

**Endbericht für ein Forschungsprojekt**  
gefördert durch die  
**DRES. EDITH UND KLAUS DYCKERHOFF-STIFTUNG**  
zum Thema  
**„CO<sub>2</sub>-Vermeidung bei der Zement- und Betonherstellung durch  
ein duales Closed-Loop-Recycling“**

Technische Universität Darmstadt

**Institut für Werkstoffe im Bauwesen (WiB)**

Prof. Dr.ir. Eddie Koenders (Institutsleiter)

Prof. Dr.-Ing. Albrecht Gilka-Bötzow (Projektleiter)

Franziska-Braun-Straße 3

64287 Darmstadt

Telefon: +49 6151 16 22219

Mail: [albrecht.gilka-boetzow@h-da.de](mailto:albrecht.gilka-boetzow@h-da.de)

Internet: [www.wib.tu-darmstadt.de](http://www.wib.tu-darmstadt.de)

**Projektbearbeitung WiB:**

Dr.-Ing. Sha Yang

M.Sc. Lisa Schiefer

M.Sc. Anna Menegazzi

B.Sc. Sven Böhm

## Zusammenfassung des Forschungsprojektes

Ziel des Vorhabens ist es, eine signifikante Reduktion von mindestens 30 % der Treibhauswirkung von zementgebundenen Hüllbauteilen für den Gebäudebau zu erreichen und diese vor allem auch bilanziell nachweisbar zu machen. Hierfür soll ein völlig neuer Ansatz für einen dualen komplett geschlossenen Wiederverwendungskreislauf verfolgt werden.

Exemplarisch wird ein ökologisches und leistungsfähiges Sandwichelement entwickelt und beforscht, das über eine Tragschicht aus Beton und eine Dämmschicht aus zementös mineralisiertem Schaum besteht. Das Bauteil soll modernem energieeffizientem Bauen genügen, zu einem Großteil aus Recyclingmaterial besteht und durch einen materialkonformen Aufbau sortenrein und vollständig wieder in den Stoffkreislauf zurückgeführt werden können sowie zudem nicht brennbar sein.

Die signifikante Minderung des Treibhauspotentials von zementgebundenen Baustoffen soll zum einen durch eine gezielte und dauerhafte CO<sub>2</sub>-Bindung in karbonatisierter rezyklierten Gesteinskörnung des Deckbetons erfolgen. Zum anderen sollen Techniken entwickelt werden, die es erlauben, die zementgebundene Dämmschicht an ihrem Lebensende vollständig in die Zementproduktion zurückzuführen.

Substanziell gliedert sich also das Projekt wie das angestrebte neuartige Beton-Sandwich-Bauteil in zwei Werkstoffe: Rezyklierten Beton und mineralisierter Schaum. Die jeweils relevanten Komponenten sollen insbesondere in Bezug auf die CO<sub>2</sub> vermeidenden Maßnahmen einzeln für sich sowie als Ganzes sowohl technisch als auch bilanziell im Form zweier paralleler geschlossener Stoffkreisläufe („Closed-Loops“) betrachtet werden.

**„1. Closed-Loop“ (Tragschicht)** Die für den Recycling-Beton zu verwendende rezyklierte Gesteinskörnung besteht im Normalfall zu einem Großteil aus Zementstein (zwischen ca. 40 % und 60 %). Dieser ist, da er meist aus dem Inneren abgebrochener Betonbauteile stammt, nicht oder zumindest nicht vollständig karbonatisiert. Im hier zu entwickelnden Beton soll in die Gesteinskörnung jedoch durch gezielte und definierte Exposition ein Maximum an CO<sub>2</sub> durch beschleunigte Karbonatisierung der anhaftenden Zementreste eingelagert werden. Wünschenswert ist eine direkte überkritische CO<sub>2</sub>-Beaufschlagung durch Industrieabgase. Auf diese Weise kann der Anteil des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes bei der Zementherstellung, der durch Entsäuerung des Kalksteins verursacht wurde, wieder vollständig ausgeglichen werden.

Zentrale Forschungsschritte zum Erreichen der Ziele ist das Finden eines chemischen Optimums für die CO<sub>2</sub>-Exposition der rezyklierten Gesteinskörnung zur effizienten Karbonatisierung. Die fertigen Betone müssen zudem auf ihre Leistungsfähigkeit untersucht werden. Im Fokus stehen dabei etwaige Effekte auf die Festigkeit sowie den pH-Wert des Betons. Die Durchführbarkeit des Ansatzes wird anhand eines Mockups des oben beschriebenen Bauteils demonstriert.

**„2. Closed-Loop“ (Dämmschicht)** Der für die Dämmung vorgesehene mineralisierte Schaum ist zementgebunden und weist darüber hinaus nur kleinere Anteile anderer mineralischer Stoffe auf. Ein klassisches „Beton“-Recycling ist aufgrund seines geringen mechanischen Widerstandes nicht möglich. Vielmehr soll dieser nahezu reine, aufgeschäumten Zementstein am Nutzungsende in gemahlener Form als Ausgangsstoff direkt in die Zementproduktion zurückgeführt werden. Im nicht karbonatisierten Zustand, wie es für feuchtegeschütztes Material im Inneren eines Sandwiches zu erwarten ist, liegt das Mahlgut bezogen auf Kalkmergel in einer höheren energetischen Form vor. Aus diesem Grund erfolgt für diese Material der CO<sub>2</sub>-Ausstoß während des Brennens durch die Kalksteinentsäuerung nicht mehr.

Die durchzuführende Forschung muss sich auf die chemische und mineralogische Analyse und Einschätzung der Ausgangsstoffe, Mahl- und Brennprodukte konzentrieren, um weitere Zusatzstoffe oder Maßnahmen zu identifizieren. Die Brennbarkeit dieser Rohmehle sowie die Leistungsfähigkeit der produzierten Zemente werden in den technischen Einrichtungen der TU Darmstadt im Labormaßstab erforscht und demonstriert.

## **Inhaltsübersicht**

### 1 Erster Closed-Loop

- a) Herstellen von repräsentativer R-Gesteinskörnung
- b) Strukturelle und mineralische Analyse der R-Gesteinskörnung
- c) Entwicklung geeigneter Auslagerungstechniken
- d) Entwicklung effizienter und leistungsfähiger Mischungsentwürfe
- e) Analyse der Dauerhaftigkeit
- f) Modellierung der Dauerhaftigkeit
- g) Herstellung des Recycling-Betons
- h) Erstprüfung des Betons
- i) Herstellung eines Beton-Beton-Sandwichbauteils

### 2 Zweiter Closed-Loop

- a) Optimierung des Mischungsentwurfes des mineralisierten Schaums
- b) Re-Kalzinierung des hydratisierten, nicht-karbonatisierten Zementsteins

### 3 Ganzheitliche Analyse

- a) Zieldefinition und Untersuchungsrahmen
- b) LCA: Stoffkreislauf Sandwichelement
- c) LCA: Stoffkreislauf RC-Beton
- d) LCA: Stoffkreislauf des mineralisierten Dämmschaum
- e) Wirkungsabschätzung
- f) Auswertung der Ökobilanzierung

### 4 Fazit

## **Sachstand**

### **1 Erster Closed-Loop**

#### **a) Herstellen von repräsentativer R-Gesteinskörnung**

##### ***Herkunft der Altbetone***

Für die Herstellung und Analyse der Recycling-Gesteinskörnung wurde Altbeton verschiedenen Ursprungs verwendet. Zum einen wurden Betonproben der Firma Zuber Betonwerk GmbH & Co. kg mit Sitz in Crailsheim zur Verfügung gestellt. Die Betonproben entstammen der Produktion und sind in Abbildung 1 exemplarisch dargestellt. Bei den Bauteilen handelt es sich um unterschiedliche Mischungen aus reinem Portlandzement und Kalksteinmehl sowie verschiedenen Korngrößen der Gesteinskörnung. Der Vorteil besteht darin, dass die Mischungsentwürfe der einzelnen Betone bekannt sind. So können die Ergebnisse der Analysen konkret auf die Bestandteile des Betons zurückgeführt werden.



*Abbildung 1: Betonproben*

Zum anderen wurde rezyklierte Gesteinskörnung aus einer abgebrochenen Brückenkappe gewonnen (Abbildung 2). Die Brücke befand sich in der Gemarkung Lämmerspiel im Landkreis Offenbach südöstlich von Frankfurt am Main. Das Brückenbauwerk überführte die Kreisstraße K191, von Obertshausen kommend in Richtung Lämmerspiel, über die Bundesstraße B448. Das Bauwerk wurde im Jahre 1977 als 2-stegige Spannbetonplattenbrücke als Durchlaufträger über zwei Felder hergestellt. Die Gesamtbreite betrug 14,00 m und die Gesamtlänge 50,94 m. Die Herstellung der rezyklierten Gesteinskörnung beschränkte sich auf die Brückenkappen. Diese bestanden aus einem Stahlbeton C 25/30-LP mit hohem Frost- und Tausalz widerstand der Expositionsklassen XC4/XD3/XF4/WA, Mindestluftporengehalt nach ZTV-ING 3-1, Tab. 3.1.1, max.  $w/z = 0,50$ .



*Abbildung 2: Abbruch der Brückenkappe.*

Der Beton, die Bewehrung und die Querfugen der Kappen wurden erschütterungsarm mit Kleingerät (Minibagger) abgebrochen. Erforderliche Trennschnitte zum schonenden Abbruch

der Kappe waren ein Längsschnitt ca. 5 cm von der Außenkante des Kragarmes in Richtung Bauwerk mit einer Schnitttiefe bis ca. 2 cm oberhalb des Kragarmes, Querschnitte im Abstand von ca. 2 m und Horizontalschnitte im Gesims in Höhe der Oberkante der Kragplatte. Das Abbruchgut wurde im Anschluss an die Südthessische Wertstoffrückgewinnungs GmbH in Messel geliefert. Eine Separierung des Betons war nicht notwendig. Nachteil an der Verwendung eines solchen Betons für die Laboruntersuchungen ist das Fehlen des originalen Mischungsentwurfs, was die Auswertung der Analysen erschwert. Jedoch kann durch die Verwendung eines über 40 Jahre alten Betons das reale Verhalten einer RC-Gesteinskörnung betrachtet werden.

Die Kombination aus im Werk hergestellten Betonbauteilen und realem Abbruch ermöglicht eine umfangreiche Analyse unter Betrachtung aller wesentlichen Aspekte.

### **Aufbereitung**

Die Zerkleinerung des Altbetons aus Betonwerk und Brücke erfolgte analog. Eine stationäre Brecheranlage mit Lesehaus und zwei nachgeschalteten Siebanlagen garantieren einen hohen Mengendurchsatz sowie eine konstante Qualität der Produkte (Abbildung 3).



*Abbildung 3: Anlage SHW Messel.*

Das Material wurde zwischen einer schwingenden Brechplatte und einer fest stehenden Druckplatte in einem sich verengenden Spalt zermahlen. Mithilfe der Frequenz der Brechplatte und der Einstellung des Brechspaltes lässt sich die Korngröße variieren. Der zerkleinerte Bauschutt wird unter dem Brecher von einem Transportband aufgenommen. Manuelle und maschinelle Sortierbereiche ermöglichen eine fremdstofffreie Gesteinskörnung. Durch Magnetabscheider werden Eisenmetalle aussortiert. Die nachgeschaltete Siebanlage ermöglicht eine Sortierung der Gesteinskörnung in die Korngruppen 0/2, 2/8 und 8/16 (Abbildung 4).



Abbildung 4: Korngruppen 0/2 (links), 2/8 (Mitte) und 8/16 (rechts).

## b) Strukturelle und mineralische Analyse der R-Gesteinskörnung

Im Anschluss an das Brechen wurde die RC-Gesteinskörnung an die TU Darmstadt transportiert. Die aufbereiteten Betonproben dienen für den zu entwickelnden Recycling-Beton als Gesteinskörnung und wurden bezüglich ihrer Eigenschaften mikrostrukturell analysiert. Nur durch ein genaues Kenntnis der Ausgangsstoffe ist die Entwicklung einer qualitativ hochwertigen RC-Gesteinskörnung zur gezielten CO<sub>2</sub>-Bindung im Beton-Sandwich möglich.

### **Korngrößenverteilung**

Für die Bestimmung der Korngrößenverteilung der Gesteinskörnung wurde die Siebanalyse DIN EN 933-1 mithilfe eines Siebturms durchgeführt. Die Prüfung besteht im Aufteilen und Trennen der Körnung in unterschiedliche Klassen (Abbildung 5). Die kumulativ erhaltenen Anteile werden graphisch in einer Sieblinie dargestellt.

Zu Beginn wurde die Probe bei einer Temperatur von 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet und anschließend die Gesamt-Trockenmasse ( $M_1$ ) gewogen. Das Material ist in den Siebturm zu schütten. Der Siebturm wurde mithilfe der Vibrations-siebmaschine „AS 200 basic“ der Firma Retsch gerüttelt. Insgesamt wurde eine Siebzeit von 15 Minuten angesetzt, in der über eine Dauer von 10 Minuten bei 40 % der Amplitude und 5 Minuten bei 60 % der Amplitude gesiebt wurde. Anschließend waren die Analysensiebe nacheinander, mit der größten Öffnungsweite beginnend, abzunehmen und von Hand nachzusieben. Hierbei musste darauf geachtet werden, dass kein Probenmaterial verloren geht und der zusätzliche Durchgang in das nächst kleinere Sieb überführt wurde.

Der Rückstand  $R_i$ , der auf den Sieben der verschiedenen Maschenweiten verblieb, war zu wägen und zu notieren. Anhand dieser Ergebnisse konnten die prozentualen Rückstände sowie Durchgänge berechnet werden.



Abbildung 5: Siebturm.

### **Menge des anhaftenden Zementsteins**

Die Menge des anhaftenden Zements an der RC-Gesteinskörnung beeinflusst die Eigenschaften dieser erheblich. Der Zementgehalt hängt dabei von mehreren Faktoren ab, wie z.B. von den Verarbeitungsverfahren, der ursprünglichen Betonmischung und der Partikelgröße. Das Hauptproblem besteht darin, die Gesamtmenge des beigefügten Zementsteins zu bestimmen. Bislang wurde noch keine Standardmethode für diese Messung definiert. Eine gängige Methode zur Bestimmung des Zement-Gehalts ist die Behandlung mit einer Lösung aus Salzsäure (Abbildung 6). Diese Methode konzentriert sich auf die Säureauflösung des Zementsteins als Mittel zur Trennung der ursprünglichen Gesteinskörnung vom alten anhaftenden Zement. Auch im vorliegenden Fall wurde der Zementgehalt in den einzelnen Fraktionen der RC-Gesteinskörnung durch die Lagerung in Salzsäure bestimmt. Für den Versuch wurden Stücke, der im Ofen bei 105 °C getrockneten Proben in einer Glasschale platziert. Anschließend wurde mithilfe einer Pipette eine 37 %ige-Salzsäure über die Gesteinskörnung gegeben. Um ein Ausgasen der Säure zu verhindern, sind die Schalen abzudecken.



Abbildung 6: Lagerung in Salzsäure.

Wird nun das Gewicht der übriggebliebenen Gesteinskörnung gemessen und mit der Probenmasse zu Beginn des Versuchs verglichen, kann eine Aussage über den Anteil an anhaftendem Zementstein für die jeweiligen Kornfraktionen getroffen werden. Für den Brückenbeton sind die Anteile jeweils für jede Korngruppe in Tabelle 1 dargestellt.

*Tabelle 1: Massenverlust durch Säurelagerung (Brückenkappe)*

Probe	$m_{\text{vor}}$ [g]	$m_{\text{nach}}$ [g]	Massenverlust [g]	Massenverlust [%]
0/2	8,39	2,98	5,41	64,48
2/8	17,65	8,60	9,05	51,27
8/16	25,67	17,83	7,84	30,54

Die Menge des anhaftenden Zementgehalts beträgt wie im Projektantrag vermutet im Mittel ca. 30 % - 55 %. Dies bestätigen auch Nagataki et al. (2004) und Gokce et al. (2004), die ebenfalls den Zementgehalt mittels Salzsäure-Auflösung bestimmt haben.

### **Wasseraufnahme**

Der Zementstein reichert sich verstärkt im Brechsand an. Je feiner die Kornfraktion, umso höher der anhaftende Anteil an altem Zementstein. Des Weiteren bewirkt die Feinheit der Gesteinskörnung einen Anstieg der Wasserabsorption. Dies wird anhand der Wasseraufnahme nach 10 Minuten gemäß DAfStb deutlich. Zunächst wird die Gesteinskörnung bei 105 °C bis zu Massenkonstanz getrocknet und anschließend in einem Exsikkator auf Raumtemperatur (20 °C) abgekühlt, um die Trockenmasse ( $m_{g,od}$ ) zu bestimmen. Daraufhin lagert die Probe für 10 Minuten unter Wasser und wird mit einem schwach feuchten Baumwolltuch abgetrocknet, bis die Oberfläche mattfeucht erscheint. Im Anschluss wird wiederum die Masse der Probe ( $m_f$ ) bestimmt. Die Wasseraufnahme (W) resultiert dabei aus der Gleichung

$$W = \frac{m_f - m_{g,od}}{m_{g,od}} \cdot 100$$

Für die Gesteinskörnung, welche aus der alten Brückenkappe gewonnen wurde, ergab die Untersuchung der Wasseraufnahme nach 10 Minuten sowie die Bestimmung der Rohdichte nach DIN 1097-6 folgenden Ergebnisse.

*Tabelle 2: Wasseranspruch und Rohdichte (Brückenkappe)*

Probe	$m_{g,od}$ [g]	$m_f$ [g]	W [%]	$\rho_{rd}$ [kg/dm <sup>3</sup> ]
0/2	627,23	688,54	9,77	2,92
2/8	752,62	784,58	4,25	2,76
8/16	753,65	773,7	2,66	2,71

Die feineren Fraktionen, welche eine erhöhte Menge an anhaftendem Zementstein aufweisen besitzen demnach auch eine erhöhte Porosität. Darüber hinaus ist festzuhalten, je feiner die Gesteinskörnung, desto höher die Wasseradsorption dieser Kornfraktion.

Weitere Aussagen über die Porosität und die Porengrößenverteilung lassen sich mithilfe der Quecksilberdruckporosimetrie (MIP) treffen. Das MIP (mercury intrusion porosimeter) basiert auf dem Prinzip der druckabhängigen Quecksilberintrusion. Für die Untersuchung, in Anlehnung an die Vorgehensweise in DIN 66133, werden Stücke aus der RC-Gesteinskörnung verwendet. Diese sind zunächst bei 105 °C im Ofen bis zur Massenkonstanz zu trocknen.

Die Druckprüfung wird in zwei Teilen, mit dem Niederdruckgerät „Pascal 140“ und dem Hochdruckgerät „Pascal 440“ von Porotec, durchgeführt (Abbildung 7). Dabei werden Porengrößen von 1,8 nm bis 300 µm erfasst. Mit Hilfe des „Pascal 140“ wird die Probe in einem Dilatometer bei einem max. Druck von 140 MPa für die Porosimetrie vorbereitet. Die RC-Gesteinskörnung wird hierbei entgast und mit Quecksilber beschichtet. Zudem wird die Niederdruckporosimetrie durchgeführt, welche sehr große Poren und Partikel misst. Nach der Nie-

derdruckmessung wird das Dilatometer in das Hochdruckgerät überführt, welches die Porosimetrie bei max. 400 MPa ausführt. Mithilfe dieses hohen Drucks werden auch sehr kleine Poren detektiert. Die Oberflächenspannung des Quecksilbers liegt bei 0,48 N/m bei einer Prüftemperatur von 25,4 °C. Für die Versuchsreihe wird ein Kontaktwinkel von 125° zwischen dem Quecksilber und der Porenwand definiert. Dieser Winkel wird durch die Zusammensetzung des Zements und der Gesteinskörnung, der Charakteristik der Poren und dem verwendeten Quecksilber beeinflusst [1].



Abbildung 7: Pascal 140 & Pascal 440.

Der Vergleich zwischen der RC-Gesteinskörnung der Korngruppen 4/8 und 8/16 des Brückenbetons bestätigt die Aussagen, welche durch die vorangegangenen Versuche getroffen wurden (Abbildung 8).

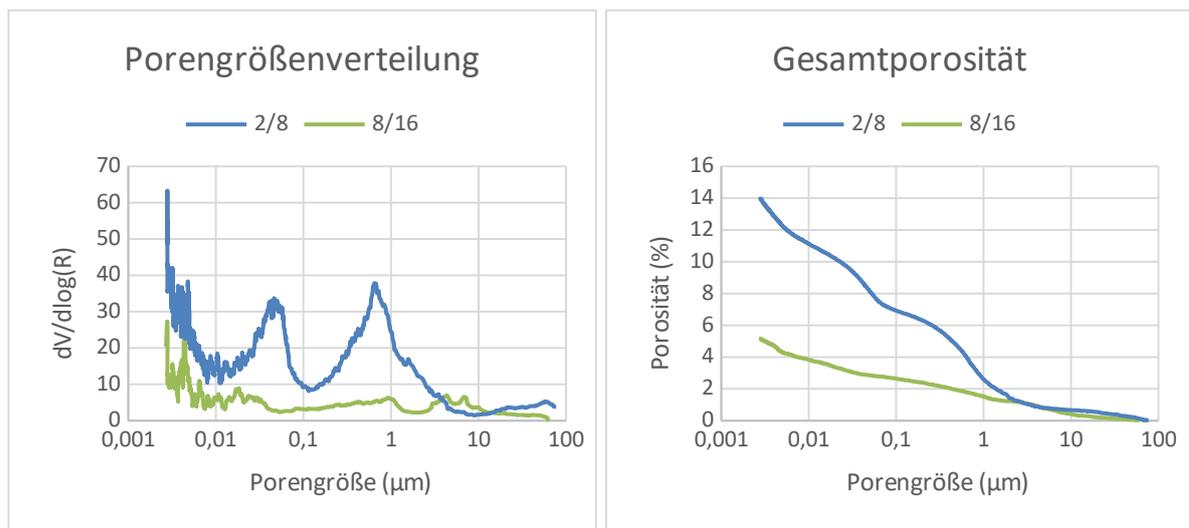


Abbildung 8: MIP für RC-Gesteinskörnung aus Brückenkappe.

Die Porosität der RC-Gesteinskörnung wird durch die Zusammensetzung beeinflusst. Purer Zementstein hat eine Porosität von 50 %. Dieser Wert wird durch die Zugabe von dichtem Zuschlag (z.B.  $\Phi_{\text{Granit}} = 0,2 - 1,5 \%$ ) reduziert. Normalbeton hat eine Gesamtporosität von ca. 10 - 15 %. Der erhöhte Anteil an anhaftendem Zementstein der Korngruppe 4/8 gegen-

über der Fraktion 8/16 spiegelt sich in der Gesamtporosität wieder. Während die RC-Gesteinskörnung mit einem Größtkorn von 16 mm eine Porosität von ca. 5,2 % aufweist, besitzt die recycelte Gesteinskörnung der Größe 4/8 eine Gesamtporosität von 14,1 %. Vor allem der Anteil an Kapillarporen ist bei der feineren Kornfraktion deutlich ausgeprägt. Kapillarporen bilden sich, wenn Wasser, das nicht für die Zementhydratation benötigt wird, in den Zwickelbereichen der hydratisierten Zementpartikel zurückbleibt. Die ca. 10 nm bis 100 µm großen Poren ermöglichen die kapillare Aufnahme von Wasser. Sie beeinflussen somit die Kapillarität, die Permeabilität, die Festigkeiten und das Schwinden des zementgebundenen Materials. Diese erhöhte Wasseradsorption war bereits bei der Wasseraufnahme nach 10 Minuten zu erkennen.

### c) Entwicklung geeigneter Auslagerungstechniken

Zur Herstellung des Recycling-Betons für das Beton-Sandwich soll rezyklierte Gesteinskörnung verwendet werden, welche zuvor in einem neuen Verfahren ausgelagert wird, um erhebliche CO<sub>2</sub>-Mengen durch sog. Karbonatisierung gezielt zu binden. Auf diese Weise kann der Anteil des CO<sub>2</sub>-Austoßes bei der Zementherstellung, der durch die Entsäuerung des Kalksteins verursacht wird, vollständig ausgeglichen werden. Dies erfolgt am besten direkt an den Produktionsstandorten der Elemente. Hier kann ausgestoßenes CO<sub>2</sub> - etwa aus der oft üblichen Wärmebehandlung von Fertigteilen - in die geeignet exponierte Recycling-Gesteinskörnung eingelagert werden. So wird aktiv und lokal zur Verringerung des Treibhauspotentials beigetragen.

Die für den RC-Beton zu verwendende RC-Gesteinskörnung besteht im Durchschnitt zu 40 % bis 60 % aus Zementstein. Dieser ist, da er meist aus dem Inneren abgebrochener Betonbauteile stammt, nicht oder zumindest nicht vollständig karbonatisiert und kann weiterhin CO<sub>2</sub> aufnehmen (siehe nachfolgende vereinfachte Carbonatisierungsgleichung). Es handelt sich dabei aufgrund der CO<sub>2</sub>-reichen Atmosphäre um einen ständig stattfindenden Prozess.



#### **Karbonatisierungspotential**

Der Phenolphthaleintest nach DIN EN 12390-10 zeigt das Potential der nachträglichen Karbonatisierung. Dabei wird die Phenolphthaleinlösung auf die frische Betonbruchfläche gesprüht. Unkarbonatisierte Bereiche (pH > 12,6) färben sich kräftig violett, karbonatisierte Bereiche (pH < 9) bleiben dagegen farblos. Auch nach über 40 Jahren ist der Beton der Brückenkappe nicht vollständig karbonatisiert. Die RC-Gesteinskörnung, welche mithilfe einer Brecheranlage hergestellt wurde, verfärbt sich stark violett, was einem pH-Wert > 12,6 entspricht (Abbildung 9).



Abbildung 9: Phenolphthaleintest der frisch gebrochenen RC-Gesteinskörnung aus Brückenkappe.

### **Thermogravimetrische Bestimmung des CO<sub>2</sub>-Aufnahme**

Im vorliegenden Projekt wurde der Karbonatisierungsfortschritt neben dem Phenolphthaleintest auch mittels TGA überwacht. Bei der thermogravimetrischen Analyse (TGA) kann die Massenänderung eines Stoffs in Abhängigkeit von Temperatur und Zeit gemessen werden. Dazu wird eine Probe in einem Ofen erhitzt, während ein Schreiber das Gewicht und die Temperatur aufnimmt. Die Heizrate wird in Kelvin pro Minute gezählt und kann entweder konstant steigend, stufenweise isotherm oder vollständig isotherm sein. Die erste zeitliche Ableitung der thermogravimetrischen Kurve hilft, die verschiedenen Reaktionsprozesse getrennt voneinander zu betrachten und die Start- und Endtemperatur der einzelnen Reaktionen zu identifizieren.

Die TGA von Zementsteinproben ergibt unterschiedliche Temperaturbereiche, in denen die verschiedenen Bestandteile zersetzt werden. Im Bereich unter 105 °C, also noch während der Ofentrocknung, entweicht das Kapillarwasser. Ab 100 °C bis etwa 600 °C entweicht dann das chemisch gebundene Wasser. Das Calciumhydroxid zersetzt sich in einem Temperaturbereich von 400 °C bis 500 °C und das Calciumcarbonat zwischen 600 °C und 800 °C. Die Massenänderung des Calciumhydroxids und des Calciumcarbonats können dabei relativ zuverlässig isoliert von anderen Prozessen bestimmt werden, da sie gesondert von der Massenänderung der anderen Phasen auftreten [2].

Mittels der thermogravimetrischen Ergebnisse und der Molmassen der einzelnen Stoffe lässt sich auch der Anteil des Calciumhydroxids und Calciumcarbonats an der gesamten Zementsteinmasse berechnen. Calciumhydroxid gibt bei seiner Zersetzung Wasser ab und wird zu Calciumoxid. Calciumcarbonat wird ebenfalls zu Calciumoxid, gibt aber bei seiner Zersetzung Kohlenstoffdioxid ab. Die Molmassen von Calciumhydroxid, Calciumcarbonat, Kohlenstoffdioxid und Wasser sind jeweils 74, 100, 44 und 18 Gramm pro Mol. Der Massenanteil von Calciumhydroxid bzw. Calciumcarbonat an der Gesamtmasse kann mithilfe folgender Gleichung berechnet werden

$$m = \Delta m \cdot \frac{M_1}{M_2}$$

Wobei:

m	Massenanteil des Stoffs an der Gesamtmasse [%]
$\Delta m$	Massenänderung gemessen in TGA [%]
$M_1$	Molmasse des zersetzten Stoffes [g/mol]
$M_2$	Molmasse der flüchtigen Komponente [g/mol]

Im hier zu entwickelnden Beton soll in die Gesteinskörnung durch gezielte und definierte Exposition ein Maximum an CO<sub>2</sub> durch beschleunigte Karbonatisierung der anhaftenden Zementreste eingelagert werden. Bestenfalls ist der Betonschutt gebrochen an der Luft zu lagern, um ihm die Möglichkeit zu geben möglichst viel CO<sub>2</sub> aufzunehmen. Dieses Ansinnen ist jedoch aufgrund des Platzbedarfs und der an der Luft immer noch sehr langsam ablaufenden Karbonatisierungsreaktion wirtschaftlich nicht attraktiv. Besteht jedoch eine wirtschaftlich und bilanziell sinnvolle Anwendung, wie sie das Beton-Sandwich darstellt, hat die CO<sub>2</sub>-Sequestrierung in RC-Beton großes Potential.

Da die geplante Art der Auslagerung der rezyklierten Gesteinskörnung nach aktuellem Kenntnisstand einen völlig neuartigen, innovativen Ansatz im Bauwesen repräsentiert, ist es notwendig, umfassende Analysen durchzuführen. Hierfür wurden Versuche in einem speziellen Klimaschrank ICH C mit Kompressorkühlung, Feuchteregulierung und CO<sub>2</sub>-Begasung der Firma Memmert durchgeführt. Die Klimakammer ermöglicht einen Einstelltemperaturbereich von +10°C bis +50°C, einen Einstellbereich der Feuchte von 10 %RH bis 80 %RH und eine Einspeisung von CO<sub>2</sub> von 0 % bis 20 %. Dadurch ist es möglich, Entwicklungen unter gewissen Umgebungsbedingungen beschleunigt zu betrachten.

In der speziellen Klimakammer ICH H werden unterschiedliche Umgebungsbedingungen (Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit (RH), CO<sub>2</sub>-Einspeisung) eingestellt. Durch die Lagerung der RC-Gesteinskörnung in der Klimakammer wird die Auslagerung der RC-Gesteinskörnung simuliert und zusätzlich durch die erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration/CO<sub>2</sub>-Einspeisung beschleunigt, um anschließend mittels der TGA eine Aussage über den Anteil der chemischen Bindung an CO<sub>2</sub> treffen zu können. Die vorliegenden Proben der RC-Gesteinskörnung aus dem Brückenabbruch werden bei konstanten 20°C und 10 % CO<sub>2</sub>-Einspeisung in der Klimakammer gelagert.

Die Analyse der eingespeicherten CO<sub>2</sub>-Menge in der RC-Gesteinskörnung wird durch verschiedene Faktoren beeinträchtigt. Das herkömmliche Vorgehen besteht darin, den Zementstein von der Gesteinskörnung abzukratzen und zu mahlen. Anschließend wird dieser mittels TGA untersucht. Das Problem an dieser Methode ist jedoch, dass das Abschaben des Zementsteins lediglich oberflächlich möglich ist. Dies führt dazu, dass nur die obere Zementschicht, welche ohnehin bereits karbonatisiert ist betrachtet wird. Es kann somit keine Aussage über die Karbonatisierungstiefe getroffen werden.

Die hier verwendete Methode wählt einen anderen Ansatz, um die Menge an CO<sub>2</sub> welche in der RC-Gesteinskörnung eingespeichert wurde zu bestimmen. Die maximale Karbonatisierungsgeschwindigkeit von Beton stellt sich bei einer relativen Luftfeuchtigkeit von 60 bis 80 Prozent ein. Diese Werte repräsentieren mitteleuropäische Bedingungen. Die Randbedingungen der TGA werden variiert, um den daraus folgenden Einfluss auf das Karbonatisierungspotential zu diskutieren. Die Proben werden getrennt unter einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % und 75 % (65 %RH, 75 %RH) gelagert.

Für die TGA werden die Proben der RC-Gesteinskörnung nach der Lagerung in der Klimakammer mittels einer Kombination aus Kugel- und Schlagmühle zerkleinert und anschließend mit einem Mörser pulverisiert. Aus den Ergebnissen der TGA wird der Anteil an Calciumhydroxid und Calciumcarbonat der Proben in der Einheit Gramm pro 100 Gramm einer Probe berechnet. Die TGA wird für jeweils vier Proben (65 %RH, 75 %RH) vor der Lagerung, nach vier Wochen und nach acht Wochen Lagerung in der Klimakammer ICH H durchgeführt.

Der Vorteil an der Methode ist, dass die Gesteinskörnung als Ganzes betrachtet wird. So ist es möglich den Fortschritt der Karbonatisierung in die Tiefe des Gesteinskorns anhand der ansteigenden Menge an CO<sub>2</sub> zu beobachten. Die Verunreinigungen, welche aus der ursprüng-

lichen Gesteinskörnung resultieren sind für die einzelnen Untersuchungen konstant und können anschließend ausgeblendet werden.

In Tabelle 3 ist die berechnete Masse an Calciumhydroxid und Calciumcarbonat für jeweils vier Proben vor der Lagerung, nach einer Lagerungsdauer von vier Wochen und nach einer Lagerungsdauer von acht Wochen unter einer relativen Luftfeuchtigkeit von 65 % dargestellt und anschließend erläutert.

*Tabelle 3: Ca(OH)<sub>2</sub>- und CaCO<sub>3</sub>-Gehalt, 65%RH, Lagerungsdauer 0, 4 und 8 Wochen*

Probe	Ca(OH) <sub>2</sub>			CaCO <sub>3</sub>		
	[g/100 g Probe]					
Lagerungsdauer in Wochen	0	4	8	0	4	8
65-1	1,10	0,70	0,78	1,22	5,26	1,89
65-2	0,92	0,69	0,95	1,37	5,30	2,56
65-3	1,14	0,57	0,69	1,31	4,06	2,00
65-4	0,92	0,61	0,69	1,04	5,67	2,75

Es fällt auf, dass die Massenzunahme von Calciumcarbonat nach einer Lagerung von vier Wochen deutlich höher ist als die Massenzunahme von Calciumcarbonat nach acht Wochen. Zum Vergleich sind in Tabelle 6 die diese Werte für eine relative Luftfeuchtigkeit bei 75 % dargestellt.

*Tabelle 4: Ca(OH)<sub>2</sub>- und CaCO<sub>3</sub>-Gehalt, 75 %RH, Lagerungsdauer 0, 4 und 8 Wochen*

Probe	Ca(OH) <sub>2</sub>			CaCO <sub>3</sub>		
	[g/100 g Probe]					
Lagerungsdauer in Wochen	0	4	8	0	4	8
75-1	1,10	0,57	0,66	1,22	1,95	3,43
75-2	0,92	0,64	0,74	1,37	2,79	2,82
75-3	1,14	0,61	0,61	1,31	2,02	2,89
75-4	0,92	0,35	0,53	1,04	2,23	3,23

Laut den Versuchsergebnissen ist die Masse an Calciumcarbonat unter einer Luftfeuchtigkeit von 65 % für die Lagerung von vier Wochen im Vergleich mit einer relativen Feuchtigkeit von 75 % um das Drei- bis Vierfache höher, wobei der Massenverlust von Ca(OH)<sub>2</sub> für die unterschiedlichen Lagerungsbedingungen (65 %RH, 75 %RH) beinahe identisch sind. Für die Repräsentation plausibler Versuchsergebnisse werden im Folgenden die Massenunterschiede von Calciumcarbonat bei einer relativen Feuchtigkeit von 65 % nach einer Lagerung von acht Wochen verwendet.

Um die Versuchsergebnisse weiter zu diskutieren, werden die Massenunterschiede berechnet, dargestellt und anschließend erläutert. In Tabelle 5 sind die Mittelwerte für den Massenunterschied von Calciumhydroxid nach einer Lagerungsdauer von vier Wochen und der Massenunterschied von Calciumcarbonat nach einer Lagerungsdauer von acht Wochen für die vier untersuchte Proben (65 %RH) dargestellt. In Tabelle 6 sind die Mittelwerte für den Massenunterschied von Calciumhydroxid und Calciumcarbonat für vier untersuchte Proben (75 %RH) nach einer Lagerungsdauer von vier Wochen dargestellt.

Tabelle 5: Massenunterschiede  $\text{Ca(OH)}_2$  und  $\text{CaCO}_3$ , 65 %RH

Probe	Massenunterschied	
	$\text{Ca(OH)}_2$	$\text{CaCO}_3$
	[g/100 g Probe]	[g/100 g Probe]
65-1	- 0,40	1,89
65-2	- 0,23	2,56
65-3	- 0,57	2,00
65-4	- 0,31	2,75
Mittelwert	- 0,28	2,30

Tabelle 6: Massenunterschiede  $\text{Ca(OH)}_2$  und  $\text{CaCO}_3$ , 75 %RH

Probe	Massenunterschied	
	$\text{Ca(OH)}_2$	$\text{CaCO}_3$
	[g/100 g Probe]	[g/100 g Probe]
75-1	- 0,53	0,73
75-2	- 0,28	1,42
75-3	- 0,53	0,71
75-4	- 0,57	1,19
Mittelwert	- 0,48	1,01

Das negative Vorzeichen des Massenunterschiedes an Calciumhydroxid zeigt den Massenverlust an Calciumhydroxid. Durch die Karbonatisierung des anhaftenden Zementstein der RC-Gesteinskörnung reagiert Calciumhydroxid durch die chemische Bindung von  $\text{CO}_2$  zu Calciumcarbonat. Der positive Massenunterschied von Calciumcarbonat zeigt diese Massenzunahme an  $\text{CaCO}_3$ .

In Tabelle 5 (65 %RH) liegen die Massenunterschiede von Calciumhydroxid bei 0,23 g/100 g bis 0,57 g/100 g. In Tabelle 6 (75 %RH) liegen die Massenunterschiede von Calciumhydroxid bei 0,28 g/100 g bis 0,57 g/100 g. Die Werte liegen nahe bei einander und zeugen für eine Repräsentativität der Versuchsergebnisse. Das theoretische Karbonatisierungspotential der vorliegenden RC-Gesteinskörnung wird im Folgenden aus den Versuchsergebnissen an Hand des Massenunterschiedes von Calciumhydroxid berechnet. Um einen repräsentativen Mittelwert für die Berechnung des theoretischen Karbonatisierungspotential der RC-Gesteinskörnung zu verwenden, wird der Mittelwert mit der niedrigsten Streuung aus Tabelle 6 unter einer relativen Luftfeuchtigkeit von 75 % gewählt.

Die Ergebnisse aus der TGA streuen teilweise stark. Der Karbonatisierungsfortschritt der vorliegenden Proben lässt sich u.a. deshalb schwer abschätzen, da die Karbonatisierung in der äußeren Schicht des Betons stattfindet und der Beton im Inneren des Bauteils zum Zeitpunkt des Abbruchs nicht karbonatisiert vorliegt. Der Ursprung des Betonabbruchs/Altbetons der Brückenkappen ist nur bedingt bekannt. Es ist unbekannt, ob der Betonbruch aus randnahen Betonbauteile oder aus dem Inneren der Betonbauteile stammt. Aus diesem Grund ist die Homogenität der Probenmasse nur bedingt gewährleistet. Die Arbeit mit Betonabbruch im Gegensatz zu unter Laborbedingungen hergestellten Prüfkörpern bietet jedoch den Vorteil einer realen Betrachtung der derzeitigen Situation. Trotz der beschriebenen Streuungen ist das Potential zur  $\text{CO}_2$ -Einspeisung in 40 Jahre alten Brückenbeton deutlich erkennbar. Zusätzlich wird für eine präzisere Berechnung des Karbonatisierungsfortschritts der w/z-Wert des ursprünglichen Betons und somit der originale Mischungsentwurf benötigt. Nach Betrachtung und Abschätzung aller Versuchsergebnisse wird die Versuchs-

reihe der Probe 1 bis Probe 4 für die Randbedingungen 75 %RH, 0 Wochen und 4 Wochen für die folgenden Berechnungen verwendet. Im Folgenden wird aus den Mittelwerten dieser Versuchsergebnisse (siehe Tabelle 6) das theoretische Karbonatisierungspotential der RC-Gesteinskörnung berechnet.

### **Berechnung des theoretischen Karbonatisierungspotentials**

Vor der Berechnung des theoretischen Karbonatisierungspotentials wird der Einfluss der erhöhten CO<sub>2</sub>-Konzentration/CO<sub>2</sub>-Einspeisung während der Lagerung der Proben der fein aufgemahlene RC-Gesteinskörnung in der Klimakammer ICH H diskutiert.

Die Abhängigkeit des Karbonatisierungsfortschritts und der Karbonatisierungsgeschwindigkeit von der CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre und von der Zeit verläuft nicht linear. Durch das Umwälzen der RC-Gesteinskörnung während der Auslagerung zur CO<sub>2</sub>-Aufnahme soll eine gleichmäßige Karbonatisierung der exponierten RC-Gesteinskörnung erreicht werden, die in einem Betonbauteil nach Einbau nicht gegeben ist und bessere Bedingungen für die Karbonatisierung des Betons schafft.

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre wird als konstant angenommen und liegt bei 0,04 %, was umgerechnet etwa 0,8 g/m<sup>3</sup> Luft beträgt. In Abgasen kann der Gehalt an CO<sub>2</sub> der Umgebungsluft deutlich höher liegen. Bereits kleine Mengen an Abgasen erhöhen den CO<sub>2</sub>-Gehalt stark, sodass z. B. in Anlagen des Motorfahrzeugverkehrs wie Tunnel oder Garagen mit einer Erhöhung der CO<sub>2</sub>-Konzentration um 0,01 % gerechnet wird. Zusätzlich erhöht sich, durch die Erhöhung des CO<sub>2</sub>-Gehaltes der Luft, die Karbonatisierungsgeschwindigkeit [3]. Auf Grund des Standortes der SHW wird für die Auslagerung der RC-Gesteinskörnung eine erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration der Luft von 0,05 % angenommen. Auf Grundlage der Diffusionsgesetze lässt sich die Karbonisierungstiefe eines Bauteils in Abhängigkeit der CO<sub>2</sub>-Konzentration im Wurzelmaßstab darstellen [3]. Im Falle einer Schnellkarbonisierung zur Simulation der Auslagerungstechnik der RC-Gesteinskörnung in der Klimakammer erhöht sich die Karbonisierungsgeschwindigkeit bei einer CO<sub>2</sub>-Einspeisung von zehn Prozent um den Faktor  $\sqrt{200} = 14,142$ .

In Tabelle 7 sind die (Eingangs-) und Berechnungsgrößen für die Berechnung des theoretischen Karbonatisierungspotentials für die RC-Gesteinskörnung u. a. auf Grundlage der TGA-Ergebnisse dargestellt und anschließend in der Berechnung wiederzufinden.

*Tabelle 7: Berechnungsgrößen Karbonatisierungspotential*

Berechnungsgröße	Wert	Einheit
M <sub>Ca(OH)<sub>2</sub></sub> , Molare Masse an Ca(OH) <sub>2</sub>	74,09	g/mol
M <sub>CO<sub>2</sub></sub> , Molare Masse an CO <sub>2</sub>	44,01	g/mol
Massenunterschied Ca(OH) <sub>2</sub> , 75 %RH	4,78	g/100 g Probe
Anteil RC-GK in 1m <sup>3</sup> RC-Beton	1565,74	kg/m <sup>3</sup>
CO <sub>2</sub> -Gehalt (Klimakammer)	10,00	%
CO <sub>2</sub> -Gehalt (SHW-Messel)	0,05	%

Stöchiometrische Berechnungen:

$$\frac{M_{Ca(OH)_2}}{M_{CO_2}} = \frac{m_{Ca(OH)_2}}{m_{CO_2}} \rightarrow \text{Masse } CO_2 (m_{CO_2}) = 0,2839 \text{ g/100 g}$$

Umrechnung auf 1 m<sup>3</sup> RC-Beton:

$$2,839 \text{ g/kg} \cdot 1565,74 \text{ kg/m}^3 = 4445,51 \text{ g/m}^3$$

Theoretisches Karbonatisierungspotential unter Berücksichtigung der Effekte aus Schnellkarbonatisierung:

$$4445,51 \text{ g/m}^3 \div \sqrt{200} = 314,35 \text{ g/m}^3$$

Aus den Ergebnissen der Proben 1, 2, 3 und 4 ergibt sich ein mittlerer Massenunterschied von 4,8 g Calciumhydroxid pro 100 g einer aufgemahlene Probe der RC-Gesteinskörnung. Aus der stöchiometrischen Berechnung ergeben sich 2,8 g gebundenes CO<sub>2</sub> pro Kilogramm RC-Gesteinskörnung. Aus dem Mischungsentwurf und unter Berücksichtigung des Faktors der Schnellkarbonatisierung ergibt sich ein theoretisches Karbonatisierungspotential von etwa 315 g gebundenes CO<sub>2</sub> pro Kubikmeter RC-Beton durch die Auslagerungstechnik der RC-Gesteinskörnung.

Die vorliegenden Untersuchungen zeigen, dass mehrere Materialparameter einen Einfluss auf den Ablauf der Karbonatisierung haben. Diese Einflussfaktoren müssen identifiziert und quantifiziert werden, um eine geeignete Auslagerungstechnik zu entwickeln. Beispiele hierfür sind die CO<sub>2</sub>-Konzentration, die Feuchtigkeit und Temperatur sowie die Art des Zements.

Die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre ist besonders einflussreich, da sie seit dem Beginn der Industrialisierung exponentiell ansteigt. Das bedeutet, dass in Zukunft auch die Karbonatisierung minimal beschleunigt voranschreiten wird. So hat sich die CO<sub>2</sub>-Konzentration innerhalb der letzten 10 Jahre um durchschnittlich 2 - 3 ppm erhöht [4]. In der Nähe von Verkehrswegen und industriellen Betrieben ist ebenfalls eine erhöhte Menge an CO<sub>2</sub> nachweisbar [3].

Für die Reaktion von Calciumhydroxid zu Kalkstein wird neben Kohlenstoffdioxid auch Wasser benötigt. Da die CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Atmosphäre nahezu konstant ist, steuert die Menge an vorhandenem Wasser maßgeblich die Karbonatisierungsgeschwindigkeit. Die Umgebungsfeuchtigkeit besitzt dadurch eine der größten Einflüsse auf die Karbonatisierung. Bei einem zu niedrigen Feuchtegehalt steht nicht genug Wasser für die Reaktion zur Verfügung, das CO<sub>2</sub> kann sich nicht im Porenwasser auflösen und so auch nicht das Calciumhydroxid neutralisieren. Ein zu hoher Feuchtegehalt führt jedoch dazu dass eine Wasserschicht auf den Poren verhindert, dass CO<sub>2</sub> in den Porenraum eintritt. Das liegt daran, dass der Diffusionskoeffizient für CO<sub>2</sub> im Wasser im Gegensatz zu dem in der Luft vernachlässigbar gering ist. So lässt sich z.B. auch bei unter Wasser gelagerten Bauteilen effektiv keine Karbonatisierung feststellen. Zwischen diesen beiden Extremwerten liegt eine optimale relative Feuchtigkeit. Gehlen [5] definiert den Optimalwert mit 65 %RH. Stark und Wicht [3] sowie Lagerblad [6]grenzen den Bereich auf 60 %RH bis 80 %RH ein. Im Gegensatz dazu ist nach Papadakis [7] eine relative Feuchtigkeit von 50 %RH am effektivsten. Versuche zeigen, dass die Porosität der RC-Gesteinskörnung positiv mit der relativen Feuchtigkeit korreliert. Das liegt daran, dass der Kapillarraum einer feinporigen Zementmatrix vermehrt durch Wasser blockiert wird als der eines Betons mit größeren Poren.

Allgemein ist davon auszugehen, dass moderate Temperaturen keinen signifikanten Einfluss auf die Karbonatisierungstiefe haben. Eine erhöhte Temperatur verlangsamt zwar die Löslichkeit von Ca(OH)<sub>2</sub>, jedoch steigt dadurch die Molekülbewegung, was die Diffusion von CO<sub>2</sub> in den Zementstein begünstigt. Dementsprechend ist eine höhere Temperatur als karbonatisierungsfördernd zu beurteilen [3].

Bei der Karbonatisierungsreaktion wird Calciumhydroxid in Calciumcarbonat umgewandelt. Diese Verbindung entsteht im Beton hauptsächlich durch die Hydratisierung der Klinkerphasen Tricalciumsilikat (C<sub>3</sub>S) und Dicalciumsilikat (C<sub>2</sub>S). Die Reaktionsgeschwindigkeit der Kar-

bonatisierung hängt dabei von der Menge an vorhandenem Calciumhydroxid im Zementstein und dadurch auch von der Menge an C<sub>3</sub>S und C<sub>2</sub>S im Zement ab. Zemente mit einem niedrigen Klinkeranteil bilden weniger Calciumhydroxid und weisen dadurch höhere Karbonisierungstiefen auf als Zemente mit einem hohen Klinkeranteil. Im vorliegenden Fall werden RC-Gesteinskörnungen aus verschiedenen Zementarten hergestellt und die Karbonisierungsgeschwindigkeiten miteinander verglichen [8].

Insgesamt sind demnach ein hoher CO<sub>2</sub>-Gehalt der Luft, warme Temperaturen, eine erhöhte relative Luftfeuchtigkeit sowie eine hohe Porosität des Betons beschleunigende Einflussgrößen für die Karbonisierung. Dahingegen führen ein hoher Zementgehalt, dabei vor allem ein hoher Anteil an C<sub>3</sub>S und C<sub>2</sub>S, eine lange, feuchte Nachbehandlung sowie eine gute Verdichtung des Altbetons zur Verzögerung der Karbonisierung. Für die Entwicklung einer geeigneten Auslagerungstechnik sollten diese Aspekte berücksichtigt werden.

#### d) Entwicklung effizienter und leistungsfähiger Mischungsentwürfe

Normativ ist die Verwendung von RC-Gesteinskörnung auf einen Anteil von 35 Vol.-% des Gesamtvolumens des Zuschlags und eine Korngröße > 2 mm begrenzt. Um das Potential dieses innovativen Projektes vollkommen auszuschöpfen, wurden jedoch drei Mischungsentwürfe mit verschiedenen Anteilen an Recycling-Material entwickelt.

Der erste Mischungsentwurf ist ein normativ korrekter Beton (M-Norm). Die Fraktion 0/2 enthält vollständig Primärsand. Die Fraktion 2/8 besteht aus RC-Material und übersteigt einen Anteil von 35 Vol.-% nicht. Für den zweiten Mischungsentwurf (M-RC) wird für beide Fraktionen 0/2 und 2/8 ausschließlich RC-Gesteinskörnung verwendet. Der dritte Mischungsentwurf (M-50/50) entspricht M-Norm, jedoch besteht die feine Fraktion 0/2 zu 50% ebenfalls aus RC-Material.

Die Sieblinie aller Mischungen orientiert sich an der Sieblinie B8 mit einem k-Wert von 2,9 unter der Bedingung, dass die Fraktion 2/8 einen Anteil von 35 Vol.-% nicht überschreitet. Dieses Optimierungsproblem wird mit Hilfe eines Exceltools (Software „Excel Solver“) gelöst.

Hierzu sind zunächst die Sieblinien der zur Verfügung stehenden, ofentrockenen und massenkonstanten Korngruppen zu bestimmen. Dies umfasst die Recycling-Fraktionen 0/2 und 2/8 sowie die Fraktionen 0,1/0,5, 0,5/1, 1/2 des Primärsandes.

Anschließend wird der geforderte Siebdurchgang der Betonschicht für jede einzelne Maschenweite durch eine Kombination der Gesteinskörnungen optimiert. Ziel ist die Erreichung eines k-Wertes von 2,9. Dabei ist der Anteil der Fraktion 2/8 auf 35 Vol.-% zu begrenzen und die Summe aller Anteile von 100 Vol.-% zu erreichen.

Neben der Sieblinie ist der w/z-Wert ebenfalls ein Faktor, der durch die RC-Gesteinskörnung beeinflusst wird. Für Betonsplitt aus Altbeton ist die Wasserabsorption aufgrund des anhaftenden Mörtels erhöht. Aus diesem Grund ist die Saugfähigkeit der Gesteinskörnung bei der Bemessung des w/z-Wertes speziell zu berücksichtigen.

$$\left(\frac{w}{z}\right)_{eff} = \frac{w}{z} + \frac{w_{add}}{z} - \delta \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{p_i \cdot P_i}{z}\right)$$

Mit

w/z      nominaler w/z-Wert

w<sub>add</sub>/z      zusätzlich zugegebenes Wasser

δ relative Absorptionsgeschwindigkeit

p<sub>i</sub>      Wasseraufnahmekapazität der „i-ten“ Fraktion

P<sub>i</sub>      Trockenmasse der „i-ten“ Fraktion

Der nominale w/z-Wert beträgt 0,54. Dies begründet sich in einer angestrebten Konsistenzklasse von F3. Das zusätzlich benötigte Wasser ist abhängig von der Saugfähigkeit der rezyklierten Gesteinskörnung. Hierfür werden die Ergebnisse verwendet, die aus der Prüfung der Wasseraufnahme nach 10 Minuten resultieren. Um das stärkere Saugvermögen, in Abhängigkeit der Korngrößen der rezyklierten Gesteinskörnung zu berücksichtigen, muss die Wasseraufnahme der Gesteinskörnung getrennt nach Kornfraktionen erfolgen. In diesem Fall wird das zusätzliche Wasser im Zuge einer Vorsättigung der RC-Gesteinskörnung zugeführt. Dadurch lässt sich das zeitabhängige Saugen unterbinden und die anfänglich bestehende Gefahr der Entmischung, des Blutens und des verstärkten Frühschwindens begrenzen.

Für den Normbeton resultiert exemplarisch folgender Mischungsentwurf.

Tabelle 8: Mischungsentwurf M-Norm für die Brückenkappe.

Ausgangsstoffe							
	<b>Zement</b>	52,5 R CEM I					
		Druckfestigkeit	C30/37				
		Konsistenz	F3				
		$\rho_z =$	3,10	kg/dm <sup>3</sup>			
	<b>Wasser</b>	$\rho_w =$	1,00	kg/dm <sup>3</sup>			
		w/z =	0,54				
		<b>Gesteinskörnung</b>					
		$\rho_{g,0,1/0,5} =$	2,65	kg/dm <sup>3</sup>	→	13,79	Vol.-%
		$\rho_{g,0,5/1} =$	2,65	kg/dm <sup>3</sup>	→	38,32	Vol.-%
		$\rho_{g,1/2} =$	2,65	kg/dm <sup>3</sup>	→	12,89	Vol.-%
	$\rho_{g,2/8} =$	2,70	kg/dm <sup>3</sup>	→	35,00	Vol.-%	
Anteile							
		k =	2,90				
		w =	225,00	kg/m <sup>3</sup>			
		z =	416,67	kg/m <sup>3</sup>			
		p =	5,50	Vol.-%			
	$1000\text{dm}^3/\text{m}^3 = z/\rho_z + w/\rho_w + g/\rho_g + p$			→	$g/\rho_g = 1000\text{dm}^3/\text{m}^3 - (z/\rho_z + w/\rho_w + p)$		
		$g/\rho_g =$	585,59	kg/m <sup>3</sup>			
		$g_{0,1/0,5} =$	214,00	kg/m <sup>3</sup>			
		$g_{0,5/1} =$	594,65	kg/m <sup>3</sup>			
		$g_{1/2} =$	200,03	kg/m <sup>3</sup>			
		$g_{2/8} =$	553,38	kg/m <sup>3</sup>			
Massen							
		Menge =	0,50	m <sup>3</sup>	→	500,00	Liter
		w =	112499,99	g	→	112,50	kg
		z =	208333,31	g	→	208,33	kg
		$g_{0,1/0,5} =$	107000,32	g	→	107,00	kg
		$g_{0,5/1} =$	297327,41	g	→	297,33	kg
		$g_{1/2} =$	100012,89	g	→	100,01	kg
		$g_{2/8} =$	276691,95	g	→	276,69	kg
	<b>Zusatzwasser</b>						
	$w_{2/8} =$	5,53	kg	→	2,00	%	

### e) Analyse der Dauerhaftigkeit

Die Analyse und Modellierung der Dauerhaftigkeit orientiert sich an den Expositionsklassen für Beton. So umfasst sie sowohl die Prüfung des Frost-Tausalz-Widerstands und der Wasserreindringtiefe unter Druck als auch die Bestimmung des relativen Karbonatisierungswiderstandes und des Chloridwiderstandes des Betons.

Zur Bestimmung des Frost-Tausalz-Widerstands gegen Abwitterung der Betonoberfläche wird das CDF-Verfahren angewendet. Hierfür steht die Frost-Tau-Truhe und Zubehör für CDF-Versuche nach RILEM zur Verfügung. Dazu werden in einer Prüfflüssigkeit gelagerte Probekörper definierten, zyklischen Frost-Tau-Beanspruchungen ausgesetzt. In regelmäßigen Abständen erfolgt eine Bestimmung der äußeren Schädigung (Wägung des abgewitterten Materials) und der inneren Schädigung (Messung der Ultraschalllaufzeit durch die Probekörper).

Die Verwendung von Betonbrechsand führt zu einer Verringerung des Frost-Tausalz-Widerstandes der geprüften Betone. In Tabelle 9 bzw. 10 sind die Prüfergebnisse des Frost-Tausalz-Widerstandes gegenübergestellt. Die flächenbezogene Abwitterung der Betone mit Betonbrechsandanteil, ist jeweils höher als beim Referenzbeton RC N. Hierbei liegen die Betone RC 100 bzw. RC 50/50 um 0,542 kg/m<sup>2</sup> (75,91 %) bzw. 0,932 kg/m<sup>2</sup> (130,53 %) über der flächenbezogenen Abwitterung des Referenzbetons.

Die massenbezogene Abwitterung (Masse des abgewitterten Materials im Verhältnis zur Masse des ungesättigten Probekörpers) beträgt im Mittel 0,85 % für den Beton RC 100, 1,09 % für den Beton RC 50/50 sowie 0,45 % für den Beton RC N.

Tabelle 9: Gegenüberstellung - Frost-Tausalz-Widerstand Vergleich mit Referenzbeton.

Beton	m <sub>s,28</sub> i.M. [g]	m Probekörper ungesättigt i.M. [g]	massenbezogene Abwitterung [%]	Zunahme S <sub>28</sub> gegenüber RC N	
				[kg/m <sup>2</sup> ]	[%]
RC 100	28,26	3308	0,85	0,542	75,91
RC 50/50	37,03	3400	1,09	0,932	130,53
RC N	16,05	3586	0,45	Referenz	

Im BAW-Merkblatt - Frostprüfung von Beton [9] der Bundesanstalt für Wasserbau ist als Abnahmekriterium eine mittlere Abwitterung ≤ 1500 g/m<sup>2</sup> nach 28 Frost-Tau-Wechseln definiert. Dieser Grenzwert wird von den Betonen RC 100 sowie RC N eingehalten. Der Beton RC 50/50 überschreitet den Grenzwert um 9,73 %. Der Beton RC-N weist dahingehend die höchste Leistungsfähigkeit auf und unterschreitet den geforderten Grenzwert um 52,40 %. Zieht man diesen Grenzwert zur Bewertung der Dauerhaftigkeit heran, weisen die Betone RC 100 sowie RC N eine ausreichende Dauerhaftigkeit bei Frost-Tausalz-Beanspruchung auf.

Tabelle 10: Gegenüberstellung - Frost-Tausalz-Widerstand Vergleich mit Grenzwert.

Beton	m Probekörper i.M. [kg]		Δ m, Sättigung i.M.		S <sub>14</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	S <sub>28</sub> [kg/m <sup>2</sup> ]	Abweichung von Grenzwert S <sub>28</sub> = 1,500 kg/m <sup>2</sup>	
	ungesättigt	gesättigt	[g]	[%]			[kg/m <sup>2</sup> ]	[%]
RC 100	3,308	3,331	22,30	0,67	0,591	1,256	-0,244	-16,26
RC 50/50	3,400	3,414	14,60	0,43	0,395	1,646	+0,146	+9,73
RC N	3,586	3,595	9,40	0,26	0,174	0,714	-0,786	- 52,40

Vor Beginn der Frost-Tau-Zyklen, wurden die Probekörper zur kapillaren Flüssigkeitsaufnahme in einer Natriumchloridlösung vorgesättigt. Dabei nahmen die Probekörper des Betons RC 100 im Mittel 22,30 g (0,67 %) ihrer Ausgangsmasse zu. Für den Beton RC 50/50 lag die Massenzunahme der Probekörper bei 14,60 g (0,43 %). Die Probekörper des Referenzbetons RC N wiesen nach der Sättigung eine mittlere Massenzunahme von 9,40 g (0,26 %) auf. In Abb. 10 ist die Massenzunahme der Probekörper nach der Sättigung dargestellt.

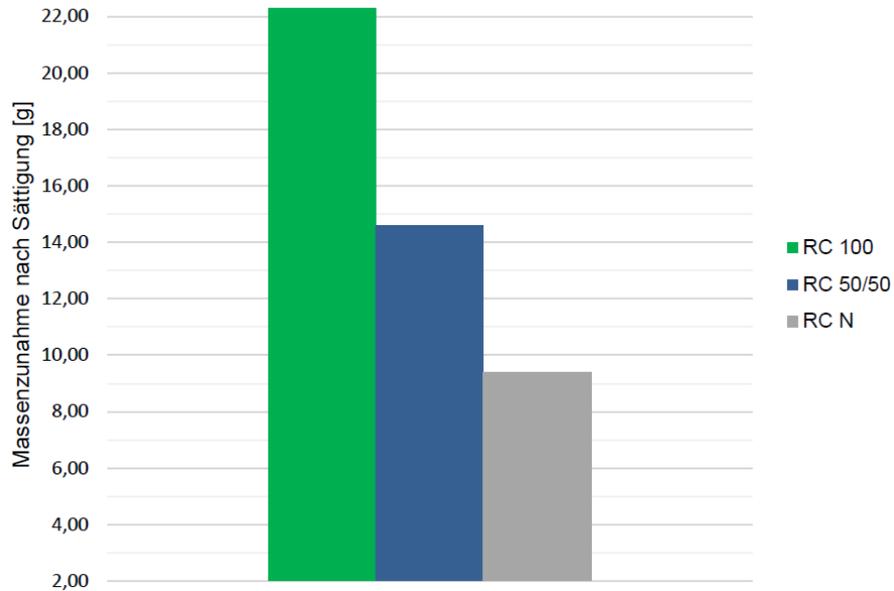


Abbildung 10: Massenzunahme der Probekörper nach Sättigung.

In Abb. 11 ist die Massenzunahme der Probekörper durch die kapillare Flüssigkeitsaufnahme und die flächenbezogene Abwitterung, nach 14 bzw. 28 Frost-Tau-Wechseln, gegeneinander aufgetragen. Bei der Betrachtung wird die Korrelation der beiden Parameter ersichtlich. Zudem fällt auf, dass die Streuung der Messwerte beim Beton RC N am geringsten ist.

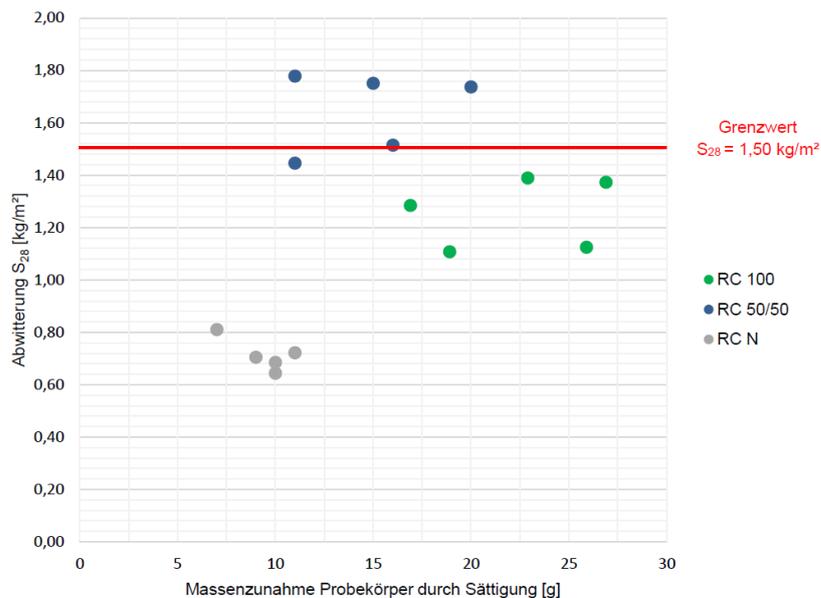


Abbildung 11: Zusammenhang Abwitterung und kapillare Flüssigkeitsaufnahme - Frost-Tau-Wechsel.

Bei der Betrachtung der Prüfflächen ist bereits visuell ein höherer Schädigungsgrad der Probekörper aus Beton mit Brechsandanteilen zu erkennen. In Abb. 12 sind die Prüfflächen dargestellt (v.li.: RC 100; RC 50/50; RC N).



Abbildung 12: Gegenüberstellung - Prüfflächen der Probekörper für CDF-Prüfung.

Durch organoleptische Begutachtung des abgewitterten Materials nach 28 Frost-Tau-Wechseln wurde festgestellt, dass sich dieses in seiner jeweiligen Beschaffenheit deutlich voneinander unterscheidet. Das abgewitterte Material der Betone mit Betonbrechsandanteilen enthält neben dem Feinanteil zudem gröberes Material. Wohingegen sich die Abwitterung des Referenzbetons RC N hauptsächlich aus feinem Material zusammensetzt. In Abb. 13 ist das abgewitterte Material dargestellt (v. li.: RC 100; RC 50/50; RC N).



Abbildung 13: Gegenüberstellung - abgewittertes Material nach 28 Frost-Tau-Wechseln.

Der geringere Frost-Tausalz-Widerstand der Betone mit Betonbrechsand, lässt sich auf den höheren Kapillarporenanteil der feinen rezyklierten Gesteinskörnung.

Die höhere Kapillarporosität begünstigt die kapillare Flüssigkeitsaufnahme, wodurch mehr Flüssigkeit in den Beton aufgenommen wird. Infolgedessen liegt eine größere Menge potentiell gefrierbares Wasser im Beton vor, als im Beton RC N mit gefügedichtetem Natursand. Aufgrund des kapillaren Effektes, gefriert das Wasser zunächst in den Kapillarporen. Beim Gefrieren von Wasser zu Eis, kommt es zu einer Zunahme des ursprünglichen Volumens, was eine Verdrängung von Wasser zur Folge hat. Durch bereits vorhandenes Eis in den Kapillarporen, ist der erforderliche Expansionsraum nicht gegeben, wodurch ein hydraulischer Druck entsteht, der zur Schädigung des Betons führt. [10]

Der Beton RC 50/50 weist nach 28 Frost-Tau-Wechseln eine 31 % höhere flächenbezogene Abwitterung auf, als der Beton RC 100, dessen feine Gesteinskörnung vollständig aus Betonbrechsand besteht. Gegebenenfalls ist dies darauf zurückzuführen, dass trotz der höheren kapillaren Wasseraufnahme, verhältnismäßig mehr Expansionsraum im Beton zur Verfügung steht. Diese Beobachtung lässt sich im Rahmen dieser Arbeit jedoch nicht abschließend klären und bietet Anlass für weitere Untersuchungen, zur Beantwortung der Fragestellung, wie sich das Verhältnis von Brechsand zu Natursand auf den Frost-Tausalz-Widerstand von RC-Betonen auswirkt.

In [11] wurden, im Rahmen einer Frostwiderstandsprüfung von RC-Betonen mit variierender Zusammensetzung der Gesteinskörnung (u.a. 100 % Brechsandanteil), ausreichend hohe Frostwiderstände festgestellt. Zudem wird von Schwankungen, hinsichtlich der Masse des abgewitterten Materials, bei den geprüften Betonen berichtet. Für die Prüfung der Wassereindringtiefe wird nach DIN EN 12390-8 Wasser unter Druck (500 kPa) auf die Oberfläche des Prüfkörpers aufgebracht. Nach Einwirken des Drucks über 72 h wird der Probekörper gespalten, die größte Eindringtiefe gemessen und auf 1 mm genau angegeben. Das Mindestalter der Proben zu Prüfbeginn beträgt 28 Tage.

Die Wassereindringtiefe in den Beton steigt mit zunehmendem Brechsandanteil. Die mittlere Wassereindringtiefe der Mischung RC 100 liegt mit 4,3 mm (+ 26,88 %) deutlich über der mittleren Wassereindringtiefe des Betons RC N. Die Wassereindringtiefe des Betons RC 50/50 weicht um 1,0 mm (+ 6,25 %) vom Referenzwert ab. In Tab. 11 sind die Prüfergebnisse gegenübergestellt. Abb. 14 zeigt den Verlauf der Wassereindringtiefe an den Probekörpern (v.li.: RC 100; RC 50/50; RC N).

In den Zusätzlichen Technischen Vertragsbedingungen - Wasserbau (ZTV-W) für Wasserbauwerke aus Beton und Stahlbeton ist festgelegt, dass die Wassereindringtiefe von Betonen für Wasserbauwerke  $\leq 30$  mm sein muss. Dieser Grenzwert wird von den geprüften RC-Betonen deutlich unterschritten, somit ist ein ausreichender Wassereindringwiderstand der Betone gegeben.

Tabelle 11: Gegenüberstellung - Wassereindringtiefe.

Beton	Mittelwert $d_{\max}$ [mm]	Zunahme $d_{\max}$ gegenüber RC N		Abweichung von Grenzwert $d \leq 30$ mm	
		[mm]	[%]	[mm]	[%]
RC 100	20,3	4,3	26,88	-9,7	-32,33
RC 50/50	17,0	1,0	6,25	-13,0	-43,33
RC N	16,0	Referenz		-14,0	-46,67



Abbildung 14: Gegenüberstellung - Wassereindringtiefe an Probekörpern.

Die Zunahme der Wassereindringtiefe mit höherem Brechsandanteil, lässt sich auf die höhere Porosität der rezyklierten Gesteinskörnung zurückführen, die wiederum die Wasserpermeabilität des Betons beeinflusst. [3], [10]

In [12] wurde festgestellt, dass kein signifikanter Unterschied bei der Wassereindringtiefe von Betonen mit rezykliertem Zuschlag (Typ 1), im Vergleich zu Normalbetonen besteht. Die untersuchten Betone enthielten jedoch keinen Brechsand. Siebel et al. vermuten, dass die Verwendung von Brechsand, in einer geringfügig höheren Wassereindringtiefe resultiert und führen dies auf die höhere Porosität des Brechsandes gegenüber Natursand zurück. Die in

[12] von Siebel et al. angestellte Vermutung, lässt sich anhand der hier vorgestellten Prüfergebnisse bestätigen.

Für die Bestimmung des relativen Karbonatisierungswiderstandes des Betons wird wiederum mit dem Klimaschrank ICH C mit Kompressorkühlung, Feuchteregulierung und CO<sub>2</sub>-Begasung der Firma Memmert durchgeführt. Der Karbonatisierungswiderstand nimmt mit zunehmendem Brechsandanteil im Beton ab. In Tabelle 15 sind die Karbonatisierungskoeffizienten gegenübergestellt. Die Betone RC 100 bzw. RC 50/50, weisen einen 62,26 % bzw. 41,51 % höheren Karbonatisierungskoeffizienten auf, als der Referenzbeton RC N (vgl. Tab. 12).

Tabelle 12: Gegenüberstellung - Karbonatisierungsgeschwindigkeit bzw. -koeffizient.

Beton	$K_{AC}$ [mm/d <sup>1/2</sup> ]	Zunahme $K_{AC}$ gegenüber RC N [%]
RC 100	1,72	62,26
RC 50/50	1,50	41,51
RC N	1,06	<b>Referenz</b>

Die Karbonisierungstiefen sowie die maßliche und prozentuale Abweichung gegenüber des Referenzbetons RC N, können Tabelle 16 entnommen werden. Während der Unterscheid der Karbonisierungstiefen der Betone zu Beginn der CO<sub>2</sub>-Beaufschlagung noch relativ gering ist, wird dieser mit fortschreitender Expositionsdauer zunehmend deutlich (Abb. 15 und 16). Die Karbonisierung ist beim Beton RC 100, nach 28 d bzw. 42 d, um 57,14 % bzw. 56,66 % weiter fortgeschritten, als beim Referenzbeton RC N. Für den Beton RC 50/50 liegt die Zunahme der Karbonisierungstiefe nach 28 d bzw. 42 d, 36,55 % bzw. 40,81 % über dem Referenzwert (vgl. Tab. 13).

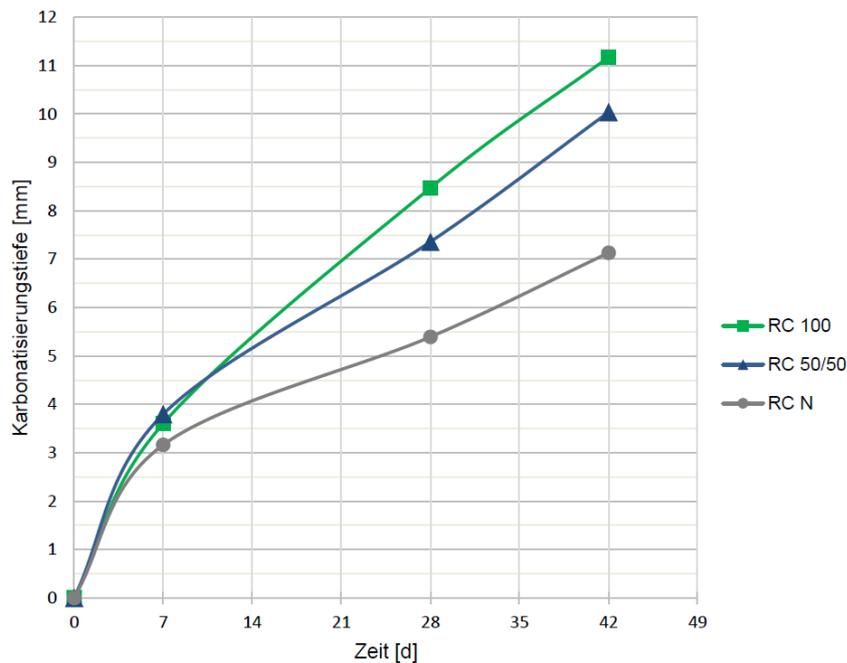


Abbildung 15: Gegenüberstellung - Zeitl. Verlauf d. Karbonisierungstiefe.

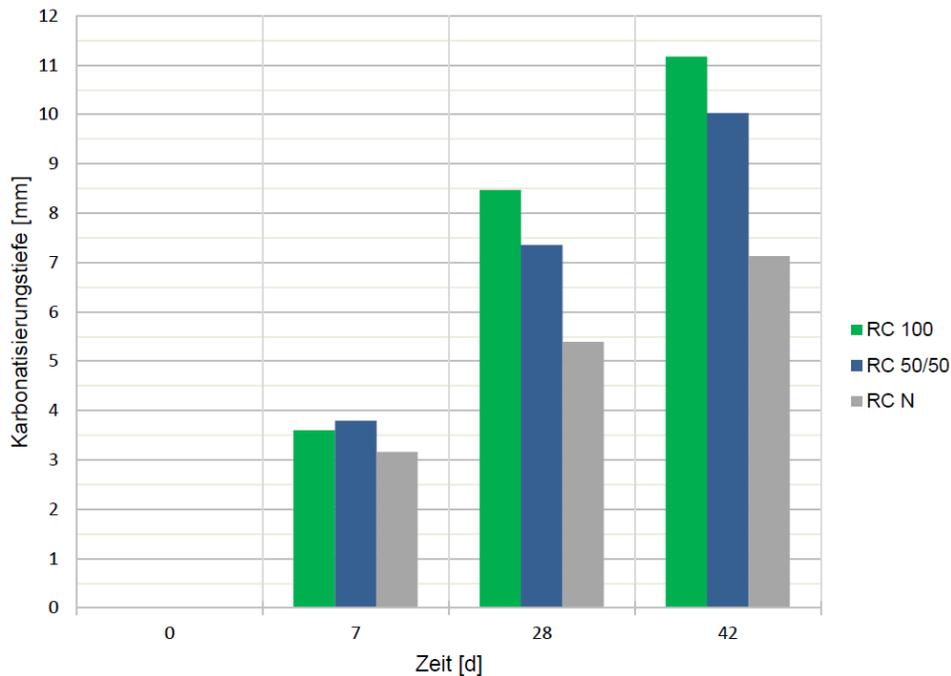


Abbildung 16: Karbonatisierungstiefe nach Expositionsdauer.

Tabelle 13: Abweichung des Karbonatisierungsfortschritts gegenüber Referenzbeton.

Beton	Karbonisierungstiefe je Expositionsdauer			Zunahme $d_k$ gegenüber RC-N					
	$d_{k, 7 d}$ [mm]	$d_{k, 28 d}$ [mm]	$d_{k, 42 d}$ [mm]	7 d		28 d		42 d	
				[mm]	[%]	[mm]	[%]	[mm]	[%]
RC 100	3,60	8,47	11,17	0,44	13,92	3,08	57,14	4,04	56,66
RC 50/50	3,80	7,36	10,04	0,64	20,25	1,97	36,55	2,91	40,81
RC N	3,16	5,39	7,13	Referenz					

Der geringere Karbonatisierungswiderstand der Betone mit Betonbrechsand, lässt sich auf die höhere Porosität der rezyklierten Gesteinskörnung zurückführen, die wiederum die Gaspermeabilität des Betons beeinflusst. [3], [10].

Im Rahmen anderer Forschungsarbeiten [10], [12] wurde der Karbonatisierungsfortschritt an RC-Betonen mit gleichwertiger Druckfestigkeit ermittelt. Diese wurde erreicht, indem der w/z-Wert durch einen höheren Zementanteil verringert wurde. Dementsprechend sind diese Forschungsergebnisse nur bedingt mit den Ergebnissen dieser Arbeit vergleichbar.

Siebel et al. konnten in [12] keinen nachteiligen Einfluss von Betonbrechsand auf den Karbonatisierungswiderstand feststellen. Ferner wird in [10] ein positiver Einfluss von rezyklierter Gesteinskörnung beschrieben, der bei einem Austausch von 20 bzw. 50 Vol.-%, sowohl bei feiner, als auch bei grober rezyklierter Gesteinskörnung festgestellt wurde.

In [12] wird dieser positive Einfluss auf den Nachbehandlungseffekt, der durch das vorgesättigte Rezyklat im Beton entsteht, zurückgeführt. Bei höheren Brechsandanteilen wird wiederum von einem geringeren Karbonatisierungswiderstand berichtet. [10]

Mit Chlorid-Diffusionskoeffizienten können sowohl die Stoffeigenschaften von Beton eingeschätzt als auch Transportvorgänge berechnet und modelliert werden. Diffusionskoeffizienten können i.d.R. jedoch nur in sehr zeitaufwendigen, teilweise über mehrere Monate dauernden Versuchen ermittelt werden. Eine gute Alternative bieten hier die sogenannten Schnell-Migrationsversuche. Die im Rahmen dieser Versuche ermittelbaren Chlorid-Migrationskoeffizienten stehen in direkter Korrelation zu Chlorid-Diffusionskoeffizienten und es

besteht die Möglichkeit, innerhalb nur weniger Tage ein Versuchsergebnis zu erhalten. Ein weiterer großer Vorteil des Migrationsversuchs besteht auch darin, dass der Migrationskoeffizient zu einem bestimmten Alter des Betons ermittelt werden kann, während beim klassischen Diffusionsversuch nur ein mittlerer Diffusionskoeffizient über die gesamte Dauer des Versuchs ermittelt wird. Für die Bestimmung des Migrationskoeffizienten wird der RCM-Versuch nach Tang.

Der Chlorideindringwiderstand sinkt mit zunehmendem Betonbrechsandanteil (Abb. 17 und Tab. 14). Die Chlorideindringtiefe  $x_d$  (Abbildung 46; v.li.: RC 100; RC 50/50; RC N) hat, aufgrund der unterschiedlichen Prüfspannungen, keine direkte Aussagekraft. Ein Vergleich der Betone untereinander, ist demzufolge erst nach Auswertung der Prüfergebnisse anhand des Chloridmigrationskoeffizienten DRCM möglich. Die Betone RC 100 bzw. RC 50/50, weichen mit einer Zunahme von 68,78 % bzw. 35,61 % vom Chloridmigrationskoeffizienten des Referenzbetons RC N ab.

Im BAW-Merkblatt - Chlorideindringwiderstand von Beton [13] der Bundesanstalt für Wasserbau sind in Abhängigkeit der Expositionsklasse, Grenzwerte für den Chloridmigrationskoeffizienten angegeben. Für die Expositionsklasse XD1 darf der Mittelwert  $10 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  nicht überschritten werden. Der Referenzbeton unterschreitet diesen Grenzwert mit  $9,80 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  um 2 %. Die Betone mit Brechsandanteil überschreiten den Grenzwert jeweils deutlich. Hierbei liegt der Chloridmigrationskoeffizient des Betons RC 100 mit  $16,54 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  um 68,78 % über dem Grenzwert. Der Beton RC 50/50 weicht mit  $D_{\text{RCM}} = 13,29 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$  um 32,90 % vom Grenzwert ab.

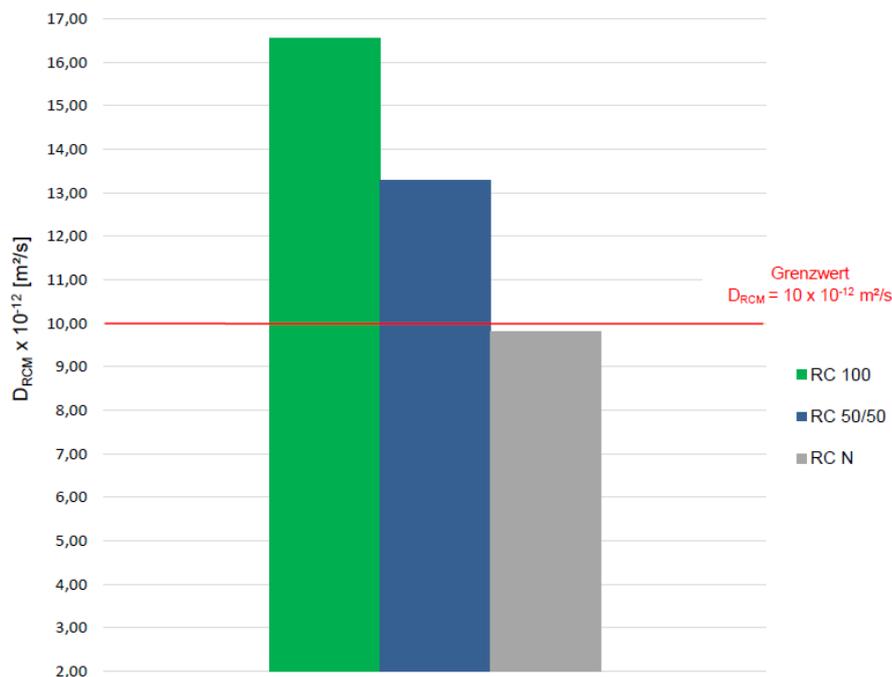


Abbildung 17: Chlorideindringwiderstand.

Abbildung 14: Gegenüberstellung - Chlorideindringwiderstand.

Beton	Prüfspannung U [N]	$x_d$ [mm]	$D_{RCM}$ [ $\times 10^{-12}$ m <sup>2</sup> /s]	Zunahme $D_{RCM}$ gegenüber RC N [%]	Abweichung von Grenzwert $D_{RCM} = 10 \times 10^{-12}$ [m <sup>2</sup> /s] [%]
RC 100	10	11,84	16,54	68,78	+ 65,40
RC 50/50	10	9,80	13,29	35,61	+ 32,90
RC N	15	10,76	9,80	Referenz	- 2,00



Abbildung 18: Gegenüberstellung - Chlorideindringtiefe an Probekörpern.

Der geringere Chlorideindringwiderstand der Betone mit Brechsandanteilen, steht in Zusammenhang mit der höheren Porosität sowie der Porenstruktur der rezyklierten Gesteinskörnung. Chloride werden über das Porensystem in den Beton transportiert. Das Betongefüge ist, aufgrund des höheren Kapillarporenanteils der feinen Gesteinskörnung, weniger dicht. Folglich nimmt der Widerstand gegenüber Chlorideindringung in den Beton ab. In [3] wird von einer signifikanten Zunahme der Chlorideindringtiefe, bei steigendem Betonbrechsandanteil berichtet. Dieser Zusammenhang wurde ebenso im Rahmen der vorliegenden Arbeit festgestellt. [3], [14]

#### f) Modellierung der Dauerhaftigkeit

Das Modellieren der Dauerhaftigkeit erfolgt für die Karbonatisierung des Betons anhand des Wurzel-Zeit-Gesetzes. Die Modellierung der Dauerhaftigkeit, für das Eindringen von Chloriden in den Beton, basiert auf einer analytischen Lösung. Es wird jeweils eine Zeitspanne, die Nutzungsdauer, berechnet bis die Karbonatisierungsfront die Bewehrung erreicht hat, bzw. bis der kritische Chloridgehalt innerhalb der Betondeckung im Bereich der Bewehrung erreicht ist. Dies führt in beiden Fällen zur Depassivierung des Bewehrungsstahles, welcher infolgedessen korrosionsbereit im Beton vorliegt. Unter Berücksichtigung der gegebenen Parameter lässt sich, stark vereinfacht, die Nutzungsdauer abschätzen. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die Modellierung der Dauerhaftigkeit bzgl. Karbonatisierung bzw. Chlorideindringung, unabhängig voneinander erfolgen. Konkret bedeutet dies, dass der Einfluss der Karbonatisierung, die eine dichtere Betonstruktur bewirkt, bei der Berechnung des zeit- und tiefenabhängigen Chloridgehaltes unberücksichtigt bleibt. Somit handelt es sich um eine theoretische Berechnung, bei der die realen Bedingungen nicht abgebildet werden. Um die Dauerhaftigkeit des Sandwichelementes zu modellieren, wird die Betondeckung mit  $c_{nom} = 30$  mm (Abb. 19) entsprechend der konstruktiven Vorgaben, als Eingangsparameter herangezogen.

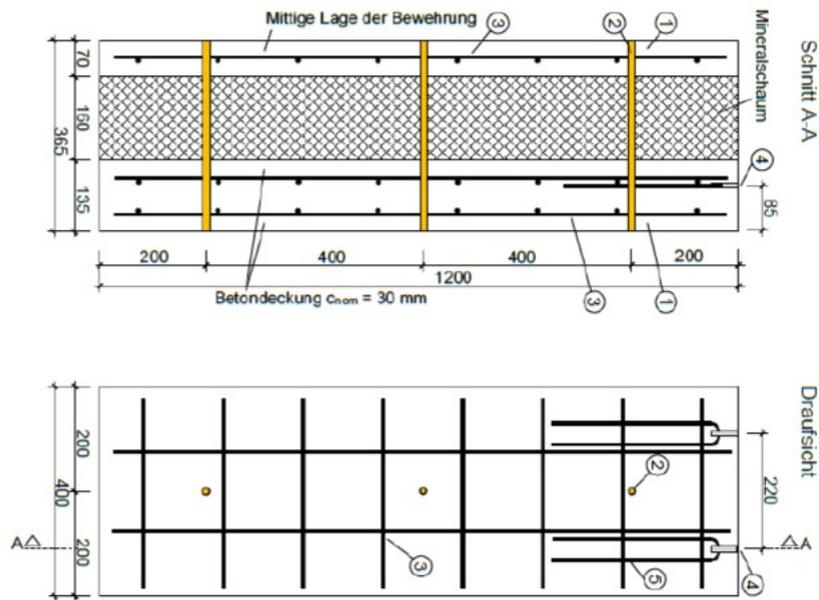


Abbildung 19: Sandwichelement im Querschnitt und Grundriss.

Ferner wird die Annahme getroffen, dass das Sandwichelement als Außenwand im Wohnungsbau verwendet wird. Entsprechend der Einwirkungen aus der Umgebung auf das Bauteil, ergibt sich die Zuordnung der Expositionsklassen XC4, XF1 sowie der Feuchtigkeitsklasse WF. Hieraus resultieren Anforderungen bezüglich des Zementgehaltes, des w/z-Wertes, der Druckfestigkeitsklasse sowie zur Betondeckung, die in Tab. 15 zusammengestellt sind. [15]

Tabelle 15: Expositionsklassen Sandwichelement.

Expositions- bzw. Feuchtigkeitsklasse	Mindest-Zementgehalt $Z_{min}$ [kg/m <sup>3</sup> ]	Wasser-Zement-Wert w/z <sub>max</sub> [-]	Mindest-Druckfestigkeitsklasse	Mindest-Betondeckung $C_{min}$ [mm]
XC4	280	0,60	C 25/30	25
XF1	280	0,60	C 25/30	keine Anforderung

Um den Zeitpunkt zu berechnen, zu dem der Bewehrungsstahl infolge der Karbonatisierung depassiviert im Beton vorliegt, ist zunächst der Karbonatisierungskoeffizient  $K_{AC}$ , der anhand des beschleunigten Verfahrens ermittelt wurde, auf den Karbonatisierungskoeffizienten unter atmosphärischen Bedingungen  $K_{NAC}$  umzurechnen. Die erhöhte CO<sub>2</sub>-Konzentration  $CO_{2AC}$  betrug während des beschleunigten Verfahrens 3,00 Vol.-%. Die CO<sub>2</sub>-Konzentration der Atmosphäre wird zu 0,035 Vol.-% angenommen. Die Umrechnung erfolgt anhand der untenstehenden Formel. [16]

$$K_{NAC} = \frac{K_{AC}}{\left(\frac{CO_{2AC}}{CO_{2N}}\right)^{\frac{1}{2}}}$$

Durch Umformen, des erläuterten Wurzel-Zeit-Gesetzes, lässt sich schließlich die Zeit  $t$ , die als Nutzungsdauer bei der gegebenen Betondeckung  $c_{nom} = 30$  mm betrachtet werden kann, berechnen. [3]

$$d_k = K_{NAC} \cdot \sqrt{t}$$

$$d_k = c_{nom}$$

$$t = \left( \frac{C_{nom}}{K_{NAC}} \right)^2$$

Die Berechnungsergebnisse sind in Tab. 17 zusammengefasst sowie in Abb. 20 grafisch ausgewertet.

Tabelle 16: Modellieren der Dauerhaftigkeit - Karbonatisierung.

Beton	$K_{AC}$ [mm/d <sup>1/2</sup> ]	$K_{NAC}$ [mm/d <sup>1/2</sup> ]	$K_{NAC}$ [mm/a <sup>1/2</sup> ]	t [a]
RC 100	1,72	0,1858	3,549	71,45
RC 50/50	1,50	0,1620	3,095	93,96
RC N	1,06	0,1145	2,187	188,17

Zieht man die zur Planung vorgesehene Nutzungsdauer von 50 Jahren für Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke entsprechend DIN EN 1990 (Eurocode 0) als Kriterium zur Bewertung der Dauerhaftigkeit heran, weisen alle im Rahmen dieser Arbeit geprüften Recycling-Betone, eine ausreichende Dauerhaftigkeit in Bezug auf die Karbonatisierung auf.

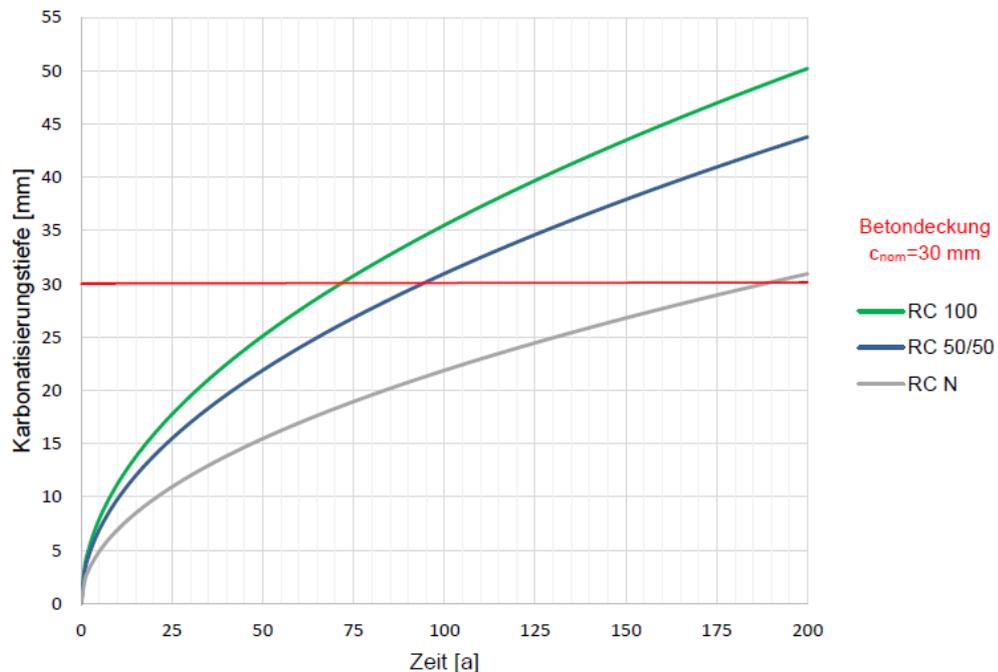


Abbildung 20: Graph. Modellieren der Dauerhaftigkeit - Karbonatisierung.

Die Dauerhaftigkeit eines chloridbeanspruchten Betonbauteils, lässt sich analytisch mithilfe der untenstehenden Gleichung berechnen. Hierbei ist zu prüfen, ob der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt  $C_{crit}$  innerhalb der Betondeckung, während der vorgesehenen Nutzungsdauer erreicht bzw. überschritten wird.

Zunächst ist der zeitabhängige offensichtliche Chloriddiffusionskoeffizient  $D_{app}(t)$  zu berechnen. Hierzu wird der Chloridmigrationskoeffizient DRCM, der bei der Prüfung des Chlorideindringwiderstandes ermittelt wurde, angesetzt. Darüber hinausgehen das Betonalter bei der Migrationsprüfung  $t_{28}$  [s] sowie die jeweilig betrachtete Zeit  $t$  [s] mit in die Berechnung ein. Der von der Zementart abhängige Alterungsexponent  $n$  ergibt sich nach Gehlen [5] für den verwendeten Portlandzement (CEM I) zu  $n = 0,30$ .

$$D_{app}(t) = D_{RCM} \cdot \left( \frac{t_{28}}{t} \right)^n$$

Zur Berechnung des zeit- und tiefenabhängigen Chloridgehaltes  $C(x,t)$  im Bereich der Bewehrung, wird für die Bauteiltiefe  $x$ , das Nennmaß der Betondeckung  $c_{nom}$  angesetzt. Die genaue Chloridbeaufschlagung des Bauteils ist unbekannt. Es wird jedoch von einer tendenziell geringen Beanspruchung, durch Chloride aus Taumitteln ausgegangen. Zudem erfolgt die Beaufschlagung von Betonbauteilen mit Tausalzen in aller Regel saisonal. In [17] sind Oberflächenkonzentrationen für Umgebungsbedingungen, entsprechend der Expositions-klasse XD1, im Bereich von 0,5 - 1,5 M.-%/Zementgehalt angegeben. Für die Modellierung der Dauerhaftigkeit des Sandwichelementes, wird  $C_s = 0,5$  M.-%/ Zement sowie  $C_s = 0,75$  M.-%/Zement angenommen. Der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt wird zu  $C_{crit} = 0,40$  M.-%/Zement angesetzt. [14]

$$x = c_{nom}$$

$$C(x,t) = C_s \cdot \left[ 1 - \operatorname{erf} \left( \frac{x}{2 \cdot \sqrt{D_{app}(t) \cdot t}} \right) \right]$$

Die Berechnungsergebnisse sind in bzw. zusammengefasst sowie in Abb. 21 bzw. 22 grafisch ausgewertet.

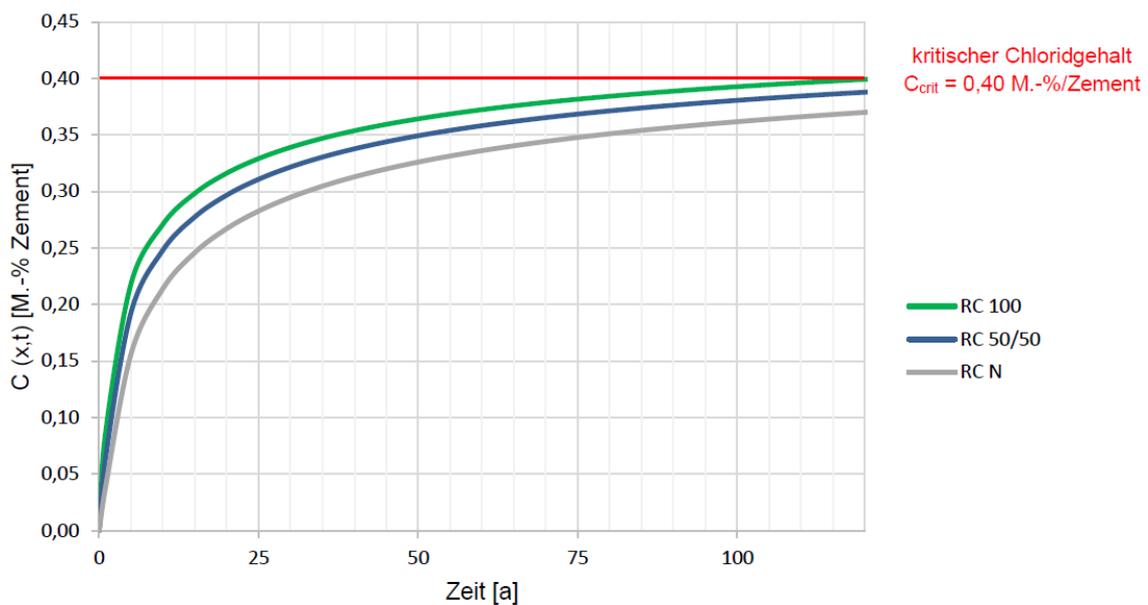


Abbildung 21: Grafische Darstellung - Chlorideindringung bei  $C_s = 0,5$  M.-%/Zement.

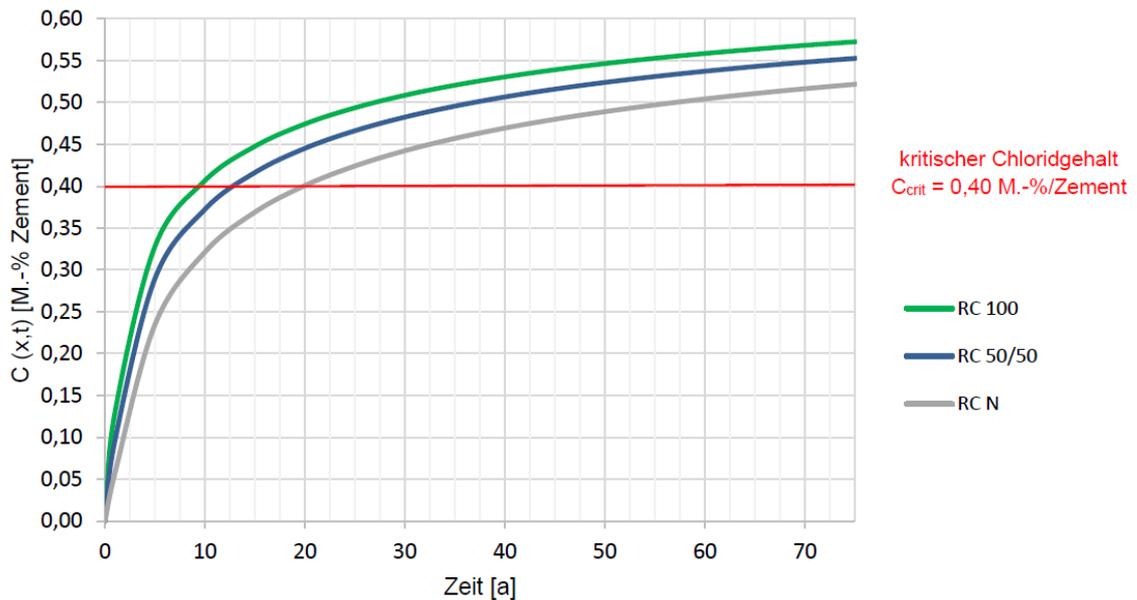


Abbildung 22: Grafische Darstellung - Chlorideindringung bei  $C_s = 0,75$  M.-%/Zement.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse zur Dauerhaftigkeit der Betone beim Eindringen von Chloriden, zeigt sich eine deutliche Abhängigkeit von der Intensität der Chloridbeaufschlagung. Während die Dauerhaftigkeit der untersuchten Betone bei einer Chloridoberflächenkonzentration von  $C_s = 0,5$  M.-%/Zement gegeben ist, erreicht der kritische korrosionsauslösende Chloridgehalt, die Bewehrung bei  $C_s = 0,75$  M.-%/Zement bereits innerhalb deutlicher kürzerer Zeitspannen. Somit wäre die zur Planung vorgesehene Nutzungsdauer von 50 Jahren, für Gebäude und andere gewöhnliche Tragwerke gemäß DIN EN 1990 (Eurocode 0) und damit die Dauerhaftigkeit der untersuchten Betone, nicht gegeben. Entsprechend der Verwendung des Sandwichelementes als Außenwand im Wohnungsbau, stellt die Beanspruchung durch Chloride aus Tausalzen jedoch keine relevante Umwelteinwirkung dar [15]. Des Weiteren ist die Verwendung von rezyklierter Gesteinskörnung, bei chloridbeanspruchten Betonbauteilen normativ nicht vorgesehen. Damit bestätigt sich die Regelung der DAfStb-Richtlinie bezüglich der Einschränkungen bei den Expositionsklassen.

Zur Bewertung der Dauerhaftigkeit erfolgte ein Vergleich der Prüfergebnisse mit Grenzwerten aus Regelwerken oder Zielwerten, die sich aus den Anforderungen der Expositionsklassen ergeben. Darüber hinaus werden die Betone untereinander verglichen. Hierbei dient ein normkonform hergestellter Recyclingbeton als Referenz. Die Dauerhaftigkeit wird für die Karbonatisierung des Betons, anhand des Wurzel-Zeit Gesetzes modelliert. Für das Eindringen von Chloriden in den Beton, wird eine analytische Lösung zur Modellierung der Dauerhaftigkeit herangezogen.

Es ist festzustellen, dass die Verwendung von Betonbrechsand, auch bei vollständigem Ersatz des Natursandes, zu adäquaten Frisch- und Festbetoneigenschaften führt. Die Materialwiderstände nehmen in der Regel mit zunehmendem Recyclingsandanteil ab, erfüllen aber zumeist dennoch die dauerhaftigkeitsrelevanten Anforderungen. Dabei ist die Veränderung der Frisch- und Festbetoneigenschaften in Abhängigkeit des Recyclingsandanteils, auf die Beschaffenheit der feinen rezyklierten Gesteinskörnung zurückzuführen, die aufgrund des anhaftenden Zementsteins, eine geringere Festigkeit, höhere Porosität sowie andersartige Porenstruktur, als Natursande aufweist. Die Herstellung dauerhafter Recyclingbetone, mit bis zu 100 % Betonbrechsandanteil, ist demnach möglich. Dabei sollte bei der Betonkonzeption, der Anteil des Recyclingsandes, auf die typischen Umgebungsbedingungen des Bauteils abgestimmt werden. Bei chloridbeanspruchten Betonbauteilen, sollte von einer Verwendung von Betonbrechsand im Beton abgesehen werden.

Tabelle 17: Zusammenfassung der Dauerhaftigkeits-Ergebnisse.

Beton	Materialwiderstand	Dauerhaftigkeits-kennwert	Grenz-bzw. Zielwert	Prüf-ergebnis
RC 100	„Dauerhaftigkeit“	Druckfestigkeit	C 25/30	C 20/25
RC 50/50				C 25/30
RC N				C 30/37
RC 100	Wassereindringwiderstand	Wassereindringtiefe unter Druck	< 30,0 mm	20,3 mm
RC 50/50				17,0 mm
RC N				16,0 mm
RC 100	Karbonatisierungs-widerstand	Karbonatisierungsgeschwindigkeit (Karbonatisierungskoeffizient)	50 Jahre	71 Jahre
RC 50/50				94 Jahre
RC N				188 Jahre
RC 100	Frost-Tausalz-Widerstand	Flächenbezogene Abwitterung	< 1,50 kg/m <sup>2</sup>	1,256 kg/m <sup>2</sup>
RC 50/50				1,646 kg/m <sup>2</sup>
RC N				0,714 kg/m <sup>2</sup>
RC 100	Chlorideindringwiderstand	Chloridmigrationskoeffizient	< 10 x 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s	16,54 x 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s
RC 50/50				13,29 x 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s
RC N				9,80 x 10 <sup>-12</sup> m <sup>2</sup> /s

Die Druckfestigkeit von Betonen, dient im Rahmen der deskriptiven Dauerhaftigkeitsbemesung, als Kennwert zur Beurteilung der Dauerhaftigkeit. In Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen, wird mit den Expositionsklassen eine Mindestdruckfestigkeitsklasse gefordert. Die Untersuchung der Recyclingbetone hinsichtlich ihrer Druckfestigkeit, führt zu der Erkenntnis, dass die Druckfestigkeit mit zunehmendem Brechsandanteil im Beton sinkt. Die Festigkeitseinbußen durch die Verwendung von Betonbrechsand, sind im Wesentlichen auf die geringere Festigkeit und damit verbunden, auf die höhere Porosität des Betonbrechsandes im Vergleich zu Natursand, zurückzuführen. Dies ist wiederum, durch den höheren Anteil von anhaftendem Zementstein an der der feinen rezyklierten Gesteinskörnung bedingt. Darüber hinaus ist ein Zusammenhang von Druckfestigkeit und Festbetonrohddichte festzustellen. Mit zunehmendem Brechsandanteil nimmt, neben der Druckfestigkeit, auch die Festbetonrohddichte ab. Dies ist auf die höhere Porosität der rezyklierten Gesteinskörnung, insbesondere des Brechsandes, zurückzuführen.

Bei einem Betonbrechsandanteil von 100 % (RC 100) wird die, in den Expositionsklassen geforderte Druckfestigkeitsklasse, um eine Klasse unterschritten und damit nicht erreicht. Der Recyclingbeton, mit je 50 % Betonbrechsand bzw. Natursand (RC 50/50), erreicht die

Mindestruckfestigkeitsklasse. Der normkonforme Recyclingbeton RC N übertrifft die geforderte Mindestdruckfestigkeit um eine Druckfestigkeitsklasse.

Anhand der Wassereindringtiefe, lässt sich die Wasserpermeabilität der Betone beurteilen. Mit zunehmendem Brechsandanteil steigt die Wassereindringtiefe in den Beton. Dies lässt sich auf die höhere Porosität der rezyklierten Gesteinskörnung zurückführen, die zu einem weniger dichten Betongefüge führt. Die ermittelten Wassereindringtiefen liegen jeweils unterhalb des Grenzwertes, somit ergibt sich für die untersuchten Recyclingbetone ein jeweils ausreichender Wassereindringwiderstand.

Der Karbonatisierungswiderstand ist ein Maß für die CO<sub>2</sub>-Permeabilität der Betone. Mit zunehmendem Brechsandanteil nimmt der Karbonatisierungswiderstand ab. Dies ist auf die höhere Porosität des Betonbrechsandes, im Vergleich zur natürlichen Gesteinskörnung zurückzuführen. Anhand der ermittelten Karbonatisierungskoeffizienten, wird mithilfe des Wurzel-Zeit-Gesetzes, die Zeit bis zur Depassivierung des Bewehrungsstahls berechnet. Die vorgesehene Nutzungsdauer, die den Expositionsklassen zugrunde liegt, wird von den untersuchten Recyclingbetonen jeweils deutlich übertroffen.

Die Verwendung von Betonbrechsand in Beton führt zu einer Abnahme des Frost-Tausalz-Widerstandes. Hierbei wird die kapillare Wasseraufnahme in den Beton, durch die höhere Kapillarporosität der Betone mit Brechsandanteilen, begünstigt. Dies resultiert in einer größeren Menge potentiell gefrierbaren Wassers im Beton, das beim Gefrieren zu Eis aufgrund seiner Volumenzunahme eine Schädigung des Betons herbeiführt. Für den Beton mit 100 % Brechsandanteil (RC 100) sowie für den normkonformen Beton (RC N), kann ein ausreichender Frost-Tausalz-Widerstand, anhand der flächenbezogenen Abwitterung, nachgewiesen werden.

Der Chlorideindringwiderstand sinkt mit zunehmendem Betonbrechsandanteil. Der höhere Kapillarporenanteil des Betonbrechsandes führt, zu einem weniger dichten Betongefüge. Dies begünstigt den Transport von Chloriden in den Beton. Die Chloridmigrationskoeffizienten der Betone mit Brechsandanteilen (RC 50/50; RC 100) überschreiten den geltenden Grenzwert jeweils deutlich. Anhand der ermittelten Chloridmigrationskoeffizienten wurde die Nutzungsdauer bei Chloridbeanspruchung modelliert. Dies führt zu dem Ergebnis, dass die Dauerhaftigkeit bei Chloridoberflächenkonzentrationen  $> 0,50 \text{ M.-%/Zementgehalt}$  nicht gegeben ist.

Bei einer Novellierung der Regelwerke, sollte eine differenzierte Verwendung von Betonbrechsand der Korngruppe 0/4 in Beton mit rezyklierter Gesteinskörnung ermöglicht werden. Daraus würden sich, entsprechend des facettenreichen Einsatzes von Beton, vielfältige Verwendungsmöglichkeiten für Betone mit feiner rezyklierter Gesteinskörnung, darbieten.

Der differenzierten Verwendung von hohen Betonbrechsandanteilen in RC-Betonen, steht in Bezug auf die Dauerhaftigkeit, nichts entgegen, sodass unbewehrte Bauteile, Innenbauteile sowie Außenbauteile mit geringer Beanspruchung aus der Umgebung, mit bis zu 100 % Betonbrechsand hergestellt werden könnten, sofern es die statischen Erfordernisse erlauben. Für die Verwendung in weiteren Betonbauteilen, sollte der Recyclingsandanteil in Abhängigkeit der Umgebungsbedingungen (Expositionsklassen) festgelegt werden. Hierbei sollte es die Maßgabe sein, einen höchstzulässigen Recyclingsandanteil je Expositionsklasse, in den Regelwerken zu definieren, der die Abwägung der ökologischen sowie technologischen Vor- und Nachteile, die sich durch die Verwendung von Recyclingsand ergeben, berücksichtigt.

### g) Herstellung des Recycling-Betons

Der eigentliche Herstellungsprozess des leistungsfähigen RC-Betons für die Vorsatz- und Tragschicht des Beton-Sandwiches folgt den normativen Vorgaben. Die Ausgangsstoffe werden entsprechend des Mischungsentwurfs abgemessen. Der Beton wird in einer oder mehreren Lagen in die Form gefüllt und verdichtet. In Abhängigkeit von der Geometrie der Schalungen ist die Anzahl der Schichten so zu wählen, dass vollständige Verdichtung erreicht wird. Die Probekörper wurden an der TU Darmstadt mittels Konus-Mischer hergestellt und auf einem Rütteltisch verdichtet.

Bei Herstellen von RC-Beton liegt ein besonderes Augenmerk auf der stärkeren (Wasser-)Saugfähigkeit der Gesteinskörnung. Beim Entwurf und der Herstellung von Betonen mit rezyklierter Gesteinskörnung muss dies besonders berücksichtigt werden, um mögliche Auswirkungen auf Frisch- und Festbetoneigenschaften zu vermeiden. Im Vergleich zu Betonen aus natürlicher Gesteinskörnung muss ein erhöhter Wasseranspruch eingeplant werden. Diese Daten entstammen der Wasseraufnahme nach 10 min. Das zusätzlich erforderliche Wasser sollte stets zur Vorsättigung der rezyklierten Gesteinskörnung eingesetzt werden, bevor der eigentliche Mischprozess beginnt. Die Vorsättigung findet gemäß Wasseranspruch gesondert für die einzelnen Kornfraktionen statt.



Abbildung 23: Herstellung der Probekörper an der TU Darmstadt.

### h) Erstprüfung des Betons

Neben der Frischbetonrohddichte wurde zudem auch das Ausbreitmaß bestimmt. Frischbetonprüfungen werden unmittelbar nach dem Mischen des Betons durchgeführt.

Eine erste Kontrolle der Eignung des Mischungsentwurfes bildet die Ermittlung des Ausbreitmaßes gemäß DIN EN 12350-5. Der Frischbeton wird in einen Kegelstumpf, der auf einem Ausbreittisch steht, eingebracht. Nach Entfernen der Form wird die bewegliche Tischplatte 15 mal bis zur Begrenzung angehoben und wieder fallen gelassen. Das Ausbreitmaß wird parallel zu den Tischkanten auf 10 mm genau gemessen ( $x_1$ ,  $x_2$ ). Der Durchmesser des Beton-

kuchens als Mittelwert von zwei Messungen gibt das Ausbreitmaß an. Zusätzlich wird der Beton optisch auf eventuell auftretende Entmischungen geprüft.



Abbildung 24: Bestimmung des Ausbreitmaßes.

Zur Bestimmung der Frischbetonrohichte nach DIN EN 12350-6 wird der Frischbeton in einem biegesteifen und wasserdichten Behälter verdichtet und gewogen. Das Verhältnis von Masse Betonprobe  $m$  [kg] und Behältervolumen  $V$  [m<sup>3</sup>] ergibt die Frischbetonrohichte  $D$  und ist auf 10 kg/m<sup>3</sup> genau anzugeben.

Tabelle 18: Frischbetonversuche Brückenkappenbeton.

M-Norm				M-RC			
<b>Ausbreitmaß</b>				<b>Ausbreitmaß</b>			
	$x_1=$	42,0	cm		$x_1=$	48,0	cm
	$x_2=$	42,0	cm		$x_2=$	46,5	cm
	$x=$	42,0	cm		$x=$	47,25	cm
	Klasse	F3			Klasse	F3	
<b>Frischbetonrohichte</b>				<b>Frischbetonrohichte</b>			
	Leer=	4,16	kg		Leer=	4,16	kg
	Voll=	21,5	kg		Voll=	21,14	kg
	Volumen=	0,005	m <sup>3</sup>		Volumen=	0,005	m <sup>3</sup>
	$D=$	3468	kg/m <sup>3</sup>		$D=$	3396	kg/m <sup>3</sup>
	Rohdichte=	3,47	kg/dm <sup>3</sup>		Rohdichte=	3,40	kg/dm <sup>3</sup>

Die Druckfestigkeit von Festbeton ist gemäß DIN EN 12390-3 an mindestens drei Würfeln, mit einer Kantenlänge von 150 mm, im Alter von mindestens 28 Tagen zu ermitteln.

Tabelle 19: Festbetonversuche Brückenkappenbeton.

Probe	Länge	Breite	Masse	F
	[mm]	[mm]	[g]	[N/mm <sup>2</sup> ]
M-RC_1	150,03	148,32	7108,8	37,5
M-RC_2	150,85	147,41	7056,4	36,3
M-RC_3	150,21	147,42	7072,0	35,1
M-RC_4	147,77	149,53	7183,6	38,8
<b>Mittelwert</b>				36,9
M-Norm_1	150,47	148,00	7747,4	54,6
M-Norm_2	150,49	149,98	7596,2	49,1
M-Norm_3	150,20	146,53	7541,6	47,2
M-Norm_4	150,71	149,78	7721,4	49,8
<b>Mittelwert</b>				50,2

#### i) Herstellung eines Beton-Beton-Sandwichbauteils

Am 09.03.2020 und 10.03.2020 wurden bei der Firma Zuber Betonwerk GmbH & Co. kg in Crailsheim die konzeptionierten Beton-Sandwich-Bauteile testweise produziert. Die Schalungen der Elemente werden hinter einander auf dem Rüttel-Kipptisch platziert. Dies ermöglicht einen durchgängigen Betonierprozess mittels Betonierkübel. Zunächst wird dann die Vorsatzschicht bewehrt, betoniert und mithilfe des Rütteltisches verdichtet. Im Anschluss wird der mineralisierte Dämmschaum direkt auf den Beton der Vorsatzschicht gegeben, auf der gewünschten Höhe (in Abhängigkeit der Dicke der Dämmschicht) abgezogen und die Verbindungsmittel eingebracht. Wenn der mineralisierte Schaum eine ausreichende Steifigkeit besitzt, kann die Tragschicht des Sandwich-Elementes bewehrt, betoniert und mithilfe einer Rüttelflasche verdichtet werden. Die Elemente werden vom Kipptisch mit Kraneinsatz an den mit Rd-Anker befestigten Seilschlaufen abgehoben.

Die einzelnen Prozessschritte werden im Detail nachfolgend anhand der praktischen Herstellung im Werk erläutert. Anstelle des Recyclingbetons für die äußeren Schalen des Elementes wurde zunächst die Standard-Mischung von Zuber eines C35/45 Betons verwendet. Der mineralisierte Schaum wurde von der Firma Wilhelm Röser Söhne GmbH & Co. kg vor Ort im Werk von Zuber hergestellt. Hierfür wurde die gesamte Mischanlage zur Herstellung des mineralisierten Schaums in das Werk von Zuber in Crailsheim transportiert. Exemplarisch ist das Sandwich-Element mit einer 160 mm dicken Dämmschicht mit dem mineralisierten Dämmschaum in Abbildung 25 dargestellt. Als Verbindungsmittel wurden nach obigen Ausführungen Schöck Isolink TA-H verwendet.

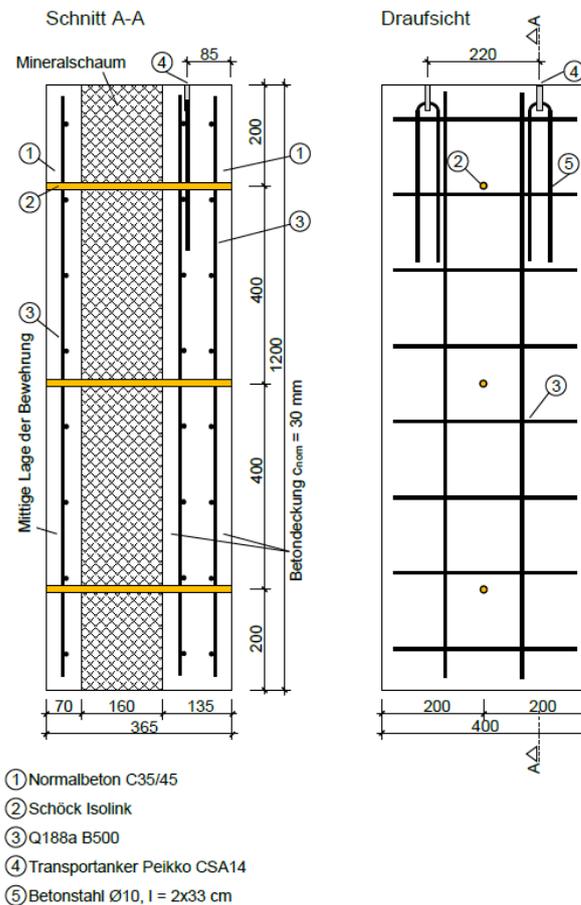


Abbildung 25: Sandwich-Element mit 160 mm mineralisierter Dämmschaum-Schicht.

Für die Herstellung der Sandwich-Elemente wurden zunächst die Schalungen hergestellt. Die Elemente weisen jeweils Abmessungen von 40 cm in der Breite und 120 cm in der Höhe auf. Die Holzschalungen wurden auf einem Rütteltisch wie in Abbildung 26 dargestellt platziert. Anschließend wurde die Bewehrung eingebracht (Abbildung 27).



Abbildung 26: Schalungen auf dem Rütteltisch.



Abbildung 27: Bewehrung der Vorsatzschicht.

Der Beton für die Trag- und Vorsatzschicht des Sandwich-Elementes wurde in der Mischanlage der Firma Zuber hergestellt. Der Beton hat die Festigkeitsklasse C35/45 mit einem Größtkorn von 8 mm für die Vorsatzschicht und 16 mm für die Tragschicht. Das Einbringen der Vorsatzschicht mit einer Höhe von 7 cm erfolgte für alle Elemente mithilfe eines Betonierkübels. Die Verdichtung wurde mit dem Rütteltisch durchgeführt. Anschließend wurde der mineralisierte Schaum wie obig im Detail beschrieben von Mitarbeitern der Firma

Röser hergestellt und auf die Vorsatzschicht aufgebracht (Abbildung 29; Abbildung 30). Der mineralisierte Schaum wurde mithilfe einer Holzvorrichtung in der jeweiligen Höhe abgezogen (Abbildung 31). Im nächsten Schritt wurden pro Element jeweils drei Verbindungsmittel (Schöck Isolink TA-H) eingebracht (Abbildung 33).



Abbildung 28: Betonage der Vorsatzschicht mit Betonierkübel.



Abbildung 29: Einbringen des mineralisierten Dämmschaums.



Abbildung 30: Eingebrachter mineralisierter Dämmschaum.



Abbildung 31: Abzug des mineralisierten Dämmschaums.

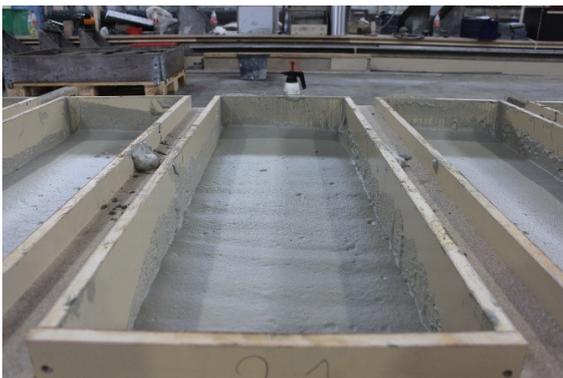


Abbildung 32: Abgezogene Oberfläche des mineralisierten Dämmschaums.

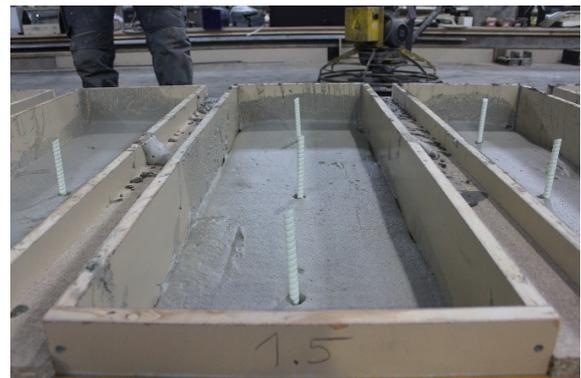


Abbildung 33: Einbringen der Verbindungsmittel.

Nachdem der mineralisierte Schaum 24 h aushärtete, wurde die Bewehrung für die zweite Betonschicht eingebracht (Abbildung 34). Als Anschlagmittel wurde ein Rd-Anker (16 mm) mit Seilschlaufen gewählt (Abbildung 35).

Im Anschluss wurde der Beton für die Tragschicht eingebracht (Abbildung 36). Die Verdichtung erfolgte mithilfe einer Rüttelflasche (Abbildung 37). Ein bedeutendes Ziel der Entwicklung wird in der kommenden Projektphase sein, ein schnelleres Aushärten des mineralisier-

ten Schaums zu erreichen, sodass das Einbringen der zweiten Betonschicht (Tragschicht) zeitnaher erfolgen kann. Hierfür ist insbesondere die Anpassung des Zeitpunkts der Dosierung des Beschleunigers angedacht. Die fertig betonierten Sandwich-Elemente sind in Abbildung 38 dargestellt.



Abbildung 34: Bewehrung der Tragschicht.



Abbildung 35: Rd-Anker 16 mm.



Abbildung 36: Betonage der Tragschicht mit Betonierkübel.



Abbildung 37: Verdichtung mit Rüttelflasche.



Abbildung 38: 30 hergestellte Sandwich-Elemente.

Zum Ausschalen der Sandwich-Elemente wurden Seilschlaufen an die Rd-Anker befestigt, sodass die Bauteile durch ein Aufstellen des Kipptisches abgehoben werden konnte.

## 2 Zweiter Closed-Loop

### a) Optimierung des Mischungsentwurfes des mineralisierten Schaums

Der am WiB bekannte Mischungsentwurf des Dämmschaums wurde zunächst im Hinblick auf die Wiederverwendung als Sekundärrohstoff in der Zementherstellung optimiert. Exemplarisch sind an dieser Stelle drei unterschiedliche Zusammensetzungen des Bindemittels in Tabelle 20 dargestellt. Außerdem wurden verschiedene Zielrohddichten erprobt. Alle Rezepturen weisen einen w/f-Wert von 0,33 auf.

Tabelle 20: Exemplarische Übersicht über ausgewählte Mischungszusammensetzungen

Material und Masse [kg/m <sup>3</sup> ]	R1	R2	R3
CEM I 52,5 R	78,0	42,8	42,5
CEM III/A 52,5 R	-	36,0	25,5
Silicastaub	6,8	6,8	6,8
Weißzement (Dyckerhoff)	-	-	10,2
Wasser	28,8	28,7	28,5
Fließmittel	0,6	0,3	0,3
Erhärtungsbeschleuniger	0,8	0,4	0,4
Schwindreduzierer	1,6	0,9	0,9
Stabilisierer	0,8	0,4	0,4
Wasserschaum	80,0	80,0	80,0
Rechnerische Schaumdichte	120,0	120,0	120,0

Die Rezepturen wurden anhand der Rohdichte, Wärmeleitfähigkeit und Porosität beurteilt. Probekörper mit geringeren Zielrohddichten als 100 kg/m<sup>3</sup> waren sehr weich und zerfielen in der Hand schon unter sehr leichtem Druck. Die Prüfung der Rohdichte und der Wärmeleitfähigkeit dieser Proben konnte folglich nicht durchgeführt werden. Die dritte Mischungszusammensetzung (R3) mit einer Zielrohddichte von 100 kg/m<sup>3</sup> zeigte in den Untersuchungen die geringste Rohdichte (103 kg/m<sup>3</sup>) bei der kleinsten Wärmeleitfähigkeit (0,047 W/mK). Trotz der geringen Dichte war diese Probe sehr leicht zu verarbeiten. Diese Mischungszusammensetzung (gelb markiert in Abbildung 39) wird hinsichtlich der durchgeführten Untersuchungen am geeignetsten eingestuft.

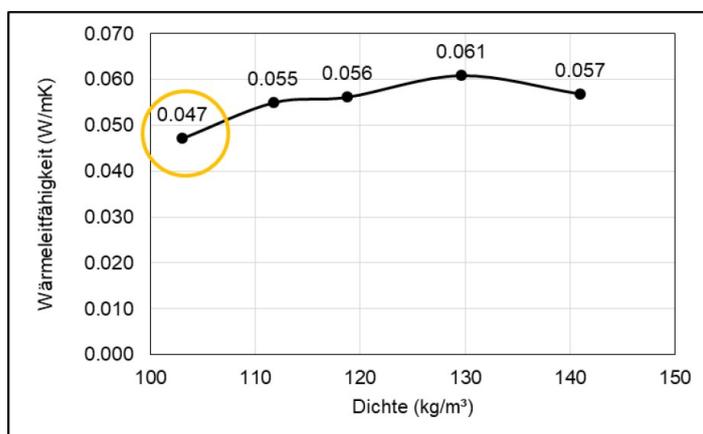


Abbildung 39: Wärmeleitfähigkeit, Rohdichte und Aufnahme des mineralisierten Schaums (R3); rechts mit Zielrohddichte von 100 kg/m<sup>3</sup>.

Im Laufe des Projektes wurde der mineralisierte Dämmschaum stetig weiter entwickelt insbesondere im Hinblick auf die Reduktion von Schwindprozessen beim Erhärten. Hierfür wurde unter anderem der Einsatz von Metakaolin als Zusatzstoff neben Portlandzement erprobt. Da das Material ein hohes Wasserbindevermögen besitzt, konnte durch den Einbezug von Metakaolin erheblich die Stabilität des mineralisierten Dämmschaums sowie eine Reduktion von Schwindverformungen realisiert werden.

Die Analyse der mechanischen Eigenschaften des entwickelten mineralisierten Schaums ist insbesondere im Hinblick auf den Bauzustand notwendig, bei dem die Druck- und Schubtragfähigkeit der Schaumdämmung eine besondere Bedeutung erlangt. Aufgrund der geringen Deckschichtdicken kann es zu einem Durchstanzen der Verbindungsmittel kommen. Bei einer horizontalen Fertigung im Werk liegt das Eigengewicht einer Schale auf den Verbindungsmitteln, gleichzeitig verfügt der Beton noch über eine nur niedrige Frühfestigkeit. Aus diesem Grund soll eine planmäßige Stützwirkung des Schaums realisiert werden. Außerdem bilden Druck- und Schubtragfähigkeit die Basis für die statisch-konstruktive Vorbemessung eines Sandwichelementes. Der Probekörper ist in Abbildung 40 dargestellt.



*Abbildung 40: Probekörper zur Analyse der mechanischen Eigenschaften des mineralisierten Schaums.*

Die Scherversuche wurden an Doppelprobekörpern in Anlehnung an DIN EN 12090 durchgeführt. Der Versuchsaufbau ist in Abbildung 41 dargestellt. Der Doppelprobekörper besteht dabei aus zwei Dämmstoffblöcken, die mittels Klebstoff an drei Sperrholzplatten befestigt werden. Die Außenhölzer werden an einem im Spannfeld verankerten Stahlrahmen befestigt, das Mittelholz am Hydraulikzylinder. Die Kraft wird mittels Kraftmessdose und der Weg mittels induktivem Wegaufnehmer während der Versuchsdurchführung simultan gemessen.

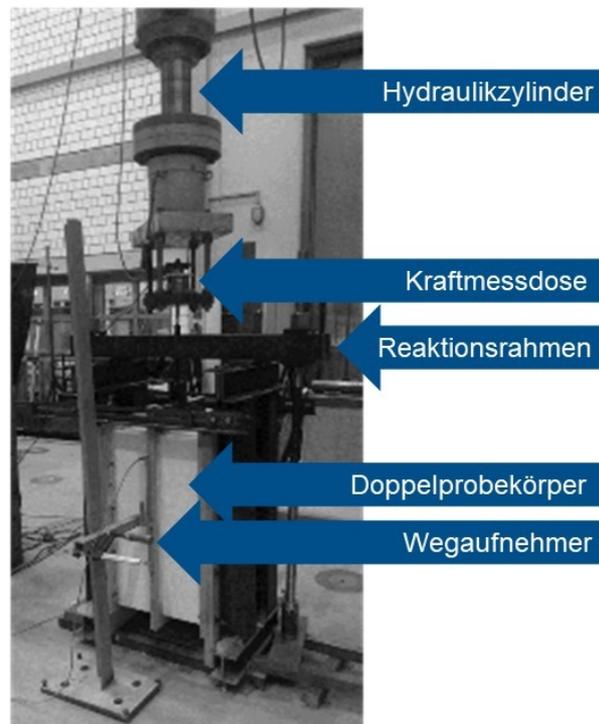
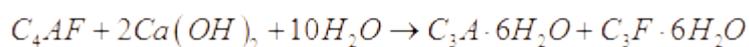
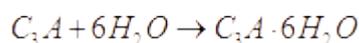
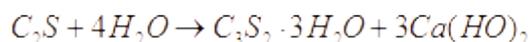


Abbildung 41: Versuchsaufbau für Scherversuche an Doppelprobekörpern in Anlehnung an DIN EN 12090.

## b) Re-Kalzinierung des hydratisierten, nicht-karbonatisierten Zementsteins

Wenn Zementkörner mit Wasser in Berührung kommen, laufen verschiedene Reaktionen ab, wobei sich ein festes zementäres Material bildet, das aus Portlanditkristallen (Calciumhydroxid, CH) und amorphen Calciumsilikathydraten (C-S-H-Gel) besteht und allgemein als „Zementstein“ bezeichnet wird. Die ungefähren Hydratationsreaktionen zwischen Wasser und den Zementbestandteilen können für jeden der Hauptbestandteile des Portlandzements wie folgt dargestellt werden [18], [19]:



Die Produkte enthalten gebundenes Wasser, das durch Pyrolyse bei hoher Temperatur aus den Kristallen entfernt werden kann, aber im vorliegenden Zusammenhang muss weiter geprüft werden, ob die Kristalle wieder in die Konfiguration von Zementklinker gebracht werden können. Mit Hilfe der TGA kann analysiert werden, ob das gebundene Wasser vollständig entfernt wurde, und mit Hilfe von XRD kann detektiert werden, ob die Kristallformation mit dem Original übereinstimmt.

Bei der praktischen Anwendung von Beton können Verunreinigungen wie Kalziumhydroxid oder Kalziumkarbonat durch den Kontakt seiner freiliegenden Oberflächen mit Feuchtigkeit und Kohlendioxid in der Luft entstehen. Da Wandzwischenlagen aus Beton nicht in direktem Kontakt mit der Umwelt stehen und die Wahrscheinlichkeit, dass sie durch Kohlendioxid und Wasser erodiert werden, sehr viel geringer ist, bieten Abfallmaterialien, die nicht stark karbonisiert sind, als Wandzwischenlagen das Potenzial für ein Recycling.

Bei der Herstellung von Beton wird der Zementklinker vollständig hydratisiert und bildet eine Reihe komplexer Kristallstrukturen wie C-S-H, AFm, AFt usw. Ziel dieses Projekts ist es, den hydratisierten Zementklinker zu verwenden, um die Abfallwandzwischen-schicht zu simulieren, und mit geeigneten Mitteln die Zusammensetzung und Struktur von Kalkklinker wiederherzustellen, um zu beweisen, dass die Abfallwandzwischen-schicht potenziell recycelt werden kann.

## Experiment

### **Vorbereitung des Betons**

Das Verfahren zur Herstellung des Zementsteins/Betons war wie folgt:

- 1) Abwiegen von 2,8761 kg Zement;
- 2) Abwiegen von 1,1505 kg nicht entionisiertes Wasser, Hinzufügen der Hälfte zum Zement; Sicherstellen, dass das Massenverhältnis von Wasser zu Zement 0,4 beträgt;
- 3) Langsamem Rühren für 30 s; (Abb. 42)
- 4) Hinzufügen der zweiten Hälfte des Wassers; weitere 30 s langsames Rühren; 60 s schnelles Rühren;
- 5) Manuelle Einstellung des Gemisches;
- 6) Schnelles Rühren für 60 s;



Abbildung 42 3.1.1: Elektrisches Rührwerk  
Mixmatic



Abbildung 43: Getrocknete Betonproben, gelagert im Exsikkator

Anschließend hydratisiert das Material für 28 Tage in entionisiertem Wasser. Um nicht gebundenes Wasser von der Oberfläche und aus dem Inneren des Betons zu entfernen, werden nach der Erhärtungsperiode die Proben 48 h bei 60 °C in getrocknet. Danach wurden die gebrochenen Proben in einem Exsikkator gelagert, um eine weitere Hydratation der Proben weitgehend zu verhindern (Abb. 43).

### **Pyrolyse des Zementsteinmehls**

Die gebrochenen Proben wurden anschließend weiter zerkleinert (Abb. 44) und das fein gemahlene Material mit eine Sieb (1,25 mm) gesiebt. Das Pulver wurde dann in einem Hochtemperaturofen erhitzt (Abb. 45).



Abbildung 44: Retsch-Mühle



Abbildung 45: Elektrischer Hochtemperatur-Heizofen Carbolite Gero RHF 1600

Der Brennprozess für unterschiedliche Proben ist in den folgenden Abbildungen dargestellt. Die Buchstaben oben links bezeichnen den Versuch. Die Heiz- und Kühlraten für alle Proben betragen  $5\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{min}$ .

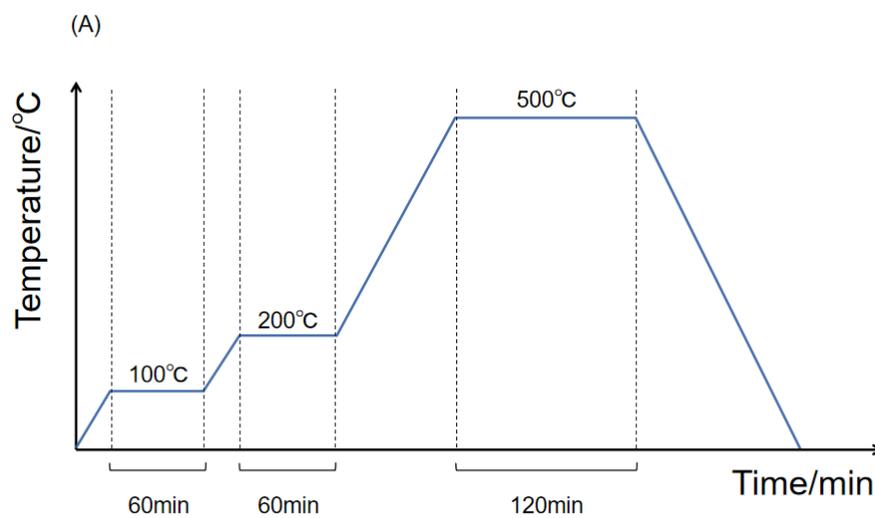


Abbildung 46: Brennprozess A

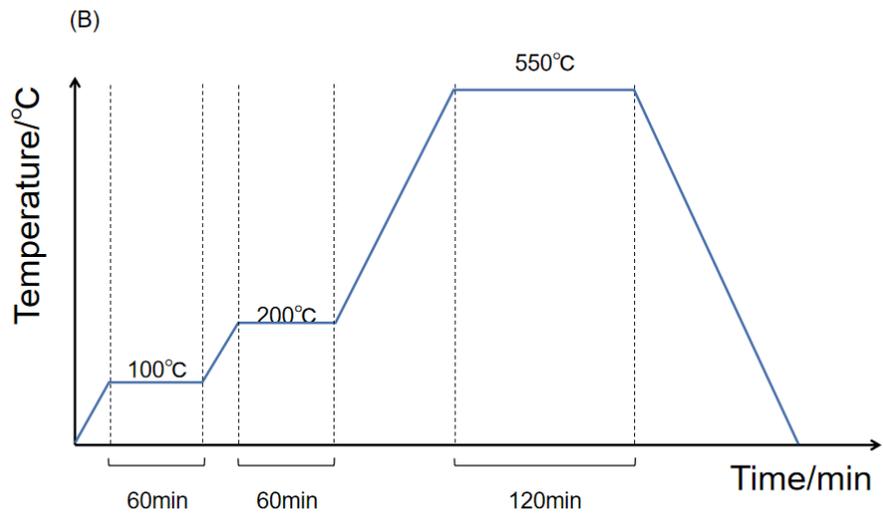


Abbildung 47: Brennp Prozess B

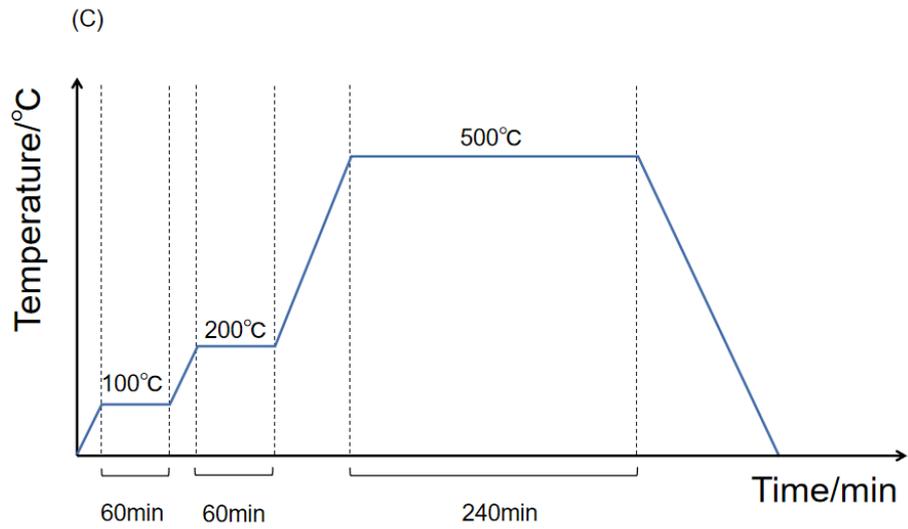


Abbildung 48: Brennp Prozess C

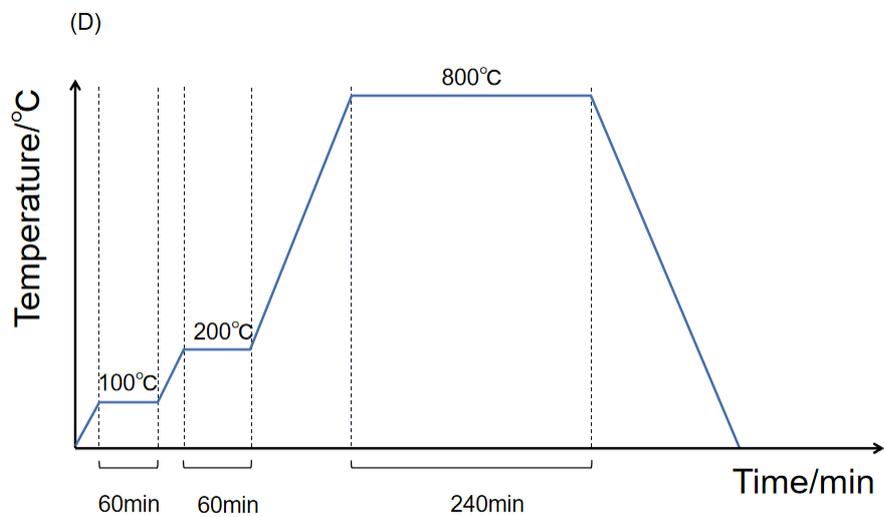


Abbildung 49: Brennp Prozess D

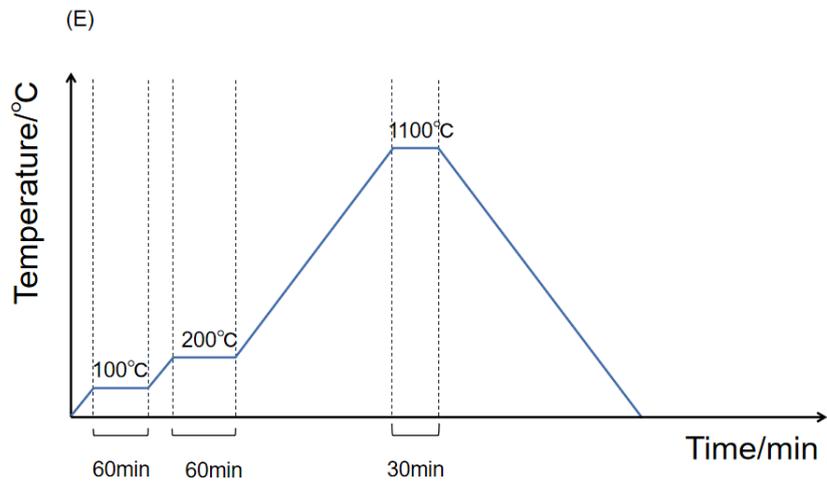


Abbildung 50: Brennp Prozess E

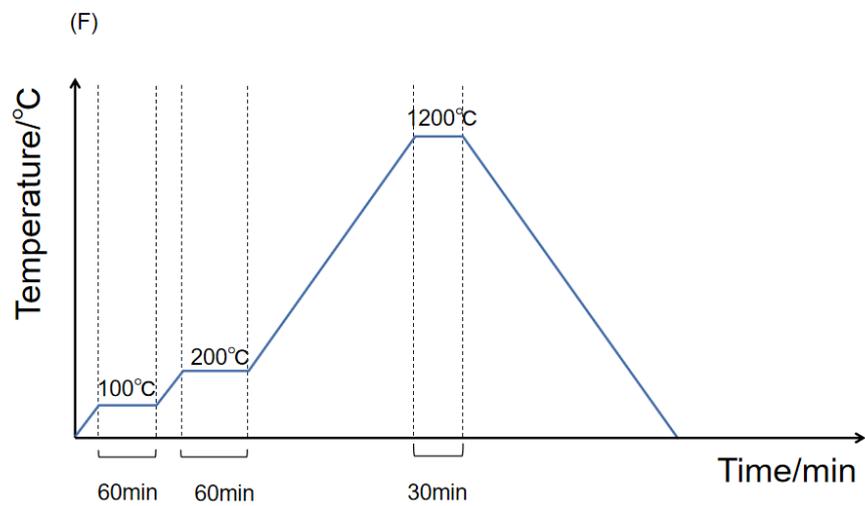


Abbildung 51: Brennp Prozess F

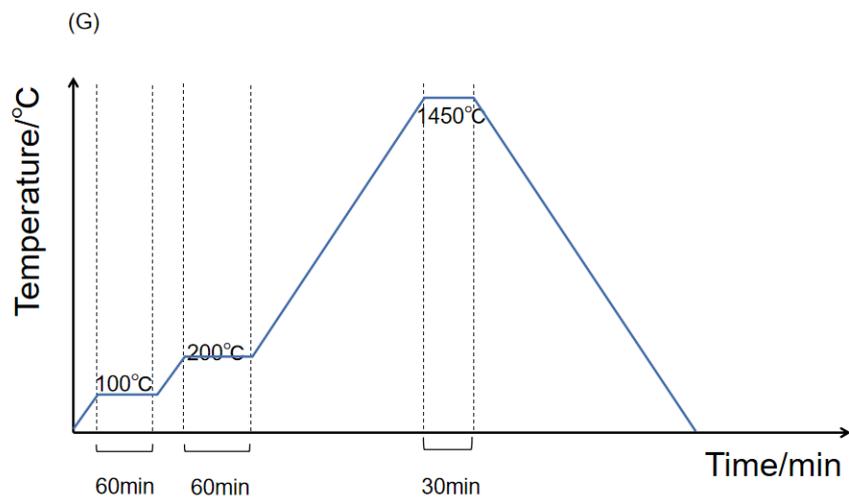


Abbildung 52: Brennp Prozess G

### **Röntgendiffraktometrie (XRD) und Thermogravimetrische Analyse (TGA)**

Der Zement, die hydratisierten Zementsteine und die sechs resultierenden Pyrolysematerialien wurden durch Röntgenbeugungsmuster (XRD) charakterisiert (Abb. 53). Die Spektren wurden mit einer Molybdän-Quelle (Mo-K $\alpha$ 1,  $\lambda = 0,7093 \text{ \AA}$ ) gemessen. Die Software „Highscore“ wurde für die Phasenidentifizierung verwendet.

Die oben genannten Materialien wurden zudem mittel thermogravimetrische Analyse (TGA) charakterisiert (Abb. 54). Die Spektren wurden unter Stickstofffluss und im Temperaturbereich von 100 °C bis 900 °C gemessen. Die Ergebnisse wurden mit der Software „Proteus Analysis“ ausgewertet.



Abbildung 53: Bruker XRD-Messgerät

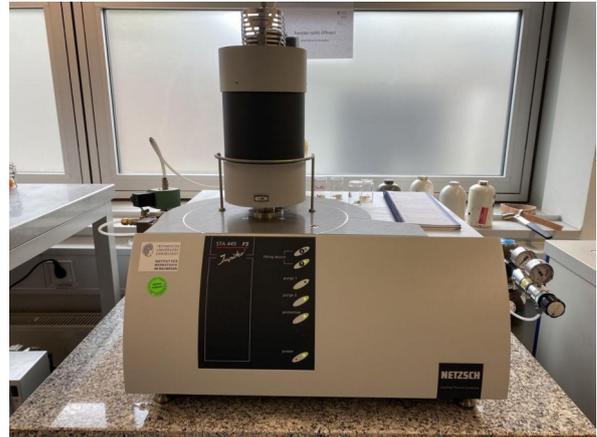


Abbildung 54: Netzsch TGA-Messgerät

## Ergebnisse und Diskussion

### XRD

Zunächst wurden die Elementzusammensetzung und die Kristallzusammensetzung des Zementklinkers mittels XRD untersucht, und die Ergebnisse sind in Abb. 55 dargestellt.

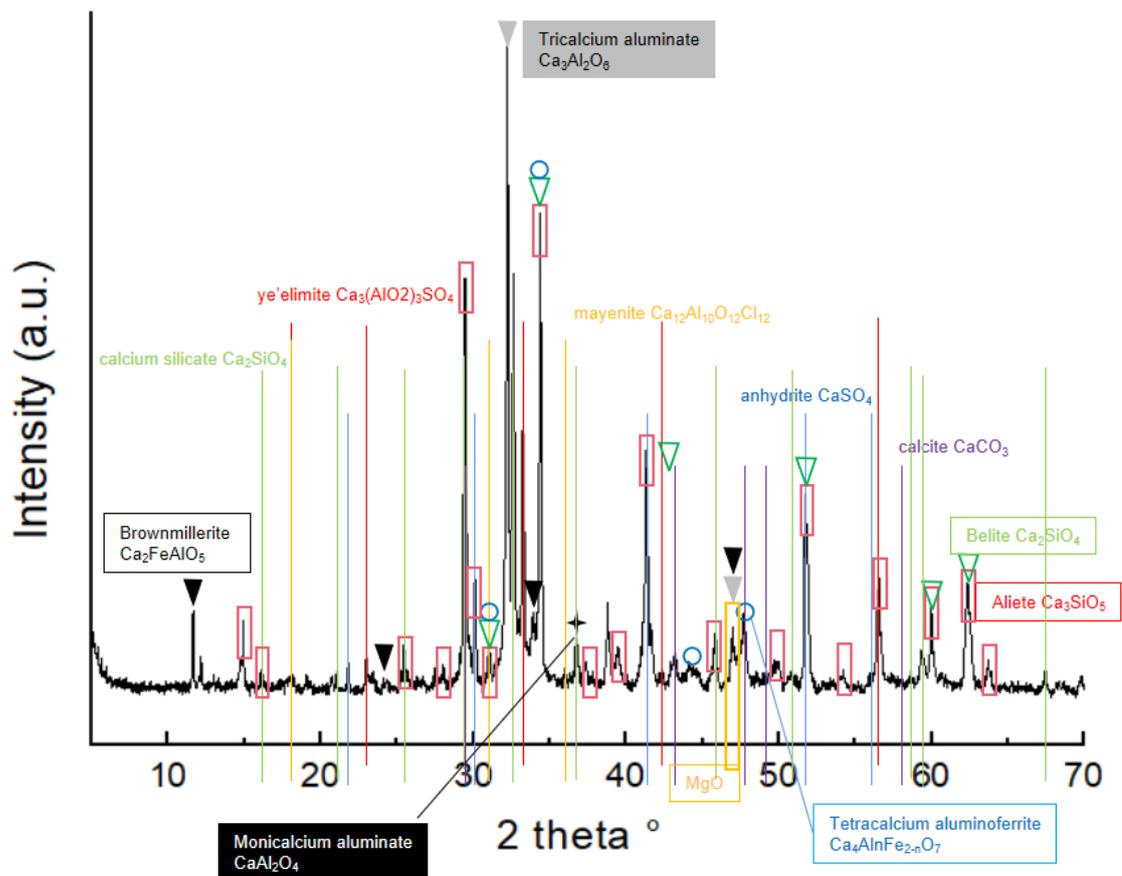


Abbildung 55: XRD-Ergebnisse des Zementrohmaterials.

Aus der Abbildung geht hervor, dass der in diesem Experiment verwendete Zementklinker hauptsächlich Ca-, Fe-, Al- und Si-Elemente enthält, von denen Ca- und Si-Elemente die Calciumsilikat-, Aliete- (C3S) und Belit- (C2S) Kristalle bilden; Ca- und Al-Elemente bilden die Ye'eliemit-, Tricalciumaluminat- (C3A), Monocalciumaluminat- und Mayenit-Kristalle; Ca-, Fe- und Al-Elemente bilden den Brownmillerit, Tetracalciumaluminoferrit (C4AF); darüber hinaus gibt es auch Calcit, Anhydrit und Magnesiumoxid. C3S, C2S, C3A und C4AF sind die Hauptzusammensetzung von Zement [19].

Nach dem Mischen mit Wasser und einer 28-tägigen Hydratation in Wasser wird der Zementklinker in Zementstein umgewandelt. Das XRD-Muster dieses Hydratationsproduktes nach ist in Abb. 56 dargestellt, aus dem deutlich das Vorhandensein von C-S-H-Bildung bei 17 °, 29 °, 32 °, 49 °, 54 °, 60 °, 66 °-Peaks hervorgeht.

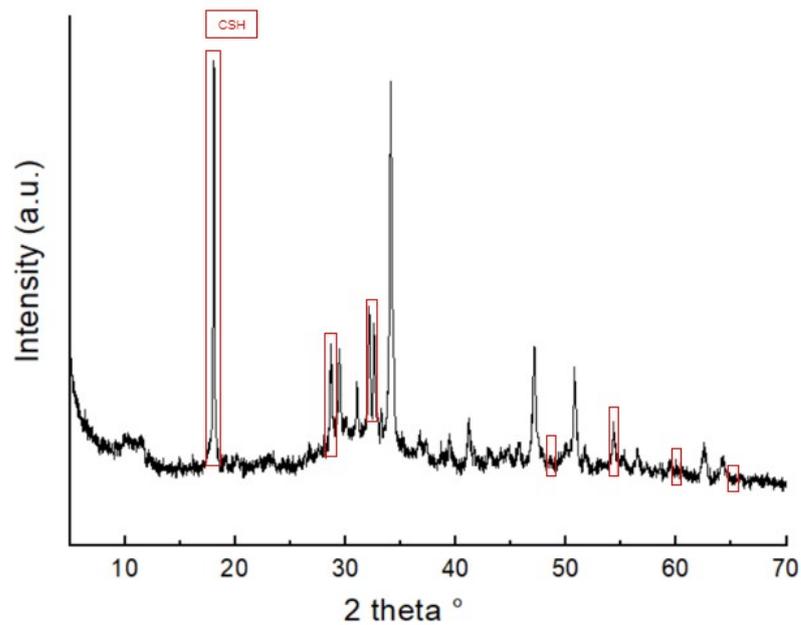


Abbildung 56: XRD-Ergebnisse des Hydratationsproduktes.

Um die Unterschiede der Kristallkomposite zwischen Zementklinkermaterial und 28-Tage-Hydratationsprodukt zu ermitteln, sind die beiden Ergebnisse in Abb. 57 verglichen.

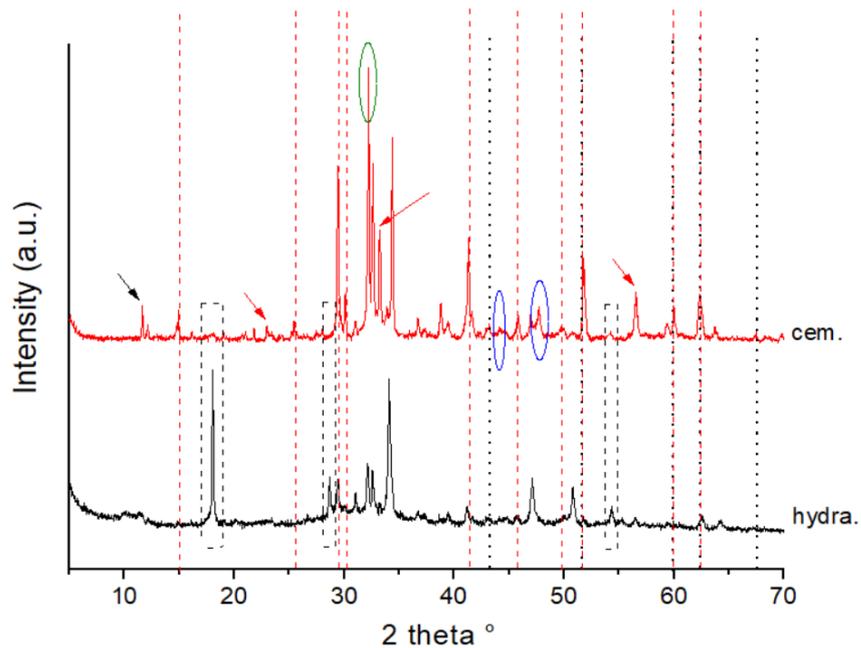


Abbildung 57: Die XRD-Ergebnisse von Zementrohmaterial und Hydratationsprodukte.

C3S und C2S sind durch rote bzw. schwarze gestrichelte Linien gekennzeichnet. Es ist zu erkennen, dass die diesen Strukturen entsprechenden Peaks in der Zementkurve verschwinden oder eine deutliche Abnahme der relativen Intensität aufweisen, während die der C-S-H-Struktur entsprechenden Peaks in der Zementsteinkurve zu finden sind (durch schwarze Kästchen gekennzeichnet). Dies weist darauf hin, dass C3S und C2S sich weitgehend in C-S-H-Kristalle umgewandelt haben. Die Spitzen von C3A (grüner Kreis) und C4AF (blauer Kreis) verschwinden ebenfalls oder schwächen sich in der konkreten Kurve aufgrund ihrer

Umwandlung in AFt und AFm [20] ab. Darüber hinaus verschwinden auch die durch den schwarzen Pfeil gekennzeichneten Brownmillerit-Kristalle und die durch den roten Pfeil gekennzeichneten Ye'elimite-Kristalle.

Um das Ziel zu erreichen, das Produkt wieder in die Zementklinkerstruktur umzuwandeln, ist der direkteste Weg, das kristalline und nicht-kristalline Wasser zu entfernen und dann den richtigen Temperaturbereich zu finden, um auch die Kristallstruktur zu verändern. Zunächst wurde hierfür eine Pyrolyse bei 500 °C und 550 °C für verschiedene Zeiträume durchgeführt (Ergebnisse siehe Abb. 58).

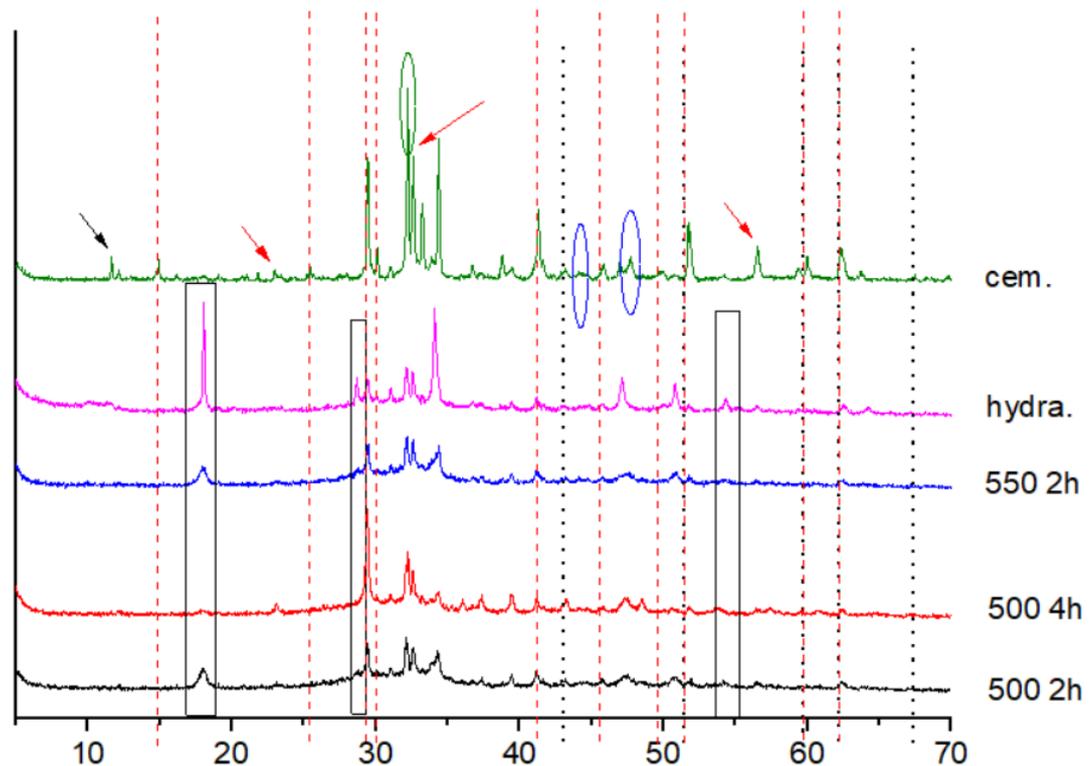


Abbildung 58: Die XRD-Ergebnisse von Zementrohmaterial, Hydratationsprodukt, Pyrolyseproben bei 500 °C, 550 °C für 2 h und 4 h.

Wie aus der Abbildung 58 ersichtlich ist, unterscheiden sich die XRD-Muster der Proben, die im genannten Niedrigtemperaturbereich produziert wurden nicht wesentlich von denen des Zementsteins nach der Hydratation. Die Positionen der Peaks ändern sich nicht wesentlich, abgesehen von der relativen Abschwächung einiger Peak-Intensitäten (hauptsächlich die der C-S-H-Struktur). In der Probe mit längerer Pyrolysezeit (500 °C-4 h) traten die Peaks von Ye'elimite jedoch wieder auf, aber nur ein Reflexionspeak war beteiligt.

Nach Erhalt der oben genannten Daten wurde die Auswahl der steigenden Temperatur bis in den mittleren Temperaturbereich fortgesetzt, und die hydratisierten Betonproben wurden vier Stunden lang bei 800 °C pyrolysiert. Zum Vergleich zeigt Abbildung 59 die Ergebnisse der 500 °C-4 h-Proben und 800 °C-4 h-Proben.

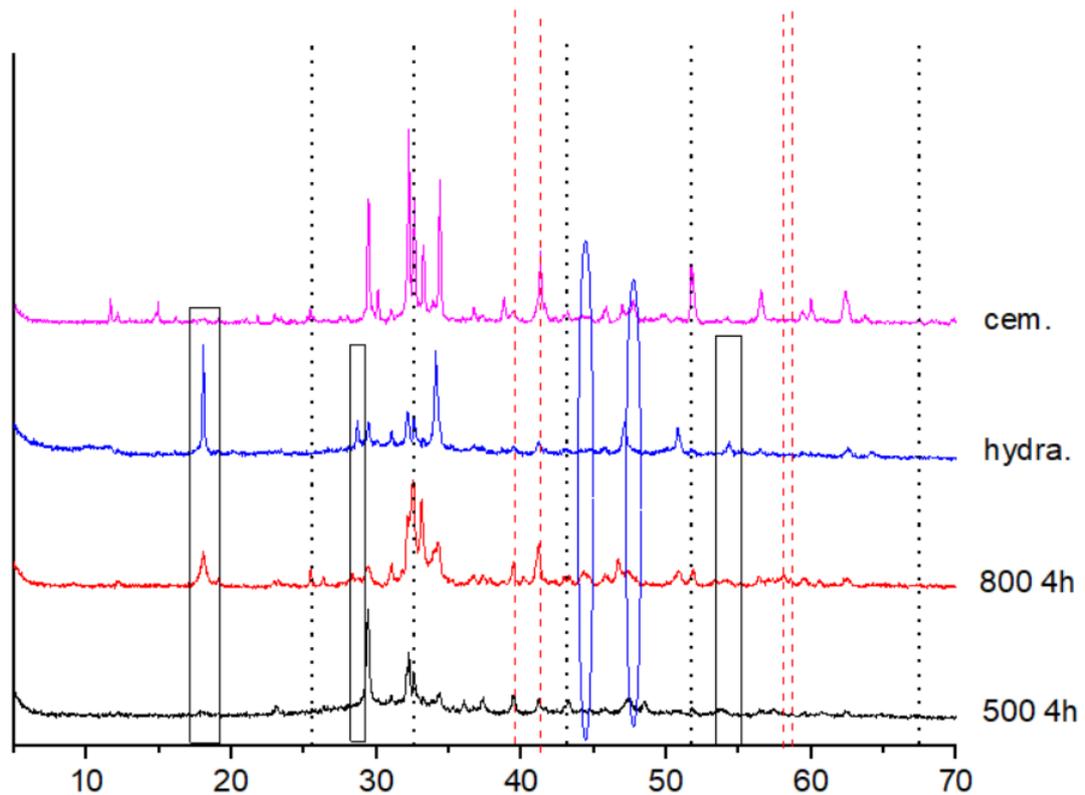


Abbildung 59: Die XRD-Ergebnisse von Zementrohmaterial, Hydratationsprodukt, Pyrolyseproben bei 500 °C, 800 °C für 4 h.

Wie in Abbildung 59 zu sehen, sind die Reflexionsspitzen von C-S-H in den 800 °C-4 h-Proben immer noch vorhanden, aber die relativen Intensitäten nehmen in den 17 °-, 29 °- und 49 °-Positionen, die durch die schwarzen Kästen markiert sind, im Vergleich zu den hydratisierten Proben ab. Während die relativen Intensitäten von C3S, die durch die rote gestrichelte Linie markiert sind, in den Proben im mittleren Temperaturbereich erhöht sind. Eine ähnliche Situation kann für C2S-Kristalle beobachtet werden, die durch die schwarze gestrichelte Linie markiert sind. Insbesondere in den 32.5 ° und 52 °-Positionen, in Verbindung mit den oben genannten Veränderungen, kann vorläufig angenommen werden, dass in der Probe im mittleren Temperaturbereich ein Teil von C-S-H dehydriert und in die ursprüngliche C2S, C3S-Kristallstruktur umgewandelt wurde. Außerdem tauchen die C4AF-Kristalle, die durch blaue Ellipsen gekennzeichnet sind, auch in der Probe im mittleren Temperaturbereich wieder auf.

Im Anschluss wurden Experimente im Hochtemperaturbereich bei 1100 °C und 1200 °C durchgeführt. Mit Rücksicht auf die Sicherheit der Instrumente und die Durchführbarkeit der Versuche wurden die Proben bei diesen Temperaturen nur 0,5 h lang bei der höchsten Temperatur belassen. In Abb. 60 sind die 1200 °C-0,5 h und 1100 °C-0,5 h-Proben zu dargestellt.

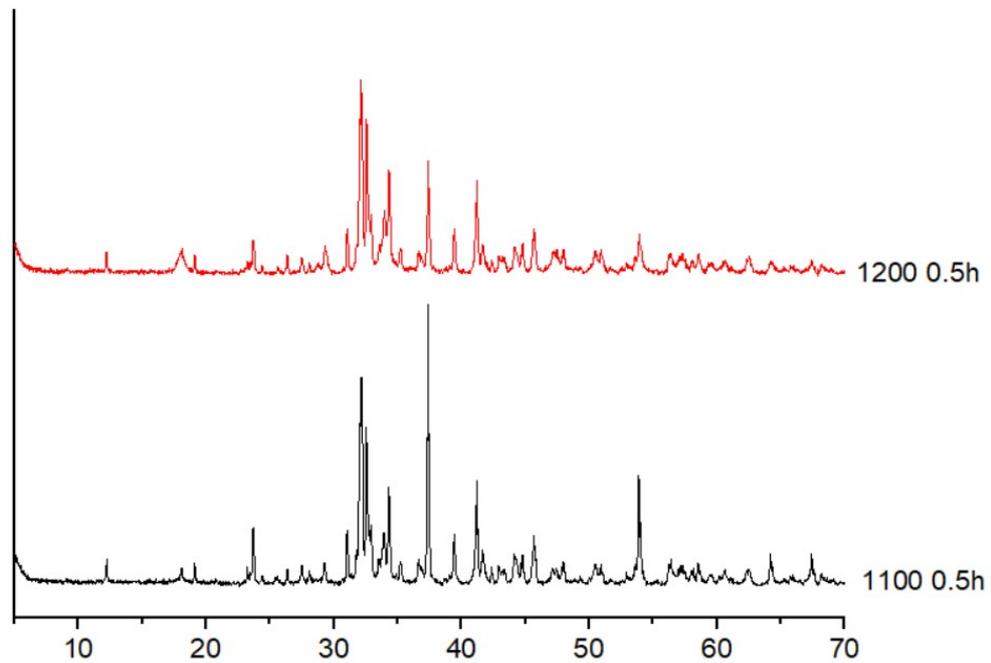


Abbildung 60: Die XRD-Ergebnisse der Pyrolyseproben bei 1100, 1200 °C für 0,5 h.

Es ist festzustellen, dass die XRD-Ergebnisse der beiden Proben nicht sehr unterschiedlich sind, sowohl was die Peakposition als auch die Peakform betrifft. Zum Vergleich wurden die Ergebnisse der Zementklinker, der Hydratationsprodukte, der 800 °C-4 h- und der 1100 °C-0,5 h-Proben in Abb. 61 gemeinsam dargestellt.

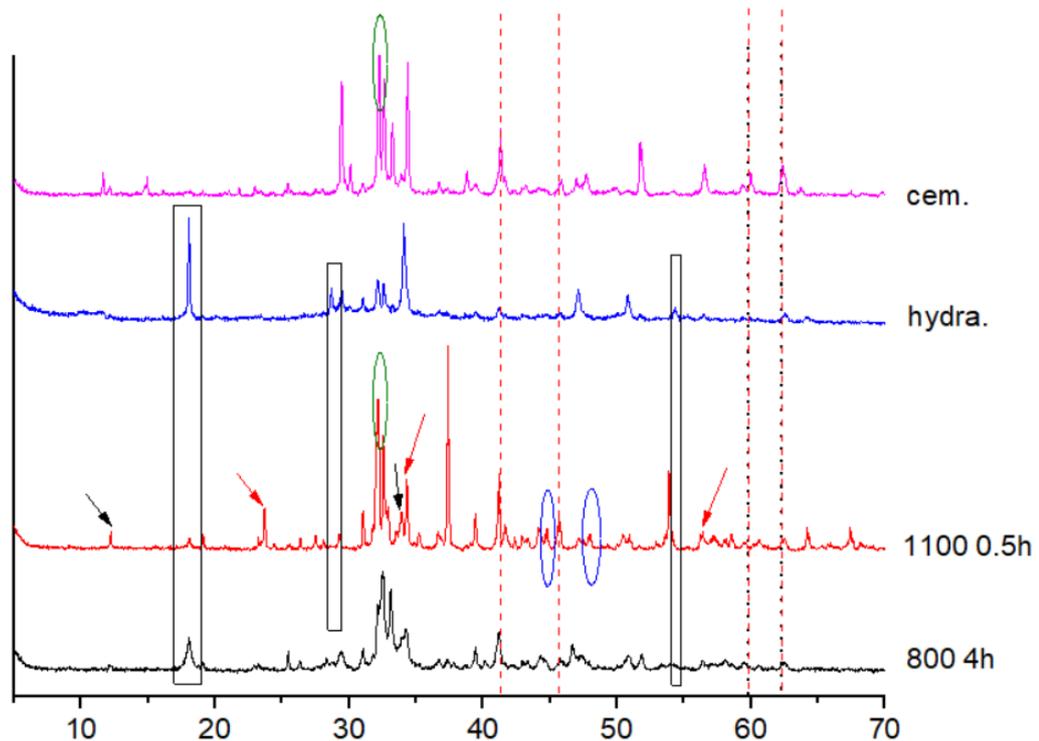


Abbildung 61: Die XRD-Ergebnisse von Zementrohmaterial, Hydratationsprodukt und Pyrolyseproben bei 800 °C, 1100 °C für 4 h und 0,5 h.

Wie in der Abbildung 61 zu sehen ist, zeigt der weitere Anstieg der Temperatur Veränderungen, die mit dem mittleren Temperaturbereich übereinstimmen, d. h., die relative Intensität der C-S-H-Kristallstruktur, die durch den schwarzen Kasten gekennzeichnet ist, wird immer schwächer, und die Reflexionsspitzen sind bei 29 ° und 49 ° kaum noch beobachtet. Die Peaks von C3S, die durch die rote gestrichelte Linie markiert sind, und C2S, die durch die schwarze gestrichelte Linie markiert sind, nähern sich zudem weiter den Peaks Zementklinker an (hier wurde aus Gründen des Vergleichs nur die relative offensichtliche Positionsänderung markiert). Die Intensität von C4AF, die durch die blaue Ellipse markiert ist, wird ebenfalls deutlich erhöht. Es ist erwähnenswert, dass der Peak in der Nähe von C3A, der durch den grünen Kreis markiert ist, fast die gleiche ist wie die von Zementklinker. Die 1100-0.5h-Probe weist fünf deutlichere Peaks auf: die C3A bei 32 °, C3S bei 32 °, 32,8 ° und 34 °, C2S bei 32,5 ° und 34 °, Brownmillierit bei 33 ° bzw. C4AF bei 34 °. Die durch die schwarzen und roten Pfeile markierten Reflexionsspitzen bestätigen ebenfalls das Auftreten von Brownmillerit- und C4AF-Kristallen.

Schließlich wurden auch die hydratisierten Proben einer Pyrolyse bei einer Ultrahochtemperatur von 1450 °C über den gleichen Zeitraum von 0,5 h unterzogen. Zu Vergleichszwecken wurden die Zementklinker-, die Hydratations- und die 1450 °C-0,5 h-Proben zusammen betrachtet, und die Ergebnisse sind in Abb. 62 dargestellt.

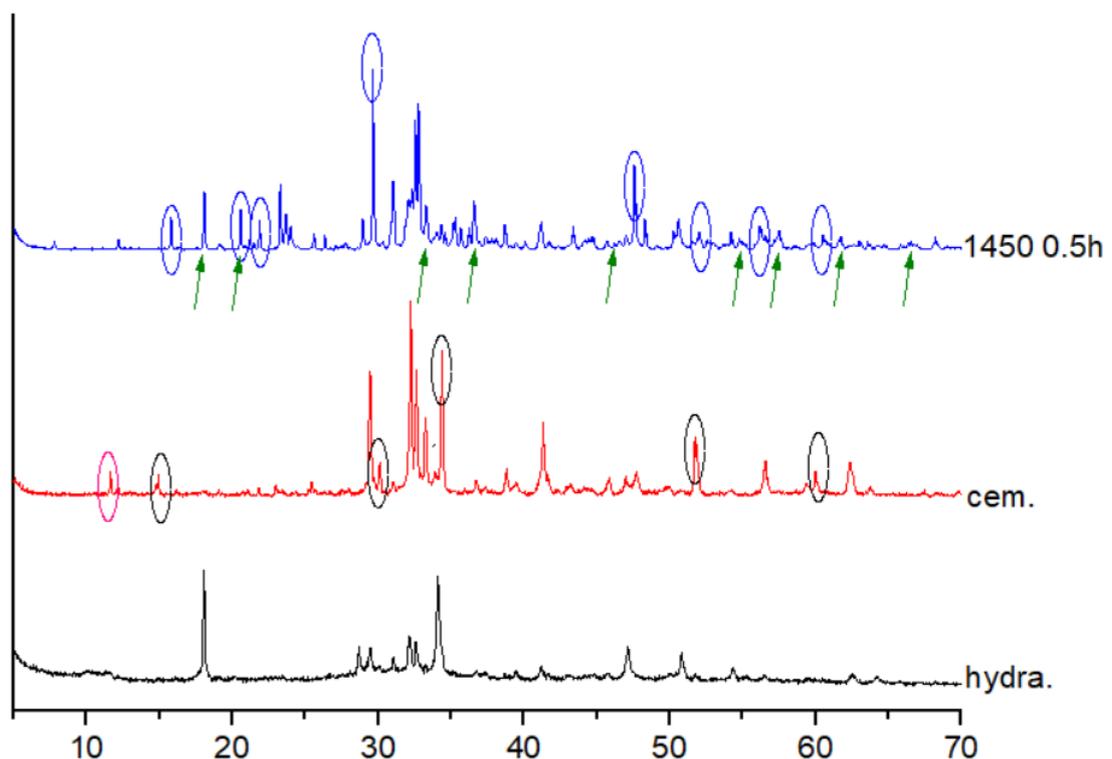


Abbildung 62: Die XRD-Ergebnisse von Zementrohmaterial, Hydratationsprodukten und Pyrolyseproben bei 1450 °C für 0,5 h.

Wie bei den Ultrahochtemperatur-Proben (Abb. 62) zu sehen, ändern sich die XRD-Ergebnisse stark, sowohl was die Peakform als auch die Peakposition betrifft. Drei offensichtliche Punkte sind: das Verschwinden der Peak-Intensität von Brownmillerit bei 12 °, markiert durch die rote Ellipse; die Umwandlung der Belit-Konfiguration von der ursprünglichen Bete-Konfiguration (markiert durch den schwarzen Kreis) in die Alpha-Konfiguration (markiert

durch die blaue Ellipse), Darüber hinaus zeigen die Ergebnisse der Probe bei 1450 °C-0,5 h auch die leicht zu beobachtenden Mayenit-Kristalle ( $\text{Ca}_{12}\text{Al}_{14}\text{O}_{33}$ ), markiert durch den grünen Pfeil.

Der Grund, warum die Peakform der 1450 °C-Probe eine große Veränderung aufweist, ist, dass bei zu hoher Temperatur genügend Energie aufgebracht werden kann, die Grenze überwinden, die einige Kristallkonfigurationsumwandlungen bestimmt. Bekanntermaßen entspricht dies dem Temperatur bei der industriellen Produktion von Zementklinker (zwischen 1300 °C und 1450 °C). Leider ist aus dem gleichen Grund sehr schwierig, C-S-H-Kristalle eindeutig in der 1450 °C-Probe zu bestimmen, da es zu viele Reflexionspeaks gibt, von denen sich einige mit den Positionen der C-S-H-Reflexionspeaks überschneiden.

Um den Anteil der einzelnen kristallinen Phasen in den Proben 1100 °C, 1200 °C und 1450 °C genauer zu verstehen, wurden daher zudem drei XRD-Untersuchungen mit einem Korundanteil von 10 % durchgeführt (Abb. 63 bis 65).

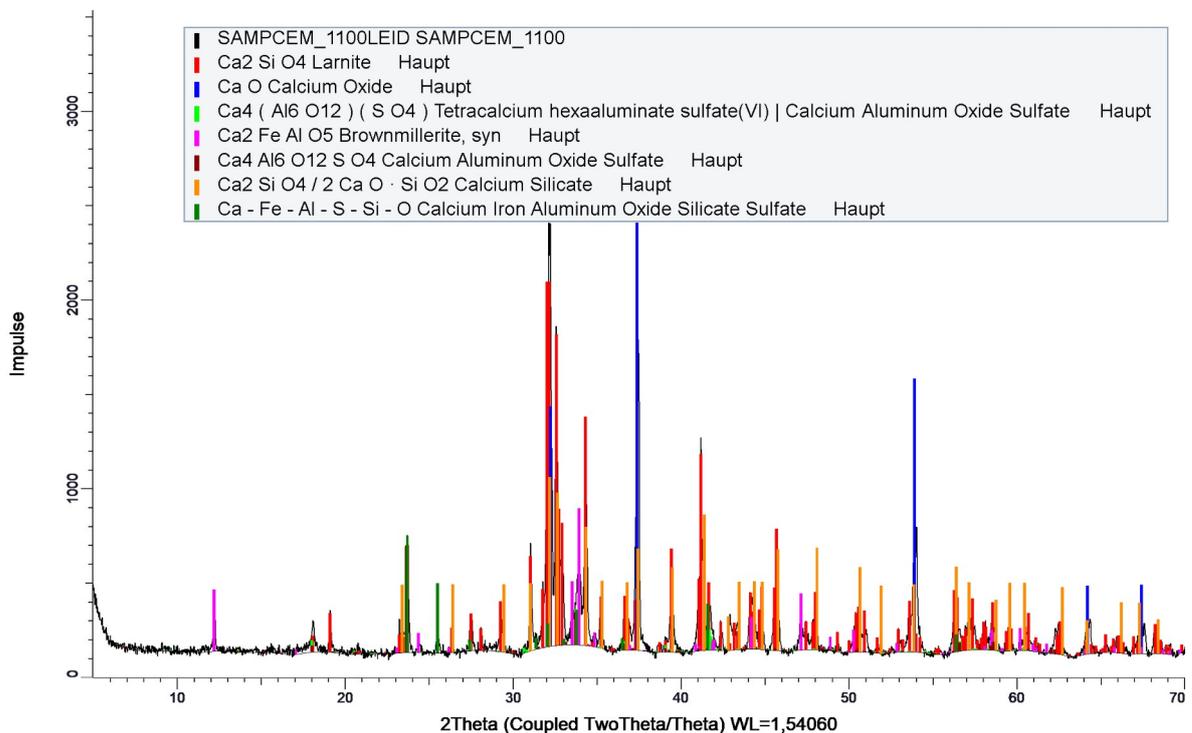


Abbildung 63: Zusammensetzung der Materialphasen der Pyrolyseproben bei 1100 °C für 0,5 h.

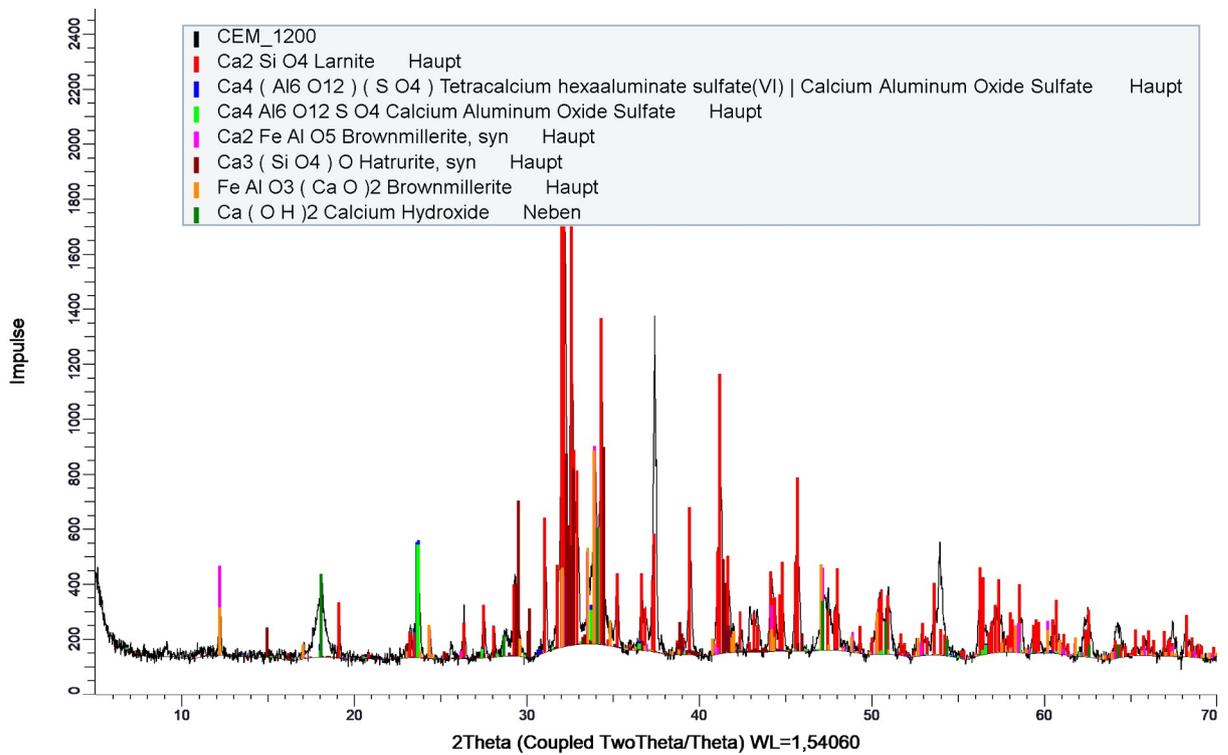


Abbildung 64: Zusammensetzung der Materialphasen der Pyrolyseproben bei 1200 °C für 0,5h.

Da die Unterschiede zwischen den XRD-Mustern von 1100 °C und 1200 °C nicht offensichtlich sind, werden die Muster dieser beiden Proben gemeinsam betrachtet. Aus den Abbildungen 63 und 64 lässt sich schließen, dass Alite und Belite neben einigen anderen kristallinen Komponenten die Hauptzusammensetzung zu sehen sind.

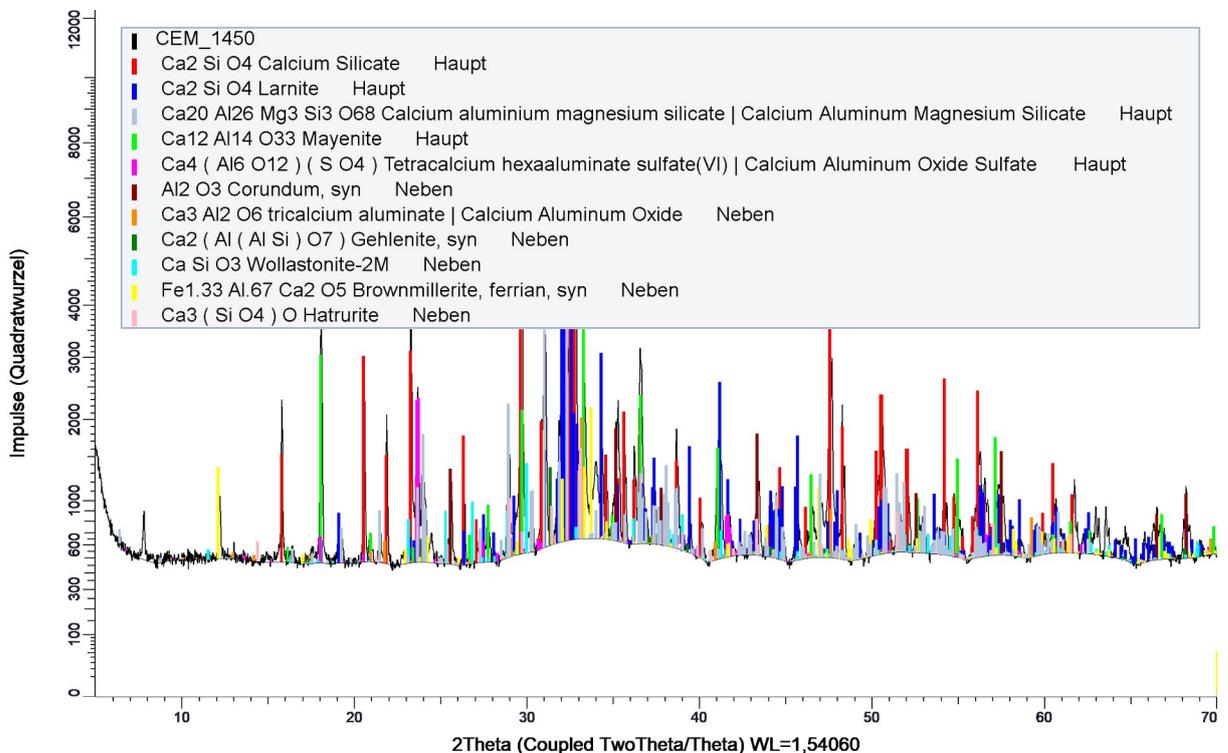


Abbildung 65: Zusammensetzung der Materialphasen der Pyrolyseproben bei 1450 °C C für 0,5 h.

In Abbildung 65 wird ersichtlich, dass die in den Proben enthaltenen Kristallstrukturen im Vergleich zu den Proben 1100 °C und 1200 °C wesentlich komplexer sind, was auch mit den XRD-Ergebnissen der Proben ohne Verfeinerung übereinstimmt. Darüber hinaus wird die vorherrschende Kristallzusammensetzung in 1450 °C eine Mischung aus Kalziumsilikat in der Alpha- und Beta-Phase, außerdem gibt es viele neue Kristalle, die im Zementklinker normalerweise nicht vorhanden sind.

### TGA

Im Rahmen von thermogravimetrischen Analysen von Zementprodukten sind mit steigender Temperatur typischerweise folgende Gewichtsverluste zu verzeichnen:

- 25 °C bis 400 °C Wasserverlust, der in zwei Hauptprozesse unterteilt werden kann:
  - 25 °C bis 100 °C Verlust von nicht gebundenem Wasser in Klüften und Poren
  - 100 °C bis 400 °C Verlust von gebundenem Wasser von C-S-H, AFt, AFm
- 400 °C bis 600 °C Dehydratisierung von Calciumhydroxid
- 600 °C bis 800 °C Pyrolyse von Kalziumkarbonat

Die TGA-Kurven von Zementklinker wurden zunächst mit den Hydratationsprodukten verglichen (Abb. 66).

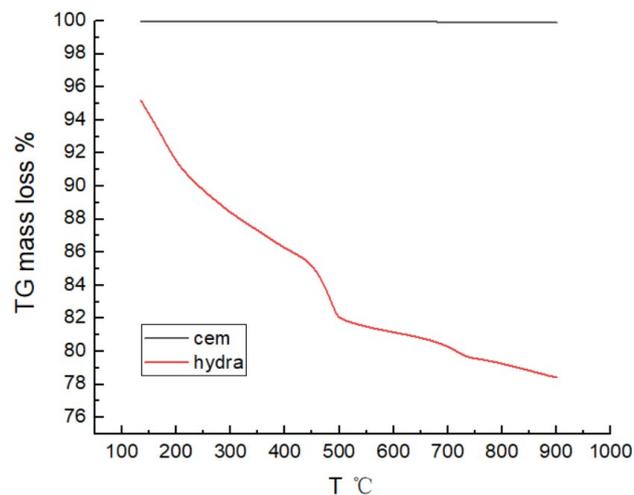


Abbildung 66: Die TGA-Ergebnisse von Zementklinker und Hydratationsprodukt.

Für Zementklinker ist ein TGA-Massenverlust fast nicht vorhanden, was bestätigt, dass der untersuchte Zementklinker tatsächlich kein ungebundenes und gebundenes Wasser enthält. Zudem gibt fast keine Calciumhydroxidverunreinigungen sowie Calciumcarbonatverunreinigungen nach Karbonisierung. Dies befindet sich im Einklang mit der XRD-Ergebnisse.

Im Gegensatz dazu ist in den Profilen der Hydratationsprodukte ein deutlicher Massenverlust zu beobachten, insbesondere zwischen 100 °C und 400 °C. Dies deutet auf das Vorhandensein einer großen Menge gebundenen Wassers in der Probe hin, in Form von C-S-H, AFm oder AFt. Das Vorhandensein von C-S-H kann auch aus den XRD-Ergebnissen abgeleitet werden.

Um die TGA-Ergebnisse der Proben bei jeder Temperatur besser zu verstehen, wurden die Ergebnisse der bei 500 °C, 800 °C und 1200 °C, 1450 °C geprüften Proben zum Vergleich in Abbildung 67 zusammengestellt.

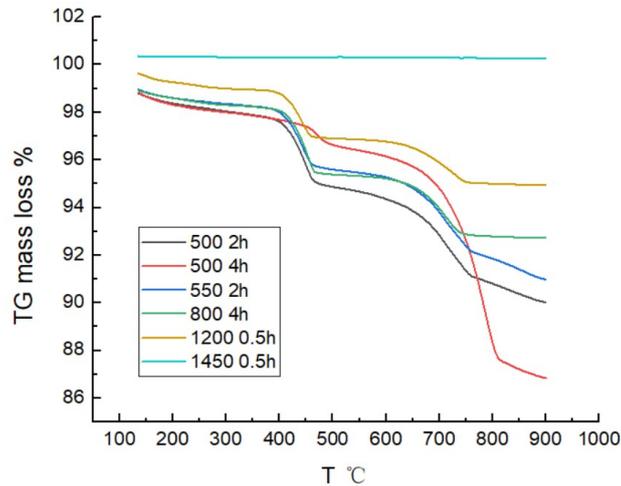


Abbildung 67: Die TGA-Ergebnisse der Pyrolyseproben.

Zum Zwecke der Diskussion sind die Proben in eine Gruppe mit nicht ultrahoher Temperatur bis 1200 °C und eine Gruppe mit ultrahoher Temperatur unterteilt. Wie in Abbildung 67 ersichtlich, haben alle bisher erhaltenen Nicht-Ultrahochtemperatur-Proben einen geringen Massenverlust, wenn sie auf 400 °C erhitzt werden. Der Massenverlust fällt umso geringer aus, wenn die Pyrolysetemperatur steigt. Dies deutet aber darauf hin, dass das gebundene Wasser nach der derzeitigen Methode nicht vollständig aus den Proben entfernt wird. Aber es bleibt bei steigender Pyrolysetemperatur tatsächlich weniger gebundenes Wasser. Dies stimmt auch mit den XRD-Ergebnissen über. Bei der Ultrahochtemperaturgruppe ist dann der Massenverlust sehr unbedeutend und nähert sich fast dem Zementklinker an, was darauf hinweist, dass bei dieser Temperatur fast kein gebundenes Wasser mehr vorhanden ist.

Ein eher kontraintuitives Phänomen ist, dass bei der 500 °C-4h-Probe der Massenverlust zwischen 600 °C bis 800 °C sehr ausgeprägt ist. Dies deutet darauf hin, dass sie mehr Kalziumkarbonat enthält. Der mögliche Grund dafür ist, dass die Probe während der 4 h dauerenden Pyrolyse aufgrund des Kontakts mit der Umgebung während des Experiments vollständig oxidiert wurde und mehr Kalziumkarbonat gebildet wurde.

Um den Massenverlust der einzelnen Proben in den verschiedenen Temperaturbereichen besser zu verstehen, wurden die für repräsentative Proben erzielten Ergebnisse erneut miteinander verglichen (Abb. 68). Der Massenverlust in jeder Temperaturstufe wurde zudem in Form einer Tabelle (Tab. 21) zusammengefasst.

Tabelle 21: Die repräsentativen TGA-Ergebnisse der Pyrolyseproben in verschiedenen Temperaturbereichen.

	<b>100-400</b>	<b>400-600</b>	<b>600-800</b>	<b>800-900</b>
Cem.	0.0299%	0.01778%	0.05786%	0.00156%
Hydra.	13.74072%	5.10123%	1.90085%	0.82859%
550 2h	2.39535%	3.24668%	3.55101%	0.78496%
800 4h	1.93091%	2.84991%	2.50004%	0.06314%
1200 0.5h	1.21346%	2.01303%	1.77153%	0.05907%
1450 0.5h	0.00500%	0.00568%	0.00387%	0.00105%

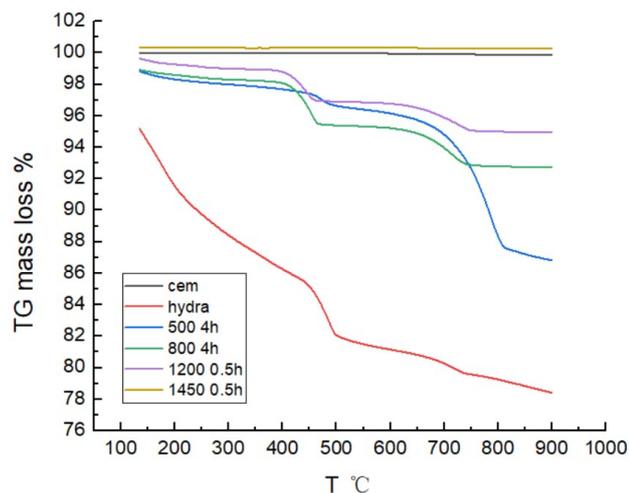


Abbildung 68: Die repräsentativen TGA-Ergebnisse von Pyrolyseproben in verschiedenen Temperaturbereichen.

Aus der Kombination der Daten in der Tabelle wird deutlich, dass das gebundene Wasser umso gründlicher entfernt wird, je höher die Temperatur ist und je geringer die Wahrscheinlichkeit ist, dass Calciumhydroxid- und Calciumcarbonat-Verunreinigungen eingebracht werden.

### Schlussfolgerung

Im Projekt wird durch Hochtemperaturpyrolyse versucht, hydratisierten Beton das gebundene Wasser zu entziehen und möglichst viel der darin enthaltenen Kristallstruktur in den kristallinen Klinker zurückzuführen. Der Grund dafür ist, dass die gleiche elementare Zusammensetzung und die gleiche kristalline Zusammensetzung erforderlich sind, um den Zementanteil in der Hydratation, die Hydratationsgeschwindigkeit und die Ausbeute an Hydratationsprodukten beizubehalten, was sich auf die mechanischen Eigenschaften des resultierenden Betons auswirken wird.

Insgesamt wurden vier verschiedene Temperaturintervalle von Pyrolyseexperimenten aus der gleichen Charge von Hydratationsproduktproben durchgeführt, darunter 500 °C-2 h, 500 °C-4 h, 550 °C-2 h für die Niedertemperaturzone; 800 °C-4 h für die Mitteltemperaturzone; 1100 °C-0,5 h, 1200 °C-0,5 h für die Hochtemperaturzone; und 1450 °C-0,5 h für die Ultrahochtemperaturzone.

Die Niedertemperaturzone benötigt die kürzeste Zeit und verbraucht die wenigste Energie, aber die resultierenden Proben enthalten immer noch eine große Menge an gebundenem Wasser und die Kristallstruktur ist weit von der des Zementklinkers entfernt. Die Mitteltemperaturzone erfordert mehr Energie, aber die Ergebnisse sind nicht zufriedenstellend, da nicht das gesamte gebundene Wasser entfernt werden kann und die Kristallstruktur nicht vollständig wiederhergestellt werden kann. Die Ergebnisse der Hochtemperaturzone sind im Vergleich am zufriedenstellendsten und die Kristallstruktur ist fast die gleiche wie die des Zementklinkers. Obwohl die TGA-Ergebnisse zeigen, dass das gebundene Wasser bei ultrahocher Temperatur fast aus der Probe entfernt wird, ist dies aus mehreren Gründen nicht die richtige Wahl: Erstens ist die Ausbeute des erhaltenen Produkts sehr gering, und die Beschädigung des Produkts ist relativ groß, und es gibt Fälle, in denen Kristalle schmelzen und am Behälter haften bleiben; zweitens ist der Energiebedarf sehr hoch, der Prozess dauert lange und erfordert eine sehr hochwertige technische Ausrüstung; drittens werden neue Kristalle gebildet und es kommt zu einer kristallinen Umwandlung, die die Eigenschaften der Produkte irreversibel und ernsthaft beeinträchtigt.

Ein Gesamtvergleich der Auswirkungen der Zeit oder der maximalen Pyrolysetemperatur auf die resultierenden Proben zeigt, dass die Temperatur eine wichtigere Rolle bei der Regulierung der Eigenschaften der resultierenden Proben spielt, während die Zeit keine signifikante Auswirkung auf die Eigenschaften der Proben hat, und wenn die maximale Pyrolysetemperatur zu lang ist, erhöht sie nicht nur die Kosten, sondern kann auch zu mehr Verunreinigungen führen.

Es ist erwähnenswert, dass sich die in den resultierenden Proben enthaltenen Elemente durch Hydrolyse und Pyrolyse im Vergleich zu Zementklinker nicht wesentlich verändern. Dies bedeutet, dass keine zusätzlichen Elemente hinzugefügt werden müssen, wenn die genaue Konsistenz der kristallinen Form und Kristallstruktur unberücksichtigt bleibt, was eine größere Möglichkeit für die industrielle Produktion dieses Projekts bietet.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass für die vorliegenden Ergebnisse Proben, die bei 1100 °C mit einer Aufheiz- und Abkühlrate von 5 °C pro Minute und einer maximalen Temperaturverweilzeit von 0,5 h hergestellt wurden, befriedigende Eigenschaften aufweisen. Die optimalen Ergebnisse wurden jedoch noch nicht erreicht, was sich vor allem darin widerspiegelt, dass die TGA noch Restkristallwasser anzeigte, das den nachfolgenden Hydratationsprozess beeinträchtigen könnte.

### **3 Ganzheitliche Analyse**

Der übergreifende Rahmen des Forschungsvorhabens bildet eine begleitende ganzheitliche umweltbezogene Analyse. Diese bezieht sich auf die Integration von ökonomischen und ökologischen im gesamten Projektverlauf. Die Analyse umfasst zudem die simultane Modellierung der Stoffkreisläufe, welche auch die Untersuchung von Materialausfallströmungen Innovationen, Risiko und Relevanz beinhaltet. Ein weiterer Fokus liegt auf der ganzheitlichen Analyse des Reduktionspotentials der CO<sub>2</sub>-Bilanz, welches in dem vorliegenden Forschungsvorhaben von herausragender Bedeutung ist. Die Analyse wird im Rahmen einer Ökobilanzierung (LCA) durchgeführt.

#### **a) Zieldefinition und Untersuchungsrahmen**

Das Ziel der Ökobilanzstudie nach DIN EN 14040/14044 des Sandwichelementes ist die Quantifizierung der Umweltauswirkungen des Bauteils mit Schwerpunkt auf CO<sub>2</sub>-Emissionsvermeidung und CO<sub>2</sub>-Sequestrierung im Laufe des gesamten Bauteillebenszyklus. Als Referenzsubstanz für die Ökobilanz wird das Treibhausgas CO<sub>2</sub> gewählt.

Ökobilanzen können konsequenzorientiert (consequential) und beschreibend (attributorial) sein. Im Falle des Sandwichelementes handelt es sich um verschiedene, neuartige Ansätze, weswegen die Ökobilanz konsequenzorientierte und beschreibende Elemente enthält. Konsequenzorientiert werden Prozesse im Bauteillebenszyklus beschrieben, die neuartig und auf das Sandwichelement abgestimmt sind. Beschreibend werden Prozesse behandelt, die mit konventionellen produkt-/material- und verfahrensähnlichen Prozessen verglichen werden können, um den Einfluss des Sandwichelementes auf die Umwelt anschließend bewerten und diskutieren zu können.

Die Umweltproduktdeklaration, auf Englisch Environmental Product Declaration (EPD), ist eine standardisierte Form, Umweltauswirkungen in Bezug auf verschiedene Aspekte quantitativ zu beschreiben [21]. Die Vergleichbarkeit der EPD-Werte ist gegeben, wenn die EPD-Daten aus den EPD-Datensätzen nach DIN EN 15804 erstellt wurden und u.a. produktspezifische Leistungsmerkmale berücksichtigt werden.

Für die Quantifizierung der Wirkungsabschätzungsergebnisse der Ökobilanz der Sandwichelementes werden folgende EPD-Datensätze des Informationszentrums Beton GmbH verwendet:

- Umwelt-Produktdeklaration: Beton der Druckfestigkeitsklasse C 25/30
- Umwelt-Produktdeklaration: Beton der Druckfestigkeitsklasse C 35/45
- Umwelt-Produktdeklaration: Cavipor® FTX 1
- Umwelt-Produktdeklaration: Bauschutt-Aufbereitung
- Umwelt-Produktdeklaration: Bauschutt-Deponierung
- Umwelt-Produktdeklaration: Zement
- Prozess-Datensatz: Betonfertigteile Wand 40 cm (de)

## b) LCA: Stoffkreislauf Sandwichelement

Die Produktsysteme des Sandwichelementes werden als geschlossene Stoffkreisläufe modelliert. Der gesamte Bauteillebenszyklus des Sandwichelementes wird durch drei geschlossene Stoffkreisläufe dargestellt. Der Stoffkreislauf des Sandwichelementes beschreibt die Prozesseinheiten (PE), die für den RC-Beton und den mineralischen Dämmschaum identisch sind. Aus der Herstellung des Sandwichelementes folgen die geschlossenen Stoffkreisläufe des RC-Betons und des mineralischen Dämmschaums.

Die funktionelle Einheit ist ein Quadratmeter Sandwichelement. In Tabelle 22 sind relevante Werte für die Berechnung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung dargestellt.

Tabelle 22: Funktionelle Einheit Sandwichelement

Bezeichnung	Wert	Einheit
Funktionelle Einheit	1	m <sup>2</sup>
Umrechnungsfaktor 1m <sup>3</sup> RC-Beton auf 1m <sup>3</sup> Sandwichelement	0,56	-
Umrechnungsfaktor 1m <sup>3</sup> MSB auf 1m <sup>3</sup> Sandwichelement	0,44	-
Umrechnungsfaktor von 1m <sup>3</sup> Sandwichelement auf 1m <sup>2</sup> Sandwichelement	0,365	-

### Typ der EPD: Cradle-to-Cradle mit Optionen.

Der geschlossene Stoffkreislauf des Sandwichelementes berücksichtigt im Sinne der Kreislaufwirtschaft die Produktion des RC-Betons und des mineralischen Dämmschaums unter Herstellung und Wiederaufbereitung der Materialien, die nachhaltige Konzeptionierung im Nutzungsstadium des Bauteils und die Herstellung und Wiederverwendung von Recyclingprodukten, insbesondere der RC-Gesteinskörnung und von Zementrezyklaten. Einzelne Prozesseinheiten werden in der Modellierung der Stoffkreisläufe des RC-Betons und des mineralischen Dämmschaums detailliert erläutert.

Der Stoffkreislauf des Sandwichelementes beinhaltet die Prozesseinheiten, die für den RC-Beton und für den mineralisierten Dämmschaum identisch sind. In Abbildung 69 ist der geschlossene Stoffkreislauf des Sandwichelementes dargestellt und anschließend erläutert. Zu den Prozesseinheiten gehört die Herstellung des Sandwichelementes (PE 0), der Einbau der Fertigteile (PE A), die Nutzung (PE B) und das Bereitstellen von Sekundärrohstoffen (PE C).

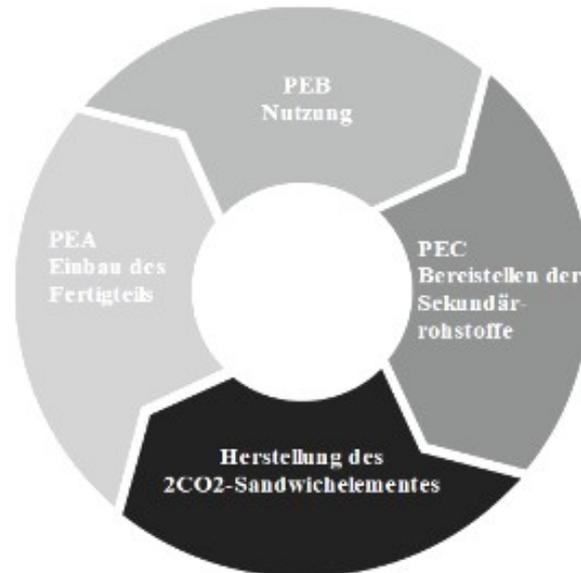


Abbildung 69: Stoffkreislauf Sandwichelement.

### **Prozesseinheit A: Einbau des Fertigteils**

Die Einzelprozesse sind der Transport zur Baustelle (A1) und der Einbau des Fertigteils (A2).

**A1:** Verwendet wird ein gewichteter Mittelwert für den Transport zur Baustelle. Bei bekannten Transportentfernungen sind diese anzugeben.

**A2:** Die Umwelteinwirkungen für den konventionellen Einbau von Fertigteilen auf der Baustelle aus dem gewichteten Mittelwert des Einbaus von Transportbeton und des Einbaus von Fertigteilen. Die Betonfertigteile werden mittels Autokran oder Turmdrehkran auf der Baustelle montiert.

### **Prozesseinheit B: Nutzung**

Die Einzelprozesse sind die Karbonatisierung während der Nutzungsdauer (B1) und Instands- und Reparaturmaßnahmen (B2).

**B1:** Die Karbonatisierung des Betons während der Nutzungsphase eines Bauteils wird als negatives Treibhauspotential mit 10 kg CO<sub>2e</sub> pro Kubikmeter Beton in der Ökobilanz angenommen.

**B2:** Instandhaltungs- und Reparaturmaßnahmen für Betonbauteile während der Referenznutzungsdauer von 50 Jahren. In der Regel fallen keine Umweltlasten an.

### **Prozesseinheit C: Bereitstellen der Sekundärrohstoffe**

Die Einzelprozesse sind der Rückbau/ Abbruch von Betonbauteilen (C1) und der Transport des Abbruchmaterials zur Aufbereitung (C2).

**C1:** Der Rückbau erfolgt durch Longfrontbaggern mit Abbruchzangen unter Einleitung von Druckkraft („Pressschneiden“).

**C2:** Transport des groben Betonabbruchmaterial zur Brecheranlage am Fertigteilwerk.

### **Abschneidekriterien**

Es werden die Energien für das Mischen, die Verdichtung, die Wärmebehandlung im Betonfertigteilwerk und interne Transporte berücksichtigt.

### c) LCA: Stoffkreislauf RC-Beton

Die funktionelle Einheit ist 1 m<sup>3</sup> bewehrter Konstruktionsbeton im Hochbau, Tief- oder Ingenieurbau. In Tabelle 23 sind relevante Werte für die Berechnung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung dargestellt.

Tabelle 23: Funktionelle Einheit RC-Beton

Bezeichnung	Wert	Einheit
Funktionelle Einheit	1	m <sup>3</sup>
Dichte (Mittelwert)	2,5	kg/m <sup>3</sup>
Umrechnungsfaktor auf 1 m <sup>2</sup> Sandwichelement	0,56	-

#### Typ der EPD: Cradle-to-Gate mit Optionen.

Der geschlossene Stoffkreislauf des RC-Betons berücksichtigt im Sinne der Kreislaufwirtschaft die Produktion des RC-Betons unter Herstellung und Wiederaufbereitung der Materialien, sowie die Herstellung und Wiederverwendung von Recyclingprodukten, insbesondere der RC-Gesteinskörnung.

In Abbildung 70 ist das Produktsystem des RC-Betons als geschlossener Kreislauf dargestellt und anschließend erläutert.



Abbildung 70: Stoffkreislauf RC-Beton.

#### Prozesseinheit D: Bereitstellen der RC-Gesteinskörnung

Brechen des Altbetons und Abfallbehandlung (Abschneide) (D)

**D:** Der Betonabbruch/Altbeton wird in einer stationären Brecheranlage des Fertigteilwerkes SHW zerkleinert und in den zwei nachgeschalteten Siebanlagen in einzelne Kornfraktionen getrennt. Manuelle und maschinelle Sortierbereiche ermöglichen eine fremdstofffreie Gesteinskörnung. Magnetabscheider sortieren Eisenmetalle aus.

#### Prozesseinheit E: Auslagerung der RC-Gesteinskörnung zur gezielten CO<sub>2</sub>-Sequestrierung

Bauschuttdeponierung (E1) und CO<sub>2</sub>-Sequestrierung durch Auslagerung (E2).

**E1:** Die Deponierung von 1 kg Bauschutt in einer Deponie mit einer Höhe von 30 Meter und einem Gelände von 40 000 m<sup>2</sup> und einer Lagerungsdauer von 100 Jahren.

**E2:** Die Ergebnisse der TGA zeigen, dass durch die Auslagerungstechnik der RC-Gesteinskörnung gezielt CO<sub>2</sub> aufgenommen und im Zementstein der RC-Gesteinskörnung dauerhaft gebunden wird. In der Ökobilanz des Sandwichelementes wird diese CO<sub>2</sub>-Aufnahme als Gutschrift durch ein negatives Treibhauspotential angerechnet. Es wird ein Wert von 0,315 kg CO<sub>2</sub> pro Kubikmeter RC-Beton angerechnet.

**Prozesseinheit F: RC-Betonherstellung im Fertigteilwerk**

Gewinnung und Aufbereitung der Betonausgangsstoffe (F1), Transport der Rohstoffe zum Fertigteilwerk und interne Transporte (F2), Betonherstellung im Fertigteilwerk (F3) und Gutschrift für die Verwendung von Betonabbruch (F4).

**F4:** Die Gutschrift für die Verwendung von Betonabbruch bezieht sich auf die in der DAfStb-Richtlinie festgelegten Grenzen zur Verwendung von RC-Gesteinskörnung in Beton abhängig der Expositionsklassen. Im vorliegenden RC-Beton wird ein 100 prozentiger Zuschlag an RC-Gesteinskörnung verwendet, welches deutlich höher ist als in der DAfStb-Richtlinie festgelegten Grenze von 35 % Zuschlag an RC-Gesteinskörnung für die Expositionsklasse XC4. Die Einzelprozesse F1 und F2 haben ebenfalls Einfluss auf die Gutschrift, da sowohl die Gewinnung und Aufbereitung der Betonausgangsstoffe als auch der Transport der Rohstoffe durch den hohen Rezyklatanteil des RC-Betons deutlich weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen verursachen. Um eine Vergleichbarkeit der EPD-Werte zu gewährleisten werden die EPD-Werte der Einzelprozesse F1 und F2 aus produktähnlichen Datensätzen beibehalten und die Gutschrift für die Verwendung von Betonabbruch mit dem Faktor 2,0 multipliziert.

**Abschneidekriterien**

Für die Berechnung der EPD-Werte werden Zusatzmittel (0,1 M.-%) und Zusatzstoffe (2,6 M.-%) beim Mischungsentwurf des RC-Betons berücksichtigt. Diese Abschätzungen und Annahmen sind von Deutsche Bauchemie (DBC) auf Grundlage umfassender Datensätzen aus der Bauindustrie samt Marktanteilen getroffen worden.

Vernachlässigt werden die Umweltlasten aus der Herstellung und Nutzung der Schalung, da diese weniger als 1 % der Gesamtwerte für die Betonherstellung der eingesetzten Ressourcen und der eingesetzten Primärenergie betragen.

Der Bewehrungsanteil wird mit 0,002375 m<sup>3</sup> pro Quadratmeter Sandwichelement angenommen. Die Verbindungsmittel Schöck Isolink TA H haben einen Durchmesser von 13,5 mm. In einem Quadratmeter Sandwichelement sind sechs Verbindungsmittel, woraus sich ein Anteil von 0,003435 m<sup>3</sup> ergibt. Für die Berechnung der Ökobilanz wird ein durchschnittlicher Bewehrungsgehalt angenommen.

**d) LCA: Stoffkreislauf des mineralisierten Dämmschaum**

Die funktionelle Einheit ist ein Kubikmeter mineralisierter und unbewehrter Dämmschaum. In Tab. 24 sind relevante Werte für die Berechnung der Ergebnisse der Wirkungsabschätzung dargestellt.

*Tabelle 24: Funktionelle Einheit MSB*

Bezeichnung	Wert	Einheit
Funktionelle Einheit	1	m <sup>3</sup>
Angestrebte Rohdichte (Mittelwert)	160	kg/m <sup>3</sup>
Rohdichte Zement	3100	kg/m <sup>3</sup>
Umrechnungsfaktor von 1 t auf 1 kg	0,001	-
Umrechnungsfaktor Bindemittelanteil auf 1 m <sup>3</sup> MSB	0,0835	-
Umrechnungsfaktor auf 1 m <sup>2</sup> Sandwichelement	0,44	-

### **Typ der EPD: Cradle-to-Gate mit Optionen.**

Der geschlossene Stoffkreislauf des MSBs berücksichtigt im Sinne der Kreislaufwirtschaft die Produktion des Schaumbetons unter Herstellung und Wiederaufbereitung der Materialien, sowie die Herstellung und Wiederverwendung von Recyclingprodukten, insbesondere der Wiederverwendung von Rezyklaten bei der Zementherstellung. In Abbildung 71 ist das Produktsystem des RC-Betons als geschlossener Stoffkreislauf dargestellt und anschließend erläutert.

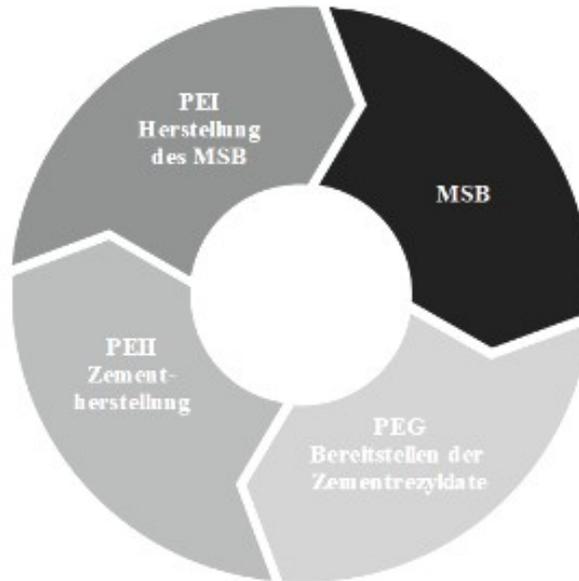


Abbildung 71: Stoffkreislauf MSB.

### **Prozesseinheit G: Bereitstellen der Rezyklate für die Zementherstellung**

Brechen und Mahlen des Schaumbetons (G).

### **Prozesseinheit H: Zementherstellung**

Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen (H1), Transport der Rohstoffe zum Werkstor und interne Transporte (H2), Zementherstellung (H3) und Gutschrift für die Verwendung von Zementrezyklaten (H4).

**H4:** Die Wiederverwendung von Zementrezyklaten durch Klinkersubstitution wird in der Ökobilanz als negatives Treibhauspotential angerechnet. Es wird ein Wert von 11,97 kg CO<sub>2</sub> pro Tonne Zement angerechnet.

### **Prozesseinheit I: Herstellung des mineralisierten Dämmschaumes**

Herstellung von Metakaolin (I1) und Herstellung des mineralisierten Dämmschaumes und Installation (I2).

**I1:** Die Herstellung von synthetischem Metakaolin mit einem Anteil von 11,8 kg/m<sup>3</sup> wird dem Zementgehalt als Bindemittelgehalt auf der sicheren Seite angerechnet. Der rechnerische Gesamtbindemittelgehalt des mineralischen Dämmschaums beträgt 83,5 kg/m<sup>3</sup>.

**I2:** Berücksichtigt sind Mischen der Komponenten mit Wasser, Applikation, Reinigung und Verpackungsentsorgung. Der Schaumbeton ist selbstverdichtend und wird mit Hilfe von drei Pumpen und Druckluft hergestellt.

### **Abschneidekriterien**

Energie- und Stoffströme, die kleiner als ein Prozent der Gesamtmenge ausmachen, werden bei der Installation des Schaumes nicht berücksichtigt.

### e) Wirkungsabschätzung

Die Wirkungsabschätzung des Sandwichelementes betrachtet die Wirkungskategorie „anthropogener Treibhauseffekt“, die Wirkung der Wirkungskategorie ist der Treibhauseffekt. Der Wirkungsindikator ist das Treibhauspotential, auf Englisch Global Warming Potential. In den EPD-Datensätzen wird der Wirkungsindikator Treibhauspotential als Globales Erwärmungspotential mit der Abkürzung GWP bezeichnet. Die Wirkung bezieht sich auf die Referenzsubstanz CO<sub>2</sub>. Der typische Charakterisierungsfaktor bzw. die Einheit des Wirkungsindikators ist kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente. Relevante Stoffströme sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Laufe des Bauteillebenszyklus und die CO<sub>2</sub>-Sequestrierung durch die Auslagerung der RC-Gesteinskörnung. Die quantitativen Werte der Wirkungsabschätzungsergebnisse werden unter Berücksichtigung der gewählten Datensätze, aller in der Sachbilanz getroffenen Annahmen, berechneter Umrechnungsfaktoren in Bezug auf die funktionelle Einheit der LCA und unter Berücksichtigung aller in dieser Arbeit ausgearbeiteten und aus der Auswertung der Versuchsergebnisse gewonnenen Daten berechnet. (X = in Ökobilanz enthalten; ND = Nicht Deklariert)

Tabelle 25: Ergebnisse RC-Beton.

Bereitstellen der RC-GK	Auslagerung der RC-GK und CO <sub>2</sub> -Sequestrierung		RC-Betonherstellung im Fertigteilwerk	
	Bauschuttdeponierung	CO <sub>2</sub> -Sequestrierung	Betonherstellung im Fertigteilwerk	Gutschrift für Verwendung von Betonabbruch
D	E1	E2	F1	F2
X	X	X	X	X

#### ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ UMWELTAUSWIRKUNGEN: 1m<sup>3</sup> RC-BETON

Parameter	Einheit	D	E1	E2	F1	F2
GWP	[kg CO <sub>2</sub> e]	6,01	0,01364	-0,785	244	-42,8

Tabelle 26: Ergebnisse mineralisierter Schaumbeton.

Bereitstellen der Zementrezyklate	Zementherstellung				Herstellung des MSB	
	Gewinnung und Aufbereitung von Rohstoffen	Transport der Rohstoffe zum Werkstor und interne Transporte	Zementherstellung	Gutschrift für die Verwendung von Zementrezyklaten	Herstellung von Metakaolin	Installation
<b>G</b>	<b>H1</b>	<b>H2</b>	<b>H3</b>	<b>H4</b>	<b>I1</b>	<b>I2</b>
X	X	X	X	X	ND	X

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ UMWELTAUSWIRKUNGEN: 1m<sup>3</sup> MSB

Parameter	Einheit	G	H1-H3	H4	I2
<b>GWP</b>	[kg CO <sub>2</sub> e]	5,05	49,10	-0,86	4,45

Tabelle 27: Ergebnisse Sandwichelement.

Herstellung		Einbau des Fertigteils		Nutzung		Bereitstellen der Sekundärrohstoffe	
RC-Beton	MSB	Transport zur Baustelle	Einbau des Fertigteils	Karbonatisierung während der Nutzungsphase	Instands- und Reparaturen	Rückbau/Abbruch der Betonbauteile	Transport des Abbruchmaterials zur Aufbereitung
<b>RC</b>	<b>MSB</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>
X	X	X	X	X	ND	X	X

ERGEBNISSE DER ÖKOBILANZ UMWELTAUSWIRKUNGEN: 1m<sup>2</sup> 2CO<sub>2</sub>-SANDWICHELEMENT

Parameter	Einheit	RC	MSB	A1	A2	B1	B2	C1	C2
<b>GWP</b>	[kg CO <sub>2</sub> e]	59,69	9,39	3,32	0,39	-3,65	ND	1,13	4,38

**f) Auswertung der Ökobilanzierung**

In Abbildung 72 ist das globale Erwärmungspotential (GWP) der einzelnen Prozesse aus dem Stoffkreislauf und den Ergebnissen der Ökobilanz für die Herstellung von 1 m<sup>2</sup> Sandwichelement in Prozent anteilig dargestellt. Die Gutschrift aus der Karbonatisierung des Betons während der Nutzungsphase (PE B) wird der Herstellung des RC-Betons angerechnet.

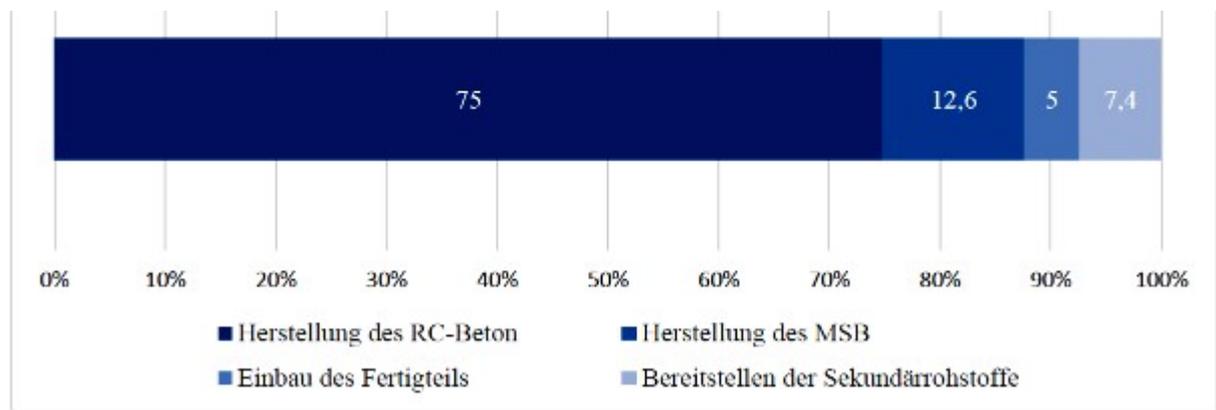


Abbildung 72: GWP-Anteile [%] der Prozesse für die Herstellung von 1 m<sup>2</sup> Sandwichelement in Prozent.

Die Herstellung des RC-Betons ist für 75 % des GWP des Sandwichelementes verantwortlich. Es folgt eine Diskussion verschiedener Aspekte:

Das GWP der Herstellung von handelsüblichen Beton der Druckfestigkeitsklasse C35/45 wird von der Zementherstellung mit einem Anteil von 84,5 % am gesamten GWP stark dominiert. In der Betrachtung des GWP für das Sandwichelement lässt sich diese Dominanz in der Herstellung des RC-Betons mit einem Anteil von 75 % am GWP wiederfinden.

Die Schichtdicke des MSB liegt bei 16 cm, die Schichtdicke des RC-Betons liegt bei 20,5 cm (Summe aus der Trag- und Deckschicht). Obwohl die Schichtdicken nahe beieinander liegen, ist die Herstellung des RC-Betons für das sechsfache des GWP des Sandwichelementes verantwortlich. Das liegt u. a. daran, dass der mineralische Dämmschaum recyclingfreundlich konzipiert und mit einer hohen Rohdichte entworfen ist. Der geringe Bindemittelgehalt führt zu einer deutlich besseren Ökobilanz. Im Vergleich zum Mischungsentwurf eines handelsüblichen Betons mit einem w/z-Wert von 0,54 liegt der Bindemittelanteil des mineralischen Dämmschaums bei nur 20 %. Es resultiert eine positive Wirkung auf das GWP des Sandwichelementes.

Zur Einordnung der Ökobilanz des Sandwichelementes wird das GWP der Herstellung von 1 m<sup>2</sup> Sandwichelement dem GWP der Herstellung von 1 m<sup>2</sup> einer handelsüblichen Betonfertigteilwand der Dicke 40 cm [22] (Beton der Druckfestigkeitsklasse C20/25 und Bewehrungsstahl) in Abbildung 13 gegenübergestellt. Der Typ der EPD ist Cradle-to-Gate. Daraus folgend ist das berechnete GWP für das Sandwichelement die Summe aus den Prozesseinheiten PE RC, PE MSB, PE C.

Aus Abbildung 73 folgt eine Einsparung von etwa 55 kg-CO<sub>2e</sub> pro Quadratmeter Fertigteilwand durch das Sandwichelement. Das entspricht einer Reduktion von 42 % kg-CO<sub>2e</sub> verglichen mit dem Gesamt-GWP einer handelsüblichen Betonfertigteilwand.

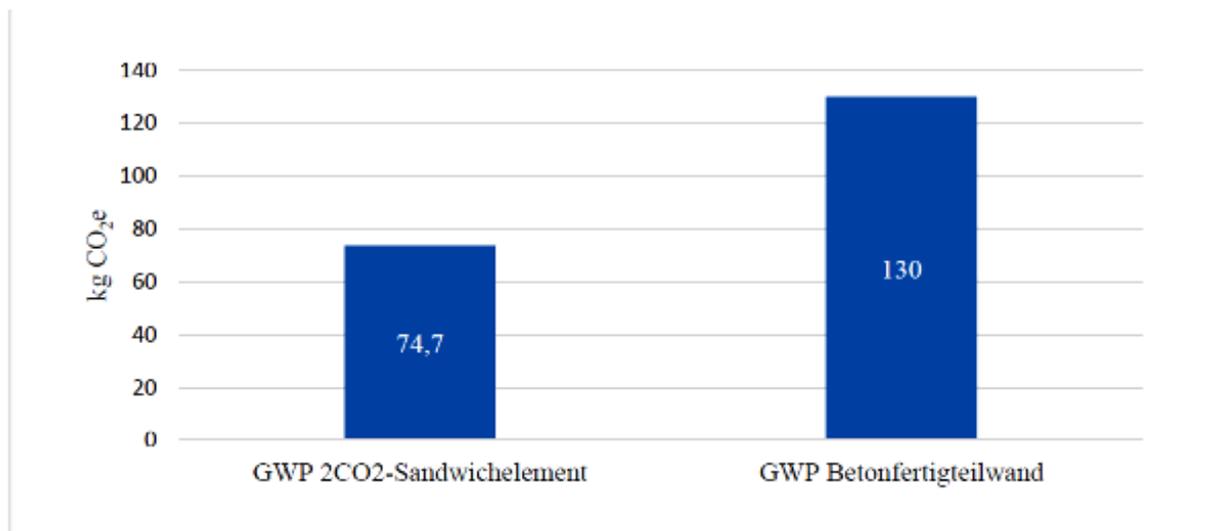


Abbildung 73: Gegenüberstellung des GWP von 1m<sup>2</sup> Sandwichelement zu 1m<sup>2</sup> Betonfertigteilwand.

Für das Jahr 2018 liegen die CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland bei 755 Mio, t CO<sub>2</sub> [23]. Der Gesamtbedarf an Gesteinskörnungen im Jahr 2016 betrug 566 Mio t Gesteinskörnung, von denen 12,7 % aus Recycling-Baustoffen gewonnen wurden. Daraus ergibt sich eine Menge von 71,9 Mio t verwendeter RC-Gesteinskörnung. Wie in Kapitel 1c) ausgeführt können bei einem Karbonatisierungspotential ca. 2,8 kg pro Tonne RC-Gesteinskörnung etwa 200.000 t CO<sub>2</sub> von der RC-Gesteinskörnung dauerhaft gebunden werden.

#### 4 Fazit

Die Klimaschutzziele Deutschlands sehen bis 2020 eine Senkung von 40 % der Gesamt-CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Jahr 1990 vor. Bis 2030 wird eine Senkung von 55 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zum Jahr 1990 angestrebt [23]. Im Vergleich zum Jahr 1990 sind die CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr um 35,7 % gesunken. Das ergibt eine (negative) Differenz von lediglich 4,3 % der CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2019 zum angestrebten Klimaschutzziel im Jahr 2020. Durch eine gezielte CO<sub>2</sub>-Sequestrierung in RC-Gesteinskörnung sowie durch Re-Kalzinierung von unkarbonatisiertem Zementstein könnte ein beachtenswerter Anteil der CO<sub>2</sub>-Emissionen in Deutschland eingespart und somit ein Beitrag zur Erreichung der Klimaschutzziele und somit zur Eindämmung des anthropogenen Treibhauseffektes geleistet werden.