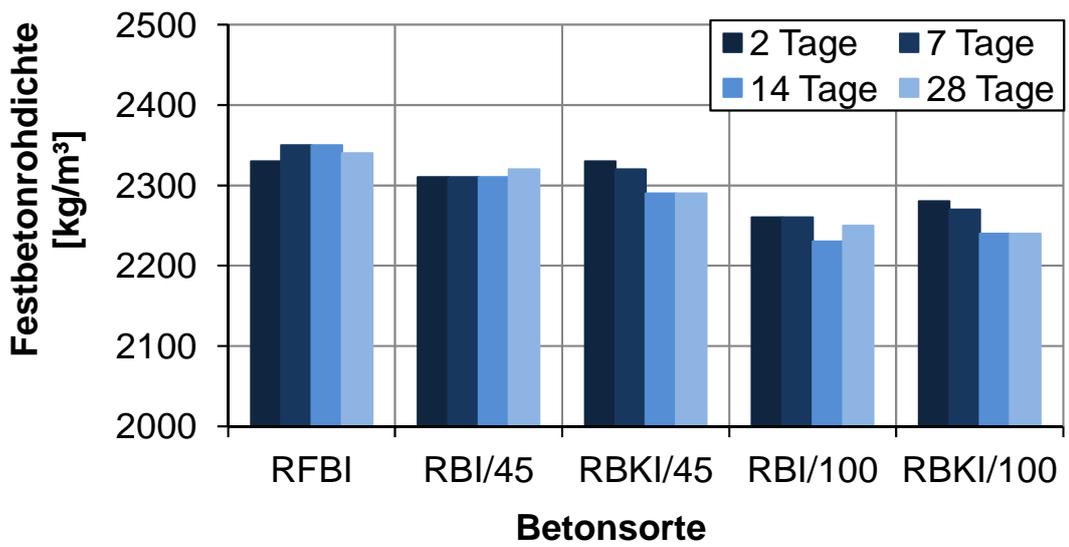


Bild A 24: Festbetonrohddichte der Betone (CEM I 42,5 R)

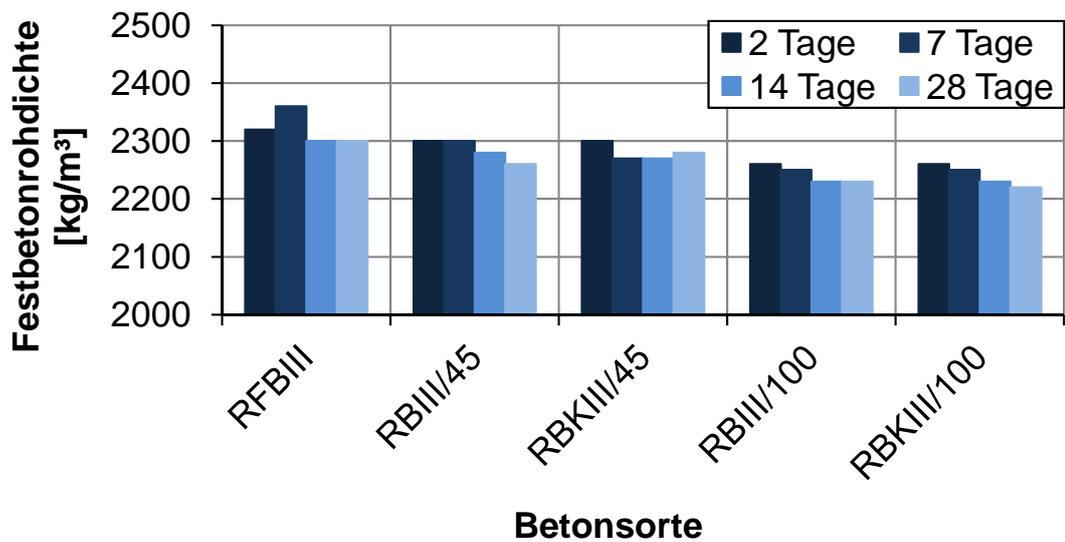


Bild A 25: Festbetonrohddichte der Betone (CEM III/B 42,5 L-LH/SR/NA)

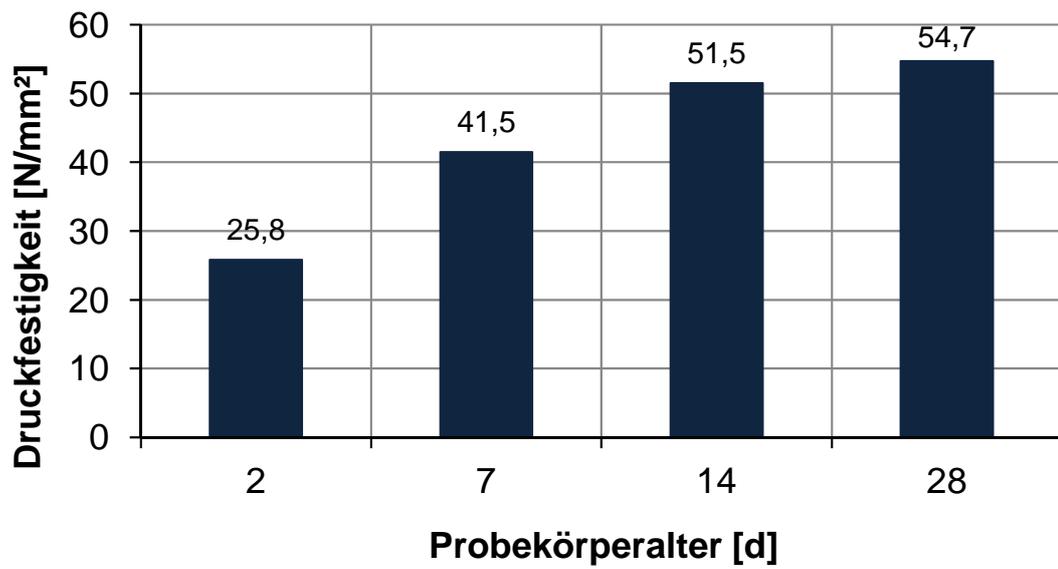


Bild A 26: Druckfestigkeiten der Betone mit natürlicher GK (RFBI)

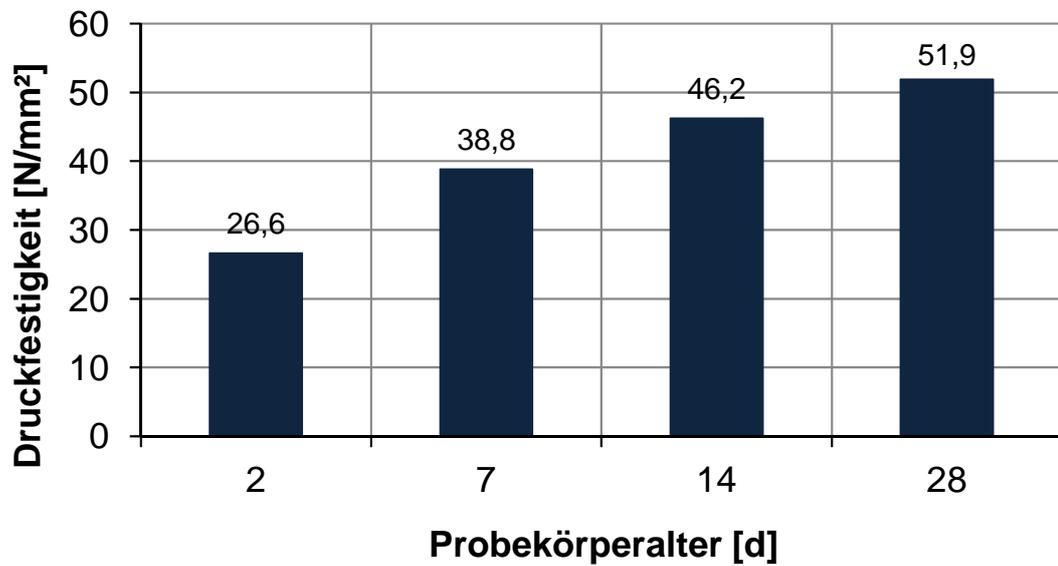


Bild A 27: Druckfestigkeiten der Betone mit unbehandelter GK (RBI/45)

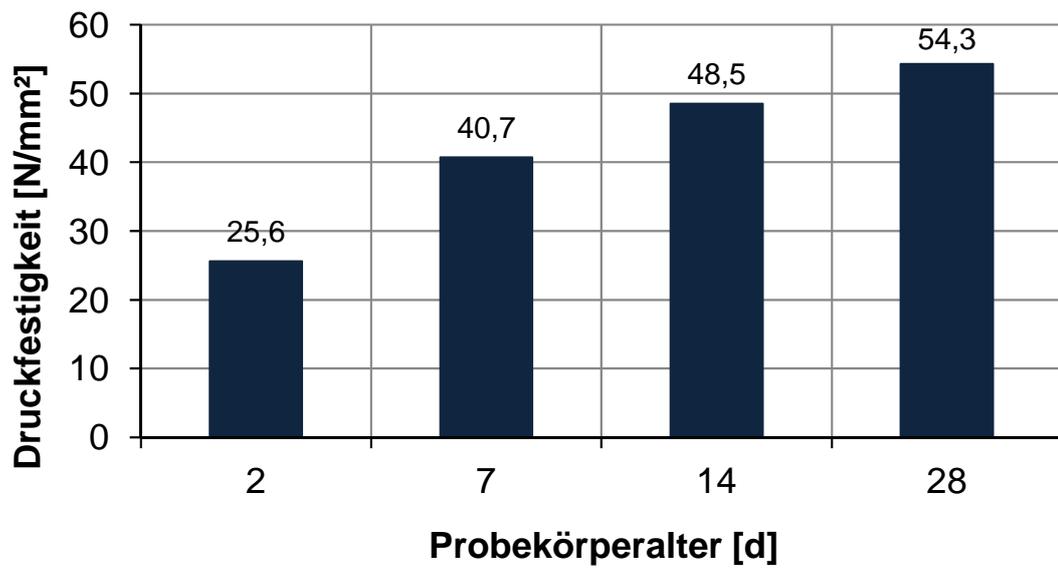


Bild A 28: Druckfestigkeiten der Betone mit karbonatisierter GK (RBKI/45)

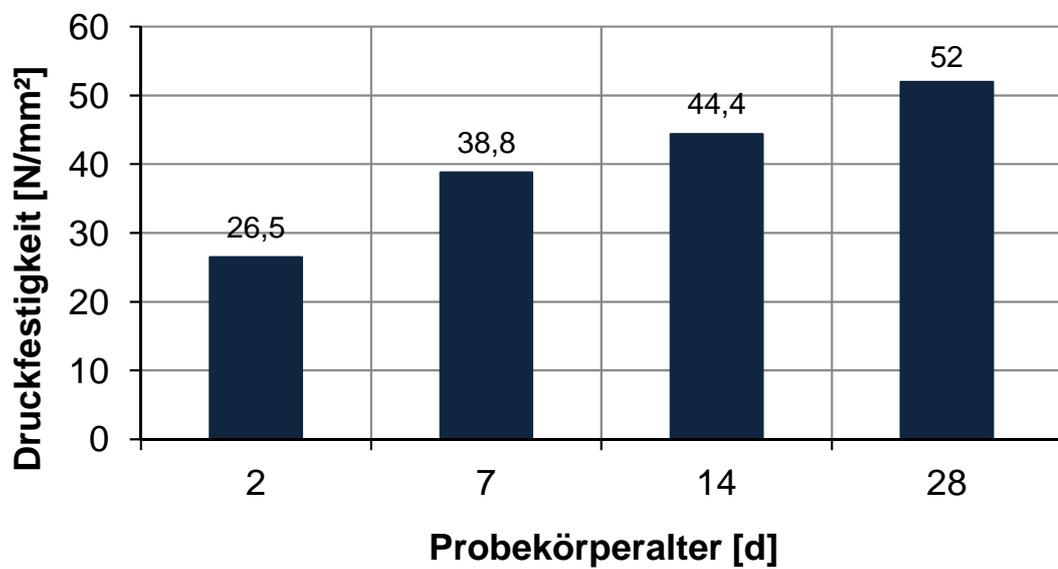


Bild A 29: Druckfestigkeiten der Betone mit unbehauelter GK (RBI/100)

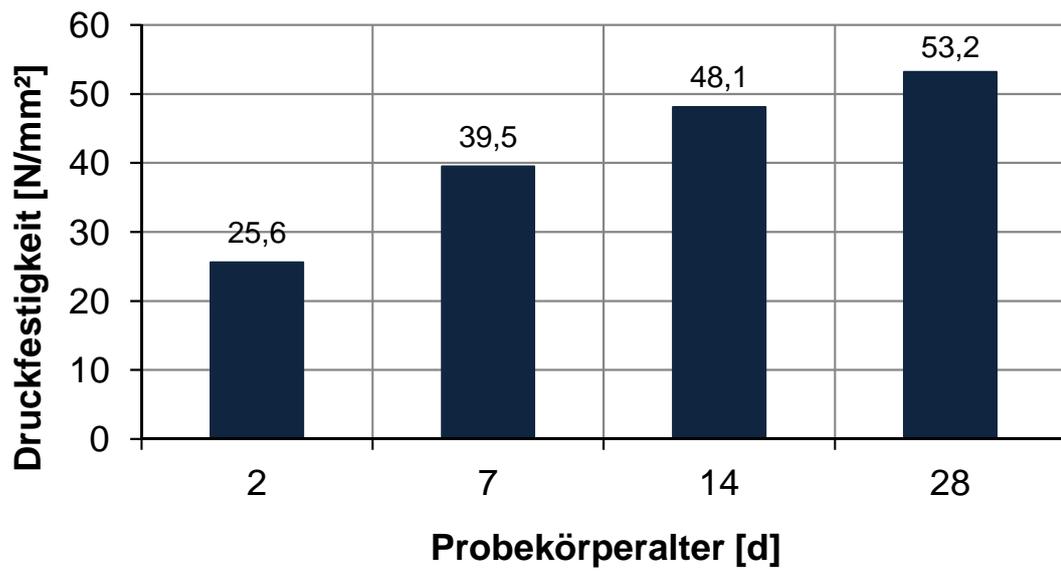


Bild A 30: Druckfestigkeiten der Betone mit karbonatisierter GK (RBKI/100)

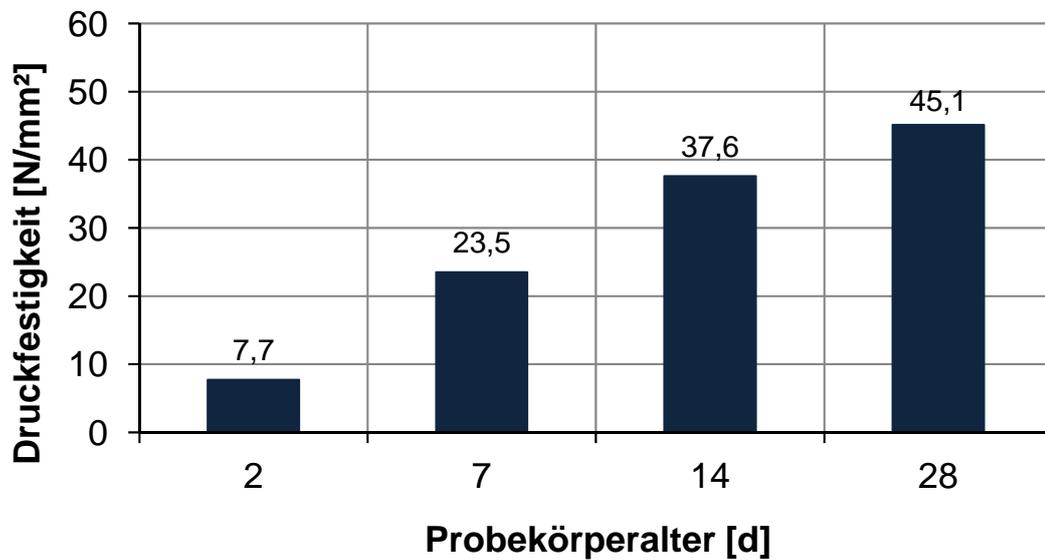


Bild A 31: Druckfestigkeiten der Betone mit natürlicher GK (RFBIII)

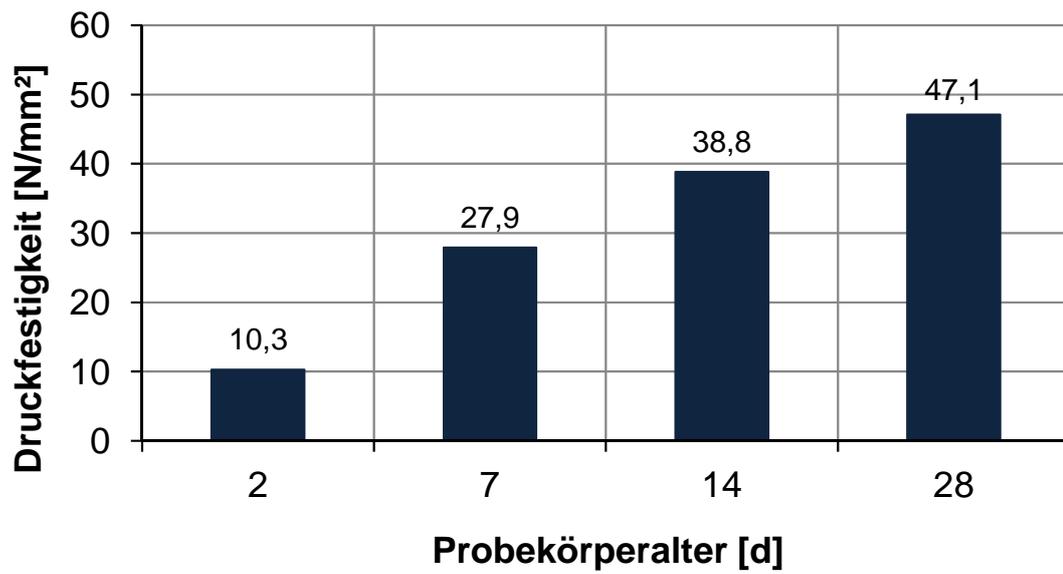


Bild A 32: Druckfestigkeiten der Betone mit unbehandelter GK (RBIII/45)

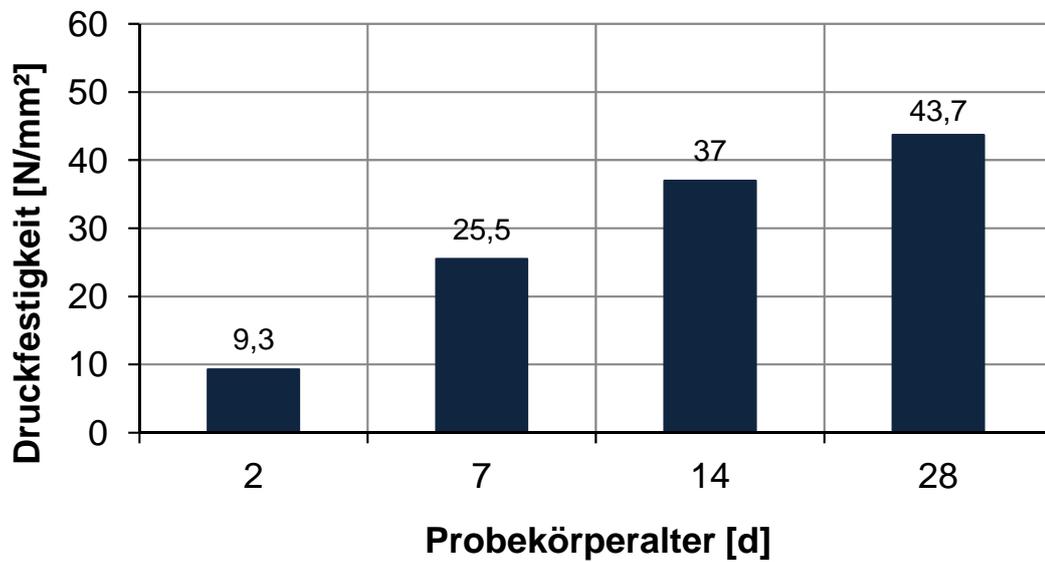


Bild A 33: Druckfestigkeiten der Betone mit karbonatisierter GK (RBKIII/45)

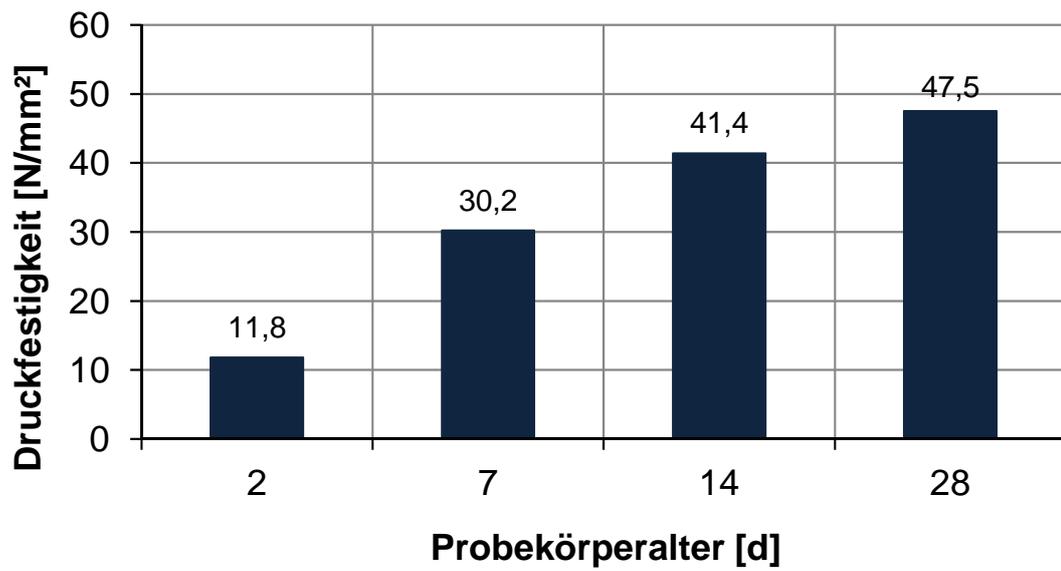


Bild A 34: Druckfestigkeiten der Betone mit unbehandelter GK (RBIII/100)

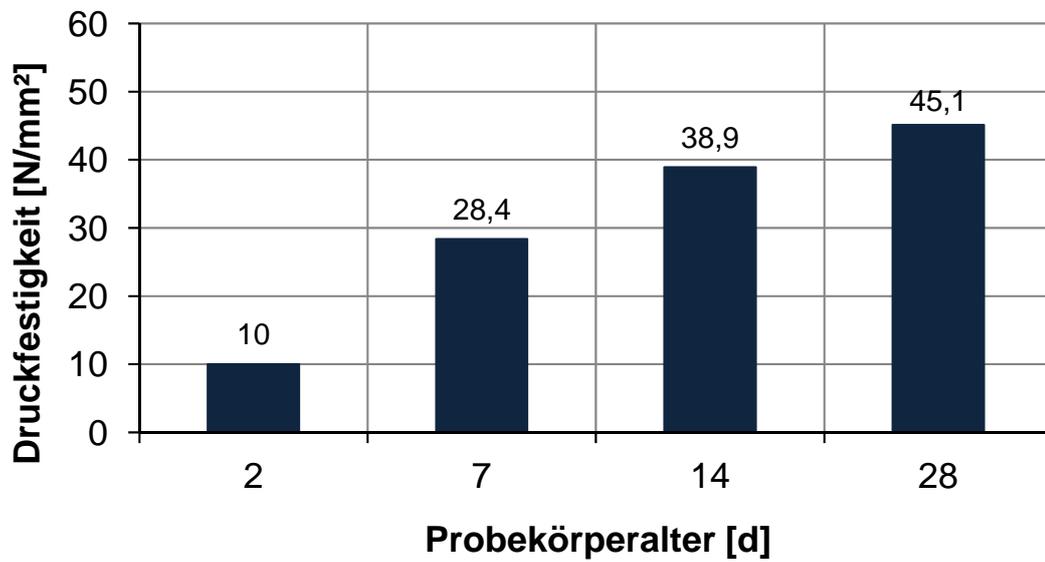


Bild A 35: Druckfestigkeiten der Betone mit karbonatisierter GK (RBKIII/100)