

Auswirkungen unterschiedlicher Bindemittelkombinationen auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Dries Beyer¹, Michael Haist¹ und Ludger Lohaus¹

¹Leibniz Universität Hannover – Institut für Baustoffe, Hannover, Deutschland

KURZFASSUNG:

Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) führt nach wie vor zu einer Vielzahl von Schadensfällen in Deutschland. Somit zeigt sich, dass derzeitige Vermeidungsstrategien nicht ausreichend sind. Dies gilt insbesondere für den modernen Betonbau, der durch Mehrstoffsysteme mit stark unterschiedlichen Bindemittelzusammensetzungen und geringen w/z- bzw. w/b-Werten gekennzeichnet ist. Die Komplexität des AKR-Schädigungsprozesses sowie die große Bandbreite von Kompositzementen und Zusatzstoffen führen einerseits zu schadensverschärfenden Randbedingungen, z.B. infolge niedriger w/z-Werte. Andererseits können schadensvermeidende oder schadensreduzierende Einflüsse der Zusatzstoffe nicht adäquat ausgenutzt werden, weil sie in den aktuellen Regelwerken nicht berücksichtigt werden. Im vorliegenden Beitrag werden die Einflüsse unterschiedlicher Bindemittelkombinationen auf die resultierende OH⁻-Ionenkonzentration in der Porenlösung und die damit einhergehende Längenänderung – als Indikator für eine AKR-Schädigung – systematisch und quantitativ ermittelt und bewertet. Dabei soll das bislang nicht genutzte Potenzial der Zusatzstoffe und Kompositzemente im Hinblick auf eine Erhöhung des AKR-Widerstands aufgezeigt werden.

Keywords: Alkali-Kieselsäure-Reaktion, OH⁻-Ionen, Zusatzstoff, AKR-Schädigung, w/z-Wert

ABSTRACT:

The alkali-silica reaction (ASR) still leads to a large number of damage cases in Germany. This shows that current avoidance strategies are not sufficient. This applies in particular to modern concrete construction, which is characterised by multi-component systems with very different binder compositions and low w/c or w/b values. The complexity of the ASR damage process as well as the wide range of composite cements and additives lead on the one hand to damage aggravating boundary conditions, e.g. due to low w/c values. On the other hand, damage-preventing or damage-reducing influences of the additives cannot be adequately exploited because they are not taken into account in the current regulations. In this paper, the influences of different binder combinations on the resulting OH⁻ ion concentration in the pore solution and the resulting change in length - as an indicator for an ASR damage - are systematically and quantitatively determined and evaluated. The potential of the additives and composite cements, which has so far not been used, with regard to an increase of the ASR resistance, is to be shown.

Keywords: Alkali-silica reaction, OH⁻-ion, additives, AKR damage, w/c value

1 EINLEITUNG

Zu den großen Herausforderungen bei der Erstellung dauerhafter Betonbauwerke zählt die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR). Bei dieser Reaktion zwischen alkalireaktiver Gesteinskörnung und Alkalien aus der Porenlösung des Zementsteins entsteht ein stark hygroskopisches Alkali-Kieselsäure-Gel (AK-Gel), welches durch die Aufnahme von Wasser starke Volumenvergrößerungen erfährt. Infolgedessen werden Quelldrücke innerhalb des Betongefüges hervorgerufen, welche die Zugfestigkeit des Betons überschreiten können. Als typisches Schadensbild einer AKR sind netzartige Risse an der Oberfläche von Betonbauteilen zu finden, oftmals verbunden mit dem Austritt des AK-Gels, wie in Bild 1 zu erkennen ist. Sofern eine Sanierung derartiger Schäden überhaupt realisierbar ist, gestaltet sich diese sehr aufwendig. Bedingt durch die massive Reduktion der Festigkeit des Betons eines von schädigender AKR betroffenen Bauwerks ist oftmals ein Abriss und eine Neuerrichtung erforderlich. Erschwerend kommt hinzu, dass die schädigenden Reaktionen über Jahre hinweg ablaufen können, ohne dass die Schädigungen offensichtlich erkennbar werden (Schäfer 2001).

Das Schädigungspotential der Alkali-Kieselsäure-Reaktion ist maßgeblich von der Art und Menge der Gesteinskörnung, deren Reaktivität und Größe sowie der Verteilung im Betongefüge, dem alkalischen Milieu und einem ausreichenden Feuchtigkeitsangebot abhängig. Gesteinskörnung gilt als reaktiv hinsichtlich einer AKR, wenn das darin enthaltene SiO_2 in schlecht kristallisierter (gittergestört oder kryptokristallin) oder amorpher Form vorliegt (Schäfer 2004). Die Kristallstruktur der Gesteinskörnung ist für den Ablauf einer AKR relevant, da das amorphe oder schlecht kristallisierte SiO_2 leicht durch OH^- -Ionen aus der Porenlösung chemisch angegriffen und gelöst werden kann.

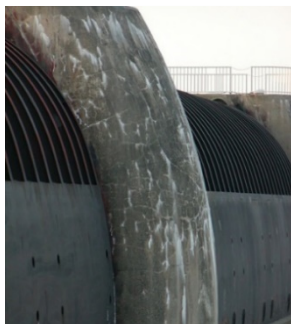


Bild 1: Schadensbild infolge AKR (Stark 2013)

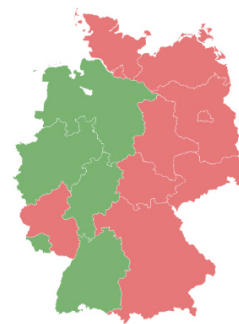


Bild 2: Bundesländer mit vermehrt auftretenden AKR-Schäden (rot) (Rieke 2017)

Seit den 1960er Jahren rückt der AKR-Schädigungsprozess auch in Deutschland zunehmend in den Fokus. Trotz weitestgehend geklärter chemischer Reaktionsabläufe und über die Jahre immer wieder verschärfter vorbeugender Maßnahmen zur Vermeidung kommt es nach wie vor zu erheblichen AKR-Schäden. Dabei treten vermehrte Schäden zunehmend in Regionen auf, in denen eine AKR aufgrund der dort verfügbaren, als nicht reaktiv eingestuften Gesteinskörnungen für ausgeschlossen gehalten wurde (Heinz 2007, Siebel 2006), vgl. Bild 2. Die zugrundgelegten Vermeidungsstrategien beruhen hauptsächlich auf einer Beurteilung der Gesteinskörnung und ihrer Einstufung hinsichtlich der Alkaliempfindlichkeit. Dabei werden jedoch Wechselwirkungen mit dem Bindemittel nur ansatzweise oder gar nicht berücksichtigt. Damit eine verbesserte Abschätzung des AKR-Widerstands vorgenommen werden kann, muss der komplexe chemische Schädigungsprozess, als Wechselwirkung zwischen reaktiver Gesteinskörnung, Bindemittel und einem ausreichenden Feuchteangebot, auch unter Berücksichtigung der betontechnologischen Entwicklungen hin zum Mehrstoffsystem mit vielen unterschiedlichen Bindemittelzusammensetzungen bei gleichzeitig geringen w/z- bzw. w/b-Werten, was sich durchaus schadensverschärfend auswirken kann, einbezogen werden. Derzeitige

Vermeidungsstrategien können dies nicht leisten und sind somit für den modernen Betonbau nicht mehr ausreichend. Eine Vielzahl von Kompositzementen und Zusatzstoffen werden in den aktuellen Regelwerken nicht berücksichtigt, obwohl von ihnen ein großes Potenzial zur Erhöhung des AKR-Widerstands zu erwarten ist. Der vorliegende Beitrag hat zum Ziel, die Auswirkungen von unterschiedlichen Bindemittelkombinationen auf eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion unter Berücksichtigung der Zusammenhänge OH⁻-Ionenkonzentration und Längenänderung – als Indikator für AKR-Schädigung – zu beschreiben und anhand von experimentellen Untersuchungen systematisch und quantitativ zu bewerten. Das Konzept geht davon aus, dass durch die Begrenzung des alkalischen Milieus (OH⁻-Ionenkonzentration in der Porenlösung), welches durch die chemische Zusammensetzung des Bindemittels maßgeblich beeinflusst wird, eine Erhöhung des AKR-Widerstands von Beton in ähnlicher Weise erreicht werden kann, wie durch Verwendung von na-Zementen und hüttensandhaltigen Zementen.

2 VERMEIDUNG EINER SCHÄDIGENDEN AKR

Es ist hinlänglich bekannt, dass drei Faktoren für den Ablauf einer schädigenden AKR notwendig sind:

1. das Vorhandensein alkalireaktiver Gesteinskörnung,
2. ein hoher Gehalt an Alkalihydroxiden und ein damit einhergehender hoher pH-Wert der Porenlösung (Alkalität der Porenlösung),
3. eine ausreichende Feuchte, um das Quellen des Gels zu ermöglichen.

Sobald einer dieser Faktoren eliminiert ist, wird eine schädigende AKR vermieden. Den Eintrag von Feuchtigkeit nachhaltig zu unterbinden, ist, wenn überhaupt möglich, oftmals mit aufwendigen Abdichtungsmaßnahmen verbunden. Daher beruhen derzeitige Ansätze zur Vermeidung einer betonschädigenden AKR neben der Einteilung in Feuchteklassen (Gefährdungsklassen) in der Regel auf der Verwendung von Zementen mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt oder auf der Verwendung von nicht-reaktiver Gesteinskörnung, vgl. Tab. 1.

Tabelle 1: Übersicht Vermeidungsstrategien mit Bezug zu den Feuchteklassen nach DAfStb-Richtlinie

Klasse	Zementgehalt [kg/m ³]	WO	WF	WA
E I, E I-O, E I-OF, E I-S	ohne Festlegung	keine		
E II-O	≤ 330	keine		na-Zement
E III-O		keine	na-Zement	Austausch GK
E II-OF	> 330	keine	na-Zement	
E III-OF		keine	na-Zement	Austausch GK
E III-S	≤ 300	keine		
	≤ 350	keine		na-Zement oder gS*
	> 350	keine	na-Zement oder gS*	Austausch GK oder gS*

* gutachterliche Stellungnahme

Bei genauerer Betrachtung der derzeit angewendeten Vermeidungsstrategien wird ersichtlich, dass zur Vermeidung einer AKR eine Limitierung des OH⁻-Ionenkonzentration über den Zementgehalt oder den Na₂O_{Aqu.} des Zements vorgenommen wird. Einflüsse aus dem w/z- bzw. w/b-Wertes, die eine erhebliche Relevanz auf das Ausmaß einer schädigenden AKR haben können (Böhm 2016, Schäfer 2004, Diamond 1981), werden nicht berücksichtigt. In der Norm DIN 1164-10, welche Grenzwerte für den maximalen wirksamen Alkaligehalt von reinen Portlandzementen und Zementen mit Hüttensand als Hauptbestandteil definiert, bleibt dieser Effekt gänzlich unbeachtet (Stark 2013).

Ebenso bleiben Einflüsse weiterer Zementarten sowie aus der zunehmenden Verwendung von Zusatzstoffen als Bindemittelbestandteil bislang unberücksichtigt. Hinsichtlich der Vermeidung einer AKR haben sich diese Stoffkomponenten jedoch als durchaus geeignet herausgestellt. Einerseits sind die positiven Effekte der Substitution auf eine Verringerung des Zementgehalts zurückzuführen, andererseits werden abhängig von der Art des Zusatzstoffes physikalische und chemische Effekte wirksam, welche die Porenlösungszusammensetzung beeinflussen. Der physikalische Effekt beruht hauptsächlich auf der geometrischen Beschaffenheit der Zusatzstoffpartikel, die die Packungsdichte erhöht und zu einem dichteren Porensystem beiträgt (Giebson 2013). Durch die höhere Dichtigkeit wird der Austausch und Transport von Ionen erschwert, wodurch die AKR abgeschwächt wird. In chemischer Hinsicht bewirkt ein Austausch von Zement mit Betonzusatzstoffen zunächst eine Verdünnung der Porenlösung, d. h. die Menge der aus dem Zement gelösten Alkaliionen und deren Konzentration in der Porenlösung wird um den Substitutionsanteil reduziert (Schäfer 2001). Zusätzlich zum Verdünnungseffekt wird die Zusammensetzung der Porenlösung durch die Alkalibindungs­kapazität des jeweiligen Zusatzstoffes reduziert. Die daraus resultierende Abnahme der OH⁻-Ionenkonzentration kann Bild 4 entnommen werden. Diese Effekte bleiben im Regelwerk DIN 1164-10 gänzlich unbeachtet (Stark 2013). Die Auswirkungen veränderter Bindemittel­zusammensetzungen durch die Verwendung reaktiver (puzzolanisch oder latent-hydraulisch) und inerte­ter Betonzusatzstoffe infolge fortschreitender betontechnologischer Entwicklungen sind somit grundsätzlich bekannt und bewirken oftmals eine Verminderung des Schädigungsausmaßes.

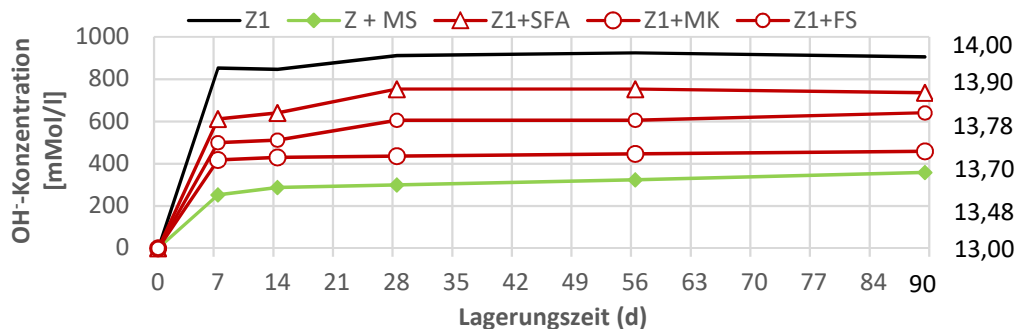


Bild 4: Einfluss der Zementsubstitution mit verschiedenen Zusatzstoffen auf die OH⁻-Ionenkonzentration der Porenlösung (Z1 = Zement (schwarz); MS = Mikrosilika (grün); MK, FS, SFA = aluminium/siliziumhaltige Zusatzstoffe (rot)) (Scholz 2016)

Systematische Untersuchungen über die AKR-vermeidenden Wirkungen der einzelnen Zusatzstoffe, die quantitative Aussagen zulassen, sind jedoch bisher kaum durchgeführt worden. Derzeit existieren daher weder hinreichend chemisch-physikalisch begründete Konzepte noch vereinfachte bautechnische Regelungen für die Verwendung von Zusatzstoffen zur Vermeidung einer schädigenden AKR. Unter Berücksichtigung der zuvor genannten Zusammenhänge zwischen Schädigung und OH⁻-Ionenkonzentration wird ersichtlich, dass die Auswahl des Bindemittels, aufgrund seiner charakteristischen chemischen Zusammensetzung, einen maßgeblichen Einfluss auf das Risiko einer schädigenden AKR haben. Aus diesem Grund gilt es zunächst, die Einflüsse aus unterschiedlichen Bindemittelkombinationen und w/z- bzw. w/b-Werten zu erfassen, sodass auf dieser Grundlage eine Prognose zum Auftreten einer schädigenden AKR vorgenommen werden kann und eine Erweiterung des bisherigen Konzepts zur Vermeidung einer AKR ermöglicht wird.

3 EINFLUSS DER PORENLÖSUNG AUF DAS SCHÄDIGUNGSMAß EINES AKR

Als Porenlösung wird das Wasser bezeichnet, welches nicht chemisch in den Hydratphasen gebunden ist, sondern im Porensystem des Zementsteins vorliegt. Die Porenlösung dient als Medium für die

Wechselwirkung verschiedener für die AKR relevanter Ionen (Na^+ , K^+ , OH^- , Ca^{2+}) aus den Ausgangsstoffen – hier insbesondere aus dem Bindemittel – mit den bereits gebildeten Hydratationsprodukten (Schäfer 2001). Die Zusammensetzung der Porenlösung wird maßgeblich vom zeitlichen Fortschritt der Hydratation und dem Alkaligehalt der Ausgangsstoffe beeinflusst. Mit fortschreitender Hydratation steigt die Konzentration an Alkalien (Na^+ , K^+) und Hydroxidionen (OH^-) stark an, wohingegen Calciumionen (Ca^{2+}) und Sulfationen (SO_4^{2-}) verbraucht werden. Bereits nach kurzer Zeit liegt das für Zementsteins typische stark alkalische Milieu vor, wobei die Porenlösung vor allem aus den Alkalihydroxiden NaOH und KOH sowie gelöstem Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) besteht. Die Alkalien entstammen in erster Linie dem Zement. Der Beitrag des Zementes an den Alkalien in der Porenlösung ist abhängig von der Menge des verwendeten Zements und dessen Alkaligehalt (Schäfer 2001). Dieser wird im Allgemeinen als Gesamtalkaligehalt in Form des Na_2O -Äquivalents ($\text{Na}_2\text{O}_{\text{äq}}$) angegeben. Bei höherem $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äq}}$ ist sowohl die Konzentration der Alkalien als auch die der OH^- -Ionen deutlich höher. Eine alleinige Abhängigkeit der OH^- -Ionenkonzentration vom $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äq}}$ kann jedoch nicht festgestellt werden (Gholizadeh-Vayghan 2017). Die Alkalität der Porenlösung kann trotz vergleichbarem $\text{Na}_2\text{O}_{\text{äq}}$ bei unterschiedlichen Zementen deutlich variieren (Gholizadeh-Vayghan 2016, Gholizadeh-Vayghan 2017). Dies lässt sich dadurch erklären, dass lediglich 60-80 % der im Zement vorhandenen Alkalien in Lösung gehen. Der Löseprozess, und somit die resultierende OH^- -Ionenkonzentration in der Porenlösung, ist darüber hinaus sehr stark vom Wasser-Zement- (w/z) bzw. Wasser-Bindemittel-Wert (w/b) abhängig. Neben der Beeinflussung des zeitlichen Ablaufs der Hydratation wird bei einer Erhöhung des w/z - bzw. w/b -Wertes der Porenraum im Zementstein vergrößert, wodurch der Austausch von Ionen und damit die Alkali-Kieselsäure-Reaktion beschleunigt wird. Aufgrund der mit steigendem w/z -Wert einhergehenden Verdünnung der Porenlösung (größerer Anteil an freiem Wasser) wird gleichzeitig die OH^- -Ionenkonzentration herabgesetzt, was vor allem hinsichtlich der puzzolanischen Reaktion reaktionshemmende Auswirkungen hat (Schäfer 2004). Zudem bewirkt die Verdünnung mengenmäßig eine geringere Bindung von Alkalien in Hydratationsprodukten (Böhm 2016, Gholizadeh-Vayghan 2016). Diesen Effekt bezeichnet man als Alkalibindungs-kapazität. Dafür spielt die Zusammensetzung der CSH-Phasen eine entscheidende Rolle. Je geringer das Calcium/Silicium-(Ca/Si)-Verhältnis der CSH-Phasen, desto höher ist deren Neigung, Alkalien aus der Porenlösung einzubinden. Die Verwendung von puzzolanischen und latent hydraulischen Zusatzstoffen bzw. Zementen mit silikatischen Hauptbestandteilen führt zur Reduktion des Ca/Si -Verhältnisses und wirkt sich dementsprechend reduzierend auf die Alkalität der Porenlösung aus (Giebson 2013). Die bei der Betrachtung maßgebende OH^- -Ionenkonzentration der Porenlösung liegt somit vor allem in Form von Alkalihydroxiden, aber auch als Calciumhydroxid ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) in gelöster und kristalliner Form vor. Je höher die OH^- -Ionenkonzentration, desto ausgeprägter verläuft die AKR. Aus dieser Reaktion resultiert ein AK-Gel, welches unter Wasseraufnahme bereits ab einer relativen Feuchtigkeit von ca. 60 % starke Quelleigenschaften aufweist (L'Hopital 2016). Das Risiko einer schädigenden AKR besteht demnach nicht nur bei Bauteilen, die direkter Feuchtigkeit ausgesetzt sind, sondern prinzipiell bei allen luftberührenden Bauteilen. Neben der Hygroskopizität des Gels ist auch dessen Komposition für das Aufbauen eines Quelldrucks von Relevanz, vor allem hinsichtlich der darin gebundenen Alkalien und Calciumionen (Ca^{2+}) (Thomas 2011).

4 VERSUCHSKONZEPTION

Ziel des vorliegenden Beitrags ist es, die Effekte von Bindemittelvariationen und unterschiedlichen w/z - bzw. w/b -Werten auf den AKR-Schädigungsprozess systematisch zu erfassen und zu bewerten. Diesbezüglich werden die in Tab. 2 aufgeführte Bindemittelzusammensetzungen hinsichtlich ihrer OH^-

-Ionenkonzentration anhand der Überstandslösung in Anlehnung an TGL 28 104/17 untersucht. Dabei werden Leimzusammensetzungen mit deutlich erhöhten w/b-Wert (> 1,0) hergestellt und die Überstandslösung (Blutwasser), die sich aufgrund der stark erhöhten Wasserzugabe bildet, nach 28 d entnommen und chemisch analysiert. Durch den Vergleich der ermittelten OH⁻-Ionenkonzentration kann zunächst eine Beurteilung der Bindemittelzusammensetzung vorgenommen werden. Ergänzend zu den Untersuchungen des alkalischen Milieus an den Leimzusammensetzungen wird die Längenänderung als Indikator für die AKR-Schädigung ermittelt. Dazu werden die Bindemittelzusammensetzungen (Tab. 3b) auf Mörtelproben mit konstanter Sieblinie und Leimmenge übertragen, vgl. Tab. 3a.

Tabelle 2: Bindemittelzusammensetzungen zur Ermittlung der OH⁻-Ionenkonzentration

	Ref. [M-%]	FA1 _{0,1} [M-%]	FA1 _{0,3} [M-%]	FA1 _{0,5} [M-%]	SI1 _{0,1} [M-%]	SI1 _{0,3} [M-%]	KS1 _{0,1} [M-%]	KS1 _{0,3} [M-%]	KS1 _{0,5} [M-%]
CEM I 32,5 N (1,3 M.-% Na ₂ O)	100	90	70	50	90	70	90	70	50
Flugasche	-	10	30	50	-	-	-	-	-
Silikastaub	-	-	-	-	10	30	-	-	-
Kalksteinmehl	-	-	-	-	-	-	10	30	50

Tabelle 3a: Mörtelzusammensetzungen

Mörtelzusammensetzung [g/dm ³]	
Bindemittel	775
GK 4/2	170
2/1	425
1/0,5	425
0,5/0,25	425
0,25/0,125	255
Wasser	365
Fließmittel	*

* FM-Konzentration variiert bei konstantem Ausbreitmaß

Tab. 3b: Bindemittelzusammensetzung Mörteluntersuchungen

Bindemittelzusammensetzung		
Zement	Betonzusatzstoff	Substitutionsanteil [M.-% v.Z.]
CEM I 32,5	-	-
CEM I 32,5	6x FA*	10 / 30 / 50
CEM I 32,5	2x SI*	10 / 30
CEM I 32,5	2x KSM*	10 / 30 / 50

* Erste Kennziffer gibt die Anzahl an verwendeten Stoffen an

Um eine aussagekräftige Beurteilung der Bindemittelzusammensetzung zu ermöglichen, gilt es, reproduzierbare Prüfbedingungen bei einem größtmöglichen AKR-Schädigungspotenzial in einem akzeptablen Prüfzeitraum sicherzustellen. Dies konnte durch eine Modifikation des „Schnellprüfverfahrens“ nach DAfStb-Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton“ erreicht werden. Das Verfahren weist bereits durch die Beaufschlagung der Prüfkörper mit 1,0 mol/l NaOH-Prüflösung sowie Prüftemperaturen von 80°C extrem AKR-förderliche Umgebungsbedingungen auf. Darüber hinaus ist die erhöhte Temperatur für den Hydratationsprozess der Bindemittelvariationen wichtig, insbesondere bei der Verwendung von Flugasche, um die vom Zusatzstoff ausgehenden Effekte auf die Hydratation möglichst voll umfänglich trotz der stark zeitgerafften Prüfmethode zu berücksichtigen. Dieses Vorgehen hat sich bereits bei vorangegangenen Arbeiten bewährt (Böhm 2016). Ein maßgebender Unterschied zum DAfStb-Schnellprüfverfahren besteht in der Anpassung der Gesteinskörnung. Um eine reproduzierbare größtmögliche Reaktivität der

GK zu erzielen, wurde als hochreaktive synthetische Gesteinskörnung Borosilikatglas (BSGL) verwendet, welches bereits in vorangegangenen Arbeiten als geeignet identifiziert worden war (Ott 2008). Unter diesen Prüfbedingungen konnte bei einer Prüfzeit von 14d eine durchschnittliche Erhöhung der Längenänderung von bis zu 88 % gegenüber natürlichen reaktiven Gesteinskörnungen erreicht werden.

5 AUSWIRKUNG DER BINDEMittelZUSAMMENSETZUNG AUF EINE AKR-SCHÄDIGUNG

5.1 Einfluss variierender Bindemittelkombinationen auf die OH⁻-Ionenkonzentration

In Bild 5 sind die Auswirkungen des Substitutionsanteils auf die gemessene und auf einen w/b-Wert von 0,47 bezogene OH⁻-Ionenkonzentration nach 28 Tagen dargestellt. Dabei wird die OH⁻-Ionenkonzentration über den Zementsubstitutionsgrad aufgetragen. Grundsätzlich ist festzuhalten, dass eine Zementsubstitution zu einer Absenkung der OH⁻-Ionenkonzentration führt. Je umfangreicher Zementanteile gegen Zusatzstoffe ausgetauscht werden, desto stärker ist die Absenkung ausgeprägt.

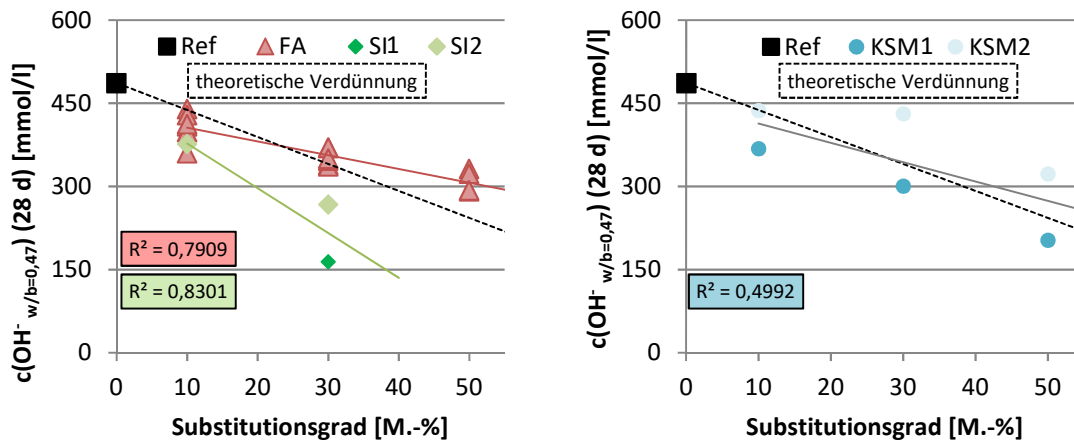


Bild 5: Auswirkungen der Zementsubstitution mittels puzzolanischer Zusatzstoffe (links) und inertem Kalksteinmehl (rechts) auf die OH⁻-Ionenkonzentration

Bei Betrachtung der untersuchten Flugaschen (FA - rot) sind geringfügige Streuungen in der Reduktion der OH⁻-Konzentration festzustellen. Diese konnten jedoch nicht spezifisch auf deren chemische Zusammensetzung zurückgeführt werden. Vielmehr ist hier von einer Überlagerung der Effekte aus chemischer Zusammensetzung und spezifischer Oberfläche auszugehen. Das grundsätzliche Verhalten der Flugaschen lässt sich mit einer linearen Korrelation beschreiben (rote Linie). Anhand dieser konnte nach einer Hydrationsdauer von 28 Tagen bei einem Substitutionsgrad von 10 % eine geringere OH⁻-Ionenkonzentration als die theoretische Verdünnung festgestellt werden, wohingegen bei einem Substitutionsgrad von 30 % und 50 % eine leicht höhere Konzentration ermittelt wurde. Eine mögliche Erklärung könnten die in der Flugasche enthaltenen Alkalien sein, die mit zunehmendem Zementaustausch nicht mehr vollumfänglich durch die Alkalibindungs Kapazität kompensiert werden können. Für die silikastaubhaltigen Zusammensetzungen (SI - grün) lässt sich dagegen festhalten, dass mit steigendem Substitutionsgrad eine über die theoretische Verdünnung hinausgehende Reduktion der OH⁻-Konzentration zu erkennen ist. Silikastaub reagiert aufgrund der großen Reaktionsoberfläche und der amorphen kristallinen Struktur sehr schnell. Es ist somit davon auszugehen, dass die puzzolanische Reaktion aufgrund der höheren Reaktivität bereits weiter fortgeschritten ist und dementsprechend auch die reduzierende Wirkung auf die OH⁻-Ionenkonzentration ausgeprägter und früher als bei den flugaschehaltigen Bindemittelzusammensetzungen eintritt. Dabei zeigte sich, dass mit steigendem

Anteil an reaktionsfähigem SiO_2 die Effektivität von Silikastaub zunahm, vergleiche Bild 5 – Silikastaub *SI1* mit 96 % SiO_2 gegenüber *SI2* mit ca. 85 % SiO_2 .

Kalksteinmehl (KSM – grau) gilt als inerte Zusatzstoff, nimmt also nicht aktiv am Hydratationsprozess teil, weshalb hierbei zunächst von einer rein verdünnenden Wirkung auf die OH^- -Ionenkonzentration ausgegangen wird. Bild 5 (rechts) zeigt die Auswirkungen des Substitutionsanteils auf die gemessenen und auf einen w/b-Wert von 0,47 bezogenen OH^- -Ionenkonzentrationen nach 28 Tagen. Die Substitution mit Kalksteinmehl verringert zunächst den Portlandzementgehalt, wodurch auch der wirksame Alkaligehalt reduziert wird. Dementsprechend liegen in der Porenlösung weniger Alkalien vor. Bei genauerer Betrachtung ist zu erkennen, dass nach 28 Tagen ein Unterschied in der Konzentration in Abhängigkeit der Art des Kalksteinmehls festgestellt werden kann. Die Substitution mit dem feineren und CaCO_3 -reicheren Kalksteinmehl *KSM2* bewirkt dabei eine Konzentration, welche höher ist als die theoretische Verdünnung, während das Kalksteinmehl *KSM1* eine Reduktion über die theoretische Verdünnung hinaus bewirkt. Eine mögliche Erklärung für das unterschiedliche Verhalten der Kalksteinmehle ist der Keimbildungseffekt. Dabei dient die Oberfläche von Kalksteinmehlparkeln als Wachstumsfläche für die Hydratationsprodukte des Portlandzementes, wodurch deren Bildung angeregt wird. Bei diesen Reaktionsprodukten handelt es sich hauptsächlich um $\text{Ca}(\text{OH})_2$ und CSH-Phasen, was durch eine deutliche Erhöhung der Ca^{2+} -Konzentration in der Porenlösung begleitet wird. Die Wirkungsweise des Keimbildungseffektes wird maßgeblich vom Zetapotential und der spezifischen Oberfläche der Zusatzstoffpartikel beeinflusst (Krauss 2013). Diese Wirkung fällt mit höherer Reinheit, d. h. höherem CaCO_3 -Gehalt stärker aus. Es ist davon auszugehen, dass *KSM2* die besseren Keimbildungseigenschaften aufweist. Daraus resultiert ein gegenüber dem Kalksteinmehl *KSM1* höherer Hydratationsgrad zu diesem Zeitpunkt. Hierdurch wiederum liegt im Zementstein, aufgrund des größeren Anteils an chemisch gebundenem Wasser, weniger freies Wasser bei einer gleichzeitig größeren Menge an gelösten Alkalien vor, sodass die OH^- -Konzentration vergleichsweise höher ist. Darüber hinaus haben eigene Untersuchungen gezeigt, dass durch die Verwendung von kalksteinmehlhaltigen Bindemittelzusammensetzungen ein deutlicher Anstieg des Portlanditeils / Calciumhydroxids ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) im Zementstein eintritt, wodurch die zuvor beschriebenen Zusammenhänge bestätigt werden können, vgl. Bild 6.

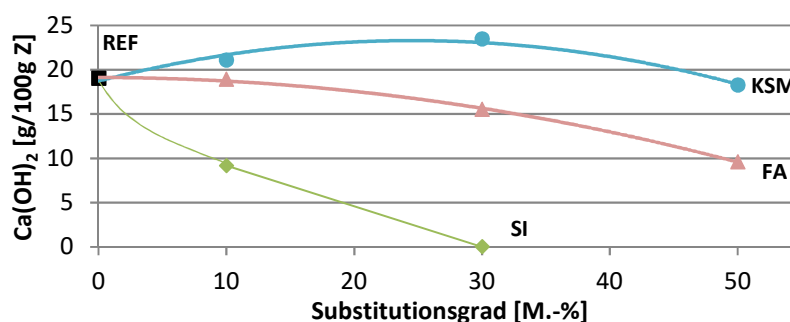


Bild 6: Auswirkungen der Zementsubstitution mittels puzzolanischer Zusatzstoffe und inertem Kalksteinmehl auf den Anteil $\text{Ca}(\text{OH})_2$ am Zementstein

5.2 Einfluss des w/z- bzw. w/b-Wertes auf die OH^- -Ionenkonzentration

Zur Beschreibung des Einflusses aus w/z- bzw. w/b-Wert wird in der Literatur ein linearer Zusammenhang zwischen OH^- -Ionenkonzentration und freiem Wasser zugrunde gelegt (Böhm 2016 Schäfer 2004 Diamond 1981). Eigene Untersuchungen zeigen, dass eine lineare Berücksichtigung des w/z- bzw. w/b-Wertes mit den zuvor beschriebenen Auswirkungen (freies Wasser, Verdünnung bzw. Erhöhung der Ionenkonzentration der Porenlösung, Alkalibindungskapazität der Hydratationsprodukte)

auf die OH⁻-Ionenkonzentration einer starken Vereinfachung entspricht. Erschwerend kommt hinzu, dass in Abhängigkeit von der Hydratationsdauer sowie der Art und dem Substitutionsgrad des verwendeten Zusatzstoffes der Hydratationsgrad und damit der Anteil an chemisch gebundenem Wasser variiert (Bild 7). Aus diesem Grund ist eine Anpassung der bisherigen von Schäfer (2004) getroffenen linearen Annahme von 0,2 g chemisch gebundenen Wassers pro Gramm Feststoff vorgenommen worden.

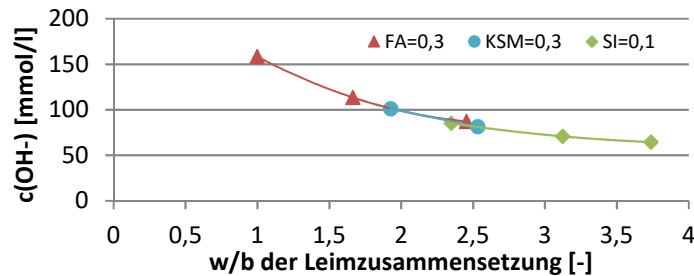


Bild 7: Einfluss des Wassers-Bindemittels-Verhältnisses auf die OH⁻-Ionenkonzentration bei ansonsten identischer Leimzusammensetzung unter Verwendung variierender Bindemittelzusammensetzung

Hierzu sind die Anteile an chemisch und physikalisch gebundenem Wasser entsprechend Adam (2006) ermittelt worden. So konnten auf Basis von Schäfer (2004) nachfolgende Zusammenhänge zur Bestimmung der OH⁻-Ionenkonzentration bestimmt werden:

$$OH^-_{neu} [mmol/l] = OH^-_{akt.} \cdot \frac{w_f}{w/b_{neu} - (w/b_{akt.} - w_f)} \quad (1)$$

mit $OH_{akt.}$ Ausgangswert OH⁻-Ionenkonzentration
 OH_{neu} angepasste OH⁻-Ionenkonzentration
 w/b_{neu} Zielwert w/b
 $w/b_{akt.}$ Ausgangswert w/b

$w_f = 0,189$ (28d)	$w_f = 0,191$ (56d)	bei $w/b < 1,0$
$w_f = 0,177$ (28d)	$w_f = 0,185$ (56d)	bei $1,0 < w/b < 1,5$
$w_f = 0,170$ (28d)	$w_f = 0,177$ (56d)	bei $1,5 < w/b < 2,0$
$w_f = 0,161$ (28d)	$w_f = 0,167$ (56d)	bei $2,0 < w/b < 3,0$

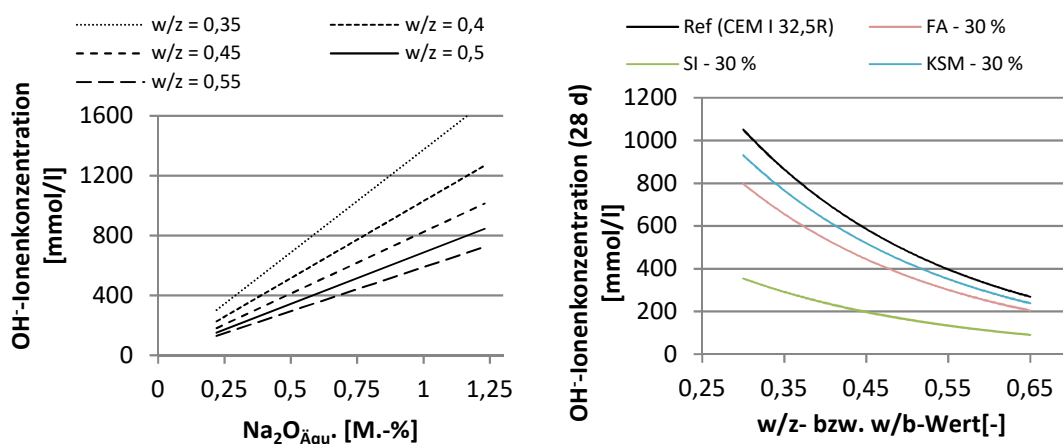


Bild 8: Einfluss variierender w/z- bzw. w/b-Werte auf die OH⁻-Ionenkonzentration über den Na₂O_{Äqu.} von CEM I (links), Einfluss variierender w/z- bzw. w/b-Werte verschiedener Bindemittelzusammensetzungen auf die OH⁻-Ionenkonzentration (rechts)

Bei w/b-Werten von bis zu 1,0 konnte ein linearer Zusammenhang zwischen OH⁻-Konzentration und w/b-Wert – wie in Schäfer (2004) beschrieben – bestätigt werden. Eigene Untersuchungen haben jedoch

zeigt, dass eine Anpassung des Anteils an chem. gebundenem Wasser von 0,2 g auf 0,189 g (28d) chemisch gebundenen Wassers pro Gramm Feststoff eine genauere Bestimmung der OH-Ionenkonzentration ermöglicht (vgl. Gleichung 1). Übersteigt der w/b-Wert die Größenordnung von 1,0 – insbesondere bei der Analyse der Überstandslösung maßgebend – gehen mit steigendem Anteil an freiem Wasser deutlich mehr Ionen (v.a. Natrium, Kalium und Calcium) in Lösung. Dieser Effekt sowie die Auswirkungen des Hydratationsgrads werden in der o.g. Gleichung (1) berücksichtigt. Somit lassen sich nachfolgende Zusammenhänge für unterschiedliche w/z- bzw. w/b-Werte in Bild 8 (links) festhalten. Bei gleichbleibendem $\text{Na}_2\text{O}_{\text{Äqu.}}$ des Bindemittels nimmt die OH-Ionenkonzentration mit abnehmendem w/z- bzw. w/b-Wert deutlich zu. Aus Bild 8 (rechts) geht ebenfalls hervor, dass eine deutliche Steigerung der OH-Ionenkonzentration bei abnehmendem Wassergehalt umso ausgeprägter eintritt, je intensiver die verwendete Bindemittelzusammensetzung eine hohe Verfügbarkeit an Natrium-, Kalium- und Calciumhydroxid ermöglicht (Bild 8 rechts).

5.3 Einfluss unterschiedlicher Bindemittelkombinationen auf die Längenänderung

Die Auswirkungen des Substitutionsanteils auf die gemessene Längenänderung nach 14 Tagen sind in Bild 9 aufgeführt. Dabei wurde die Längenänderung über den Zementsubstitutionsgrad aufgetragen. Flugasche wird wegen der puzzolanischen Reaktion unter Verbrauch von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ sowie der erhöhten Bindungskapazität der CSH-Phasen in der Literatur (Böhm 2016, Heinz 2007) zumeist eine AKR-reduzierende Wirkung beigemessen. Bild 9 zeigt die Dehnungen der flugaschehaltigen Mörtel bezogen auf die der Referenzzusammensetzung. Es wird ersichtlich, dass die Verwendung von Flugasche (FA – rot) bezogen auf den jeweiligen Substitutionsanteil eine deutliche Reduktion der Längenänderung hervorruft. Mit zunehmendem Substitutionsanteil wird eine höhere Reduktion der Dehnung erreicht. Anhand der Regressionsgeraden über die verschiedenen Substitutionsanteile wird ebenfalls deutlich, dass die Effizienz bei Flugasche mit zunehmendem Substitutionsanteil leicht abnimmt und sich nahezu parallel zur theoretisch zu erwartenden Verdünnung (gestrichelt schwarz) verhält.

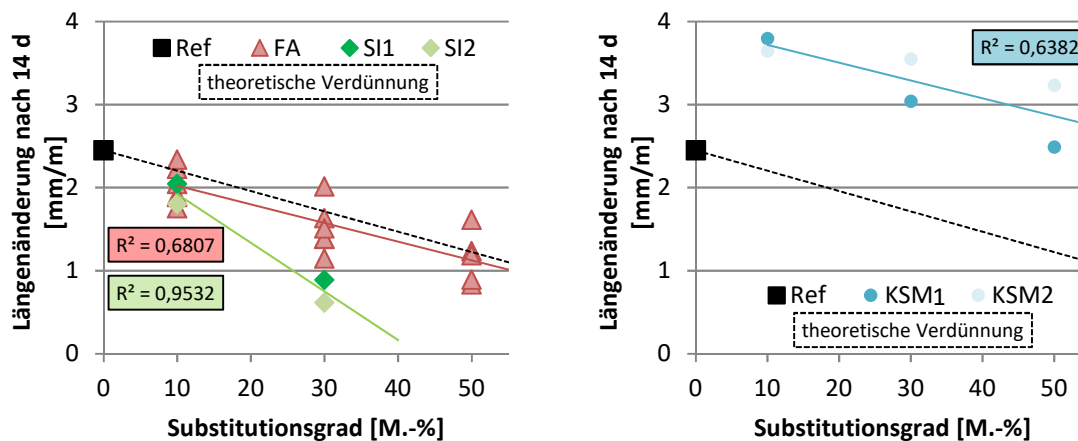


Bild 9: Auswirkungen der Zementsubstitution mittels puzzolanischer Zusatzstoffe (links) und inertem Kalksteinmehl (rechts) auf die Längenänderungen infolge AK-Gelbildung

Ebenso wie Flugasche reagiert auch Silikastaub (SI – grün) puzzolanisch unter Verbrauch von $\text{Ca}(\text{OH})_2$. Die chemische Zusammensetzung der Ausgangsstoffe begünstigt hierbei die Bildung von CSH-Phasen mit besonders stark ausgeprägter Alkalibindungskapazität (Schäfer 2004, Giebson 2013), wodurch die Dehnungen infolge AKR wesentlich stärker abgemindert werden. Die Untersuchungsergebnisse bestätigen dies, wie aus Bild 9 hervorgeht. Alle Bindemittelzusammensetzungen mit Silikastaub haben zu einer starken Reduktion der Längenänderung gegenüber der Referenzzusammensetzung geführt. Die

Mahlfeinheit kann bei der Beurteilung vernachlässigt werden (Scholz 2016), da die Silikastaubpartikel eine so geringe Größe aufweisen, dass sie komplett reagieren. Aufgrund dessen kann bei einem ausreichenden Angebot an Silikastaub der Anteil an kristallinem $\text{Ca}(\text{OH})_2$ am Zementstein nahezu vollständig reduziert werden, siehe Bild 6. Kalksteinmehl (KSM – grau) wird aufgrund seines inerten Verhaltens in der Literatur eine dehnungsreduzierende Wirkung zugeschrieben. Die experimentellen Untersuchungen mit dem in diesem Beitrag vorgestellten mod. Prüfverfahren bestätigen dies nur teilweise. Bild 9 (rechts) zeigt, dass unabhängig vom verwendeten Kalksteinmehl und dem Substitutionsanteil zunächst eine Erhöhung der Längenänderung gegenüber der Referenzzusammensetzung zu verzeichnen ist. Nichts desto trotz wird mit zunehmender Substitution eine Abnahme der Längenänderung erreicht. Bei einer Substitution von 50 % entspricht die Längenänderung in etwa der der Referenzzusammensetzung. Bei geringem Austausch mit Kalksteinmehl (10 %) sind die Auswirkungen verschiedener Kalksteinmehle auf die Längenänderungen noch vergleichbar. Mit höherem Substitutionsanteil ist die Reduktion der Längenänderung bei Verwendung von feinerem Kalksteinmehl *KSM2* geringer ausgeprägt, während beim größeren Kalksteinmehl *KSM1* eine stärkere Reduktion der Längenänderung erreicht wird. Als Erklärungsansatz für die dehnungsfördernde Wirkung von Kalksteinmehl lässt sich der Einfluss der spezifischen Oberfläche – respektive des Keimbildungseffekts – heranziehen. Demnach steht durch den beschleunigten Ablauf der Hydratation vergleichsweise mehr $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zur Verfügung, vergleiche Bild 6. Das darin vorhandene Calcium setzt durch Austausch mit den im AK-Gel gebundenen Alkalien erneut Natrium und Kalium frei. Es bilden sich Alkalihydroxide in der Porenlösung, wodurch die AKR wie in einem Kreislauf weiter vorangetrieben wird. Darüber hinaus wird in Scholz (2016) die These aufgestellt, dass das Verhältnis von $\text{Ca}(\text{OH})_2$ zu CSH-Phasen infolge des Keimbildungseffektes negativ beeinflusst werden könnte. Das Ca/Si-Verhältnis der CSH-Phasen und damit deren Alkalibindungs Kapazität könnten deutlich herabgesetzt und das Schädigungspotenzial deutlich heraufgesetzt werden. Diese These ist nicht abschließend verifiziert, wird jedoch grundsätzlich anhand der ermittelten Längenänderungen gestützt (Bild 9, rechts). Der Einfluss von einem erhöhten Anteil an $\text{Ca}(\text{OH})_2$ auf eine größere Längenänderung wird ebenfalls in Bild 10 (links). Ob dieser Ansatz ausreicht, die deutliche Zunahme der Längenänderung trotz erheblicher Absenkung der OH-Ionenkonzentration (vgl. Bild 10, rechts) vollumfänglich zu beschreiben, oder inwiefern möglicherweise eine Kombination aus einer größeren Menge an stark quellfähigem AK-Gel und geschwächter Zementsteinmatrix zu einer stärker ausgeprägten Längenänderung führen, muss noch gesondert betrachtet werden.

Abschließend kann bei der Gegenüberstellung der OH-Ionenkonzentrationen sowie der zugehörigen Längenänderungen der unterschiedlichen Bindemittelzusammensetzungen ein linearer Zusammenhang ermittelt werden, welcher sich für die jeweiligen Stoffgruppen, in jeden Fall aber für den jeweiligen Typ des Zusatzstoffes (puzzolanisch, inert), ergibt (Bild 10, rechts).

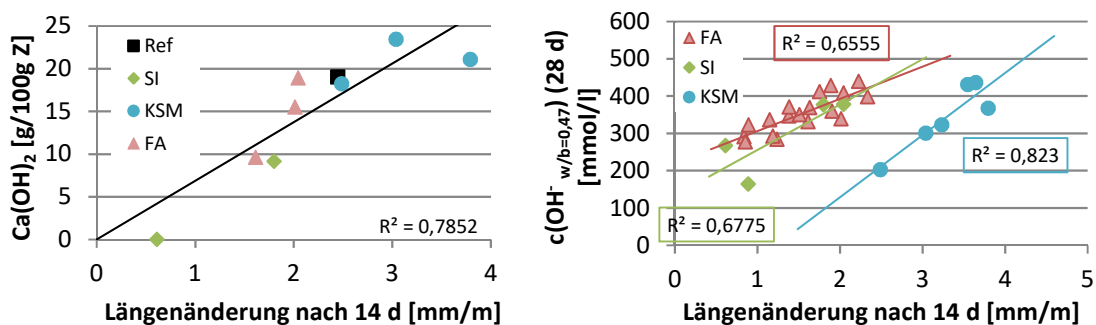


Bild 10: Gegenüberstellung Anteil $\text{Ca}(\text{OH})_2$ am Zementstein und ermittelte Längenänderung (links); Gegenüberstellung der ermittelten OH-Ionenkonzentrationen mit zugehörigen Längenänderungen (rechts)

6 SCHLUSSFOLGERUNGEN

Im vorliegenden Beitrag wurden zunächst die Auswirkungen von unterschiedlichen Bindemittelzusammensetzungen sowie der Einfluss des w/z- bzw. w/b-Wertes auf die OH⁻-Ionenkonzentration in der Porenlösung vorgestellt. Dabei kann durch die Substitution des Zements mittels Betonzusatzstoffen grundsätzlich eine Abminderung der OH⁻-Ionenkonzentration erreicht werden. Bei dem inerten Zusatzstoff Kalksteinmehl wird in erster Linie eine Verdünnung der OH⁻-Ionenkonzentration erreicht, da zum einen weniger Alkalien durch die Reduktion des Zementgehalts vorliegen, zum anderen ein größerer Anteil an Ca(OH)₂ in kristalliner Form vorliegt. Bei den puzzolanisch wirkenden Stoffen wie Flugasche und Silikastaub wird die Abminderung neben dem Verdünnungseffekt durch ihre Beteiligung an der Hydratation und der daraus resultierenden Alkalibindungskapazität erzielt. Im Rahmen der vorgenommenen Untersuchungen konnte der größtmögliche Abminderungseffekt bei einer 30 % igen Substitution des Zements durch Silikastaub mit einem möglichst hohen SiO₂-Gehalt erreicht werden.

Im Weiteren konnte der Einfluss des w/z- bzw. w/b-Wertes auf die OH⁻-Ionenkonzentration bekräftigt werden. Mit abnehmenden Wassergehalt im Leim steigt die OH⁻-Ionenkonzentration deutlich an. Daraus kann je nach w/z- bzw. w/b-Wert bei ansonsten identischer Bindemittelzusammensetzung eine Erhöhung der OH⁻-Ionenkonzentration um den Faktor 4 resultieren.

Die Ergebnisse aus den Untersuchungen zur Längenänderung decken sich nur teilweise mit zuvor identifizierten Auswirkungen der Bindemittelzusammensetzungen auf die OH⁻-Ionenkonzentrationen. Bei der Gegenüberstellung von OH⁻-Ionenkonzentration und den ermittelten Längenänderungen lässt sich grundsätzlich eine lineare Abhängigkeit feststellen. Diese ist jedoch stoffspezifisch, zumindest aber vom Reaktionstyp des Zusatzstoffes abhängig (puzzolanisch, inert), einzuordnen. Insbesondere ist bei Verwendung von Kalksteinmehl eine deutliche Abweichung der auftretenden Längenänderungen im Verhältnis zu zuvor ermittelten OH⁻-Ionenkonzentrationen festgestellt worden. Hierbei wird deutlich, dass neben den chemischen Einflussgrößen ebenfalls die physikalischen Einflussgrößen (Festigkeitseigenschaften, Dichte, etc.) einen Einfluss auf den Schädigungsverlauf und das Schädigungsausmaß einer AKR haben.

Gestützt werden die zuvor beschriebenen Erkenntnisse durch ergänzende Untersuchungen zur Bestimmung des Anteils an kristallinem Ca(OH)₂ im Zementstein. Neben der Bestätigung der Auswirkungen des Keimbildungseffektes auf eine Zunahme des Anteils an kristallinem Ca(OH)₂ kann insbesondere ein linearer Zusammenhang zwischen diesem und der auftretenden Längenänderung abgeleitet werden. Dies erscheint zunächst sinnvoll, wenn von der These ausgegangen werden kann, dass ein hoher Anteil an Ca²⁺-Ionen in der Porenlösung die Bildung von besonders quellfähigem AK-Gel begünstigt.

Die Untersuchungen haben gezeigt, dass der Berücksichtigung unterschiedlicher Bindemittelkombinationen sowie deren w/z- bzw. w/b-Wert bei der Vermeidung einer schädigenden AKR eine große Relevanz beigemessen werden kann. Dabei wird ersichtlich, dass ein großes Potenzial zur Erhöhung des AKR-Widerstands allein durch eine gezielte Anpassung der Bindemittelzusammensetzung vorhanden ist. Inwiefern die gewonnenen Erkenntnisse es erlauben, bisherige Vermeidungsstrategien zu erweitern oder sogar eine Prognose über eine zu erwartende Schädigung infolge AKR vorzunehmen, muss in weiterführenden Arbeiten genauer beleuchtet werden.

LITERATUR

- Adam, T. (2006): Ein Modell zur Beschreibung der Hydratation von Beton in Abhängigkeit vom Feuchtegehalt (Dissertation), Darmstadt.
- Böhm, M. (2016): Beitrag von Steinkohlenflugasche in Zement zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion (Dissertation), Clausthal.
- Böhm, M. & Baetzner, S. (2007): Die Auswirkungen der Alkalität der Porenlösung auf eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion, in AiF-Vorhaben-Nr.: 14242 N, Abschlussbericht Verein Deutscher Zementwerke e.V.
- Diamond, S. (1981): Effects of two danish flyashes on alkali contents of pore solutions of cement-flyash pastes, in *Cement and Concrete Research* Vol. 11, Oxford, Pergamon Press Ltd., pp. 383-394.
- Gholizadeh-Vayghan, A. & Rajabipour, F. (2017): The influence of alkali-silica reaction (ASR) gel composition on its hydrophilic properties and free swelling in contact with water vapor, in *Cement and Concrete Research* 94, Oxford, Elsevier Ltd., 2017, pp. 49-58.
- Gholizadeh Vayghan, A., Rajabipour, F. & Rosenberger, J. L. (2016): Composition-rheology relationships in alkali-silica reaction gels and the impact on the gel's deleterious behaviour, in *Cement and Concrete Research* 83, Oxford, Elsevier Ltd., pp. 45-56.
- Giebson, C. (2013): Die Alkali-Kieselsäure-Reaktion in Beton für Fahrbahndecken Flugbetriebsflächen unter Einwirkung alkalihaltiger Enteisungsmittel (Dissertation), Weimar.
- Heinz, D., Schmidt, K. & Urbonas, L. (2007): Vermeidung von schädigender AKR durch Steinkohlenflugasche, in *Beton- und Stahlbetonbau* 102, Heft 8, Berlin, Ernst & Sohn Verlag, pp. 511-520.
- Krauss, H.-W. (2013): Zur Auswirkung hochfeiner inerter Zusatzstoffe auf die Hydratationskinetik und die Mikrostruktur von Zementstein (Dissertation), Braunschweig.
- L'Hôpital, E., Lothenbach, B., Scrivener, K. & Kulik, D. (2016): Alkali uptake in calcium alumina silicate hydrate (C-A-S-H), in *Cement and Concrete Research* 85, Oxford, Elsevier Ltd., pp. 122-136.
- Ott, C. (2008): Entwicklung einer Referenzkörnung für die Alkali-Kieselsäure-Reaktion (Dissertation), Clausthal.
- Rieke, C. (2017): Autobahnen als Millionengräber – Betonkrebs frisst Steuergelder, auf Website: <https://www.n-tv.de/wirtschaft/Betonkrebs-frisst-Steuergelder-auf-article19912778.html>, zuletzt aufgerufen: 09.10.2019.
- Schäfer, E. & Meng, B. (2001): Einfluss von Zement und Zusatzstoffen auf das Alkaliangebot für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion, in *beton* 10/2001, Düsseldorf, Verlag Bau+Technik GmbH, pp. 145-155.
- Schäfer, E. (2004): Einfluss der Reaktionen verschiedener Zementhauptbestandteile auf den Alkalihaushalt der Porenlösung des Zementsteins (Dissertation), Clausthal.
- Scholz, Y. (2016): Dauerhaftigkeit von Beton - Wirkungsweisen von Betonzusatzstoffen zur Vermeidung einer AKR (Dissertation), Cottbus.
- Siebel, E. et al. (2006): AKR-Prüfverfahren - Vergleichbarkeit und Praxis-Relevanz, Teil 1 und Teil 2, Düsseldorf: Betontechnische Berichte, Forschungsinstitut der Zementindustrie.
- Stark, J. & Wicht, B. (2013): Alkali-Kieselsäure-Reaktion, in *Dauerhaftigkeit von Beton* (2. Auflage), Berlin, Springer Vieweg, pp. 299-398.
- Thomas, M. (2017): The effect of supplementary cementing materials on alkali-silica reaction: A review, in *Cement and Concrete Research* 41, Oxford, Elsevier Ltd., pp. 1224-1231.