

Quantifizierung der Carbonatisierung von Betonrecyclaten und Potential zur CO₂-Speicherung

Linda Walewska

26.09.2025

Betreuer:

Prof. Dr. Jörn Einfeldt

Prof. Dr.-Ing. habil. Anette Müller

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Technische Grundlagen	2
2.1	Übersicht zur Aufbereitung und Recycling von Betonbruch aus dem Rückbau/Abbruch von Bauwerken	2
2.2	Grundlagen der Carbonatisierung von Beton in Bauwerken	2
2.3	Folgerungen für die Carbonatisierung von Betonbruch	5
2.4	Aktuelle Entwicklungen zur technischen Umsetzung der gezielten Carbonatisierung	6
3	Konkretisierung der Aufgabenstellung	9
4	Material und Methoden	10
4.1	Material	10
4.2	Partikelgrößenbestimmung	14
4.2.1	Siebanalyse	14
4.2.2	Partikelgrößenanalysator Beckmann Coulter	15
4.3	Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mittels RFA und Glühverlust . . .	15
4.4	Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung mittels XRD	16
4.5	Bestimmung der Gehalte an Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und Calcit CaCO_3 mittels STA .	16
4.6	Phenolphthalein-Prüfung	16
4.7	Klimaprüfkammer	17
5	Durchführung	18
5.1	CO_2 -Behandlung	18
5.2	Phenolphthalein-Prüfung grober Betonbruchproben	21
6	Ergebnisse	24
6.1	Feine Fraktion (Proben 25299 und 25300)	24
6.2	Mittlere Fraktion (Proben 25303 und 25304)	30
6.3	Grobe Fraktion (Proben 25305 und 25306)	30
6.4	Berechnung des maximalen Calcitgehaltes und Ermittlung der maximalen CO_2 -Aufnahme eines hypothetischen Betons	32
7	Schlussfolgerungen und Fazit	35
A	Anhang	37
A.1	Messprotokolle Partikelgrößenverteilung Beckmann Coulter	37
A.2	Messprotokolle der Siebanalyse	42
A.3	Messprotokolle der Röntgenfluoreszenzanalyse	42
A.4	Messprotokolle XRD und STA	45

Abbildungsverzeichnis

1	Recyclinghof Heinz Werner GmbH Aschara. Angelieferter Betonbruch im Vordergrund (Quelle: Denny Silabetzschky, zur Verfügung gestellt)	10
2	Haufwerk mit angeliefertem Betonbruch (Quelle: Katrin Rost, zur Verfügung gestellt)	10
3	Der Betonbruchhaufen, von welchem die groben Proben stammen (Quelle: Katrin Rost, zur Verfügung gestellt)	11
4	Das Haufwerk, von dem die mittleren Proben stammen (Quelle: Katrin Rost, zur Verfügung gestellt)	11
5	Die Halde mit dem entnommenen feinen Material (Quelle: Katrin Rost, zur Verfügung gestellt)	12
6	Die verpackten Proben mittlerer Korngröße (eigene Aufnahmen)	12
7	Die verpackten Proben feiner Korngröße (eigene Aufnahmen)	13
8	Grobe Fraktion (eigene Aufnahmen)	13
9	Partikelanalysator des Herstellers Beckmann Coulter, Modell LS 13 320 (Quelle: WEBSEITE)	15
10	Die feinkörnigen Teilproben vorbereitet für die Lagerung im Klimaschrank, samt Probennummern (eigene Aufnahme)	18
11	Die beiden feinkörnigen Proben im Klimaschrank (eigene Aufnahme)	19
12	Die Probe 25300 nach der Entnahme der Teilprobe nach 14 Tagen Lagerung im Klimaschrank (eigene Aufnahme)	20
13	Grafik zur Übersicht der Teilprobennummern und entsprechenden Analysen, welche an den jeweiligen Proben vorgenommen wurden (eigene Darstellung)	21
14	Die unter Verschluss gelagerten Proben 25305 und 25306 (eigene Aufnahme)	22
15	Die besprühte Bruchfläche mit deutlich sichtbarem Rand (eigene Aufnahme)	23
16	Kornzusammensetzung der beiden feinkörnigen Ausgangsproben mit den Probennummern 25299 und 25300	24
17	Durchgangssummenkurven der Proben 25299-4 und 25300-4	25
18	Verteilungsdichtekurven der Proben 25299-4 und 25300-4	25

Tabellenverzeichnis

1	Proben entnommen von dem Recyclinghof	14
2	Übersicht aller behandelten sowie unbehandelten Teilproben	14
3	Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse und Glühverlust der feinen Proben . . .	26
4	Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie sowie der Simultanthermoanalyse für die Proben 25299	27
5	Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie sowie der Simultanthermoanalyse für die Proben 25299	29
6	Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse und Glühverlust der mittleren Proben .	30
7	Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie sowie der Simultanthermoanalyse für die mittlere Gesteinskörnung.	30
8	Carbonatisierungstiefe unverpackt gelagerter Proben	31
9	Carbonatisierungstiefe und Farbe verpackt gelagerter Proben	31

1 Einleitung

Beton ist ein sehr vielseitiger Baustoff und heutzutage nicht mehr wegzudenken. Die Geschichte seiner Verwendung geht bis ins antike Rom zurück, wo er als *opus caementicium* eine breite Verwendung fand, nach dem Untergang des Weströmischen Reiches in Vergessenheit geriet, um erst am Ende des 18. Jahrhunderts neu entwickelt und wieder eingesetzt zu werden. Mit der Erfindung von Stahlbeton im 20. Jahrhundert, welcher die Beständigkeit und Druckfestigkeit des Betons mit Zugfestigkeit des Stahls in sich vereint, kamen zu seiner ohnehin breiten Anwendung noch mehr Möglichkeiten hinzu und das Bauen unterschiedlicher Ingenieurbauwerke großer Dimensionen wie Brücken sowie Hochhäuser wurden dadurch ermöglicht. (Stark und Wicht 2012) Herstellung massiver Bauteile sowie beliebiger Formen, Möglichkeit der Verarbeitung des Baustoffs unter Wasser sowie weltweite Verfügbarkeit seiner Bestandteile machen den Beton zu einem der beliebtesten Baustoffe. So werden jährlich mehr als 30 Milliarden Kubikmeter Beton weltweit verbaut, während die Nachfrage weiter zunimmt (King 2021). Dabei verursacht der Zement als Schlüsselbestandteil des Betons hohe CO_2 -Emissionen - etwa 600 kg je Tonne Zement (VDI Wissensforum 2023). In Anbetracht der hohen Mengen und der steigenden Nachfrage ist es wichtig, Betonproduktion nachhaltiger zu gestalten - sowohl bezogen auf die Verwendung der Ressourcen als auch auf den hohen CO_2 -Ausstoß. Ein Ansatz zur Verbesserung der Nachhaltigkeit des Betons, welcher in jüngster Zeit von mehreren Unternehmen verfolgt wird, ist die gezielte Carbonatisierung von Betonbruch. Carbonatisierung ist ein Vorgang, bei welchem CO_2 ins Betongefüge eingebunden wird und in Betonbauwerken unter normalen Umgebungsbedingungen langsam - über Jahrzehnte - voranschreitet. Diesem Effekt wurde stets entgegengewirkt, da sich dieser auf die Dauerhaftigkeit von Stahlbetonbauten negativ auswirkt. Nun bietet er jedoch eine Möglichkeit zur dauerhaften CO_2 -Speicherung in abgerissenen und zurückgebauten Betonbauwerken. Zudem wirkt sich der Vorgang positiv auf die Druckfestigkeit des Betons aus, sodass der Betonbruch als ein hochwertiges Rezyklat verwendet werden kann, beispielsweise als Gesteinskörnung für neuen Beton. In den letzten Jahren haben mehrere Unternehmen dieses Potential erkannt und arbeiten daran, die Carbonatisierung von Betonbruch in Zusammenarbeit mit Recyclingunternehmen umzusetzen, unter Entwicklung von Verfahren zur Beschleunigung des Carbonatisierungsvorganges. Folgende Arbeit liefert einerseits einen Überblick zu den aktuellen Entwicklungen zur technischen Umsetzung der Carbonatisierung von Betonbruch. Andererseits wurden im Zuge der Bachelorarbeit von einem Recyclinghof entnommene Betonbruchproben nach Korngröße eingeteilt, im Ausgangszustand und nach einer gezielten Behandlung zur Beschleunigung des Carbonatisierungsvorganges untersucht. Auf diese Weise sollte der Einfluss der Partikelgröße auf die Carbonatisierungsgeschwindigkeit ermittelt werden. Außerdem wurden Berechnungen zur maximalen CO_2 -Aufnahme eines hypothetischen Betons durchgeführt. Darauf basierend sollte der theoretische maximale Carbonatisierungsgrad mit dem tatsächlichen, praktisch ermittelten verglichen werden. Das Ziel der Recherche und der experimentellen Untersuchungen ist die Einschätzung, inwiefern ein Verbesserungspotential zum aktuellen Stand der Aufbereitungstechnik im Hinblick auf die Carbonatisierung von Altbeton besteht.

2 Technische Grundlagen

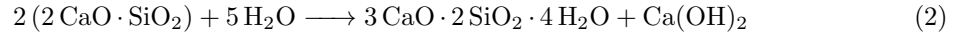
2.1 Übersicht zur Aufbereitung und Recycling von Betonbruch aus dem Rückbau/Abbruch von Bauwerken

Bauabfälle stellen den Großteil der gesamten Abfallmenge in Deutschland dar. (Umweltbundesamt 2025a) Seit 1996 fallen in Deutschland jedes Jahr um die 200 Mio. Tonnen Bauabfälle an. (Initiative Kreislaufwirtschaft Bau 2024) So waren es im Jahr 2022 207,9 Mio. Tonnen, was 61 % des Gesamtabfallaufkommens in Deutschland ausmachte. Bauschutt, als eine Fraktion der Bauabfälle, welcher mineralischen Abfall aus sämtlichen Bautätigkeiten wie z.B. Rückbau und Abriss darstellt, machte im gleichen Jahr 55,2 Mio. Tonnen aus. (Umweltbundesamt 2025b) Unter diese Kategorie fällt neben Ziegel, Fliesen und Keramik der Beton, welcher wiederum heutzutage Schätzungen zufolge etwa 60 % des Bauschutts ausmacht. Müller 2019, S. 23–33 Hieraus lässt sich eine ungefähre Menge des jährlichen Betonbruchaufkommens in Deutschland zu knapp 34 Mio. Tonnen errechnen, basierend auf dem Mittelwert des anfallenden Betonbruchs in den Jahren 1996–2022. Bezogen auf diesen Zeitraum betrug die durchschnittliche jährliche Recyclingquote der Abfallfraktion Bauschutt 74,3 %, die jährliche durchschnittliche Beseitigung betrug hingegen 7,4 %. (Initiative Kreislaufwirtschaft Bau / Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. 2025) Im Jahr 2018 wurden 6,1 % des Bauschutts beseitigt, 77,9 % wurden im Zuge des Recyclings wieder zu neuen Baustoffen gemacht. Dabei ist jedoch anzumerken, dass diese mineralischen Abfälle größtenteils als Schüttgüter im Straßenbau und Erdbau verwendet wurden, (Grimm 2021) was ihrem Potential nicht gerecht wird, denn diese könnten als Gesteinskörnung in neuen Bauwerken eingesetzt werden und somit ressourcenschonend die Naturgesteine ersetzen. Aktuell findet diese Anwendung bereits statt, ist jedoch auf maximal 25–45 % RC-Gesteinskörnung normativ begrenzt, je nach Anwendungsfall, wobei Verwendung rezyklierter Gesteinskörnung < 2 mm nicht vorgesehen ist. So ist der Gehalt rezyklierter Gesteinskörnung nach der entsprechenden DAfStb-Richtlinie (Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton e. V.) geregelt. Technisch ist es jedoch möglich bis zu 100 % rezyklierter Gesteinskörnung zu verwenden, dabei müssen jedoch zuvor deren Eigenschaften und Umweltverträglichkeit durch ein Gutachten geprüft werden. (Beton.org n.d.)

2.2 Grundlagen der Carbonatisierung von Beton in Bauwerken

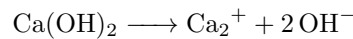
Beton besteht aus der Zementmatrix und der darin eingeschlossenen Gesteinskörnung, welche klassischerweise aus Sand und Kies besteht und zur Druckfestigkeit des Betons beiträgt. Je nach Anwendungsfall können der Mischung unterschiedliche Zusatzmittel wie z.B. Betonverflüssiger und Fließmittel oder Zusatzstoffe wie beispielsweise Quarzmehl oder Kalksteinmehl hinzugegeben werden, um die Eigenschaften des Betons während der Verarbeitung oder als Fertigprodukt nach der Verfestigung gezielt zu verändern. (Beton.org n.d.) Infolge der Vermischung von Zement und Wasser entsteht zunächst der fließfähige Zementleim, welcher aufgrund der hydraulischen Verfestigung zum Zementstein wird und so als Bindemittel für die Gesteinskörnung fungiert. Merkmal der hydraulischen Verfestigung ist, dass sie sowohl an Luft als auch unter Wasser erfolgt. Zement entsteht durch Mahlung des Zementklinkers unter Zugabe von Gips zur Abbinderegulierung. Zusätzlich werden Zusatzstoffe wie Hüttensand und Kalkstein zugegeben, um den Anteil des Klinkers im Zement zu reduzieren. Dabei ist der Zementklinker Grundbestandteil des Zementes und entsteht infolge eines thermischen Prozesses, bei dem Kalkstein und Ton in einem Drehrohrofen bei Temperaturen von 1400 °C - 1500 °C gebrannt werden (Wikipedia contributors 2025). Bei dieser thermischen Behandlung findet die stoffliche Umsetzung des Calciumcarbonats des Kalksteins zu Calciumoxid statt, wobei Kohlenstoffdioxid freigesetzt wird ($\text{CaCO}_3 \rightarrow \text{CaO} + \text{CO}_2$), was für den hohen CO_2 -Ausstoß der Zementproduktion verantwortlich ist und selbst den Ausstoß übersteigt, der aufgrund des hohen Energieverbrauchs des Brennens entsteht. Die Freisetzung des CO_2 infolge dieser chemischen Reaktion ist unvermeidbar. Als gewünschtes Resultat des Brennvorganges erhält man die sogenannten Klinkerphasen, Alit, Belit, Ferrit, etc.-> später in Tabelle mit C-S-H-Phasen dargestellt in Tabelle X, welche mineralische Bestandteile des Zementes darstellen, die beim Anmischen des Betons mit dem Wasser reagieren und somit die hydraulische Verfestigung des Betons ermöglichen. Die Verfestigung findet aufgrund des chemischen Einbindens des Wassers

in die Klinkerphasen statt, wobei sich Calciumsilikathydrate bilden, welche in der Bauchemie als C-S-H-Phasen bezeichnet werden. Sie stellen komplexe chemische Verbindungen aus Calciumoxid (CaO), Siliziumoxid (SiO₂) und Wasser dar, die amorph oder zumindest nur lokal kristallin sind. Die C-S-H-Phasen können zusätzlich Fremdoxide beinhalten, wie Al₂O₃, Fe₂O₃. Die zwei wichtigsten Phasen und die entsprechenden Gleichungen werden im Folgenden dargestellt:

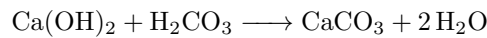


(Stark und Wicht 1998) Während die C-S-H-Phasen die Hauptprodukte der Hydratation darstellen, entsteht als Nebenprodukt der Reaktion das Calciumhydroxid (Ca(OH)₂). Calciumhydroxid entsteht zusätzlich durch die Reaktion des freien Calciumoxids mit Wasser und spielt bei der Carbonatisierung von Beton eine wichtige Rolle.

Die Carbonatisierung des verfestigten Betons ist ein Vorgang, welcher bislang hauptsächlich unter dem Aspekt der Dauerhaftigkeit von Stahlbeton betrachtet wurde. Aufgrund der mit ihr eingehenden Korrosionsgefahr des Bewehrungsstahls galt die Carbonatisierung stets als ein unerwünschter Effekt. Dieser läuft unter bestimmten Bedingungen im bereits verfestigten Beton ab und erfolgt in mehreren Teilschritten. Zunächst diffundiert das CO₂ durch die Kapillarporen* des Betons, zeitgleich zum Lösen des kristallinen Portlandits (Ca(OH)₂) im Feuchtfilms an der Porenoberfläche und dessen Dissoziation:



Im nächsten Schritt löst sich das CO₂ in dem Feuchtfilms der Porenwandung und reagiert teilweise mit dem Wasser zur Kohlensäure (H₂CO₃), welche dann zu Wasserstoffionen und Carbonationen dissoziiert. Im letzten Schritt laufen die tatsächlichen Carbonatisierungsreaktionen ab. Dabei bildet sich Calciumcarbonat (CaCO₃):



Durch Lösung von Calciumhydroxid im Porenwasser und somit Bildung von Hydroxidionen liegt der pH-Wert von frischem, nicht carbonatisiertem Beton bei 13-13,5. Bei der Carbonatisierung gehen die Hydroxidionen in eine Bindung ein und sind demnach nicht mehr im Porenwasser frei gelöst, wodurch deren Konzentration abnimmt und infolgedessen der pH-Wert sinkt. Für Bauten aus Stahlbeton ist dies problematisch, da unter dem pH-Wert von 11 die vor Korrosion schützende Passivschicht des Bewehrungsstahls nicht mehr gegeben ist, was zu Schäden unterschiedlicher Ausmaße am Bauwerk führen kann. Um möglichst hohe Lebensdauern von Konstruktionen dieser Art zu gewährleisten, ist die Eindämmung der Carbonatisierung und Kontrolle deren Fortschrittes notwendig. Auf der anderen Seite wird bei dem Carbonatisierungsvorgang das CO₂ aus der Luft in das Porengefüge des Betons dauerhaft eingebunden und führt durch Bildung von Calciumcarbonat zur Volumenzunahme, zur Verdichtung der Poren und zur Erhöhung der Betonfestigkeit, wobei die Festigkeit des Betons durch Carbonatisierung je nach Zementart um 20 bis 50 % ansteigen kann. Stark und Wicht 1995, S. 24 Die Dauerhaftigkeit der Stahlbetonbauwerke und somit Eindämmung der Carbonatisierung stehen während der Nutzung des Bauwerks nach wie vor im Vordergrund. Jedoch wird die Carbonatisierung von Beton - aufgrund der durch die EU gesetzten Klimaziele und der somit angestrebten Klimaneutralität - in jüngerer Zeit unter einem anderen Blickwinkel betrachtet. Sie wird als eine Möglichkeit gesehen, zumindest einen Teil des bei der Zementproduktion ausgestoßenen CO₂ aus der Atmosphäre zu entfernen und langfristig zu binden. Allerdings eröffnet sich diese Möglichkeit erst am Lebensende des Betons, wenn der Korrosionsschutz keine Rolle mehr spielt. Die aus carbonatisiertem Betonbruch hergestellten Recyclate können dabei zusätzlich von der Verdichtung des Porengefüges und steigender Festigkeit profitieren. Um das Potential der Carbonatisierung des Betonbruchs bestmöglich auszuschöpfen, müssen die den Vorgang begünstigenden Bedingungen sowie gewisse Abhängigkeiten bekannt sein und beachtet werden. Die Gesetzmäßigkeiten der CO₂-Aufnahme als diffusionsgesteuerten Vorgang, die ursprünglich für den Korrosionsschutz abgeleitet wurden, können auf die Carbonatisierung von Betonbruch übertragen

werden. Danach kann die Abhängigkeit der Carbonatisierungstiefe aus dem ersten Fickschen Gesetz hergeleitet werden:

$$J = -D \frac{\partial c}{\partial x} \quad (3)$$

Das Gesetz sagt aus, dass die Anzahl der sich im Zeitintervall durch eine Fläche bewegenden Teilchen, also die Teilchenstromdichte J , durch den Diffusionskoeffizienten und dem Konzentrationsgradienten eines Stoffes (in dem Falle CO_2) gegeben ist. Bei Betrachtung eines bestimmten Volumens, durch welches das CO_2 diffundieren soll und unter Einführung einer Konstanten a , welche die für die Carbonatisierung des Volumens nötige Menge an CO_2 in $\left(\frac{\text{mol}}{\text{mm}}\right)$ darstellt, lässt sich eine Differentialgleichung aufstellen. Dabei wird zunächst das Volumen als ein inkrementelles Element betrachtet und lässt sich durch die Fläche und Carbonatisierungstiefe x darstellen (in (Stark und Wicht 1995) beschrieben):

$$dV = aAdx \quad (4)$$

Die Teilchenstromdichte J für eine gegebene Fläche über die Zeit betrachtet muss gleich der Menge des für die Carbonatisierung nötigen CO_2 sein, bei Betrachtung des selben Volumens, also der selben Fläche über die Strecke x verlaufend:

$$Ja\partial t = aAdx \quad (5)$$

So lässt sich durch Einbindung des Fickschen Gesetzes folgender Zusammenhang erstellen:

$$D \frac{c}{x} dt = adx \quad (6)$$

Nach der Lösung dieser der Differentialgleichung ergibt sich für t :

$$t = \frac{a}{2Dc} x^2 \quad (7)$$

und somit für die Carbonatisierungstiefe:

$$x = \sqrt{\frac{2Dc}{a} t} \quad (8)$$

wobei der Einfluss der Zeit isoliert wird und für den restlichen Term ein Koeffizient für den Carbonatisierungsfortschritt in der Praxis eingesetzt wird, sodass die Gleichung zur Berechnung der Carbonatisierungstiefe folgende Form annimmt:

$$x = k\sqrt{t} \quad (9)$$

In der Praxis wird diese Gleichung verwendet, um die noch verbleibende Lebensdauer eines Betonbauwerks abzuschätzen. Mit den bekannten Parametern Zeit und praktisch ermittelter Carbonatisierungstiefe ergibt sich der Wert für k , der für die Berechnung der theoretischen Dauer bis zum Erreichen der Bewehrung durch die Carbonatisierungsfront dient. Der Koeffizient k setzt sich aus einer Vielzahl einfließender Parameter zusammen - alleine der darin steckende Diffusionskoeffizient ist komplex und müsste sich selbst mit der Zeit ändern, was in der Herleitung der oberen Formel nicht berücksichtigt wurde. Dieser Koeffizient stellt also lediglich eine Proportionalitätskonstante dar, die für jeden einzelnen Anwendungsfall individuell ermittelt wird.

Der Carbonatisierungsfortschritt hängt einerseits von den Eigenschaften des Betons ab, wobei die Porosität eine der wichtigsten ist - schließlich stellen Porenwände Kontaktflächen zwischen dem Beton und der Umgebung dar, wobei an deren Oberfläche der Carbonatisierungsvorgang stattfindet. Im Beton befinden sich Poren unterschiedlicher Größen. Die für die Transportphänomene und folglich Carbonatisierungsfortschritt im Beton verantwortlichen Poren sind die Kapillarporen, welche unregelmäßig geformte Hohlräume der Größe von 10 nm bis 100 μm darstellen und durch das überschüssige, nicht durch die Hydratation verbrauchte Wasser im Zementstein entstehen. Stark und Wicht 1998, S.26 Die Menge des überschüssigen Wassers ist abhängig vom massenbezogenen Verhältnis des Wassers zum Zement in einer Beton-Mischung, dem sogenannten w/z-Wert. Die Menge und Art der Poren im Beton ist wiederum abhängig von der Zusammensetzung des Betons

und seiner Verarbeitung. Die Zusammensetzung des Betons - die Zementart, Art der Körnung, Zusatzstoffe und Zusatzmittel - beeinflusst nicht nur den Porenbestand und die Permeabilität des Betons, sondern ebenfalls die chemische Zusammensetzung und somit Menge bzw. Verfügbarkeit der für die Carbonatisierung nötigen Stoffe. Andererseits hängt der Vorgang der Carbonatisierung von äußeren Einflüssen ab wie der Temperatur, der relativen Luftfeuchtigkeit und dem CO_2 -Gehalt der Luft. Die Luftfeuchtigkeit beeinflusst die Wassermenge, die sich in den Poren befindet/die Dicke des Wasserfilms. Wenn sich zu viel Wasser in den Poren befindet, auch bei 100 % relativer Luftfeuchtigkeit, kommt der Carbonatisierungsvorgang praktisch zum Stillstand, da das CO_2 durch Wasser deutlich langsamer diffundiert, als durch die Luft - die entsprechenden Diffusionskoeffizienten unterscheiden sich um vier Größenordnungen Stark und Wicht 1995, S.47 , analog verhält sich also der Carbonatisierungsfortschritt. Bei einer relativen Luftfeuchtigkeit unter 30 % läuft der Vorgang ebenfalls sehr verlangsamt, da nicht genug Porenwasser vorhanden ist. Der Einfluss der Temperatur ergibt sich einerseits aus seiner Verknüpfung mit der relativen Luftfeuchtigkeit, andererseits aus der Temperaturabhängigkeit der Löslichkeit von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ in Wasser. Je geringer die Temperatur, desto höher die Löslichkeit des Calciumhydroxids in Wasser (Stark und Wicht 1995, S.58) , jedoch auch höher die relative Luftfeuchtigkeit bei gleicher Wasserdampfmenge in der Luft. So kann trotz hoher Verfügbarkeit an gelöstem Calciumhydroxid die hohe relative Luftfeuchtigkeit den Vorgang verhindern. Die CO_2 -Konzentration der Umgebungsluft verhält sich umgekehrt proportional zu der Carbonatisierungsgeschwindigkeit t , was aus der Umstellung der Gleichung (6) nach t ersichtlich wird:

$$t = \frac{1}{c} \left(x^2 \frac{a}{2D} \right) \quad (10)$$

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass der Carbonatisierungsfortschritt in einem Betonbauwerk von unterschiedlichen Parametern und deren Zusammenspiel abhängig ist.

2.3 Folgerungen für die Carbonatisierung von Betonbruch

Die bisher erforschten Einflüsse auf die Carbonatisierung in bestehenden Bauwerken können qualitativ auf diesen Vorgang im Betonbruch übertragen werden. Die Geschwindigkeit des Voranschreitens des Carbonatisierungsvorganges eines rückgebauten und auf dem Recyclinghof gelagerten Betons unterscheidet sich jedoch von dem eines bestehenden Bauwerks. Beispielsweise verläuft die Beregnung und anschließende Trocknung einer massiven Betonwand anders, als es bei einer Schüttung der Fall ist, wodurch die beiden Objekte bei gleichen Witterungsbedingungen unterschiedlichen Zuständen ausgesetzt sind. Naheliegend ist jedoch, dass die Menge der verfügbaren Oberfläche der ausschlaggebende Unterschied ist. Dieser stellt die Kontaktfläche zur Umgebung dar und ermöglicht die Zufuhr des CO_2 in das Innere des Betons.

welche die Kontaktfläche zur Umgebung darstellt und hierdurch die Zufuhr des CO_2 in die Tiefe des Betons ermöglicht und gleichzeitig selber dem Carbonatisierungsvorgang unterzogen wird. Anhand der Formel (9) für die Carbonatisierungstiefe lässt sich zunächst beobachten, dass diese mit der Zeit immer langsamer zunimmt. Schätzungen zufolge kann der Wert für k je nach Umgebungsbedingungen und Belastung des Bauwerks zwischen $0,5 \text{ mm}/\sqrt{\text{Jahr}}$ und $15 \text{ mm}/\sqrt{\text{Jahr}}$ liegen. (Lagerblad 2005, S. 25) Demzufolge ergibt sich nach dem Einsetzen dieser geschätzten Werte in die Formel (9) ein Bereich der Carbonatisierungstiefe von $0,5 \text{ mm}$ bis 15 mm nach einem Jahr und 5 mm bis 150 mm nach einhundert Jahren. Allerdings ist dies nur eine grobe Schätzung, in welche Einflüsse wie beispielsweise gebildete Risse im Bauwerk nicht berücksichtigt werden. Trotzdem wird daraus ersichtlich, wie die Zunahme der Oberfläche infolge der deutlichen Reduzierung der Abmessungen der einzelnen Betonstücke im Vergleich zu den ursprünglichen Abmessungen von Bauwerksbetonen den Carbonatisierungsprozess deutlich beschleunigen kann.

Der Carbonatisierungsfortschritt im Bereich von wenigen Centimetern pro Jahrzehnt steht in keinem Verhältnis zur Erhöhung der Oberfläche eines Bauwerks durch die Zerkleinerung nach dem Abbruch. Dennoch müssen Einflüsse der Witterung und des Stoffaustauschs innerhalb eines Haufwerks des gebrochenen Betons berücksichtigt werden, um die bei der Lagerung am Recyclinghof nötige Zeit zum Erreichen des gewünschten Carbonatisierungsgrades zu bestimmen.

Gegenwärtig stehen die unterschiedlichen Einflüsse sowie die Quantifizierung der CO_2 -Aufnahme durch Betonbruch im Mittelpunkt vieler Forschungsprojekte, um die positiven Eigenschaften der

Carbonatisierung auszuschöpfen und deren Effektivität und dadurch auch deren Grenzen zu ermitteln.

ERGÄNZEN!!!! Im erhärteten Zementstein bzw. in der Mörtel- oder Betonmatrix bilden die C-S-H-Phasen die stabilsten Verbindungen. Bei einer sehr starken CO₂-Belastung des Betons kann es nach der Carbonatisierung des Portlandzements auch zur Carbonatisierung der C-S-H-Phasen kommen (Tabelle 2.9.7). Diese zersetzen sich in CaCO₃, Silicagel und Wasser. Dabei wird die stabile CaCO₃-Form Calcit (Abbildung 2.9.22) über die metastabilen Carbonatmodifikationen Vaterit und Aragonit gebildet. Bei einer vollständigen Carbonatisierung aller Hydratphasen ist von der Zementmatrix des Betons keine Festigkeit mehr zu erwarten."

2.4 Aktuelle Entwicklungen zur technischen Umsetzung der gezielten Carbonatisierung

In Anbetracht der Dringlichkeit der Reduzierung der CO₂-Emissionen und des Potentials von jährlich anfallenden knapp 34 Mio. Tonnen an Betonbruch allein in Deutschland bietet sich die Verwendung des Betonbruchs als eine CO₂-Senke an. So starteten in den letzten Jahren mehrere Projekte und Forschungsvorhaben, die diesen Ansatz verfolgen. Zurzeit werden unterschiedliche Verfahren entwickelt, erprobt und teilweise bereits umgesetzt.

Im Oktober 2021 startete das von der ETH Zürich geleitete Pilotprojekt DemoUpCARMA (Demonstration and Upscaling of CARbon dioxide MANagement solutions for a net-zero Switzerland) und das Teilprojekt DemoUpStorage, bei welchen eines der Hauptziele die Errichtung einer sogenannten Nutzungs- und Speicherungswertschöpfungskette (CCUS - carbon capture, utilisation and storage) war. Dabei sollte das von einer Biogasaufbereitungsanlage abgeschiedene CO₂ in primärem und recyceltem Beton gespeichert werden. (ETH Zürich 2021) Insgesamt 24 Partner aus Industrie und Wissenschaft waren an dem Pilotprojekt beteiligt. Im September 2023 endete das Projekt (Stiftung Risiko-Dialog 2021) und als dessen Resultat wurden wissenschaftliche Arbeiten publiziert, welche unter Anderem die Eigenschaften des carbonatisierten Betons bzw. Betonschlamms behandeln. Desweiteren wurden die Eigenschaften der unter Zugabe der Rezyklate hergestellten RC-Betone untersucht. Dabei wurden in den drei zum Thema veröffentlichten Artikeln unterschiedliche Schwerpunkte gesetzt und für die beschleunigte Carbonatisierung unterschiedliche Verfahren genutzt. Im Artikel *Recycled Aggregate Concrete with Industrially Pre-carbonated Recycled Concrete Aggregates and Low Clinker Content* wurden die relevanten Betoneigenschaften eines RC-Betons mit carbonatisierten Rezyklaten untersucht, wie beispielsweise Elastizitätsmodul, Druckfestigkeit und Rissbildung, um seine Funktionalität mit einem Beton mit natürlicher Gesteinskörnung zu vergleichen. Dabei wurde dem RC-Beton mit vorcarbonatisierter, recycelter Gesteinskörnung zudem pulverisierter Kalkstein und Phonolit beigemischt, um den Zementanteil der Betonmischung zu reduzieren. Die beschleunigte Carbonatisierung des Rezyklats wurde an Klassen 0/8 mm und 8/16 mm vorgenommen. Mit Rezyklat gefüllte Silos wurden jeweils mit 100 % CO₂-Gas möglichst vollständig befüllt, die Aussetzung des Materials der CO₂-Umgebung dauerte ungefähr 12 Stunden. Die Klasse 16/32 wurde nicht carbonatisiert aufgrund ihrer geringen CO₂-Aufnahme. Die Tests haben ergeben, dass die Klasse 0/16 mm ca. 13 kg CO₂/t aufgenommen hat. In der zweiten Arbeit *Accelerated carbonation of recycled concrete aggregates and its implications for the production of recycling concrete* wurde ebenfalls eine beschleunigte Carbonatisierung des Betonbruchs durch Erhöhung des CO₂-Gehaltes des zur Behandlung verwendeten Gases durchgeführt. Anschließend wurde der Effekt der Carbonatisierung auf die Eigenschaften und Mikrostruktur des daraus produzierten Recyclingbetons untersucht. Zusätzlich wurde der Mischung Betonschlamm hinzugegeben, um die Druckfestigkeit des Betons zu erhöhen und somit Potential für Verringerung des Zementanteils im Beton ermöglichen sollte. Außerdem wurde der Betonbruch, der als neue Gesteinskörnung für den RC-Beton fungieren soll, unter verschiedenen Feuchtegehalten carbonatisiert. Die Gesteinskörnung wurde in einem zylindrischen Behälter mit einem Volumen von 75 Litern platziert und mit 100 %igem CO₂ durchströmt. Nach 70 Minuten wurde die CO₂-Behandlung beendet, da die Messung der Massenänderung des Versuchsaufbaus zum Ende der Behandlung hin auf eine nur geringfügige und stets kontinuierlich kleiner werdende Massenänderungen hindeutete. Der CO₂-Gehalt wurde anhand der Massenänderungen der Proben ermittelt. Die CO₂-Aufnahme der Gesteinskörnung mit höherem Feuchtegehalt von 60-200 % der Wasseraufnahme, wie er auf Recyclinganlagen zu erwarten ist, lag im Bereich von 10,2 bis 12,7 kg/t. Bei einem Feuchtegehalt äquivalent zu 30 % der

Wasseraufnahme stieg die CO₂-Aufnahme auf 21,2 kg/t. Die Angaben beziehen sich auf die Trockenmasse des Betons. Es wurden zudem Unterschiede in der CO₂-Aufnahme je nach Korngröße ermittelt. Dabei ergab die feinste untersuchte Fraktion 0/4 mm eine vierzehnfache Aufnahme des Gases gegenüber der Fraktion 4/8 mm und 35-fache gegenüber der Fraktion 8/16 mm. Außerdem wurde beobachtet, dass durch eine "Vorcarbonatisierung" der Gesteinskörnung, also eine siebenmonatige überdachte Lagerung unter atmosphärischem CO₂-Gehalt und Feuchtegehalt entsprechend 100 %-iger Wasseraufnahme, die CO₂-Aufnahme auf 4,0 kg/t fällt. Der dritte Artikel *Carbonated Concrete Slurry Waste as Supplementary Cementitious Material* befasst sich mit einem Versuch zur Aufnahme von CO₂ durch Betonschlamm und die Verwendung des carbonatisierten Schlammes in der Betonmischung, um zusätzlich den Zementanteil im neuen Beton zu reduzieren. Zur Carbonatisierung des Betonschlammes wurde diesem 100 % CO₂ über 90 Minuten kontinuierlich zugeführt. Danach wurde der Schlamm getrocknet, charakterisiert und als 30 M.-%-ger Ersatz für Zement eingesetzt. Gegenüber dem Einsatz von nicht carbonatisiertem Schlamm als Zusatz wurde eine erhöhte Druckfestigkeit des Betons festgestellt. Die untersuchte Probe konnte umgerechnet ca. 120 kg CO₂ pro 1 Tonne Trockenmasse (= ca. 8 kg pro 1 Tonne Betonschlamm) aufnehmen.

Das Schweizer Unternehmen Neustark war einer der Partner im DemoUpCARMA-Projekt. Neustark entwickelt Lösungen für Betonrecycler zur Umsetzung der Speicherung von biogenem, regional verfügbarem CO₂ aus Biogasanlagen oder aus Abwasserbehandlungsanlagen. Dabei fungiert das Unternehmen als Technologieanbieter und gleichzeitig als Vermittler zwischen den Betonrecyclern und den Betreibern von Biogas- und Abwasseranlagen. So hat Neustark bereits 39 Abscheidungs- und Speichereinrichtungen in Betrieb gesetzt (neustark AG 2025b) und ist somit der Vorreiter in diesem Bereich innerhalb Europas. Zudem hat Neustark die erste nach dem Gold Standard anerkannte Methodologie für technologiebasierte CO₂-Entfernung entwickelt, welche in 2022 im Gold Standard Methodenregister veröffentlicht wurde. (neustark AG 2025a) Darin werden drei unterschiedliche Verfahren beschrieben (Ausgabe vom 28.05.2025). Das erste Verfahren nutzt Gasstrom mit erhöhter CO₂-Konzentration (> 400 ppm) in einem Reaktorsystem bei kontrolliertem Druck, wobei der mineralische Abfall dem Gas direkt ausgesetzt wird. Das zweite Verfahren bezieht sich auf die Carbonatisierung von Schlämmen, die als Abfall nach Reinigung von diversen Maschinen und Anlagen beim Betonbau und Transport anfallen. Das letzte beschriebene Verfahren nutzt die indirekte Carbonatisierung durch Erstellung einer Suspension in einem Reaktor, unter Abtrennung inerter Materialien und anschließender Behandlung der alkalireichen Lösung in einem sogenannten Mineralisationsreaktor, wo diese mit CO₂ in Kontakt gebracht wird, zur Kristallisation und Fällung der carbonatisierten Mineralstoffe führt. In Zusammenarbeit mit dem deutschen Familienunternehmen Heinrich Feeß GmbH und Co. KG wurde am 15. November 2024 eine der ersten Anlagen in Deutschland eingeweiht, welche im Abbruchbeton biogenes CO₂ bindet. Hierbei wird Betonsplitt der Korngrößenklasse 2 bis 16 mm in einem Spezialcontainer mit der Kapazität von etwa 40 t unter dichtem Verschluss drei Stunden lang mit CO₂ beaufschlagt. Dabei werden knapp 200 kg CO₂ aufgenommen. Dabei stammt das CO₂ aus einer 150 Kilometern entfernten Biogasanlage. (Fromm 2025) Neustark gibt zudem an, dass eine Tonne Betonschutt mindestens 10 Kilogramm aufnehmen kann. (neustark AG 2024)

Die Firma Heidelberg Materials beschäftigt sich als einer der größten Baustoffunternehmen weltweit (Weltexporte 2021) (Wikipedia-Autoren 2025) ebenfalls mit dem Thema Carbonatisierung im Zusammenhang mit Recycling von Baustoffen. Heidelberg Materials forscht seit einigen Jahren an der Verwendung des carbonatisierten Feinanteils von Betonbruch und zusätzlich an der Entwicklung neuer Ansätze zur Abscheidung und Nutzung von CO₂, also zur sogenannten CCU (Carbon Capture and Utilisation). So hat das Unternehmen im Jahr 2022 im Projekt ReConcrete-360° ein Konzept entwickelt, in welchem Altbeton zerkleinert und nahezu sortenrein in Sand, Kies und Zementstein getrennt wird, wobei der Zementstein im Feinanteil mittels CO₂-Aufnahme carbonatisiert wird. Anschließend kann der carbonatisierte Feinanteil bei der Klinker- und Zementherstellung als Kalksteinersatz verwendet werden. (Heidelberg Materials 2022) So startete Heidelberg Materials im Juli 2024 die erste Phase einer großtechnischen Einführung von ReConcrete durch Eröffnung einer Recyclinganlage in Kattowitz (Polen), welche solch eine Trennung ermöglicht. Im Juli dieses Jahres (2025) wurde als weitere Aktivität eine Pilotanlage für gezielte Carbonatisierung im polnischen Zementwerk GóraŹdŹe in Betrieb genommen. Dort werden Betonrezyklate den Abgasen des Ofens des Zementwerks ausgesetzt und infolge der Carbonatisierung das im Abgas enthaltene CO₂ teilweise gebunden. Hierfür gibt Heidelberg Materials an, dass pro eingesetzter

Tonne des Rezyklats ungefähr 100 bis 150 kg CO₂ gebunden werden. (Dienemann 2023)

Die Themen Carbonatisierung von Betonbruch und dessen Anwendungen befinden sich derzeit noch im Anfangsstadium. Die ersten Pilotprojekte zu dem Thema starteten in den letzten Jahren, die ersten Unternehmen beschäftigen sich mit Entwicklung und Anbieten von Verfahren zur gezielten Carbonatisierung von Betonbruch. Die Entwicklung eines Systems mit CO₂-Quellen und Senken, wie Neustark es bereits umsetzt, erscheint sinnvoll. Der Ausbau eines Netzwerks solcher Verfahren bringt ein großes Potential mit sich. Deshalb ist es umso wichtiger, die Forschung zu diesem Thema voranzubringen. Das gilt sowohl im Hinblick auf verfahrenstechnische Fragen der CO₂-Behandlung als auch auf baustofftechnische Fragen bezüglich möglicher Veränderungen der Frisch- und Festbetoneigenschaften bis hin zur Dauerhaftigkeit.

3 Konkretisierung der Aufgabenstellung

Das Ziel folgender Untersuchungen ist zum einen die Ermittlung des Carbonatisierungsgrades unterschiedlicher Betonbruchproben aus einem Recyclinghof, wobei der Einfluss der Partikelgröße des Betonbruchs auf den Carbonatisierungsfortschritt untersucht und bewertet werden soll. Zum anderen soll abgeschätzt werden, wie viel CO_2 durch eine bestimmte Menge Betonbruch in der Praxis maximal aufgenommen werden kann und wie sich diese Aufnahme von der maximalen theoretischen Aufnahme unterscheidet. Als Grundlage für die Bewertung des Carbonatisierungsgrades der jeweiligen Proben gilt deren Calciumhydroxid- und Calciumcarbonatgehalt. Da durch den Carbonatisierungsvorgang eine Umsetzung des Calciumhydroxids in das Calciumcarbonat stattfindet, können anhand der Unterschiede derer Gehalte unter Proben unterschiedlicher Korngröße sowie unterschiedlicher Lagerungsbedingungen Rückschlüsse auf den Carbonatisierungsgrad gezogen werden. Um dies umzusetzen, sollen zunächst die Proben unterschiedlicher Korngröße im Ausgangszustand charakterisiert und mithilfe thermischer sowie mineralogischer Analysen auf deren Zusammensetzung untersucht werden. Unter anderem sollen durch geeignete Analyseverfahren die Gehalte des Calciumhydroxids sowie des Calciumcarbonats jeder Probe ermittelt und miteinander verglichen werden. Im Anschluss sollen Teilproben ausgewählter Ausgangsstoffe unter einer erhöhten CO_2 -Konzentration gelagert werden, um den Carbonatisierungsfortschritt zu beschleunigen. Die Proben sollen unterschiedlich lange bei gleichbleibenden Bedingungen gelagert werden und anschließend analog zu den Proben im Ausgangszustand untersucht werden. Letztendlich sollen die Gehalte des Calciumcarbonats und Calciumhydroxids der jeweiligen gelagerten Proben und der Ausgangsproben miteinander verglichen werden. Anhand der Gehalte soll der Carbonatisierungsgrad der Proben abgeschätzt werden und die Abhängigkeit des Fortschrittes von der Partikelgröße ermittelt werden. Der Vergleich zwischen der theoretischen und praktischen maximalen CO_2 -Aufnahme durch Beton beim Carbonatisierungsvorgang soll entsprechend auf Grundlage theoretischer Berechnung erfolgen sowie auf Basis der ermittelten Gehalte an Calciumcarbonat und Calciumhydroxid aller Proben.

4 Material und Methoden

4.1 Material

Zur Untersuchung des Carbonatisierungsvortschrittes wurden Betonbruchproben der Recyclingfirma Heinz Werner GmbH Aschara am 02.04.2025 entnommen. Der jährliche Materialumsatz des Recyclinghofs liegt bei etwa 35.000 t. Dabei handelt es sich um Material von diversen Abbruchbaustellen, beispielsweise Abbruch von Wohngebäuden, Büroräumen und Fundamenten, welches in Schollenform oder als Platten angeliefert und zunächst auf einem Haufwerk gelagert wird (Abb. 1 und Abb. 2) .



Abbildung 1: Recyclinghof Heinz Werner GmbH Aschara. Angelieferter Betonbruch im Vordergrund (Quelle: Denny Silabetzschky, zur Verfügung gestellt)



Abbildung 2: Haufwerk mit angeliefertem Betonbruch (Quelle: Katrin Rost, zur Verfügung gestellt)

Das angelieferte Material wird per Backenbrecher zerkleinert, klassiert und anschließend ohne Überdachung oder Abdeckung auf nach der Korngröße getrennten Halden gelagert. Die Lagerungsdauer ist vom Absatz der Rezyklate abhängig und beträgt von einem bis zu maximal 24 Monaten. Das entnommene, hier verwendete Material lag ca. eine bis acht Wochen auf dem Recyclinghof. Die

Halden sind nahezu sortenrein und bestehen zu ca. 98 % aus Betonabfällen. Entnommen wurde Betonbruch von drei unterschiedlichen Korngrößenklassen, im Folgenden vereinfachend als fein (0/16 mm), mittel (0/45 mm) und grob (keine Angabe zur Korngröße auf dem Recyclinghof) bezeichnet, wie in table 1 dargestellt. Die Abbildungen 3 bis 5 zeigen die jeweiligen Halden.



Abbildung 3: Der Betonbruchhaufen, von welchem die groben Proben stammen (Quelle: Katrin Rost, zur Verfügung gestellt)



Abbildung 4: Das Haufwerk, von dem die mittleren Proben stammen (Quelle: Katrin Rost, zur Verfügung gestellt)

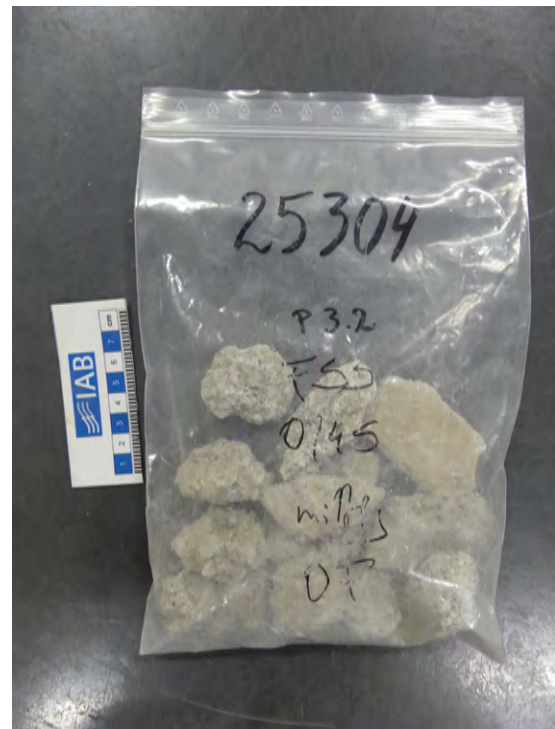


Abbildung 5: Die Halde mit dem entnommenen feinen Material (Quelle: Katrin Rost, zur Verfügung gestellt)

Dabei wurden von jeder Korngröße jeweils zwei sich voneinander unterscheidende Proben entnommen. Jeder entnommenen Probe wurde eine Probennummer zugewiesen. Um drei sich voneinander eindeutig unterscheidende Größenklassen vorzuweisen wurden von der Halde der Klasse 0/45 mm nur Partikel im Größenbereich 25/45 mm entnommen, wie in Abb. 6a sowie Abb. 6b zu sehen. Die vollständigen feinen Proben sind in der Abbildung 7 dargestellt, die groben Stücke sind exemplarisch in Abb. 8a und Abb. 8b abgebildet.

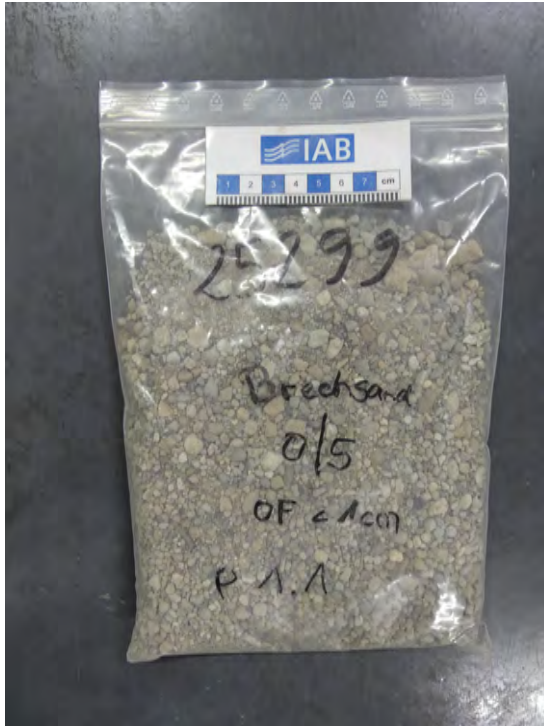


(a) Vollständige Probe 25303

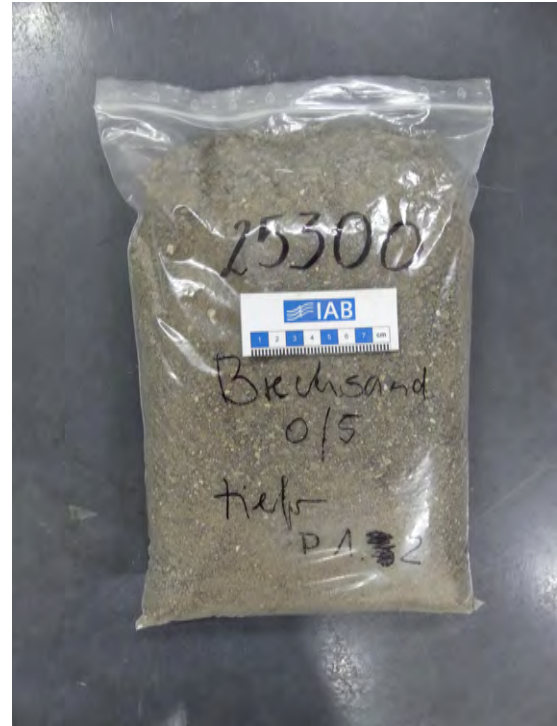


(b) Vollständige Probe 25304

Abbildung 6: Die verpackten Proben mittlerer Korngröße (eigene Aufnahmen)



(a) Vollständige Probe 25299



(b) Vollständige Probe 25300

Abbildung 7: Die verpackten Proben feiner Korngröße (eigene Aufnahmen)



(a) Probe 25305



(b) Probe 25306

Abbildung 8: Grobe Fraktion (eigene Aufnahmen)

Tabelle 1: Proben entnommen von dem Recyclinghof

Probennummer	Korngröße	Bezeichnung	Masse	Beschreibung
25299	0/16 mm	fein	1170 g	Probenahme oberflächennah, max 1 cm Tiefe, Lagerung ca. 2 Monate
25300	0/16 mm	fein	4885 g	Probenahme ca. 5 cm unter der Oberfläche, Lagerung ca. 2 Monate
25303	0/45 mm	mittel	382 g	Probenahme oberflächennah, linker Haufen
25304	0/45 mm	mittel	418 g	Probenahme oberflächennah, mittiger Haufen
25305	keine Angabe	grob	ca. 1000 g	vorderer Haufen, frisch
25306	keine Angabe	grob	ca. 1000 g	hinterer Haufen, sortiert

Während die oben genannten Proben als Ausgangsproben fungieren, stellen die in Tabelle 2 aufgeführten Proben deren Teilproben dar, welche entweder zur Analyse des Ausgangsmaterials oder zur weiteren Behandlung erstellt wurden. Diese tragen jeweils die Nummer derer Ausgangsprobe und einen angehängten Index, welcher fortlaufend vergeben wurde und jeweils mit einer bestimmten Behandlung der Teilproben verknüpft ist. So beschreibt beispielsweise der Index "0" den Ausgangszustand, also keine weitere Behandlung der Teilprobe, die Indizes von "1" bis "3" entsprechend aufsteigend die Zeit der Lagerung unter bestimmten Bedingungen.

Tabelle 2: Übersicht aller behandelten sowie unbehandelten Teilproben

Probennummer	Korngröße	Zustand
25299-0	0/16 mm	Ausgangszustand
25299-1	0/16 mm	1 Tag Klimaschrank
25299-2	0/16 mm	3 Tage Klimaschrank
25299-3	0/16 mm	7 Tage Klimaschrank
25299-4	<125 μ m	gemahlen
25299-5	<125 μ m	7 Tage Klimaschrank, gemahlen
25299-6	<125 μ m	14 Tage Klimaschrank, gemahlen
25299-7	<125 μ m	28 Tage Klimaschrank, gemahlen
25300-0	0/16 mm	Ausgangszustand
25300-1	0/16 mm	1 Tag Klimaschrank
25300-2	0/16 mm	3 Tage Klimaschrank
25300-3	0/16 mm	7 Tage Klimaschrank
25300-4	<125 μ m	gemahlen
25300-5	<125 μ m	7 Tage Klimaschrank, gemahlen
25300-6	<125 μ m	14 Tage Klimaschrank, gemahlen
25300-7	<125 μ m	28 Tage Klimaschrank, gemahlen
25303-0	0/45 mm	Ausgangszustand
25304-0	0/45 mm	Ausgangszustand

4.2 Partikelgrößenbestimmung

4.2.1 Siebanalyse

Für die feinen Proben, also die Ausgangsproben 25299 und 25300 wird die Partikelgrößenverteilung mittels Siebung in Anlehnung an DIN EN 933-1 bestimmt. Verwendung findet ein Siebturm mit Quadratlochsieben der Größen 0,063 / 0,125 / 0,25 / 0,5 / 1 / 2 / 4 / 8 / 16 und 32 mm.

4.2.2 Partikelgrößenanalysator Beckmann Coulter

Zur Analyse der Partikelgröße der Proben 25299-4 und 25300-4 wird der Partikelanalysator des Herstellers Beckmann Coulter, Modell LS 13 320 (Abb. 9), verwendet. Das Messprinzip beruht auf Beugung von Laserstrahlung an Partikeln in einem Größenbereich von 40 nm bis 2 mm. Bei Untersuchung von Feststoffen wird eine geringe Menge der Probe mit einem Spatel in das Gerät eingeführt und dem flüssigen Medium hinzugegeben. Dieses dient als Dispergiermittel und wird entsprechend des zu untersuchenden Stoffes gewählt, sodass es sich diesem gegenüber inert verhält. Das Medium mit der Probe strömt kontinuierlich und zirkuliert im System, sodass die im Medium schwebenden Partikel mehrmals am Laser vorbeigeführt wird. Durch die Interaktion des Lasers mit den Partikeln werden größenspezifische Beugungsmuster erzeugt und durch mehrere, im Gerät verteilte Detektoren gemessen. Anhand dieser werden die Partikelgrößen abgeleitet (z.B. Fraunhofer-Modell) und von der Software den entsprechenden Größenklassen zugeordnet. Das Ergebnis wird als eine volumenbezogene Durchgangssummenkurve sowie eine Partikelgrößenverteilung ausgegeben. Aus den Messdaten lassen sich ebenfalls weitere Parameter ableiten, wie beispielsweise der d_{50} -Wert oder eine rechnerische spezifische Oberfläche, die auf einem Kugelmodell beruht.



Abbildung 9: Partikelanalysator des Herstellers Beckmann Coulter, Modell LS 13 320 (Quelle: WEBSEITE)

4.3 Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mittels RFA und Glühverlust

Mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse kann die Oxidzusammensetzung einer Probe bestimmt werden. Durch Bestrahlung einer Probe mit Röntgenstrahlung werden die einzelnen Atome angeregt und emittieren eine elementspezifische Fluoreszenzstrahlung. Durch Erfassung der emittierten Strahlung können Rückschlüsse auf die Probenzusammensetzung gezogen werden. Hierfür wird das zu untersuchende Material unter 40 °C getrocknet, gemahlen auf Korngröße < 63 µm und anschließend als eine Schmelz- oder Presstablette präpariert. Alle untersuchten Proben wurden nach Trocknung und Mahlung jeweils zu einer Schmelztablette verarbeitet und in dieser Form unter Vakuum-Atmosphäre bestrahlt. Die Messmethode gilt als semiquantitativ, da die Methode keine regelmäßige Validierung durch Verwendung von Referenzmaterialien erhält, sondern nach Normierung mittels Fundamentalparametern erfolgt (d.h. nach einer Werkskalibrierung des Herstellers mit verschiedenen Matrices). Die Analyse ermöglicht Erfassung der Elemente von Fluor bis Uran. In

Ergänzung zur RFA wird der Glühverlust der Probe in Anlehnung an DIN 51081 bestimmt. Der Glühverlust ist dabei ein materialspezifischer Gewichtsverlust, welcher beim Glühen einer Probe durch Stoffumwandlung und Wasserverlust entsteht. Hierbei wird die zu untersuchende Probe zunächst bei 40°C im Vakuum getrocknet und anschließend bei 950°C geglüht. Dabei findet die Zersetzung verschiedener Mineralphasen bzw. Carbonate statt. (Azevedo u. a. 2023)

4.4 Bestimmung der mineralogischen Zusammensetzung mittels XRD

Die Röntgendiffraktometrie (X-Ray Diffraction XRD) dient zur qualitativen und quantitativen Bestimmung der Mineralphasenzusammensetzung von Feststoffen. Alle kristallinen Phasen wechselwirken mit der Röntgenstrahlung, da die Wellenlänge der Strahlung und der Abstand zwischen den einzelnen Gitterebenen der Mineralphasen im gleichen Größenbereich liegen. So wird die Röntgenstrahlung an dem Kristallgitter gebeugt und die entstehenden Peaks der Intensität der gebeugten Strahlung werden erfasst. Die Beugungsmuster sind von dem Einfallswinkel und Wellenlänge der Strahlung sowie von dem Gitterabstand der jeweiligen Phase abhängig. Durch Messung unter unterschiedlichen Einfallswinkeln kann jeder Winkeleinstellung eine Intensität zugeordnet werden, welche den CPS (counts per second) entspricht, also der gezählten Photonen innerhalb einer Sekunde. Die Identifizierung der kristallinen Phasen erfolgt durch Vergleich der gemessenen Kurve mit entsprechenden Werten in der Datenbank der ICDD (International Centre for Diffraction Data). Die quantitative Ermittlung erfolgt über Vergleich entsprechender gemessener Peaks mit denen einer Referenzprobe mit bekanntem Anteil der zu ermittelnden Phase. Für die Messungen wurde das Gerät STADI MP der Firma Stoe aus Darmstadt verwendet. Die Proben wurden auf <63 mm gemahlen und entsprechend texturarm präpariert. Der 2θ -Messbereich lag zwischen 2 – 52,385. Die Röntgenröhre mit optischen Hilfsmitteln lieferte monochromatische Kupfer-K α 1-Strahlung. Die gebeugten Photonen wurden mittels Halbleiter-Streifendetektor (Mythen K1 von Dectris) gemessen. (Leitgeb 2019)

4.5 Bestimmung der Gehalte an Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und Calcit CaCO_3 mittels STA

Die Simultanthermoanalyse (STA) setzt sich zusammen aus der Differentialthermoanalyse (DTA) und der Thermogravimetrie (TG), welche Änderungen der Probe über eine stetige Temperaturerhöhung erfassen. Durch gleichzeitige Ausführung beider Messungen können aussagekräftigere Ergebnisse zur Zusammensetzung der Probe geliefert werden, da sich die beiden Methoden gegenseitig ergänzen. Während die DTA Auskunft über die Temperaturdifferenzen zwischen der Probe und einer inerten Referenzprobe liefert (wobei diese im Diagramm in mV/mg angegeben werden), woraus Rückschlüsse auf vorkommende Reaktionen in der Probe gewonnen werden können, zeigt die Thermogravimetrie die prozentuale Massenänderung der Probe an. Durch Darstellung beider Messkurven in einem gemeinsamen Diagramm wird ersichtlich, welche Massenänderung welcher Reaktion und somit welchem Materialumsatz der Probe entspricht. Daraus lässt sich durch Berechnung eine Aussage über die prozentualen Massenanteile der jeweiligen Stoffe in der untersuchten Probe treffen. Die Messungen wurden mit dem Messgerät STA 449 Jupiter F3 der Firma Bruker ausgeführt. Jede Messung erforderte ungefähr 50 mg Probe. Die Abtastrate des Geräts liegt bei zehn Messpunkten pro Kelvin. (Humbeeck 1998)

4.6 Phenolphthalein-Prüfung

Die Phenolphthalein-Prüfung zur Bestimmung der Carbonatisierungstiefe im Festbeton stellt ein gängiges Prüfverfahren zum Schutz sowie Instandsetzung von Betontragwerken dar und ist in der DIN EN 14630 geregelt. Durch Aufbringen einer Phenolphthalein-Indikatorlösung auf die Oberfläche bzw. Bruchfläche des zu untersuchenden Betons mittels Zerstäuber kann anhand der Farbe der besprühten Oberfläche auf die Carbonatisierung geschlossen werden: eine rosa-violett-Färbung tritt bei pH-Werten von etwa 8,5-13 auf. Folglich werden diejenigen Stellen des Betons verfärbt, die noch nicht carbonatisiert sind. Die carbonatisierten Stellen, die niedrigere pH-Werte aufweisen, bleiben unverfärbt.

4.7 Klimaprüfkammer

Die Multifunktionale Klimaprüfkammer KPK 3633/3633 (im Folgenden auch Klimaschrank genannt) der Firma Feutron Klimasimulation GmbH dient zur Aufbewahrung von Probematerial unter bestimmten Bedingungen. Hierfür lässt sich unter Anderem die Temperatur, die relative Luftfeuchte sowie die CO₂-Konzentration einstellen. Der höchste einstellbare CO₂-Gehalt liegt bei zehn Volumenprozent.

5 Durchführung

5.1 CO₂-Behandlung

Zur Charakterisierung der Ausgangsproben erfolgte zunächst die Erfassung der Partikel- bzw. Korngröße der einzelnen Proben. Da die mittlere und grobe Fraktion aus nur wenigen Steinen bestand, welche augenscheinlich einer einzigen Größenklasse zuzuordnen waren, wurde deren Größe photographisch dokumentiert, mit einem Maßstab als Referenz. Die Partikelgrößenverteilung der feinen Fraktion hingegen (Ausgangsproben 25299 und 25300) wurde jeweils durch eine Siebanalyse ermittelt. Hierfür wurden die beiden Proben vollständig dem Siebturm aufgegeben. Anschließend wurde die Probenteilung aller Proben vorgenommen - einerseits im Zuge der Vorbereitung für weitere Behandlung, andererseits zur Erstellung repräsentativer Teilproben für die Untersuchung des Ausgangszustandes.

Die Bestimmung der chemischen Zusammensetzung mittels RFA, der mineralogischen Zusammensetzung mittels XRD sowie die Bestimmung der Gehalte an Portlandit Ca(OH)_2 und Calcit CaCO_3 mittels DTA erfolgte an Teilproben der mittleren sowie feinen Fraktion. Die Probennummern dieser Teilproben tragen den Index Null. Anschließend wurden repräsentative Teilproben des feinen Materials (Ausgangsproben 25299 und 25300) entnommen und in einer Klimaprüfkammer unter erhöhter CO₂-Konzentration aufbewahrt, um den Carbonatisierungsvorgang zu beschleunigen. Das Material wurde hierbei dem maximal einstellbaren CO₂-Gehalt von 10 Vol-% ausgesetzt, welcher 250 Mal höher ist, als die CO₂-Konzentration in der Luft. Die in der Kammer herrschende Temperatur betrug 23°C, die relative Luftfeuchtigkeit hingegen 65 %. Einleitend wurde jeweils eine Teilprobe der beiden feinen Ausgangsproben à 80 g auf einer flachen Plastikunterfläche ausgebreitet, wie in Abbildungen 10 und 11 dargestellt, und im Klimaschrank eine Woche lang gelagert. Nach einem, drei und sieben Tagen Lagerung wurde hiervon jeweils eine Teilprobe von je ca. 10 g entnommen. Mit einem kleinen Metalllöffel wurde dabei selektiv nur der feine Anteil der Probe entnommen, welche den gebrochenen Zementstein darstellt. Die grobe Gesteinskörnung würde bei einer so kleinen Probemenge die Probe stark beeinflussen. Eine repräsentative Probenahme war bei diesem Versuchsaufbau nicht möglich. Die entnommenen Proben wurden anschließend zur DSC- sowie XRD-Analyse abgegeben, um den Carbonatisierungsfortschritt innerhalb dieser Lagerungszeiten zu erfassen.



Abbildung 10: Die feinkörnigen Teilproben vorbereitet für die Lagerung im Klimaschrank, samt Probennummern (eigene Aufnahme)



Abbildung 11: Die beiden feinkörnigen Proben im Klimaschrank (eigene Aufnahme)

Nach Vorliegen der Messergebnisse wurde auf deren Basis entschieden, für die weiteren Untersuchungen neue Teilproben zu entnehmen und diese vor der Lagerung auf Partikelgrößen $< 125 \mu\text{m}$ aufzumahlen. Die Zerkleinerung sollte einerseits für eine bessere Homogenität der Proben sorgen. Andererseits sollte so der Carbonatisierungsvorgang beschleunigt werden. Nach dem Zerkleinerungsprozess wurde die Partikelgrößenverteilung der Proben mittels des Partikelgrößenanalysators Beckmann Coulter bestimmt. Jeweils 73 g der gemahlenen Teilproben wurden auf den Plastikdeckeln möglichst gleichmäßig ausgebreitet und im Klimaschrank für 28 Tage gelagert. Diesmal erfolgten die Probenahmen nach sieben, 14 und 28 Tagen, wobei von jeder Probe ca. 8 g Material mit einem kleinen Metalllöffel punktuell an mehreren Stellen entnommen wurde, wie in Abb. 12 zu sehen. Nach jeder Entnahme wurde das verbliebene Material erneut gleichmäßig verteilt.



Abbildung 12: Die Probe 25300 nach der Entnahme der Teilprobe nach 14 Tagen Lagerung im Klimaschrank (eigene Aufnahme)

Auch die im zerkleinerten Zustand gelagerten Proben wurden auf ihre chemische und mineralogische Zusammensetzung untersucht. Zudem wurde jeweils eine gemahlene Teilprobe ohne Lagerung in der Klimaprüfkammer den gleichen Untersuchungen unterzogen. Diese trägt den Index vier, wie in der Teilprobenübersicht in Abb. 13 dargestellt.

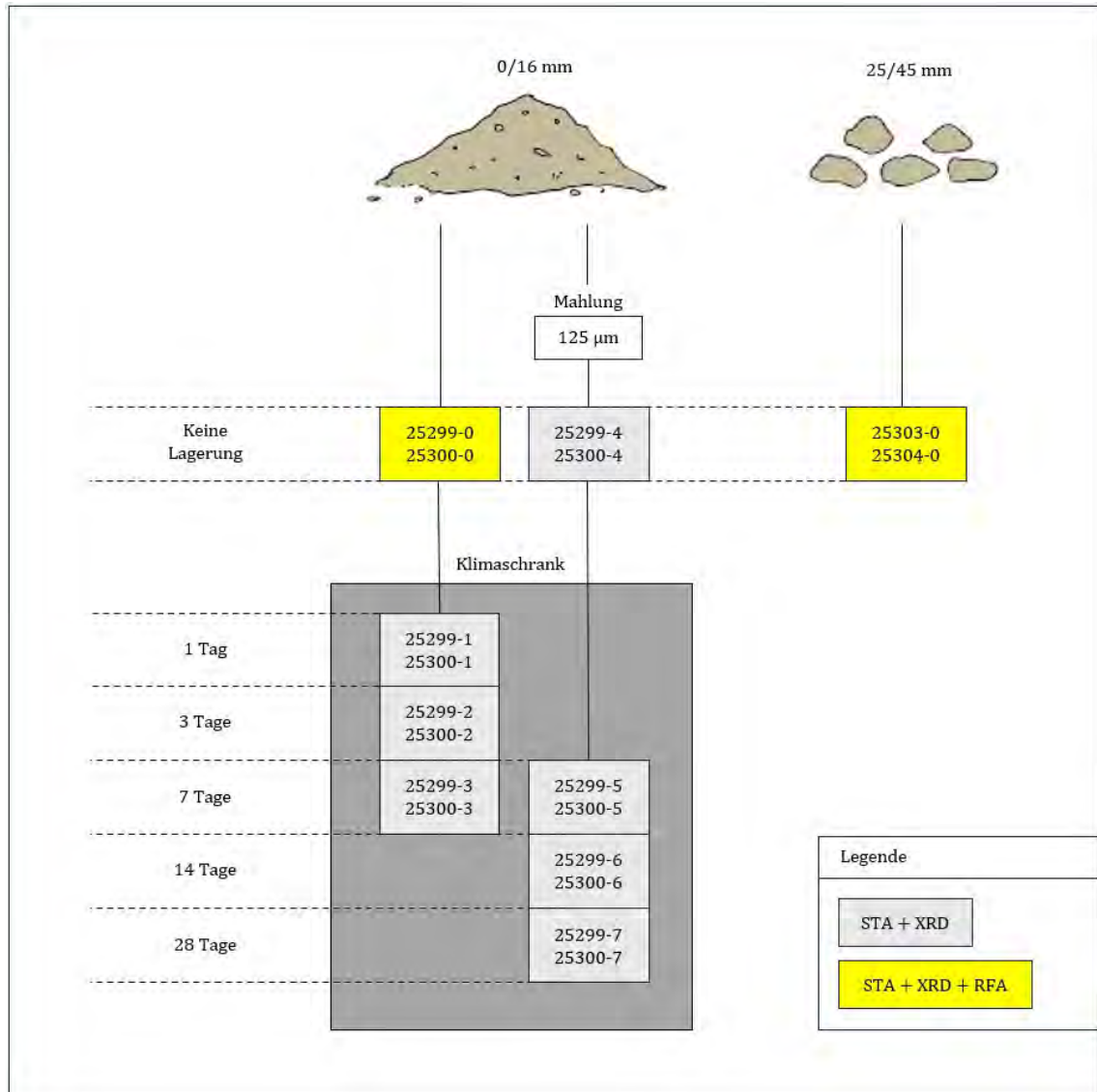


Abbildung 13: Grafik zur Übersicht der Teilprobennummern und entsprechenden Analysen, welche an den jeweiligen Proben vorgenommen wurden (eigene Darstellung)

5.2 Phenolphthalein-Prüfung grober Betonbruchproben

Von den Proben 25305 und 25306 wurden jeweils drei Steine vom Mitte April bis Mitte August offen in einem Büroregal gelagert. Die hierfür ausgewählten Proben sind im Kapitel *Material und Methoden* in Abbildung 8) zu sehen. Die restlichen Steine wurden in Plastiktüten in einem dicht verschlossenem Behälter aufbewahrt, um den potentiellen Carbonatisierungsvorgang durch Unterbindung der Frischluftzufuhr möglichst einzuschränken (Abb. 14).



Abbildung 14: Die unter Verschluss gelagerten Proben 25305 und 25306 (eigene Aufnahme)

Alle im Regal gelagerten Steine sowie jeweils drei der unter Verschluss gelagerten Steine wurden mit dem Indikator Phenolphthalein besprüht. Dabei wurden zunächst die Steine aus dem Regal mittels Hammer und Meißel aufgebrochen und unmittelbar nach dem Aufbrechen mit Phenolphthalein an der Bruchfläche besprüht. Die besprühten Oberflächen wurden photographisch aufgezeichnet. Die aus der Farbänderung ersichtliche Carbonatisierungstiefe, gegeben als ein Rand (Beispiel in Abb. 15), wurde jeweils ausgemessen und notiert.



Abbildung 15: Die besprühte Bruchfläche mit deutlich sichtbarem Rand (eigene Aufnahme)

Die dicht verpackt gelagerten Proben wurden vor dem Aufbrechen von allen Seiten besprüht, um zunächst festzustellen, ob deren Oberfläche bereits carbonatisiert ist. Danach wurden auch diese Steine aufgebrochen und deren Bruchkanten mit Phenolphthalein besprüht. Auch diese Ergebnisse wurden photographisch dokumentiert.

6 Ergebnisse

Die Ergebnisse der Untersuchungen sind im Folgenden nach Korngröße der Proben gegliedert. Dabei werden zur besseren Übersicht nur die Probennummern der Ausgangsproben jeweils in der Überschrift genannt - die dazugehörigen Teilproben sind entsprechend in den Kapiteln enthalten.

6.1 Feine Fraktion (Proben 25299 und 25300)

Partikelgröße

Die Ergebnisse der Siebanalysen der beiden feinkörnigen Ausgangsproben sind in einem gemeinsamen Diagramm dargestellt.

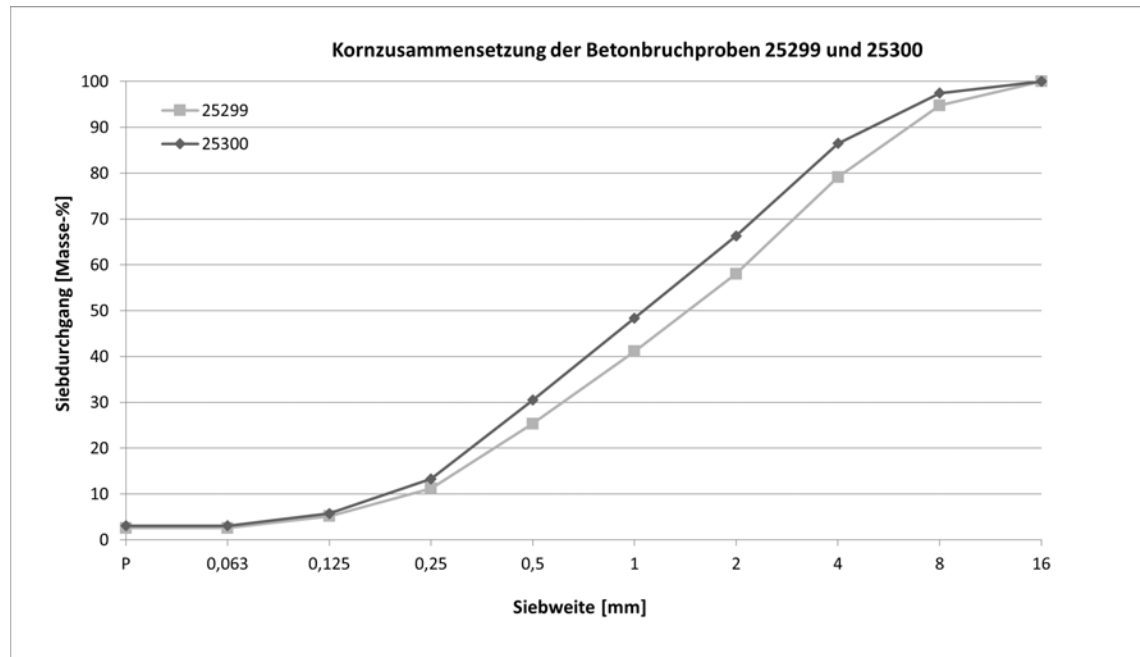


Abbildung 16: Kornzusammensetzung der beiden feinkörnigen Ausgangsproben mit den Probennummern 25299 und 25300

Aus dem Diagramm lässt sich entnehmen, dass beide Proben eine nahezu identische Korngrößenverteilung aufweisen und bei beiden die größten vorkommenden Partikel kleiner als 16 mm sind.

Die mittels des Partikelanalysators Beckman Coulter bestimmten Korngrößenverteilungen der auf <125 µm aufgemahlenen Ausgangsproben mit den Probennummern 25299-4 und 25300-4 wurden in zwei gemeinsamen Diagrammen dargestellt. In Abbildung Abb. 17 sind die Durchgangssummenkurven beider Proben dargestellt, in Abbildung Abb. 18 hingegen die beiden Verteilungsdichtekurven.

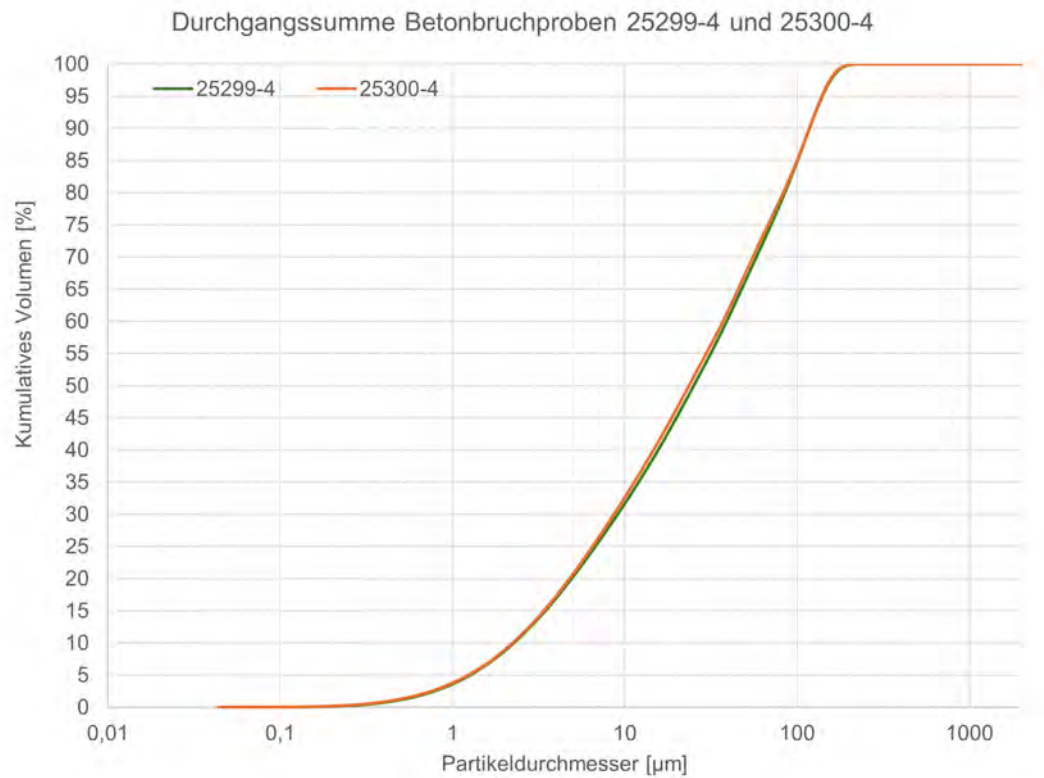


Abbildung 17: Durchgangssummenkurven der Proben 25299-4 und 25300-4

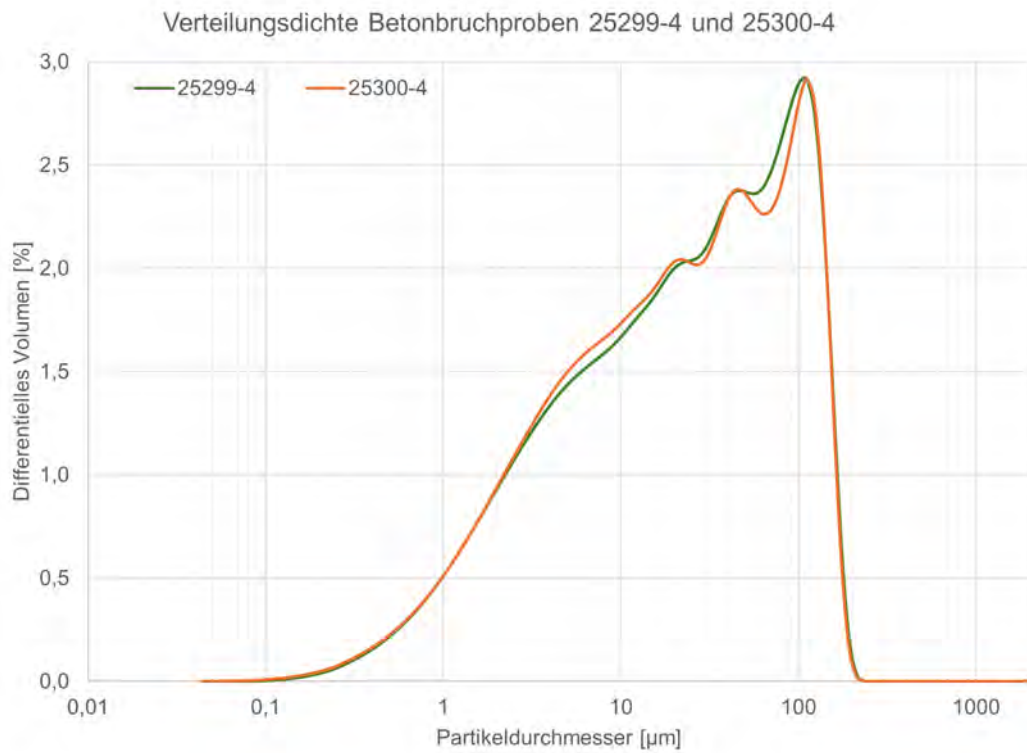


Abbildung 18: Verteilungsdichtekurven der Proben 25299-4 und 25300-4

Röntgenfluoreszenzanalyse und Glühverlust

Die Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse und des Glühverlustes der feinkörnigen Ausgangsproben sind in der Tabelle 3 dargestellt.

Tabelle 3: Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse und Glühverlust der feinen Proben

Probe \ M.-%	GV	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	K₂O	Na₂O	SO₃
25299-0	7,86	57,8	7,67	4,99	13,4	2,60	2,40	1,20	0,61
25300-0	9,79	55,7	6,39	4,08	16,6	2,78	1,89	1,03	0,53

Röntgendiffraktometrie und Simultanthermoanalyse

In folgender, gemeinsamer Tabelle sind die Ergebnisse der Analysen der XRD sowie STA der Proben 25299 dargestellt (Tabelle 5).

Tabelle 4: Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie sowie der Simultanthermoanalyse für die Proben 25299

Probennummer	25299-0	25299-1	25299-2	25299-3	25299-4	25299-5	25299-6	25299-7	25999-8
Korngröße	0/16 mm	0/16 mm	0/16 mm	0/16 mm	0/125 µm	0/125 µm	0/125 µm	0/125 µm	0/125 µm
CO ₂ -Behandlung	keine	1 Tag KS	3 Tage KS	7 Tage KS	keine	7 Tage KS	14 Tage KS	28 Tage KS	31 Tage MW
Angabe in Ma.-%									
Calciumhydroxid	0,8	0,8	1,3	1,3	1,3	1,7	1,7	1,7	1,7
Calciumcarbonat	11,4	12,3	13,4	12,5	11,1	13,2	13,6	13	15,7
Masseverluste in %									
Temperaturbereich									
RT - 75 °C, Feuchte	0,9	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,7	0,4	0,4
75°C - 115°C, H ₂ O (Gips, Ettringit)	1	0,7	0,6	0,6	1	0,6	0,6	0,6	0,6
115°C - 200°C, H ₂ O (Ettringit, CSH)	0,8	0,8	0,6	0,5	0,8	0,6	0,6	0,5	0,5
200°C - 400°C, H ₂ O, OH (CSH)	0,6	0,5	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,4
200°C - 400°C, Org. leicht flüchtig	0,6	0,5	0,5	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
425°C - 475°C Portlandit	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4
400°C - 600°C Org. schwer flüchtig	-	-	-	-	-	-	-	-	-
400°C - 550°C, H ₂ O, OH (?)	0,7	0,8	0,8	0,8	0,6	0,8	0,9	0,9	0,6
550°C - 600°C beginnt Calcit: -CO ₂	0,4	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	0,7	0,7	0,4
600°C - 800°C, CO ₂ -Abgabe Calcit	4,6	4,9	5,4	5	4,5	5,2	5,3	5	6,5
800°C - 1000°C Restentgasung	0,3	0,1	0,2	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1
Gesamt-MV	10,1	9,4	9,7	9,2	9,4	9,8	10,3	9,5	10,4
Restmasse nach 1000°C	89,8	90,6	90,3	90,8	90,5	90,1	89,7	90,5	89,4

Analog sind die Ergebnisse der Proben 25300 in Tabelle ?? dargestellt.

Tabelle 5: Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie sowie der Simultanthermoanalyse für die Proben 25299

Probennummer	25300-0	25300-1	25300-2	25300-3	25300-4	25300-5	25300-6	25300-7	25300-8
Korngröße	0/16 mm	0/16 mm	0/16 mm	0/16 mm	0/125 µm	0/125 µm	0/125 µm	0/125 µm	0/125 µm
CO ₂ -Behandlung	keine	1 Tag KS	3 Tage KS	7 Tage KS	keine	7 Tage KS	14 Tage KS	28 Tage KS	31 Tage MW
Angabe in Ma.-%									
Portlandit	1,2	1,2	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	1,7	0,8
Calcit	15,7	12,5	14,3	12,5	10,5	13	12,3	12,7	15,9
Masseverluste in %									
Temperaturbereich									
RT - 75 °C, Feuchte	0,5	0,4	0,5	0,4	0,5	0,6	0,7	0,5	1
75°C - 115°C, H ₂ O (Gips, Ettringit)	0,9	0,6	0,6	0,6	1	0,6	0,5	0,6	1
115°C - 200°C, H ₂ O (Ettringit, CSH)	0,8	0,6	0,6	0,6	0,9	0,6	0,5	0,4	0,5
200°C - 400°C, H ₂ O, OH (CSH)	0,5	0,5	0,5	0,4	0,6	0,5	0,4	0,4	0,5
200°C - 400°C, Org. leicht flüchtig	0,5	0,5	0,6	0,5	0,6	0,5	0,5	0,5	0,5
425°C - 475°C Portlandit	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,2
400°C - 600°C Org. schwer flüchtig	-	-	-	-	-	-	-	-	-
400°C - 550°C, H ₂ O, OH (?)	0,4	0,8	1	0,9	0,5	0,9	0,9	1	0,6
550°C - 600°C beginnt Calcit; -CO ₂	0,3	0,6	0,7	0,6	0,4	0,7	0,7	0,7	0,5
600°C - 800°C, CO ₂ -Abgabe Calcit	6,3	4,9	5,6	4,9	4,2	5	4,7	4,9	6,5
800°C - 1000°C Restentgasung	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,1	0,1	0,1	0
Gesamt-MV	10,8	9,4	10,7	9,5	9,4	9,9	9,4	9,5	11,3
Restmasse nach 1000°C	89,8	90,6	90,3	90,8	90,5	90,1	89,7	90,5	89,4

6.2 Mittlere Fraktion (Proben 25303 und 25304)

Röntgenfluoreszenzanalyse und Glühverlust

Die Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse und des Glühverlustes der Ausgangsproben der mittleren Partikelgröße sind in der Tabelle 9 dargestellt.

Tabelle 6: Ergebnisse der Röntgenfluoreszenzanalyse und Glühverlust der mittleren Proben

Probe \ M.-%	GV	SiO₂	Al₂O₃	Fe₂O₃	CaO	MgO	K₂O	Na₂O	SO₃
25303-0	15,35	68,4	4,52	1,95	7,02	0,61	1,42	0,20	0,17
25304-0	15,26	46,34	6,12	4,04	20,34	3,90	1,10	1,09	0,46

Röntgendiffraktometrie und Simultanthermoanalyse

Die Tabelle 7 zeigt die Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie sowie der Simultanthermoanalyse für die mittlere Gesteinskörnung.

Tabelle 7: Ergebnisse der Röntgendiffraktometrie sowie der Simultanthermoanalyse für die mittlere Gesteinskörnung.

Probennummer	25303	25304
Korngröße	25/45 mm	25/45 mm
CO ₂ -Behandlung	keine	keine
Angabe in Ma.-%		
Quarz	50	29
Calciumhydroxid	-	-
Calciumcarbonat	11,8	18,0
Masseverluste in %		
Temperaturbereich		
RT - 75 °C, Feuchte	0,5	0,4
75°C - 115°C, H ₂ O (Gips, Ettringit)	0,3	0,5
115°C - 200°C, H ₂ O (Ettringit, CSH)	0,3	0,6
200°C - 400°C, H ₂ O, OH (CSH)	?	0,4
200°C - 400°C, Org. leicht flüchtig	6,7	0,3
425°C - 475°C Portlandit	-	-
400°C - 600°C Org. schwer flüchtig	2,6	-
400°C - 550°C, H ₂ O, OH (?)	?	1
550°C - 600°C beginnt Calcit: -CO ₂	0,4	0,6
600°C - 800°C, CO ₂ -Abgabe Calcit	4,8	11,7
800°C - 1000°C Restentgasung	0,1	0,1
Gesamt-MV	15,7	15,6
Restmasse nach 1000°C	84,2	84,4

Die Calciumhydroxidgehalte lagen unterhalb von 0,5 Massenprozent.

6.3 Grobe Fraktion (Proben 25305 und 25306)

Phenolphthaleinprüfung

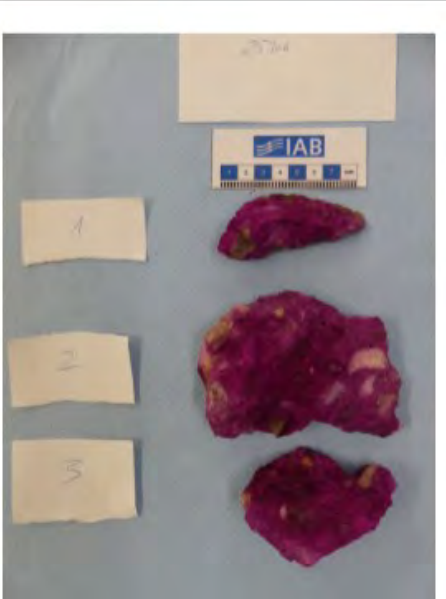
Tabelle 8: Carbonatisierungstiefe unverpackt gelagerter Proben

Aufbewahrung	Probe	Tiefe in mm			
unverpackt	25305-1	4	2	-	-
	25305-2	4	2	3	-
	25305-3	1,6 (außen)	1,5	2,5	-
	25306-1	4	9 (Pore)	1	8
	25306-2	4	2	-	-
	25306-3	8	4	1	-

Tabelle 9: Carbonatisierungstiefe und Farbe verpackt gelagerter Proben

Aufbewahrung	Probe	Farbe/Tiefe
verpackt	25305-1	nicht violett (Bewehrung)
	25305-2	vollständig violett
	25305-3	vollständig violett
	25306-1	4 mm Tiefe
	25306-2	vollständig violett
	25306-3	vollständig violett

Folgende Abbildung zeigt die jeweils verpackten und unverpackten Steine.

	25305 (vorderer Haufen, frisch)	25306 (hinterer Haufen, sortiert)
unverpackt gelagert		
verpackt gelagert		

6.4 Berechnung des maximalen Calcitgehaltes und Ermittlung der maximalen CO₂-Aufnahme eines hypothetischen Betons

Um feststellen zu können, inwieweit die Carbonatisierung vorangeschritten ist, muss der erreichte Massengehalt an Calciumcarbonat dem maximal möglichen gegenübergestellt werden. Letzterer lässt sich anhand der Massengehalte und plausibler Annahmen für die Zusammensetzung eines beispielhaften Betons berechnen. Somit werden der Zementgehalt im Beton, die Reindichte des Betons, der Klinkeranteil sowie die Anteile der Klinkerphasen im Zement angenommen. Unter diesen Annahmen lässt sich die theoretische maximale CO₂-Aufnahme infolge der Carbonatisierung bestimmen. Die folgende Berechnung wird für einen Beton mit der Zementart CEM I durchgeführt, da diese Zementart in den letzten Jahrzehnten überwiegend verwendet wurde. Zudem weist CEM I den höchsten Klinkeranteil unter allen Zementarten auf, nämlich zwischen 95 und 100 %, und hat somit das höchste CO₂-Aufnahmepotential. Ferner wurde eine in der Praxis gebräuchliche Zementmenge von 350 kg Zement für einen Kubikmeter Beton angenommen. Die Reindichte für

den Normalbeton liegt bei 2500 kg/m^3 , welche für die Berechnungen angenommen wurde. Anhand der chemischen Gleichungen zur Umsetzung der Klinkerphasen Alit ($3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$, in der Zementchemie auch als C_3S bezeichnet) und Belit ($2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2$ bzw. C_2S) wird zunächst die Menge des Calciumhydroxids ($\text{Ca}(\text{OH})_2$ bzw. CH) für einen Kubikmeter Beton bestimmt:

Annahmen:

$1 \text{ m}^3 \text{ Beton} \Rightarrow 350 \text{ kg Zement}$

Klinkeranteil im Zement = 100 %

Somit Klinkeranteil in $1 \text{ m}^3 \text{ Beton} = 350 \text{ kg}$

Anteil der Klinkerphasen im Zement:

60 % $3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\text{Alit}) \Rightarrow 210 \text{ kg } 3 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2 / \text{m}^3 \text{ Beton}$

20 % $2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2 (\text{Belit}) \Rightarrow 70 \text{ kg } 2 \text{ CaO} \cdot \text{SiO}_2 / \text{m}^3 \text{ Beton}$

Reaktionsgleichungen für die Umsetzung der Klinkerphasen (Alit in (11) und Belit in (12)) und Bildung von Calciumhydroxid:



Zunächst werden anhand der Gleichung (11) die molaren Massen für das Alit und das daraus umgesetzte Calciumhydroxid bestimmt:

$$M_{2(3\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)} = 2[3(40 + 16) + 28 + (2 \cdot 16)] \text{ g/mol} = 456 \text{ g/mol}$$

$$M_{3\text{Ca}(\text{OH})_2} = 3[40 + 2(16 + 1)] \text{ g/mol} = 222 \text{ g/mol}$$

Anhand der Massenverhältnisse lässt sich die Menge des infolge der Umsetzung entstandenes Calciumhydroxids aus 1 kg Alit bestimmen:

$$\frac{456 \text{ g/mol}}{222 \text{ g/mol}} = \frac{1000 \text{ g}}{m_{\text{Ca}(\text{OH})_2}}$$

$$m_{\text{Ca}(\text{OH})_2} = 0,487 \text{ kg/kg Alit}$$

Analog wird die Calciumhydroxidmasse infolge der Umsetzung aus Gleichung (12) berechnet:

$$M_{2(2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2)} = 2[2(40 + 16) + 28 + (2 \cdot 16)] \text{ g/mol} = 344 \text{ g/mol}$$

$$M_{\text{Ca}(\text{OH})_2} = [40 + 2(16 + 1)] \text{ g/mol} = 74 \text{ g/mol}$$

So ergibt sich aus 1 kg Belit :

$$\frac{344 \text{ g/mol}}{74 \text{ g/mol}} = \frac{1000 \text{ g}}{m_{\text{Ca}(\text{OH})_2}}$$

$$m_{\text{Ca}(\text{OH})_2} = 0,215 \text{ kg/kg Belit}$$

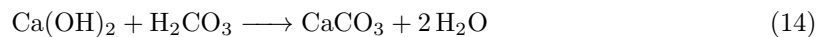
Nun lassen sich die jeweiligen Mengen des Calciumhydroxids aus Umsetzung von Alit und Belit anhand derer Gehalte im Zement für einen Kubikmeter Beton berechnen:

$$210 \text{ kg Alit} \cdot 0,487 \text{ kg Ca}(\text{OH})_2 / \text{kg Alit} = 102,27 \text{ kg Ca}(\text{OH})_2$$

$$70 \text{ kg Belit} \cdot 0,215 \text{ kg Ca}(\text{OH})_2 / \text{kg Belit} = 15,05 \text{ kg Ca}(\text{OH})_2$$

$$102,27 \text{ kg Ca}(\text{OH})_2 + 15,05 \text{ kg Ca}(\text{OH})_2 = 117,32 \text{ kg Ca}(\text{OH})_2 / \text{m}^3 \text{ Beton} \quad (13)$$

Bei vollständiger Umsetzung des Calciumhydroxids in Calciumcarbonat nach folgender Reaktionsgleichung



sowie entsprechender Bilanz der molaren Massen

$$M_{\text{Ca}(\text{OH})_2} = 40 + 2 \cdot (16 + 1) \text{ g/mol} = 74 \text{ g/mol}$$

$$M_{\text{CaCO}_3} = 40 + 12 + (3 \cdot 16) \text{ g/mol} = 100 \text{ g/mol}$$

$$\frac{57 \text{ g/mol}}{100 \text{ g/mol}} = \frac{117,32 \text{ g}}{m_{\text{CaCO}_3}}$$

erhält man die maximal mögliche Calciumcarbonatmasse pro Kubikmeter Beton:

$$m_{\text{CaCO}_3 \text{ max/m}^3 \text{ Beton}} = 205,82 \text{ kg/m}^3 \text{ Beton}$$

$$m_{\text{H}_2\text{CO}_3 \text{ max/m}^3 \text{ Beton}} = \text{kg/m}^3 \text{ Beton}$$

Durch Umrechnung auf eine Tonne Beton unter Annahme der Betondichte von 2500 kg/m^3 ergibt sich folgende spezifische maximale Masse des Calciumcarbonats für eine Tonne Beton:

$$m_{\text{CaCO}_3 \text{ max/kg Beton}} = \frac{205,82 \text{ kg/m}^3 \text{ Beton}}{2500 \text{ kg/m}^3} = 0,082 \text{ kg/kg Beton}$$

Dies bedeutet, dass das Calciumcarbonat aus vollständiger Calciumhydroxidumsetzung maximal $8,2\%$ der untersuchten Gesamtmasse des Betons betragen kann. Auf gleiche Weise lässt sich der maximale Massenanteil des Calciumhydroxids bestimmen, basierend auf der zuvor in Gleichung 13 bestimmten Menge pro Kubikmeter Beton, welcher $4,7\%$ beträgt.

Im Weiteren wird der maximale CaCO_3 -Wert zur Berechnung des aufgenommenen CO_2 verwendet:

$$m_{\text{CaCO}_3 \text{ max/t Beton}} = 82 \text{ kg/t Beton}$$

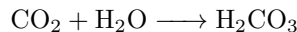
Aus der Gleichung (14) ergibt sich für das H_2CO_3 folgende Beziehung:

$$\frac{62 \text{ g/mol}}{100 \text{ g/mol}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{CO}_3 \text{ max/t Beton}}}{m_{\text{CaCO}_3 \text{ max/t Beton}}} = \frac{m_{\text{H}_2\text{CO}_3 \text{ max/t Beton}}}{82 \text{ kg/t Beton}}$$

$$m_{\text{H}_2\text{CO}_3 \text{ max/t Beton}} = \frac{62 \text{ g/mol}}{100 \text{ g/mol}} \cdot 82 \text{ kg/t Beton} = 50,84 \text{ kg/t Beton}$$

$$m_{\text{H}_2\text{CO}_3 \text{ max/kg Beton}} = 50,84 \text{ kg/t Beton}$$

Das hierfür nötige CO_2 , welches durch Umwandlung zum H_2CO_3 in der Gleichung (14) wird, ergibt sich wiederum aus folgender Reaktion:



Basierend auf den molaren Massen errechnet sich folgendermaßen:

$$\frac{44 \text{ g/mol}}{62 \text{ g/mol}} = \frac{m_{\text{CO}_2 \text{ max/t Beton}}}{m_{\text{H}_2\text{CO}_3 \text{ max/t Beton}}} = \frac{m_{\text{CO}_2 \text{ max/t Beton}}}{50,84 \text{ kg/t Beton}}$$

woraufhin sich die maximale CO_2 -Aufnahme durch eine Tonne Beton rechnerisch ergibt:

$$m_{\text{CO}_2 \text{ max/t Beton}} = 36,08 \text{ kg/t Beton}$$

Dabei ist anzumerken, dass dieser theoretische Wert voraussetzt, dass die gesamte Menge der vorhandenen Klinkerphasen im Zement vollständig hydratisiert vorliegen, was in der Praxis niemals der Fall ist.

7 Schlussfolgerungen und Fazit

Die Gehalte an Calciumhydroxid und Calciumcarbonat aller Teilproben unterscheiden sich voneinander nur geringfügig und weisen keine klaren Änderungen auf, die auf die Behandlung der Proben oder auf deren Korngröße zurückzuführen wäre. Der erwartete Anstieg des Calciumcarbonatgehaltes unter gleichzeitiger Abnahme des Calciumhydroxidgehaltes infolge der Carbonatisierung, welcher zum steigenden Zerkleinerungsgrad und steigender Lagerungszeit im Klimaschrank proportional sein sollte, wird somit durch die Messdaten nicht bekräftigt/ ist in den Messdaten nicht sichtbar.

Während die Calciumhydroxidgehalte aller Proben unterhalb des maximalen Gehaltes von 4,67 M.-% liegen und somit plausibel und nicht weiter auffällig sind, übersteigen die Calciumcarbonatgehalte aller Proben den rechnerisch ermittelten Wert für den maximalen Massengehalt des Calciumcarbonats im Beton von 8,2 M.-%.

Die Röntgenfluoreszenzanalyse aller untersuchten Ausgangsproben ergab Gehalte der einzelnen Oxide sowie der Glühverluste, die im Bereich der typischen Werte für Betonbruch liegen. Dabei ist der Glühverlust der Proben der Körnung 25/45 mm höher, als der Glühverlust der Proben der Klasse 0/16 mm. Dies ist bei der Probe 25303-0 auf leichtflüchtige Bestandteile zurückzuführen, also auf enthaltene Organik. Bei der Probe 25304-0 hingegen hängt dies mit einem höheren Calciumcarbonatgehalt zusammen.

Die Untersuchungen der groben Proben mithilfe des Phenolphthaleintests deuten darauf hin, dass die Betonbruchstücke zu dem Zeitpunkt der Probenahme noch nicht carbonatisiert vorlagen und der Carbonatisierungsvorgang selbst an ihrer Oberfläche noch nicht merklich vorangeschritten ist, bis auf ein Bruchstück, welches vermutlich bereits vor dem Abriss durchcarbonatisiert ist, worauf die braune Einkerbung in Form und Dimension einer Bewehrung auf einen Rostrückstand einer Bewehrung hindeuten (??). Im Anbetracht der kurzen Verweilzeit der groben Betonbruchstücke auf dem Recyclinghof sowie der Tatsache, dass die Bruchstücke aus unterschiedlichen Tiefen eines Betonbauwerks abstammen können, ist es möglich, dass die Bruchstücke zum Zeitpunkt der Probenahme selbst auf ihrer Oberfläche noch nicht carbonatisiert waren. So können die Bruchstücke mit violett verfärbten Oberflächen beispielsweise Bruchstücke des Inneren eines frisch abgebrochenen Betonbauteils darstellen. Die Färbung der im Büroregal aufbewahrten Betonproben lässt die Vermutung zu, dass die Proben nach viermonatiger Lagerung mit für die Frischluft frei zugänglicher Oberfläche, wenige Millimeter tief durchcarbonatisiert sind. Eines dieser Bruchstücke scheint ein Stück einer Außenwand zu sein(??), da es an seiner glatten Seite unverfärbt geblieben ist und eine höhere Carbonatisierungstiefe gegenüber den im Regal gelagerten Proben aufweist.

Unter gleichzeitiger Betrachtung der angegebenen Lagerungszeiten einzelner Halden sowie der Ergebnisse der Simultanthermoanalyse samt der Röntgendiffraktometrie sowie der Phenolphthaleinuntersuchung kommt die Vermutung auf, dass die feinen und mittleren Proben bereits auf dem Recyclinghof durchcarbonatisiert sind. Die groben Betonbruchstücke wurden frisch angeliefert bzw. wurden zunächst sortiert während die feine Fraktion ca. zwei Monate im gebrochenen Zustand auf dem Recyclinghof lag. Innerhalb dieser Zeit könnte der feine Betonbruch durchcarbonatisiert sein. Die durch den Phenolphthaleintest ermittelte Tiefe der Carbonatisierung grober Betonproben beträgt im Mittel ca. 3 mm nach viermonatiger, offener Lagerung. Das feinkörnige Material verblieb etwa die Hälfte dieser Zeit auf dem Recyclinghof. Der Siebdurchgang der feinen Proben bei einer Siebweite von 3 mm betrug 70% und 75%. Da die Carbonatisierungstiefe mit der Wurzel der Zeit ansteigt, lässt sich pauschal sagen, dass nach der Hälfte der Zeit die Tiefe zwischen 1,5 mm (also die Hälfte) und 3 mm angenommen wird. In diesem Bereich der Siebweite ist der massenbezogene Durchgang beider Proben bei über 50%. Da die Zementmatrix eine geringere Druckfestigkeit aufweist als die Gesteinskörnung, ist der Zementstein überwiegend in dem feinen Anteil der Probe gegeben, wobei die größeren Partikel oft Naturgestein der Betonkörnung darstellen. Anhand der feinen Proben 25299 und 25300 ist dies zu bestätigen, wie in Abb. 10 zu erkennen ist. Dies bedeutet, dass der Zementstein der feinen Proben im Zeitraum von ca. zwei Monaten auf dem Recyclinghof durchaus vollständig carbonatisiert sein könnte, anhand des Vergleichs mit der Carbonatisierungstiefe der groben Proben.

Genauere Angaben zur Lagerungsdauer der mittleren Fraktion fehlen. So ist es vorstellbar, dass das Material aufgrund möglicher monatelanger Lagerung auf dem Recyclinghof durchcarbonatisiert ist, zumal die entnommenen Steine von der Oberfläche des Haufens entnommen wurden, wo die

Frischlufztzufuhr stets gewährleistet ist und nach dem Regen die Trocknung am schnellsten erfolgt. Die Annahme, dass die mittleren und feinen Proben bereits auf dem Recyclinghof im vollständig carbonatisiertem Zustand vorlagen, wird durch die erfassten Gehalte des Calciumcarbonats und des Calciumhydroxids dieser beider Fraktionen bekräftigt. Alle Calciumcarbonatwerte liegen über dem theoretisch errechneten maximalen Gehalt, was auf eine fortgeschrittene Carbonatisierung hindeuten kann. Der hohe Calciumcarbonatwert kann andererseits auf Verwendung von Kalkstein (Calciumcarbonat) als Gesteinskörnung des untersuchten Betons oder Zugabe von Kalksteinmehl als Zusatzstoff hindeuten. Zudem gibt es kaum Unterschiede in den Calciumhydroxidgehalten der feinen Proben. Dies könnte bedeuten, dass infolge der Carbonatisierung das aufgrund der Zementsteinstruktur für die Carbonatisierung zugängliche Calciumhydroxid bereits umgesetzt wurde und somit der nicht zugängliche Anteil des Calciumhydroxids den gemessenen Gehalt widerspiegelt.

Auf die Verwendung von Kalkstein als Gesteinskörnung deutet ebenfalls der hohe Calciumcarbonatgehalt der Probe 25304-0 hin, welcher sowohl durch die XRD-Analyse wie auch die Simultanthermoanalyse und Röntgenfluoreszenzanalyse ermittelt wurde.

Dabei ist zu beachten, dass der Ursprung der jeweiligen Fraktionen unterschiedlich sein kann. Es ist unbekannt, ob und zu welchem Grade die einzelnen Fraktionen den selben Ursprung haben. Aus diesem Grunde ist ein direkter Vergleich der Gehalte zwischen den mittleren und feinen Proben nicht möglich bzw. nicht sinnvoll und kann nur zu einer groben Orientierung dienen.

Letztendlich lässt sich festhalten, dass die Bewertung des Carbonatisierungsgrades von Betonbruch aus einem Recyclinghof aufgrund vieler Unbekannten schwierig ist. Das Alter und Art des Bauwerks sowie die Zusammensetzung des Betons spielen hierbei eine Rolle - der Beton kann sich in der Zementart und Zementmenge sowie dem Wasser-Zement-Wert unterscheiden, in der Art und Menge der Zusatzmittel und Zusatzstoffe sowie der Gesteinskörnung, welche jeweils den Carbonatisierungsvorgang beeinflussen. Die meisten dieser Eigenschaften sind beim Abbruch und Rückbau eines Bauwerks nicht bekannt. Die im Zuge dieser Arbeit untersuchten Proben beinhalteten zudem eine weitere Unbekannte - den Zusammenhang zwischen den einzelnen untersuchten Fraktionen. Zwar deuten die Analysen darauf hin, dass ein hoher Carbonatisierungsgrad von Betonbruch möglich ist. Jedoch ist dies anhand der Probenmenge und Probenart nicht auf ein gesamtes Haufwerk übertragbar und lässt sich somit nicht quantifizieren. In einer engeren Zusammenarbeit mit einem Betonrecycler und in einem größerem Umfang ließen sich die Untersuchungen besser planen und umsetzen. Somit könnten Informationen über die genauen Lagerungszeiten und Zusammenhänge zwischen den Proben unterschiedlicher Korngröße erfasst und genutzt werden und somit die genauen Zusammenhänge feststellen.

Die berechnete, beispielhafte maximale CO₂-Aufnahme durch Beton ergab 36,08 kg/t Beton, ohne Berücksichtigung der unvollständigen Hydratation der Klinkerphasen. Während Neustark von einer CO₂-Aufnahme von mindestens 10 kg/t ausgeht, was im Vergleich zum theoretischen Wert realistisch erscheint, gibt das Unternehmen Heidelberg Materials an, sogar 100 bis 150 kg CO₂ pro Tonne eingesetzten Recyclats zu speichern, was den Wert der theoretische Berechnung deutlich übersteigt. Höchstwahrscheinlich spricht das Unternehmen von aufbereitetem Beton, bei welchem Zementstein angereichert wurde. In Anbetracht der laufenden Bemühungen, das CO₂ in Recyclingbeton zu speichern, kann einerseits festgestellt werden, dass weitere Forschung zum Carbonatisierungsgrad des Betonbruchs auf Recyclinghöfen interessant für die Feststellung wäre, wie viel mehr CO₂ durch gezielte Behandlung gespeichert werden kann im Vergleich zu einer "normalen" Lagerung auf dem Recyclinghof. Eine Berechnung anhand des Calcitgehaltes ohne bekannte Zusammensetzung des Betons lässt jedoch einen beträchtlichen Interpretationsspielraum bei der Auswertung. Dennoch könnte ein Trend bestimmt werden, anhand des Ausgangszustandes des frisch angelieferten Materials im Vergleich zu den Zuständen der davon abstammenden Fraktionen im Verlauf der Lagerung.

A Anhang

Im Folgenden sind die vollständigen Messprotokolle und Ergebnisse der Beauftragten sowie der eigenständig vorgenommenen Messungen aufgeführt.

A.1 Messprotokolle Partikelgrößenverteilung Beckmann Coulter

Korngrößenverteilung

Partikelgrößenanalysator Beckmann Coulter

LS 13 320 mit Universal Liquid Module

Messbereich: 0,04 µm - 2000 µm mit 116 Größenklassen

Material : 25299-4
Datum : 01.07.2025
Kunde : Carbonatisierung/Walewska

Messung Nummer	:		Kommentar	:	
Mehrfachmessung	:	gemittelt	Ultraschall	:	120 s intern
interne Datei	:	25299-4.\$av	Messkonzentration %	:	6
Dispergiermittel	:		PIDS Konzentration %	:	52
Prüfer / Operator	:	Khripacheva	Optisches Modell	:	Fraunhofer.rf780d Mit PIDS Dat
Firma	:	IAB gGmbH	Mess./Spülzeit.	:	
Ort	:	Weimar	Verdünnung	:	-

Probenanzahl :
Durchläufe : 3

Mittelwert x_m
mittlere Korngröße : 40,06 µm

Modalwert x_{mod}
Maximum der Häufigkeit : 105,93 µm

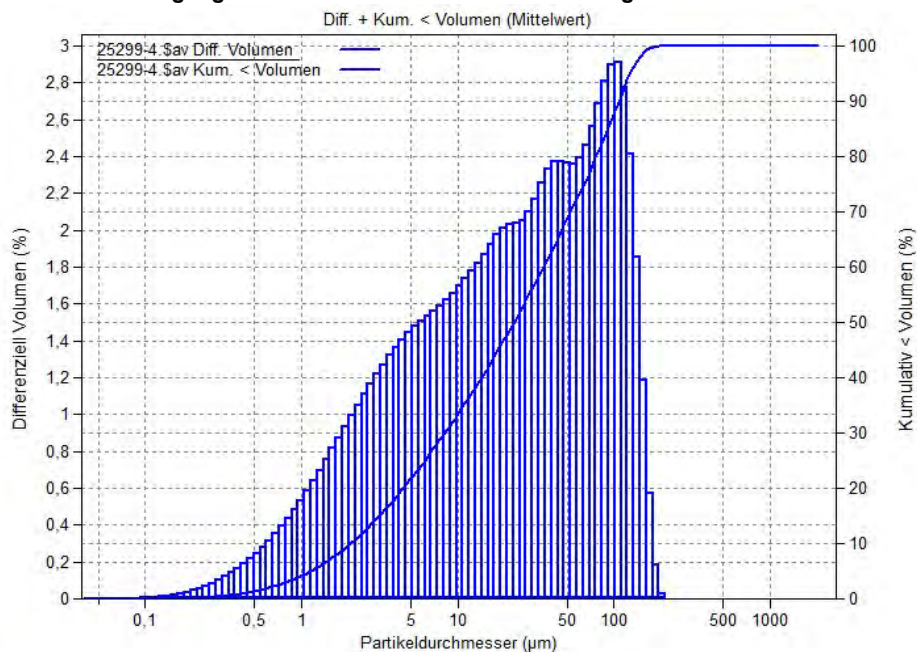
Medianwert x_{50}
Partikelgröße bei 50% : 22,90 µm

Partikelgröße bei 10% : 2,07 µm

Partikelgröße bei 90% : 107,67 µm

RRSB Verteilung
Lageparameter x' : 36,1 µm
Steigungsmaß n : 0,83

Durchgangskennlinie und Anteile in den Partikelgrößenklassen



Korngrößenverteilung

Partikelgrößenanalysator Beckmann Coulter

LS 13 320 mit Universal Liquid Module

Messbereich: 0,04 µm - 2000 µm mit 116 Größenklassen

Material : 25299-4
 Datum : 01.07.2025
 Kunde : Carbonatisierung/Walewska

Statistische Werte

Von	µm	0,040
bis	µm	2000
Volumen	%	100
Mittelwert:	µm	40,06
Medianwert:	µm	22,90
D(0,0):	µm	0,207
Mittel/Medianwert:	-	1,749
Maximum:	µm	105,93
S.D.:	µm	42,03
Varianz:	µm ²	1766,78
C.V.:	%	104,9
Schiefte:	-	1,151
Kurtosis:	-	0,397
Spez. Oberfläche:	cm ² /mL	11793,0
R-R_Dm:	µm	36,13
R-R_n:	-	0,832

Anteil % <	Partikelgröße [µm]
10	2,07
25	6,16
50	22,90
60	35,59
75	64,31
90	107,67

Ausgewählte Datenpunkte der Verteilung Klasseneinteilung nach R5 gewählt

Partikelgröße [µm]	Durchgang [Vol.-%]
0	% <
0,04	0,00
0,063	0,00
0,1	0,01
0,16	0,07
0,25	0,29
0,4	0,87
0,63	2,02
1	4,10
1,6	7,49
2,5	12,08
4	18,30
6,3	25,37
10	33,31
16	42,34
25	51,92
40	62,92
63	74,47
100	87,71
160	99,11
250	100,00
400	100,00
630	100,00
1000	100,00
1600	100,00
2500	100,00

Datum: 01.07.2025

Prüfer:

Khri

Korngrößenverteilung

Partikelgrößenanalysator Beckmann Coulter

LS 13 320 mit Universal Liquid Module

Messbereich: 0,04 μm - 2000 μm mit 116 Größenklassen

Material : 25300-4
Datum : 01.07.2025
Kunde : Carbonatisierung/Walewska

Messung Nummer	:		Kommentar	:	
Mehrfachmessung	:	gemittelt	Ultraschall	:	120 s intern
interne Datei	:	25300-4.\$av	Messkonzentration %	:	9
Dispergiermittel	:		PIDS Konzentration %	:	61
Prüfer / Operator	:	Khripacheva	Optisches Modell	:	Fraunhofer.rf780d Mit PIDS Dat
Firma	:	IAB gGmbH	Mess./Spülzeit.	:	
Ort	:	Weimar	Verdünnung	:	-

Probenanzahl :
Durchläufe : 3

Mittelwert x_m	:	39,05 μm
mittlere Korngröße	:	

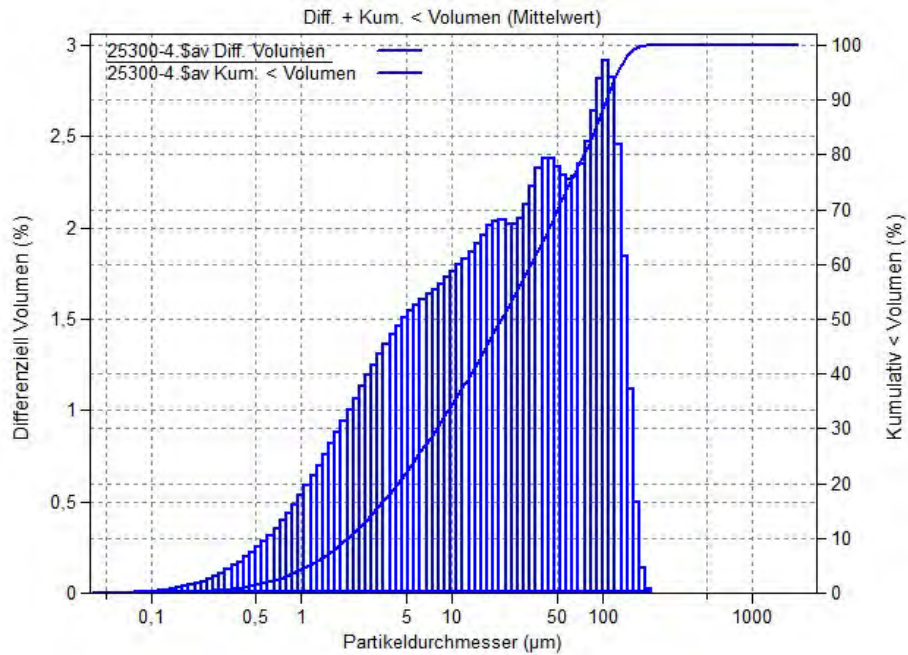
Modalwert x_{mod}	:	105,93 μm
Maximum der Häufigkeit	:	

Medianwert x_{50}	:	21,52 μm
Partikelgröße bei 50%	:	

Partikelgröße bei 10%	:	2,04 μm
Partikelgröße bei 90%	:	107,24 μm

RRSB Verteilung	:	
Lageparameter x'	:	34,9 μm
Steigungsmaß n	:	0,83

Durchgangskennlinie und Anteile in den Partikelgrößenklassen



Korngrößenverteilung

Partikelgrößenanalysator Beckmann Coulter

LS 13 320 mit Universal Liquid Module

Messbereich: 0,04 µm - 2000 µm mit 116 Größenklassen

Material : 25300-4
 Datum : 01.07.2025
 Kunde : Carbonatisierung/Walewska

Statistische Werte		
Von	µm	0,040
bis	µm	2000
Volumen	%	100
Mittelwert:	µm	39,05
Medianwert:	µm	21,52
D(0,0):	µm	0,160
Mittel/Medianwert:	-	1,815
Maximum:	µm	105,93
S.D.:	µm	41,67
Varianz:	µm ²	1736,52
C.V.:	%	106,7
Schiefte:	-	1,180
Kurtosis:	-	0,426
Spez. Oberfläche:	cm ² /mL	12380,7
R-R_Dm:	µm	34,87
R-R_n:	-	0,829

Anteil % <	Partikelgröße [µm]
10	2,04
25	5,93
50	21,52
60	33,82
75	61,85
90	107,24

Ausgewählte Datenpunkte der Verteilung Klasseneinteilung nach R5 gewählt	
Partikelgröße [µm]	Durchgang [Vol.-%]
0	% <
0,04	0,00
0,063	0,00
0,1	0,02
0,16	0,12
0,25	0,37
0,4	0,99
0,63	2,18
1	4,26
1,6	7,65
2,5	12,28
4	18,67
6,3	26,05
10	34,33
16	43,62
25	53,29
40	64,12
63	75,46
100	87,85
160	99,25
250	100,00
400	100,00
630	100,00
1000	100,00
1600	100,00
2500	100,00

Datum: 01.07.2025

Prüfer:

Khri

A.2 Messprotokolle der Siebanalyse

Korngrößenverteilung von Gesteinskörnungen und Gehalt an Feinanteilen nach DIN EN 933-1

Formblatt 851-2F004-03-1



Probematerial: Größtkorn:

Lieferwerk: Korngruppe:

geförderte Mindesteinwaage nach DIN EN 933-1:

Korngröße D max. mm	Masse der Meßprobe min. kg
63	40
32	10
16	2,5
8	0,6
≤ 4	0,2

Einwaagen (mindestens geförderte Mindesteinwaage):

Auswaage S Ri + P in g:

Einwaage vor Auswaschen (trocken) M₁ in g:

Abweichung:

Einwaage nach Auswaschen (trocken) M₂ in g:

zulässiger Wert:

Siebweiten in mm	P	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
Rückstand R _i auf jedem Sieb in g	27,4	27,6	64,3	149,5	167,4	179,0	223,7	166,0	55,4	0,0	0,0
Anteil auf dem Sieb in M ₁ -%	2,6	2,6	6,1	14,1	15,8	16,9	21,1	15,7	5,2	0,0	0,0
Durchgang in M ₁ -%	2,6	2,6	5,2	11,3	25,4	41,1	58,0	79,1	94,8	100,0	100,0

Gehalt an Feinanteilen < 63 µm:	
k-Wert:	2,9
D-Summe:	614,8

Prüfer: Walewska

Korngrößenverteilung von Gesteinskörnungen und Gehalt an Feinanteilen nach DIN EN 933-1

Formblatt 851-2F004-03-1



Probematerial: Größtkorn:

Lieferwerk: Korngruppe:

geförderte Mindesteinwaage nach DIN EN 933-1:

Korngröße D max. mm	Masse der Meßprobe min. kg
63	40
32	10
16	2,5
8	0,6
≤ 4	0,2

Einwaagen (mindestens geförderte Mindesteinwaage):

Auswaage S Ri + P in g:

Einwaage vor Auswaschen (trocken) M₁ in g:

Abweichung:

Einwaage nach Auswaschen (trocken) M₂ in g:

zulässiger Wert:

Siebweiten in mm	P	0,063	0,125	0,25	0,5	1	2	4	8	16	31,5
Rückstand R _i auf jedem Sieb in g	27,4	27,6	64,3	149,5	167,4	179,0	223,7	166,0	55,4	0,0	0,0
Anteil auf dem Sieb in M ₁ -%	2,6	2,6	6,1	14,1	15,8	16,9	21,1	15,7	5,2	0,0	0,0
Durchgang in M ₁ -%	2,6	2,6	5,2	11,3	25,4	41,1	58,0	79,1	94,8	100,0	100,0

Gehalt an Feinanteilen < 63 µm:	
k-Wert:	2,9
D-Summe:	614,8

Prüfer: Walewska

A.3 Messprotokolle der Röntgenfluoreszenzanalyse

Analyse	Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), Multielementanalyse von F bis U in Betonproben
Gerät	ZSX Primus IV (WD-RFA der Firma Rigaku; Rh-Anode, max 4 kW)
Probenpräparation	< 63 µm; Schmelztablette (bei 110°C getrocknete Probe / bei 1025°C geglühte Probe; Probe/Schmelzsalz = 1/10)
Messmethode	Semiquantitativ an Schmelztablette (Fundamentalparametermethode); Messatmosphäre: Vakuum
Ergebnis	Mittelwerte aus (mindestens) Doppelmessungen am Einzelpräparat; Die Angabe der Masseänderung beim Glühen bezieht sich auf die getrocknete Probe; (Angabe der Werte unter Berücksichtigung des Glühverlustes)
Ziel der Untersuchung:	

Projekt/Auftrag	L. Walewska/ BA Carbonatisierung
Datum	05.09.2025
Bearbeiter	Storch
Bemerkung(en):	Die Angabe von SO3 bei Schmelztabletten versteht sich als "Rest-SO3", da während der Probenpräparation (Glühen, Schmelzen) je nach Stoffart bzw. Verbindungstyp S- Die Berücksichtigung von davon abweichenden Bindungsformen setzt Kenntnisse über Art und Gehalt voraus. Annahme für die Auswertung von Presstabletten aus unbehandelten Proben: Die Komponenten liegen als Oxide vor.

n. b.	kann nicht berechnet oder angegeben werden
n. d.	nicht detektiert bzw. nicht nachgewiesen (Zusatzangabe "< x _{EG} ")
nw	nachgewiesen (x _{NG} ≤ x _{gemessen} < x _{BG}); Annahme BG = 3xNG
<i>kursiv</i>	Element < 3-mal pro Bestimmung detektiert bzw. nachgewiesen oder quantifizierbar
rot	Befund unsicher (z. B. wenn x ≤ Δx)
RSD	Relative Standardabweichung
x	Gehalt: wiederholt ermittelter Einzelwert nach Ausreißereliminierung (Zusatzangabe Δx)
Δx	Vertrauensintervall (P = 95 %)
x _{EG}	Höchstgehalt, wenn nicht nachgewiesen; Annahme EG = 2xNG
$\bar{x}$	Gehalt: Mittelwert nach Ausreißereliminierung
Δ $\bar{x}$	Vertrauensintervall (P = 95 %)
s	Standardabweichung (Stichprobe)
N	Anzahl der Messwerte nach Ausreißereliminierung bei Einzelbestimmung
n	Anzahl der Messwerte nach Ausreißereliminierung bei Mehrfachbestimmung
BG	Bestimmungsgrenze
EG	Erfassungsgrenze
NG	Nachweisgrenze

Analysenergebnisse:

IAB-Pr.Nr.	25299-0		IAB-Pr.Nr.	25300-0	
TV 110°C	1,36	M.-%	TV 110°C	1,29	M.-%
GV 1025°C	7,86	M.-%	GV 1025°C	9,79	M.-%

Element(oxid)	x [M.-%]	Δx oder. x _{EG} [M.-%]	Element(oxid)	x [M.-%]	Δx oder. x _{EG} [M.-%]
SiO2	57,8	0,04	SiO2	55,7	0,2
Al2O3	7,67	0,06	Al2O3	6,39	0,47
Fe2O3	4,99	0,001	Fe2O3	4,08	0,05
Cr2O3	0,02	0,01	Cr2O3	0,03	0,01
BaO	nw	n. b.	BaO	nw	n. b.
MnO	0,09	0,01	MnO	0,07	0,01
TiO2	0,82	0,03	TiO2	0,65	0,03
CaO	13,4	0,1	CaO	16,6	0,2
MgO	2,60	0,10	MgO	2,78	0,11
Na2O	1,20	0,18	Na2O	1,03	0,08
K2O	2,40	0,02	K2O	1,89	0,03
P2O5	0,29	0,01	P2O5	0,21	0,000
SO3	0,61	0,04	SO3	0,53	0,04
V2O5	0,02	0,01	V2O5	0,01	0,002
NiO	nw	n. b.	NiO	nw	n. b.
CuO	nw	n. b.	CuO	nw	n. b.
ZnO	nw	n. b.	ZnO	nw	n. b.
Ga2O3	n. d.	n. b.	Ga2O3	n. d.	n. b.
As2O3	n. d.	n. b.	As2O3	n. d.	n. b.
Rb2O	nw	n. b.	Rb2O	n. d.	n. b.
SrO	0,06	0,004	SrO	0,07	0,003
ZrO2	0,03	0,001	ZrO2	0,02	0,01
PbO	n. d.	n. b.	PbO	n. d.	n. b.
Co2O3	nw	n. b.			

Analyse Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA), Multielementanalyse von F bis U in keramischen Roh- und Werkstoffen
Gerät ZSX Primus IV (WD-RFA der Firma Rigaku; Rh-Anode, max 4 kW)
Probenpräparation < 63 µm; Schmelztablette (bei 40°C getrocknete Probe / bei 950°C gegläute Probe; Probe/Schmelzsalz = 1/10)
Messmethode Semiquantitativ an Schmelztablette (Fundamentalparametermethode); Messatmosphäre: Vakuum
Ergebnis getrocknete Probe; (Angabe der Werte unter Berücksichtigung des Glühverlustes)
Ziel der Untersuchung:

Projekt/Auftrag Walewska/ BA Carbonatisierung
Datum 18.06.2025
Bearbeiter Storch
Bemerkung(en): Die Angabe von SO3 bei Schmelztabletten versteht sich als "Rest-SO3", da während der Probenpräparation (Glühen, Schmelzen) je nach Stoffart bzw. Die Berücksichtigung von davon abweichenden Bindungsformen setzt Kenntnisse über Art und Gehalt voraus.
Annahme für die Auswertung von Presstabletten aus unbehandelten Proben: Die Komponenten liegen als Oxide vor.

- n. b.

kann nicht berechnet oder angegeben werden
- n. d.

nicht detektiert bzw. nicht nachgewiesen (Zusatzangabe "< x_{EG}")
- nw

nachgewiesen (x_{NG} ≤ x_{gemessen} < x_{BG}); Annahme BG = 3x_{NG}
- kursiv

Element < 3-mal pro Bestimmung detektiert bzw. nachgewiesen oder quantifizierbar
- rot

Befund unsicher (z. B. wenn x ≤ Δx)
- RSD

Relative Standardabweichung
- x

Gehalt: wiederholt ermittelter Einzelwert nach Ausreißereliminierung (Zusatzangabe Δx)
- Δx

Vertrauensintervall (P = 95 %)
- x_{EG}

Höchstgehalt, wenn nicht nachgewiesen; Annahme EG = 2x_{NG}
- $\bar{x}$

Gehalt: Mittelwert nach Ausreißereliminierung
- Δ $\bar{x}$

Vertrauensintervall (P = 95 %)
- s

Standardabweichung (Stichprobe)
- N

Anzahl der Messwerte nach Ausreißereliminierung bei Einzelbestimmung
- n

Anzahl der Messwerte nach Ausreißereliminierung bei Mehrfachbestimmung
- BG

Bestimmungsgrenze
- EG

Erfassungsgrenze
- NG

Nachweisgrenze

Analysenergebnisse:

IAB-Pr.Nr.	25303-0		IAB-Pr.Nr.	25304-0	
TV 40°C	0,05	M.-%	TV 40°C	0,07	M.-%
GV 950°C	15,35	M.-%	GV 950°C	15,26	M.-%

Element(oxid)	x [M.-%]	Δx oder. x _{EG} [M.-%]
SiO2	68,4	0,2
Al2O3	4,52	0,14
Fe2O3	1,95	0,04
Cr2O3	nw	n. b.
BaO	< 0,05	n. b.
MnO	0,07	0,005
TiO2	0,17	0,01
CaO	7,02	0,07
MgO	0,61	0,04
Na2O	0,20	0,07
K2O	1,42	0,02
P2O5	0,05	0,001
SO3	0,17	0,001
V2O5	nw	n. b.
NiO	nw	n. b.
CuO	nw	n. b.
ZnO	nw	n. b.
Ga2O3	n. d.	n. b.
As2O3	n. d.	n. b.
Rb2O	n. d.	n. b.
SrO	nw	n. b.
ZrO2	0,02	0,002
PbO	n. d.	n. b.

Element(oxid)	x [M.-%]	Δx oder. x _{EG} [M.-%]
SiO2	46,34	0,47
Al2O3	6,12	0,09
Fe2O3	4,04	0,02
Cr2O3	0,03	0,004
BaO	nw	n. b.
MnO	0,07	0,003
TiO2	0,81	0,03
CaO	20,34	0,14
MgO	3,90	0,25
Na2O	1,09	0,02
K2O	1,10	0,02
P2O5	0,26	0,02
SO3	0,46	0,01
V2O5	0,02	0,001
NiO	0,02	0,003
CuO	nw	n. b.
ZnO	nw	n. b.
Ga2O3	n. d.	n. b.
As2O3	n. d.	n. b.
Rb2O	n. d.	n. b.
SrO	0,06	0,002
ZrO2	0,02	0,01
PbO	n. d.	n. b.

A.4 Messprotokolle XRD und STA

Walewska: Betonbruch CO2-Aufnahme Pr. 25299 2025-07

Tabelle 1: Ergebnisse der Phasenanalyse XRD, mithilfe DSC-TG

Bezeichnung	25299-4	25299-5	25299-6	25299-7
IAB Pr.-Nr.				
Angabe in Ma.-%				
Quarz				
Feldspäte				
Sonstige Silikate				
Portlandit	1,3	1,7	1,7	
Gips (Dihydrat)				
Ettringit				
Calcit	11,1	13,2	13,6	
Zement-Klinkerphasen				
Klinker-Hydratationsphasen				
röntgenamorphes silikatisch				
Röntgenamorphes hydroxidisch				
röntgenamorphes organisch				
Summe Tonminerale TM (Kaolinit, Glimmer, Illit, Smektit, Chlorit)				
Summe_gesamt				
Masseverluste in %				
Temperaturbereich				
RT - 75 °C, Feuchte	0,5	0,5	0,7	
75°C - 115°C, H2O (Gips, Ettringit)	1,0	0,6	0,6	
115°C - 200°C, H2O (Ettringit, CSH)	0,8	0,6	0,6	
200°C - 400°C, H2O, OH (CSH)	0,5	0,5	0,5	
200°C - 400°C, Org. leicht flüchtig	0,6	0,5	0,5	
425°C – 475°C Portlandit	0,3	0,4	0,4	
400°C - 600°C Org. schwer flüchtig	-	-	-	
400°C - 550°C, H2O, OH (?)	0,6	0,8	0,9	
550°C - 600°C beginnt Calcit: -CO2	0,4	0,6	0,7	
600°C - 800°C, CO2-Abgabe Calcit	4,5	5,2	5,3	
800°C - 1000°C Restentgasung	0,2	0,1	0,1	
Gesamt-MV	9,4	9,8	10,3	
Restmasse nach 1000°C	90,5	90,1	89,7	

n.b. = nicht bestimmt bei Gehalten um 20 %: ± 1,0 %, um 75 %: ± 2,0 %

Hinweise:

für $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ Faktor: 1 / 0,21

für $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ Faktor: 1 / 0,115

für Dolomit CaMgCO_3 Faktor: 1 / 0,48

für Calcit CaCO_3 Faktor: 1 / 0,44

für Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Faktor: 1 / 0,24

*ende

Walewska: Betonbruch CO2-Aufnahme Pr. 25299 2025-07

Tabelle 1: Ergebnisse der Phasenanalyse XRD, mithilfe DSC-TG

Bezeichnung	25299-4	25299-5	25299-6	25299-7
IAB Pr.-Nr.				
Angabe in Ma.-%				
Quarz				

Material: Proben original und nach CO₂-Lagerung (...?), jeweils repräsentative Teilmenge analysefein < 63 µm aufbereitet/homogenisiert

Thermische Analyse: Differential-Scanning-Calorimetry (DSC) + Thermogravimetrie (TG)

Details zu den Geräte- und Mess-parametern sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Meßparameter zur Thermoanalyse

Gerät	STA 449 Jupiter F3, SiC-Ofen; Netzsch
Thermoelemente / -paare	Typ S (Platin//PlatinRhodium)
Heizrate	10 K/min
Abtastrate	10 Punkte / Kelvin
Atmosphäre	Gemisch Luft-Stickstoff (3:2; O ₂ ca. 12,6 %)
Inertmaterial	1200°C calcinierte kappa-Al ₂ O ₃ (= alpha-Al ₂ O ₃)
Einwaagen	50 mg
Tiegel	Platin mit Al ₂ O ₃ -Inliner

Röntgenpulverdiffraktometrie: (X-Ray Diffraction analysis) XRD

Die Pulverpräparate wurden mittels der Front-Loading- Methode texturarm präpariert. Für die Messung in Reflexion wird das Pulver-Diffraktometer "STOE STADI MP" mit Kupfer Cu K-α1-Strahlung und primär-Monochromator angewendet. Details zu den Geräte- und Mess-parametern sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Geräteparameter zur Aufnahme der Röntgenbeugungsdiffraktogramme

Diffraktometertyp	Bragg-Brentano, Omega-2-Theta-Goniometer
Röhrenspannung	35 kV
Röhrenstrom	30 mA
Strahlungsart	Cu K-α
Monochromator	Primär, Germanium 111
Detektortyp	MYTHEN 1K der Firma DECTRIS
Probendrehung	Eine Umdrehung / Sekunde
Detektorfenster	2,25°
Auflösung	0,015°
Schrittweite	0,45°
Meßzeit	24 sec / Schritt (2 min je 2,25°)
2-Theta-Meßbereich	2 - 52,385

Die Phasensuche erfolgte mit Datenbankabgleich und aus bisheriger Erfahrung zu diesen Materialien. Die Ergebnisse der Thermoanalyse (Masseverluste im Bereich 75°C bis ca. 800°C) halfen bei der Quantifizierung. ~~Zusätzlich wurde Rietveld-Berechnung (AutoQuan) genutzt.~~

Ergebnisse

Einzeldiagramme siehe Anlagen...

Angaben in Masse-%

Fortsetzung nächstes Blatt

Tabelle 1: Ergebnisse der Phasenanalyse XRD, mithilfe DSC-TG

Bezeichnung	25300-4	25300-5	25300-6	25300-7
IAB Pr.-Nr.				
Angabe in Ma.-%				
Quarz				
Feldspäte				
Sonstige Silikate				
Portlandit	1,7	1,7	1,7	
Gips (Dihydrat)				
Ettringit				
Calcit	10,5	13,0	12,3	
Zement-Klinkerphasen				
Klinker-Hydratationsphasen				
röntgenamorphes silikatisch				
Röntgenamorphes hydroxidisch				
röntgenamorphes organisch				
Summe Tonminerale TM (Kaolinit, Glimmer, Illit, Smektit, Chlorit)				
Summe_gesamt				
Masseverluste in %				
Temperaturbereich				
RT - 75 °C, Feuchte	0,5	0,6	0,7	
75°C - 115°C, H ₂ O (Gips, Ettringit)	1,0	0,6	0,5	
115°C - 200°C, H ₂ O (Ettringit, CSH)	0,9	0,6	0,5	
200°C - 400°C, H ₂ O, OH (CSH)	0,6	0,5	0,4	
200°C - 400°C, Org. leicht flüchtig	0,6	0,5	0,5	
425°C – 475°C Portlandit	0,4	0,4	0,4	
400°C - 600°C Org. schwer flüchtig	-	-	-	
400°C - 550°C, H ₂ O, OH (?)	0,5	0,9	0,9	
550°C - 600°C beginnt Calcit: -CO ₂	0,4	0,7	0,7	
600°C - 800°C, CO ₂ -Abgabe Calcit	4,2	5,0	4,7	
800°C - 1000°C Restentgasung	0,3	0,1	0,1	
Gesamt-MV	9,4	9,9	9,4	
Restmasse nach 1000°C	90,6	90,2	90,5	

n.b. = nicht bestimmt bei Gehalten um 20 %: ± 1,0 %, um 75 %: ± 2,0 %

Hinweise:
für CaSO₄ * 2 H₂O Faktor: 1 / 0,21
für CaSO₄ * 0,5 H₂O Faktor: 1 / 0,115
für Dolomit CaMgCO₃ Faktor: 1 / 0,48
für Calcit CaCO₃ Faktor: 1 / 0,44
für Portlandit Ca(OH)₂ Faktor: 1 / 0,24
*ende

Tabelle 1: Ergebnisse der Phasenanalyse XRD, mithilfe DSC-TG

Bezeichnung	25300-4	25300-5	25300-6	25300-7
IAB Pr.-Nr.				
Angabe in Ma.-%				
Quarz				
Feldspäte				
Sonstige Silikate				
Portlandit	1,7	1,7	1,7	1,7
Gips (Dihydrat)				
Ettringit				
Calcit	10,5	13,0	12,3	12,7
Zement-Klinkerphasen				
Klinker-Hydratationsphasen				
röntgenamorphes silikatisch				
Röntgenamorphes hydroxidisch				
röntgenamorphes organisch				
Summe Tonminerale TM (Kaolinit, Glimmer, Illit, Smektit, Chlorit)				
Summe_gesamt				
Masseverluste in %				
Temperaturbereich				
RT - 75 °C, Feuchte	0,5	0,6	0,7	0,5
75°C - 115°C, H ₂ O (Gips, Ettringit)	1,0	0,6	0,5	0,6
115°C - 200°C, H ₂ O (Ettringit, CSH)	0,9	0,6	0,5	0,4
200°C - 400°C, H ₂ O, OH (CSH)	0,6	0,5	0,4	0,4
200°C - 400°C, Org. leicht flüchtig	0,6	0,5	0,5	0,5
425°C – 475°C Portlandit	0,4	0,4	0,4	0,4
400°C - 600°C Org. schwer flüchtig	-	-	-	-
400°C - 550°C, H ₂ O, OH (?)	0,5	0,9	0,9	1,0
550°C - 600°C beginnt Calcit: -CO ₂	0,4	0,7	0,7	0,7
600°C - 800°C, CO ₂ -Abgabe Calcit	4,2	5,0	4,7	4,9
800°C - 1000°C Restentgasung	0,3	0,1	0,1	0,1
Gesamt-MV	9,4	9,9	9,4	9,5
Restmasse nach 1000°C	90,6	90,2	90,5	90,3

n.b. = nicht bestimmt bei Gehalten um 20 %: ± 1,0 %, um 75 %: ± 2,0 %

Hinweise:
für CaSO₄ * 2 H₂O Faktor: 1 / 0,21
für CaSO₄ * 0,5 H₂O Faktor: 1 / 0,115
für Dolomit CaMgCO₃ Faktor: 1 / 0,48
für Calcit CaCO₃ Faktor: 1 / 0,44
für Portlandit Ca(OH)₂ Faktor: 1 / 0,24
*ende

Material: Proben original, Teilmenge analysefein < 63 µm aufbereitet/homogenisiert

Thermische Analyse: Differential-Scanning-Calorimetry (DSC) + Thermogravimetrie (TG)

Details zu den Geräte- und Mess-parametern sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Meßparameter zur Thermoanalyse

Gerät	STA 449 Jupiter F3, SiC-Ofen; Netzsch
Thermoelemente / -paare	Typ S (Platin//PlatinRhodium)
Heizrate	10 K/min
Abtastezeit	10 Punkte / Kelvin
Atmosphäre	Gemisch Luft-Stickstoff (3:2; O ₂ ca. 12,6 %)
Inertmaterial	1200°C calcinierte kappa-Al ₂ O ₃ (= alpha-Al ₂ O ₃)
Einwaagen	50 mg
Tiegel	Platin mit Al ₂ O ₃ -Inliner

Röntgenpulverdiffraktometrie: (X-Ray Diffraction analysis) XRD

Die Pulverpräparate wurden mittels der Front-Loading- Methode texturarm präpariert. Für die Messung in Reflexion wird das Pulver-Diffraktometer "STOE STADI MP" mit Kupfer Cu K-α1-Strahlung und primär-Monochromator angewendet. Details zu den Geräte- und Mess-parametern sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Geräteparameter zur Aufnahme der Röntgenbeugungsdiffraktogramme

Diffraktometertyp	Bragg-Brentano, Omega-2-Theta-Goniometer
Röhrenspannung	35 kV
Röhrenstrom	30 mA
Strahlungsart	Cu K-α
Monochromator	Primär, Germanium 111
Detektortyp	MYTHEN 1K der Firma DECTRIS
Probendrehung	Eine Umdrehung / Sekunde
Detektorfenster	2,25°
Auflösung	0,015°
Schrittweite	0,45°
Meßzeit	24 sec / Schritt (2 min je 2,25°)
2-Theta-Meßbereich	2 - 52,385

Die Phasensuche erfolgte mit Datenbankabgleich und aus bisheriger Erfahrung zu diesen Materialien. Die Ergebnisse der Thermoanalyse (Masseverluste im Bereich 75°C bis ca. 800°C) halfen bei der Quantifizierung. ~~Zusätzlich wurde Rietveld-Berechnung (AutoQuan) genutzt.~~

Ergebnisse

Einzeldiagramme siehe Anlagen...

Angaben in Masse-%

Fortsetzung nächstes Blatt

Material: Proben original, Teilmenge analysefein < 63 µm aufbereitet/homogenisiert

Thermische Analyse: Differential-Scanning-Calorimetry (DSC) + Thermogravimetrie (TG)

Details zu den Geräte- und Mess-parametern sind der Tabelle 1 zu entnehmen.

Tabelle 1: Meßparameter zur Thermoanalyse

Gerät	STA 449 Jupiter F3, SiC-Ofen; Netzsch
Thermoelemente / -paare	Typ S (Platin//PlatinRhodium)
Heizrate	10 K/min
Abtastrate	10 Punkte / Kelvin
Atmosphäre	Gemisch Luft-Stickstoff (3:2; O ₂ ca. 12,6 %)
Inertmaterial	1200°C calcinierte kappa-Al ₂ O ₃ (= alpha-Al ₂ O ₃)
Einwaagen	50 mg
Tiegel	Platin mit Al ₂ O ₃ -Inliner

Röntgenpulverdiffraktometrie: (X-Ray Diffraction analysis) XRD

Die Pulverpräparate wurden mittels der Front-Loading- Methode texturarm präpariert. Für die Messung in Reflexion wird das Pulver-Diffraktometer "STOE STADI MP" mit Kupfer Cu K-α1-Strahlung und primär-Monochromator angewendet. Details zu den Geräte- und Mess-parametern sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Geräteparameter zur Aufnahme der Röntgenbeugungsdiffraktogramme

Diffraktometertyp	Bragg-Brentano, Omega-2-Theta-Goniometer
Röhrenspannung	35 kV
Röhrenstrom	30 mA
Strahlungsart	Cu K-α
Monochromator	Primär, Germanium 111
Detektortyp	MYTHEN 1K der Firma DECTRIS
Probendrehung	Eine Umdrehung / Sekunde
Detektorfenster	2,25°
Auflösung	0,015°
Schrittweite	0,45°
Meßzeit	24 sec / Schritt (2 min je 2,25°)
2-Theta-Meßbereich	2 - 52,385

Die Phasensuche erfolgte mit Datenbankabgleich und aus bisheriger Erfahrung zu diesen Materialien. Die Ergebnisse der Thermoanalyse (Masseverluste im Bereich 75°C bis ca. 800°C) halfen bei der Quantifizierung. ~~Zusätzlich wurde Rietveld-Berechnung (AutoQuan) genutzt.~~

Ergebnisse

Einzeldiagramme siehe Anlagen...

Angaben in Masse-%

Fortsetzung nächstes Blatt

Materiallagerung x Tage in Mineralwasser (.. g Einwaage, .. ml Wasser mit CO2)

Tabelle 1: Ergebnisse der Phasenanalyse XRD, mithilfe DSC-TG

Bezeichnung				
IAB Pr.-Nr.	25999-8	25300-8		
Angabe in Ma.-%				
Quarz				
Feldspäte				
Sonstige Silikate				
Portlandit	1,7	0,8		
Gips (Dihydrat)	3	5		
Ettringit				
Calcit	15,7	15,9		
Zement-Klinkerphasen				
Klinker-Hydratationsphasen				
röntgenamorphes silikatisch				
Röntgenamorphes hydroxidisch				
röntgenamorphes organisch				
Summe Tonminerale TM (Kaolinit, Glimmer, Illit, Smektit, Chlorit)				
Summe_gesamt				
Masseverluste in %				
Temperaturbereich				
RT - 75 °C, Feuchte	0,4	1,0		
75°C - 115°C, H2O (Gips, Ettringit)	0,6	1,0		
115°C - 200°C, H2O (Ettringit, CSH)	0,5	0,5		
200°C - 400°C, H2O, OH (CSH)	0,4	0,5		
200°C - 400°C, Org. leicht flüchtig	0,5	0,5		
425°C – 475°C Portlandit	0,4	0,2		
400°C - 600°C Org. schwer flüchtig	-	-		
400°C - 550°C, H2O, OH (?)	0,6	0,6		
550°C - 600°C beginnt Calcit: -CO2	0,4	0,5		
600°C - 800°C, CO2-Abgabe Calcit	6,5	6,5		
800°C - 1000°C Restentgasung	0,1	0,0		
Gesamt-MV	10,4	11,3		
Restmasse nach 1000°C	89,4	88,7		

n.b. = nicht bestimmt bei Gehalten um 20 %: ± 1,0 %, um 75 %: ± 2,0 %

Hinweise:
für $\text{CaSO}_4 \cdot 2 \text{H}_2\text{O}$ Faktor: 1 / 0,21
für $\text{CaSO}_4 \cdot 0,5 \text{H}_2\text{O}$ Faktor: 1 / 0,115
für Dolomit CaMgCO_3 Faktor: 1 / 0,48
für Calcit CaCO_3 Faktor: 1 / 0,44
für Portlandit $\text{Ca}(\text{OH})_2$ Faktor: 1 / 0,24
*ende

Literatur

- Azevedo, A. C. u. a. (2023). „A proposal to clarify the use of Sum of Bases in soil analysis“. In: *Methods of Soil Analysis: Part 3. Chemical Methods*. Hrsg. von D. L. Sparks. Soil Science Society of America, S. 551–574. DOI: 10.2136/sssabookser5.3.c7.
- Beton.org (n.d.). *B30: Zement-Merkblatt*. <https://www.beton.org/fileadmin/beton-org/media/Dokumente/PDF/Service/Zementmerkblatt/B30.pdf>. Abgerufen am 26. September 2025.
- Dienemann, Wolfgang (Jan. 2023). „CO-Kreislauf bei Beton schließen“. In: *RECYCLING magazin*. Abgerufen am 26. September 2025. URL: <https://www.recyclingmagazin.de/2023/01/11/co2-kreislauf-bei-beton-schliessen/>.
- ETH Zürich (2021). *Über DemoUpCARMA*. Abgerufen am 26. September 2025. URL: <https://demoupcarma.ethz.ch/de/project/about>.
- Fromm, Leonhard (2025). „Feess bindet CO in recyceltem Bauschutt“. In: *AT MINERALS*. Abgerufen am 26. September 2025. URL: <https://www.at-minerals.com/de/artikel/feess-bindet-co2-in-recycliertem-bauschutt-4235800.html>.
- Grimm, Roland (2021). *Verwertung mineralischer Bauabfälle*. <https://www.baustoffwissen.de/verwertung-mineralischer-bauabfaelle-31102023>. Zuletzt bearbeitet 22. April 2025, abgerufen am 26. September 2025.
- Heidelberg Materials (2022). *HeidelbergCement erhält Deutschen Innovationspreis für Klima und Umwelt (IKU)*. Abgerufen am 26. September 2025. URL: <https://www.heidelbergmaterials.com/de/pi-16-05-2022>.
- Humbeeck, J. Van (1998). „Simultaneous Thermal Analysis“. In: *Handbook of Thermal Analysis and Calorimetry*. Hrsg. von M. E. Brown. Bd. 3. Elsevier Science, S. 157–185. DOI: 10.1016/S1573-4374(98)80014-9. URL: [https://doi.org/10.1016/S1573-4374\(98\)80014-9](https://doi.org/10.1016/S1573-4374(98)80014-9).
- Initiative Kreislaufwirtschaft Bau (2024). *Kreislaufwirtschaft Bau – Monitoring mineralischer Bau- und Abbruchabfälle*. <https://www.kreislaufwirtschaft-bau.de>. Abgerufen am 26. September 2025.
- Initiative Kreislaufwirtschaft Bau / Bundesverband Baustoffe – Steine und Erden e.V. (2025). *Kreislaufwirtschaft Bau – Mineralische Bau- und Abbruchabfälle / Monitoring*. <https://www.kreislaufwirtschaft-bau.de/>. Abgerufen am 26. September 2025.
- King, David (Mai 2021). „Concrete needs to lose its colossal carbon footprint“. In: *Nature* 593, S. 20–22. DOI: 10.1038/d41586-021-02612-5. URL: <https://www.nature.com/articles/d41586-021-02612-5>.
- Lagerblad, Björn (2005). *Carbon Dioxide Uptake during Concrete Life Cycle – State of the Art*. CBI Report 2:2005. Abgerufen am 26. September 2025. Stockholm, Schweden: Cement- och Betonginstitutet (CBI). URL: <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A497850>.
- Leitgeb, Hannes (2019). „HYPE: A System of Hyperintensional Logic (with an Application to Semantic Paradoxes)“. In: *Journal of Philosophical Logic* 48.2, S. 305–405. DOI: 10.1007/s10992-018-9467-0. URL: <https://doi.org/10.1007/s10992-018-9467-0>.
- Müller, Anette (2019). *Baustoffrecycling: Entstehung – Aufbereitung – Verwertung*. 1. Auflage, 2018/2019. Wiesbaden: Springer Vieweg, Fachmedien Wiesbaden, S. 336. ISBN: 978-3-658-22987-0.
- neustark AG (2024). *Gemeinsame Pionierarbeit für mehr Nachhaltigkeit in der Bauindustrie: neustark und Feeß eröffnen erste Anlage im Raum Stuttgart zur permanenten Speicherung von CO in Abbruchbeton*. Abgerufen am 26. September 2025. URL: <https://www.neustark.com/de/news/gemeinsame-pionierarbeit-f%C3%BCr-mehr-nachhaltigkeit-in-der-bauindustrie-neustark-und-fee%C3%9F-er%C3%B6ffnen-erste-anlage-im-raum-stuttgart-zur-permanenten-speicherung-von-co2-in-abbruchbeton>.
- (2025a). *MRV – messen, melden und verifizieren*. Abgerufen am 26. September 2025. URL: <https://www.neustark.com/de/unsere-garantie-messen-bericht-erstatten-verifizieren-mrv>.
- (2025b). *Über neustark*. Abgerufen am 26. September 2025. URL: <https://www.neustark.com/de/lernen-sie-uns-kennen#map>.

- Stark, Jochen und Bernd Wicht (1995). *Dauerhaftigkeit von Beton*. Schriftenreihe 100. Weimar: Hochschule für Architektur und Bauwesen Weimar.
- (1998). *Anorganische Bindemittel: Zement – Kalk – spezielle Bindemittel*. Bd. 109. Schriften der Bauhaus-Universität Weimar. Abgerufen am 26. September 2025. Bauhaus-Universität Weimar, S. 364. ISBN: 978-3860680933. URL: https://books.google.com/books/about/Anorganische_Bindemittel.html?id=hBEuAAAAAAAJ.
- (2012). *Geschichte der Baustoffe*. Vieweg+Teubner / Springer. ISBN: 978-3-322-92892-4. DOI: 10.1007/978-3-322-92892-4.
- Stiftung Risiko-Dialog (2021). *DemoUpCARMA*. Abgerufen am 26. September 2025. URL: <https://www.risiko-dialog.ch/projekt/demoupcarma>.
- Umweltbundesamt (2025a). *Bauabfälle – Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bauabfaelle#verwertung-von-bau-und-abbruchabfallen>. Abgerufen am 26. September 2025.
- (2025b). *Bauabfälle – Verwertung von Bau- und Abbruchabfällen*. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/bauabfaelle#verwertung-von-bau-und-abbruchabfallen>. Abgerufen am 26. September 2025.
- VDI Wissensforum (2023). *Verwertung von Beton – ein Beitrag zum Ressourcen*. Abgerufen am 26. September 2025. URL: <https://www.vdi-wissensforum.de/news/verwertung-von-beton/>.
- Weltexporte (2021). *Die größten Baustoffunternehmen nach Umsatz – bis 2020*. Abgerufen am 26. September 2025. URL: <https://www.weltexporte.de/unternehmen-baustoffe/>.
- Wikipedia contributors (2025). *Zementklinker*. <https://de.wikipedia.org/wiki/Zementklinker>. Abgerufen am 26. September 2025.
- Wikipedia-Autoren (2025). *Heidelberg Materials*. Abgerufen am 26. September 2025. URL: https://de.wikipedia.org/wiki/Heidelberg_Materials.