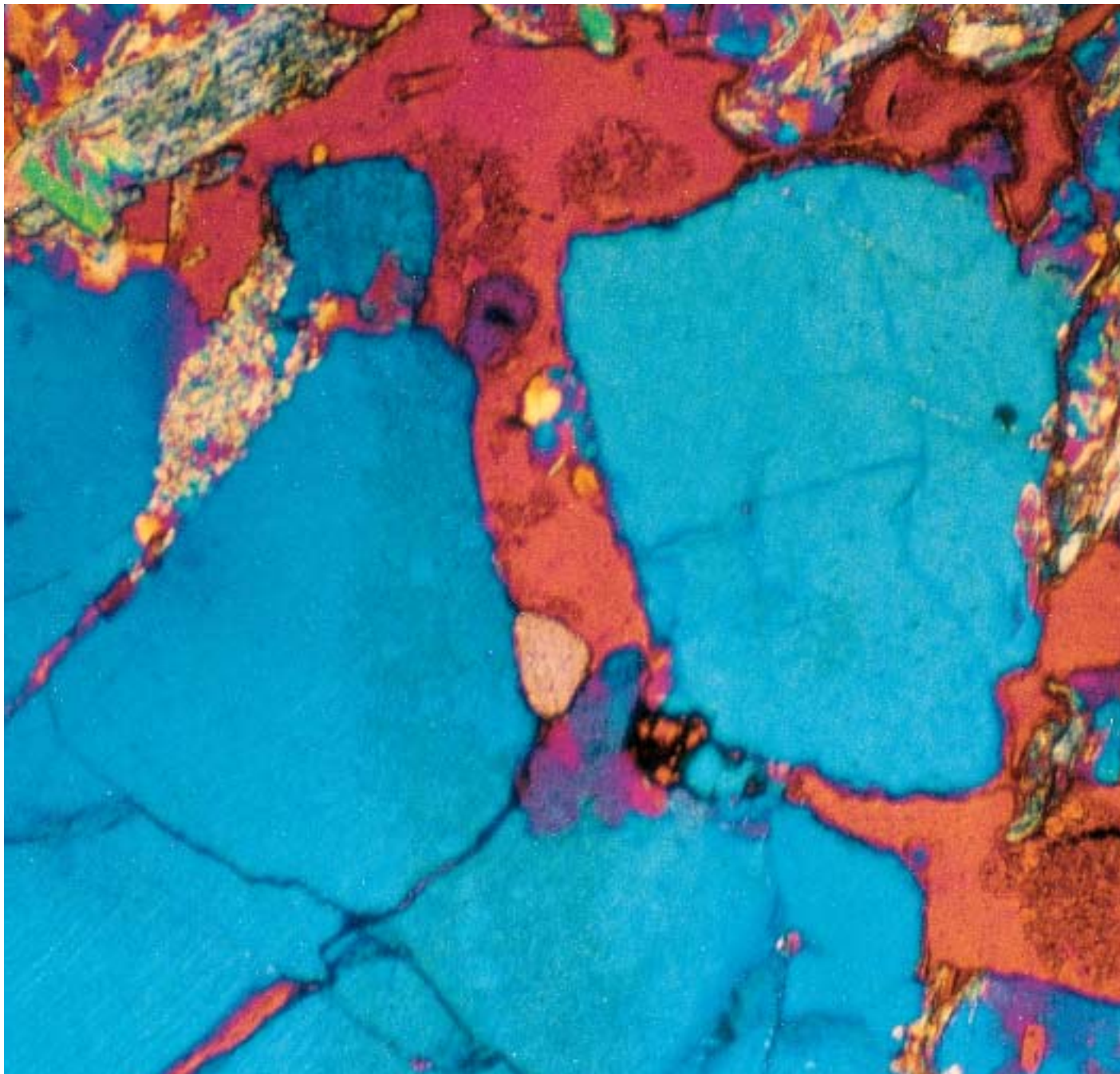


Alkali-Aggregat-Reaktionen (Teil 1)

Korrodierter und gerissener Zuschlag als Folge von AAR-Reaktionen (mikroskopische Untersuchung eines Dünnschliffs im polarisierten Licht).



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 Thalman, 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

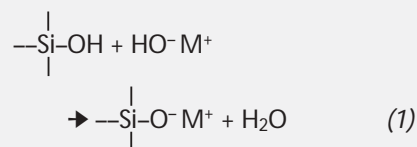
Vorgänge sind nicht mit letzter Sicherheit geklärt.

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

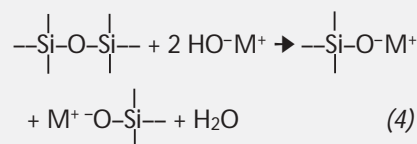
nach der Herstellung eines Betons auf. Mechanistisch unterscheiden sich die beiden Reaktionen kaum. Der Geschwindigkeitsunterschied lässt sich damit erklären, dass Gesteine und Mineralien verschieden reaktive Kieselsäuremodifikationen aufweisen können.

Unter Kieselsäure wird SiO_2 verstanden, dessen korrekter Name Siliziumdioxid ist. Gut

kristallisiertes SiO_2 (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:



Anschließend erfolgt der Angriff auf die tiefer liegenden Siloxanbrücken (Si-O-Si):



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^+ -Ionen wandern aus dem Porenwasser zur reaktionsfähigen Kieselsäure der Zuschlagstoffe
- Reaktion der Alkalihydroxide mit reaktionsfähiger Kieselsäure






	Zuschlagkorn mit alkaliempfindlicher Kieselsäure
	Oberflächenreaktion mit Alkali- und Calciumionen des Zements zu nicht quellendem Alkalicalciumsilikathydrat (semipermeable Membran)
	Diffusion von Alkaliionen und Wasser in das Innere des Zuschlagkorns und Reaktion mit alkaliempfindlicher Kieselsäure zu Alkalikieselgel
	Innendruck durch Fortschreiten der Reaktion und Aufnahme von Wasser erhöht
	Rissbildung bei Überschreiten der Zugfestigkeit des Zuschlagkorns; geringe Gelbildung
	Auflösung des Zuschlagkorns von innen heraus: starke Gelbildung

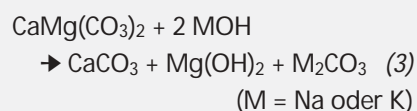
Abb. 1 Schematische Darstellung eines möglichen Schadensmechanismus bei AKR-Reaktionen nach [5] (modifiziert).

- Bildung eines quellfähigen Alkali-kieselgels
- In einigen Fällen Umwandlung des Gels in nicht quellendes kristallines Alkalicalciumsilikathydrat, das als semipermeable Membran oder Schicht auf der Oberfläche bevorzugt Na⁺- und K⁺-Ionen 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.

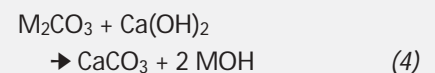
Die hier beschriebenen einzelnen Schritte sind auch in *Abbildung 1* schematisch dargestellt.

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:



(Dolomit + Alkalihydroxid
→ Calcit + Brucit + Alkalikarbonat)



Bei *Reaktion (3)* handelt es sich um eine Dedolomitisierung, die mit einem Volumenrückgang verbunden ist. Treiberscheinungen treten auf, weil bei der Umwandlung von $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ in $\text{Mg}(\text{OH})_2$ die Porosität erhöht wird. Dadurch kann Feuchtigkeit zu den Toneinschlüssen gelangen, die quellen. Die freigesetzten Alkalikarbonate (M_2CO_3) reagieren mit Calciumhydroxid aus dem Zement ($\text{Ca}(\text{OH})_2$), wobei erneut Alkalihydroxide [$\text{M}(\text{OH})$] freigesetzt werden [*Reaktion (4)*].

in *Tabelle 1* zusammengestellt. Zuschläge mit amorph 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 beigelegt

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-% Na_2O -Äq. (%-Äq. Na_2O = % Na_2O + % K_2O x 0,658).

Der Alkaligehalt in der Porenlösung beeinflusst den $\text{Ca}(\text{OH})_2$ -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 Mineralphasen auftreten können	Reaktive Mineralphasen	Reaktionstyp
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 Grundwasser, 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 nied-

rigen 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 Diskussionssthema. 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 Umgebungsbedingungen 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 30 % des Portlandzements durch Flugasche (Senkung des aktiven Alkaligehalts) ersetzt. Zunehmend höhere Zementdosierungen (z. B. bei Spritzbeton-Anwen-

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.

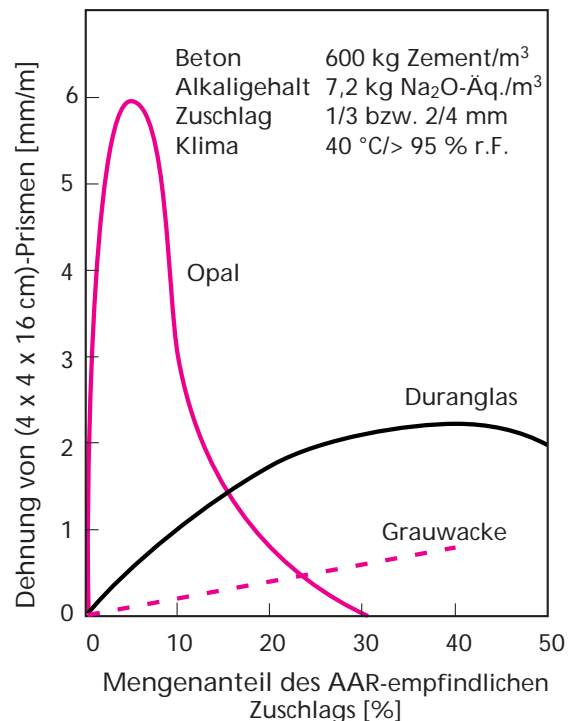


Abb. 2 Einfluss der Zuschlagmenge auf das Dehnungsverhalten von Betonprismen mit verschiedenen Zuschlägen (Opal und Duranglas: Pessimum-Effekt) nach [5].



Abb. 3 AAR-Schäden in unbewehrter Stützmauer.

Foto: Fritz Hunkeler, TFB

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