

ORIGINAL



Schnellprüfverfahren für den Carbonatisierungswiderstand von dampfgehärteten Baustoffen: Erste Vorarbeiten

Christian Felten¹ | Anya Vollpracht¹ | Bernd Winkels¹ | Holger Nebel¹ | Thomas Matschei¹

Correspondence

Prof. Dr. Thomas Matschei
RWTH Aachen University
Institut für Baustoffforschung
Schinkelstraße 3
52062 Aachen
Email: matschei@ibac.rwth-aachen.de

¹ Institut für Baustoffforschung,
Aachen, Deutschland

Abstract

Die Einflussfaktoren auf den Carbonatisierungswiderstand des 11Å-Tobermorits in dampfgehärteten Baustoffen sind bislang nicht systematisch untersucht worden. In der Vergangenheit haben Forschungen gezeigt, dass ein geringer Carbonatisierungswiderstand mit einem auffällig hohen Trockenschwindwert einhergeht. Daher wurde durch das DIBt ein Grenzwert für das Schwinden von Porenbetonen von 0,4 mm/m eingeführt. Es ist jedoch nicht systematisch untersucht, ob ein geringer Carbonatisierungswiderstand per se mit niedrigen Schwindwerten beim Trocknungsschwinden einhergehen. In einem von der DFG geförderten Forschungsprojekt werden unterschiedliche potentielle Einflussfaktoren auf die Carbonatisierung von Porenbeton untersucht, wofür Modellporenbetone hergestellt wurden, die sich im Sulfatgehalt unterscheiden. Für eine möglichst hohe Vergleichbarkeit werden die äußeren Einflussfaktoren wie die Luft- und Materialfeuchtigkeit, Temperatur und Kohlendioxidkonzentration konstant gehalten.

Im Rahmen dieser Untersuchungen wurden kleinformatige Prismen extrahiert, an denen die Festigkeitsentwicklung mit zunehmender Carbonatisierung unter ansonsten gleichen Bedingungen untersucht wurde. Die spezifische Oberfläche dieser Prüfkörper wurde mit dem BET-Verfahren vor und nach der Carbonatisierung charakterisiert, um Rückschlüsse auf die Veränderung der Mikrostruktur zu ziehen. Zudem wurde an aus den Prismen extrahierten Pulverproben die Phasen nach der Carbonatisierung mineralogisch analysiert.

Keywords

autoclaved aerated concrete, carbonation process, carbonation resistance, tobermorite, durability

1 Einleitung

Bei Porenbeton handelt es sich um einen autoklavierten Mauerwerkbaustoff. Dieser wird vor allem aufgrund seiner Wärmedämmeigenschaften für den Hausbau eingesetzt. Ein Hauptfaktor für die Alterung von Porenbeton stellt die Carbonatisierung der festigkeitsbildenden CSH-Phase 11 Å-Tobermorit dar, wodurch dessen mechanische Eigenschaften beeinflusst werden können. Durch die Carbonatisierung entstehen dabei aus dem Tobermorit die polymorphen Calciumcarbonatphasen Calcit, Aragonit und Vaterit sowie Silika-Gel [1].

Systematische Untersuchungen des Carbonatisierungsverhaltens von Porenbeton aus verschiedenen Herstellwerken, veröffentlicht von Lohaus, zeigten einen unterschiedlichen Carbonatisierungswiderstand des Tobermorits woraus bei einem einzelnen Herstellwerk ein erheblicher Verlust der Druckfestigkeit resultierte [2]. Dabei unterschritt der Porenbeton aus diesem Herstellwerk die

notwendige Mindestdruckfestigkeit. Die festigkeitsbildende Phase Tobermorit hatte sich bei der Lagerung bei einer CO₂-Konzentration von ca. 0,04 Vol.-%, vollständig umgewandelt. Porenbetonprodukte aus den anderen Herstellwerken zeigten keine kritische Verringerung der Druckfestigkeit und Tobermorit wurde röntgenographisch nachgewiesen. Die Ursachen für das unterschiedliche Carbonatisierungsverhalten des Tobermorits in den unterschiedlichen Porenbetonen sind bisher nicht aufgeklärt [2].

Wesentliche Einflussfaktoren auf die Carbonatisierung des Tobermorits im Porenbeton stellen Temperatur, Luftfeuchtigkeit und CO₂-Konzentration dar. Darüber hinaus spielt die Porosität und die Kristallinität des Porenbetons eine bedeutende Rolle [3]. In den Untersuchungen von Lohaus, die teilweise einen niedrigen Carbonatisierungswiderstand des Porenbetons zeigten, wurden diese Faktoren nicht oder nur teilweise beleuchtet [2]. Die Kristallinität von Porenbeton wird unter anderem durch den Sul-

fatgehalt beeinflusst, wobei die Ursache dafür bisher noch nicht eindeutig aufgeklärt ist [4].

Der Porenbeton mit niedrigem Carbonatisierungswiderstand aus den Untersuchungen von Lohaus wies mit etwa 0,7 mm/m auch einen deutlich höheren Schwindwert auf als die übrigen untersuchten Porenbetone (0,3 mm/m bis 0,35 mm/m) [2]. Aus diesem Grund hat das DIBt ein Schwindgrenzwert von 0,40 mm/m in die Norm DIN 20000-404 aufgenommen [5]. Es ist allerdings nicht belegt, dass ein hoher Schwindwert tatsächlich mit einem geringen Carbonatisierungswiderstand zusammenhängt. Die Porenbetonhersteller haben daher ein großes Interesse daran, neue zuverlässige Schnellprüfverfahren zu etablieren, mit denen der Carbonatisierungswiderstand in kurzer Zeit bewertet werden kann.

2 Material und Methoden

2.1 Material

Bei den Porenbetonen handelt sich um industriell hergestellte Modellporenbetonmischungen mit eigens dafür in Zusammenarbeit mit einem Porenbetonhersteller entwickelten Rezepturen. Dabei enthielt die Mischung M_0 keine Sulfatzugabe zusätzlich zum bereits im Zement enthaltenen Sulfat. Dies entspricht einer SO₃-Konzentration von ca. 1 M.-%. Der zweiten Mischung M_100 wurde Sulfat in üblicher Dosierung in Form von Anhydrit zugesetzt, sodass sich ein SO₃-Gehalt von ca. 2,8 M.-% einstellte. Beide Porenbetone sind bei einer Druckhaltezeit von 7 Stunden bei ca. 12,5 bar und ca. 180 °C autoklaviert worden.

Tabelle 1 Maße der angelieferten Porenbetonplansteine

Mischung	Länge [mm]	Breite [mm]	Höhe [mm]
M_0	505	365	250
M_100	605	365	250

Die Mischungen M_0 und M_100 sind dabei im Winter hergestellt und im Januar angeliefert worden. Zwischen Anlieferung und Durchführung der Versuche lagen ca. drei Monate. Der verwendete Porenbeton ist in Form von Plansteinen auf Paletten in Folie verpackt angeliefert worden und bis zur Untersuchung in überdachter Außenlagerung zwischengelagert worden. Die Maße der Plansteine sind in Tabelle 1 aufgeführt.

Bild 1 zeigt die chemische Zusammensetzung der verwendeten Porenbetonmischungen für die Komponenten mit einem Gehalt von über 1 M.-%. Ermittelt wurden die Werte mit Hilfe der Röntgenfluoreszenzanalyse (RFA) und mit Hilfe des Kohlenstoff-Schwefel-Analysators (CSA). Die Proben sind vor der Analyse bei 105 °C bis zur Massenkonstanz getrocknet worden. Zu erkennen ist der unterschiedliche SO₃-Gehalt der beiden Mischungen.

In Bild 2 sind die mithilfe der quantitativen Röntgenpulverdiffraktometrie (XRD)-Analysen unter Anwendung der Rietveld-Methode ermittelten Phasengehalte der Porenbetonmischungen im Ausgangszustand dargestellt. Die Mischungen M_0 und M_100 unterscheiden sich dabei

außer in Bezug auf ihre Anhydritkonzentration nur marginal beim Quarz- und Vateritgehalt voneinander. Die Ausgangsmenge an Carbonaten betrug bei beiden Mischungen 2 M.-%.

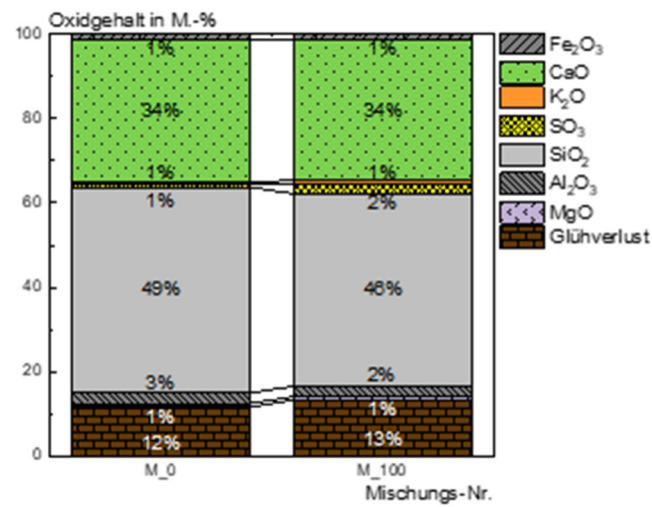


Bild 1 Röntgenfluoreszenz (RFA)- bzw. Kohlenstoff-Schwefel Analysator (CSA)-Ergebnisse der verwendeten Porenbetonmischungen > 1 M.-%

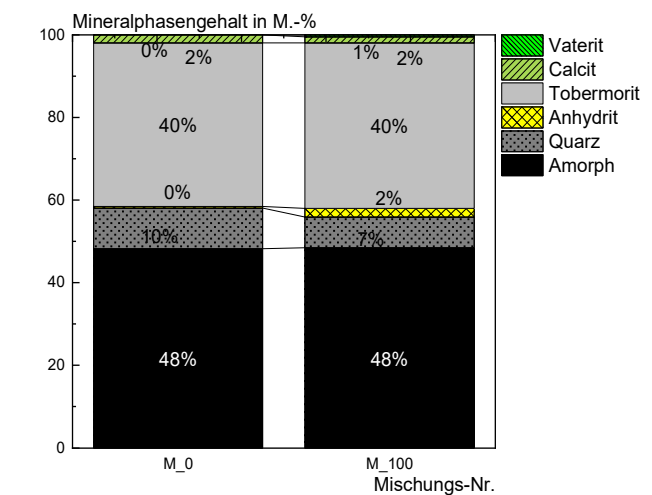


Bild 2 Gehalte der kristallinen und der amorphen Phasen in M.-% der verwendeten Porenbetonmischungen im Ausgangszustand

2.2 Methoden

Aus den angelieferten Plansteinen wurden je 36 Prismen mit den Maßen 160 x 60 x 16 mm³ extrahiert. Die Entnahme aus dem Planstein erfolgte in drei senkrecht zur Treibrichtung orientierten Entnahmereihen mit je 6 Flachprismen übereinander, siehe Bild 3 (A, B). Auf diese Weise wurde der erhebliche Einfluss der Treibrichtung auf die Rohdichte ausgeglichen. Im nächsten Schritt wurden die beiden größten Seitenflächen der extrahierten Prismen planparallel geschliffen, sodass sich ein Probekörperformat von 160 x 60 x 12 mm ergab. Anschließend wurde der Feuchtegehalt des Porenbetons gravimetrisch bestimmt. Er variierte im Anlieferungszustand um bis zu 20 M.-%. Um eine einheitliche Materialfeuchte einzustellen, wurden die extrahierten Prismen bei Argonatmosphäre auf 30 M.-% ± 2 M.-% getrocknet. Um ein eindimensionales Eindringen des CO₂ in den Probekörper

zu gewährleisten, wurden die Prismen im nächsten Schritt mit einem Verbundklebeband aus Butylkautschuk und Aluminium als CO₂-Barriere entlang der vier Seitenflächen abgeklebt, siehe Bild 3 C.

Nun erfolgte die Lagerung der Probekörper für 1, 7 und 15 Tage bei CO₂-Konzentrationen von jeweils 0,04 Vol.-%, 0,5 Vol.-% und 3,0 Vol.-%. Temperatur und Luftfeuchtigkeit betrugen in allen Fällen 20 °C und 65 % r. F.. Die Beaufschlagung bei 0,04 Vol.-% CO₂ erfolgte in einer Klimazelle der Firma Weiss. Diese wies eine Präzision von $\pm 0,5$ °C und $\pm 4,5$ % r. F. auf. Die Beaufschlagung unter CO₂-Konzentrationen von 0,5 Vol.-% und 3,0 Vol.-% erfolgten in Klimaschränken der Firma Mytron GmbH.

Die Klimaschränke waren so optimiert, dass die Abweichungen von ± 1 °C, $\pm 2,5$ % r. F. und $\pm 0,1$ Vol.-% CO₂ erreichten. Pro Lagerungsdauer und CO₂-Konzentration wurden immer drei Prismen aus drei unterschiedlichen Entnahmereihen, siehe Bild 3 (A), genutzt, damit sowohl bezogen auf die Länge als auch auf die Höhe des Plansteins möglichst vergleichbare Flachprismen für die Dreifachbestimmung herangezogen werden konnten.

Nach der Beaufschlagung mit CO₂ wurde das Verbundklebeband entfernt und die Prismen wurden zum einen in ein Prisma mit den Maßen 55 x 60 x 12 mm³ für die Druckfestigkeitsuntersuchungen geteilt. Dieses Prisma wurde vor der Prüfung auf die Maße 50 x 50 x 12 mm³ zurechtgeschnitten (Bild 3 (D)).

Das zweite Prisma wurde von 105 x 60 x 12 mm³ auf 100 x 50 x 12 mm³ zurechtgeschnitten. Anschließend wurde dieses Teilstück mit Hilfe einer Schleifmaschine in 1 mm Schritten entlang der Seite 100 x 50 mm² abgeschliffen und das Pulver für die XRD-Analyse aufgefangen. Die untere Prismenhälfte von 100 x 50 x 6 mm³ wurde mechanisch zu Würfeln mit einer Kantenlänge von ca. 3 mm formatiert (Bild 3 (E)).

Die Druckfestigkeit wurde mit Hilfe einer FTS-Prüfmaschine an Prismen in Anlehnung an die Fugendruckfestigkeitsbestimmung nach DIN 18555-9:2019-04 bestimmt [6].

Für die XRD-Analysen wurde ein Panalytical X'Pert Pro, ausgestattet mit einem Panalytical X'Celerator-Detektor, in Bragg-Brentano-Geometrie mit den folgenden Messbedingungen genutzt: Die Messung erfolgte im Bereich von 5° 2 θ bis 70° 2 θ mit einer Cu-K α -Strahlung. Bei jedem Messdurchgang wurde ein externer Rutil-Standard mit bekannter Kristallinität zur Ermittlung des K-Faktors gemessen.

Die spezifische Oberfläche wurde mit Hilfe der 5-Punkt BET bei 77,35 K mit N₂ als Messgas in Doppelbestimmung mit Hilfe einer „3P sync“ Messeinheit der Firma 3P instruments gemessen.

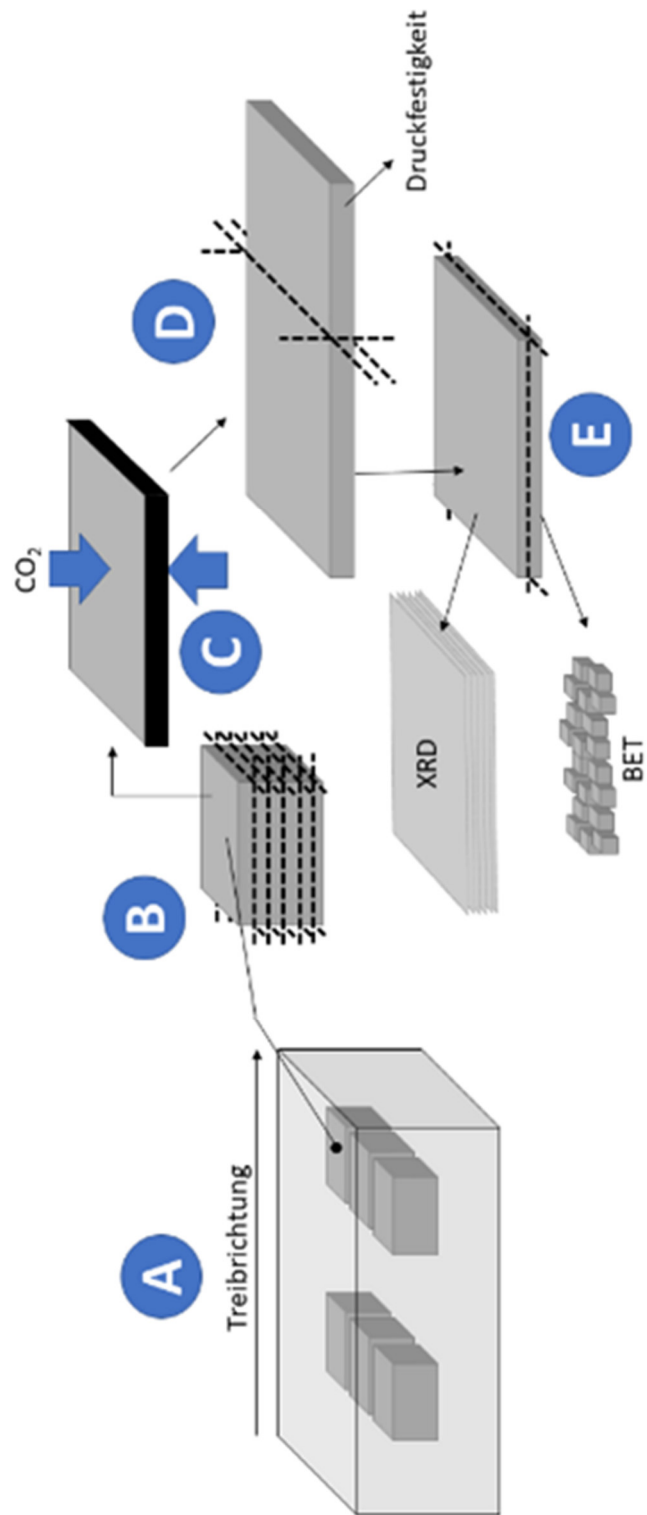


Bild 3 Schrittweise Beschreibung der Prismenextraktion aus dem Planstein (A und B), CO₂-Beaufschlagung mit Verbundklebeband (C), Prismenteilung für die Analysen (D und E)

3 Ergebnisse

3.1 Druckfestigkeit

Untersucht wurden die Druckfestigkeiten der beiden Mischungen, welche bei den CO₂-Konzentrationen von 0,04 Vol.-%, 0,5 Vol.-% und 3,0 Vol.-% und jeweils Beaufschlagungsdauern von 1, 7 und 15 Tagen gelagert wurden. Die gemessenen Druckfestigkeiten sind in Bild 4 dargestellt. Die Mischung M₀ zeigte bei allen beauf-

schlagten CO₂-Konzentrationen nach einem Zeitraum von 15 Tagen einen Anstieg der Druckfestigkeiten. Der höchste Anstieg der Druckfestigkeit konnte bei 3,0 Vol.-%, der mittlere Anstieg bei 0,5 Vol.-% und der kleinste Anstieg bei 0,04 Vol.-% beobachtet werden. Die Druckfestigkeiten der Mischung M_100 zeigten für die beaufschlagten Konzentrationen 0,04 Vol.-% und 0,5 Vol.-% einen analogen Trend. Bei dieser Mischung konnte bei 3,0 Vol.-% kein eindeutiger Anstieg beobachtet werden.

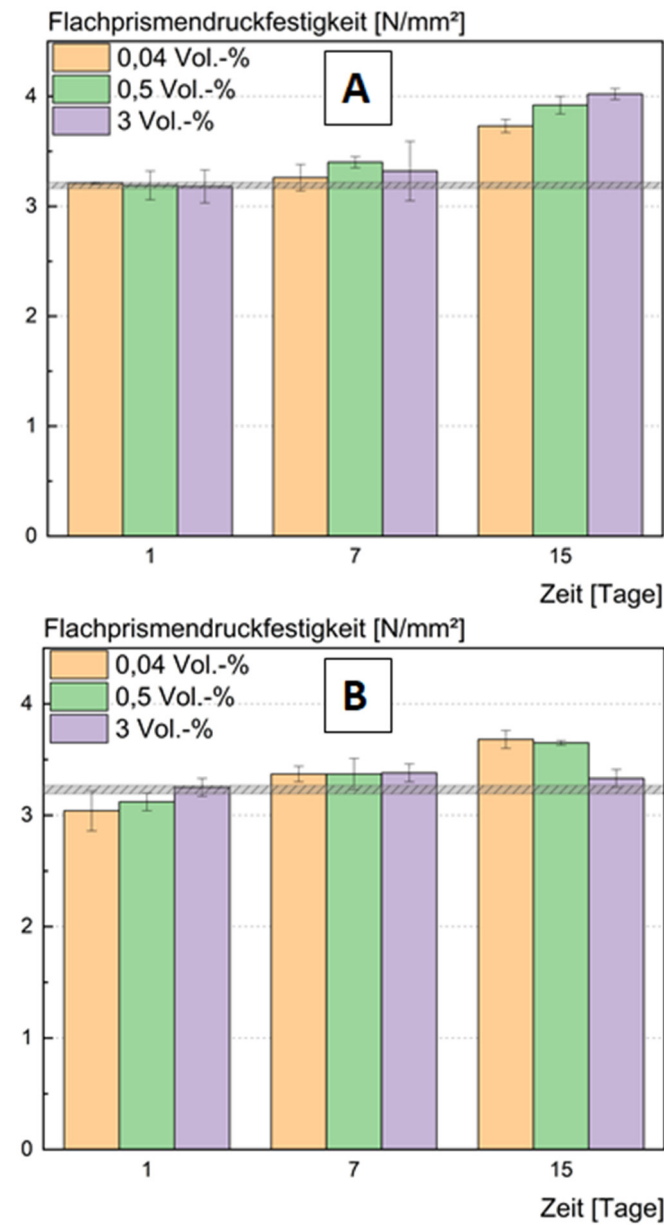


Bild 4 Flachprismendruckfestigkeit der Mischungen M_0 (A) und M_100 (B). Grau schraffiert ist der Fehlerbereich der uncarbonatisierten Referenzprobe.

3.2 Mineralogischer Phasenbestand

Untersucht wurde die quantitative Änderung der Phasenzusammensetzung jeder Mischung nach einer CO₂-Beaufschlagung von 3,0 Vol.-% über 15 Tage. In **Bild 5** sind die Ergebnisse der XRD-Analysen der carbonatisierten Proben dargestellt. Diese zeigten bei beiden Mischungen das Auftreten der Calciumcarbonatphasen Calcit und Vaterit im Umfang von zusammen 30 M.-% bis 38 M.-%.

Die Verhältnisse zwischen den Carbonatphasen Vaterit und Calcit schwankten zwischen 1:2 und 1:1.

$$TC - Quotient = \frac{T_{bc} - T_{ac}}{Carb_{ac} - Carb_{bc}} \quad (1)$$

Dabei steht T_{bc} für den Massenanteil von Tobermorit in der uncarbonatisierten Probe, T_{ac} für den Massenanteil von Tobermorit in der carbonatisierten Probe, Carb_{ac} für die summierten Massenanteile der kristallinen Carbonatphasen in der carbonatisierten Probe und Carb_{bc} für die summierten Massenanteile der kristallinen Carbonatphasen in der uncarbonatisierten Probe.

Tabelle 2 Differenzwerte von Tobermorit und der kristallinen Carbonatphasen vor- und nach der Carbonatisierung und der daraus ermittelte TC-Quotient

Mischung	Tobermorit-differenz [T _{bc} - T _{ac}]	Carbonatdifferenz [Carb _{ac} - Carb _{bc}]	TC-Quotient
M_0	14,8	28,1	0,53
M_100	20,1	35,6	0,56

In Tabelle 2 sind Verhältniswerte dargestellt, die zeigen sollen, ob bevorzugt Tobermorit oder der amorphe Anteil carbonatisiert.

Zu diesem Zweck wurden im ersten Schritt jeweils die Differenzen aus den gemessenen Mengen von Tobermorit und der Summe aller Carbonatphasen vor- und nach der Carbonatisierung bestimmt. Mit Hilfe des Quotienten beider Differenzen ließ sich nun in einem zweiten Schritt ein Verhältniswert ermitteln, der im Folgenden als TC-Quotient bezeichnet werden soll. Die Berechnung erfolgt nach Formel 1. Je kleiner dieser Wert wird, desto weniger sank im Zuge der Carbonatisierung der Tobermoritgehalt im Vergleich zum Anstieg des Carbonatanteils. Unter Berücksichtigung des Methodenfehlers sind die ermittelten und in Tabelle 2 dargestellten TC-Quotienten der beiden Mischungen nicht signifikant unterschiedlich.

Bei allen CO₂-beaufschlagten Proben trat Gips auf, dessen Vorhandensein trotz der geringen Menge von um 1 M.-% aufgrund der Lage seines Hauptreflexes im Diffraktogramm eindeutig erkennbar war ([siehe Bild 5](#)). Bei allen Mischungen wurden um 16 % bis 20 % geringere amorphe Anteile im Vergleich zu den jeweiligen uncarbonatisierten Mischungen beobachtet. Die Quarz- und Anhydritanteile zeigten beim Vergleich zwischen carbonatisierter und uncarbonatisierter Probe keine Unterschiede, die über den Methodenfehler hinausgehen.

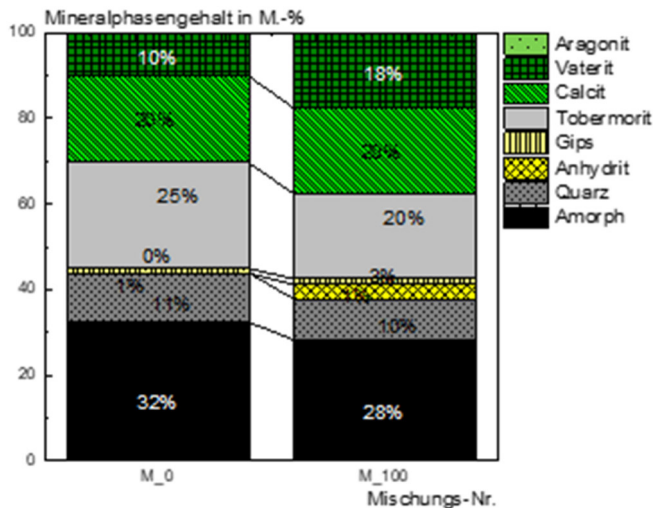


Bild 5 XRD Analysen der Prismen nach 15-tägiger CO₂-Beaufschlagung bei 3 Vol.-%

3.3 Mikrostruktur - Spezifische Oberfläche

Die BET-Untersuchung wurde an jeder Mischung nach einer CO₂-Beaufschlagungsdauer von 15 Tagen und Konzentrationen von 0,04 Vol.-%, 0,5 Vol.-% und 3,0 Vol.-% an den extrahierten Probenfragmenten mit Kantenlängen von ca. 3 - 5 mm durchgeführt, um die jeweilige spezifische Oberfläche zu bestimmen. In **Bild 6** sind die Ergebnisse der spezifischen Oberfläche in Abhängigkeit der beaufschlagten CO₂-Konzentration dargestellt. Zu erkennen ist, dass die spezifische Oberfläche im Vergleich zwischen 0,04 Vol.-% mit 0,5 Vol.-% bei beiden Mischungen um ca. den Faktor 0,9 geringer ausfiel. Der Vergleich zwischen den mit 0,5 Vol.-% mit den mit 3,0 Vol.-% beaufschlagten Proben zeigte bei den 3,0 Vol.-% um 38 %, bzw. 50 % höhere Messwerte.

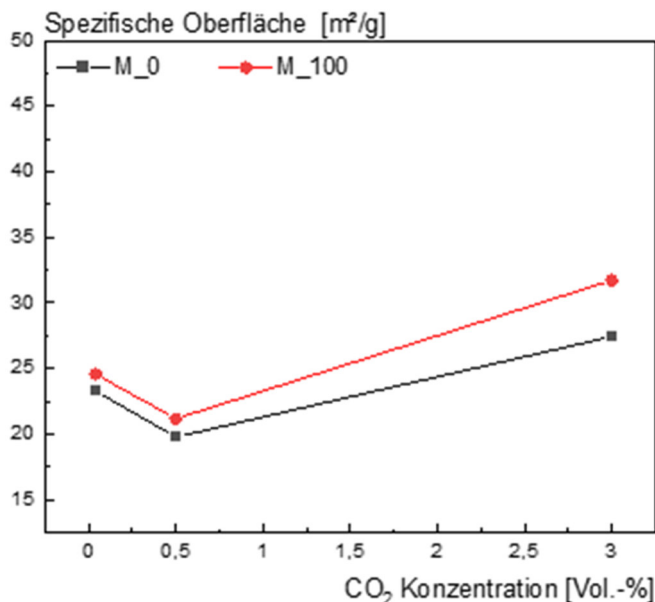


Bild 6 BET-Oberflächen nach 15 Tagen Beaufschlagung bei unterschiedlichen CO₂-Konzentrationen

4 Diskussion

Eine Zunahme der Druckfestigkeit durch Carbonatisierung, wie bei Mischung M_0 festgestellt, ist bei Porenbeton bereits in der Vergangenheit schon beobachtet und

dort auf die Zunahme der Rohdichte zurückgeführt worden [2]. Eine Verringerung der Druckfestigkeit bei Flachprismen, wie sie von Lohaus et al. auch beobachtet worden war, konnte hier nicht beobachtet werden [2].

Die in **Bild 5** vorgestellten XRD-Daten zeigen durch eine signifikante Verminderung des Tobermoritgehaltes und des amorphen Anteils, dass sich im Zuge der Carbonatisierung sowohl die amorphe Phasen als auch der Tobermorit in die Carbonate Calcit, Vaterit und Aragonit umsetzt. Dies ist in guter Übereinstimmung mit den Literaturdaten [1, 4].

Unter Berücksichtigung des Methodenmessfehlers sind die Unterschiede zwischen den TC-Quotienten der beiden Mischungen nicht signifikant unterschiedlich. Dies deutet darauf hin, dass sich der Tobermoritgehalt in beiden Proben in vergleichbarem Maße relativ zur Summe aller Carbonate geändert haben muss.

Da zwischen den Mischungen kein deutlicher Unterschied hinsichtlich des Carbonatisierungswiderstands beobachtet werden konnte, scheint es bei den beiden Mischungen unter den gegebenen Lagerungsbedingungen und -dauern keinen Zusammenhang zwischen Sulfatgehalt und Carbonatisierungswiderstand zu geben.

Darüber hinaus wurden erste Vorarbeiten mit Hilfe der BET durchgeführt, um die Entwicklung der spezifischen Oberfläche nachvollziehen zu können. In den vorliegenden Ergebnissen ist die bei beschleunigt carbonatisierten Proben Zunahme der Probenoberfläche zu erkennen. Matsushita führte die Oberflächenzunahme auf das bei der Carbonatisierung entstandene Silika-Gel zurück, dessen Struktur mit Porengrößen im Nanometerbereich die große Oberfläche erzeugt. Aufgrund der Größe der Calcit-Kristalle können diese laut Matsushita nicht Ursache für die Oberflächenzunahme sein [8]. Der zu erkennende Abfall der BET-Oberfläche bei einer beaufschlagten CO₂-Konzentration von 0,5 Vol.-% kann dadurch jedoch nicht erklärt werden, da auch hier eine Carbonatisierung erfolgt und Silika-Gel entstehen muss, sodass die BET-Oberfläche ebenfalls steigen müsste. Von Kus (2003) veröffentlichte REM-Aufnahmen zeigen das Wachstum von Calcit-Kristallen auf der Oberfläche der Porenbetonporen [7]. Gezeigt wurde dort, dass die Kristallgröße bei einer höheren CO₂-Konzentration ebenfalls zunahm, so dass die Oberfläche des Calcits selbst wahrscheinlich nicht die Oberflächenzunahme mit steigender CO₂-Konzentration bewirken kann.

Stattdessen wäre vorstellbar, dass Carbonatkristalle möglicherweise in den Kleinporen aufwachsen und diese verstopfen könnten, was die Verminderung der spezifischen Oberfläche bei einer beaufschlagten CO₂-Konzentration von 0,5 Vol.-% erklären könnte. Die Untersuchungen von Matsushita zeigten, dass Porenbetonproben bei einem vergleichbaren Carbonatisierungsgrad je nach beaufschlagter CO₂-Konzentration sehr unterschiedlich große spezifische Oberflächen aufwiesen [8]. Eventuell zeigt das bei 0,5 Vol.-% entstandene Silika-Gel keine so große spezifische Oberfläche und könnte unter anderem deshalb einen eventuellen Verstopfungseffekt nicht vollständig ausgleichen. Beide Effekte könnten das Absinken der spezifischen Oberfläche bei 0,5 Vol.-%

erklären. Dass die spezifische Oberfläche dann bei einer beaufschlagten CO_2 -Konzentration von 3 Vol.-% wieder deutlich höhere Werte aufweist, ist vor diesem Hintergrund nicht überraschend, da hier zunächst vermutlich wesentlich mehr Silica-Gel als in den 0,5 Vol.-%-Proben entstanden ist. Sollte dieses darüber hinaus eine höhere spezifische Oberfläche als das bei niedrigeren CO_2 -Konzentrationen entstandene Silica-Gel aufweisen, könnte dies den massiven Anstieg der spezifischen Oberfläche erklären.

Erste Erkenntnisse über das Carbonatisierungsverhalten der Modellporenbetone konnten gesammelt werden. Um eine Empfehlung über ein Schnellprüfverfahren geben zu können, müssen die Carbonatisierungsmechanismen besser verstanden werden und mit Ergebnissen der natürlichen Carbonatisierung verglichen werden.

Es existieren eine Reihe an möglichen Verfahren, die das Potential für ein Prüfverfahren aufweisen. Mit Hilfe einer CO_2 -Chemisorption kann eventuell in situ unter definierten Bedingungen das Carbonatisierungsverhalten bestimmt werden. Da diese Methode dennoch nur mit sehr hohen CO_2 -Konzentrationen praktikabel ist, muss validiert werden, inwieweit die Ergebnisse auf das natürliche Carbonatisierungsverhalten von Porenbeton übertragbar sind, auch unter Berücksichtigung des Gasdiffusionsverhaltens in einem Probekörper im Dezimetermaßstab.

Möglicherweise lassen sich auch mit Hilfe von XRD-Analysen an carbonatisiertem und an uncarbonatisiertem Porenbeton Aussagen über den Carbonatisierungswiderstand des Tobermorits treffen, sodass vorhergesehen werden kann, wie stabil dieser langfristig unter natürlichen Bedingungen sein wird.

5 Zusammenfassung

- Die eingestellte Sulfatkonzentration hat in den hier vorgestellten Ergebnissen keinen maßgeblichen Einfluss auf das Carbonatisierungsverhalten der Porenbetone, deren Feuchte vor der 15-Tage Bewitterung 30 % betrug.
- Im Zuge der Carbonatisierung entstand Calcit, Vaterit und Gips. Es können bei 20 °C, 65 % r. F. und 3,0 Vol.-% CO_2 kristalline Calciumcarbonatgehalte von 30 M.-% bis 38 M.-% erreicht werden.
- Die spezifische Oberfläche erhöht sich im Zuge der Carbonatisierung.
- Die Druckfestigkeitsuntersuchungen an carbonatisierten Flachprismen eignen sich unter den vorgestellten Messbedingungen nicht als Schnellprüfverfahren.

6 Ausblick

- Die Herkunft vom Gips soll näher untersucht werden, beispielsweise mit Hilfe der STEM, gekoppelt mit EDS, und die Phasenentwicklung könnte thermodynamisch modelliert werden. Es könnte so ermittelt werden, welche Phasen Sulfat enthalten und später auslaugen.
- Die Korrelierbarkeit von BET mit dem Carbonisierungsgrad muss weiter untersucht werden.

- Die Untersuchungsergebnisse sollen mit Carbonatisierungsstudien an Pulvern verglichen werden.
- Es muss ein Vergleich mit über einen repräsentativen Zeitraum natürlich carbonatisierten Modellporenbetonen gezogen werden.
- Weitere Untersuchungen zum Carbonatisierungsmechanismus an Porenbetonen mit höherer Rohdichte und mit unterschiedlichen Ausgangsfeuchten sollten durchgeführt werden, auch um den Einfluss der Gasdiffusion in den Probekörper getrennt vom Einfluss des chemischen Carbonatisierungswiderstands untersuchen zu können.

Danksagung

Gedankt werden soll der DFG für die Förderung des Projekts "Mechanismen der Carbonatisierung von Calciumsilikathydrat-Phasen in hydrothermal gehärteten porierten Baustoffen".



Deutsche
Forschungsgemeinschaft

References

- [1] Šauman, Z. (1971) *Carbonization of porous concrete and its main binding components*. Cement and Concrete Research, 1, pp. 645–662
- [2] Lohaus, L. (Ed.). (2013) *Dauerhaftigkeit von Porenbeton-Plansteinen unter realitätsnahen Bedingungen*. Fraunhofer-IRB-Verlag.
- [3] Matsushita, F.; Aono, Y.; Shibata, S. (2004) *Calcium silicate structure and carbonation shrinkage of a tobermorite-based material*. Cement and Concrete Research, 34, pp. 1251–1257
- [4] Walk-Laufer, B. (2002) *Untersuchung des Einflusses von Sulfaten auf das System $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-K}_2\text{O-H}_2\text{O}$ mittels Wärmeflusskalorimetrie und in-situ Neutronenbeugung unter hydrothermalen Bedingungen*.
- [5] Anwendung von Bauprodukten in Bauwerken - Regeln für die Verwendung von Porenbetonsteinen nach DIN EN 771-4:2015-11 2018.
- [6] Prüfung von Mörteln mit mineralischen Bindemitteln - Teil 9: Bestimmung der Fugendruckfestigkeit von Festmörteln nach DIN 18555-9 2019
- [7] Kus, H., Carlsson, T. (2003) *Microstructural investigations of naturally and artificially weathered autoclaved aerated concrete*. Cement and Concrete Research 33, pp. 1423–1432
- [8] Matsushita, F., Aono, Y. & Shibata, S. (2004) *Microstructure Changes in Autoclaved Aerated Concrete during Carbonation under Working and Accelerated Conditions*. J. of Advanced Concrete Technology Vol. 2, No. 1, pp. 121–129