

Professur Aufbereitung von Baustoffen und Wiederverwertung  
Bauhaus-Universität Weimar

**Gezielte Karbonatisierung rezyklierter Gesteinszuschläge zur simultanen Nutzung von Betonbruch und Verbesserung der Materialeigenschaften als Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Minderung**

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

von

Dipl.-Ing. Marko Seidemann & Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller

Weimar, den 31. Dezember 2010

**Projektkennblatt**  
der  
**Deutschen Bundesstiftung Umwelt**



Az	<b>23689</b>	Referat	<b>23</b>	Fördersumme	<b>123.240,00 €</b>	
<b>Antragstitel</b>	<b>Gezielte Karbonatisierung rezyklierter Gesteinszuschläge zur simultanen Nutzung von Betonbruch und Verbesserung der Materialeigenschaften als Beitrag zur CO2-Minderung</b>					
<b>Stichworte</b>	Abfall, Recycling					
Laufzeit	Projektbeginn	Projektende	Projektphase(n)			
<b>24 Monate</b>	<b>01.07.2008</b>	<b>30.06.2010</b>	<b>1.</b>			
Zwischenberichte						
<b>Bewilligungsempfänger</b>	Bauhaus-Universität Weimar		Tel.	03643-584606		
	Fakultät Bauingenieurwesen		Fax	03643-584631		
	Aufbereitung und Wiederverwertung von Baustoffen		Projektleitung			
	Coudraystr. 7, Zimmer 110		Frau Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller			
	99423 Weimar		Bearbeiter			
			Dipl.-Ing. Marko Seidemann			
<b>Kooperationspartner</b>	... folgen in der 2. Projektphase					

**Zielsetzung und Anlass des Vorhabens**

Ziel des beantragten Forschungsprojektes ist es, die Karbonatisierung von rezyklierten Zuschlägen aus Altbeton zu nutzen, um die Qualität dieser Zuschläge zu verbessern und gleichzeitig einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Minderung zu leisten. Durch die Bilanzierung des Prozesses soll die erreichbare CO<sub>2</sub>-Reduzierung pro t Beton nach verschiedenen Ansätzen abgeschätzt werden. Zur Überprüfung soll die Kinetik der Karbonatisierung von Altbetonkörnungen im gesamten thermodynamisch in Frage kommenden Bereich untersucht werden. Darauf aufbauend soll die technische Umsetzung dieses Prozesses konzipiert und punktuell getestet werden. Parallel ist zu untersuchen, welche Auswirkungen die Karbonatisierung auf die Eigenschaften des rezyklierten Altbetons hat.

**Darstellung der Arbeitsschritte und der angewandten Methoden**

In den Forschungsarbeiten sollen die Potentiale der CO<sub>2</sub>-Minderung zunächst abgeschätzt werden und durch Untersuchungen zur Kinetik der Karbonatisierung von Altbeton untermauert werden (Projektphase 1). Darauf aufbauend ist eine Technologie zu entwerfen, welche die technische Nutzung der Effekte erlaubt (Projektphase 2).

Folgende Arbeitspakete sind in Phase 1 geplant:

*Arbeitspaket 1: Abschätzung des Potentials der CO<sub>2</sub>-Reduzierung durch die Karbonatisierung von rezyklierten Zuschlägen*

Die Menge an CO<sub>2</sub>, welche gebunden werden kann, ist nach verschiedenen Szenarien zu berechnen.

*Arbeitspaket 2: Entwicklung einer Versuchsapparatur für die kinetischen Untersuchungen*

Es ist eine Versuchsapparatur zu entwerfen und zu bauen, die die Untersuchung der Karbonatisierung unter konstanten äußeren Bedingungen erlaubt. Denkbar ist ein Durchströmungs-

reaktor. In der Apparatur muss eine Variation der Parameter Materialkorngröße, Materialfeuchte, Temperatur und Zusammensetzung des Reaktionsgases möglich sein. Die Zusammensetzung des ggf. im Kreislauf geführten Reaktionsgases nach Verlassen des Reaktors muss gemessen werden können.

*Arbeitspaket 3: Karbonatisierungsverlauf von Zementpasten und Modellbetonen*

Der Verlauf der Karbonatisierung ist an Modellbetonen mit definierter Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Korngröße, der Zusammensetzung, der Feuchte etc. zu untersuchen. Als äußere Einflussgrößen sind der CO<sub>2</sub>-Partialdruck und die Temperatur des Reaktionsgases zu variieren. Aus den experimentellen Ergebnissen ist die Karbonatisierungsgeschwindigkeit in Abhängigkeit von den Parametern der Modellbetone, der Korngröße und den äußeren Bedingungen abzuleiten. Der Reaktionsmechanismus soll ermittelt werden, um die Haupteinflussgrößen zur gezielten Beeinflussung der Reaktionsgeschwindigkeit zu erkennen.

*Arbeitspaket 4: Nachweis der Qualitätsverbesserungen der Zuschläge*

Es soll überprüft werden, ob die erwarteten Veränderungen der physikalischen Eigenschaften der Zuschläge wie Porosität und Porengrößenverteilung, Rohdichte, Kornfestigkeit etc. eingetreten sind. Eine Gegenüberstellung mit den entsprechenden Eigenschaften der Ausgangsbetone ist vorzunehmen.

*Arbeitspaket 5: Karbonatisierungsverlauf von realen Betonen*

Die in den Arbeitspaketen 2 und 3 gewonnenen Erkenntnisse sind an realen Betonen zu überprüfen. Als Ergebnis sollen Aussagen zu den Reaktionsbedingungen stehen, bei welchen die CO<sub>2</sub>-Einbindung erfolgen muss, um ein optimales Ergebnis sowohl in Bezug auf die CO<sub>2</sub>-Reduktion als auch in Bezug auf die Eigenschaften der Zuschläge zu erzielen.

*Arbeitspaket 6: Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch die Zementpasten, Modellbetone und realen Betone*

Der Vorgang der Karbonatisierung ist zu bilanzieren. Der CO<sub>2</sub>-Verbrauch ist den Phaseneubildungen in den Modellbetonen gegenüberzustellen. Anhand der Bilanzierung ist das CO<sub>2</sub>-Reduzierungspotential durch Rezyklate abzuschätzen.

Am Ende der Arbeitspakete 1 bis 6 soll eine Zwischenbilanz gezogen werden, in der die Reaktionsbedingungen, unter welchen die gezielte Karbonatisierung abläuft, dargestellt und die technische Umsetzung entworfen wird. Basierend darauf wird in den folgenden Arbeitspaketen 7 bis 9 die technische Umsetzung erprobt und der ökologische und ökonomische Nutzen bewertet.

## **Ergebnisse und Diskussion**

- Entwicklung, Aufbau und Betrieb einer Versuchsanlage
- Nachweis der beschleunigten Karbonatisierung
- Umwandlung von Portlandit in Calcit
- dauerhafte Bindung von CO<sub>2</sub> in der Zementsteinmatrix
- Verminderung der Kapillarporosität infolge der wachsenden Kristallmatrix aus Calcit
- Abnahme der Gelporosität aufgrund der beginnenden Karbonatisierung der Hydratphasen
- Anstieg der Dichte im Zuge der Verminderung der Porosität
- Verbesserung der Qualität des Zementsteins und damit der rezyklierten Gesteinszuschläge

## **Öffentlichkeitsarbeit und Präsentation**

- Posterpräsentation und Veröffentlichung im Tagungsband auf der 17. Internationalen Baustofftagung in Weimar (ibausil) am 23.-26. September 2009
- Flyerpräsentation auf dem Messsegemeinschaftsstand der DBU am 27. – 30. Oktober 2009 auf der Entsorga-Enteco`09 in Köln
- Veröffentlichung im Journal der Bauhaus-Universität Weimar „der bogen“ 4/2009
- Veröffentlichung im Schülermagazin der technischen Studiengänge der Bauhaus-Universität Weimar „go.ing“ 1/2010
- Posterpräsentation und Präsentation der Versuchsanlage am 03.Juni 2010 Ein Tag im Land der Ideen in Weimar
- Posterpräsentation am 20.August – 26.September 2010 Ausstellung „zero emission“

- im Haus am Horn in Weimar
- Vortrag und Veröffentlichung im Tagungsband auf der Fachtagung Recycling R`10 in Weimar (ibausil) am 22. und 23. September 2010
  - Vortrag und Veröffentlichung im Tagungsband auf der Fachtagung Rohstoffeffizienz und Rohstoffinnovationen in Nürnberg am 10. und 11. Februar 2011

### **Fazit**

- Versuchsergebnisse zeigen den Erfolg der gezielten Karbonatisierung
- Dauerhafte Bindung von CO<sub>2</sub> wurde erreicht.
- Verbesserung der Materialeigenschaften wurden nachgewiesen
- Weiterführende Ziele:
  - Optimierung des Versuchsablaufs
  - Weitere Beschleunigung der Karbonatisierung
  - Erweiterung der Versuchsanlage, damit die Temperatur variiert werden kann
  - Korrelation zwischen CO<sub>2</sub>-Aufnahme und Temperatur untersuchen
  - Planen und Betreiben einer Anlage im Praxismaßstab

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

<http://www.dbu.de>

# Inhaltsverzeichnis

<b>Projektkennblatt</b> .....	<b>2</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>5</b>
<b>Verzeichnis von Bildern und Tabellen</b> .....	<b>6</b>
<b>Verzeichnis von Begriffen und Definitionen</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Zusammenfassung</b> .....	<b>9</b>
<b>2 Einleitung</b> .....	<b>11</b>
<b>3 Hauptteil</b> .....	<b>15</b>
3.1 Abschätzung des Potentials der CO <sub>2</sub> -Reduzierung durch die Karbonatisierung .....	15
3.1.1 Berechnung der theoretischen maximalen CO <sub>2</sub> – Aufnahme des Portlandzementes durch die Karbonatisierung .....	16
3.1.2 Abschätzung der CO <sub>2</sub> – Aufnahme von rezyklierten Zuschlägen aus Bauabfällen durch die Karbonatisierung .....	21
3.2 Entwicklung einer Versuchsapparatur für die kinetischen Untersuchungen.....	24
3.3 Karbonatisierungsverlauf von Zementpasten und Modellbetonen .....	29
3.3.1 Gezielte Karbonatisierung von Zementpasten .....	29
3.3.2 Gezielte Karbonatisierung von Modellbeton.....	37
3.4 Nachweis der Qualitätsverbesserungen der Zuschläge .....	40
3.5 Karbonatisierungsverlauf von realen Betonen .....	44
3.6 Bilanzierung der CO <sub>2</sub> -Aufnahme durch die Zementpasten, Modellbetone und realen Betone .....	47
<b>Fazit</b> .....	<b>49</b>
<b>Literaturverzeichnis</b> .....	<b>51</b>
<b>Quellenverzeichnis</b> .....	<b>54</b>
<b>Anhang</b> .....	<b>55</b>

## Verzeichnis von Bildern und Tabellen

Bild 1: Gase die den Treibhauseffekt verursachen [Kle99].....	11
Bild 2: Statistisch erfasste Mengen von Bau- und Abbruchabfällen 2006.....	23
Bild 3: Verwertungswege für Bau- und Abbruchabfällen 2006 nach Angaben des 6. Monitoring-Bericht der ARGE KWTB 2008 .....	23
Bild 4: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung (Variante 1).....	26
Bild 5: Schematische Darstellung der Versuchsanordnung (Variante 2).....	26
Bild 6: Versuchsanordnung (Variante 2).....	29
Bild 7: Durchführungsschema für die gezielte Karbonatisierung von ZS.....	30
Bild 8: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von w/z-Wert und Zeit.....	31
Bild 9: Karbonatisierungsverlauf in Abhängigkeit von w/z-Wert und Zeit .....	31
Bild 10: Massezunahme in Abhängigkeit von Korngröße und CO <sub>2</sub> Konzentration .....	32
Bild 11: Massezunahme in Abhängigkeit von Zeit und CO <sub>2</sub> Konzentration .....	33
Bild 12: Wassergehalt vor der Karbonatisierung .....	34
Bild 13: Massezunahme nach der Karbonatisierung.....	34
Bild 14: relative Massezunahme bei einer CO <sub>2</sub> Konzentration von 40 % .....	35
Bild 15: relative Massezunahme bei einer CO <sub>2</sub> Konzentration von 40 % .....	36
Bild 16: relative Massezunahme bei einer CO <sub>2</sub> Konzentration von 40 % .....	37
Bild 17: Durchführungsschema für die gezielte Karbonatisierung von Modellbetonen.....	38
Bild 18: Zerkleinerung des Modellbetons .....	39
Bild 19: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von Zeit und CO <sub>2</sub> Konzentration .....	39
Bild 20: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von der Zeit.....	40
Bild 21: Reindichte in Abhängigkeit von Korngröße und CO <sub>2</sub> Konzentration.....	41
Bild 22: Reindichte in Abhängigkeit von Bewitterungszeit.....	41
Bild 23: Korrelation zwischen Reindichte und Massezunahme .....	42
Bild 24: Porenradienverteilung von ZS 2/4 vor und nach der Karbonatisierung .....	43
Bild 25: Veränderung der spezifischen Oberfläche durch die Karbonatisierung .....	44
Bild 26: Durchführungsschema für die gezielte Karbonatisierung von Betonbruch .....	45
Bild 27: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von der CO <sub>2</sub> Konzentration .....	46
Bild 28: Rohdichte in Abhängigkeit von der CO <sub>2</sub> Konzentration .....	46
Bild 29: Schematische Darstellung der Massezunahme von PZ und Beton.....	48

Tabelle 1: Eigenschaften der Hauptklinkerminerale [SW98]16	
Tabelle 2: chemische Zusammensetzung von Portlandzementen .....	20
Tabelle 3: Auflistung der verwendeten Komponenten und Messgeräte: .....	28
Tabelle 4: Zusammensetzung des Modellbetons .....	38
Tabelle 5: Abhängigkeit der Porosität und der Dichte von der Bewitterungszeit .....	42
Tabelle 6: Veränderung der spezifischen Oberfläche durch die Karbonatisierung .....	43

# 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
$CO_2$	-	Kohlendioxid
$H_2CO_3$	-	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

w/z	-	Wassorzementwert
PZ	-	Portlandzement
ZS	-	Zementstein
k	-	karbonatisiert
nk	-	nicht karbonatisiert

# 1 Zusammenfassung

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit befasst sich mit der gezielten Karbonatisierung von rezyklierten Gesteinskörnungen. Das Ziel der Untersuchung bestand darin, in Betonbruch ein Maximum an  $\text{CO}_2$  dauerhaft chemisch zu binden und gleichzeitig die Materialeigenschaften der Betonrezyklate so zu verbessern, dass diese primärstoffvergleichbare Qualitäten erreichen.

Durch die gezielte Karbonatisierung kommt es zu einer dauerhaften Isolation von  $\text{CO}_2$  aus der Atmosphäre. Ein Beitrag zur Reduzierung des anthropogenen Treibhauseffekts wäre denkbar, da  $\text{CO}_2$  der Atmosphäre auf Dauer entnommen wird. So könnte sich die Baustoffrecyclingindustrie an dem laufenden Prozess, dem Klimawandel entgegenzuwirken, entsprechend ihren Möglichkeiten beteiligen. Die Verbesserung der Materialeigenschaften und der damit mögliche hochwertige Einsatz von rezyklierten Produkten würden zu dem die Ressourcen schonen.

Bis zum gegenwärtigen Zeitpunkt wurde das Potential der Karbonatisierung nicht genutzt. In Bauwerksbetonen wird versucht, die Karbonatisierungsreaktion zu unterbinden, da sie den passiven Korrosionsschutz der Bewehrung aufheben kann. Bei rezyklierten Gesteinszuschlägen spielt dieser Korrosionsschutz keine Rolle, weil bei der Betonherstellung aus Rezyklaten der Korrosionsschutz durch die erneute Zementzugabe gewährleistet wird. Deshalb wurde bisher nur untersucht, wie die Karbonatisierung aufgehalten werden kann. Mit der Fragestellung, wie die Karbonatisierung zu beschleunigen ist und ob damit die gewünschten Eigenschaftsverbesserungen zu erreichen sind, wird also völliges Neuland betreten.

Im Vorfeld der Versuche wurde eine Versuchsanlage geplant und im Labormaßstab technisch umgesetzt. Die sich dann anschließenden Versuche befassten sich zu Beginn mit der Karbonatisierung von Zementstein. Nach umfangreichen jedoch noch nicht abgeschlossenen Versuchsreihen, erfolgte die Karbonatisierung von Modell- und Praxisbetonen. Bei allen Versuchen und den anschließenden Analysen der Proben konnte die beschleunigte Karbonatisierung nachgewiesen werden. Es wurde  $\text{CO}_2$  chemisch in  $\text{CaCO}_3$  eingebunden. Die in den Poren wachsende Kristallmatrix aus Calcit verminderte die Kapillarporosität. Gleichzeitig nahm die Gelporosität, die den strukturbestimmenden Hydratphasen des Zementsteins zugeordnet ist, ab. Die Porositätsabnahme bewirkte einen Anstieg der Dichte, der ebenfalls experimentell nachgewiesen werden konnte. Insgesamt wird die Qualität des Zementsteins und damit der rezyklierten Gesteinszuschläge verbessert.

Nach den bisherigen Versuchen werden Verweilzeiten der Rezyklate in der  $\text{CO}_2$ -Atmosphäre von mehreren Stunden benötigt, um die gewünschten Effekte zu erreichen. In zukünftigen Versuchen sollte versucht werden, die Reaktion durch Wahl der Versuchsbedingungen weiter zu beschleunigen. Zwei Wege sollen beschritten werden:

- Gezielte Einstellung des Feuchthaushalts der Proben

- Karbonatisierung bei erhöhten Temperaturen

Für den ersten Weg ist der Versuchsablauf so zu verändern, dass während der gesamten Karbonatisierung ein ausreichendes Feuchteangebot zur Verfügung steht, ohne dass der Transport des CO<sub>2</sub> zur Reaktionszone behindert wird. Für den zweiten Weg ist die gegenwärtig genutzte Versuchsanlage so zu modifizieren, dass es möglich ist, die Temperatur zwischen 20°C und mehreren 100°C zu variieren. Die Versuche beginnen wie in der ersten Versuchsetappe mit Zementstein und werden dann an Modell- und Praxisbetonen fortgesetzt. In einem weiteren Schritt wird eine Versuchsanlage im praktischen Maßstab geplant, gebaut und betrieben. Als CO<sub>2</sub>-Quelle soll dann ein in der Praxis anfallendes Rauchgas dienen.

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

## 2 Einleitung

Wenn man die Erde als ein geschlossenes System betrachtet, bewegt sich die darin enthaltene Materie in sedimentären, gasförmigen oder flüssigen Zustand. Die dabei ablaufenden Stoffkreisläufe sind für die Lebensprozesse auf der Erde verantwortlich. Die Moleküle in den Kreisläufen werden durch chemische, physikalische und biochemische Prozesse verändert und in andere Formen eingebaut. In den Stoffkreisläufen unterscheidet man aktive Pools und Speicher-pools.

Der Kohlenstoffzyklus ist dabei einer der lebensnotwendigsten Prozesse auf der Erde. Über Millionen von Jahren hat sich eine Verteilung eingestellt, die ein Leben auf der Erde ermöglicht. 99,8 % der gesamten globalen Kohlenstoffmenge befindet sich in Speicher-pools unter der Erdoberfläche und nur 0,2 % durchlaufen den aktiven Kohlenstoffkreislauf. Durch die stetig wachsende Nutzung der Kohlenstoffträger aus den Speicher-pools, kommt es zu einer Veränderung der Stoffkonzentration im aktiven Kohlenstoffkreislauf, was direkten Einfluss auf die zukünftigen Lebensbedingungen auf der Erde hat.

Die kurzweilige Sonnenstrahlung erreicht unsere Erdoberfläche weitestgehend ungehindert und wird von der Erde als langwellige Wärmestrahlung reflektiert. Diese Wärmestrahlung wird in der Atmosphäre von verschiedenen Gasen, unter anderem von Kohlendioxid, absorbiert, dadurch kommt es zu einem natürlichen Treibhauseffekt.

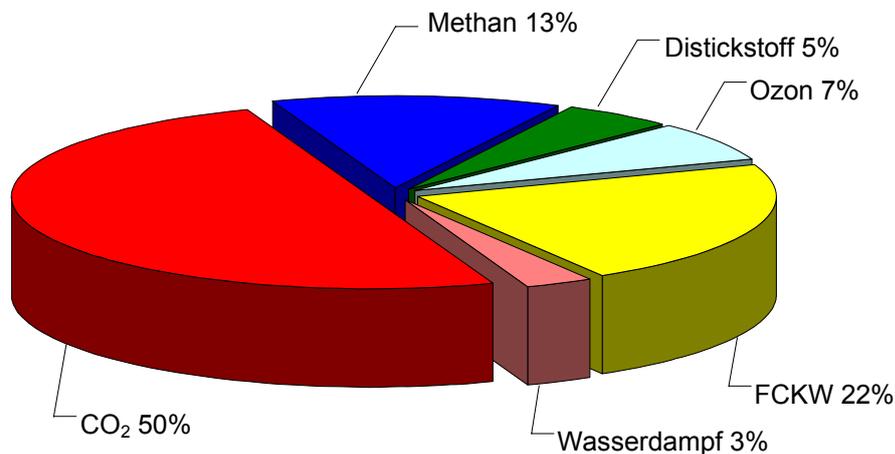


Bild 1: Gase die den Treibhauseffekt verursachen [Kle99]

Die globale Erwärmung der erdnahen Lufthülle ist die Folge des stetig wachsenden Kohlendioxidgehaltes in der Atmosphäre. Die fossilen Brennstoffe aus natürlichen Kohlenstoffvorräten werden aufgrund ihres scheinbar unerschöpflichen energetischen Potentials durch den Menschen sukzessive genutzt. Der natürliche Kohlenstoffkreislauf wird durch die beiden entgegengesetzten Prozesse Photosynthese und Respiration dahingehend gesteuert, dass es zu einer gleichbleibenden Verteilung im gesamten Kohlenstoffkreislauf kommt. Die

schnelle Freisetzung des über Jahrmillionen gebunden Kohlenstoffs durch den Menschen stört das natürliche Gleichgewicht im Kohlenstoffkreislauf. Durch das Verbrennen fossiler Energieträger steigt die Menge an Kohlendioxid in der Atmosphäre stetig an. Diese zusätzliche Menge an CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre und Hydrosphäre kann durch den wichtigsten Teilschritt beim Kohlenstoffkreislauf, der sogenannten Assimilation von CO<sub>2</sub> der Pflanzen durch die Photosynthese, nicht mehr vollständig kompensiert werden. Es kommt zu einer zusätzlichen Anreicherung von CO<sub>2</sub> in der Atmosphäre, was den natürlichen Treibhauseffekt verstärkt. Der natürliche Treibhauseffekt sorgt für ein lebensfreundliches Klima auf unserer Erde. Der anthropogene Treibhauseffekt hingegen hat einen Klimawandel zur Folge, was schon jetzt durch die globale Erwärmung sichtbar wird.

Seit Beginn der Industrialisierung ist die CO<sub>2</sub>-Konzentration von 280 ppm auf 380 ppm gestiegen [KS06]. Diese Konzentrationserhöhung stellt eine Gefährdung von Mensch und natürlicher Umwelt dar. Der Gehalt an Kohlendioxid in der Lufthülle gilt außerdem als der wichtigste Indikator des Klimawandels. Um dem Klimawandel entgegensteuern zu können, ist es notwendig die CO<sub>2</sub>-Emissionen zu verringern und einen Teil des bereits freigesetzten CO<sub>2</sub> permanent aus der Atmosphäre zu eliminieren. Global gesehen, sind die Anstrengungen zur dauerhaften CO<sub>2</sub> Eliminierung weniger belastend als die absehbaren Folgen einer übermäßigen Erderwärmung. Die möglichen ökologischen Folgen des anthropogenen Treibhauseffektes, z.B. der Anstieg des Meeresspiegels und eine Veränderung der Vegetationszonen [Kle99], werden wirtschaftliche Schäden nach sich ziehen, die einige Prozent des Weltbruttosozialproduktes ausmachen werden [Umw96].

Beton ist der meistverwendete Baustoff unserer Zeit. Weltweit werden jährlich mehr als 10 Milliarden t Beton hergestellt, davon ca. 250 Mio. t in Deutschland. Gleichzeitig entstehen große Mengen von Betonbruch. Die Prognose für Deutschland, welche von den in der Vergangenheit hergestellten Betonmengen und Annahmen für die Lebensdauer von Betonbauwerken ausgeht, weist aus, dass bis 2020 jährlich ca. 100 Mio. t Betonabbruch entstehen kann [Rah91].

Z. Zt. beschränkt sich die Wiederverwertung des aufbereiteten Betonbruch hauptsächlich auf die Bereiche Füllmaterial und Material für Trag- und Frostschuttschichten. Hochwertige Verwertung von Betonrezyklaten als Gesteinskörnung im Beton werden bisher nur in geringem Umfang genutzt, obwohl die Anforderungen und Einsatzbereiche durch Vorschriften klar definiert sind. Nach der Erhebung der Arbeitsgemeinschaft Kreislaufwirtschaftsträger Bau wurden im Jahr 2004 von insgesamt 49,6 Mio. t produzierten RC-Baustoffen 4,9 % als Betonzuschlag eingesetzt [1]. Gegenwärtig werden verstärkt Bemühungen unternommen, geschlossene Kreisläufe im Hochbau zu etablieren. In dem von der DBU geförderten Pilotprojekt [Kna10] [Met10], wurden Betonrezyklate als grobe Gesteinskörnungen 2/8 mm und 8/16 mm für die Herstellung von Beton entsprechend der Richtlinie des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton eingesetzt. Bei Anteilen der Rezyklate zwischen 25 und 35 Vol.-% an der Gesamtgesteinskörnung waren die Qualitäten der RC-Betone gut bis sehr gut.

Für die Verwendung von Betonrezyklaten zur erneuten Betonherstellung können nur grobe Körnungen > 2 mm eingesetzt werden, so dass sich für die fei-

nen Körnungen < 2 mm Verwertungsdefizite ergeben. Der sachliche Grund für den Ausschluss besteht darin, dass sich der Zementstein besonders in den Sandfraktionen anreichert. Werden diese Sande zur erneuten Betonherstellung eingesetzt, entsteht ein Beton, der neben den Gesteinskörnungen und dem sie verbindenden „neuen“ Zementstein noch „alten“ Zementstein enthält. Das hat zur Folge, dass der Anteil der Bindemittelmatrix – bestehend aus Hydratphasen und Poren - zunimmt. Aufgrund dessen verändern sich wichtige Betoneigenschaften signifikant. So vermindert sich beispielsweise die Festigkeit, wenn nicht durch einen höheren Zementeinsatz gegengesteuert wird. Noch stärker nimmt - bedingt durch die Struktur der Hydratphasen - der E-Modul ab. Die Karbonatisierung, d.h. die Reaktion zwischen dem CO<sub>2</sub> der Atmosphäre und dem Calciumhydroxid des Betons kann in Betonen mit Rezyklaten schneller ablaufen, da kein ausreichender Widerstand dem Eindringen von Kohlendioxid und Luftfeuchtigkeit entgegen steht. Dies hat zur Folge, dass der passive Korrosionsschutz der Bewehrung nicht dauerhaft besteht.

Um einen hochwertigen Betonzuschlag aus Betonbruch zu erhalten, ist es erforderlich, dass durch geeignete Behandlungsmaßnahmen die Porosität von rezyklierten Gesteinskörnungen vermindert und gleichzeitig ihre Festigkeit erhöht wird. Dann wäre ein Wiedereinsatz ohne Restriktionen möglich. Das Ziel der Arbeit ist es, die Karbonatisierung von rezyklierten Zuschlägen aus Altbeton zu nutzen, um die Qualität dieser Zuschläge zu verbessern. Der heutige Stand der Technik und die damit verbundenen Forschungen beschränken sich auf die Vermeidung der Karbonatisierung im Beton. Im Gebrauchszustand von Betonbauteilen ist das existenziell, da es durch die Karbonatisierung zu einem Absinken des pH-Wertes kommt, was wiederum den Korrosionsschutz der Bewehrung aufheben kann. Die Beschleunigung der Karbonatisierung ist dagegen eine bisher kaum untersuchte Fragestellung. Dass durch die Karbonatisierung der rezyklierten Gesteinskörnung eine primärstoffvergleichbare Qualität und eine dauerhafte Bindung von CO<sub>2</sub> erreicht werden kann, wurde bis dato in nur sehr wenigen Studien aufgegriffen. In [GN07] wird geprüft, ob sich eine beschleunigte Karbonatisierung zur Nachbehandlung von Beton eignet. Von [CFAA09] werden die Auswirkungen auf die Phasenzusammensetzung bei der Karbonatisierung mit CO<sub>2</sub>-Gehalten von 3, 10 und 100 % im Vergleich zur Karbonatisierung in natürlicher Atmosphäre untersucht, um vorhandene Laborschnelltests zum Korrosionsschutz bewerten zu können. Als Folge der Karbonatisierung wird eine Massenzunahme des untersuchten Zementsteins von 13 % festgestellt.

Das Ziel der Arbeit ist es, die Karbonatisierung von rezyklierten Zuschlägen aus Altbeton zu nutzen, um die Qualität dieser Zuschläge zu verbessern und gleichzeitig einen Beitrag zur CO<sub>2</sub>-Minderung zu leisten. Durch die Bilanzierung des Prozesses soll die erreichbare CO<sub>2</sub>-Reduzierung pro t Beton nach verschiedenen Ansätzen abgeschätzt werden. Zur Überprüfung soll die Kinetik der Karbonatisierung von Altbetonkörnungen im gesamten thermodynamisch in Frage kommenden Bereich untersucht werden. Darauf aufbauend soll die technische Umsetzung dieses Prozesses konzipiert und punktuell getestet werden. Parallel ist zu untersuchen, welche Auswirkungen die Karbonatisierung auf die Eigenschaften des rezyklierten Altbetons hat.

Mit Hilfe der gesteuerten Karbonatisierung soll ein Maximum an Kohlendioxid in Betonrezyklaten dauerhaft gebunden werden und dadurch die Eigenschaften des Rezyklats so verändert werden, dass es zu einer Abnahme der Porosität und zu einer Steigerung der Festigkeit kommt. Um eine Abnahme der Porosität und die damit verbundene Festigkeitssteigerung der rezyklierten Zuschläge zu erreichen, wird in dieser Arbeit eine gezielte Karbonatisierung der rezyklierten Gesteinszuschläge als Methode zur Qualitätsverbesserung angewandt. Durch die Aufbereitung von Betonbruch kommt es zu einer Vergrößerung der Oberfläche, die wiederum Voraussetzung für eine beschleunigte Karbonatisierung ist. Eine Steigerung der Festigkeit erfolgt nur bei vollständig karbonatisiertem Portlandit im Beton. Kommt es nur zu einer Karbonatisierung der Oberfläche, stellt sich nur eine Steigerung der Oberflächenhärte ein.

Die Karbonatisierung ist ein von Bauwerksbetonen her bekannter Vorgang. Als diffusionsgesteuerter Prozess verläuft er jedoch sehr langsam und zieht sich über Jahre hin. Die technische Herausforderung dieser Arbeit besteht darin, die Karbonatisierungsreaktion in einem Reaktor zu beschleunigen und damit technisch nutzbar zu machen. Weiterhin sollen möglichst ausführliche Aussagen über die chemischen Abläufe und die Bedingungen für die CO<sub>2</sub> - Behandlung getroffen werden.

Im Vorfeld sollen die Potentiale der CO<sub>2</sub>-Reduzierung durch die Karbonatisierung von rezyklierten Zuschlägen abgeschätzt bzw. durch verschiedene Szenarien berechnet werden. Nachdem die theoretische CO<sub>2</sub> - Menge ermittelt wurde, welche sich in Altbeton dauerhaft binden lässt, wird eine Versuchsanlage geplant, in der die Karbonatisierung gesteuert und überwacht werden kann. Der Reaktor soll derart konstruiert werden, dass es zu einer gleichmäßigen Durchströmung im Inneren kommt. Die Karbonatisierung sollte dabei unter konstanten äußeren Bedingungen ablaufen können, wobei eine Variation von verschiedenen Parametern, z.B. Zusammensetzung des Reaktionsgases, Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit usw. möglich sein muss.

Mit Hilfe des Reaktors soll der Karbonatisierungsverlauf von Zementstein und Modellbetonen dahingehend untersucht und gesteuert werden, dass aus den experimentellen Ergebnissen die Abhängigkeit der Karbonatisierungsgeschwindigkeit von den äußeren Bedingungen abgeleitet werden kann. Die dabei gewonnenen Ergebnisse sollen Rückschlüsse auf die Haupteinflussgrößen geben. Nachdem die Beaufschlagung der Probe mit CO<sub>2</sub> in der Versuchsanlage abgeschlossen ist, kommt es zur Untersuchung der physikalischen Eigenschaften. Dabei ist die Gegenüberstellung mit den entsprechenden Eigenschaften der Ausgangsprobe vorzunehmen, um Aussagen zu gewinnen, ob die erwarteten Veränderungen wie Porosität, Porengrößenverteilung, Rohdichte etc. eingetreten sind.

### 3 Hauptteil

#### 3.1 Abschätzung des Potentials der CO<sub>2</sub>-Reduzierung durch die Karbonatisierung

##### Hydratation:

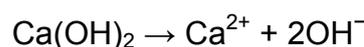
Die Entstehung der Hydratationsprodukte erfolgt nicht parallel, sondern nacheinander. Die Hydratation gliedert sich in drei Hauptphasen.

1. In dieser Phase kommt es zu der Entstehung von Calciumhydroxid und Trisulfat. Das aus C<sub>3</sub>A und Gips entstandene Trisulfat wandelt sich später in Monosulfat um. Die entstandenen Hydratphasen enthalten neben Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> auch Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.
2. Die nächste Phase beginnt, wenn die Hydratation von C<sub>3</sub>S und C<sub>2</sub>S einsetzt. Diese Hydratationsstufe beginnt etwa nach 4 Stunden.
3. In der letzten Hydratationsphase werden die noch vorhandenen Poren durch die Calciumsilicat- und Calciumaluminathydratkristalle verkleinert und zum Teil vollständig ausgefüllt.

##### Karbonatisierung:

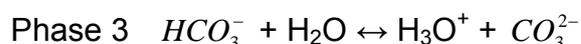
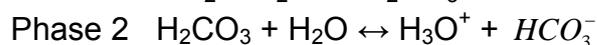
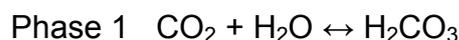
Es sind mehrere chemische Abläufe und Stofftransporte erforderlich, damit Calciumhydroxid vollständig karbonatisieren kann.

1. Das als Kristall im Zementstein vorliegende Ca(OH)<sub>2</sub> geht im Porenwasser in Lösung.

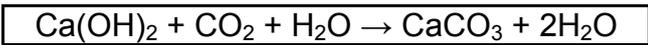


Parallel zu diesem Vorgang findet der Stofftransport als Diffusion des CO<sub>2</sub> in den Poren des Zementsteins statt.

2. CO<sub>2</sub> löst sich gut im Porenwasser und reagiert mit diesem zu Kohlensäure, jedoch reagiert nicht der gesamte Anteil des gelösten Kohlendioxids mit Wasser. Die dabei entstandene Kohlensäure liegt in einem Gleichgewicht mit ihren Dissoziationsprodukten vor [Hydrogencarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) und Carbonat ( $\text{CO}_3^{2-}$ )].



### 3. Reaktion von Calciumhydroxid mit Kohlensäure



Bei der Karbonatisierung von Calciumhydroxid entsteht Calciumkarbonat und Wasser. Dabei kommt es zu einer Volumenvergrößerung der Reaktionsprodukte.

#### 3.1.1 Berechnung der theoretischen maximalen CO<sub>2</sub> – Aufnahme des Portlandzementes durch die Karbonatisierung

##### Variante 1: Stöchiometrische Berechnung

Die Tabelle 1 zeigt die wesentlichen Eigenschaften der Hauptklinkerminerale (nach Stark et al.)

Tabelle 1: Eigenschaften der Hauptklinkerminerale [SW98]

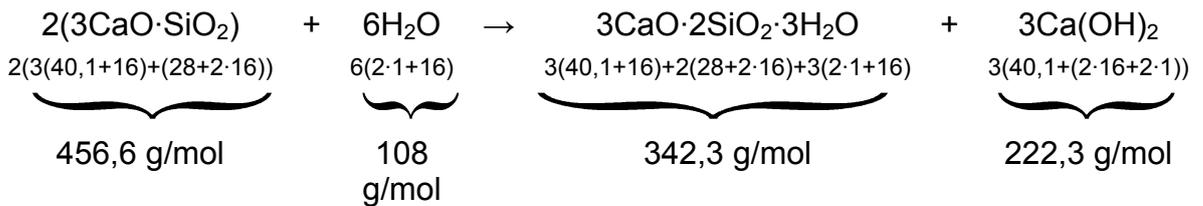
	Alit	Belit	Aluminatphase	Ferritphase
Zusammensetzung der reinen Phase	3CaO·SiO <sub>2</sub> = C <sub>3</sub> S	2CaO·SiO <sub>2</sub> = C <sub>2</sub> S	3CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = C <sub>3</sub> A	4CaO·Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ·Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> = C <sub>4</sub> AF bzw. allg. C <sub>2</sub> (A,F)
wichtigste eingebaute Fremdoxide in Klinkerphasen	MgO=0,3...2,1% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =0,4...1,8% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =0,2...1,9%	K <sub>2</sub> O=0,1...1,9% Na <sub>2</sub> O=0,1...0,8% Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =0,5...3,0% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =0,4...2,7%	K <sub>2</sub> O=0,1...3,1% Na <sub>2</sub> O=0,3...4,6% Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> =4,8...11,4% MgO=0,4...2,2% SiO <sub>2</sub> =2,9...7,1%	SiO <sub>2</sub> =1,8...4,3% MgO=1,9...4,5% TiO <sub>2</sub> ≤3,5%
Im technischen Klinker auftretende Kristallsysteme oder Modifikationen	monoklin (M II)	β-Belit, monoklin (seltener α', α-C <sub>2</sub> S)	kubisch orthorhombisch tetragonal	orthorhombisch
Kristallgröße im Klinker	20...60µm	10...30µm	submikroskopisch bis makrokristallin	
Stabilität	< 1250°C bei sehr langsamer Kühlung Zerfall in C <sub>2</sub> S + CaO, bes. bei reduziertem Brand. Reines C <sub>3</sub> S stabil ab 1264°C	Umwandlung (Zerrieseln) in das nichthydraulische γ-C <sub>2</sub> S<500°C durch rasche Kühlung und eingebaute Fremdionen verhindert	Kristallisiert beim Kühlen<1350°C aus Klinkerschmelze	bei reduzierendem Brand teilweise oder vollständige Reduktion des Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> zu FeO oder Fe
Anteile im Klinker	40...80% Ø 60%	0...30% Ø 15%	3...15% Ø 7%	4...15% Ø 8%

=> 100 g Portlandzement bestehen aus durchschnittlich:

60 g	C <sub>3</sub> S
15 g	C <sub>2</sub> S
7 g	C <sub>3</sub> A
8 g	C <sub>4</sub> AF

### C<sub>3</sub>S (Tricalciumsilicat)

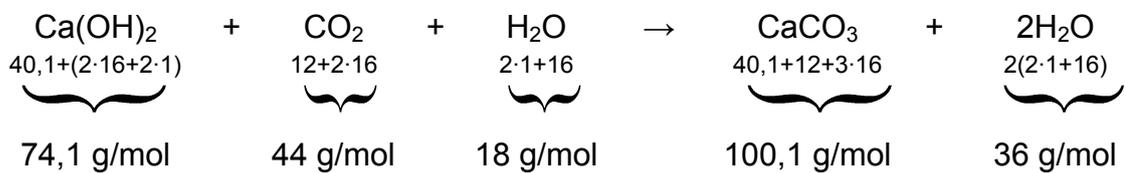
Hydratation:



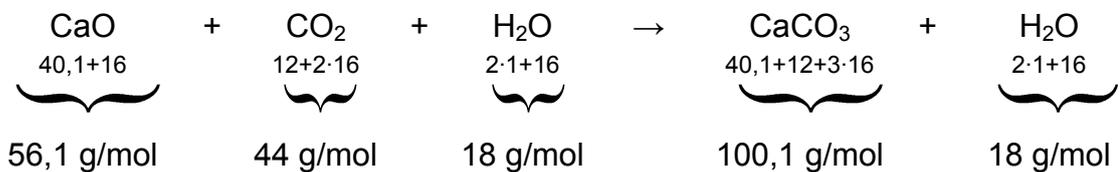
$$\frac{456,6 \text{ g/mol}}{222,3 \text{ g/mol}} = \frac{60 \text{ g}}{x} \Rightarrow x = 29,21 \text{ gCa}(\text{OH})_2$$

$$\frac{456,6 \text{ g/mol}}{168,3 \text{ g/mol}} = \frac{60 \text{ g}}{x} \Rightarrow x = 22,12 \text{ gCaO}$$

Karbonatisierung:



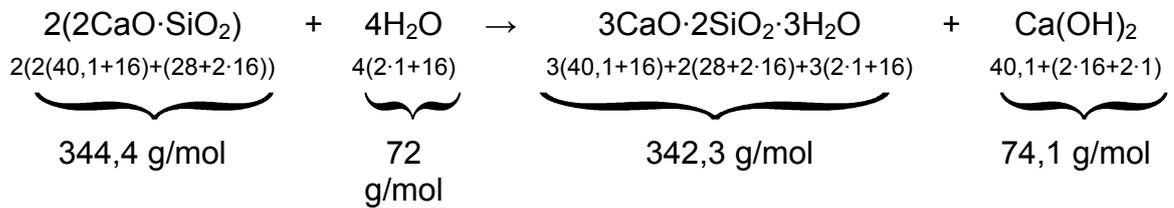
$$\frac{74,1 \text{ g/mol}}{44 \text{ g/mol}} = \frac{29,21 \text{ g}}{x} \Rightarrow x = \underline{17,35 \text{ gCO}_2}$$



$$\frac{56,1 \text{ g/mol}}{44 \text{ g/mol}} = \frac{22,12 \text{ g}}{x} \Rightarrow x = \underline{17,35 \text{ gCO}_2}$$

## C<sub>2</sub>S (Dicalciumsilicat)

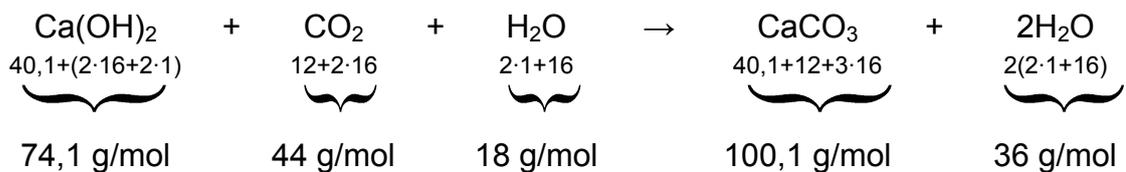
Hydratation:



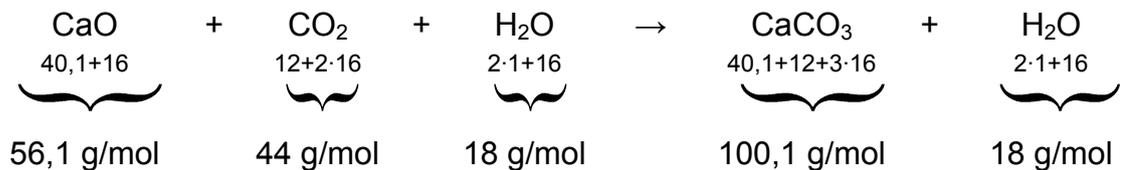
$$\frac{344,4 \text{ g/mol}}{74,1 \text{ g/mol}} = \frac{15 \text{ g}}{x} \Rightarrow x = 3,23 \text{ gCa(OH)}_2$$

$$\frac{344,4 \text{ g/mol}}{168,3 \text{ g/mol}} = \frac{15 \text{ g}}{x} \Rightarrow x = 7,33 \text{ gCaO}$$

Karbonatisierung:



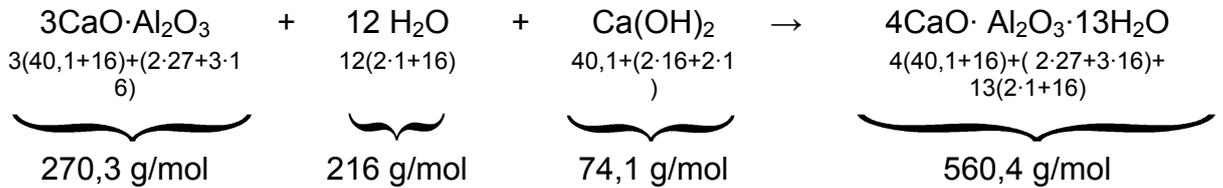
$$\frac{74,1 \text{ g/mol}}{44 \text{ g/mol}} = \frac{3,23 \text{ g}}{x} \Rightarrow x = 1,92 \text{ gCO}_2$$



$$\frac{56,1 \text{ g/mol}}{44 \text{ g/mol}} = \frac{7,33 \text{ g}}{x} \Rightarrow x = 5,75 \text{ gCO}_2$$

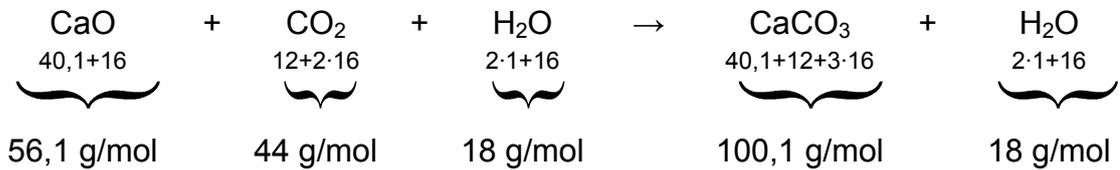
### C<sub>3</sub>A (Tricalciumaluminat)

Hydratation:



$$\frac{270,3\text{ g/mol}}{224,4\text{ g/mol}} = \frac{7\text{ g}}{x} \Rightarrow x = 5,81\text{ gCaO}$$

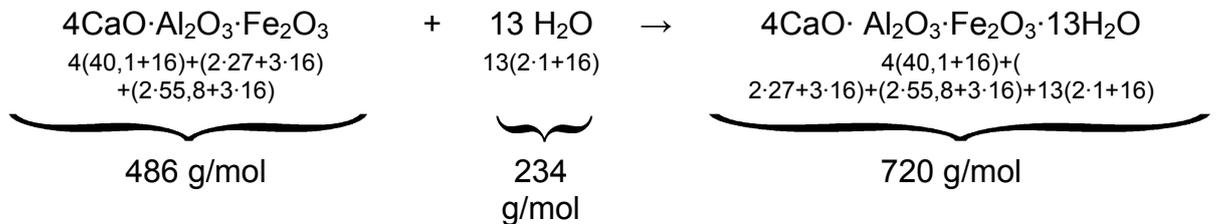
Karbonatisierung:



$$\frac{56,1\text{ g/mol}}{44\text{ g/mol}} = \frac{5,81\text{ g}}{x} \Rightarrow x = \underline{4,56\text{ gCO}_2}$$

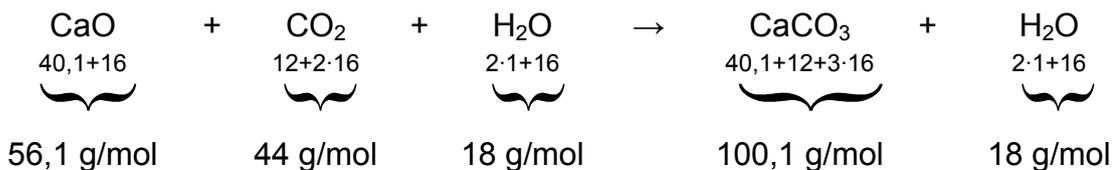
### C<sub>4</sub>AF (Tetracalciumaluminatferrit)

Hydratation:



$$\frac{486\text{ g/mol}}{224,4\text{ g/mol}} = \frac{8\text{ g}}{x} \Rightarrow x = 3,69\text{ gCaO}$$

Karbonatisierung:



$$\frac{56,1\text{ g/mol}}{44\text{ g/mol}} = \frac{3,69\text{ g}}{x} \Rightarrow x = \underline{2,89\text{ gCO}_2}$$

=> Gesamtmenge an CO<sub>2</sub> / 100 g Portlandzement die durch Karbonatisierung dauerhaft gebunden werden kann

$$CO_{2_{C_3S \rightarrow Ca(OH)_2}} + CO_{2_{C_3S \rightarrow CaO}} + CO_{2_{C_2S \rightarrow Ca(OH)_2}} + CO_{2_{C_2S \rightarrow CaO}} + CO_{2_{C_3A \rightarrow CaO}} + CO_{2_{C_4AF \rightarrow CaO}} = CO_2 / 100gPZ$$

$$17,35g + 17,35g + 1,92g + 5,75g + 4,56g + 2,89g = \underline{\underline{49,82gCO_2 / 100g PZ}}$$

### Variante 2: Berechnung mit der Steinour Formel [GN]

$$CO_2 \text{ Gehalt in \%} = 0,785(CaO - 0,7 \cdot SO_3) + 1,091 \cdot MgO + 1,42 \cdot Na_2O + 0,935 \cdot K_2O$$

Die Tabelle 2 zeigt die chemische Zusammensetzung von Portlandzementen (nach Lawrence 1998)

Tabelle 2: chemische Zusammensetzung von Portlandzementen

Komponente	Minimum	Durchschnitt	Maximum	Probenanzahl
SiO <sub>2</sub> [M.-%]	18,40	21,02	24,50	284
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [M.-%]	0,16	2,85	5,78	284
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> [M.-%]	3,10	5,04	7,56	284
<b>CaO</b> [M.-%]	58,10	<b>64,18</b>	68,00	284
<b>MgO</b> [M.-%]	0,02	<b>1,64</b>	7,10	285
<b>SO<sub>3</sub></b> [M.-%]	0	<b>2,58</b>	5,35	280
<b>Na<sub>2</sub>O</b> [M.-%]	0	<b>0,24</b>	0,78	263
<b>K<sub>2</sub>O</b> [M.-%]	0,04	<b>0,70</b>	1,66	280
Freikalk [M.-%]	0,03	1,24	3,68	132
Chlorid [M.-%]	0	0,02	0,05	15
Sr [ppm]	0	532	19195	191
Ti [ppm]	0	1059	4196	288
P [ppm]	0	389	2139	288
Mn [ppm]	0	315	2366	288
Ba [ppm]	91	280	1402	94

$$CO_2 = 0,785(64,18\% - 0,7 \cdot 2,58\%) + 1,091 \cdot 1,64\% + 1,42 \cdot 0,24\% + 0,935 \cdot 0,70\%$$

$$CO_2 = \underline{\underline{51,75\%}}$$

Die Ergebnisse aus beiden Rechnungen zeigen, dass theoretisch ca. 50 g CO<sub>2</sub>/100 g PZ durch Karbonatisierung dauerhaft gebunden werden kann.

Die Geschwindigkeit der Karbonatisierung wird durch die Eigenschaften der rezyklierten Gesteinszuschläge und die Vorort anzutreffenden atmosphärischen Gegebenheiten bestimmt.

Eine große spezifische Oberfläche des Materials führt zu einer schnellen Reaktion ebenso wie eine erhöhte  $\text{CO}_2$  Konzentration. Die Reaktionsgeschwindigkeit wird meistens, wie auch in diesem Fall, experimentell bestimmt. D.h. man misst den zeitlichen Verlauf der Konzentrationsänderungen von den beteiligten Reaktionspartnern.

### **3.1.2 Abschätzung der $\text{CO}_2$ – Aufnahme von rezyklierten Zuschlägen aus Bauabfällen durch die Karbonatisierung**

Durch das Gesetz von der Erhaltung der Masse, welches aussagt, dass bei jeder chemischen Reaktion die Gesamtmasse der Ausgangsstoffe gleich der Gesamtmasse der Reaktionsprodukte ist, wird der  $\text{CO}_2$  Bedarf bestimmt, welcher erforderlich ist, um das vorliegende  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  im Beton vollständig zu karbonatisieren.

Bei den 4 Hauptklinkermineralien des Portlandzementes entsteht bei der Hydratation von Tricalciumsilicat und Dicalciumsilicat das zur Karbonatisierung benötigte Calciumhydroxid. Nachdem das vorhandene Portlandit, welches die instabilste Phase bezogen auf die Karbonatisierung in der Zementsteinmatrix darstellt, vollständig karbonatisiert wurde, kommt es zur Karbonatisierung der CSH-Phasen, die zum Teil schon parallel mit der Karbonatisierung von Portlandit ablaufen [SW98]. Dabei wird Calcit über die metastabilen Karbonatmodifikationen Vaterit und Aragonit gebildet. Die CSH – Phasen sind die Hauptfestigkeitsbildner in der Zementsteinmatrix. Durch die Karbonatisierung von Portlandit kommt es zu einer Gefügeverdichtung und zu einer Erhöhung der Druckfestigkeit. Inwieweit die Festigkeit der Zementsteinmatrix verändert wird, wenn es zur Karbonatisierung aller Hydratphasen kommt, ist in weiteren wissenschaftlichen Ausarbeitungen zu untersuchen. Für die nachfolgenden Berechnungen wird von einer vollständigen Karbonatisierung des Calciumhydroxides ausgegangen. Die stöchiometrischen Berechnungen aus Abschnitt 3.1.1 ergeben eine Gesamtmasse von 296,4 g/mol Calciumhydroxid, welche bei der Hydratation von Portlandzement entstehen.

**Schritt 1:** Berechnung der Gesamtmasse von Calciumhydroxid, welche in 1  $\text{m}^3$  Beton vorhanden ist.

Um die Menge an  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  in 1  $\text{m}^3$  Beton bestimmen zu können, müssen folgende Annahmen bezüglich der Ausgangsstoffe getroffen werden:

Der Zementgehalt in 1  $\text{m}^3$  verdichtetem Beton richtet sich nach der geforderten Druckfestigkeit und dem Widerstand gegen Korrosion der Bewehrung im Beton.

Die Mindestmenge an Zement laut dem Deutschen Beton-Verein e.V. "Beton-Handbuch" beträgt 300  $\text{kg}/\text{m}^3$  bei bewehrtem Beton für Außenbauteile mit Zement 32,5.

Der Anteil an Klinker im Zement beträgt in Portlandzementen zwischen 95 und 100 % [SW98]. Bei Hochofenzementen sowie Portlandzementen mit Zuschlagstoffen bewegt sich der Klinkeranteil zwischen 20 und 94%. Bildet man aus den 4 Eckpunkten das arithmetische Mittel, so erhält man ca. 77 %, d.h. ca. 77 % Klinker befinden sich im Zement. Damit ergibt sich folgende Ausgangssi-

tuation, bzw. werden folgende Annahmen der Ergebnisfindung zu Grunde gelegt:

Für die Herstellung von 1 m<sup>3</sup> Beton benötigen wir Ø 300 kg Zement. Diese 300 kg Zement bestehen zu Ø 77 % aus den Hauptklinkermineralien, d.h. aus Ø 60 % C<sub>3</sub>S, Ø 15 % C<sub>2</sub>S, Ø 7 % C<sub>3</sub>A und Ø 8 % C<sub>4</sub>A,F.

Somit befinden sich in 1 m<sup>3</sup> Beton Ø 300 kg Zement. In diesen 300 kg Zement sind Ø 231 kg Klinkermineralien. Das bedeutet, dass in 1 m<sup>3</sup> Beton Ø 139,6 kg C<sub>3</sub>S und Ø 34,7 kg C<sub>2</sub>S vorkommen.

$$\begin{aligned} \Rightarrow \frac{456,6 \text{ g/mol}}{222,3 \text{ g/mol}} &= \frac{139,6 \text{ kg}}{x} \Rightarrow x = 67,97 \text{ kg Ca(OH)}_2/\text{m}^3 \text{ Beton} \\ \Rightarrow \frac{344,4 \text{ g/mol}}{74,1 \text{ g/mol}} &= \frac{34,7 \text{ kg}}{x} \Rightarrow x = 7,47 \text{ kg Ca(OH)}_2/\text{m}^3 \text{ Beton} \end{aligned} \left. \vphantom{\begin{aligned} \Rightarrow \frac{456,6 \text{ g/mol}}{222,3 \text{ g/mol}} &= \frac{139,6 \text{ kg}}{x} \Rightarrow x = 67,97 \text{ kg Ca(OH)}_2/\text{m}^3 \text{ Beton} \\ \Rightarrow \frac{344,4 \text{ g/mol}}{74,1 \text{ g/mol}} &= \frac{34,7 \text{ kg}}{x} \Rightarrow x = 7,47 \text{ kg Ca(OH)}_2/\text{m}^3 \text{ Beton} \end{aligned}} \right\} \Sigma \underline{75,44 \text{ kg/m}^3}$$

Durchschnittlich entstehen 75,44 kg Calciumhydroxid pro m<sup>3</sup> Beton bei der Hydratation des Zementes.

**Schritt 2:** Stöchiometrische Berechnung der Menge an CO<sub>2</sub> die benötigt wird, damit die 75,44 kg Calciumhydroxid vollständig karbonatisieren.

$$\Rightarrow \frac{74,1 \text{ g/mol}}{44 \text{ g/mol}} = \frac{75,44 \text{ kg}}{x} \Rightarrow \underline{x = 44,80 \text{ kg CO}_2 / \text{m}^3 \text{ Beton}}$$

Theoretisch werden durchschnittlich 44,80 kg Kohlendioxid benötigt, damit das gesamte Calciumhydroxid in 1 m<sup>3</sup> Beton vollständig karbonatisiert werden kann.

**Schritt 3:** Abschätzung der CO<sub>2</sub> – Aufnahme des jährlich anfallenden Betonbruchs

Das Abfallaufkommen für das Jahr 2006 im Baugewerbe ist durch das Bild 2 und Bild 3 dargestellt. Die Darstellungen, welche in den Monitoringberichten der ARGE Kreislaufwirtschaftsträger Bau zu finden sind, zeigen die Entwicklungen der Materialströme [1].

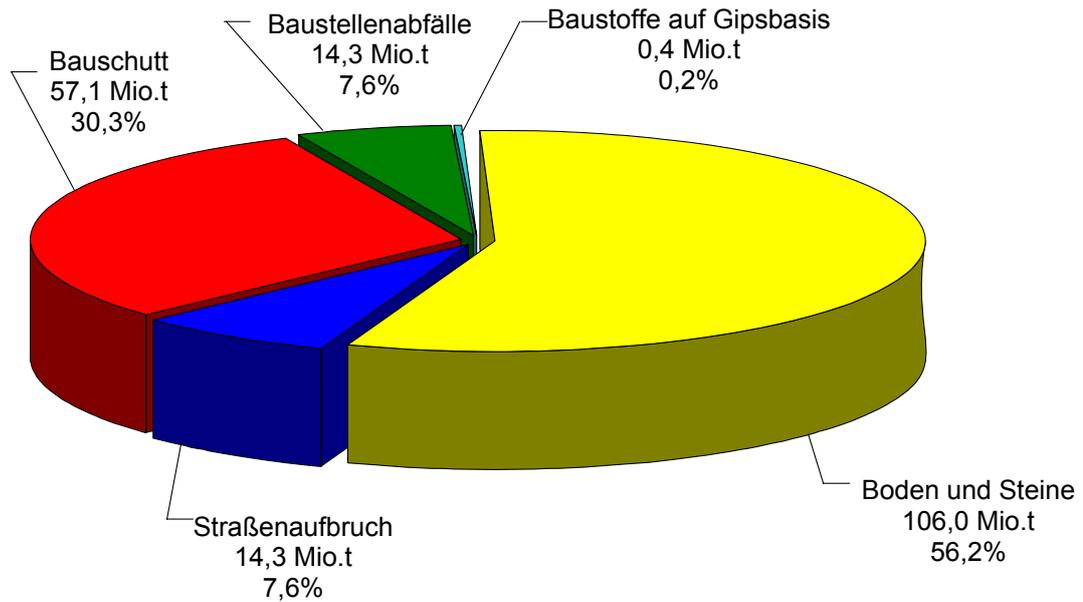


Bild 2: Statistisch erfasste Mengen von Bau- und Abbruchabfällen 2006 laut 6. Monitoring-Bericht der ARGE KWTB 2008

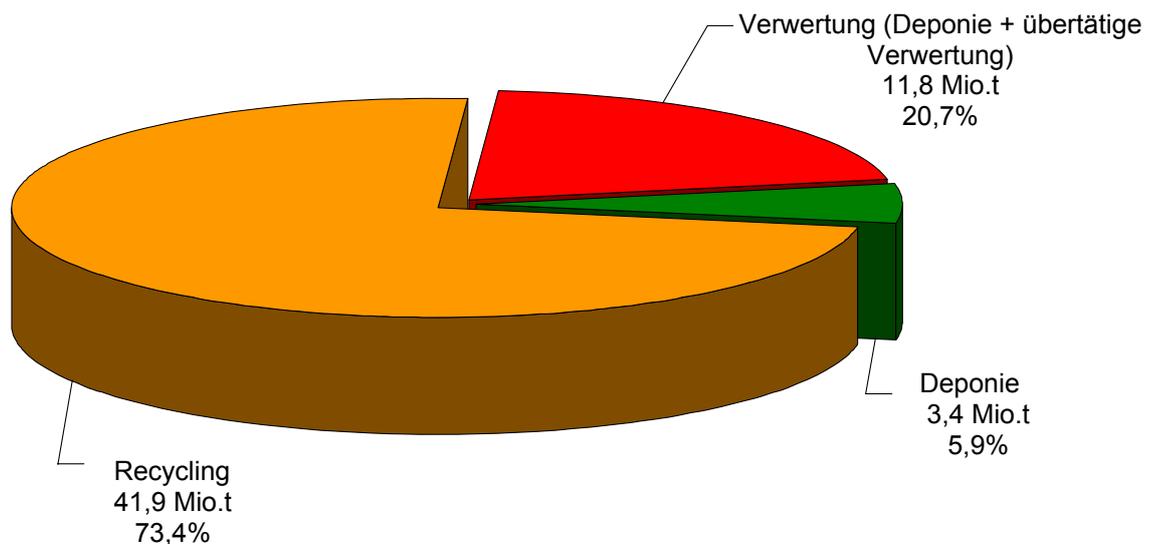


Bild 3: Verwertungswege für Bau- und Abbruchabfällen 2006 nach Angaben des 6. Monitoring-Bericht der ARGE KWTB 2008

Die Ergebnisse im Monitoringbericht 2008 zeigen, dass im Jahr 2006 57,1 Mio.t Bauschutt angefallen sind. Von diesen 57,1 Mio.t wurden 41,9 Mio.t recycelt. Wird davon ausgegangen, dass es sich bei dem rezyklierten Material überwiegend um Betonbruch handelt, standen ca. 40 Mio.t zur Verfügung, die vor ihrer Wiederverwendung hätten gezielt karbonatisiert werden können. 40 Mio.t Betonbruch entsprechen ca. 16 Mio.m<sup>3</sup> Betonbruch. Ca. 45 kg CO<sub>2</sub> können durch Karbonatisierung in 1 m<sup>3</sup> Beton chemisch gebunden werden, wenn lediglich der Portlandit umgewandelt wird. In den 16 Mio.m<sup>3</sup> Betonbruch, die im Jahr 2006 angefallen sind, hätte man durch eine gezielte Karbonatisierung theoretisch 720.000 t CO<sub>2</sub> chemisch binden können. Werden die Bedingungen der Karbonatisierung dahingehend verändert, dass es auch zur Karbonatisierung der

Hydratphasen kommt, kann davon ausgegangen werden, dass 50 g CO<sub>2</sub>/100 g Zement gebunden werden. Die CO<sub>2</sub> Aufnahme von 1 m<sup>3</sup> Betonbruch würde sich von 45 kg auf 150 kg steigern. Die gebundene Menge beträgt dann 2.500.000 t CO<sub>2</sub>. Bezogen auf die gegenwärtig in Deutschland bei der Zementherstellung freigesetzte Menge an CO<sub>2</sub> von ca. 25 Mio.t bewegt sich die potentielle CO<sub>2</sub>-Reduzierung zwischen 3 und 10 %.

Die Prognosen zum Aufkommen an Betonbruch gehen von einer Menge von 100 Mio t im Jahre 2020 aus. Damit vergrößert sich das Potential der CO<sub>2</sub> Speicherung durch gezielte Karbonatisierung enorm. Es bewegt sich dann zwischen 2 und 6 Mio. t. Wird von einer gleichbleibenden CO<sub>2</sub>-Emission der Zementindustrie ausgegangen, kann eine CO<sub>2</sub>-Reduzierung zwischen 8 und 24 % erreicht werden.

Die durchgeführten Berechnungen im oberen Teil dieses Abschnittes beziehen sich auf den anfallenden Betonbruch aus dem Jahr 2006 in Deutschland. Die jährliche Betonproduktion von Deutschland übersteigt seit Beginn der Betonbauweise den anfallenden Betonabbruch. Durch den demografischen Wandel und die endliche Lebensdauer von Betonbauwerken wird es in den nächsten Jahren zu einem stetigen Anstieg von Betonbruch kommen, der durch eine gezielte Karbonatisierung qualitativ aufgewertet werden kann und parallel dazu seine Ökobilanz verbessert.

### **3.2 Entwicklung einer Versuchsanlage für die kinetischen Untersuchungen**

Um die Zementsteinpasten, Modellbetone und rezyklierten Gesteinskörnungen gezielt karbonatisieren und im Labor untersuchen zu können, war es erforderlich, eine Versuchsanlage, welche für verschiedene Anforderungen geeignet ist, zu entwickeln.

An die Versuchsanlage wurden vor und während der Planungsphase folgende Anforderungen gestellt:

- Einstellung der CO<sub>2</sub> Konzentration über spezielle Gasmischer/-regler
- Überwachung der Temperatur und der rel. Luftfeuchte im Probenraum
- Überwachung der CO<sub>2</sub> Konzentration beim Einströmen in den Probenraum und beim Ausströmen
- 24 stündige Steuerung, Überwachung und Aufzeichnung der künstlichen Atmosphäre im Probenraum

Die Versuchsanlage sollte derart geplant werden, dass mit Hilfe einer entsprechenden Steuerung der Vorgang der Karbonatisierung im Probenraum völlig automatisiert ablaufen kann. Das bedeutet, nachdem die Proben in Position gebracht wurden, erfolgt die Eingabe der entsprechenden Parameter (CO<sub>2</sub> Konzentration, Zeitumfang der Bewitterung, Temperatur und rel. Luftfeuchte). Über die im Probenraum angebrachten Sensoren werden entsprechende Messgeräte versorgt, welche ihre Messdaten an das Steuerelement weiterleiten. Die Daten werden im Steuerelement in zeitlichen Abständen aufgezeichnet. Die Anlage bzw. der Probenraum ist so zu konzipieren, dass es zu keinem Gas- und Stoffaustausch mit der umgebenden Atmosphäre kommt. Damit die Karbo-

natisierung optimal ablaufen kann, ist es erforderlich, dass das verbrauchte CO<sub>2</sub> stetig nachgeliefert wird und dadurch die CO<sub>2</sub> Konzentration in der künstlichen Atmosphäre konstant bleibt. Damit es zu einer gleichmäßigen Karbonatisierung an der gesamten Probenoberfläche kommt, wird das Probematerial auf einem Gitterrost bzw. Lochscheibe im Reaktorinnerem positioniert.

In der Planungsphase wurden verschiedene Varianten zum Versuchsaufbau erörtert und auf verfahrenstechnische Schwerpunkte untersucht. Am Ende der Vorplanung standen zwei Versuchsaufbauten in der engeren Auswahl, von denen eine planungstechnisch umgesetzt werden sollte.

Batch-Reaktor: Probe wird in einem verschlossenen Reaktionsgefäß mit CO<sub>2</sub> beaufschlagt. Die Abnahme der CO<sub>2</sub>-Konzentration in Abhängigkeit von der Reaktionsdauer dient als Maß für die Karbonatisierung. Diese Konzeption wurde verworfen. Gründe: Absolut dichtes Gefäß notwendig. Keine Probenentnahme während des Versuchs möglich. Karbonatisierungsbedingungen hinsichtlich der CO<sub>2</sub>-Konzentration nicht konstant.

Durchlauf-Reaktor: Probe wird in einem Rohrreaktor behandelt, der von einem Gas mit definierter CO<sub>2</sub>-Konzentration durchströmt wird. CO<sub>2</sub>-Konzentration, Verfolgung der Reaktion anhand von Konzentrationsabnahme und Masserveränderung. Probenahme während der Messung möglich. Späterer technischer Reaktor wird diesem Prinzip entsprechen. Nachteil im Laborbetrieb: Hoher Gasverbrauch.

Das Bild 4 zeigt die schematische Darstellung des Batch-Reaktors, in welchem die Gaskonzentration im Probenraum kontinuierlich über den Bewitterungszeitraum abnimmt und erst bei einer bestimmten Konzentrationsänderung CO<sub>2</sub> in den Probenraum eingespeist wird, um so die geforderte CO<sub>2</sub> Konzentration wieder herzustellen. Die zweite Variante ist in Bild 5 zu sehen. Diese Variante zeigt einen gleichmäßig durchströmten, aufrecht stehenden Rohrzylinder. Der wesentliche Unterschied zu Variante 1 besteht darin, dass der Probenraum kontinuierlich über den gesamten Bewitterungszeitraum mit einer gleichbleibenden CO<sub>2</sub> Konzentration durchströmt wird.

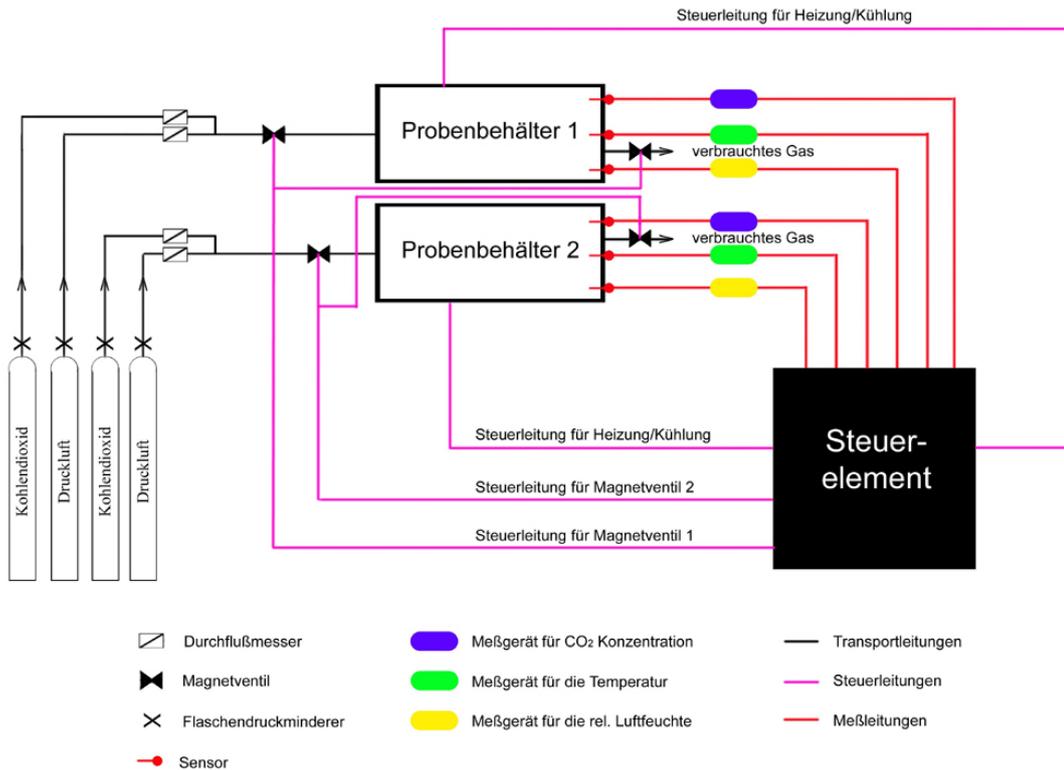


Bild 4: Schematische Darstellung der Versuchsapparatur (Variante 1)

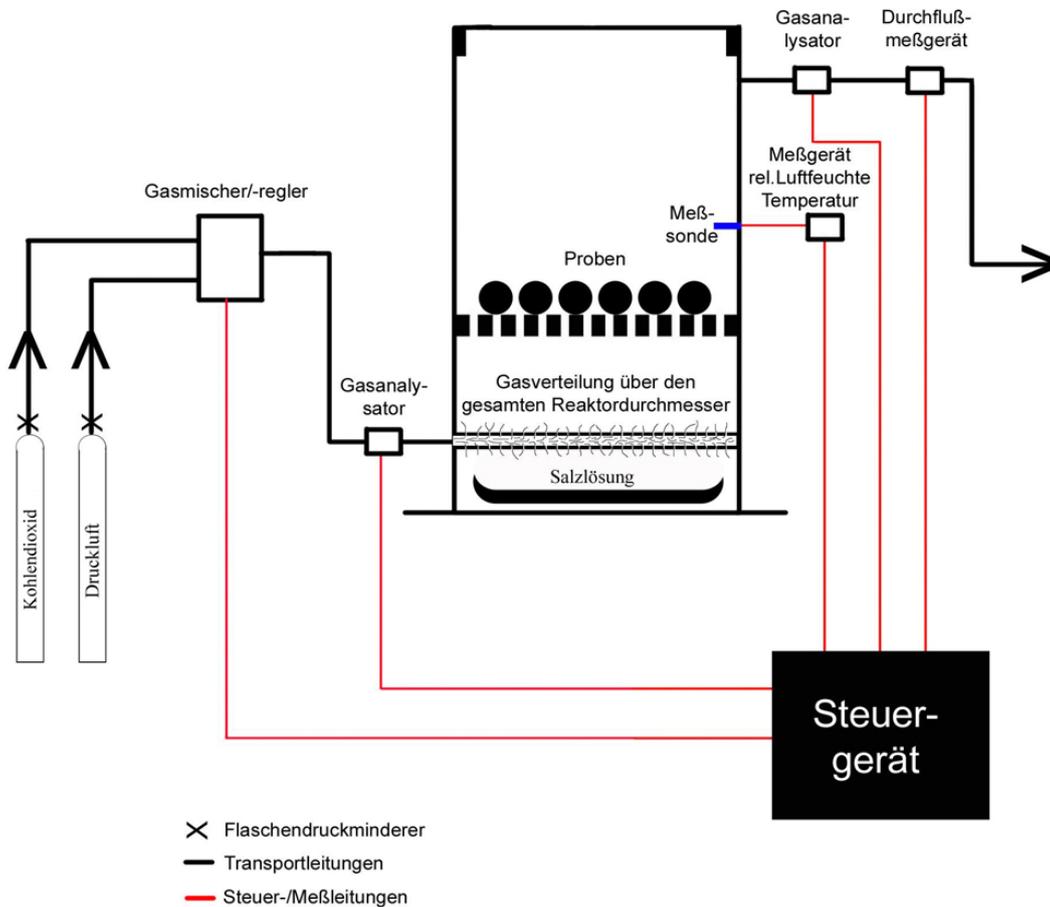


Bild 5: Schematische Darstellung der Versuchsapparatur (Variante 2)

Nach einer Gegenüberstellung der Vor- und Nachteile beider Varianten stellte sich die Umsetzung der Variante 2 als sinnvoll heraus. Die entscheidenden Aspekte welche für die Variante 2 sprachen, waren die kontinuierliche Durchströmung des Rohrzylinders, die überschaubare Steuer- und Regelungstechnik sowie die Umsetzung des Labormaßstabes in den praktischen Maßstab. Durch die gleichmäßige Durchströmung des Probenraumes kommt es zu keinen Schwankungen in der CO<sub>2</sub> Konzentration, was sich wiederum positiv auf den Karbonatisierungsvorgang auswirkt. Die Voraussetzung für eine gleichbleibende Diffusion von CO<sub>2</sub> in den Porenraum der behandelten Proben ist damit gegeben.

Nach der Fertigstellung der Versuchseinrichtung, wurden die Anlage und die einzelnen Komponenten, auf ihre Funktionsweise überprüft. Die Testphase gliederte sich in zwei Abschnitte.

In der ersten Phase wurde die Anlage im Leerlauf betrieben, d.h. es befanden sich keine Proben im Rohrreaktor. Das Ziel dieser Leerlaufphase war es, die Messeinrichtungen auf die Gesamtsituation anzupassen und zu kalibrieren. Die Ergebnisse der ersten Durchläufe waren nicht befriedigend. Es stellte sich eine, laut Messprotokoll, unterschiedliche CO<sub>2</sub> Konzentration an den Messzellen ein. Daraufhin startete eine aufwendige Fehlersuche, die wiederum mehrere Versuchsdurchläufe beinhaltete. Nachdem das Gasgemisch, die Massedurchflußmesser und das Gesamtsystem auf Undichtigkeiten überprüft wurden, erfolgte der Umbau der CO<sub>2</sub> Messzellen. Die Messzellen wurden gegeneinander ausgetauscht und auch im parallelen Betrieb miteinander verglichen. Das Resultat der Untersuchungen war, dass die CO<sub>2</sub> Messeinheiten abweichende Messwerte lieferten. Nach Rücksprache mit dem Hersteller kam es zum Ausbau einer der Messzellen. Dieser überprüfte das Gerät und bekräftigte die Messgenauigkeit. Daraufhin veranlasste der Hersteller den Austausch von beiden Messzellen. Die neuen Messeinheiten wurden in die bestehende Anlage eingebaut und auf ihre Funktionalität überprüft. Nach Abschluss der Leerlaufphase waren die Ergebnisse der Messprotokolle nachvollziehbar und die Anlage war für die 2. Testphase bereit.

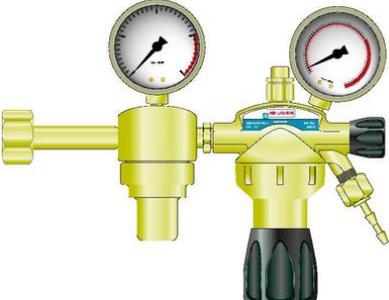
In der zweiten Phase kam es zur Bestückung des Rohrreaktors mit Probematerial. Die dabei gewonnen Messergebnisse wurden mit den Resultaten aus dem Leerlaufbetrieb verglichen. Die Unterschiede in den Ergebnissen, die Reaktionszeiten der Messelemente und die Handhabung der Probenbestückung, machten kleinere Nachkalibrierungen und Anpassungen im Versuchsaufbau und –ablauf notwendig.

Nach Beendigung beider Testphasen, welche sich über mehrere Wochen erstreckte, konnten die eigentlichen Versuchsreihen gestartet werden.

Die Versuchsanlage wird nach folgendem Schema betrieben. Die Proben werden im Reaktor auf einer Lochscheibe positioniert. Nachdem die Bewitterungskammer verschlossen wurde, werden die Durchflussmesser so eingestellt, dass sie ein definiertes Gasgemisch im Zulauf erzeugen. Über die im Zulauf befindliche CO<sub>2</sub> Messzelle erfolgt die Überprüfung der zuvor eingestellten Gaskonzentration. Im Probenraum befindet sich eine Salzlösung, die eine gleichbleibende relative Luftfeuchte gewährleistet. Parallel dazu erfolgt über eine

Messsonde die Überwachung der Luftfeuchtigkeit und der Temperatur im Reaktorrinnen. Damit es zu einer optimalen Reaktion von CO<sub>2</sub> im Reaktor kommt, ist die Strömungsgeschwindigkeit der Diffusionsgeschwindigkeit anzupassen. Nachdem das Gasgemisch den Probenraum durchströmt hat, wird es nach dem Verlassen des Rohrreaktors über eine CO<sub>2</sub> Messzelle im Ablauf geleitet und die Konzentration an CO<sub>2</sub> bestimmt. Aufgrund der CO<sub>2</sub> Konzentrationsänderung zwischen dem Zu- und dem Ablauf des Rohrreaktors können erste Aussagen über die Karbonatisierung im Inneren des Probenraumes getroffen werden.

Tabelle 3: Auflistung der verwendeten Komponenten und Messgeräte:

Komponente/Messgerät	Hersteller/ Vertrieb	Abbildung
Flaschendruckminderer	AIR LIQUIDE	
Digitaler Massedurchflußregler	Wagner Mess- und Regeltechnik GmbH	
CO <sub>2</sub> Messgerät	smartGas Mikrosensorik	
rel. Luftfeuchte Messgerät	Ahlborn Mess- und Regelungs- technik GmbH	

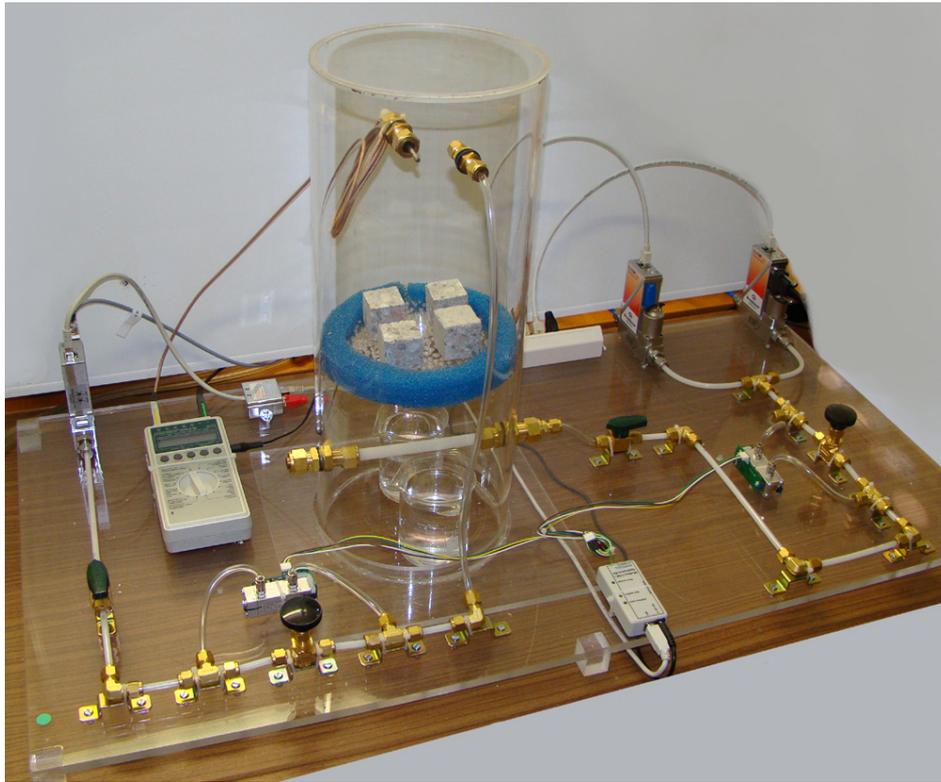


Bild 6: Versuchsanlage (Variante 2)

### 3.3 Karbonatisierungsverlauf von Zementpasten und Modellbetonen

Alle Versuche erfolgten bei einer durchschnittlichen Temperatur von 22°C und einer relativen Luftfeuchte von ca. 70 %. Der Durchfluss wurde mit 150 ml/min eingestellt, d.h. die Strömungsgeschwindigkeit im Rohrreaktor betrug 0,09 mm/s.

Die Proben wurden im Trockenschrank bei 105°C vor und nach der Bewitterung bis zur Massekonstanz getrocknet, damit die karbonatisierungsbedingten Masseveränderungen nachgewiesen werden konnten. Vor der Karbonatisierung, nach der Exsikkatorlagerung und nach der Karbonatisierung kam es zur Bestimmung des Glühverlustes.

#### 3.3.1 Gezielte Karbonatisierung von Zementpasten

##### *Nachweis der Karbonatisierung mit unterschiedlichen Methoden*

Das Durchführungsschema der gezielten Karbonatisierung von Zementpasten ist in Bild 7 zu sehen. Wie aus dem Schema zu entnehmen ist, setzte sich das experimentelle Programm aus verschiedenen Schritten zusammen, die im Laufe der Versuche immer wieder modifiziert wurden. Somit konnte die Versuchsdurchführung den Ergebnissen angepasst werden.

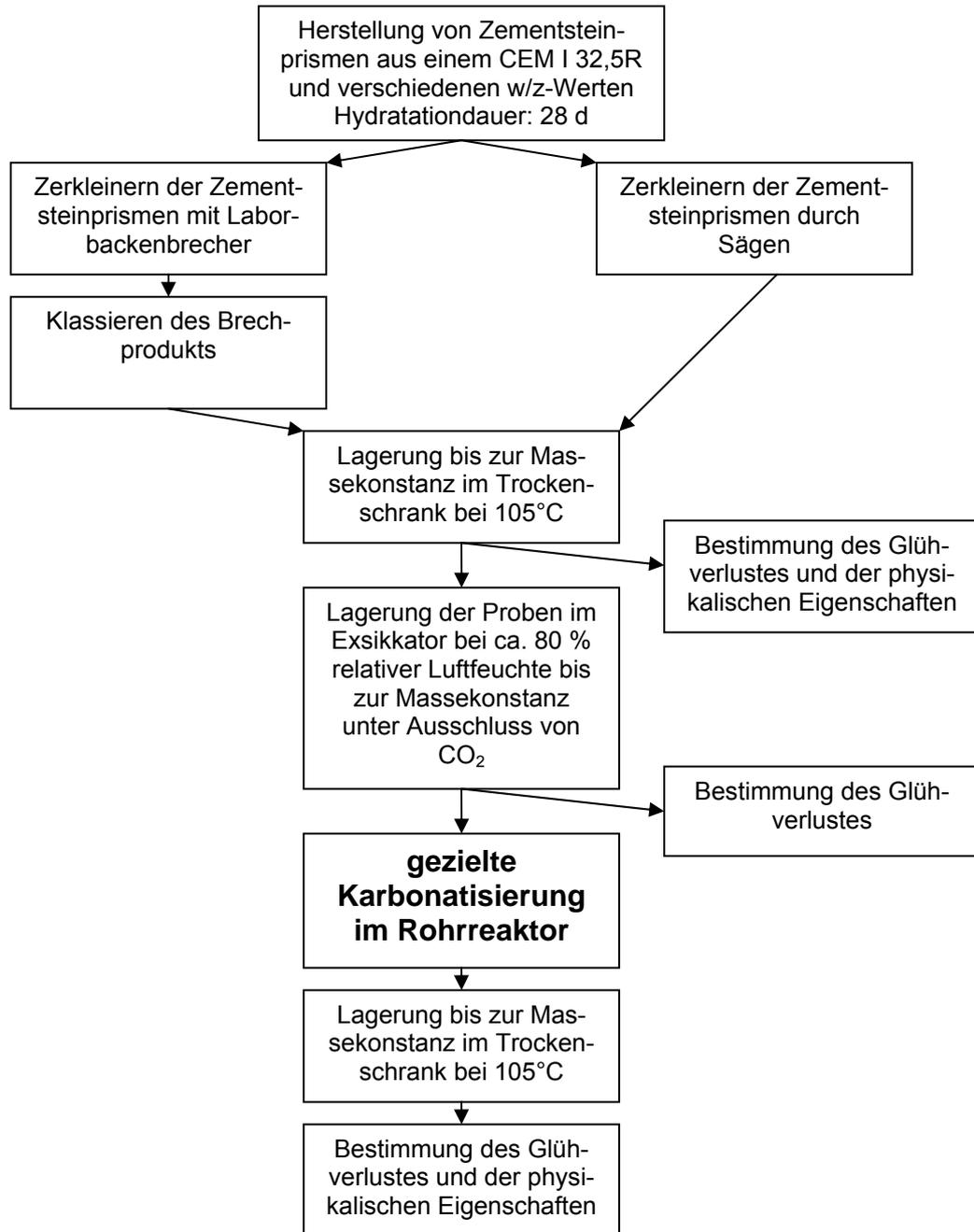


Bild 7: Durchführungsschema für die gezielte Karbonatisierung von ZS

Die ersten Versuche erfolgten an Zementsteinquadern, die aus den Zementsteinprismen durch Sägen gewonnen wurden. Die Quader hatten eine Abmessung von 4 cm x 4 cm x 2 cm. Die Versuche erstreckten sich über verschiedene Zeitintervalle bei einer konstanten CO<sub>2</sub> Konzentration von 60 %. Die Ergebnisse sollten Aufschluss über die Karbonatisierungstiefe und die relative Massezunahme in Abhängigkeit von dem w/z-Wert geben.

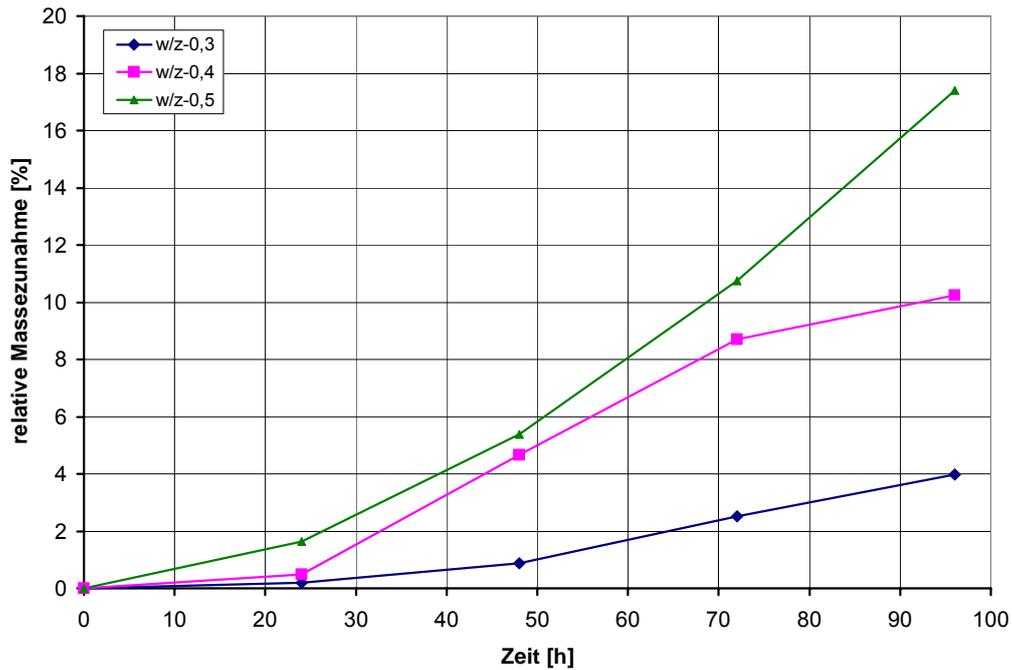


Bild 8: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von w/z-Wert und Zeit

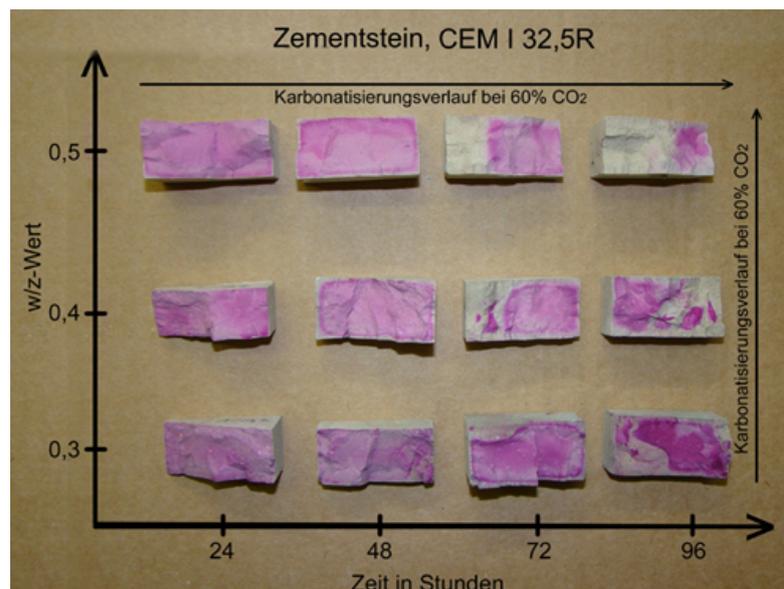


Bild 9: Karbonatisierungsverlauf in Abhängigkeit von w/z-Wert und Zeit

In den Grafiken (Bild 8 und Bild 9) ist die Abhängigkeit der Karbonatisierung von dem w/z-Wert und der Bewitterungszeit dargestellt. In Bild 9 ist die Karbonatisierung mit Hilfe des Indikators Phenolphthalein sichtbar gemacht worden. Dabei stellen die rosa eingefärbten Bereiche den noch nicht karbonatisierten Teil dar. Es ist sehr schön zu erkennen, dass mit steigendem w/z-Wert die Karbonatisierung im Zementstein voranschreitet, was wiederum auf ein durchgängiges Kapillarporensystem hinweist. Die thermische Analyse der Zementsteinquader (siehe Anhang A) bestätigt die optische Auswertung von Bild 9. D.h. die diffusionsoffene Oberfläche der Zementsteinquader mit einem w/z-0,5 hat nach der Bewitterung die größte Massezunahme erfahren und damit mehr Calcit in den Poren gebildet. Die meisten Praxisbetone besitzen einen w/z-Wert, der sich

zwischen 0,5 und 0,7 bewegt, d.h. es ist ein durchgängiges Kapillarporensystem im Zementstein vorhanden.

Trotz der relativ langen Bewitterungszeit kam es nicht zur Umwandlung des gesamten Portlandits, was den Probekörpergrößen geschuldet war. Deshalb wurde in den weiteren Versuchen Körnungen untersucht. Bild 10 sowie der Anhang A zeigen die Ergebnisse aus diesen Versuchsreihen. Es ist zu erkennen, dass durch die Erhöhung der CO<sub>2</sub> Konzentration die Karbonatisierung beschleunigt wird, die sich als Massezunahme niederschlägt. Da die Werte relativ nah aneinander liegen, wurde in den nachfolgenden Versuchen die Bewitterungszeit verkürzt und mehrfach variiert, um so den Stagnationspunkt der Karbonatisierung zu ermitteln. Während der einzelnen Versuche wurde nach der Hälfte der Bewitterungszeit ein Teil der Probe zerkleinert, damit mögliche Porenverschlüsse freigelegt werden konnten. Die dabei gewonnenen Ergebnisse (siehe Anhang A – Tabelle A3 bis A7) weisen gegenüber der nicht noch einmal zerkleinerten Probe keine Veränderungen auf. Deshalb erfolgten die weiteren Untersuchungen an Proben mit einer Korngröße 2/4 bei verschiedenen Bewitterungszeiten und unterschiedlichen CO<sub>2</sub> Konzentrationen.

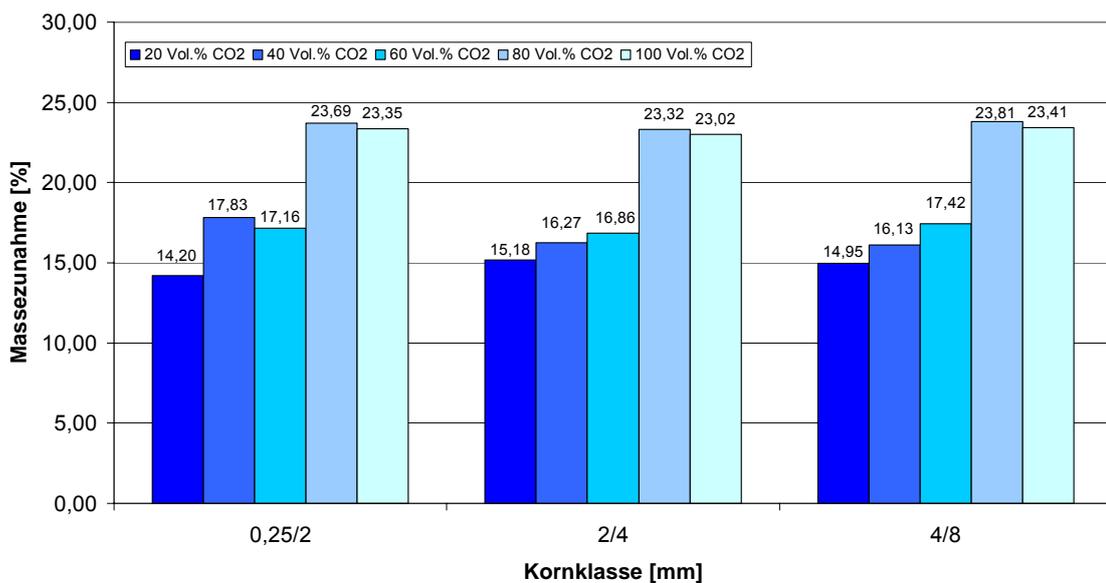


Bild 10: Massezunahme in Abhängigkeit von Korngröße und CO<sub>2</sub> Konzentration

Die Resultate der Versuche mit Zementstein der Korngröße 2/4 und einem w/z-0,5, sind in Bild 11 und im Anhang A zu sehen. Die Ergebnisse zeigen einen kontinuierlichen Anstieg der Massezunahme bezogen auf die zeitliche Lagerung im Reaktor. In den ersten 6 h ist bei allen Versuchen ein relativ steiler Anstieg zu lokalisieren, der im weiteren Verlauf abnimmt, was auf einen Abfall der Karbonatisierungsgeschwindigkeit hinweist. In der ersten zeitlichen Phase von 0 bis 6 h der gezielten Karbonatisierung kommt es zu einer raschen Umsetzung von Portlandit zu Calcit. Inwieweit der Porenverschluss oder andere äußere Einflüsse für den Karbonatisierungsablauf verantwortlich sind, ist in weiteren Untersuchungen klarzustellen. Es sollte jedoch das Augenmerk auf die ersten Stunden der Karbonatisierung gelegt werden, um dort das Maximum der Calcit-

kristallisation in den Poren zu erreichen. Für die praktische Anwendung ist der Zeitraffer der Karbonatisierung von großer Bedeutung.

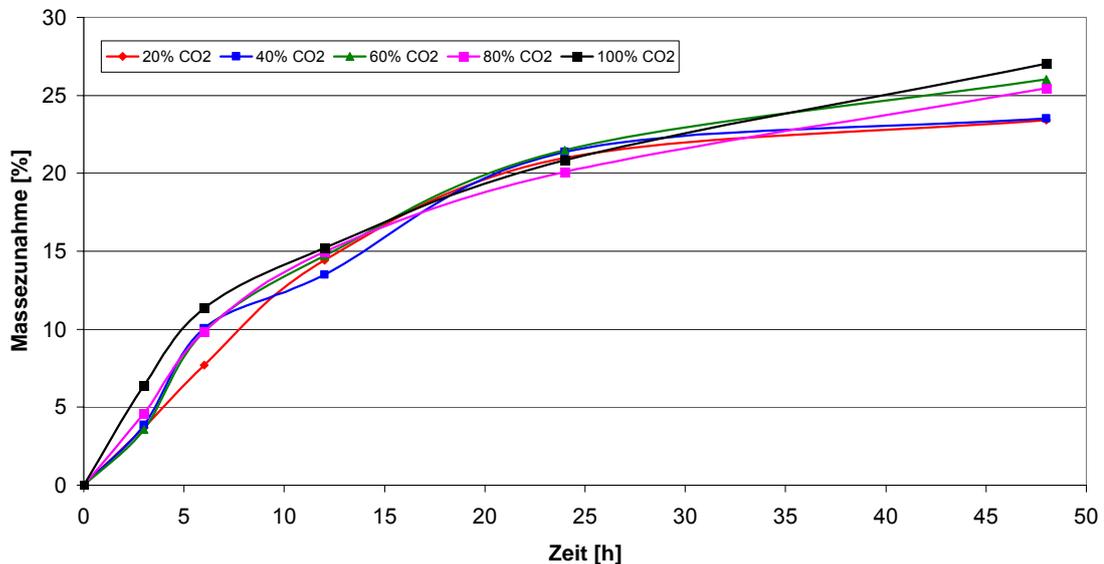


Bild 11: Massezunahme in Abhängigkeit von Zeit und CO<sub>2</sub> Konzentration

Die Massezunahme während der Karbonatisierung ergibt sich durch den Austausch des in den Hydratationsprodukten chemisch gebundenen Wassers mit einer Molmasse von 18 g/mol durch das Kohlendioxid mit 44 g/mol. Ob durch die Karbonatisierung die Hydratphasen tatsächlich reduziert und Calcit gebildet wurde, kann damit nicht nachgewiesen werden. Dieser Nachweis wurde über die thermische Analyse (siehe Anhang A) erbracht. Die Bilder A 13 bis A 18 im Anhang A zeigen den Portlandit- und Calcitgehalt vor und nach der Karbonatisierung. Der Portlanditgehalt verringert sich in den Proben und es kommt zu einem Anstieg der Calcitmenge.

#### *Einfluss der Vorbehandlung auf die Karbonatisierung*

Die Karbonatisierung konnte eindeutig nachgewiesen werden. Nicht erklärbar ist, warum die CO<sub>2</sub>-Konzentration und die Korngröße so wenig Einfluss haben. Mögliche Ursache ist die gewählte Probenvorbereitung. Die zu Beginn der Untersuchungen stehende Trocknung bei 105 °C entzieht den Proben das gesamte physikalisch gebundene Wasser und bereits Teile des chemisch gebundenen Wassers. Die anschließende Feuchtelagerung im Exsikkator in CO<sub>2</sub>-freier Atmosphäre kann den Wasserverlust nur bei sehr langen Lagerungsdauern ausgleichen.

Der Anfangswassergehalt scheint von ausschlaggebender Bedeutung zu sein und kann durch die Befeuchtung im Reaktor während der Karbonatisierung nicht ausgeglichen werden. Eine Serie von insgesamt 15 Versuchen mit Zementstein macht diesen Sachverhalt deutlich: Bei allen Versuchen waren die Bedingungen während der Karbonatisierung gleich:

CO<sub>2</sub> Konzentration : 40 %  
Durchfluss : 150ml/min

Bewitterungszeit : 6 Stunden  
 relative Luftfeuchte : 70 %  
 Temperatur : 22 °C

Unterschiede bestanden in der Zeit der Vorlagerung der Proben im Exsikkator (siehe Bild 12). Sie betrug minimal 7 Tage und maximal 140 Tage. Bild 12 zeigt, dass der Wassergehalt deutlich ansteigt und erst nach 140 Tagen eine Sättigung erreicht ist.

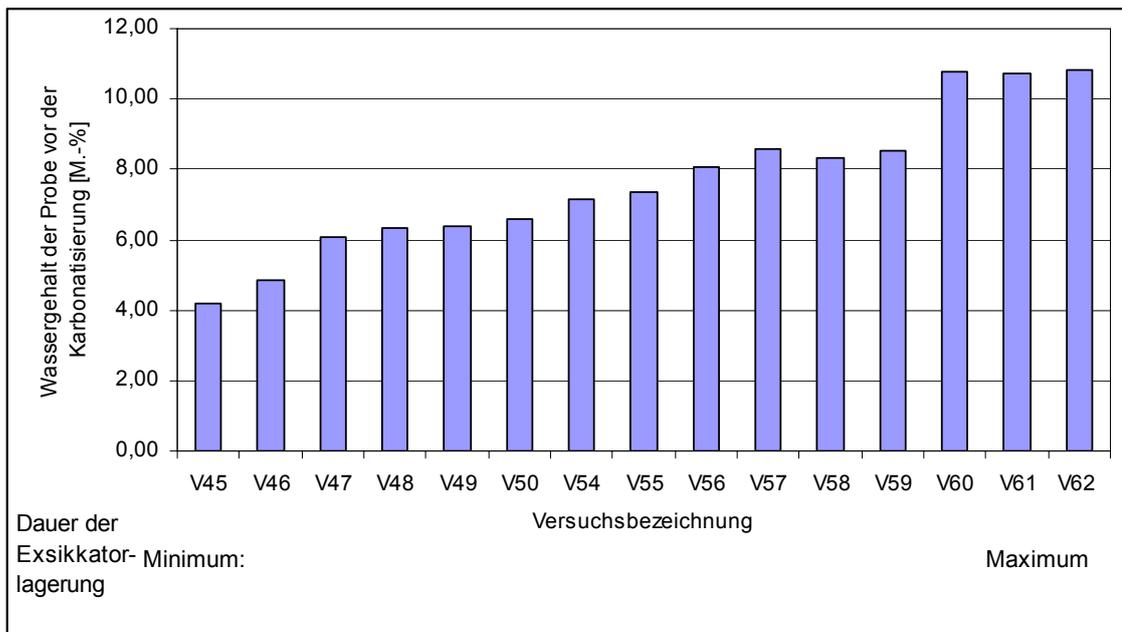


Bild 12: Wassergehalt vor der Karbonatisierung

Die Abhängigkeit der Massezunahme durch Karbonatisierung von der Dauer der Vorlagerung zeigt einen ähnlichen Verlauf.

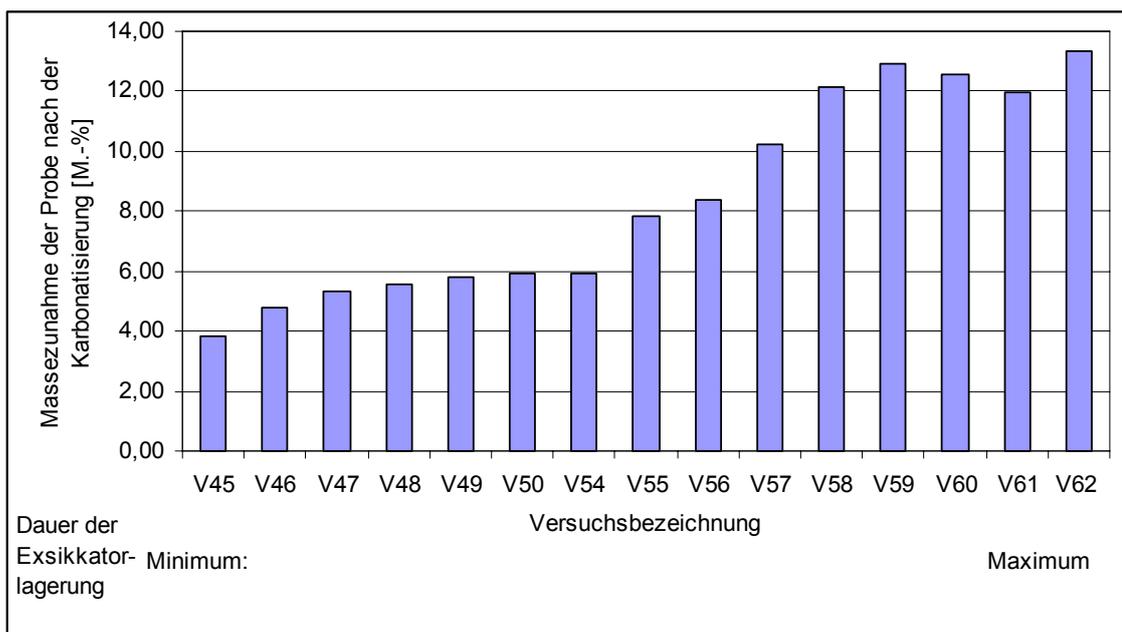


Bild 13: Massezunahme nach der Karbonatisierung

Die erste Versuchsreihe beinhaltete 6 Einzelversuche. Diese 6 Versuche liefen nacheinander immer zur gleichen Tageszeit ab. Täglich wurde ein Versuch durchgeführt, d.h. nach 6 aufeinanderfolgenden Tagen war die gesamte Versuchsreihe abgeschlossen. Im Anschluss daran kam es zur Bestimmung der physikalischen und chemischen Eigenschaften.

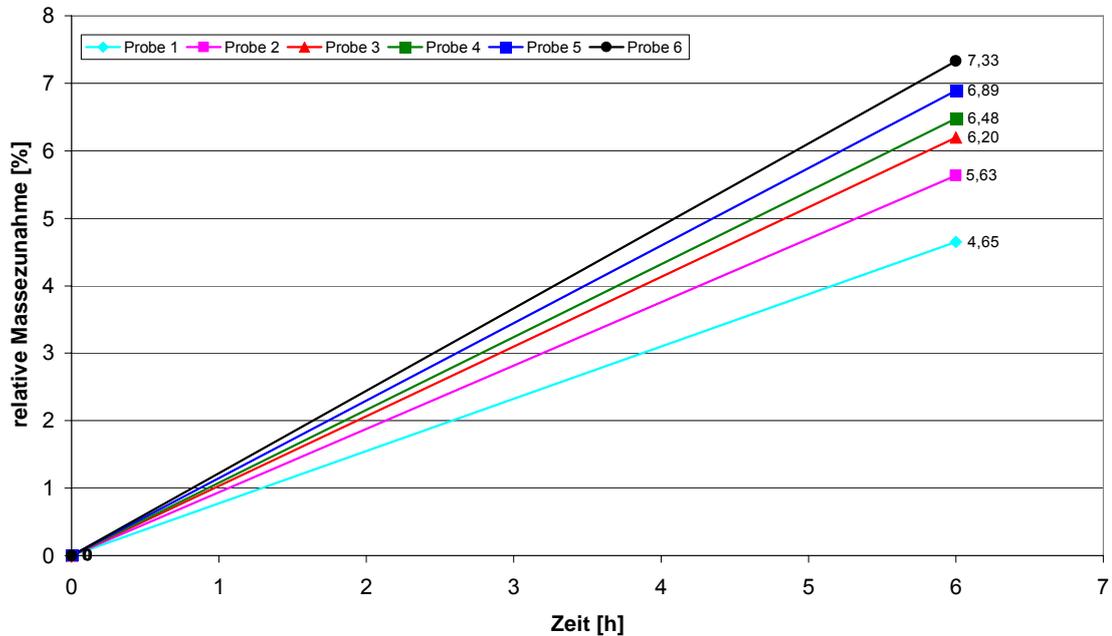


Bild 14: relative Massezunahme bei einer  $\text{CO}_2$  Konzentration von 40 %

In Bild 14 sind die Ergebnisse der ersten Versuchsreihe einmal grafisch dargestellt. Die Messwerte stellen leider keine Reproduzierbarkeit dar. Es ist jedoch ein anderer Effekt zu erkennen. Von Versuch zu Versuch kommt es zu einem Anstieg der Massezunahme, was theoretisch hätte nicht sein dürfen. Im Anhang A sind die Messwerte tabellarisch aufgelistet. Jeder Versuch setzt sich aus 4 Einzelproben zusammen. Auch innerhalb der Einzelproben ist der Trend eindeutig zu erkennen.

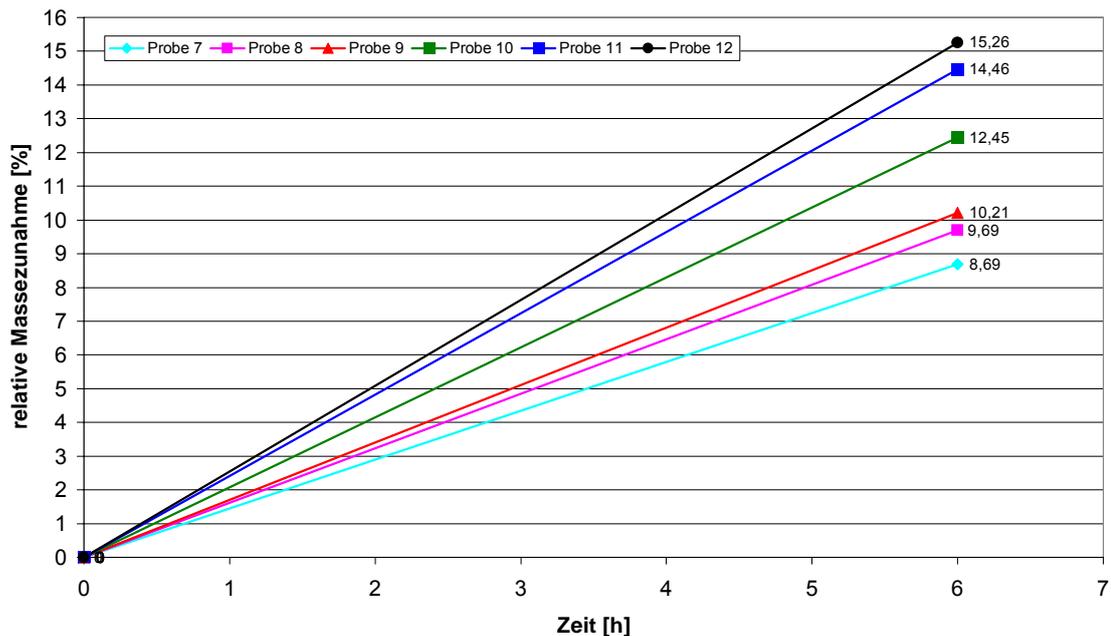


Bild 15: relative Massezunahme bei einer CO<sub>2</sub> Konzentration von 40 %

Daraufhin erfolgte die Durchführung einer zweiten Versuchsreihe, welche eventuelle Fehler im Versuchsablauf ausräumen sollte. Es wurde verstärkt darauf acht gegeben, dass die Versuchsbedingungen und der Versuchsablauf bei allen Versuchen identisch sind. Die Versuchsreihe setzte sich wieder aus 6 Versuchen zusammen, welche nacheinander abgearbeitet wurden. Die Grafik in Bild 15 zeigt die Ergebnisse der zweiten Versuchsreihe. Das vollständige Messprotokoll befindet sich im Anhang A. Das Resultat der zweiten Versuchsreihe bestätigt den Trend aus der ersten Versuchsreihe. Es ist eine weitere Besonderheit aus den Messwerten abzulesen, da diese an die stetig steigende Massezunahme aus der ersten Versuchsreihe anknüpfen. Die stetige Massezunahme welche wiederum auf eine ansteigende Calcitbildung hinweist, wurden durch die Thermoanalysen im Anhang A bestätigt. D.h. die Umsetzung von Portlandit zu Calcit erhöht sich von Versuch zu Versuch. Die Proben aus der ersten und zweiten Versuchsreihe wurden alle zur gleichen Zeit in den Exsikkator gegeben, um in einer CO<sub>2</sub>-freien Umgebung Feuchtigkeit aufzunehmen. Das bedeutet, die Proben waren unterschiedlich lange im Exsikkator, da sie mit einem Versatz von einem Tag aus der feuchten Umgebung entnommen wurden. Die Ergebnisse zeigen, dass die Exsikkatorlagerung mit der Massezunahme positiv korreliert. Warum und weshalb das so ist, kann verschiedene Ursachen haben. Eine Variante wäre die unzureichende Wasseraufnahme durch das Kapillarporensystem. Das bedeutet, dass das Probenmaterial den für die Karbonatisierung optimalen Wassergehalt noch nicht erreicht hat. Weiterhin wäre es möglich, dass es während der Exsikkatorlagerung zu einer Nachhydratation der Proben gekommen ist. Damit es zu einer Bestätigung bzw. Entkräftung der o.g. Varianten kommen kann, erfolgte die Durchführung einer dritten Versuchsreihe.

Die dritte Versuchsreihe bestand aus drei Einzelversuchen, welche jeweils 4 Proben beinhalteten. Die Proben wurden 5 Monate im Exsikkator gelagert, damit das Kapillarporensystem ausreichend Feuchtigkeit aufnehmen konnte. Nach Ende der Lagerung wurden pro Versuch 4 Proben aus dem Exsikkator entnommen. 3 Proben wurden bei den o.g. Versuchsbedingungen im Rohrreaktor bewittert und im Anschluss untersucht. 1 Probe wurde nach der Entnahme aus

dem Exsikkator bis zur Massekonstanz bei 105 °C getrocknet und im Anschluss das glühbeständige Material bestimmt. Im Anhang A sind die Messergebnisse aufgelistet. Es ist keine relative Massezunahme, während der Exsikkatorlagerung, auch auf das glühbeständige Material zu erkennen, d.h. eine Nachhydratation oder eine ungewollte Karbonatisierung sind in diesem Fall auszuschließen. Inwieweit der Feuchtegehalt des Probenmaterials Einfluss auf den Karbonatisierungsgrad hat, kann mit dem aktuellen Stand der Versuche noch nicht eindeutig gesagt werden. Es ist erforderlich, dass sich weitere Versuchsserien anschließen.

Die Grafik in Bild 16 stellt die Ergebnisse aus der dritten Versuchsreihe dar. Die relativen Massezunahmen der einzelnen Versuche liegen sehr dicht beieinander und sind zudem auch nicht stetig ansteigend, wie dies in den ersten beiden Versuchsreihen zu erkennen war. Eine ausreichende Lagerung der Proben in einem Exsikkator wo eine Luftfeuchtigkeit von 80 % eingestellt ist, scheint den Karbonatisierungsgrad positiv zu beeinflussen. Ob die eingestellte relative Luftfeuchtigkeit im Reaktor einen Einfluss auf das Fortschreiten der Karbonatisierungsfrent während der Bewitterung hat, muss durch gezielte Versuche herausgefunden werden. Die Zeitspanne um den optimalen Feuchtegrad des Probenmaterials zu erreichen, muss zeitlich stark verkürzt werden, damit der Vorbereitungsaufwand in der Praxis minimal gehalten werden kann.

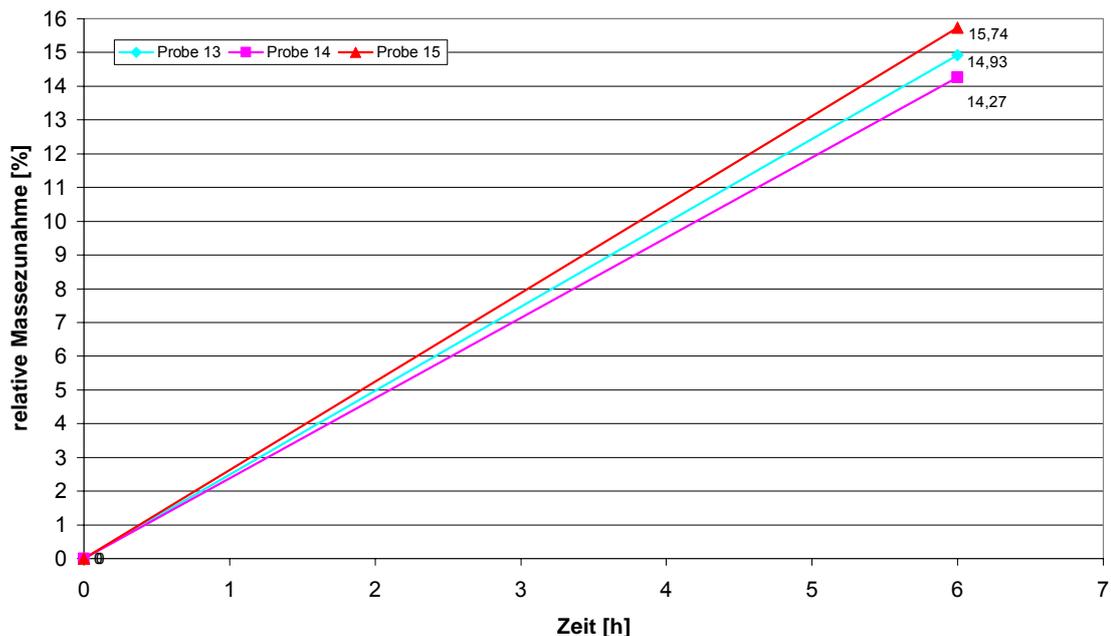


Bild 16: relative Massezunahme bei einer CO<sub>2</sub> Konzentration von 40 %

### 3.3.2 Gezielte Karbonatisierung von Modellbeton

Das Durchführungsschema der gezielten Karbonatisierung von Modellbetonen ist in Bild 17 zu sehen. Die Vorgehensweise lehnt sich an die Versuchsdurchführung von Zementstein an.

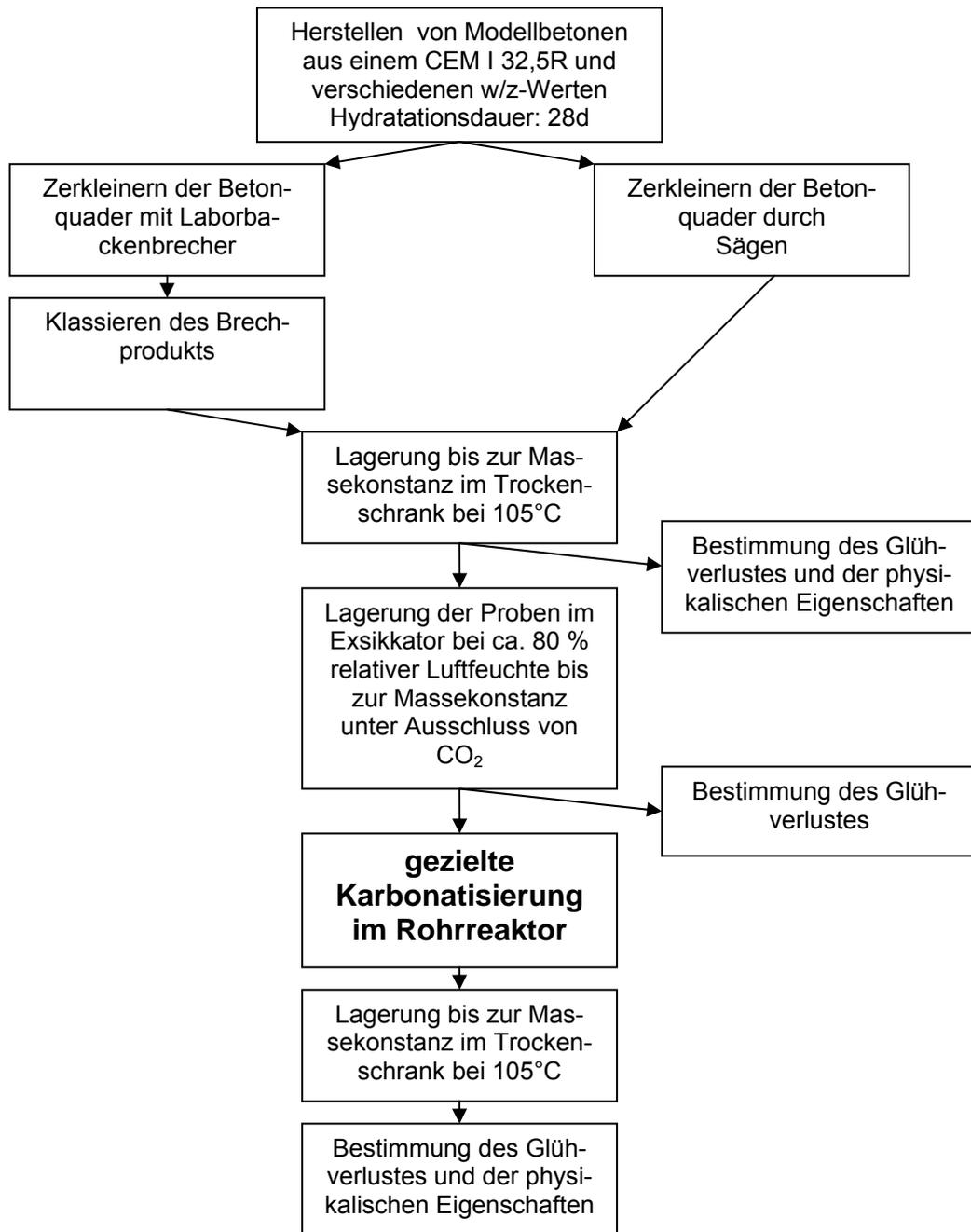


Bild 17: Durchführungsschema für die gezielte Karbonatisierung von Modellbetonen

Für die gezielte Karbonatisierung eines Modellbetons erfolgte die Herstellung von Probekörpern mit der in Tabelle 4 aufgeführten Zusammensetzung.

Tabelle 4: Zusammensetzung des Modellbetons

Zuschlag - Fraktion				Zementmenge und Festigkeitsklasse [kg/m³]	Wasser [kg/m³]	Zusätze [kg/m³]
0/2 [kg/m³]	2/4 [kg/m³]	4/8 [kg/m³]	8/16 [kg/m³]			
530,18	248,5	339,6	538,5	347,2 (CEMI 32,5R, Nr.210)	206,24	86,8 SFA

Die Betonwürfel hatten eine Seitenlänge von 15 cm und wurden in mehrere kleinere Würfel geteilt. In Bild 18 ist die Zerkleinerung schematisch dargestellt. Die Zerkleinerung erfolgte über eine Nasssägung.

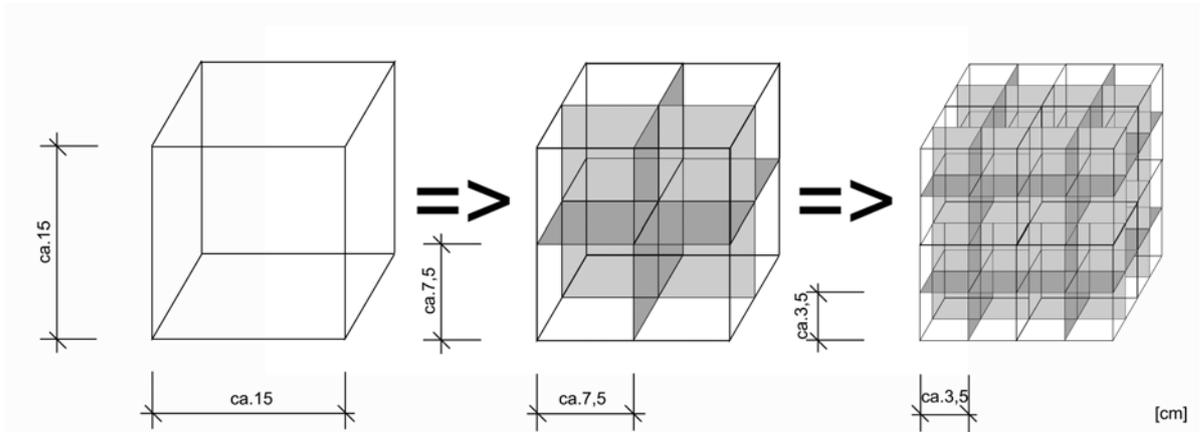


Bild 18: Zerkleinerung des Modellbetons

Die gezielte Karbonatisierung erfolgte jeweils an 3 Würfeln mit einer Seitenlänge von 3,5 cm bei CO<sub>2</sub> Konzentrationen von 20, 40, 60, 80 und 100 %. Der Versuchszeitraum erstreckte sich über 6 Stunden in dem gleichmäßig durchströmten Rohrreaktor. Dabei wurde der 1. Würfel nach 2 Stunden, der 2. nach 4 Stunden und der 3. nach 6 Stunden aus dem Rohrreaktor entnommen.

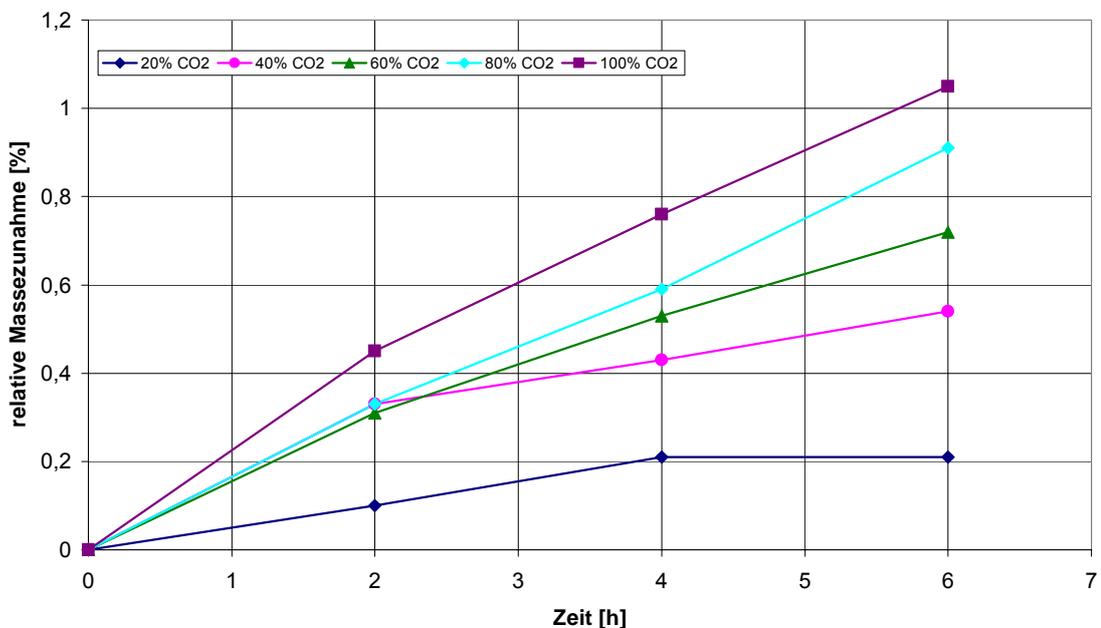


Bild 19: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von Zeit und CO<sub>2</sub> Konzentration

Das in Bild 19 dargestellte Diagramm zeigt den Verlauf der Massezunahme über einen definierten Zeitabschnitt in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub> Konzentration.

Es ist eindeutig zu erkennen, dass mit Anstieg der CO<sub>2</sub> Konzentration die Reaktion der Karbonatisierung beschleunigt wird. Weiterhin ist aus dem Diagramm zu entnehmen, dass mit zunehmender Karbonatisierungszeit die Massezunahme ansteigt, was wiederum auf die vermehrte Bildung von Calcit hindeutet.

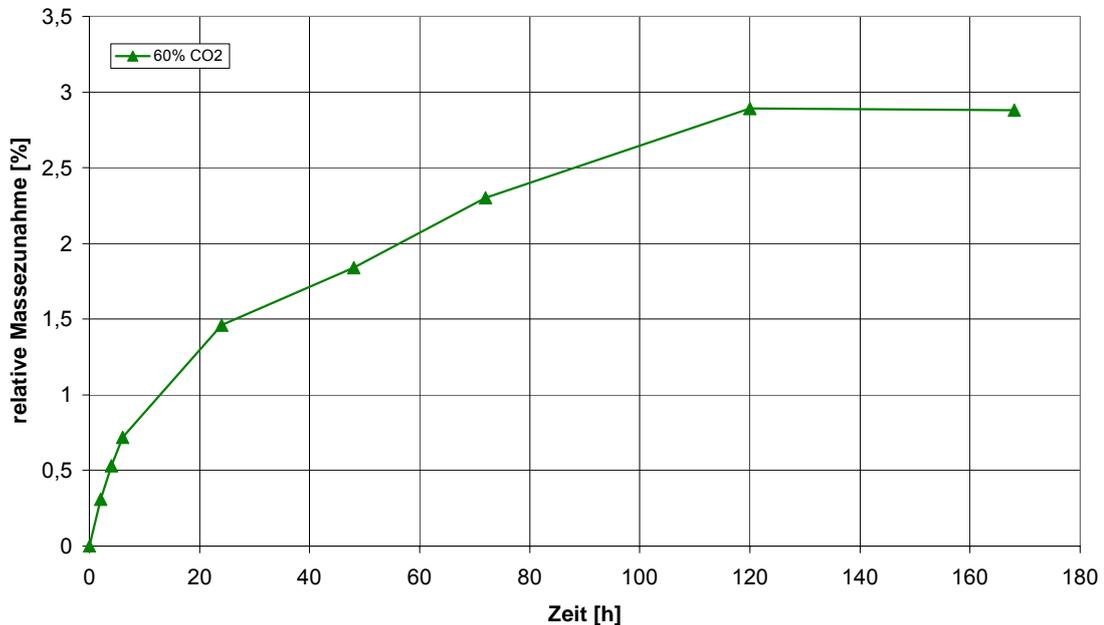


Bild 20: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von der Zeit

Die Zunahme der Masse kommt zum Erliegen, sobald für die Karbonatisierung keine Reaktionspartner mehr zur Verfügung stehen, bzw. das Kapillarporensystem nicht mehr vollständig durchgängig ist. Das Diagramm im Bild 20 zeigt die Stagnation der Massezunahme, was in diesem Fall auf einen Porenverschluss hinweist, da die Würfel in ihren Abmessungen relativ groß sind und rein rechnerisch noch Portlandit vorhanden sein muss.

Damit an Modellbetonen ein optimaler Karbonatisierungsverlauf und die dazu entsprechende Geschwindigkeit eingestellt werden kann, ist es erforderlich die Korngröße dahingehend zu verändern, dass das gesamte Portlandit für den Karbonatisierungsprozess zur Verfügung steht. Die nachfolgenden Versuche werden dementsprechend ausgerichtet.

### 3.4 Nachweis der Qualitätsverbesserungen der Zuschläge

Das Ziel der Karbonatisierung war, die Qualität der rezyklierten Gesteinszuschläge zu verbessern, d.h. die Porosität des an den Primärzuschlägen anhaftenden Zementsteins zu verringern.

Im Bild 21 ist die Veränderung der Reindichte des Zementsteins aufgetragen in Abhängigkeit der verwendeten Korngröße und der CO<sub>2</sub> Konzentration, welche für die Karbonatisierung eingestellt wurde. Die Grafik zeigt, dass es bei den karbonatisierten Proben zu einem Anstieg der Reindichte kommt. Die Kapillarporosität nimmt mit Zunahme der Dichte ab und ist im Anhang A in den Porenradienverteilungen vor und nach der Karbonatisierung sehr schön zu erkennen.

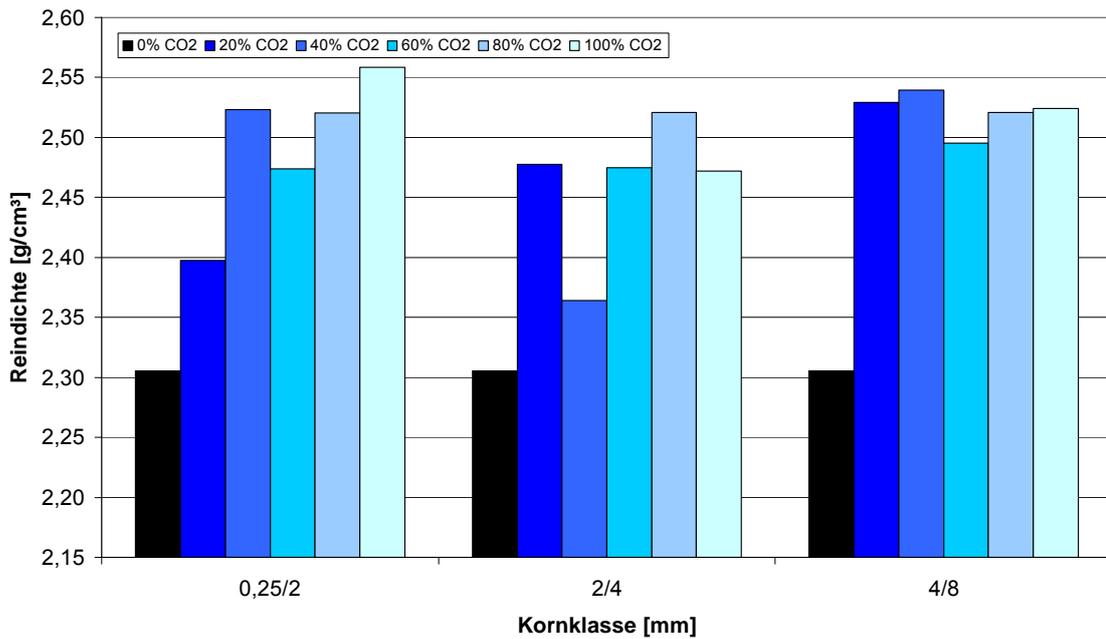


Bild 21: Reindichte in Abhängigkeit von Korngröße und CO<sub>2</sub> Konzentration

Die einzelnen Versuche wurden mit mehreren Proben durchgeführt, damit es zu aussagekräftigen Ergebnissen kommt, welche auch auf den Hinblick der Reproduzierbarkeit Verwendung finden können. Dennoch kam es zu Resultaten, wie in Bild 21 zu sehen ist, z.B. höhere Reindichten bei geringeren CO<sub>2</sub> Konzentrationen, welche nicht sofort interpretiert werden konnten. Hier ist es erforderlich, dass nachfolgende Versuche gezielt diese Problematik untersuchen.

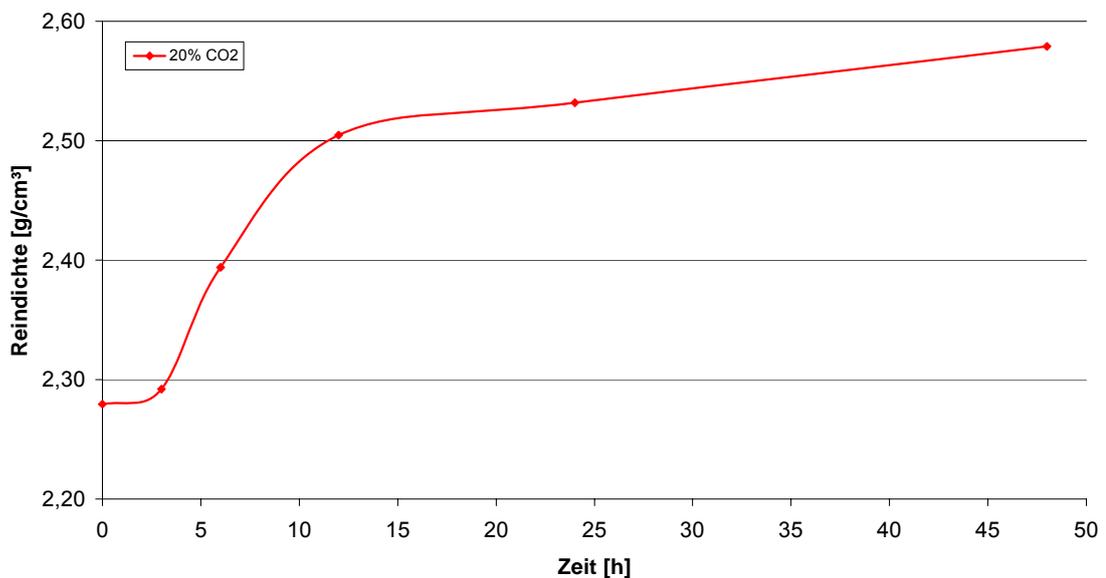


Bild 22: Reindichte in Abhängigkeit von Bewitterungszeit

Die Grafik in Bild 22 zeigt den Verlauf der Reindichte von Zementstein der Korngröße 2/4 während der Karbonatisierungszeit bei einer CO<sub>2</sub> Konzentrationen von 20 %. Auch hier wird das Zementsteingefüge mit der Bewitterungszeit dichter und es wird in den ersten Stunden, wie schon bei der Massezunahme in

Bild 11 zu erkennen war, ein Großteil des Portlandits karbonatisiert. Die einzelnen Messwerte der Reindichte, welche mit einem Heliumpyknometer ermittelt wurden, sind im Anhang A enthalten.

Tabelle 5: Abhängigkeit der Porosität und der Dichte von der Bewitterungszeit

	Bewitterungszeit		
	0	3 [h]	12
Porosität [%]	35,02	32,41	25,24
Scheinbare Dichte [g/cm <sup>3</sup> ]	1,3673	1,4662	1,6027

In der Tabelle 5 ist ein Teil der Messwerte dargestellt, welche mit Hilfe der Quecksilberdruckporosimetrie bestimmt wurden. Parallel zu der Ermittlung der Porosität und der Porenradienverteilung wurde die Dichte der Proben mit gemessen. Die dabei gewonnene Dichte ist aber keine eindeutig abgegrenzte Roh- oder Reindichte. Für die Interpretation der Ergebnisse hat dies jedoch keinen Einfluss. Die Werte zeigen eindeutig, dass es durch die Karbonatisierung zu einer Abnahme der Porosität kommt und gleichzeitig sich die Dichte erhöht. Im Bild 24 ist die Porenradienverteilung für die Proben aus Tabelle 5 in einer Grafik dargestellt. Es ist zu erkennen, dass sich der Kapillarporenanteil gegenüber der Referenzprobe mit zunehmender Karbonatisierungszeit verringert.

Die in Tabelle 5 und Bild 23 dargestellten Messwerte stammen aus Versuchen, wo die Karbonatisierung mit 20 % CO<sub>2</sub> abgelaufen ist.

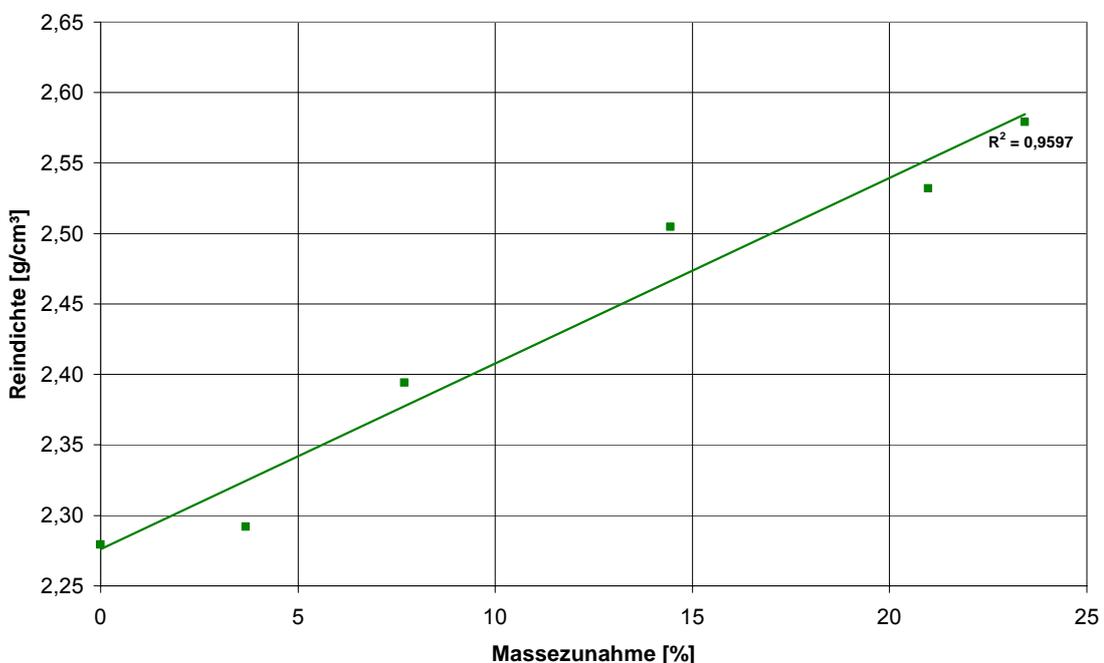


Bild 23: Korrelation zwischen Reindichte und Massezunahme



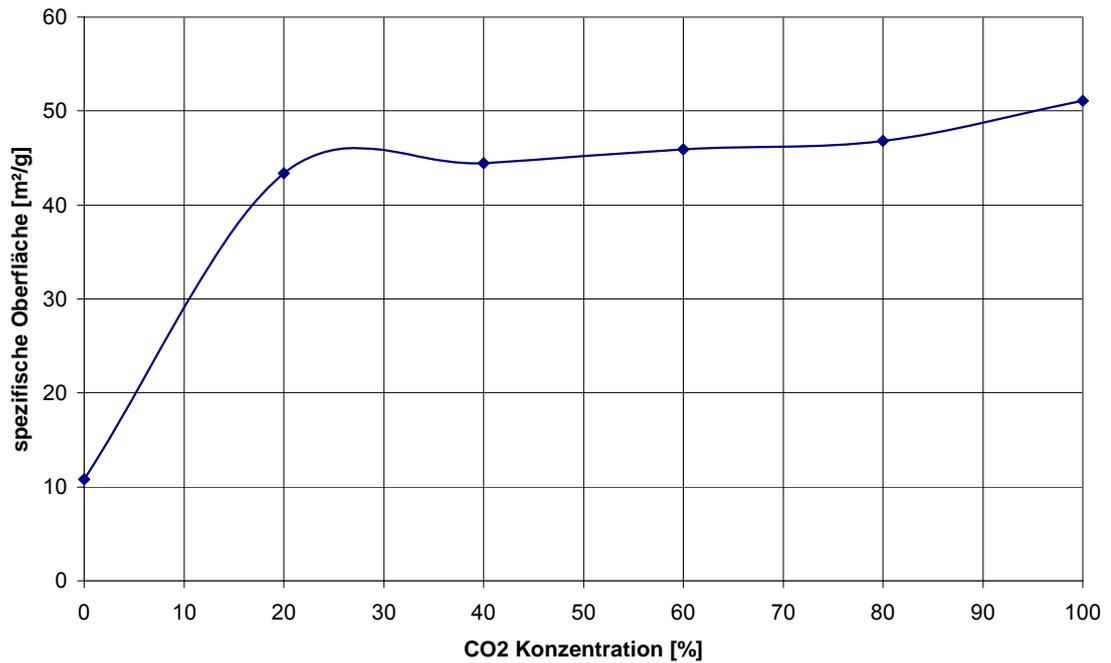


Bild 25: Veränderung der spezifischen Oberfläche durch die Karbonatisierung

### 3.5 Karbonatisierungsverlauf von realen Betonen

Das Durchführungsschema der gezielten Karbonatisierung von realen Betonen ist in Bild 26 zu sehen.

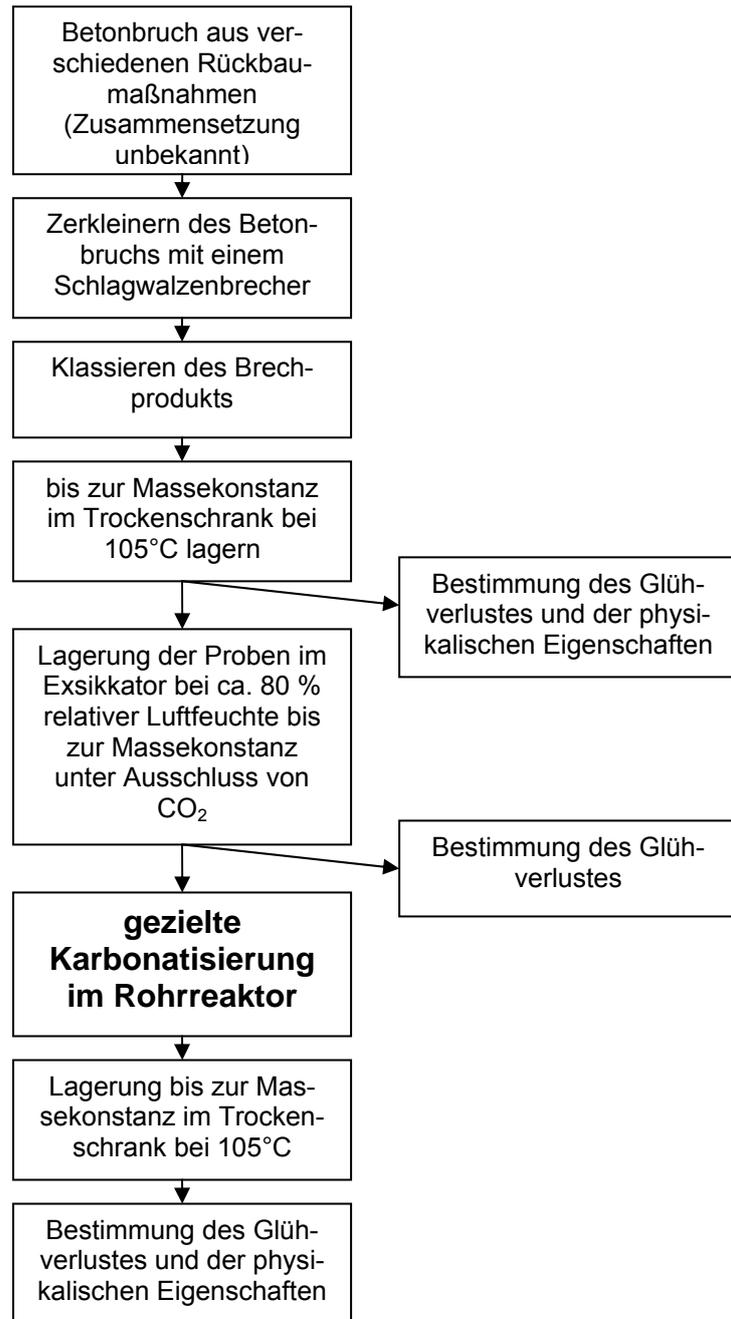


Bild 26: Durchführungsschema für die gezielte Karbonatisierung von Betonbruch

Das Probematerial für die Versuche wurde von einer Recyclinganlage bezogen. Der aufbereitete Betonbruch lag in der Körnung 4/16 vor. Die Herkunft und die Zusammensetzung des Betonbruchs war nicht bekannt. Der unbekannte Betonbruch 4/16 wurde in mehreren Versuchsreihen gezielt karbonatisiert. Die Bewitterungszeit wurde bei allen Versuchsreihen konstant bei 6 Stunden gehalten. Nur die  $\text{CO}_2$  Konzentration variierte zwischen den Versuchen. Bild 27 und Bild 28 zeigen die ersten Ergebnisse der gezielten Karbonatisierung von einem Praxisbeton. Auch bei diesen Versuchen kommt es zu einer dauerhaften Bindung von  $\text{CO}_2$  durch die gezielte Karbonatisierung. Die prozentuale Massezunahme ist hier geringer als bei reinem Zementstein, da

das Probenmaterial aus Zuschlagkörnern mit anhaftendem Zementstein besteht. Inwieweit die Proben durch das in der Atmosphäre befindliche CO<sub>2</sub> vor-karbonatisiert waren, wurde in den ersten durchgeführten Versuchen nicht berücksichtigt. Der vorhandene natürliche Karbonatisierungsgrad der Praxisbetone ist jedoch im Vorfeld zu bestimmen, damit dieser bei den Versuchsergebnissen Berücksichtigung findet.

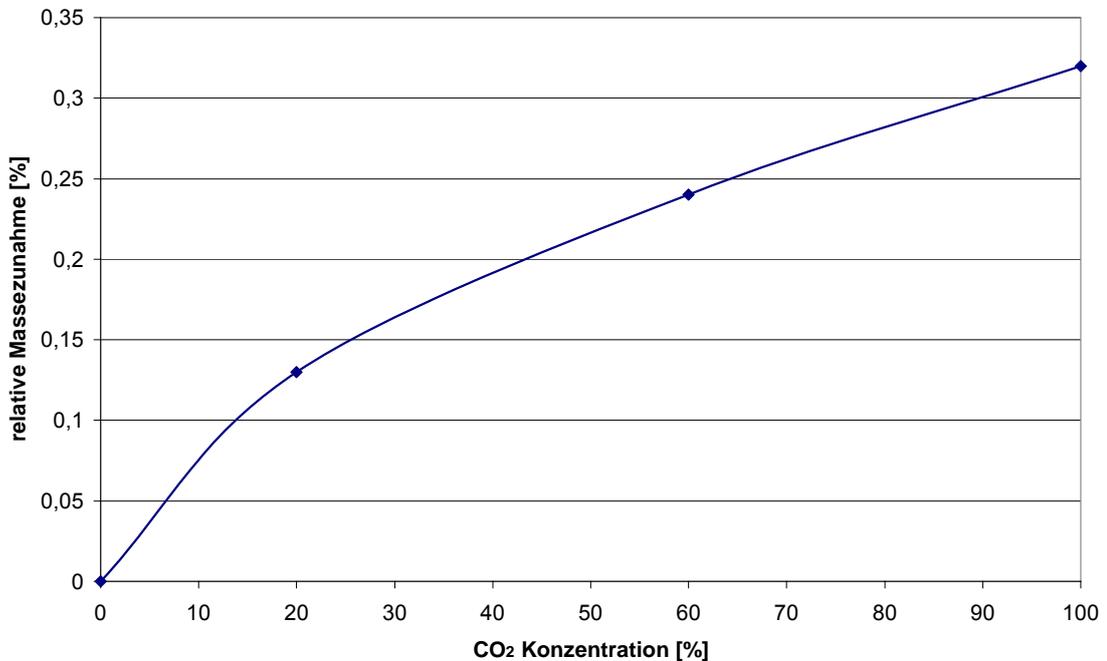


Bild 27: Relative Massezunahme in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub> Konzentration

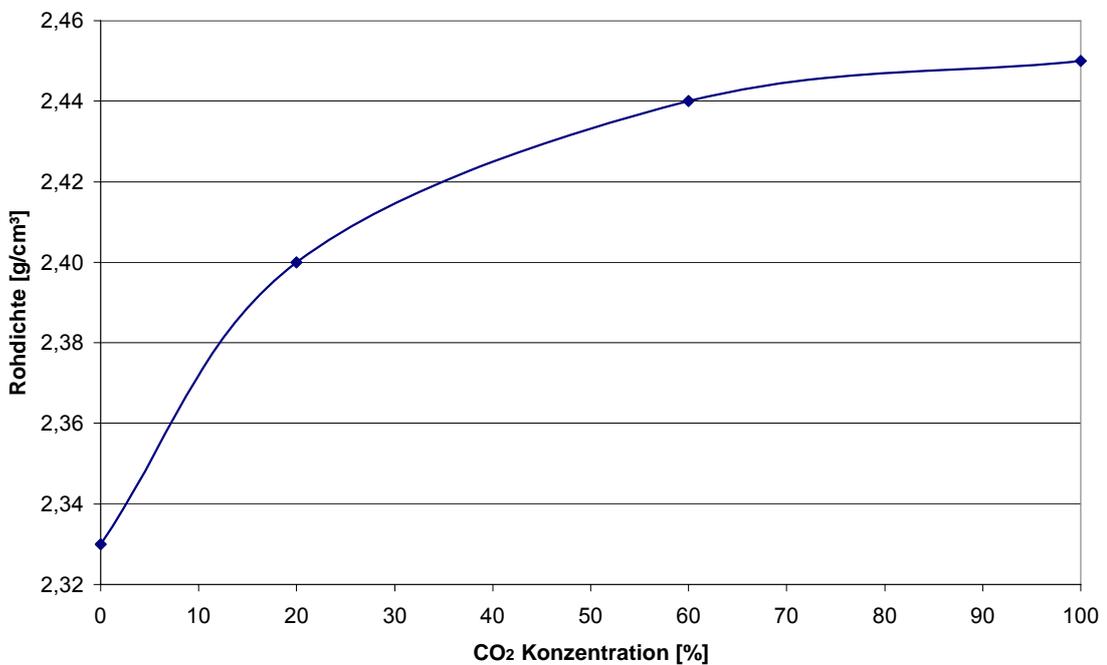


Bild 28: Rohdichte in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub> Konzentration

### **3.6 Bilanzierung der CO<sub>2</sub>-Aufnahme durch die Zementpasten, Modellbetone und realen Betone**

Der Vorgang der Karbonatisierung kann mit Hilfe der Resultate aus Abschnitt 3.3 bilanziert werden.

Die Ergebnisse der Thermoanalyse der karbonatisierten Zementsteinproben haben ergeben, dass es zu einem Gesamtmasseverlust von ca. 30 % nach dem Glühen kommt. Davon gehen ca. 20 % auf das Abspalten von CO<sub>2</sub> aus CaCO<sub>3</sub> zurück. Anhand dieser Werte kann eine Beispielrechnung aufgemacht werden, die verdeutlicht, wie viel 1 kg Portlandzement CO<sub>2</sub> durch Karbonatisierung dauerhaft, laut den Versuchsergebnissen, binden kann. Der für die Zementpasten und Modellbetone verwendete Portlandzement hat einen Glühverlust von 2,5 %, d.h. 1 kg PZ hat einen Masseverlust von 0,025 kg. Die Masse des glühbeständigen Materials beträgt somit 0,975 kg und ist vor und nach der Karbonatisierung gleich. Aus 1 kg PZ entsteht ca. 1,23 kg Zementstein [Loc00]. Wird dieser Zementstein karbonatisiert kommt es zu einer Massezunahme, die Gesamtmasse beträgt dann 1,393 kg karbonatisierter Zementstein. Der Gesamtmasseverlust beträgt laut Thermoanalyse 30 % und ergibt nach dem Glühen wieder eine Masse von 0,975 kg. Die thermische Analyse hat weiterhin ergeben, dass 2/3 des Masseverlustes durch die Abspaltung von CO<sub>2</sub> aus CaCO<sub>3</sub> entstanden sind. Das bedeutet, dass in 1,393 kg karbonatisiertem Zementstein 0,279 kg CO<sub>2</sub> chemisch gebunden sind. Der jetzige Ergebnisstand bringt ein Resultat hervor, das besagt, dass 1 kg PZ ca. 280 g CO<sub>2</sub> durch Karbonatisierung chemisch, nach 24 h bei 20 % CO<sub>2</sub>, binden kann (siehe Bild 29).

#### **49,82gCO<sub>2</sub> / 100g PZ nach Theorie Karbonatisierungsgrad von ca. 50 %**

Überträgt man das Ergebnis auf Beton bzw. auf rezyklierte Gesteinszuschläge, erhält man eine CO<sub>2</sub> Bindung pro 1 m<sup>3</sup> Beton von ca. 84 kg CO<sub>2</sub>, bei 300 kg verwendeten PZ/m<sup>3</sup> Beton. Die Menge an CO<sub>2</sub> welche durch Karbonatisierung gebunden werden konnte, liegt bereits über dem vorhandenen Portlanditgehalt (siehe Abschnitt 3.1.2), was auf eine beginnende Karbonatisierung der CSH-Phasen hinweist. Diese Phasenneubildung lässt sich auch in der Thermoanalyse erkennen. Das CO<sub>2</sub> Reduktionspotential zum Zeitpunkt der Fertigstellung dieses Abschlussberichtes liegt bei ca. 84 kg CO<sub>2</sub>/m<sup>3</sup> rezykliertem Beton. Bei der anfallenden Menge von 16 Mio.m<sup>3</sup> Betonbruch 2006 wäre es möglich gewesen, 1,344 Mio.t CO<sub>2</sub> durch Karbonatisierung dauerhaft in den Betonbruch chemisch zu binden.

Ca. 45 kg CO<sub>2</sub> können durch Karbonatisierung in 1 m<sup>3</sup> Beton chemisch gebunden werden, wenn lediglich der Portlandit umgewandelt wird. In den 16 Mio.m<sup>3</sup> Betonbruch, die im Jahr 2006 angefallen sind, hätte man durch eine gezielte Karbonatisierung theoretisch 720.000 t CO<sub>2</sub> chemisch binden können

Die Bilanzierung beschreibt jedoch noch nicht den idealen Verlauf, da die Ergebnisse der Karbonatisierung noch weiter optimiert werden können und müssen. Der zeitliche Verlauf der Karbonatisierung und die CO<sub>2</sub> Konzentration ist der Calcitsättigung in den Kapillarporen weiter anzupassen.

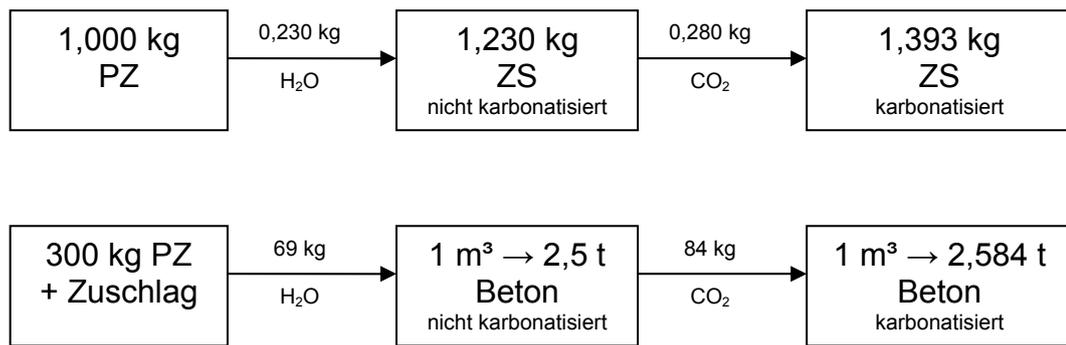


Bild 29: Schematische Darstellung der Massezunahme von PZ und Beton

## Fazit

Die ersten Versuche bzw. Versuchsreihen haben sich mit der gezielten Karbonatisierung von Zementstein über Modellbetone bis hin zu Praxisbetonen beschäftigt. In diesem ersten Stadium wurde der Schwerpunkt auf die gezielte Karbonatisierung von Zementstein gelegt, da die zu Beginn gewonnenen Versuchsergebnisse weitere Fragestellungen hervorbrachten.

Damit es zu einer wissenschaftlich fundierten Aussage für die gezielte Karbonatisierung von Modell- bzw. Praxisbetonen kommen kann, ist die Untersuchung an Zementstein Voraussetzung. Zementstein ist sowohl im Modell- wie auch im Praxisbeton die Matrix welche gezielt karbonatisiert werden soll. Wenn der optimale Karbonatisierungsprozess an reinem Zementstein versuchstechnisch ausgelotet wurde, kann die gewonnene Versuchsdurchführung auf Modell- und Praxisbetone angepasst werden.

Die Versuche an Zementstein waren sehr umfangreich und haben verschiedene Versuchsparameter beleuchtet und miteinander kombiniert. Dabei kam es zu Abgrenzungen im Versuchsablauf, um so den optimalen Karbonatisierungsverlauf zu finden. Die ersten Zementsteinproben wurden aus verschiedenen Korngrößen zusammengestellt und über einen relativ langen Zeitraum bei verschiedenen  $\text{CO}_2$  Konzentrationen bewittert. Die Ergebnisse und die anschließenden Untersuchungen haben gezeigt, dass es zu einer beschleunigten Karbonatisierung kommt. Es kam jedoch nicht zu einer weit abgestuften Steigerung der Karbonatisierung mit Erhöhung der  $\text{CO}_2$  Konzentration, wie zu erwarten war. Es ist zwar ein Wachstum erkennbar, jedoch im Verhältnis zu gering. Daraufhin wurde die Korngröße 2/4 konstant gehalten und der zeitliche Ablauf in verschiedene Richtungen variiert bei unterschiedlichen  $\text{CO}_2$  Konzentrationen. Die dabei erlangten Resultate lassen erste Aussagen über den Karbonatisierungsverlauf zu. Die gezielte Karbonatisierung mit erhöhter  $\text{CO}_2$  Konzentration verläuft sehr stark in den ersten 6 Stunden ab. Hier erfolgt, bezogen auf die gesamte Bewitterungszeit, der prozentual größte Massenzuwachs. Ob diese Erscheinung auf den fortschreitenden Porenverschluss, die unzureichende Nachlieferung von Feuchtigkeit in die Poren oder auf den zur Neige gehenden Portlanditgehalt zurückzuführen ist, muss durch weitere Versuche klargestellt werden.

Mit den Erkenntnissen aus den Versuchen mit Zementstein wurden erste Versuche an Modell- und Praxisbetonen vorgenommen. Die hierbei erhaltenen Ergebnisse weisen ähnliche Tendenzen auf. Die Versuche an Modell- und Praxisbetonen befinden sich noch in der Anfangsphase und werden zur Zeit aufbauend auf die Versuche mit Zementstein weitergeführt.

Alle Versuchsergebnisse zeigen den Erfolg der gezielten Karbonatisierung. Es kommt zu einer dauerhaften Bindung von  $\text{CO}_2$  und einer Verbesserung der Materialeigenschaften. Das weiterführende Ziel ist es, die Randbedingungen der Versuche dahingehend zu verändern, dass die optimalen Einstellungen für den Versuchsablauf gefunden und wissenschaftlich begründet werden können. Für diese Untersuchungen ist es erforderlich, dass die Versuchsanlage erweitert und umgebaut wird, damit die Temperatur und die Luftfeuchtigkeit zwischen den Versuchen variiert werden kann. Zunächst soll die Versuchsanlage so ergänzt und weiterentwickelt werden, dass die äußere Einflussgröße Tempera-

tur bis zur Entwässerung der CSH-Phasen variiert werden kann. Die so veränderte Anlage soll die Korrelationen zwischen der  $\text{CO}_2$  – Aufnahme und der Temperatur aufzeigen. Diese Variante zielt auf den Praxiseinsatz ab, wo Rauchgas mit einer vorgegebenen Temperatur direkt für die Karbonatisierung zum Einsatz kommen könnte. Im nächsten Schritt soll die Versuchsmethode und – apparatur so ergänzt und weiterentwickelt werden, dass Routinemessungen an einer großen Anzahl von Proben durchgeführt werden können. Der sich daran angliedernde Forschungsbedarf soll Aufschluss geben, inwieweit sich der Prozess noch beschleunigen lässt und wie die praktische Umsetzung und ein technischer Reaktor aussehen kann. Die Entwicklung und Betreibung einer technischen Versuchsanlage schlagen dann die Brücke zwischen Theorie und Praxis. Am Ende der labortechnischen Auswertung sollte der nahtlose Übergang in die Praxisanwendung erfolgen. Das Planen und Betreiben einer Anlage im Praxismaßstab würde hierbei den Abschluss der Untersuchungen bilden. Wobei die Anlage über einen längeren Zeitraum in betrieb gehen sollte, um so die Auswertung mit reproduzierbaren Ergebnissen zu hinterlegen, welche dann für andere Anlagen herangezogen werden können. Außerdem sollte es einen Versuchsabschnitt geben, der sich mit der erneuten Betonherstellung von karbonatisierten Rezyklaten beschäftigt.

## Literaturverzeichnis

- [TBH09] C.R. TOWNSEND, M.BEGON, J.L. HARPER: *Ökologie*, Springer Verlag, 2.Auflage, 2009
- [KS06] H. KNOBLAUCH, U. SCHNEIDER: *Bauchemie*, Werner Verlag, 6.Auflage, 2006
- [Kle99] P. KLEMMER: *Die Klimadebatte*, VGB KraftwerksTechnik79, 1999
- [Umw96] UMWELTBUNDESAMT: Jahresbericht 1995, Berlin, 1996
- [Sch06] T. SCHOLTEN: *Der Kohlenstoff-Kreislauf*, Eberhard Karls Universität Tübingen, 2006
- [SW98] J. STARK, B. WICHT: *Anorganische Bindemittel*, Bauhaus-Universität Weimar, 1998
- [Loc00] F.W. LOCHER: *Zement*, Verlag Bau+Technik, 2000
- [WT95] R.WEBER, R.TEGELAAR: *Guter Beton*, Beton-Verlag GmbH, 1995
- [SW01] J. STARK, B. WICHT: *Dauerhaftigkeit von Beton*, Bauhaus-Universität Weimar, 2001
- [Kro83] J. KROPP: *Karbonatisierung und Transportvorgänge im Zementstein*, Universität Karlsruhe, 1983
- [Bie88] T.A.BIER: *Karbonatisierung und Realkalisierung von Zementstein und Beton*, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, 1988
- [Wan93] S.WANG: *Berechnung des Karbonatisierungsfortschritts in Betonbauteilen*, RWTH Aachen, 1993
- [Jac94] F.PH.JACOBS: *Permeabilität und Porengefüge Zementgebundener Werkstoffe*, AEDIFICATIO Verlag, 1994
- [WKLFW92] F.H.WITTMANN, J.KROPP, P.LUNK, M.FIEBRICH, R.WOLFSEHER: *Feuchtigkeitstransport und Dauerhaftigkeit von Beton*, WTA-Schriftreihe Heft 3, 1992
- [Kar96] R.KARSTEN: *Bauchemie*, C.F. Müller Verlag Heidelberg, 10.Auflage, 1996
- [Ben06] R.BENEDIX: *Bauchemie*, B.G. Teubner Verlag, 3.Auflage, 2006

- [bdz08] BUNDESVERBAND DER DEUTSCHEN ZEMENTINDUSTRIE e.V.: *Zahlen und Daten*, 2008
- [Bas71] A.BASALLA: *Baupraktische Betontechnologie*, Bauverlag GmbH, 3.Auflage, 1971
- [Hei08] HEIDELBERGCEMENT AG: *Betontechnische Daten*, Heidelberg-Cement AG, 2008
- [HC89] W.F.HEMMINGER, H.K.CAMMENGA: *Methoden der Thermischen Analyse*, Springer Verlag Berlin/Heidelberg, 1989
- [Sch72] D.SCHULTZE: *Differentialthermoanalyse*, Verlag Chemie, Weinheim, 1972
- [Exn00] K.EXNER: *Bewitterung von Kalk- und Zementmörteln mit CO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub> und NO<sub>x</sub>*, Universität-Gesamthochschule Siegen, Dissertation 2000
- [Ada06] T.ADAM: *Ein Modell zur Berechnung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt*, Technische Universität Darmstadt, Dissertation 2006
- [Kul02] T.KULHAWY: *Mineralogische Untersuchungen zum komplexen Reaktionsverhalten von C-S-H Phasen in Zementgebundenen Baustoffen*, Universität Hannover, Dissertation 2002
- [Tho02] S.THOKE-WEIDLICH: *Alkaliionendiffusion in carbonatisierte und nicht carbonatisierte Betone*, Universität Hannover, Dissertation 2002
- [Sch06] K.SCHINDLER: *Verbesserung physikalischer Eigenschaften von Recycling-Baustoffen*, Bauhaus-Universität Weimar, Diplomarbeit 2006
- [CATCC08] M.CASTELLOTE, C.ANDRADE, X.TURRILLAS, J.CAMPO, G.J.CUELLO: *Accelerated carbonation of cement pastes in situ monitored by neutron diffraction*, Cement and Concrete Research 38 (1365-1373), 2008<sup>^</sup>
- [CFAA09] M.CASTELLOTE, L.FERNANDEZ, C.ANDRADE, C.ALONSO: *Chemical changes and phase analysis of OPC pastes carbonated at different CO<sub>2</sub> concentrations*, Materials and Structures Vol. 42 (2009) pp. 515–525
- [GN07] S.GHOSHAL, R.A.NIVEN: *Carbon Dioxide Uptake Rate and Extent during Accelerated Curing of concrete*, The 12th International Congress on the Chemistry of Cement. Montreal, Canada, July 8-13 2007

- [PG07] C.PADE, M.GUIMARAES: *The CO2 uptake of concrete in a 100 year perspective*, Cement and Concrete Research 37 (1348-1356), 2007
- [Rah91] K.Rahlwes: *Recycling von Stahlbeton- und Stahlverbundkonstruktionen – Ansätze zu einer umweltökonomischen Bewertung*, Vortrag auf dem Deutschen Betontag 1991 in Berlin
- [Kna10] F.Knappe: *Pilotprojekt Ludwigshafen – Der Einsatz von RC-Beton aus abfallwirtschaftlicher und ökologischer Sicht*, Vortrag auf der Fachtagung Recycling R`10 2010 in Weimar
- [Met10] A.Mettke: *RC-Beton – Qualität und Qualitätssicherung*, Vortrag auf der Fachtagung Recycling R`10 2010 in Weimar

## Quellenverzeichnis

- [1] 1. bis 6. Monitoring Bericht: [www.arge-kwtb.de](http://www.arge-kwtb.de)
- [2] Anhang D zum Rohstoffbericht: [www.wbn-baustoffe.de](http://www.wbn-baustoffe.de)
- [3] CO<sub>2</sub> Emissionen: [www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de](http://www.umweltbundesamt-daten-zur-umwelt.de)
- [4] Zementproduktion: <http://www.co2-handel.de>

# Anhang

<b>1</b>	<b>Anhang A – Versuchsergebnisse</b>	<b>57</b>
	Tabelle A 1: Massezunahme bezogen auf Zeit und w/z-Wert	57
	Tabelle A 2: Berechnung des Umsatzes an $\text{CaCO}_3$	57
	Tabelle A 3: Massezunahme in Abhängigkeit der Korngröße bei 20 % $\text{CO}_2$	61
	Tabelle A 4: Massezunahme in Abhängigkeit der Korngröße bei 40 % $\text{CO}_2$	63
	Tabelle A 5: Massezunahme in Abhängigkeit der Korngröße bei 60 % $\text{CO}_2$	64
	Tabelle A 6: Massezunahme in Abhängigkeit der Korngröße bei 80 % $\text{CO}_2$	65
	Tabelle A 7: Massezunahme in Abhängigkeit der Korngröße bei 100 % $\text{CO}_2$	66
	Tabelle A 8: Reindichte in Abhängigkeit von Korngröße und $\text{CO}_2$ Konzentration	66
	Tabelle A 9: Massezunahme nach 3 h Bewitterung in Abhängigkeit von der $\text{CO}_2$ Konzentration	67
	Tabelle A 10: Massezunahme nach 6 h Bewitterung in Abhängigkeit von der $\text{CO}_2$ Konzentration	68
	Tabelle A 11: Massezunahme nach 12 h Bewitterung in Abhängigkeit von der $\text{CO}_2$ Konzentration	69
	Tabelle A 12: Massezunahme nach 24 h Bewitterung in Abhängigkeit von der $\text{CO}_2$ Konzentration	70
	Tabelle A 13: Massezunahme nach 48 h Bewitterung in Abhängigkeit von der $\text{CO}_2$ Konzentration	71
	Tabelle A 14: Reindichte in Abhängigkeit von Bewitterungszeit und $\text{CO}_2$ Konzentration	71
	Tabelle A 15: Ergebnisse der Thermoanalyse (TG/DTG) der ZS-Proben P1- P6	78
	Tabelle A 16: Ergebnisse der Thermoanalyse (TG/DTG) der ZS-Proben P7- P11	78
	Tabelle A 17: Massezunahme nach 6 h Bewitterung (V45 – V50)	79
	Tabelle A 18: Massezunahme nach 6 h Bewitterung (V54 – V59)	80
	Tabelle A 19: Ergebnisse der Thermoanalyse (TG/DTG) der ZS-Proben V00-V59	84
	Tabelle A 20: Massezunahme nach 6 h Bewitterung (V60)	85
	Tabelle A 21: Massezunahme nach 6 h Bewitterung (V61)	85
	Tabelle A 22: Massezunahme nach 6 h Bewitterung (V62)	86
	Tabelle A 23: Massezunahme bezogen auf Zeit und $\text{CO}_2$ Konzentration	87
	Tabelle A 24: Massezunahme bezogen auf die Zeit	87
	Bild A 1: Umsatz von $\text{CaCO}_3$ in Abhängigkeit von Zeit und w/z-Wert	59
	Bild A 2: Thermische Analyse von ZS-Quadern (96 h, w/z-0,3)	59

Bild A 3: Thermische Analyse von ZS-Quadern (96 h, w/z-0,4) .....	60
Bild A 4: Thermische Analyse von ZS-Quadern (96 h, w/z-0,5) .....	60
Bild A 5: Porenradienverteilung von ZS 2/4 vor und nach der Karbonatisierung .....	62
Bild A 6: Porenradienverteilung von ZS 4/8 vor und nach der Karbonatisierung .....	62
Bild A 7: Porenradienverteilung von ZS 2/4 vor und nach der Karbonatisierung .....	72
Bild A 8: Korrelation zwischen Reindichte und Massezunahme (20 % CO <sub>2</sub> ).....	72
Bild A 9: Korrelation zwischen Reindichte und Massezunahme (40 % CO <sub>2</sub> ).....	73
Bild A 10: Korrelation zwischen Reindichte und Massezunahme (60 % CO <sub>2</sub> )...73	
Bild A 11: Korrelation zwischen Reindichte und Massezunahme (80 % CO <sub>2</sub> )...74	
Bild A 12: Korrelation zwischen Reindichte und Massezunahme (100 % CO <sub>2</sub> ).....	74
Bild A 13: Thermische Analyse von ZS-2/4 nicht karbonatisiert.....	75
Bild A 14: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 20 % CO <sub>2</sub> .....	75
Bild A 15: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 40 % CO <sub>2</sub> .....	76
Bild A 16: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 60 % CO <sub>2</sub> .....	76
Bild A 17: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 80 % CO <sub>2</sub> .....	77
Bild A 18: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 100 % CO <sub>2</sub> .....	77
Bild A 19: Thermische Analyse von ZS-2/4 nicht karbonatisiert (V00) .....	81
Bild A 20: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 40 % CO <sub>2</sub> (V54).....	81
Bild A 21: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 40 % CO <sub>2</sub> (V55).....	82
Bild A 22: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 40 % CO <sub>2</sub> (V56).....	82
Bild A 23: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 40 % CO <sub>2</sub> (V57).....	83
Bild A 24: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 40 % CO <sub>2</sub> (V58).....	83
Bild A 25: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 40 % CO <sub>2</sub> (V59).....	84

# 1 Anhang A – Versuchsergebnisse

## Versuchsergebnisse Zementpasten

Die im Anhang aufgelisteten Diagramme und Tabellen sind die Grundlage für die dargestellten Ergebnisse und Schlussfolgerungen.

Tabelle A 1: Massezunahme bezogen auf Zeit und w/z-Wert

Quader	Zeit [h]	Trockenmasse vor dem Versuch [g]	Trockenmasse nach dem Versuch [g]	Massezunahme [g]	relative Massezunahme [%]
<b>w/z-0,3</b>					
1	24	53,2	53,3	0,1	0,19
2	48	57,6	58,1	0,5	0,87
3	72	59,5	61,0	1,5	2,52
4	96	60,2	62,6	2,4	3,99
<b>w/z-0,4</b>					
1	24	40,8	41,0	0,2	0,49
2	48	51,4	53,8	2,4	4,67
3	72	51,7	56,2	4,5	8,70
4	96	50,8	56,0	5,2	10,24
<b>w/z-0,5</b>					
1	24	42,9	43,6	0,7	1,63
2	48	46,4	48,9	2,5	5,39
3	72	45,6	50,5	4,9	10,75
4	96	42,5	49,9	7,4	17,41

Tabelle A 2: Berechnung des Umsatzes an CaCO<sub>3</sub>

<b>1. Berechnung des Zementgehaltes in den Probekörpern (Zementsteinquadern)</b>					
Vollständig hydratisierter Zement enthält nach der Trocknung bei 105°C im Mittel rund <b>0,23gH<sub>2</sub>O/gZement</b> .					
Zementstein	=	Wasser	+	Zement	
	=	0,23 x PZ	+	PZ	
	=	1,23 x PZ			
Zement	=	ZS	/	1,23	
		Quader 1	Quader 2	Quader 3	Quader 4
Zementsteinmasse		53,2	57,6	59,5	60,2
Zementmasse		<b>43,3</b>	<b>46,8</b>	<b>48,4</b>	<b>48,9</b>
					w/z-0,3

Zementsteinmasse	40,8	51,4	51,7	50,8	w/z-0,4	
Zementmasse	<b>33,2</b>	<b>41,8</b>	<b>42,0</b>	<b>41,3</b>		
Zementsteinmasse	42,9	46,4	45,6	42,5	w/z-0,5	
Zementmasse	<b>34,9</b>	<b>37,7</b>	<b>37,1</b>	<b>34,6</b>		
<b>2. Berechnung der maximalen CO<sub>2</sub> Aufnahme mit der Steinour Formel</b>						
CO <sub>2</sub> Gehalt in %	=	0,785(CaO – 0,7·SO <sub>3</sub> ) + 1,091·MgO + 1,42·Na <sub>2</sub> O + 0,935·K <sub>2</sub> O				
	=	0,785(58 – 0,7·2,8) + 1,091·2,3 + 1,42·0,3 + 0,935·0,95				
	=	<b>47,81%</b>				
		Quader 1	Quader 2	Quader 3	Quader 4	
Zementmasse		43,3	46,8	48,4	48,9	w/z-0,3
max. CO <sub>2</sub> Aufnah.		<b>20,7</b>	<b>22,4</b>	<b>23,1</b>	<b>23,4</b>	
Zementmasse		33,2	41,8	42,0	41,3	w/z-0,4
max. CO <sub>2</sub> Aufnah.		<b>15,9</b>	<b>20,0</b>	<b>20,1</b>	<b>19,7</b>	
Zementmasse		34,9	37,7	37,1	34,6	w/z-0,5
max. CO <sub>2</sub> Aufnah.		<b>16,7</b>	<b>18,0</b>	<b>17,7</b>	<b>16,5</b>	
<b>3. Berechnung der maximal zu entstehenden CaCO<sub>3</sub> Menge</b>						
Ca(OH) <sub>2</sub> +	CO <sub>2</sub>	+ H <sub>2</sub> O	→	CaCO <sub>3</sub>	+ 2H <sub>2</sub> O	
	44 g/mol			100,1 g/mol		
		Quader 1	Quader 2	Quader 3	Quader 4	
max. CO <sub>2</sub> Aufnah.		20,7	22,4	23,1	23,4	w/z-0,3
max. CaCO <sub>3</sub>		<b>47,0</b>	<b>50,9</b>	<b>52,6</b>	<b>53,2</b>	
max.CO <sub>2</sub> Aufnah.		15,9	20,0	20,1	19,7	w/z-0,4
max. CaCO <sub>3</sub>		<b>36,1</b>	<b>45,5</b>	<b>45,7</b>	<b>44,9</b>	
max.CO <sub>2</sub> Aufnah.		16,7	18,0	17,7	16,5	w/z-0,5
max. CaCO <sub>3</sub>		<b>37,9</b>	<b>41,0</b>	<b>40,3</b>	<b>37,6</b>	
<b>4. Berechnung des Umsatzes an CaCO<sub>3</sub> in Abhängigkeit von der Zeit</b>						
Umsatz	=	CaCO <sub>3</sub> tatsächlich / CaCO <sub>3</sub> maximal				
		Quader 1 24 h	Quader 2 48 h	Quader 3 72 h	Quader 4 96 h	
tat. CaCO <sub>3</sub>		0,1	0,5	1,5	2,4	w/z-0,3
max. CaCO <sub>3</sub>		47,0	50,9	52,6	53,2	
Umsatz		0,0021	0,0098	0,0285	0,0451	w/z-0,4
Umsatz [%]		<b>0,21</b>	<b>0,98</b>	<b>2,85</b>	<b>4,51</b>	
tat. CaCO <sub>3</sub>		0,2	2,4	4,5	5,2	w/z-0,4
max. CaCO <sub>3</sub>		36,1	45,5	45,7	44,9	
Umsatz		0,0055	0,0528	0,0984	0,1158	w/z-0,5
Umsatz [%]		<b>0,55</b>	<b>5,28</b>	<b>9,84</b>	<b>11,58</b>	
tat. CaCO <sub>3</sub>		0,7	2,5	4,9	7,4	w/z-0,5

max. CaCO <sub>3</sub>	37,9	41,0	40,3	37,6	
Umsatz	0,0185	0,0609	0,1215	0,1969	
Umsatz [%]	1,85	6,09	12,15	19,69	

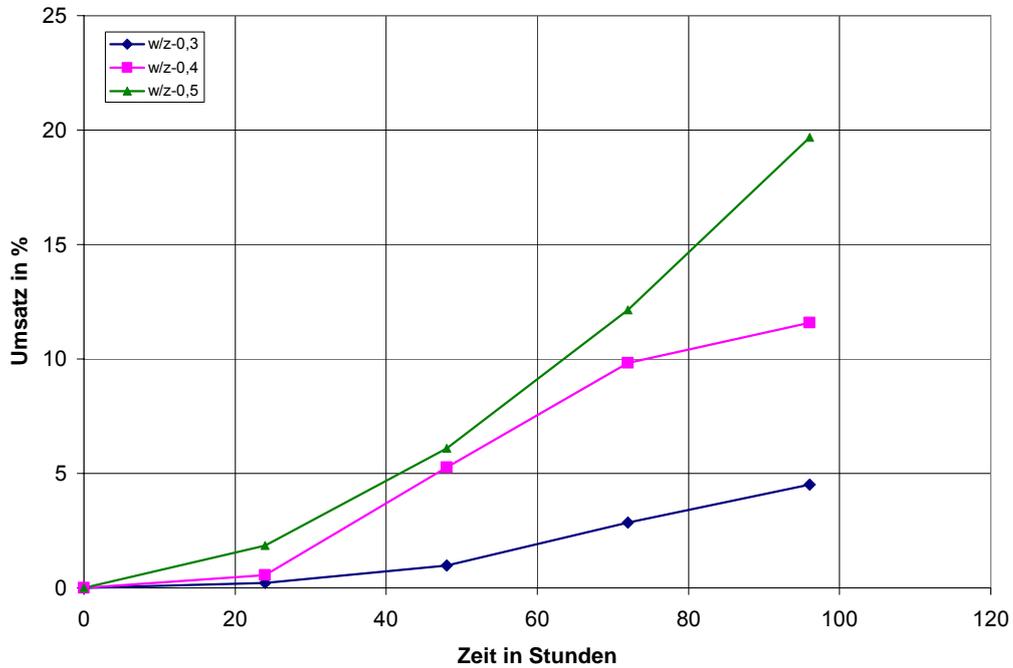


Bild A 1: Umsatz von CaCO<sub>3</sub> in Abhängigkeit von Zeit und w/z-Wert

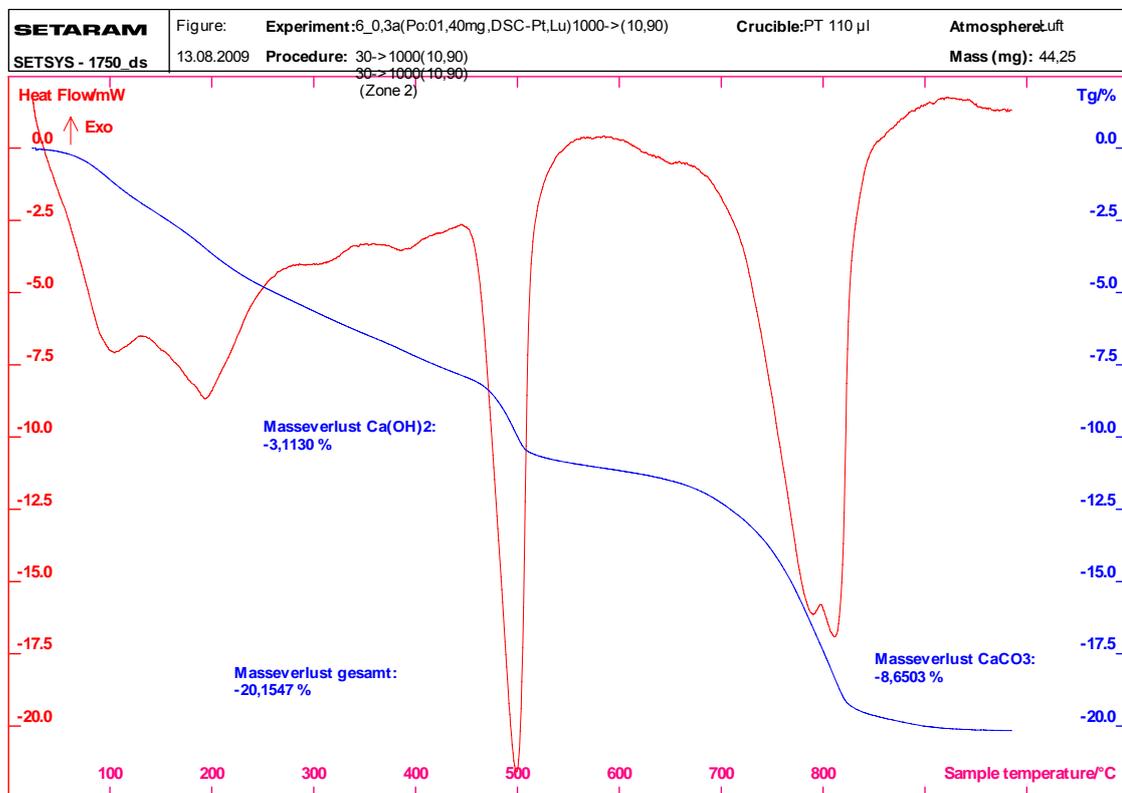


Bild A 2: Thermische Analyse von ZS-Quadern (96 h, w/z-0,3)

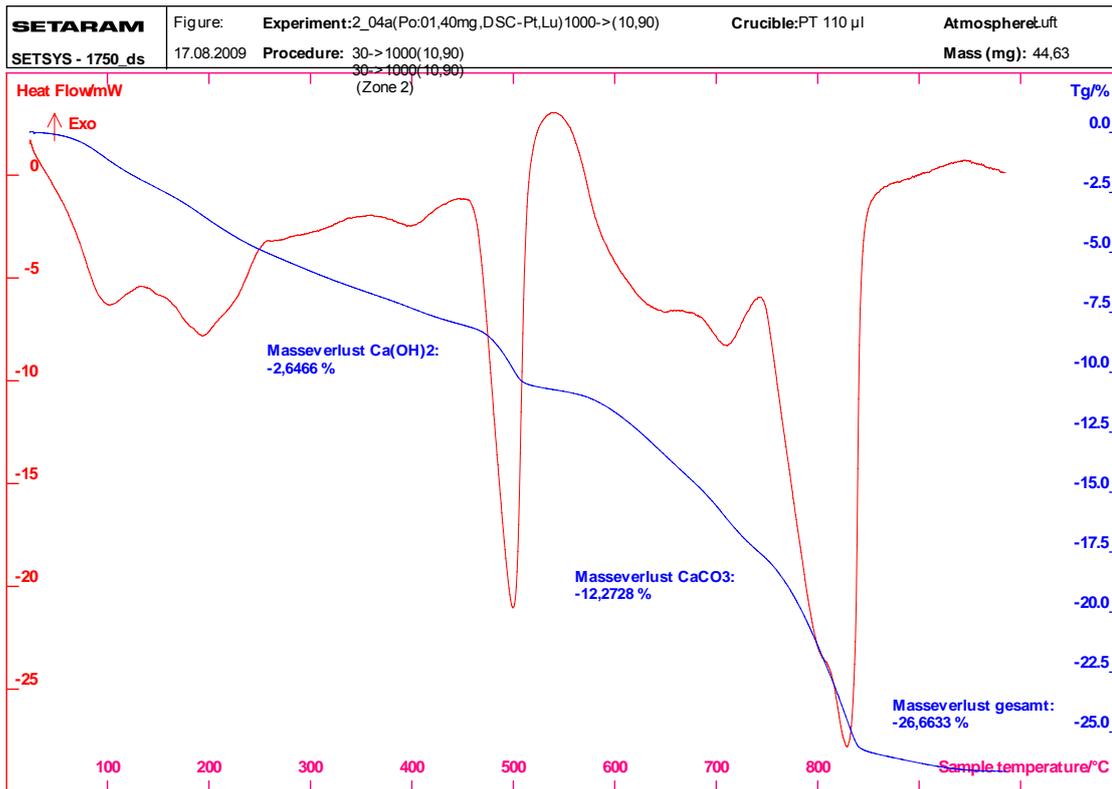


Bild A 3: Thermische Analyse von ZS-Quadern (96 h, w/z-0,4)

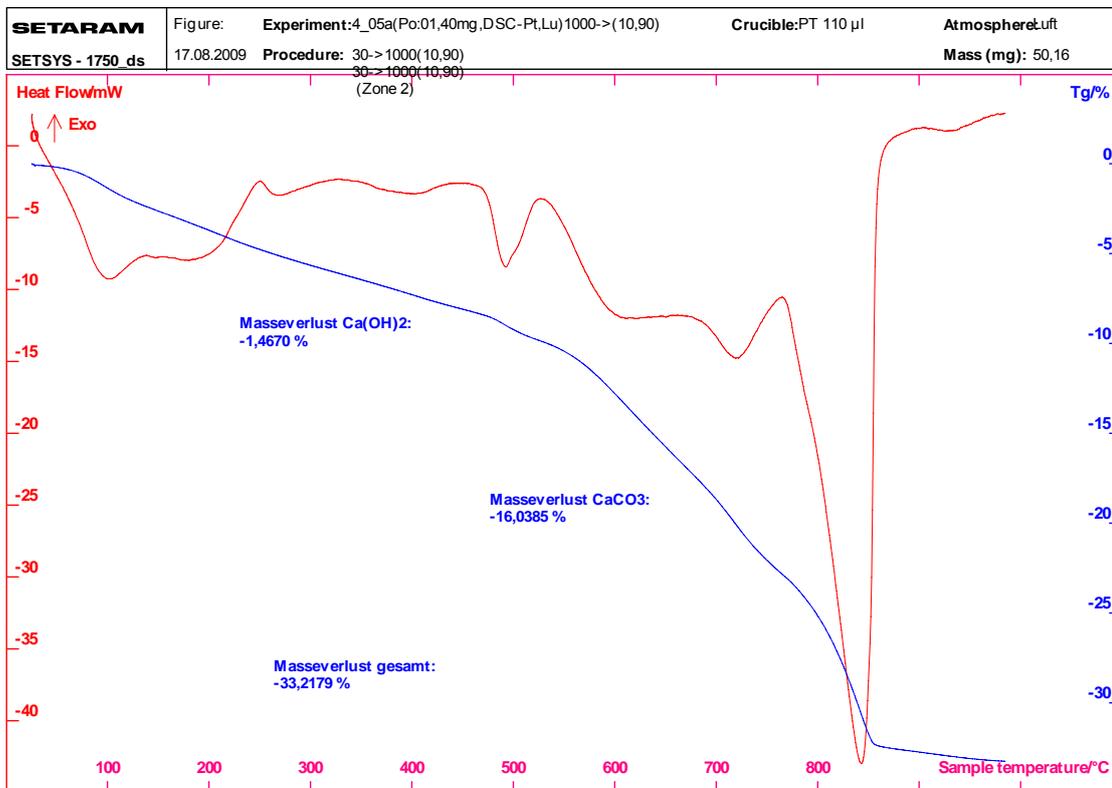


Bild A 4: Thermische Analyse von ZS-Quadern (96 h, w/z-0,5)

Tabelle A 3: Massezunahme in Abhängigkeit der Korngröße bei 20 % CO<sub>2</sub>

CO <sub>2</sub> Konzentration	Korngröße	Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert	Masse nach Exsikkatorlagerung	Masse nach 24 h Bewitterung	Masse nach 48 h Bewitterung	Masse nach 72 h Bewitterung	Masse nach 96 h Bewitterung	Trockenmasse karbonatisiert	relative Massezunahme	
[%]	[mm]		[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	
20	0,25/2	1	10,003	10,558	11,645	12,204		12,386	12,467	11,423	14,20
						Masse vor der Zerkleinerung	Masse nach der Zerkleinerung				
	2	10,059	10,605	11,741	12,293	12,170	12,433	12,511	11,462	13,95	
	2/4	1	10,020	10,654	11,689	12,248		12,469	12,562	11,541	15,18
						Masse vor der Zerkleinerung	Masse nach der Zerkleinerung				
	2	10,040	10,688	11,732	12,352	12,223	12,524	12,614	11,597	15,51	
	4/8	1	10,223	10,736	11,862	12,471		12,700	12,798	11,751	14,95
						Masse vor der Zerkleinerung	Masse nach der Zerkleinerung				
2	9,987	10,493	11,561	12,172	12,035	12,325	12,412	11,406	14,21		

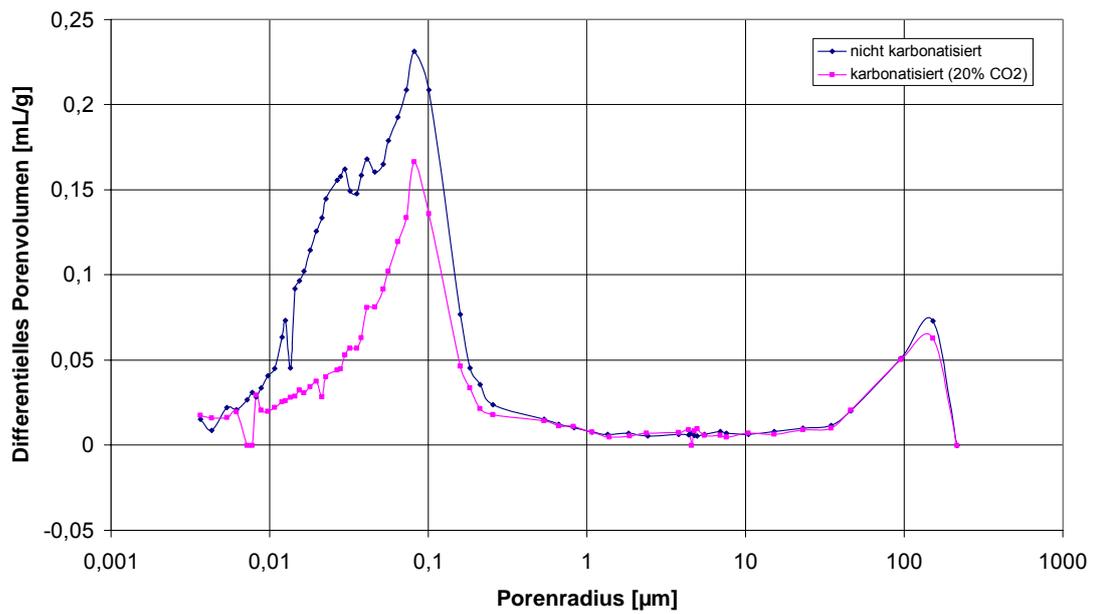


Bild A 5: Porenradienverteilung von ZS 2/4 vor und nach der Karbonatisierung

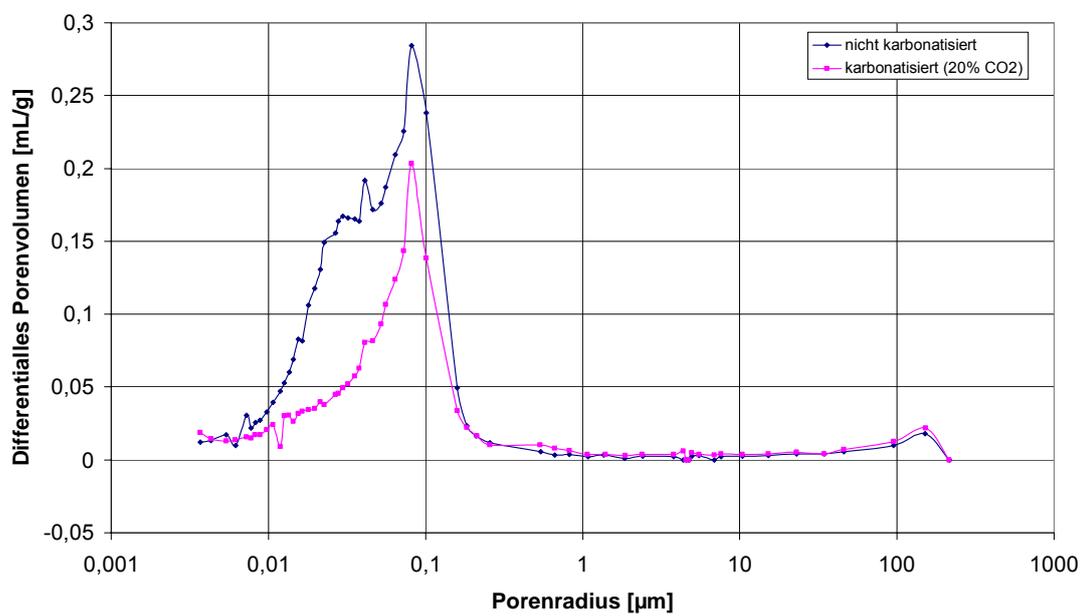


Bild A 6: Porenradienverteilung von ZS 4/8 vor und nach der Karbonatisierung

Tabelle A 4: Massezunahme in Abhängigkeit der Korngröße bei 40 % CO<sub>2</sub>

CO <sub>2</sub> Konzentration	Korngröße	Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert	Masse nach Exsikkatorlagerung	Masse nach 24 h Bewitterung	Masse nach 48 h Bewitterung	Masse nach 72 h Bewitterung	Masse nach 96 h Bewitterung	Trockenmasse karbonatisiert	relative Massezunahme	
[%]	[mm]		[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	
40	0,25/2	1	10,178	10,895	12,312	12,764		12,994	13,162	11,990	17,83
						Masse vor der Zerkleinerung	Masse nach der Zerkleinerung				
	2	10,115	10,821	12,241	12,700	12,575	12,872	13,033	11,880	17,45	
	2/4	1	10,065	10,633	11,779	12,237		12,492	12,679	11,703	16,27
						Masse vor der Zerkleinerung	Masse nach der Zerkleinerung				
	2	10,099	10,674	11,742	12,253	12,118	12,447	12,613	11,643	15,29	
	4/8	1	10,425	11,012	12,171	12,678		12,958	13,120	12,106	16,13
						Masse vor der Zerkleinerung	Masse nach der Zerkleinerung				
2	10,279	10,856	12,040	12,535	12,436	12,751	12,907	11,922	15,98		

Tabelle A 5: Massezunahme in Abhängigkeit der Korngröße bei 60 % CO<sub>2</sub>

CO <sub>2</sub> Konzentration	Korngröße	Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert	Masse nach Exsikkatorlagerung	Masse nach 24 h Bewitterung	Masse nach 48 h Bewitterung	Masse nach 72 h Bewitterung	Masse nach 96 h Bewitterung	Trockenmasse karbonatisiert	relative Massezunahme	
[%]	[mm]		[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	
60	0,25/2	1	10,134	10,770	12,214	12,644		12,827	12,913	11,873	17,16
						Masse vor der Zerkleinerung	Masse nach der Zerkleinerung				
	2	10,127	10,763	12,241	12,677	12,543	12,810	12,905	11,864	17,15	
	2/4	1	10,110	10,730	12,083	12,525		12,744	12,849	11,814	16,86
						Masse vor der Zerkleinerung	Masse nach der Zerkleinerung				
	2	10,202	10,827	12,199	12,680	12,540	12,843	12,943	11,916	16,80	
	4/8	1	10,174	10,784	12,175	12,662		12,891	13,003	11,946	17,42
						Masse vor der Zerkleinerung	Masse nach der Zerkleinerung				
2	10,116	10,722	12,099	12,573	12,479	12,760	12,859	11,845	17,09		

Tabelle A 6: Massezunahme in Abhängigkeit der Korngröße bei 80 % CO<sub>2</sub>

CO <sub>2</sub> Konzentration	Korngröße	Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert	Masse nach Exsikkatorlagerung	Masse nach 24 h Bewitterung	Masse nach 48 h Bewitterung	Masse nach 72 h Bewitterung	Masse nach 96 h Bewitterung	Trockenmasse karbonatisiert	relative Massezunahme	
[%]	[mm]		[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	
80	0,25/2	1	10,293	10,995	13,360	13,951		14,137	14,202	12,731	23,69
						Masse vor der Zerkleinerung	Masse nach der Zerkleinerung				
	2	10,376	11,087	13,520	14,081	13,842	14,173	14,238	12,815	23,51	
	2/4	1	10,103	10,758	12,867	13,537		13,731	13,799	12,459	23,32
						Masse vor der Zerkleinerung	Masse nach der Zerkleinerung				
	2	10,161	10,846	13,043	13,724	13,487	13,837	13,911	12,541	23,42	
	4/8	1	10,113	10,766	13,038	13,708		13,893	13,949	12,521	23,81
						Masse vor der Zerkleinerung	Masse nach der Zerkleinerung				
2	10,180	10,856	13,115	13,757	13,542	13,878	13,938	12,576	23,54		

Tabelle A 7: Massezunahme in Abhängigkeit der Korngröße bei 100 % CO<sub>2</sub>

CO <sub>2</sub> Konzentration	Korngröße	Probe	Trockenmasse	Masse nach Exsik-	Masse nach 24 h	Masse nach 48 h		Masse nach 72 h	Masse nach 96 h	Trockenmasse kar-	relative Massezu-	
			nicht karbonatisiert	katorlagerung	Bewitterung	Bewitterung	Bewitterung	Bewitterung	bonatisiert	nahme		
[%]	[mm]		[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	
100	0,25/2	1	10,255	10,950	13,201	13,849		14,046	14,114	12,650	23,35	
		2	10,183	10,874	13,177	Masse vor der Zerkleinerung	Masse nach der Zerkleinerung	13,910	13,972	12,555	23,29	
	2/4	1	10,339	10,994	13,040	13,806		14,026	14,111	12,719	23,02	
		2	10,172	10,853	12,869	Masse vor der Zerkleinerung	Masse nach der Zerkleinerung					13,803
	4/8	1	11,530	12,246	14,638	15,499		15,747	15,834	14,229	23,41	
		2	11,165	11,897	14,187	Masse vor der Zerkleinerung	Masse nach der Zerkleinerung					14,997

Tabelle A 8: Reindichte in Abhängigkeit von Korngröße und CO<sub>2</sub> Konzentration

96 h Bewitterung						
	CO <sub>2</sub> Konzentration [%]					
	0	20	40	60	80	100
0,25/2	2,3054	2,3976	2,5233	2,4741	2,5202	2,5586
2/4	2,3054	2,4774	2,3641	2,4747	2,5208	2,4719
4/8	2,3054	2,5291	2,5393	2,4954	2,5211	2,5243
Reindichte [g/cm <sup>3</sup> ]						

Tabelle A 9: Massezunahme nach 3 h Bewitterung in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub> Konzentration

CO <sub>2</sub> Konzentration [%]	Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert [g]	Masse nach Exsik- katorlagerung [g]	Masse nach 3 h Bewitterung [g]	Trockenmasse kar- bonatisiert [g]	relative Massezu- nahme [g]	relative Massezu- nahme auf das Glühbeständige [%]	relative Massezu- nahme auf das Glühbeständige (Mittelwert) [%]
20	1	4,695	5,072	5,272	4,848	0,153	3,90	3,68
	2	4,938	5,242	5,436	5,077	0,139	3,38	
	3	4,788	5,173	5,386	4,950	0,162	4,04	
	4	4,712	5,088	5,286	4,845	0,133	3,39	
40	1	4,939	5,236	5,451	5,097	0,158	3,83	3,88
	2	4,999	5,295	5,497	5,145	0,146	3,50	
	3	5,026	5,329	5,547	5,191	0,165	3,93	
	4	4,731	5,096	5,319	4,900	0,169	4,26	
60	1	4,850	5,241	5,438	5,003	0,153	3,78	3,59
	2	4,694	5,066	5,247	4,844	0,150	3,83	
	3	5,010	5,321	5,509	5,160	0,150	3,59	
	4	4,744	5,106	5,291	4,868	0,124	3,15	
80	1	4,765	5,143	5,390	4,959	0,194	4,87	4,62
	2	4,717	5,093	5,325	4,905	0,188	4,77	
	3	5,072	5,380	5,623	5,259	0,187	4,43	
	4	4,983	5,288	5,521	5,165	0,182	4,39	
100	1	4,758	5,173	5,498	5,040	0,282	7,09	6,40
	2	4,779	5,181	5,499	5,050	0,271	6,81	
	3	4,999	5,338	5,638	5,246	0,247	5,97	
	4	5,003	5,336	5,630	5,241	0,238	5,75	

Tabelle A 10: Massezunahme nach 6 h Bewitterung in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub> Konzentration

CO <sub>2</sub> Konzentration [%]	Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert [g]	Masse nach Exsik- katorlagerung [g]	Masse nach 6 h Bewitterung [g]	Trockenmasse kar- bonatisiert [g]	relative Massezu- nahme [g]	relative Massezu- nahme auf das Glühbeständige [%]	relative Massezu- nahme auf das Glühbeständige (Mittelwert) [%]
20	1	4,847	5,235	5,661	5,156	0,309	7,59	7,70
	2	4,907	5,303	5,699	5,206	0,299	7,27	
	3	4,904	5,290	5,735	5,236	0,332	8,04	
	4	4,865	5,245	5,682	5,189	0,324	7,90	
40	1	4,942	5,328	5,849	5,341	0,399	9,64	10,05
	2	4,865	5,311	5,742	5,249	0,384	9,43	
	3	4,922	5,307	5,878	5,359	0,437	10,50	
	4	4,907	5,301	5,866	5,348	0,441	10,63	
60	1	4,951	5,346	5,841	5,345	0,394	9,54	9,89
	2	4,891	5,285	5,799	5,302	0,411	10,05	
	3	4,884	5,261	5,777	5,283	0,399	9,78	
	4	4,884	5,275	5,798	5,301	0,417	10,20	
80	1	4,873	5,270	5,837	5,289	0,416	10,17	9,85
	2	4,913	5,312	5,811	5,318	0,405	9,85	
	3	4,957	5,356	5,857	5,359	0,402	9,71	
	4	4,895	5,295	5,780	5,290	0,395	9,66	
100	1	4,897	5,312	5,878	5,361	0,464	11,29	11,36
	2	4,928	5,338	5,873	5,375	0,447	10,85	
	3	4,934	5,345	5,938	5,426	0,492	11,83	
	4	4,907	5,319	5,883	5,380	0,473	11,48	

Tabelle A 11: Massezunahme nach 12 h Bewitterung in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub> Konzentration

CO <sub>2</sub> Konzentration [%]	Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert [g]	Masse nach Exsik- katorlagerung [g]	Masse nach 12 h Bewitterung [g]	Trockenmasse kar- bonatisiert [g]	relative Massezu- nahme [g]	relative Massezu- nahme auf das Glühbeständige [%]	relative Massezu- nahme auf das Glühbeständige (Mittelwert) [%]
20	1	5,026	5,410	6,240	5,653	0,627	14,72	14,44
	2	4,895	5,277	6,041	5,478	0,583	14,15	
	3	4,950	5,339	6,145	5,568	0,618	14,75	
	4	4,860	5,230	5,989	5,438	0,578	14,13	
40	1	4,836	5,223	5,907	5,389	0,553	13,55	13,50
	2	4,877	5,269	5,929	5,412	0,535	13,05	
	3	5,043	5,441	6,183	5,640	0,597	13,98	
	4	4,848	5,223	5,906	5,395	0,547	13,41	
60	1	4,889	5,279	6,066	5,502	0,613	14,88	14,71
	2	4,973	5,375	6,160	5,589	0,616	14,74	
	3	4,896	5,287	6,077	5,513	0,617	14,94	
	4	4,913	5,302	6,056	5,501	0,588	14,27	
80	1	4,849	5,265	6,002	5,457	0,608	14,83	14,98
	2	5,002	5,426	6,158	5,607	0,605	14,37	
	3	4,883	5,302	6,087	5,531	0,648	15,61	
	4	4,943	5,362	6,121	5,574	0,631	15,10	
100	1	4,986	5,415	6,228	5,638	0,652	15,52	15,22
	2	4,944	5,380	6,156	5,577	0,633	15,25	
	3	4,793	5,211	5,985	5,421	0,628	15,54	
	4	4,941	5,371	6,111	5,543	0,602	14,58	

Tabelle A 12: Massezunahme nach 24 h Bewitterung in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub> Konzentration

CO <sub>2</sub> Konzentration [%]	Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert [g]	Masse nach Exsikatorlagerung [g]	Masse nach 24 h Bewitterung [g]	Trockenmasse karbonatisiert [g]	relative Massezunahme [g]	relative Massezunahme auf das Glühbeständige [%]	relative Massezunahme auf das Glühbeständige (Mittelwert) [%]
20	1	4,897	5,269	6,425	5,762	0,865	21,05	20,98
	2	5,049	5,440	6,603	5,934	0,885	20,87	
	3	4,954	5,353	6,509	5,838	0,884	21,20	
	4	4,938	5,311	6,445	5,799	0,861	20,80	
40	1	4,919	5,311	6,455	5,805	0,886	21,45	21,37
	2	4,872	5,268	6,378	5,743	0,871	21,35	
	3	4,909	5,303	6,455	5,807	0,898	21,74	
	4	4,925	5,306	6,408	5,785	0,860	20,92	
60	1	4,921	5,326	6,455	5,818	0,897	21,67	21,48
	2	4,983	5,396	6,479	5,856	0,873	20,99	
	3	4,818	5,215	6,327	5,703	0,885	21,85	
	4	5,020	5,433	6,558	5,922	0,902	21,43	
80	1	4,871	5,286	6,341	5,703	0,832	20,29	20,09
	2	4,913	5,337	6,349	5,721	0,808	19,66	
	3	4,856	5,275	6,331	5,694	0,838	20,49	
	4	4,943	5,373	6,395	5,769	0,826	19,90	
100	1	4,956	5,395	6,509	5,834	0,878	21,11	20,83
	2	4,881	5,308	6,390	5,733	0,852	20,88	
	3	5,044	5,492	6,608	5,925	0,881	20,88	
	4	4,818	5,246	6,271	5,640	0,822	20,45	

Tabelle A 13: Massezunahme nach 48 h Bewitterung in Abhängigkeit von der CO<sub>2</sub> Konzentration

CO <sub>2</sub> Konzentration [%]	Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert [g]	Masse nach Exsikatorlagerung [g]	Masse nach 48 h Bewitterung [g]	Trockenmasse karbonatisiert [g]	relative Massezunahme [g]	relative Massezunahme auf das Glühbeständige [%]	relative Massezunahme auf das Glühbeständige (Mittelwert) [%]
20	1	4,792	5,252	6,342	5,739	0,947	23,50	23,43
	2	4,799	5,252	6,319	5,739	0,940	23,33	
	3	4,839	5,300	6,408	5,804	0,965	23,71	
	4	4,886	5,345	6,426	5,837	0,951	23,20	
40	1	4,863	5,340	6,441	5,836	0,973	23,67	23,37
	2	4,762	5,224	6,247	5,674	0,912	22,19	
	3	4,843	5,316	6,451	5,836	0,993	24,16	
	4	3,940	4,322	5,205	4,719	0,779	23,46	
60	1	4,926	5,417	6,671	6,025	1,099	26,35	26,02
	2	4,826	5,309	6,500	5,883	1,057	25,97	
	3	4,844	5,323	6,559	5,918	1,074	26,26	
	4	4,888	5,367	6,554	5,936	1,048	25,50	
80	1	4,841	5,313	6,551	5,892	1,051	25,63	25,44
	2	4,932	5,422	6,611	5,960	1,028	24,77	
	3	4,870	5,348	6,619	5,946	1,076	25,99	
	4	4,968	5,459	6,700	6,034	1,066	25,38	
100	1	4,917	5,430	6,744	6,056	1,139	27,38	27,03
	2	4,967	5,483	6,752	6,080	1,113	26,63	
	3	4,956	5,465	6,802	6,108	1,152	27,43	
	4	5,015	5,527	6,817	6,141	1,126	26,68	

Tabelle A 14: Reindichte in Abhängigkeit von Bewitterungszeit und CO<sub>2</sub> Konzentration

CO <sub>2</sub> Konzentration [%]	Bewitterungszeit						Reindichte [g/cm <sup>3</sup> ]
	0	3	6	12	24	48	
0	2,2795	2,2795	2,2795	2,2795	2,2795	2,2795	2,2795
20	2,2795	2,2921	2,3940	2,5048	2,5320	2,5791	
40	2,2795	2,2824	2,3810	2,4094	2,5485	2,5229	
60	2,2795	2,2429	2,4275	2,4179	2,5247	2,5451	
80	2,2795	2,2451	2,3971	2,4731	2,5971	2,5376	
100	2,2795	2,2962	2,4116	2,4488	2,5661	2,5311	

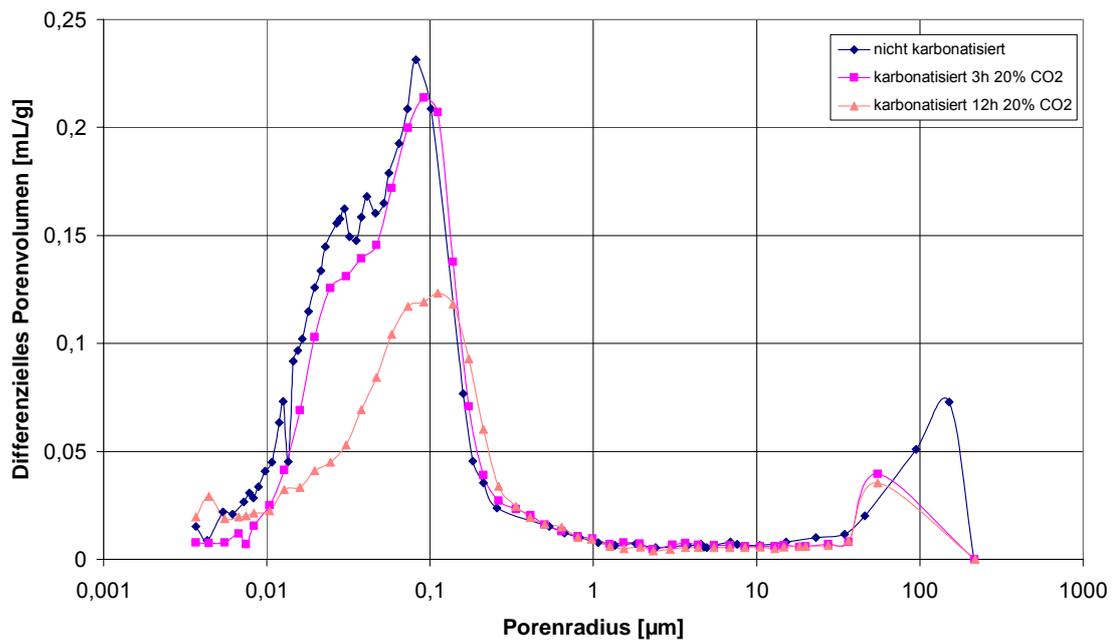


Bild A 7: Porenradienverteilung von ZS 2/4 vor und nach der Karbonatisierung

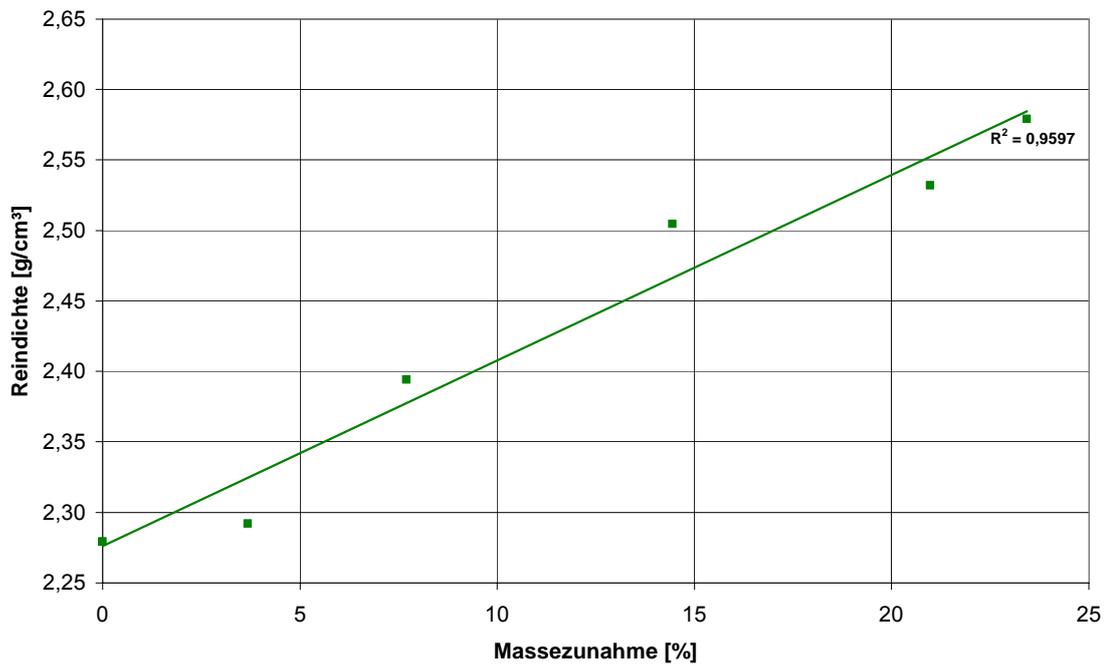


Bild A 8: Korrelation zwischen Reindichte und Massezunahme (20 % CO<sub>2</sub>)

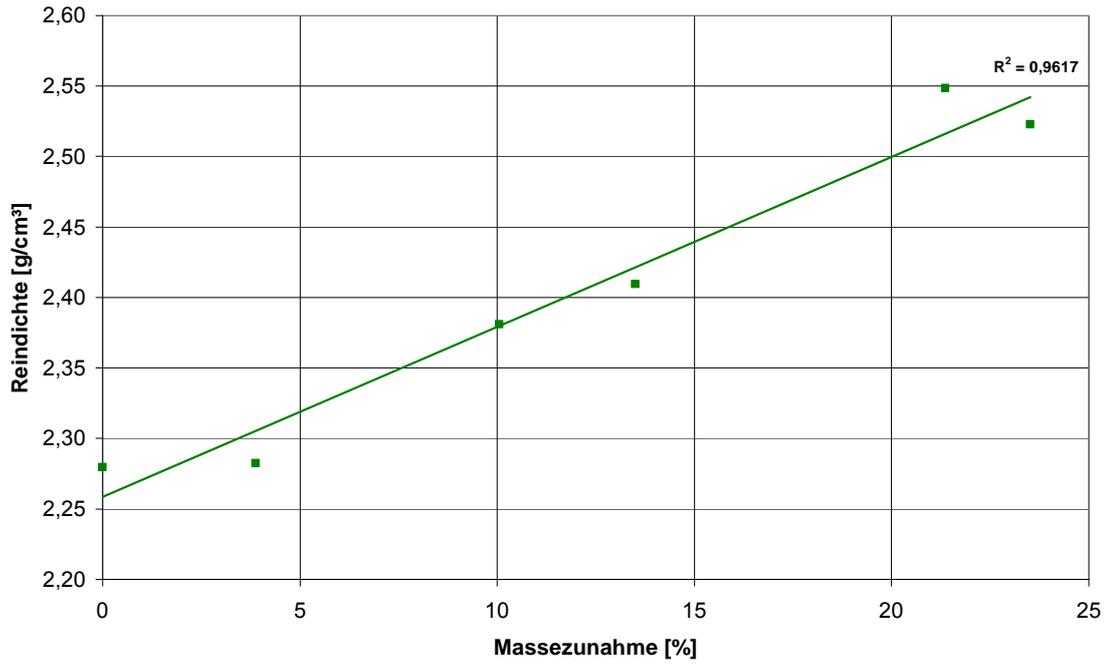


Bild A 9: Korrelation zwischen Reindichte und Massezunahme (40 % CO<sub>2</sub>)

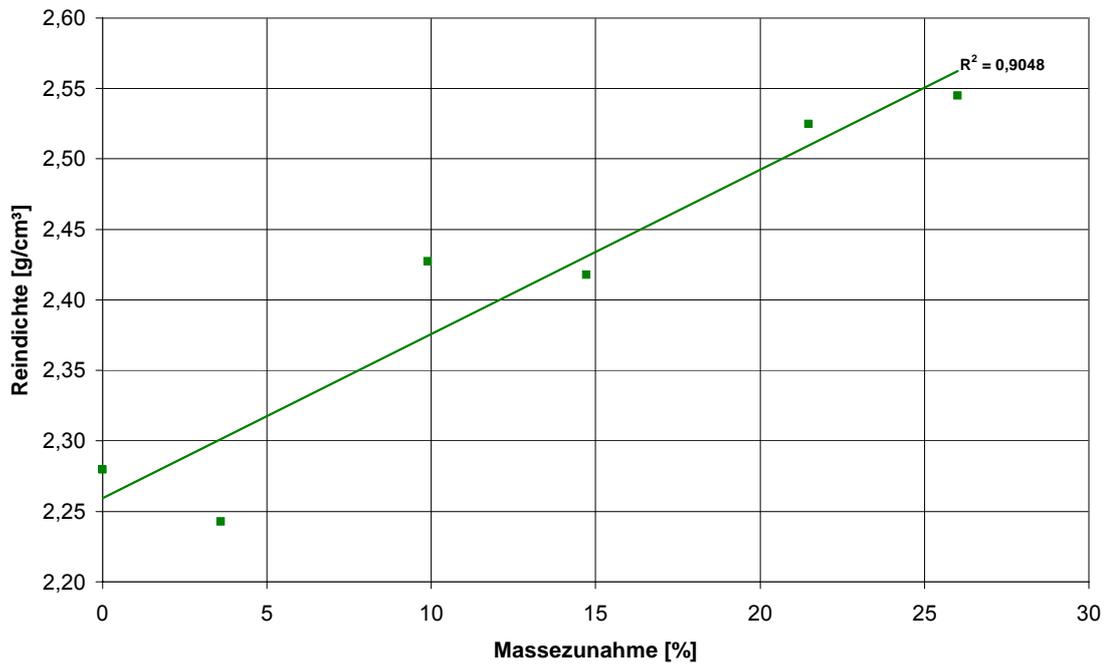


Bild A 10: Korrelation zwischen Reindichte und Massezunahme (60 % CO<sub>2</sub>)

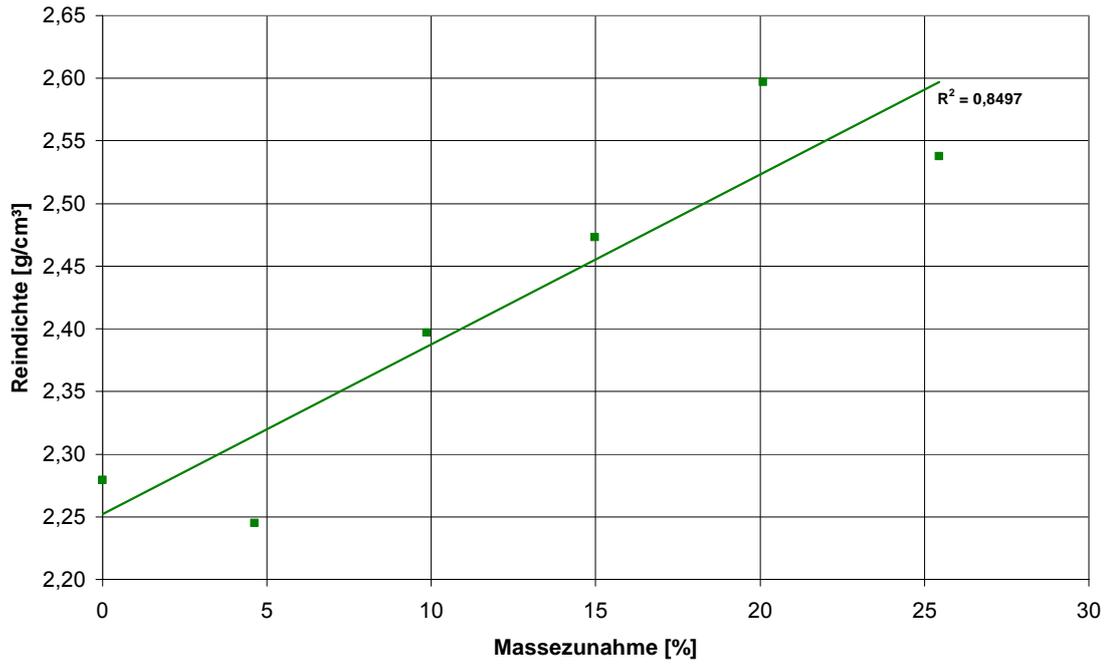


Bild A 11: Korrelation zwischen Reindichte und Massezunahme (80 % CO<sub>2</sub>)

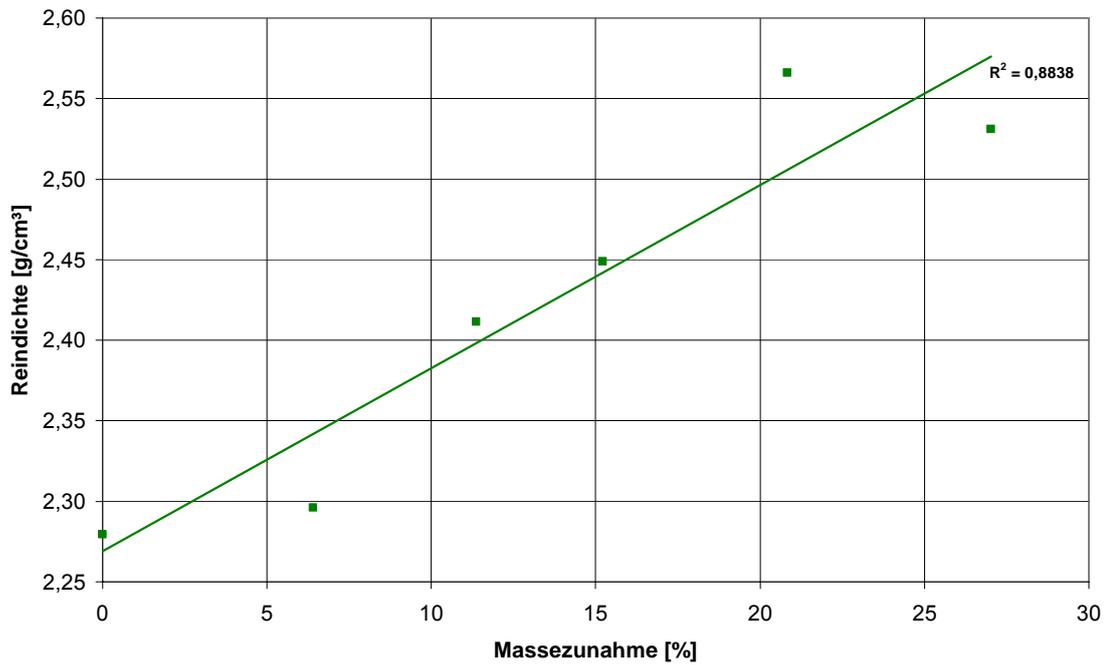


Bild A 12: Korrelation zwischen Reindichte und Massezunahme (100 % CO<sub>2</sub>)

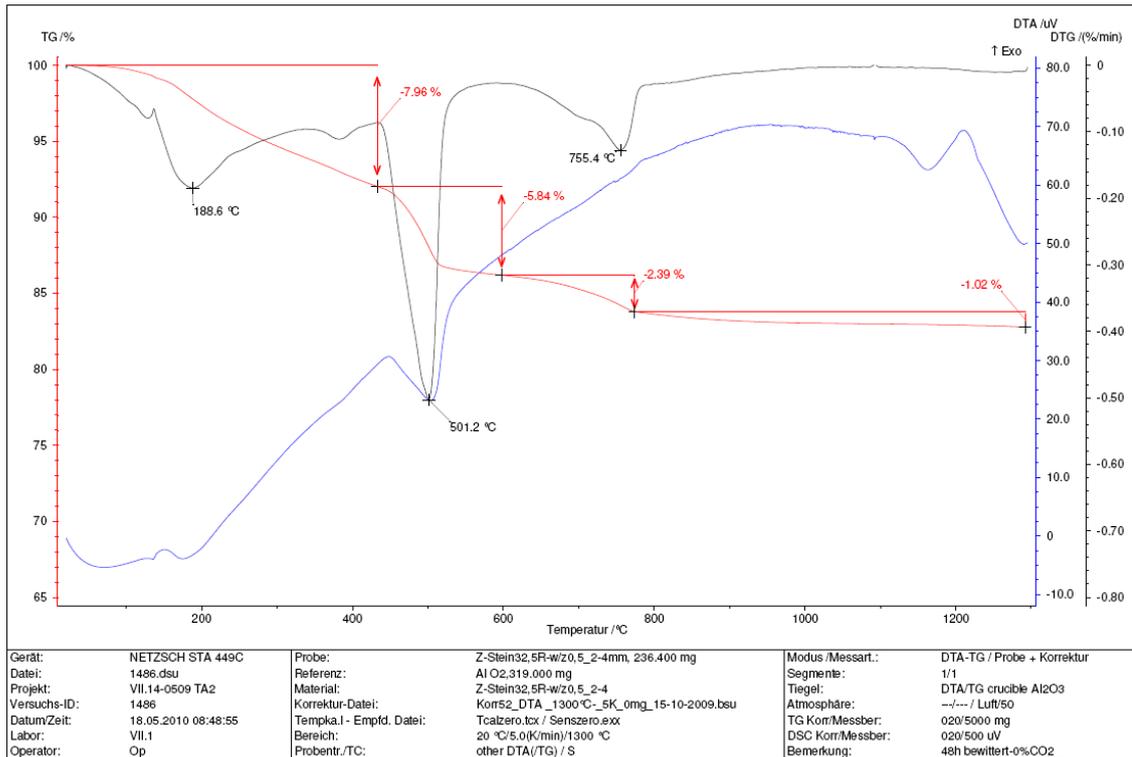


Bild A 13: Thermische Analyse von ZS-2/4 nicht karbonatisiert

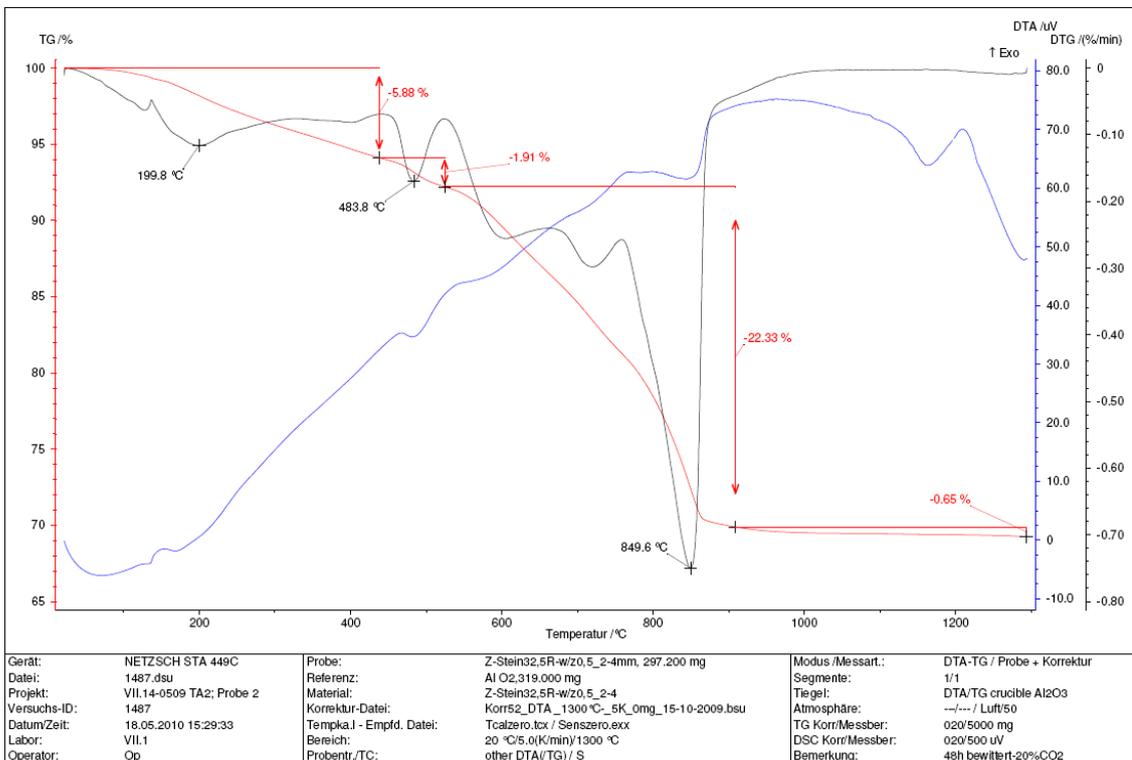


Bild A 14: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 20 % CO<sub>2</sub>

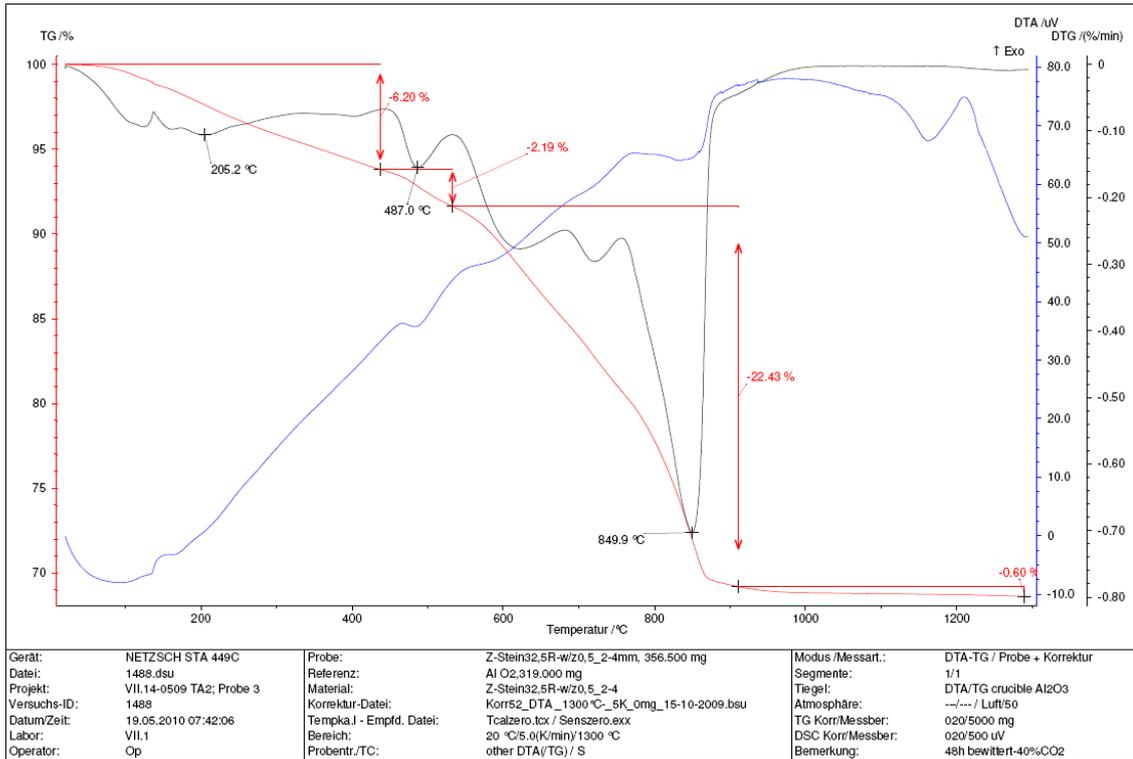


Bild A 15: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 40 % CO<sub>2</sub>

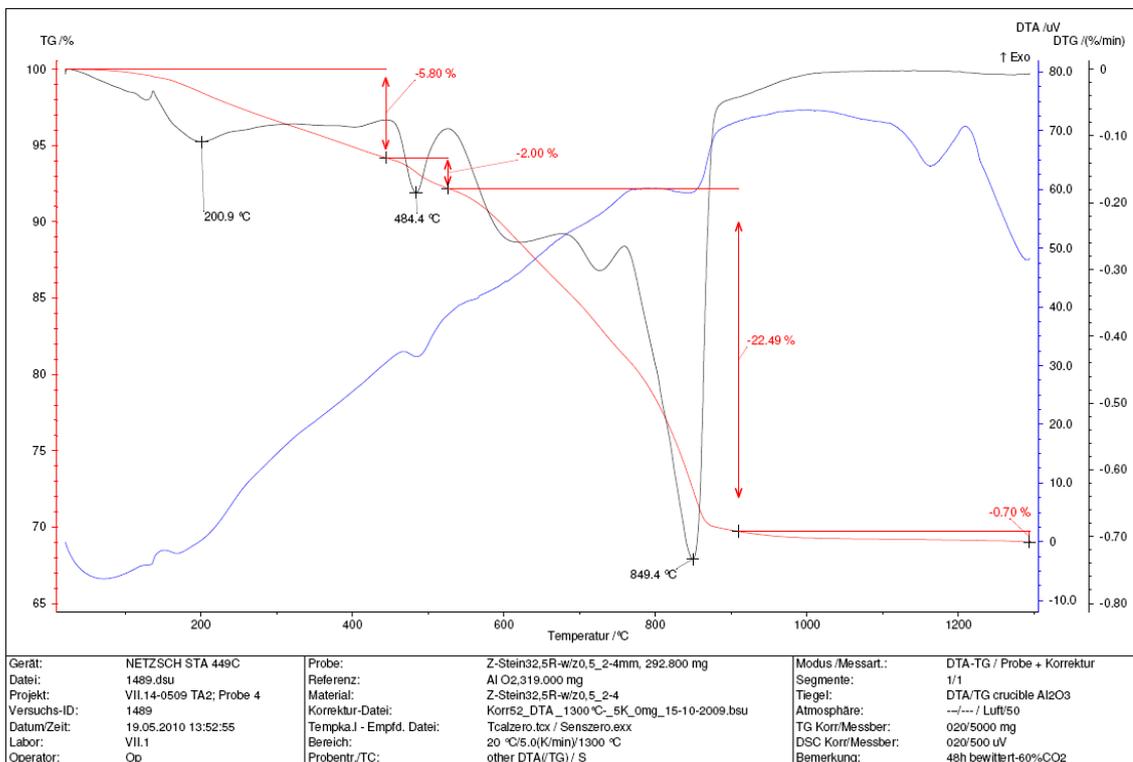


Bild A 16: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 60 % CO<sub>2</sub>

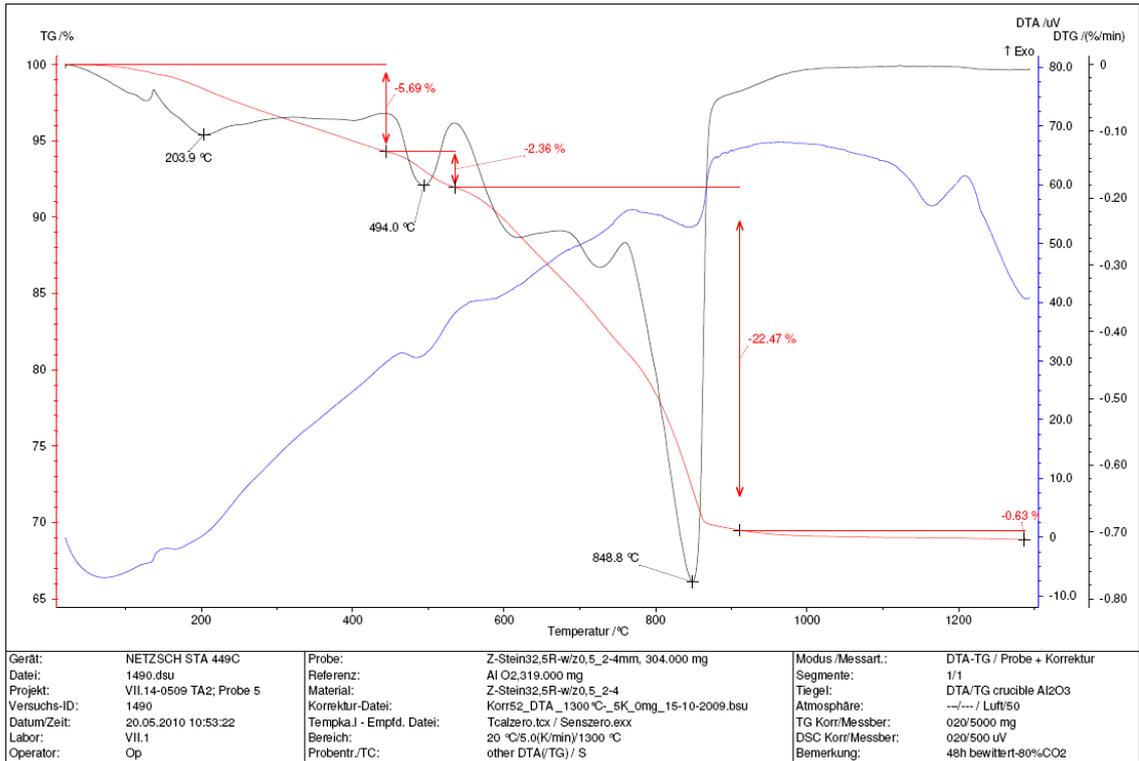


Bild A 17: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 80 % CO<sub>2</sub>

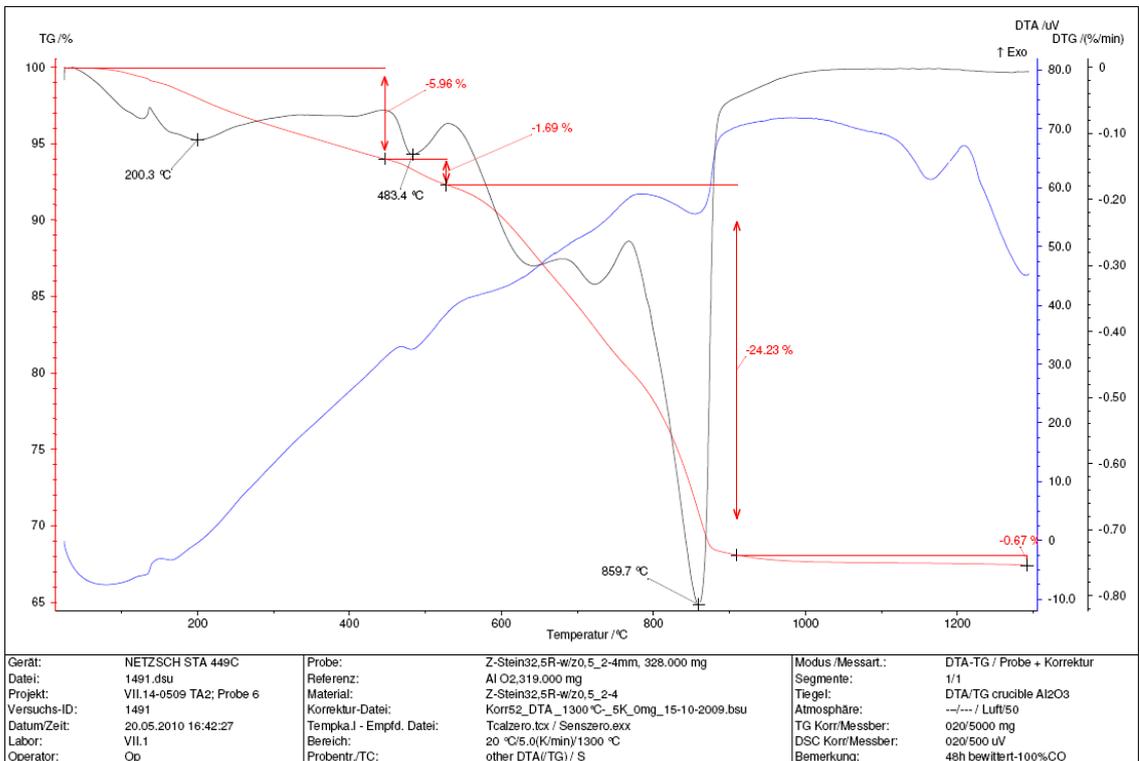


Bild A 18: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 100 % CO<sub>2</sub>

Tabelle A 15: Ergebnisse der Thermoanalyse (TG/DTG) der ZS-Proben P1-P6

Probe		P1	P2	P3	P4	P5	P6
CO <sub>2</sub> [%]		0	20	40	60	80	100
Zeit [h]		0	48	48	48	48	48
TG-Nr.		1486	1487	1488	1489	1490	1491
TG-Stufe	T [°C]	20-430	20-438	20-442	20-444	20-420	20-446
	Δm [%]	7,96	5,85	6,20	5,80	5,69	5,69
DTG-Peak	T [°C]	189	200	205	201	204	200
TG-Stufe	T [°C]	430-600	438-524	442-533	444-526	420-534	446-528
	Δm [%]	5,84	1,91	2,19	2,00	2,36	1,69
DTG-Peak	T [°C]	501	484	487	484	494	483
TG-Stufe	T [°C]	600-774	524-910	533-911	526-910	534-911	528-910
	Δm [%]	2,39	22,33	22,43	22,49	22,47	24,23
DTG-Peak	T [°C]	755	850	850	849	849	860
TG-Stufe	T [°C]	774-1300	910-1300	911-1300	910-1300	911-1300	910-1300
	Δm [%]	1,02	0,65	0,60	0,70	0,63	0,67
DTG-Peak	T [°C]	1168	1161	1165	1161	1164	1164
Gesamtverlust Δm [%]		17,21	30,74	31,42	30,99	31,15	32,55

Tabelle A 16: Ergebnisse der Thermoanalyse (TG/DTG) der ZS-Proben P7-P11

Probe		P1	P7	P8	P9	P10	P11
CO <sub>2</sub> [%]		0	20	40	60	80	100
Zeit [h]		0	24	24	24	24	24
TG-Nr.		1486	1492	1493	1494	1495	1496
TG-Stufe	T [°C]	20-430	20-437	20-441	20-437	20-438	20-438
	Δm [%]	7,96	6,20	6,44	6,82	6,53	5,32
DTG-Peak	T [°C]	189	196	163	161	160	202
TG-Stufe	T [°C]	430-600	437-525	441-532	437-528	437-537	438-542
	Δm [%]	5,84	1,98	2,17	2,22	2,45	2,63
DTG-Peak	T [°C]	501	482	490	484	491	482
TG-Stufe	T [°C]	600-774	525-910	532-910	527-910	535-910	542-910
	Δm [%]	2,39	21,29	21,24	21,28	20,84	21,15
DTG-Peak	T [°C]	755	839	849	841	846	837
TG-Stufe	T [°C]	774-1300	910-1300	871-1300	910-1300	910-1300	910-1300
	Δm [%]	1,02	0,63	0,61	0,60	0,61	0,59
DTG-Peak	T [°C]	1168	1158	1163	1164	1163	1161
Gesamtverlust Δm [%]		17,21	30,10	30,46	30,92	30,43	29,69

## Einfluss der Vorbehandlung auf die Karbonatisierung

Tabelle A 17: Massezunahme nach 6 h Bewitterung (V45 – V50)

CO <sub>2</sub> Konzentration [%]	Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert [g]	Masse nach Exsik- katorlagerung [g]	Masse nach 6 h Bewitterung [g]	Trockenmasse kar- bonatisiert [g]	relative Massezu- nahme [g]	relative Massezu- nahme auf das Glühbeständige [%]	relative Massezu- nahme auf das Glühbeständige (Mittelwert) [%]
40 (V45)	1	4,897	5,102	5,409	5,095	0,198	4,79	4,65
	2	4,947	5,154	5,439	5,129	0,182	4,37	
	3	5,052	5,258	5,590	5,260	0,208	4,88	
	4	5,003	5,204	5,515	5,194	0,191	4,54	
40 (V46)	1	4,962	5,201	5,545	5,195	0,233	5,59	5,63
	2	4,965	5,207	5,549	5,197	0,232	5,54	
	3	4,986	5,232	5,595	5,229	0,243	5,79	
	4	5,109	5,353	5,720	5,350	0,241	5,62	
40 (V47)	1	5,018	5,320	5,667	5,297	0,279	6,60	6,20
	2	5,519	5,855	6,230	5,806	0,287	6,20	
	3	5,015	5,313	5,687	5,283	0,268	6,35	
	4	5,066	5,377	5,708	5,305	0,239	5,65	
40 (V48)	1	4,912	5,222	5,570	5,177	0,265	6,42	6,48
	2	5,077	5,399	5,750	5,353	0,276	6,46	
	3	5,179	5,498	5,875	5,461	0,282	6,48	
	4	5,017	5,328	5,690	5,294	0,277	6,56	
40 (V49)	1	5,118	5,436	5,840	5,411	0,293	6,81	6,89
	2	4,985	5,303	5,686	5,272	0,287	6,85	
	3	4,998	5,314	5,708	5,287	0,289	6,88	
	4	5,166	5,488	5,904	5,471	0,305	7,01	
40 (V50)	1	4,989	5,324	5,704	5,300	0,311	7,39	7,33
	2	5,089	5,425	5,786	5,384	0,295	6,89	
	3	4,990	5,319	5,703	5,299	0,309	7,34	
	4	4,974	5,309	5,701	5,299	0,325	7,72	

Tabelle A 18: Massezunahme nach 6 h Bewitterung (V54 – V59)

CO <sub>2</sub> Konzentration [%]	Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert [g]	Masse nach Exsik- katorlagerung [g]	Masse nach 6 h Bewitterung [g]	Trockenmasse kar- bonatisiert [g]	relative Massezu- nahme [g]	relative Massezu- nahme auf das Glühbeständige [%]	relative Massezu- nahme auf das Glühbeständige (Mittelwert) [%]
40 (V54)	1	5,042	5,391	5,911	5,434	0,392	9,22	8,69
	2	4,877	5,225	5,720	5,161	0,284	7,03	
	3	4,908	5,255	5,769	5,297	0,389	9,37	
	4	4,898	5,245	5,736	5,276	0,378	9,15	
40 (V55)	1	4,940	5,308	5,814	5,349	0,409	9,76	9,69
	2	4,882	5,242	5,705	5,259	0,377	9,15	
	3	4,845	5,204	5,722	5,261	0,416	10,10	
	4	4,874	5,233	5,731	5,276	0,402	9,73	
40 (V56)	1	4,851	5,207	5,752	5,255	0,404	9,85	10,21
	2	4,935	5,334	5,843	5,341	0,406	9,74	
	3	4,942	5,344	5,895	5,385	0,443	10,55	
	4	4,840	5,243	5,781	5,281	0,441	10,70	
40 (V57)	1	4,909	5,326	5,931	5,414	0,505	12,17	12,45
	2	4,920	5,342	5,925	5,416	0,496	11,95	
	3	4,889	5,308	5,942	5,424	0,535	12,89	
	4	4,846	5,261	5,867	5,371	0,525	12,77	
40 (V58)	1	4,892	5,305	5,963	5,481	0,589	14,30	14,46
	2	4,903	5,311	5,970	5,487	0,584	14,14	
	3	4,925	5,340	6,043	5,546	0,621	14,89	
	4	4,918	5,326	6,010	5,520	0,602	14,51	
40 (V59)	1	4,952	5,374	6,063	5,576	0,624	15,00	15,26
	2	4,928	5,349	6,044	5,557	0,629	15,16	
	3	4,896	5,314	6,031	5,538	0,642	15,51	
	4	4,939	5,361	6,077	5,581	0,642	15,40	

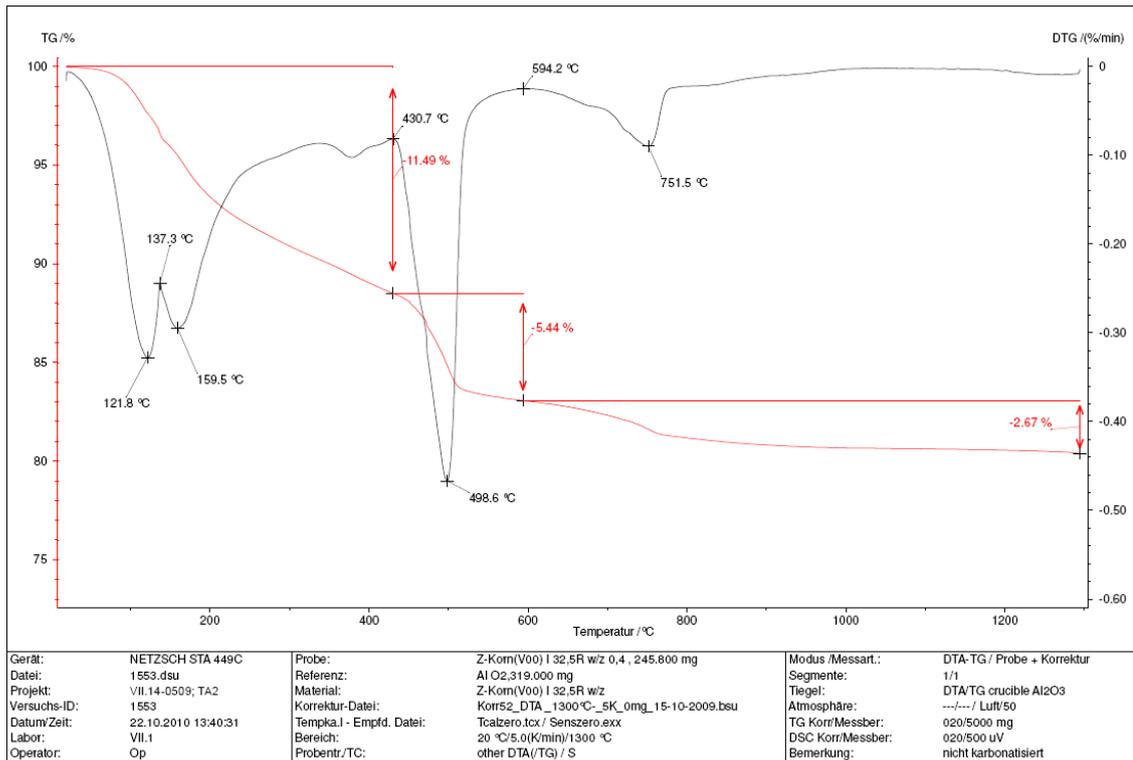


Bild A 19: Thermische Analyse von ZS-2/4 nicht karbonatisiert (V00)

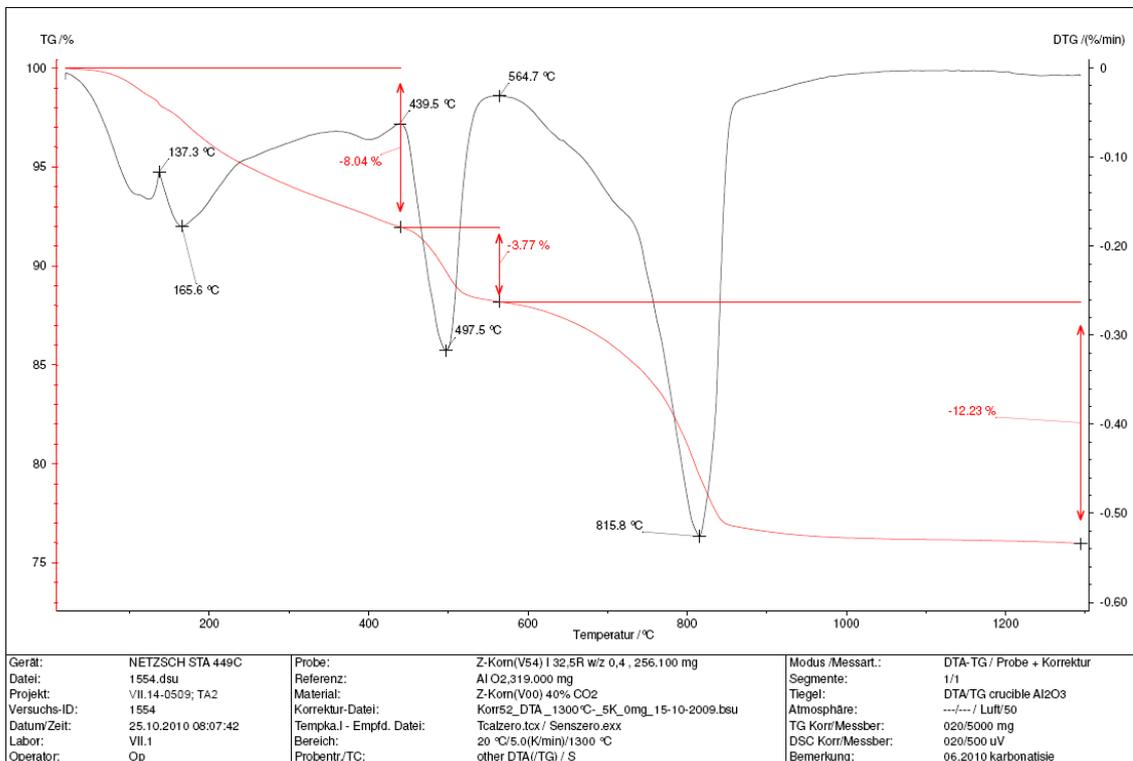


Bild A 20: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 40 % CO<sub>2</sub> (V54)

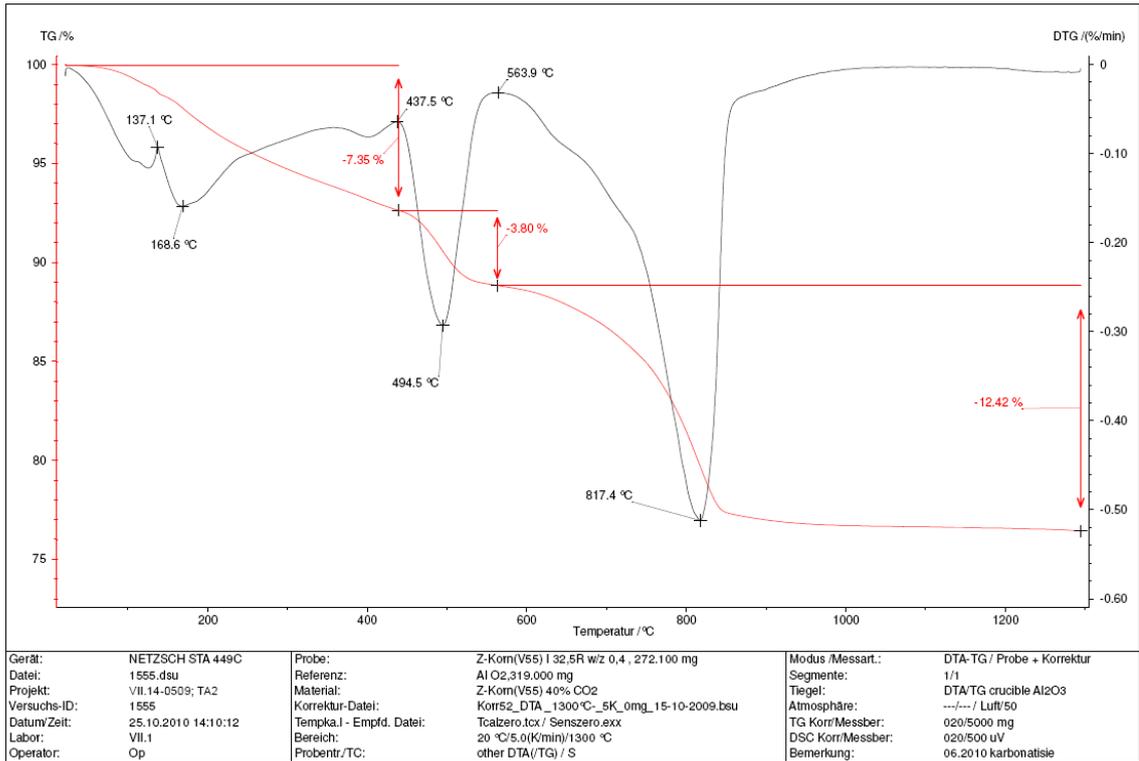


Bild A 21: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 40 % CO<sub>2</sub> (V55)

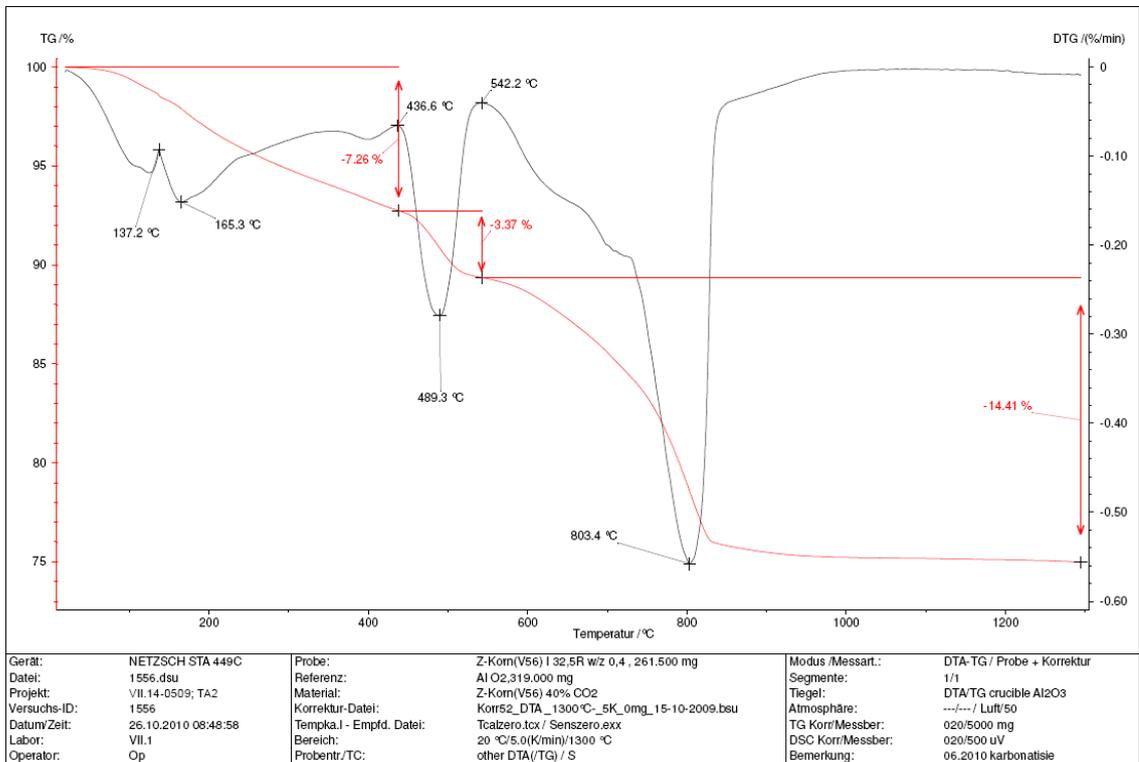


Bild A 22: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 40 % CO<sub>2</sub> (V56)

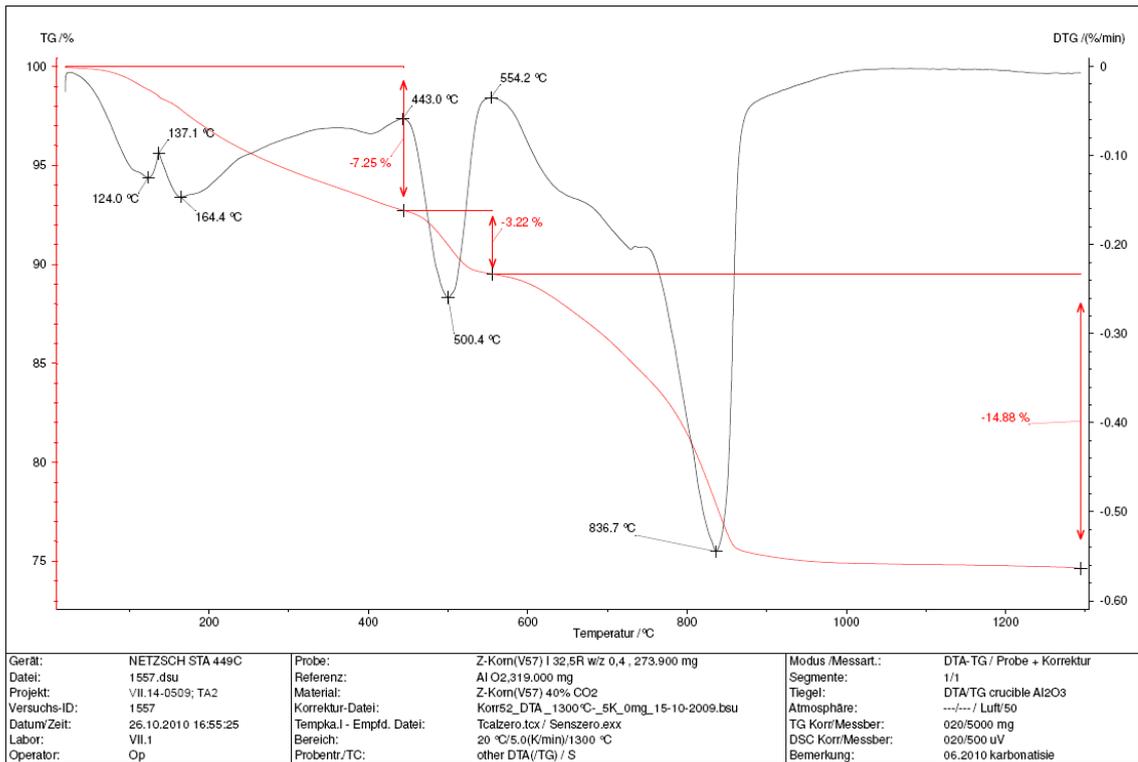


Bild A 23: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 40 % CO<sub>2</sub> (V57)

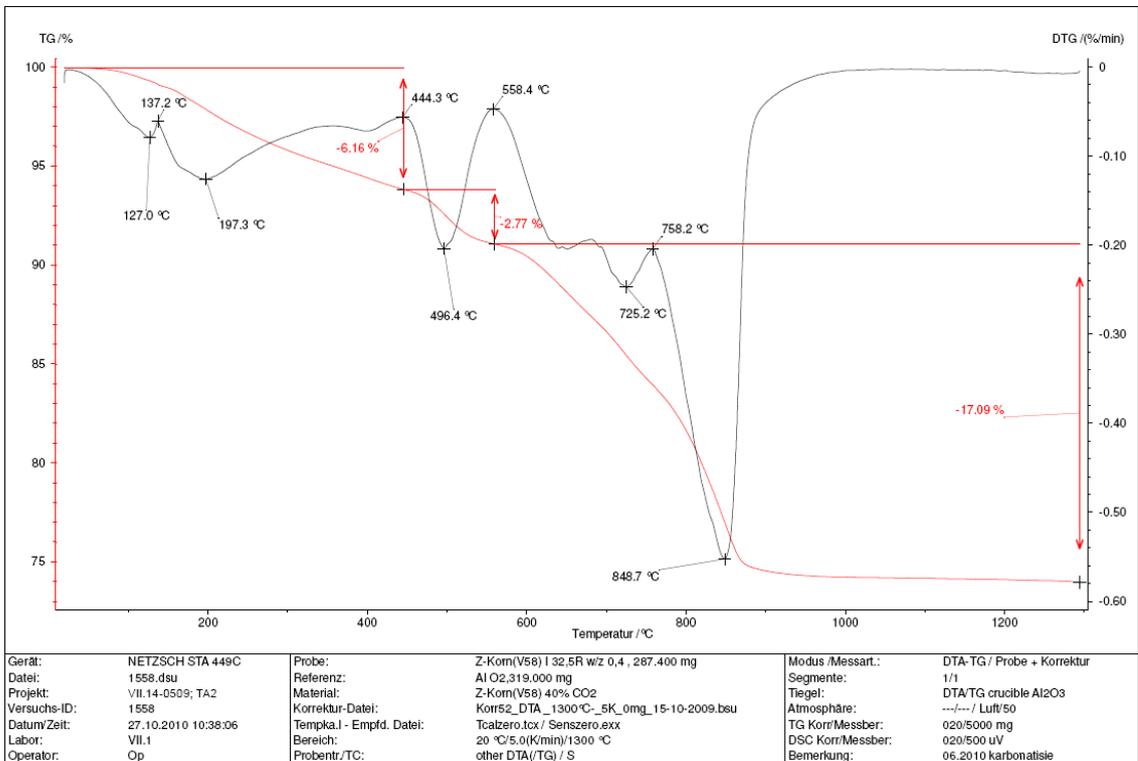


Bild A 24: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 40 % CO<sub>2</sub> (V58)

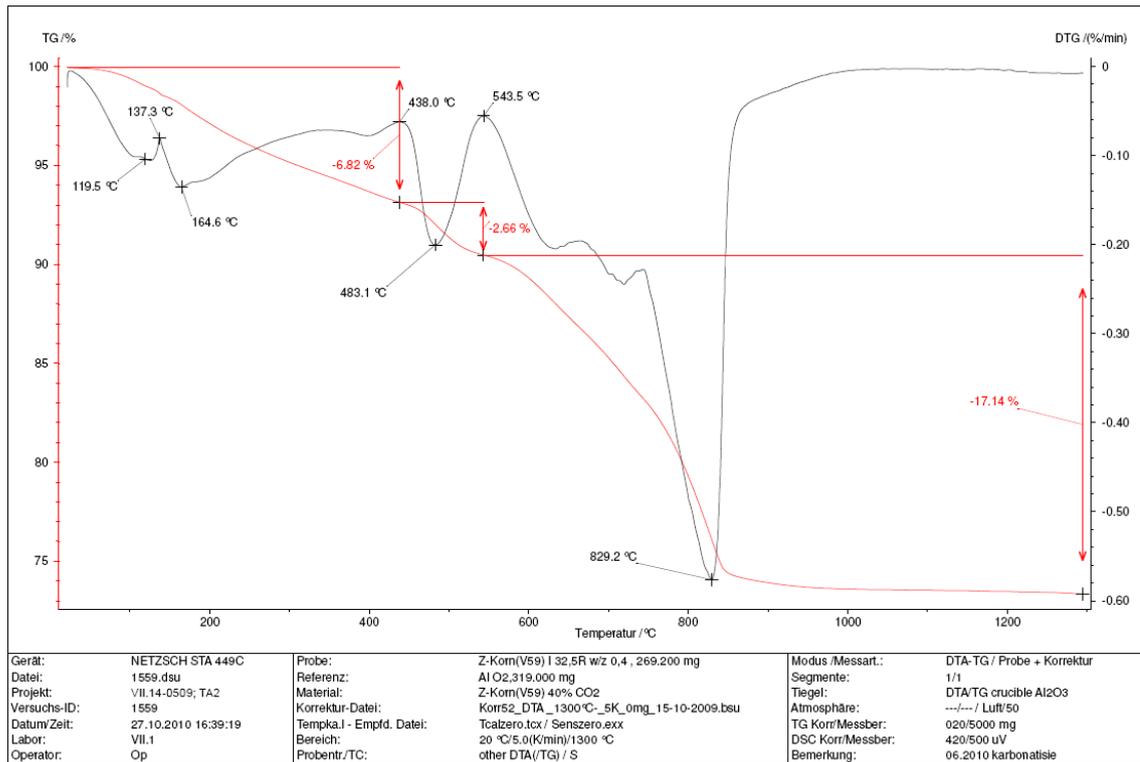


Bild A 25: Thermische Analyse von ZS-2/4 karbonatisiert bei 40 % CO<sub>2</sub> (V59)

Tabelle A 19: Ergebnisse der Thermoanalyse (TG/DTG) der ZS-Proben V00-V59

Probe		V00	V54	V55	V56	V57	V58	V59
CO <sub>2</sub> [%]		0	40	40	40	40	40	40
Zeit [h]		0	6	6	6	6	6	6
TG-Nr.		1553	1554	1555	1556	1557	1558	1559
TG-Stufe	T [°C]	20-431	20-440	20-438	20-437	20-443	20-444	20-438
	Δm [%]	11,49	8,04	7,35	7,26	7,25	6,16	6,82
DTG-Peak	T [°C]	160	166	169	165	164	197	164
TG-Stufe	T [°C]	431-594	440-565	438-564	437-542	443-554	444-558	438-544
	Δm [%]	5,44	3,77	3,80	3,37	3,22	2,77	2,66
DTG-Peak	T [°C]	499	498	495	489	500	496	483
TG-Stufe	T [°C]	594-1300	565-1300	564-1300	542-1300	554-1300	558-1300	544-1300
	Δm [%]	2,67	12,23	12,42	14,41	14,88	17,09	17,14
DTG-Peak	T [°C]	752	816	817	803	837	849	829
Gesamtverlust Δm [%]		19,6	24,04	23,57	25,04	25,35	26,02	26,62

Tabelle A 20: Massezunahme nach 6 h Bewitterung (V60)

CO <sub>2</sub> Konzentration	Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert	Masse nach Exsikkatorlagerung	Masse nach 6 h Bewitterung	Trockenmasse karbonatisiert	relative Massezunahme	relative Massezunahme auf das Glühbeständige	relative Massezunahme auf das Glühbeständige (Mittelwert)
[%]		[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
40 (V60)	1	4,925	5,450	6,125	5,549	0,624	15,00	14,93
	2	5,008	5,537	6,200	5,621	0,613	14,56	
	3	4,910	5,430	6,122	5,542	0,632	15,23	
	4	4,966	5,501		4,967	0,001	0,03	0,03

Tabelle A 21: Massezunahme nach 6 h Bewitterung (V61)

CO <sub>2</sub> Konzentration	Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert	Masse nach Exsikkatorlagerung	Masse nach 6 h Bewitterung	Trockenmasse karbonatisiert	relative Massezunahme	relative Massezunahme auf das Glühbeständige	relative Massezunahme auf das Glühbeständige (Mittelwert)
[%]		[g]	[g]	[g]	[g]	[g]	[%]	[%]
40 (V61)	1	4,945	5,462	6,113	5,532	0,587	14,18	14,27
	2	4,090	4,518	5,057	4,582	0,492	14,34	
	3	4,943	5,464	6,115	5,536	0,593	14,29	
	4	5,009	5,546		5,007	0	0	0

Tabelle A 22: Massezunahme nach 6 h Bewitterung (V62)

CO <sub>2</sub> Konzentration [%]	Probe	Trockenmasse nicht karbonatisiert [g]	Masse nach Exsikkatorlagerung [g]	Masse nach 6 h Bewitterung [g]	Trockenmasse karbonatisiert [g]	relative Massezunahme [g]	relative Massezunahme auf das Glühbeständige [%]	relative Massezunahme auf das Glühbeständige (Mittelwert) [%]
40 (V62)	1	4,978	5,529	6,221	5,642	0,664	15,73	15,74
	2	4,946	5,484	6,157	5,595	0,649	15,53	
	3	4,920	5,463	6,158	5,586	0,666	15,97	
	4	4,884	5,413		Trockenmasse nk nach Exsikkatorlagerung 4,899	0,015	0,36	0,36

## Versuchsergebnisse Modellbetone

Tabelle A 23: Massezunahme bezogen auf Zeit und CO<sub>2</sub> Konzentration

Würfel	Zeit [h]	Trockenmasse vor dem Versuch [g]	Trockenmasse nach dem Versuch [g]	Massezunahme [g]	relative Massezunahme [%]
<b>20 % CO<sub>2</sub></b>					
1	2	99,7	99,8	0,1	0,10
2	4	96,9	97,1	0,2	0,21
3	6	97,8	98,0	0,2	0,21
<b>40 % CO<sub>2</sub></b>					
4	2	92,0	92,3	0,3	0,33
5	4	93,6	94,0	0,4	0,43
6	6	92,4	92,9	0,5	0,54
<b>60 % CO<sub>2</sub></b>					
7	2	96,0	96,3	0,3	0,31
8	4	94,4	94,9	0,5	0,53
9	6	97,8	98,5	0,7	0,72
<b>80 % CO<sub>2</sub></b>					
10	2	90,1	90,4	0,3	0,33
11	4	85,0	85,5	0,5	0,59
12	6	88,3	89,1	0,8	0,91
<b>100 % CO<sub>2</sub></b>					
13	2	89,8	90,2	0,4	0,45
14	4	92,3	93,0	0,7	0,76
15	6	95,6	96,6	1,0	1,05

Tabelle A 24: Massezunahme bezogen auf die Zeit

Würfel	Zeit [h]	Trockenmasse vor dem Versuch [g]	Trockenmasse nach dem Versuch [g]	Massezunahme [g]	relative Massezunahme [%]
<b>60 % CO<sub>2</sub></b>					
7	2	96,0	96,3	0,3	0,31
8	4	94,4	94,9	0,5	0,53
9	6	97,8	98,5	0,7	0,72
16	24	102,7	104,2	1,5	1,46
17	48	92,2	93,9	1,7	1,84
18	72	86,9	88,9	2,0	2,30
24	120	100,4	103,3	2,9	2,89
25	144	104,0	106,3	2,3	2,21
26	168	93,6	96,3	2,7	2,88