

Untersuchungen zum Einfluss von neuartigen Bindemitteln auf die Dauerhaftigkeit der Stahlbewehrung

Rebecca Achenbach¹, Michael Raupach¹, Bettina I. E. Kraft², Horst-Michael Ludwig²

¹ *Institut für Baustoffforschung,
RWTH Aachen University,
Schinkelstr. 3, 52062 Aachen, Germany*

² *F. A. Finger-Institut für Baustoffkunde
Bauhaus-Universität Weimar
Coudraystr. 11b, 99423 Weimar, Germany*

achenbach@ibac.rwth-aachen.de

Kurzfassung

Mit dem Ziel die CO₂-Emissionen im Rahmen der Zementherstellung zu vermindern, wird weltweit an Alternativen zum Portlandzement geforscht. Ein Ansatz ist die Verwendung alkali-aktivierter Bindemittel, wo ein silikathaltiges Vorprodukt, wie calcinierte Tone, Kohleflugaschen oder Hüttensande mit einem hoch-alkalischen Aktivator in Form von z. B. Wassergläsern aktiviert werden. Die pH-Werte dieser Bindemittel sind anfangs zwar sehr hoch, jedoch wird bei der Erhärtungsreaktion kein Portlandit gebildet, sodass sie im Gegensatz zum Portlandzement einen geringeren Carbonatisierungswiderstand aufweisen. Um diese Bindemittel in bewehrten Bauteilen einsetzen zu können, müssten ausgehend vom zu erwartenden Carbonatisierungsfortschritt zum Teil nicht umsetzbar hohe Betondeckungen vorgesehen werden, um die Dauerhaftigkeit der Stahlbewehrung zu gewährleisten. Bisher ist allerdings unklar, welcher pH-Wert in Porenlösungen carbonatisierter Proben alkali-aktivierter Materialien überhaupt vorliegt, und es besteht die Vermutung, dass sich bei Carbonatisierung ein höherer pH-Wert einstellt, als z. B. bei Portlandzementbasierten Mörteln und Betonen. Außerdem gibt es kaum Untersuchungen dazu, wie sich die Carbonatisierung der alkali-aktivierten Materialien auf das Korrosionsverhalten der Stahlbewehrung auswirkt.

Daher wurden Untersuchungen an vier verschiedenen alkali-aktivierten Mörteln, davon zwei calcium-arme (Geopolymere) und zwei calciumreiche (alkali-aktivierte Schlacken) durchgeführt, wo der pH-Wert carbonatisierter Proben bestimmt wurde. Außerdem wurden Untersuchungen an stahlbewehrten Mörtelprüfkörpern durchgeführt, die unter natürlichem CO₂-Gehalt bis zur Bewehrung carbonatisiert wurden, um eine erste Einordnung über den Einfluss auf die Korrosion zu ermöglichen. Die Ergebnisse zeigen vor allem für die beiden Geopolymere ein Potential auf, dass hier auch im carbonatisierten Zustand eine Schutzwirkung für den eingebetteten Stahl möglich ist.

Keywords: alkali-aktivierte Mörtel, Carbonatisierung, Stahlkorrosion

Abstract

With the aim of reducing CO₂ emissions in cement production, research is being carried out worldwide into alternatives to Portland cement. One approach is the use of alkali-activated binders, where a precursor, such as calcined clays, fly ash or granulated blast furnace slag, is activated with a highly alkaline activator for example in the form of water glasses. Although the pH values of these binders are initially very high, no portlandite is formed during the hardening reaction, so that they exhibit lower carbonation resistance than Portland cement. In order to be able to use these binders in reinforced components, unreasonably large concrete covers would have to be provided, based on the expected carbonation rate, in order to ensure the durability of the steel reinforcement. To date, however, it is unclear what pH is actually present in pore solutions of carbonated samples of alkali-activated materials, and there is an indication that they may have a higher pH in the carbonated state than, for example, Portland cement-

based mortars and concretes. In addition, there is little research on how the carbonation of alkali-activated materials affects the corrosion behavior of steel reinforcement.

Therefore, studies were conducted on four different alkali-activated mortars, two of which were low in calcium (geopolymers) and two of which were high in calcium (alkali-activated slags), where the pH of carbonated samples was determined. In addition, investigations were carried out on steel-reinforced mortar prisms carbonated to the reinforcement under natural CO₂ content to provide an initial assessment of the influence on steel corrosion. The results show a potential especially for the two geopolymers that a protective effect for the embedded steel is possible even in the carbonated state.

Keywords: alkali-activated mortar, carbonation, steel corrosion

1 Einleitung

Unter Carbonatisierung versteht man die Reaktion der Betonbestandteile mit CO₂ aus der Luft, was zu einer Verminderung der Alkalität der Betonporenlösung führt. Erreicht die Carbonatisierungsf front die Tiefe der Bewehrungslage, ist der Stahl nicht mehr durch den hohen pH-Wert der Betonporenlösung vor Korrosion geschützt [1; 2]. Um die Carbonatisierung des Betons bis zur Bewehrung während der geplanten Nutzungsdauer zu verhindern, werden in den aktuellen Standards [3; 4] Anforderungen an die Betonqualität und Betondeckung u. a. basierend auf der expositionsbedingt zu erwartenden Carbonatisierungsrate definiert. Diese Anforderungen wurden an Portlandzement (PZ)-basierten Betonen entwickelt. Vor dem Hintergrund, dass aktuell weltweit an Alternativen zum PZ geforscht wird, um die Bindemittelherstellung klimafreundlicher zu gestalten, muss die Übertragbarkeit dieser Anforderungen auf neuartige Bindemittelarten überprüft werden, um damit in ihrer Dauerhaftigkeit zum PZ vergleichbare bewehrte Bauteile herstellen zu können. Viele Bindemittel, die unter verringertem CO₂-Ausstoß hergestellt werden können, führen allerdings zu höheren Carbonatisierungsraten als PZ-Betone [2; 5], was aktuell zunehmend als Hinderungsgrund für einen verbreiteten Einsatz im Stahlbeton diskutiert wird [6; 7].

Beim PZ wird während der Hydratation Portlandit gebildet, das als pH-Puffer wirkt und den Carbonatisierungsfortschritt verzögert [8]. Es gibt wenige Untersuchungen zu dem pH-Wert, der infolge von Carbonatisierung in PZ-basierten Bindemitteln erreicht wird, aber es wird allgemein von einem Wert zwischen 8 und 9 ausgegangen [6]. Bei erhöhter Substitutionsrate des Klinkers durch Klinkerersatzstoffe wird weniger Portlandit gebildet, sodass klimafreundlichere Bindemittelarten mit einer erhöhten Carbonatisierungsrate einhergehen [7]. Bei den hier untersuchten alkali-aktivierten Materialien (AAMs) wird während der Erhärtung kein Portlandit gebildet [5]. In einer umfangreichen Literaturauswertung zur Carbonatisierung von AAMs und Portland-Kompositzementen zeigen alkali-aktivierte Schlacken (AAS) Carbonatisierungsgeschwindigkeiten, die etwa in der Größenordnung der Kompositzemente mit hohen Substitutionsraten ($\geq 66\%$) liegen, während AAMs mit geringerem Calciumgehalt (Geopolymere), wie z. B. alkali-aktiviertes Metakaolin oder Flugasche deutlich höhere Carbonatisierungsgeschwindigkeiten aufweisen [9]. Auch Bernal et al. [10] beobachten für reine AAS geringere Carbonatisierungsgeschwindigkeiten, als wenn die Rezeptur zusätzlich Beimengungen von Metakaolin enthält. Allgemeine Aussagen über die Carbonatisierung von AAMs sind aufgrund der vielen Einflussfaktoren durch unterschiedliche Ausgangsstoffe, unterschiedliche Aktivatoren und unterschiedliche Testmethoden allerdings schwierig, aber eine Literaturstudie über die verschiedenen Einflüsse wurde von Zhang et al. erstellt [11]. Von mehreren Autoren wird mittlerweile darauf hingewiesen, dass die Untersuchung der Carbonatisierung in AAMs in beschleunigten Tests, also unter erhöhtem CO₂-Gehalt, zwar für einen direkten Vergleich verschiedener Rezepturen der gleichen Bindemittelart anwendbar ist [12], aber die Phasenbildung unter Carbonatisierung bei atmosphärischem CO₂-Gehalt abweicht und die Carbonatisierungsrate in AAMs durch erhöhte CO₂-Gehalte im Vergleich zum PZ überschätzt wird [11–13]. Für den pH-Wert, der sich in Porenlösungen von carbonatisierten AAMs einstellt, ist das Carbonat/Bicarbonat-Verhältnis maßgeblich [13; 14]. Bernal et al. [13] führt thermodynamische Berechnungen durch und ermittelt, dass die pH-Werte von natürlich carbonatisierten simulierten Porenlösungen von alkaliaktivierten Materialien nicht unter einen Wert von 10 fallen. Pouhet et al. [14] stellt an Laborversuchen an den Porenlösungen von alkali-aktiviertem Metakaolin fest, dass die Porenlösung zwar deutlich schneller carbonatisiert, als eine PZ-Porenlösung, aber unter natürlichem CO₂-Gehalt nur auf einen pH-Wert von 10,5 abfällt. Die Autoren leiten auf Basis des pH-Wertes eine verminderte Gefahr für Bewehrungskorrosion ab. Babaei et al. [15] kommen zu einem ähnlichen Schluss für alkali-aktivierte Flugasche mit unterschiedlichen Beimengungen von Hüttensand: Sowohl die berechneten,

als auch die gemessenen pH-Werte an natürlich carbonatisierten Proben lagen über 10,2. Bei Versuchen zur Bewehrungskorrosion infolge beschleunigter Carbonatisierung zeigen die eingebetteten Stähle keine Bewehrungskorrosion und Potentialmesswerte und Polarisationswiderstände im Bereich von passiven Stählen. Sufian Badar et al. [16] untersuchten das Korrosionsverhalten infolge Carbonatisierung an verschiedenen alkali-aktivierten Flugaschen, die sich in ihrem Ca-Gehalt der Flugaschen unterscheiden. Die Untersuchungen zeigen, dass der pH-Wert der alkaliaktivierten Flugasche mit höherem Ca-Gehalt weiter absinkt als bei den Flugaschen mit niedrigerem Ca-Gehalt. Die Korrosionserscheinungen infolge Carbonatisierung waren bei der Flugasche mit höherem Ca-Gehalt deutlich ausgeprägter und bei den anderen kaum oder nicht vorhanden. Diese Beobachtungen wurden auch durch die elektrochemischen Messungen gestützt. In [17] wird das Korrosionsverhalten einer AAS im Vergleich zum PZ untersucht. Hier führt die AAS, allerdings im beschleunigt carbonatisierten Zustand, zu deutlich höheren Korrosionsgeschwindigkeiten als der PZ.

Auf Basis der Literaturangaben kann eine Schutzwirkung mancher AAMs aufgrund höherer pH-Werte im carbonatisierten Zustand vermutet werden, die vermehrt bei den AAMs mit niedrigem Ca-Gehalt beobachtet wurde, obwohl diese schneller carbonatisieren als AAS. In der hier vorgestellten Untersuchung wurden daher zwei AAMs mit niedrigem Ca-Gehalt der Ausgangsstoffe und zwei AAS untersucht.

2 Durchgeführte Untersuchungen

Die im Folgenden beschriebenen Untersuchungen wurden mit dem Ziel durchgeführt, Erkenntnisse über den Einfluss der Carbonatisierung alkali-aktivierter Mörtel auf das Korrosionsverhalten von eingebettetem Stahl zu erhalten. Dazu wurden stahlbewehrte Mörtelprismen aus vier verschiedenen alkali-aktivierten Mörteln hergestellt und über drei Jahre dem atmosphärischen CO_2 -Gehalt ausgesetzt. An diesen Proben wurden elektrochemische Messungen durchgeführt. Anschließend wurden die Prüfkörper gespalten, visuell auf Korrosionserscheinungen untersucht und die Lage der Carbonatisierungsfront mittels Phenolphthalein-Indikator sichtbar gemacht. Um die Ergebnisse besser einordnen zu können, wurden zusätzlich die pH-Werte an carbonatisierten und nicht carbonatisierten Leimproben bestimmt.

2.1 Materialien

Die Versuche wurden mit vier verschiedenen alkali-aktivierten Mörteln durchgeführt, die mit den in Tabelle 1 gelisteten W/B-Werten und einem Bindemittel:Sand-Verhältnis von 1:3 hergestellt wurden. Dabei kam CEN-Normsand mit einer Korngröße von 0,08 bis 2,0 mm zum Einsatz.

Tabelle 1 Übersicht der untersuchten alkali-aktivierten Mörtel

Bezeichnung	Beschreibung	W/B
Geo MK	Metakaolin aktiviert mit Kaliumwasserglas (Silikatmodul 1,1)	0,50
Geo FA	Steinkohleflugasche aktiviert durch NaOH (19,068 M) und Natronwasserglas (Silikatmodul 2,0)	0,34
AAS I	Hüttensand I aktiviert durch Natronwasserglas (Silikatmodul 2,0)	0,38
AAS II	Hüttensand II aktiviert durch CEM I 52,5 R (7,2 M.-% im Bindemittel) und Na_2SO_4 ; Kalksteinmehl als Füller	0,39

Zur Berechnung der W/B-Werte wurden der flüssige Anteil des jeweiligen Aktivators zum zugegebenen Wasser addiert. Der Feststoffanteil des Aktivators, das Ausgangsmaterial und ggf. Füller wurden dem Bindemittel zugerechnet. Die Zusammensetzung der Ausgangsstoffe ist im Anhang in Tabelle 4 zu finden. Bei der teilweise zum Vergleich herangezogenen Referenz (Ref 1) handelt es sich um einen CEM I 42,5 R, der mit einem W/B-Wert von 0,5 und dem gleichen Bindemittel:Sand-Verhältnis hergestellt wurde. Die Rezepturen der Leimproben, die zur Bestimmung der pH-Werte hergestellt wurden, unterscheiden sich von den Mörtelrezepturen nur dadurch, dass der Sand weggelassen wurde.

Eine Beschreibung des Hydratations- und Carbonatisierungsverhaltens wurde bereits an anderer Stelle veröffentlicht [5].

2.2 Methoden

Zur Bestimmung der pH-Werte vor und nach Carbonatisierung wurden die frischen Leimproben in Kunststoffbehälter gefüllt und verschlossen. Die Behälter wurden 7, 28 bzw. 56 Tage bei 20 °C und 95 % relativer Luftfeuchte gelagert. Im Alter von 7 bzw. 28 Tagen wurden die Proben entnommen, 24 h bei 60 °C getrocknet und anschließend auf < 100 µm aufgemahlen. Die gemahlenen Proben wurden fünf Minuten lang im Verhältnis 1:1 mit deionisiertem Wasser gemischt und dann zentrifugiert. Der pH-Wert im Zentrat wurde gemessen. Für die Bestimmung der pH-Werte im carbonatisierten Zustand wurden die Proben im Alter von 56 Tagen den Kunststoffbehältern entnommen, in 5 x 5 x 5 mm³ kleine Stücke zerkleinert und diese bei 1 Vol.-% CO₂ beschleunigt carbonatisiert. Vorangegangene Untersuchungen hatten gezeigt, dass 56 Tage bei dieser CO₂-Konzentration mehr als ausreichen, um die Stücke vollständig zu carbonatisieren [5]. Anschließend wurde ebenfalls die zuvor beschriebene Auslaugmethode verwendet, um die pH-Werte der carbonatisierten Proben zu bestimmen.

Für die Korrosionsversuche wurden Mörtelprismen hergestellt, die eine Arbeitselektrode aus Stahl enthielten. Die S235 Glattstähle mit einem Durchmesser von 8 mm wurden vor dem Einbau in die Schalung gesandstrahlt und die Enden mit einem Epoxidharz abgedichtet, sodass die freie Länge 80 mm betrug. Im Alter von 28 Tagen wurde die Deckung auf der Oberseite zu 15 mm und auf der Unterseite zu 35 mm gesägt, sodass die Prüfkörper eine Abmessung von 120 mm x 60 mm x 60 mm hatten. Für jede Bindemittelart wurden drei dieser bewehrten Prismen hergestellt und drei Jahre lang bei 22 °C und 50 % rel. Luftfeuchte gelagert, um sie bei atmosphärischem CO₂-Gehalt zu carbonatisieren. Im Alter von 3 Jahren wurden sie kontrolliert mit Wasser beaufschlagt. Dazu wurde über 7 Tage täglich jeweils 10 ml Leitungswasser auf die Oberseite jedes Prüfkörpers gegeben. Anschließend wurden sie in den in Bild 1 dargestellten Versuchsaufbau eingesetzt. Die Ankopplung der Gegenelektrode aus MMO-beschichtetem Titannetz erfolgte mit Leitungswasser und die Ankopplung der Referenzelektrode mit Ultraschallgel, um keine zusätzlichen Alkalien in den Prüfkörper einzutragen. Das elektrochemische Potential gegen eine MnO₂-Referenzelektrode sowie der anodische Polarisationswiderstand mittels LPR wurden gemessen. Dazu wurden die Arbeitselektroden von -20 mV bis +20 mV gegen das zuvor gemessene freie Korrosionspotential mit einer Polarisationsgeschwindigkeit von 0,2 mV/s polarisiert. Der Einfluss des IR-bedingten Spannungsabfalls wurde mit der anhand einer kurzen EIS-Messung bestimmten Impedanz mit der kleinsten Phasenverschiebung im Frequenzbereich zwischen 1 und 10 kHz korrigiert.

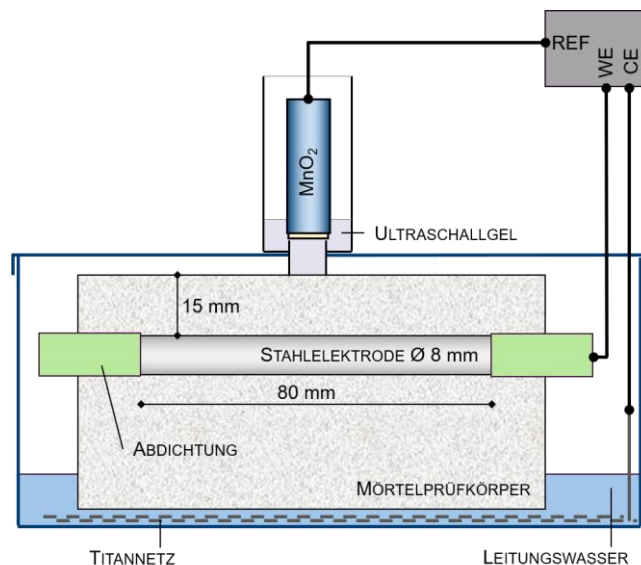


Bild 1 Messaufbau zur Bestimmung von Ruhepotential und anodischem Polarisationswiderstand

Im Anschluss an die elektrochemischen Messungen wurden die Prüfkörper längs gespalten und mit Phenolphthalein in Ethanol als pH-Indikator besprüht. Der Abstand des Farbumschlags von der gesägten Prüfkörper Ober- und Unterseite wurde an je fünf Stützstellen im Bereich des Stahls gemessen und der Mittelwert als Carbonatisierungstiefe angegeben.

3 Ergebnisse & Diskussion

Um die Versuchsbedingungen, die zum Zeitpunkt der elektrochemischen Messungen von Potential und Polarisationswiderständen vorlagen, zu verifizieren, wird die Darstellung der gespaltenen Prüfkörper mit aufgesprühtem Indikator, entgegen der chronologischen Reihenfolge der Versuchsdurchführung, vorweggenommen.

3.1 pH-Werte vor und nach Carbonatisierung

Die gemessenen pH-Werte im nicht carbonatisierten und carbonatisierten Zustand der verschiedenen alkali-aktivierten Leimproben sind in Tabelle 2 gelistet. Der höchste pH-Wert im carbonatisierten Zustand wird bei der Serie Geo FA beobachtet. Beide Geopolymere zeigen im carbonatisierten Zustand höhere pH-Werte als die beiden AAS. Allerdings muss hier darauf hingewiesen werden, dass die Carbonatisierung der Leimproben bei einem erhöhten CO₂-Gehalt erfolgte, sodass die pH-Werte im Vergleich zum natürlichen CO₂-Gehalt evtl. unterschätzt werden.

Tabelle 2 pH-Werte nicht carbonisierter und carbonisierter AAM-Leimproben, mittels Auslaugmethode bestimmt

	7 Tage ausgehärtet	28 Tage ausgehärtet	56 Tage ausgehärtet, dann 56 Tage Lagerung bei 1,0 % CO ₂
Geo MK	13,1	12,1	10,1
Geo FA	13,2	13,0	10,4
AAS I	13,2	13,2	9,7
AAS II	12,8	12,7	8,8

3.2 Stahlbewehrte Mörtelprismen

Zur Besseren Einordnung der ermittelten elektrochemischen Parameter werden hier zunächst die visuelle Untersuchung der nach Versuchsende gespaltenen Prüfkörper sowie die vorgefundenen Carbonatisierungstiefen vorgestellt. Die gespaltenen Prüfkörper mit aufgesprühtem Phenolphthalein-Indikator und nach 24 h Wartezeit sind in Bild 2 bis 5 dargestellt.

In Bild 2 sind die drei Prüfkörper der Serie Geo MK zu sehen. Die Pinkfärbung des Indikators zeigt ein unerwartetes Bild: Während die Prüfkörper im Inneren kaum verfärbt sind, schlägt der Indikator am äußeren Rand der Prüfkörper um, was auf einen höheren pH-Wert im Außenbereich hindeutet. Ein möglicher Erklärungsansatz ist, dass die Prüfkörper im Außenbereich trockener sind und sich die Ionen in der Porenlösung durch die Austrocknung aufkonzentrieren, was zu einer höheren OH⁻-Konzentration und damit zu einem höheren pH-Wert im Außenbereich des Prüfkörpers führt. Das würde bedeuten, dass die Prüfkörper zwar durchcarbonatisiert sind, aber der pH-Wert nah an der Farbumschlagkonzentration des Indikators liegt. Die Arbeitselektroden zeigen dennoch keinerlei Korrosionserscheinungen.

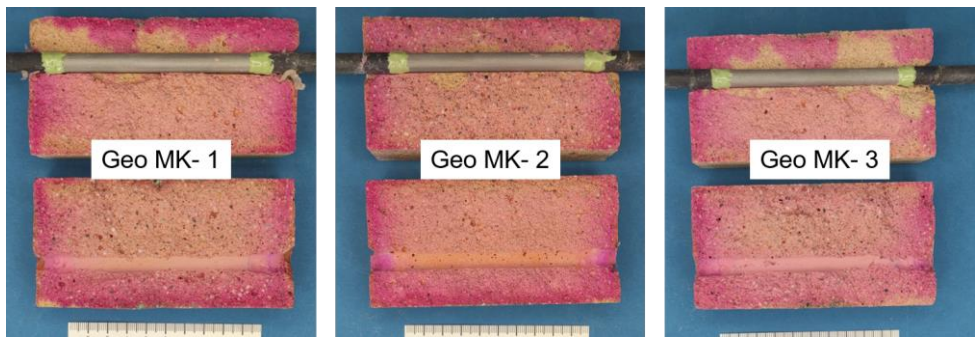


Bild 2 Nach Versuchsende gespaltene Prüfkörper der Serie Geo MK mit aufgesprühtem Phenolphthalein-Indikator

In Bild 3 sind die nach Versuchsende gespaltenen Prüfkörper der Serie Geo FA mit aufgesprühtem Indikator zu sehen. Es ist nur eine minimale Verfärbung im Außenbereich der Prüfkörper zu erkennen, sodass hier ebenfalls davon ausgegangen wird, dass die Prüfkörper vollständig carbonatisiert sind. Auch hier zeigen die Arbeitselektroden keine Korrosionserscheinungen.

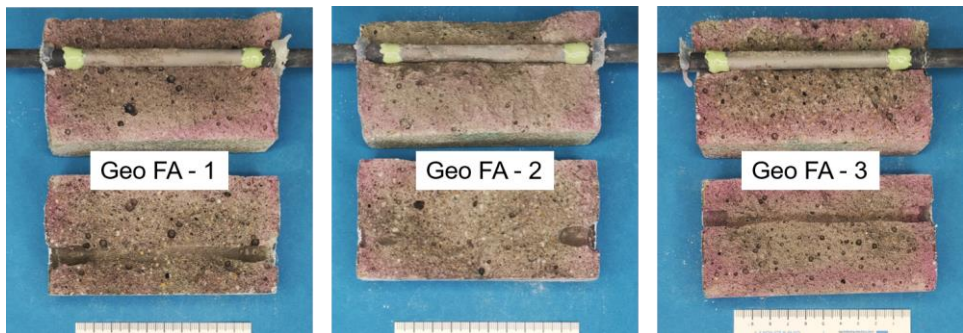


Bild 3 Nach Versuchsende gespaltene Prüfkörper der Serie Geo FA mit aufgesprühtem Phenolphthalein-Indikator

In Bild 4 sind die gespaltenen Prüfkörper der Serie AAS I zu sehen.

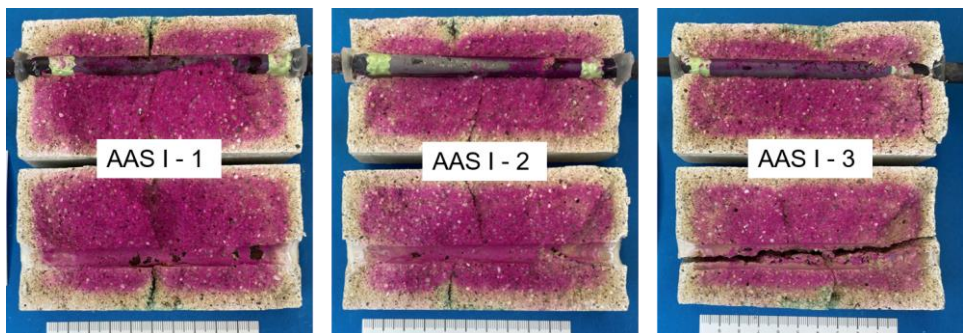


Bild 4 Nach Versuchsende gespaltene Prüfkörper der Serie AAS I mit aufgesprühtem Phenolphthalein-Indikator

Am Farbumschlag des aufgesprühten Indikators ist zu sehen, dass die Carbonatisierungsfront nicht bis zur Arbeitselektrode vorgedrungen ist. Beim Prüfkörper AAS I – 1 zeigte sich schon vor dem Spalten des Prüfkörpers ein durchgehender Riss durch den Prüfkörper. Im Bild ist zu sehen, dass dieser Riss

die Bewehrung kreuzt und Korrosionserscheinungen hauptsächlich im Rissbereich auftreten. Daher wurde dieser Prüfkörper bei der Berechnung der Mittelwerte und in den Diagrammen im Folgenden nicht berücksichtigt. Die anderen beiden Stähle zeigen vereinzelte kleine und oberflächliche Korrosionsstellen.

In Bild 5 sind die gespaltenen Prüfkörper der Serie AAS II zu sehen. Der Indikator macht deutlich, dass die Carbonatisierungsfront den Stahl erreicht hat und vornehmlich an diesen Stellen sind Korrosionsprodukte zu sehen, sodass hier davon ausgegangen werden kann, dass die Korrosion carbonatisierungs-induziert ist.

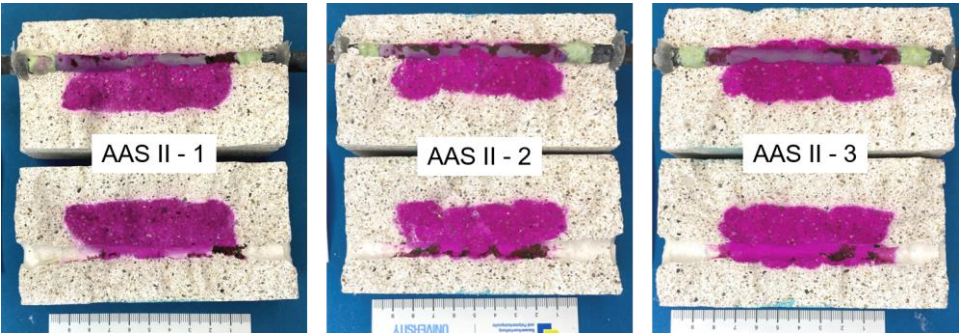


Bild 5 Nach Versuchsende gespaltene Prüfkörper der Serie AAS II mit aufgespritztem Phenolphthalein-Indikator

Die in den hier abgebildeten Prüfkörpern gemessenen Carbonatisierungstiefen sind in Tabelle 3 gelistet. In Übereinstimmung mit Litaraturangaben sind die Geopolymere schneller carbonatisiert als die beiden AAS.

Tabelle 3 An den gespaltenen Prüfkörpern gemessene Carbonatisierungstiefen anhand des Phenolphthalein-Farbumschlags

	Geo MK	Geo FA	AAS I	AAS II
Carbonatisierungstiefe nach 3 Jahren bei atm. CO ₂ -Gehalt	vollständig	vollständig	11 mm	23 mm

Vor dem Hintergrund der Carbonatisierungstiefen lassen sich die im Folgenden dargestellten Ergebnisse der elektrochemischen Untersuchungen auf folgende Randbedingungen zusammenfassen: Die Stähle der beiden calciumarmen alkali-aktivierten Mörtel Geo MK und Geo FA sowie der calciumreiche alkali-aktivierte Mörtel AAS II wurden in carbonatisierter Umgebung getestet. Die Umgebung der Stahloberfläche von AAS I ist nicht carbonatisiert. Die Prüfkörper der Ref 1 Serie wurden nicht gespalten, da sie weiterhin als Referenz benötigt werden, aber aus vorangegangenen Tests [5] und aus langjähriger Erfahrung in der Baupraxis lässt sich mit ausreichender Sicherheit sagen, dass ein CEM I Mörtel nach drei Jahren Lagerung bei atmosphärischem CO₂-Gehalt eine deutlich geringere Carbonatisierungstiefe als 15 mm hat.

Die Ergebnisse der Potential- und Polarisationswiderstandsmessungen sind in Bild 6 dargestellt. Die Potentialmesswerte wurden auf die Standardwasserstoff-Elektrode umgerechnet. Die anodischen Polarisationswiderstände wurden auf die Stahloberfläche in Kotntakt mit Mörtel bezogen. Wie oben bereits erwähnt, wurde der Prüfkörper AAS I – 1 hier nicht mit einbezogen. Die mit „c“ markierten Säulen sind die Messwerte, die in carbonatisierter Umgebung gemessen wurden. Die gemessenen Einzelwerte sind zusätzlich in Tabelle 6 im Anhang aufgelistet.

Beide calciumarmen AAMs (Geo MK und Geo FA) zeigen hohe Potentialmesswerte, die im Bereich der nicht carbonatisierten CEM I – Referenz liegen und ebenfalls hohe Polarisationswiderstände in einem ähnlich hohen Bereich. Im Zusammenhang mit den nicht vorhandenen Korrosionserscheinungen nach Versuchsende und den höheren pH-Werten im carbonatisierten Zustand könnten diese Bindemittel

trotz hoher Carbonatisierungsraten einen Schutz der Bewehrung auch im carbobatisierten Zustand ermöglichen.

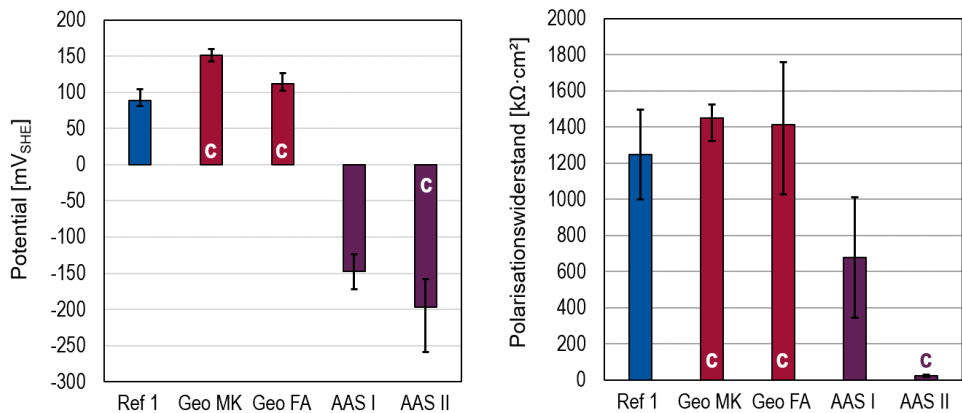


Bild 6 Messungen an Arbeitselektroden aus Stahl in AAM-Mörteln und CEM I-Referenz: Ruhepotentiale (links), anodische Polarisationswiderstände (rechts)

Die Serie AAS I zeigt negativere Potentialmesswerte und geringere Polarisationswiderstände, was aber im Fall der alkaliaktivierten Schlacken im Gegensatz zu anderen Bindemittelarten nicht unbedingt mit einer höheren Korrosionsgeschwindigkeit einhergeht [18]. Hier war der Mörtel nicht bis zur Bewehrung carbonatisiert, sodass eine Aussage über den Einfluss der Carbonatisierung auf die Korrosion der Stahlbewehrung nicht möglich ist. Bei der Serie AAS II ist die Umgebung der Stahlelektrode dagegen carbonatisiert und hier wurden mit Abstand die negativsten Potentiale und die niedrigsten Polarisationswiderstände gemessen. Im Zusammenhang mit den niedrigeren pH-Werten im carbonatisierten Zustand und den auf den Fotos der gespaltenen Prüfkörper erkennbaren Korrosionserscheinungen am Rand des Farbumschlags ist bei dieser Rezeptur eher keine Schutzwirkung im carbonatisierten Mörtel zu vermuten.

4 Zusammenfassung & Ausblick

Es wurden vier verschiedene Rezepturen von alkali-aktivierten Mörteln hinsichtlich ihres Einflusses auf die Stahlbewehrung im carbonatisierten Zustand untersucht. Davon waren zwei calciumarme alkali-aktivierte Bindemittel (Geopolymere) und zwei calciumreich (AAS). Es wurden an Leimproben die pH-Werte im carbonatisierten Zustand bestimmt, sowie Versuche an bewehrten Mörtelprismen durchgeführt, die zuvor drei Jahre lang dem atmosphärischen CO₂-Gehalt ausgesetzt waren. Im Anschluss wurden die Prüfkörper gespalten und die Carbonatisierungsfrente mittels Phenolphthalein sichtbar gemacht. Die Untersuchungen lassen die folgenden Schlüsse für die hier untersuchten Mörtelrezepturen zu:

- Beide hier untersuchten Geopolymer-Rezepturen zeigten zwar höhere Carbonatisierungsraten, aber im carbonatisierten Zustand einen höheren pH-Wert als die beiden untersuchten alkali-aktivierten Schlacken.
- Die in beiden Geopolymermörteln eingebetteten Stahlelektroden zeigten trotz carbonatisierter Umgebung ein freies Korrosionspotential im Bereich der nicht carbonatisierten CEM I-Referenz und ebenfalls anodische Polarisationswiderstände in der gleichen Größenordnung. Außerdem wiesen die Stahlelektroden nach Versuchsende keine Korrosionserscheinungen auf. Daraus lässt sich eine Schutzwirkung für eingebetteten Stahl auch im carbonatisierten Material ableiten, die auf die höheren pH-Werte im carbonatisierten Zustand zurückzuführen ist.

- Im Fall der einen bis zum Stahl carbonatisierten alkali-aktivierten Schlacke, die im carbonatisierten Zustand den niedrigsten der hier gemessenen pH-Werte aufwies, führte die Carbonatisierung zu Korrosionserscheinungen am Stahl, die auch anhand von Potential- und Polarisationswiderstandsmessungen messtechnisch erfasst werden konnte.

Vor allem die beiden Geopolymere zeigen das Potential, dass auch im carbonatisierten Zustand ein Korrosionsschutz für enthaltene Stahlbewehrung besteht, weil ihr pH-Wert auf einen höheren Wert abfällt als bei den AAS. Allerdings beruhen die hier gezeigten Erkenntnisse auf wenigen Prüfkörpern, sodass weitere Untersuchungen dieses Sachverhaltes mit größerem Probenumfang und gezielter Variation der Rezepturen notwendig sind. Außerdem muss überprüft werden, ob diese Schutzwirkung längerfristig erhalten bleibt und wie sie von Umgebungsbedingungen, insbesondere des Feuchtezustandes abhängt.

5 Literaturverzeichnis

- [1] Bertolini, L. et al. (2005) *Corrosion of steel in concrete – Prevention, diagnosis, repair*. Weinheim: Wiley-VCH.
- [2] Stefanoni, M.; Angst, U.; Elsener, B. (2018) *Corrosion rate of carbon steel in carbonated concrete – A critical review* in: Cement and Concrete Research 103, H. 12, S. 35–48. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2017.10.007>
- [3] DIN EN 206 (2021-06) *Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Deutsche Fassung EN 206:2013+A2:2021*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [4] DIN 1045-2 (2008-08) *Tragwerke aus Beton, Stahlbeton und Spannbeton – Teil 2: Beton – Festlegung, Eigenschaften, Herstellung und Konformität – Anwendungsregeln zu DIN EN 206-1*. Berlin: Beuth Verlag GmbH.
- [5] Kraft, B. et al. (2022) *Hydration and Carbonation of Alternative Binders* in: Corrosion and Materials Degradation 3, H. 1, S. 19–52. <https://doi.org/10.3390/cmd3010003>
- [6] Angst, U. M. (2023) *On the Carbonation Dilemma and How to Escape from It* in: Jędrzejewska, A. et al. [Hrsg.] *International RILEM Conference on Synergising Expertise towards Sustainability and Robustness of Cement-based Materials and Concrete Structures*. Cham: Springer Nature Switzerland, S. 1077–1084.
- [7] Angst, U. M. (2023) *Steel corrosion in concrete – Achilles’ heel for sustainable concrete?* in: Cement and Concrete Research 172, S. 107239. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2023.107239>
- [8] Leemann, A.; Moro, F. (2017) *Carbonation of concrete: the role of CO₂ concentration, relative humidity and CO₂ buffer capacity* in: Materials and Structures 50, H. 1. <https://doi.org/10.1617/s11527-016-0917-2>
- [9] Gluth, G. J. G. et al. (2022) *Carbonation rate of alkali-activated concretes and high-volume SCM concretes: a literature data analysis by RILEM TC 281-CCC* in: Materials and Structures 55, H. 8. <https://doi.org/10.1617/s11527-022-02041-4>
- [10] Bernal, S. A. et al. (2010) *Effect of silicate modulus and metakaolin incorporation on the carbonation of alkali silicate-activated slags* in: Cement and Concrete Research 40, H. 6, S. 898–907. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.02.003>
- [11] Zhang, J. et al. (2017) *Durability of alkali-activated materials in aggressive environments: A review on recent studies* in: Construction and Building Materials 152, H. 2, S. 598–613. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.07.027>
- [12] Gluth, G. J. G. et al. (2020) *RILEM TC 247-DTA round robin test: carbonation and chloride penetration testing of alkali-activated concretes* in: Materials and Structures 53, H. 1, S. 131. <https://doi.org/10.1617/s11527-020-1449-3>
- [13] Bernal, S. A. et al. (2012) *Accelerated carbonation testing of alkali-activated binders significantly underestimates service life: The role of pore solution chemistry* in: Cement and Concrete Research 42, H. 10, S. 1317–1326. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.07.002>
- [14] Pouhet, R.; Cyr, M. (2016) *Carbonation in the pore solution of metakaolin-based geopolymer* in: Cement and Concrete Research 88, S. 227–235. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2016.05.008>

- [15] Babae, M.; Khan, M.; Castel, A. (2018) *Passivity of embedded reinforcement in carbonated low-calcium fly ash-based geopolymer concrete* in: Cement and Concrete Composites 85, S. 32–43. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2017.10.001>
- [16] Sufian Badar, M. et al. (2014) *Corrosion of steel bars induced by accelerated carbonation in low and high calcium fly ash geopolymer concretes* in: Construction and Building Materials 61, S. 79–89. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2014.03.015>
- [17] Aperador, W.; Mejia de Gutiérrez, R.; Bastidas, D. M. (2009) *Steel corrosion behaviour in carbonated alkali-activated slag concrete* in: Corrosion Science 51, H. 9, S. 2027–2033. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2009.05.033>
- [18] Mundra, S. et al. (2023) *Application of electrochemical methods for studying steel corrosion in alkali-activated materials* in: Materials and Corrosion 74, H. 7, S. 988–1008. <https://doi.org/10.1002/maco.202313743>

6 Anhang

Tabelle 4 Chemische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe in M.-%

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	MnO	TiO ₂	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
CEM I 42,5 R (Ref 1)	20.50	4.70	2.90	63.20	1.30	0.03	0.20	1.22	0.28	3.20
Metakaolin (Geo MK)	65.80	21.20	4.30	2.20	0.50	0.01	0.80	0.49	0.16	0.10
Flugasche (Geo FA)	56.15	21.83	8.68	5.61	2.29	0.08	0.94	2.19	0.89	0.45
Hüttensand I (AAS I)	29.28	17.61	1.35	41.05	6.05	0.24	0.59	0.14	0.84	0.74
Hüttensand II (AAS II)	34.97	10.75	0.56	41.41	7.94	0.17	0.63	0.42	0.28	1.89

Tabelle 5 Einzelwerte der Potentialmessungen

	Prüfkörper 1	Prüfkörper 2	Prüfkörper 3	Mittelwert	Standard- abweichung
[mV _{SHE}]					
Ref 1	81,8	104,3	81,0	89,0	10,8
Geo MK	159,6	142,4	150,3	150,8	7,0
Geo FA	101,9	126,3	106,9	111,7	10,5
AAS I	(-243,7)	-123,4	-172,1	-147,8*	24,4*
AAS II	-174,5	-158,3	-259,3	-197,4	44,3
				* ohne AAS I - 1	

Tabelle 6 Einzelwerte der Polarisationswiderstands-Messungen

	Prüfkörper 1	Prüfkörper 2	Prüfkörper 3	Mittelwert	Standard- abweichung
[kΩ·cm ²]					
Ref 1	1495	1250	999	1248	203
Geo MK	1523	1497	1324	1448	88
Geo FA	1026	1757	1458	1414	300
AAS I	(21)	1011	324	678*	332*
AAS II	29	26	18	24	5
				* ohne AAS I - 1	