Zeitschrift: Cementbulletin

Herausgeber: Technische Forschung und Beratung für Zement und Beton (TFB AG)

Band: 68 (2000)

Heft: 5

Artikel: Alkali-Aggregat-Reaktionen (Teil 1)

Autor: Merz, Christine / Hammerschlag, Jean-Gabriel

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-153860

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 10.12.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

Alkali-Aggregat-Reaktionen (Teil 1)

Bei Alkali-Aggregat-Reaktionen (AAR) reagiert die Porenlösung eines Betons mit Zuschlagkörnern, was zu Treiberscheinungen und Rissen führen kann. Mit geeigneten Massnahmen lässt sich dies verhindern.

Die erste umfassende Beschreibung von Schäden durch Alkali-Aggregat-Reaktionen (AAR) erschien 1940 in den USA. Seither wurden in verschiedenen Gebieten ähnliche Beobachtungen gemacht, beispielsweise in Island, Dänemark, England, Frankreich und Deutschland. Andere Länder, darunter auch die Schweiz, blieben bisher weitgehend von derartigen Schäden verschont.

Schwerpunkt des vorliegenden Artikels über AAR sind mehr allgemeine Aspekte. In einer späteren «Cementbulletin»-Ausgabe werden Möglichkeiten zur Verhinderung dieser Reaktionen beschrieben werden.

Allgemeines

Alkali-Aggregat-Reaktionen (AAR) lassen sich in drei Arten unterteilen:

- Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR)
- Alkali-Silikat-Reaktionen (ASR)
- Alkali-Karbonat-Reaktionen.

Alkali-Kieselsäure- und Alkali-Silikat-Reaktionen verlaufen ähnlich; der Hauptunterschied liegt in der Reaktionsgeschwindigkeit: Alkali-Kieselsäure-Reaktionen sind schneller. Allen drei Reaktionsarten gemeinsam ist die Reaktion der Porenlösung eines Betons mit bestimmten Zuschlagkörnern, die zu Treiberscheinungen führt, die wiederum Risse zur Folge haben können. Im Folgenden werden unter Alkali-Aggregat-Reaktionen (AAR) sowohl AKR als auch ASR verstanden; auf die seltener beobachteten Alkali-Karbonat-Reaktionen wird nur punktuell eingegangen. Reaktionsmechanismen werden im Kasten «Theorien zu AAR-Reaktionen» beschrieben.

Einflussfaktoren für Alkali-Aggregat-Reaktionen

AAR werden durch viele Faktoren in sehr unterschiedlicher Weise beeinflusst. Deshalb sind auch keine Rezepte zur Verhinderung von AAR bekannt, die überall und unter allen Bedingungen gelten.

Entscheidend für das Auftreten von AAR sind die Umgebungsbedingungen. Wichtig sind zudem:

- Gehalt, Art und Korndurchmesser der reaktiven Zuschläge
- Alkaligehalt des Betons und Zusammensetzung der Porenlösung
- Betoneigenschaften.

Umgebungsbedingungen Zu berücksichtigen sind vor allem drei Faktoren:

 Ein hoher Feuchtigkeitsgehalt ermöglicht erst die AAR und erleichtert den Transport der Alkalien zu den reaktiven Phasen. Die Treiberscheinungen werden hauptsächlich durch die Wasseraufnahme der Kieselgele hervorgerufen.

- Eine Erhöhung der Temperatur beschleunigt die Reaktion erheblich. In Laborversuchen ergab eine Temperaturerhöhung von 10 auf 40 °C eine rund 20-fache Beschleunigung der AAR.
- Die externen Alkalibelastungen durch Grund- und Bergwässer, sulfathaltige Wässer, Streusalzlösungen können AAR begünstigen.

Reaktive Zuschläge
Die wichtigsten AKR- und ASR-reaktiven Gesteine und Mineralien sind

Zu diesem Artikel

Der vorliegende Artikel basiert vor allem auf den folgenden Referaten, die anlässlich der TFB-Fachveranstaltung «AAR – eine Gefahr für die Dauerhaftigkeit unserer Betonbauten?» am 5. April 2000 in Wildegg gehalten wurden:

- [1] «Alkaliaggregatreaktionen (AAR): materialtechnologischer Verlauf», Vortrag von Christine Merz, TFB Wildegg
- [2] «Schäden infolge Alkaliaggregatreaktion», Vortrag von Cédric Thalmann, BIG, Wabern bei Bern.
- [3] «Bestimmung der Alkaliaggregatgefährdung: vorhandene Methoden und ihre Aussagekraft, Stand der Forschung», Vortrag von Jean-Gabriel Hammerschlag, TFB Nyon
- [4] «Alkaliaggregatreaktionen (AAR): Konsequenzen und Gegenmassnahmen in der Baupraxis, Gefahrenpotenzial für die Schweiz», Vortrag von Ernst Honegger, TFB Wildegg. Ergänzungen aus der Literatur sind im Verzeichnis auf Seite 6 zusammengestellt.

Theorien zu AAR-Reaktionen

Alkali-Kieselsäure- und Alkali-Silikat-Reaktionen

Über den Mechanismus der beiden Reaktionen liegen zahlreiche Publikationen vor. Trotzdem bleibt noch vieles unklar; die hier beschriebenen Vorgänge sind nicht mit letzter Sicherheit geklärt.

Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR) treten in der Regel innerhalb einiger Jahre, Alkali-Silikat-Reaktionen (ASR) meist erst einige Jahrzehnte

nach der Herstellung eines Betons auf. Mechanistisch unterscheiden sich die beiden Reaktionen kaum. Der Geschwindigkeitsunterschied lässt sich damit erklären, dass Gesteine und Mineralien verschieden reaktive Kieselsäuremodifikationen aufweisen können. Unter Kieselsäure wird SiO₂ verstan-

unter Kieselsäure wird SiO₂ verstanden, dessen korrekter Name Siliziumdioxid ist. Gut

Abb. 1 Schematische Darstellung eines möglichen Schadensmechanismus bei AKR-Reaktionen nach [5] (modifiziert). kristallisiertes SiO₂ (Quarz) ist gegen Hydroxidlösungen weitgehend stabil. Angriffspunkte sind die Silanolgruppen (Si-OH-Gruppen) an der Oberfläche der Kieselsäure. Sie reagieren mit Alkalihydroxiden aus der alkalischen Porenlösung:

$$-Si_{-}OH + HO^{-}M^{+}$$

$$-Si_{-}O^{-}M^{+} + H_{2}O$$
(1)

Anschliessend erfolgt der Angriff auf die tiefer liegenden Siloxanbrücken (Si–O–Si):

$$-S_{i}^{J}-O-S_{i}^{J}-+2 HO^{-}M^{+} → -S_{i}^{J}-O^{-}M^{+}$$
+ M+-O-S_i-+ H₂O (4)

Der Reaktionsablauf lässt sich – vereinfacht – in die folgenden Stufen unterteilen [1, 5]:

- Anreicherung der Alkalien in der Porenlösung bei fortschreitender Hydratation des Zements
- OH⁻-, Na⁺- und K⁺-lonen wandern aus dem Porenwasser zur reaktionsfähigen Kieselsäure der Zuschlagstoffe
- Reaktion der Alkalihydroxide mit reaktionsfähiger Kieselsäure



(4)

- Bildung eines quellfähigen Alkalikieselgels
- In einigen Fällen Umwandlung des Gels in nicht quellendes kristallines Alkalicalciumsilikathydrat, das als semipermeable Membran oder Schicht auf der Oberfläche bevorzugt Na+- und K+-lonen sowie Wasser durchlässt
- Im Zuschlaginnern wird quellfähiges Alkalikieselgel gebildet
- Fortschreiten der Reaktion und Wasseraufnahme führen zu erhöhtem Innendruck
- Rissbildung und Ausfliessen des Gels, wenn der Innendruck die Zugfestigkeit des Zuschlags und des Zementsteins übersteigt.

Die hier beschriebenen einzelnen Schritte sind auch in *Abbildung 1* schematisch dargestellt.

Alkali-Karbonat-Reaktionen

Alkali-Karbonat-Reaktionen werden vor allem bei Zuschlagmaterialien aus tonigem Dolomit sowie feinkörnigen Kalksteinen mit Einschlüssen aus Tonmineralien beobachtet. Vereinfacht lassen sich die chemischen Reaktionen wie folgt formulieren:

CaMg(CO₃)₂ + 2 MOH

$$\rightarrow$$
 CaCO₃ + Mg(OH)₂ + M₂CO₃ (3)
(M = Na oder K)

(Dolomit + Alkalihydroxid → Calcit + Brucit + Alkalikarbonat) $M_2CO_3 + Ca(OH)_2$ $\rightarrow CaCO_3 + 2 MOH$

Bei Reaktion (3) handelt es sich um eine Dedolomitisierung, die mit einem Volumenrückgang verbunden ist. Treiberscheinungen treten auf, weil bei der Umwandlung von CaMg(CO₃)₂ in Mg(OH)₂ die Porosität erhöht wird. Dadurch kann Feuchtigkeit zu den Toneinschlüssen gelangen, die quellen. Die freigesetzten Alkalikarbonate (M₂CO₃) reagieren mit Calciumhydroxid aus dem Zement (Ca(OH)₂), wobei erneut Alkalihydroxide [M(OH)] freigesetzt werden [Reaktion (4)].

in Tabelle 1 zusammengestellt. Zuschläge mit amorpher oder teilkristalliner Kieselsäure reagieren schneller als kristalline Silikate. Poröse, gerissene sowie gebrochene Körner sind reaktiver als dichte, ungerissene oder natürlich gerundete Körner. Wenn der Gehalt von gewissen reaktiven Zuschlägen im Beton erhöht wird, nimmt die Expansion durch AAR nicht ständig zu, sondern sie durchläuft ein Maximum: Pessimum-Effekt. Konkret bedeutet dies, dass die AAR-Empfindlichkeit eines Betons grösser werden kann, wenn inertes Zuschlagmaterial beigefügt

wird (Pessimum-Effekt von Opal und Duranglas: *Abbildung 2*).

Alkaligehalt und Zusammensetzung der Porenlösung Zum Alkaligehalt tragen die folgenden Komponenten bei:

Zement

Im Normalfall ist der Zement der Hauptlieferant von Alkalien. Die Alkalien beeinflussen zusammen mit den Sulfaten das Ansteif- und Erhärtungsverhalten eines Zements. Ihre Menge kann deshalb nicht unbegrenzt reduziert werden. Der Gesamtalkaligehalt eines Zements hängt von den Rohstoffen und den Herstellungsbedingungen ab. Durchschnittlich enthalten Schweizer Klinker etwa 0,7–0,9 Masse-% Na₂O-Äq. (%-Äq. Na₂O

= % Na₂O + % K₂O x 0,658). Der Alkaligehalt in der Porenlösung beeinflusst den Ca(OH)₂-Gehalt und die Löslichkeit der Kieselsäure.

Zuschlagstoffe
 Gewisse vulkanische Gläser, Feldspäte und evtl. Glimmer können
 Alkalien abgeben; ungewaschene
 Kiessande, die aus dem Meer ge-

Gesteinsfamilien	Gesteine, in denen reaktive Mineral- phasen auftreten können	Reaktive Mineralphasen	Reaktions- typ
Kristalline Gesteine	Granite, Granodiorite, Diorite usw.	Poröser, mikrofaseriger Quarz	ASR
Vulkanische Gesteine	Rhyolite, Dacite, Andesite, Basalte, Obsidiane, Tuffe	 Instabile Hochtemperaturformen des Quarz: Trydimit, Cristobalit Kryptokristalline Kieselsäure: Chalzedon Amorphe, hydratisierte Kieselsäure: Opal 	AKR AKR AKR
Metamorphe Gesteine	Gneise, Schiefer, Mylonite, Quarzite, Hornfelse	 Deformierter, gerissener Quarz Deformierte, poröse, verwitterte Feldspäte Feinkristalline Glimmer Krypto- und mikrokristalliner Quarz 	ASR ASR ASR AKR
Sedimentgesteine	Sandsteine, Grauwacken, Siltite, Feuersteine, kieselige Kalke	 Deformierte, poröse, verwitterte Feldspäte Feinkristalline Tone, Glimmer Krypto- und mikrokristalliner Quarz Kryptokristalline Kieselsäure: Chalzedon Amorphe, hydratisierte Kieselsäure: Opal 	ASR ASR AKR AKR AKR

Tab. 1 Die wichtigsten AAR-reaktiven Gesteine und Mineralien (AKR: Alkali-Kieselsäure-Reaktion, ASR: Alkali-Silikat-Reaktion).

wonnen wurden, können Alkalien enthalten.

- Zusatzstoffe
 Hüttensande und Flugaschen enthalten weniger aktive Alkalien als
 Zemente
- Zusatzmittel
 Die aktive Beteiligung der in gewissen Zusatzmitteln enthaltenen Alkalien sowie ihr Einfluss auf die Zusammensetzung des Porenwassers wurden noch kaum untersucht.
- Anmachwasser in der Schweiz im Allgemeinen ohne signifikante Beiträge
- von aussen
 Tausalzlösungen, Berg- und Grundwässer, Meerwasser.

Für den Alkaligehalt sind keine allgemein gültigen Grenzwerte zur Vorbeugung von AAR verfügbar. Im Ausland üblich sind 2–4 kg Na₂O-Äq./m³ Beton, abhängig von den Zuschlägen und der Zusammensetzung der Zemente.

Zusatzstoffe

Silicastaub reduziert den Alkaligehalt von Porenlösungen. Zudem wird der pH-Wert herabgesetzt, woraus bei zu hoher Dosierung eine erhöhte Korrosionsgefahr für die Bewehrung resultieren kann.

Silicastaub besteht aus amorphem SiO₂, das Anlass zu AAR geben kann. Da die sehr feinen Teilchen bei niedrigen Dosierungen in der Regel bereits vor der Erhärtung des Betons reagieren, besteht keine Gefährdung. Voraussetzung ist allerdings, dass sich keine Agglomerate gebildet haben [6].

Flugaschen und Hüttensande sind zwar alkalihaltig, binden aber im Vergleich zu Portlandzementen vermehrt Alkalien in die Hydratationsprodukte ein.

Betoneigenschaften

Änderungen von Rezepturen haben oft sowohl positive als auch negative Auswirkungen auf das AAR-Verhalten von Betonen. So wird die Diffusion der Alkalien zu den reaktiven Zuschlägen durch ein dichtes Betongefüge verlangsamt; der Feuchtigkeitseintrag von aussen verringert sich. Ein dichtes Gefüge kann aber auch zu lokalen Spitzenkonzentrationen an Alkalien in der Porenlösung führen, die AAR auslösen können.

LITERATUR

- [[1]–[4]: Siehe Kasten «Zu diesem Artikel» auf Seite 3.
- [5] Sprung, S., und Sylla, H.-M., «Ablauf der Alkali/Kieselsäure-Reaktion im Beton bei unterschiedlichen Zuschlaggesteinen», Zement-Kalk-Gips 51 [6], 334–345 (1998).
- [6] Diamond., S., «Alkali silica reactions some paradoxes», Cement & Concrete Composites 19 [5/6], 391–401 (1997).

Je dichter ein Beton ist, desto weniger Porenraum steht zur Aufnahme des Kieselgels zur Verfügung. Die Folge sind möglicherweise grössere Schäden durch AAR. Das höhere E-Modul des dichteren Betons kann sich hingegen günstig auf die Grösse und Verteilung der Risse auswirken.

AAR in der Schweiz

In der Schweiz waren AAR-Reaktionen ausserhalb von wissenschaftlichen Kreisen lange kein Diskussionsthema. Dies vor allem auch, weil früher selten Betone mit relativ hohen Zementgehalten und wenig gebrochenes Zuschlagmaterial eingesetzt wurden.

Trotzdem müssen bei grösseren Bauwerken, wo Betonteile ungünstigen Umgebungsbedingen ausgesetzt sind, die notwendigen Vorkehrungen getroffen werden, damit die unerwünschten chemischen Reaktionen nicht auftreten können. So wurde bereits 1966 beim Bau der Barrage de Hongrin 3

der Barrage de Hongrin 30 % des Portlandzements durch Flugasche (Senkung des aktiven Alkaligehalts) ersetzt.

Zunehmend höhere Zementdosierungen (z. B. bei Spritzbeton-Anwen-

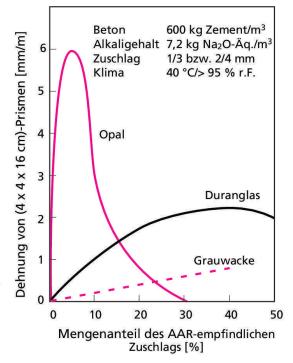


Abb. 2 Einfluss der Zuschlagmenge auf das Dehnungsverhalten von Betonprismen mit verschiedenen Zuschlägen (Opal und Duranglas: Pessimum-Effekt) nach [5].

dungen) sowie der vermehrte Einsatz von Tunnelausbruchmaterial haben dazu geführt, dass AAR-Gefährdungen in der Schweiz seit einigen Jahren ernster genommen werden, besonders bei wichtigen Bauwerken mit aussergewöhnlichen Randbedingungen wie den Tunnels von AlpTransit.

Grund zur Beunruhigung besteht jedoch nicht, denn AAR-Schäden sind in der Schweiz selten und entwickeln sich langsam. Sie treten nur regional begrenzt auf und lassen sich durch geeignete vorbeugende Massnahmen in tolerierbaren Grenzen halten. Ohne gezielte Untersuchungen und Massnahmen geht dies allerdings nicht.



Abb. 3 AAR-Schäden in unbewehrter Stützmauer.

Foto: Fritz Hunkeler, TFB

Christine Merz, TFB Wildegg und Jean-Gabriel Hammerschlag TFB Nyon