

Korrosionsschäden an Brücken – aktuelle Beispiele

Monitoring von AAR-geschädigten Bauwerken

Y. Schiegg, F. Hunkeler, L. Klemm
TFB AG, Wildegg / CH

Zusammenfassung

Die Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) ist ein langsam ablaufender chemisch-physikalischer Prozess in Beton. Die alkalische Porenlösung reagiert mit gewissen Bestandteilen der Gesteinskörnung, wobei es zu einer Volumenzunahme kommt – der Beton dehnt sich langsam aus (Grössenordnung 0.01- ca. 0.9 mm/m/Jahr in der CH). Bis ein klar sichtbares Schadensbild entsteht, können Jahrzehnte vergehen. Da die Reaktion durch eine Instandsetzung des Überdeckungsbetons meist nicht (vollständig) gestoppt werden kann, sollten betroffene Bauwerke überwacht werden. Dafür gibt es zwei Ansätze: 1) eine Überwachung der Ausdehnung des Bauteils durch periodische Messungen von Hand an fest installierten Messbolzen und 2) eine kontinuierliche Messung der Ausdehnung an fest installierten Extensometern und des elektrischen Betonwiderstandes mit eingebauten Widerstandssensoren. Es hat sich gezeigt, dass die kontinuierlichen Aufzeichnungen bezüglich der Beurteilung von AAR-bedingten rascher zu einer sicheren Beurteilung führen.

Stichworte

Alkali-Aggregat-Reaktion, AAR, Betonkorrosion, Monitoring, Korrosion, Betonwiderstand

Einleitung

Bei der AAR reagiert die alkalische Porenlösung im Beton mit Anteilen der Gesteinskörnung. Dabei handelt es sich um feinkörnigen Quarz oder amorphes (nicht-kristallines, glasartiges) SiO_2 , welches im stark alkalischen Porenwasser zunächst gelöst und wieder als Silikagel ausgeschieden wird (Abbildung 1). Dieses Silikagel ist hygroskopisch und quillt unter Aufnahme von Wasser, welches zu Rissbildungen in den reagierenden Gesteinskörnern führt (Abbildung 2).

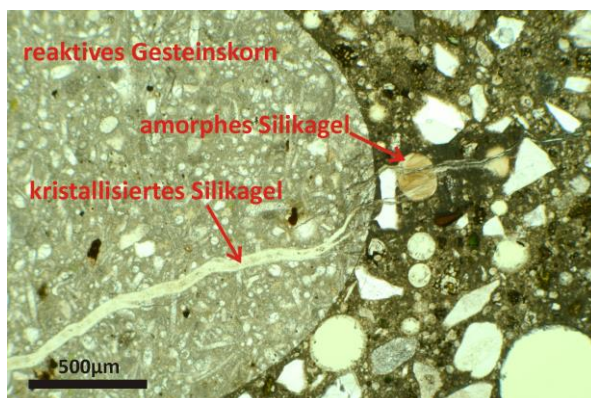


Abbildung 1: Gelbildung in Rissen

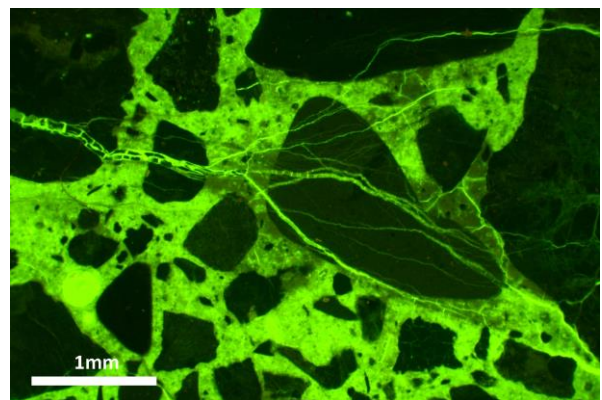


Abbildung 2: Durch Silikagel verursachte Rissbildung im Gesteinskorn

In fortgeschrittenem Stadium verlaufen die AAR-Risse von den Gesteinskörnern ausgehend durch den Zementstein und es kann das oberflächlich sichtbare, für AAR typische Rissnetz entstehen (Abbildung 3). Eine AAR kann sehr lokal oder auch grossflächig auftreten. Sie kann ein oberflächliches Phänomen sein oder den gesamten Bauteilquerschnitt betreffen. Durch die anfängliche Bildung feinsten Risse werden zusätzliche Wege für den Feuchtigkeits- und Alkalien-Eintrag geöffnet, was die Reaktion vorantreibt und u.U. auch beschleunigen kann. Drei Komponenten sind also für eine fortschreitende AAR nötig: reaktive Gesteinskörnung, alkalische Porenlösung und Feuchtigkeit. Diese Komponenten sind in vielen Bauwerken in der Schweiz vorhanden. Die meisten Gesteine enthalten mehr oder weniger feinkörnigen Quarz und müssen somit als potenziell reaktiv eingestuft werden. Die Alkalien im Beton stammen aus dem Zement. Neben den Alkalien aus den Komponenten des Betons können zusätzlich noch Alkalien aus externen Quellen, wie Grundwasser, Bergwässer oder korrosionsauslösendes Tausalz, hinzukommen und damit die AAR beeinflussen. Auch Wasser kann bei exponierten Bauwerken oft ungehindert zutreten. Durch eine fortschreitende AAR mit der Bildung vieler Risse verliert ein Beton zuerst seine Zugfestigkeit. Druckfestigkeit und E-Modul werden erst beeinträchtigt, wenn die Reaktion vergleichsweise weit fortgeschritten ist. Eine AAR kann jedoch kritisch werden, wenn bewegliche oder eingespannte Bauteile oder Bauwerke wie Staumauern, Schleusentore oder Brückenlager betroffen sind. Weitere Details können der Fachliteratur entnommen werden, z.B. in [1-4].

Schweizer Gesteinskörnungen enthalten zu einem gewissen Anteil potenziell reaktive Gesteine wie z.B. Kieselkalke, Sandsteine und Gneise. Dennoch gibt es in der Schweiz regionale Unterschiede, was die Häufigkeit und Intensität von AAR-Schäden an Betonbauten betrifft. Die weitaus meisten und stärksten Schäden treten im Alpenraum und in der Westschweiz auf, bedingt durch eine höhere Anzahl exponierter Bauwerke, wie z.B. Stützmauern, die von hinten befeuchtet werden und von vorne einen Eintrag von Taumitteln erfahren.

Die Beständigkeit eines Betons gegen AAR kann erhöht werden, indem beispielsweise der Gehalt an Alkalien des Zementes reduziert wird. Dies wird erreicht, indem entweder der gesamte Zementgehalt reduziert wird, oder aber ein Zement mit Zusatzstoffen bzw. mit anderen Hauptbestandteilen (Hüttensandmehl, Flugasche, Silikastaub) eingesetzt wird [5].

Zur sicheren Diagnose von AAR ist eine mikroskopische Gefügeuntersuchung an Dünnschliffen unerlässlich. Das charakteristische oberflächliche Rissbild kann zwar auf eine AAR hinweisen, eine Einschätzung über den Zustand des gesamten Bauwerks, insbesondere über nicht sichtbare Bereiche wie den Kernbeton oder Rückseiten von Mauern, ist nur durch eine umfassende Beprobung mit Bohrkernen möglich. Durch eine Gefügeuntersuchung kann einerseits eine AAR nachgewiesen werden, andererseits aber auch der Reaktionsfortschritt abgeschätzt werden. Ein Instandsetzungskonzept für ein AAR-geschädigtes Bauwerk kann sich z.B. auf das oberflächliche Entfernen allfälliger stark geschädigter Bereiche und auf ein Abdichten (beispielsweise Hydrophobieren) gegen weiteren Feuchtigkeits- und Alkalien-Eintrag beschränken. Ist der gesamte Bauteilquerschnitt betroffen, ist eine Überwachung empfehlenswert. Ein Monitoring umfasst meist regelmässige Begehungen durch Experten über Jahre hinweg und Messungen der fortlaufenden Ausdehnung an definierten Messfeldern zur Erfassung des Rissbreitenindex, damit das Verhalten des Bauwerks abgeschätzt und die Wirksamkeit der Instandsetzungsmassnahmen beurteilt werden kann [6, 7].



Abbildung 3: Charakteristisches AAR-Rissbild am Pylon einer Schrägseilbrücke

AAR-Monitoring am Beispiel der Rorbachbrücke bei Wassen, Kanton Uri (Schweiz) und der Stützmauer Eisten an der Simplonstrasse, Kanton Wallis (Schweiz)

Die beiden nachfolgenden Praxisbeispiele (eine Brücke und eine Stützmauer) wurden aufgrund der langjährigen Datensätze ausgewählt. Bei der in Abbildung 3 dargestellten Schrägseilbrücke sind die Messreihen noch zu kurz und deshalb zu wenig aussagekräftig.

Die **Rorbachbrücke** ist eine Eisenbahnbrücke oberhalb der Gemeinde Wassen im Kanton Uri (Schweiz). Die Tunnelbrücke wurde 1982-84 erbaut und besteht aus einer Betonröhre mit den im Innern verlegten Gleise und sog. Endquerrahmen als Widerlager (Abbildung 4). Der oberflächennahe Beton der massiven Endquerrahmen und die Verschiebebahnen Seite Wassen und Seite Göschenen wiesen eine erhebliche AAR-bedingte Rissbildung auf. Die Risse traten senkrecht und parallel zur Oberfläche (Schalenrisse) vorwiegend bis in eine Tiefe von ca. 20 cm auf. Bei den Endquerrahmen wurden vereinzelte Schalenrisse bis in eine Tiefe von 90 cm festgestellt. Die Rissbreiten an der Oberfläche waren unterschiedlich, die Breite der Schalenrisse betrug max. 1 mm. Die Breite der Oberflächenrisse nahm mit zunehmender Tiefe ab. Mit Ausnahme des Brückenquerschnitts traten bei allen Bauteilen Schalenrisse auf. Die Breite der Oberflächenrisse nahm mit etwa 0.02 bis 0.03 mm/Jahr zu, die der Kernzone um ca. 0.01 mm/Jahr (Schätzwerte aus der Zustandsuntersuchung). Die Ausdehnungsrate war eher klein und zeigte an, dass die AAR bei diesem Bauwerk relativ langsam verläuft. Durch die zunehmende Rissöffnung und Risstiefe wurde der Wassereintrag bei den bewitterten Oberflächen erleichtert. Dadurch erreichte die Feuchtigkeit zunehmend tiefere Schichten. Die Ebene mit häufigen Schalenrissen verschob sich weiter in die Tiefe (mit ca. 1 cm/Jahr).



Abbildung 4: Rorbachbrücke während der Instandsetzung 2007

Bei den relativ stark AAR-geschädigten Bauteilen (Endquerrahmen, Verschiebebahnen, Galeriefundationen und Stützmauer der Galerie Seite Wassen) wurde der schadhafte Oberflächenbeton bis zu einer Tiefe von 20 cm abgetragen und durch neuen AAR-beständigen, bewehrten Beton mit einer Dicke von 30 cm ersetzt und im Altbeton stark verankert. Der Beton wurde anschliessend hydrophobiert. Die horizontalen Flächen der Endquerträger wurden mit einem Schutzdach versehen. Gleichzeitig mit diesen Massnahmen wurde die Brücke gegen die Einwirkung von Lawinen verstärkt. Weitere Details können aus [6, 7] entnommen werden.

Die 1977 gebaute **Stützmauer Eisten** ist eine Schwergewichtsmauer und zeigt eine recht hohe Anzahl von AAR-bedingten Rissen. Die Rissweiten waren zum Zeitpunkt des Projektstarts meist noch gering (um 0.1 mm). Es konnte aber davon ausgegangen werden, dass die Rissbreiten weiter zunehmen werden. Die Zustandsuntersuchungen und Laboranalysen haben ergeben, dass sich die senkrecht zur Oberfläche verlaufenden Risse auf etwa 10 cm Tiefe schliessen. Die Ausdehnungsraten wurden auf 20 bis 40 $\mu\text{m}/\text{m}$ Jahr geschätzt [7]. An der gegenüberliegenden, talseitigen Stützmauer wurde eine deutlich stärkere AAR-Schädigung festgestellt. Grund sind vermutlich die intensiveren Nass-Trocken-Zyklen und die höhere Belastung mit Streusalz.

Der Grad der AAR-Schädigung an der Stützmauer Eisten wurde aus dem Vergleich der Dünnschliffe aus unterschiedlichen Tiefen des Bauteils ermittelt. Es wurden geringfügige und mittlere bis starke Schädigungen festgestellt. Die Befunde zeigen, dass die AAR den ganzen Baukörper erfasst hat. Die Ausprägung ist lokal sehr unterschiedlich und hängt wahrscheinlich vor allem von der Zirkulation von Feuchtigkeit und den damit einhergehenden Austauschprozessen ab. Die grössten Schäden zeigen sich in den Randzonen der Vorder- und Rückseite. Befindet sich im Dünnschliff ein Haupttriss (Riss, der den Dünnschliff teilt), so ist der Grad der Schädigung in diesem Bereich deutlich grösser. Die Anfänge von weitmaschigen Mikrorissnetzen zeigen, dass die schädigenden Prozesse stellenweise fortgeschritten sind. Die weite Spanne des Schädigungsgrads geht einher mit der stark schwankenden Bohrkerndruckfestigkeit von 35.0 bis 71.0 N/mm^2 .

Für die weiteren Untersuchungen wurden zwei 8 m breite Testfelder T1 und T2 angelegt (Abbildung 5). Die Anzahl der Risse, die innerhalb eines Meters liegen, waren so zahlreich, dass Rissbreitenänderungen mittels der vorgesehenen Methoden repräsentativ erfasst werden konnten. Nach der Zustandserfassung wurde Anfang August 2009 die Testfläche T1 der Stützmauer mittels Hochdrucklanze (500 bar) von oben nach unten gereinigt. Nach der Trocknung, während der es nicht regnete, wurde im Testfeld T1 eine Hydrophobierung (Gel mit 90% Silan) appliziert. Die Testfläche T2 blieb unbehandelt.

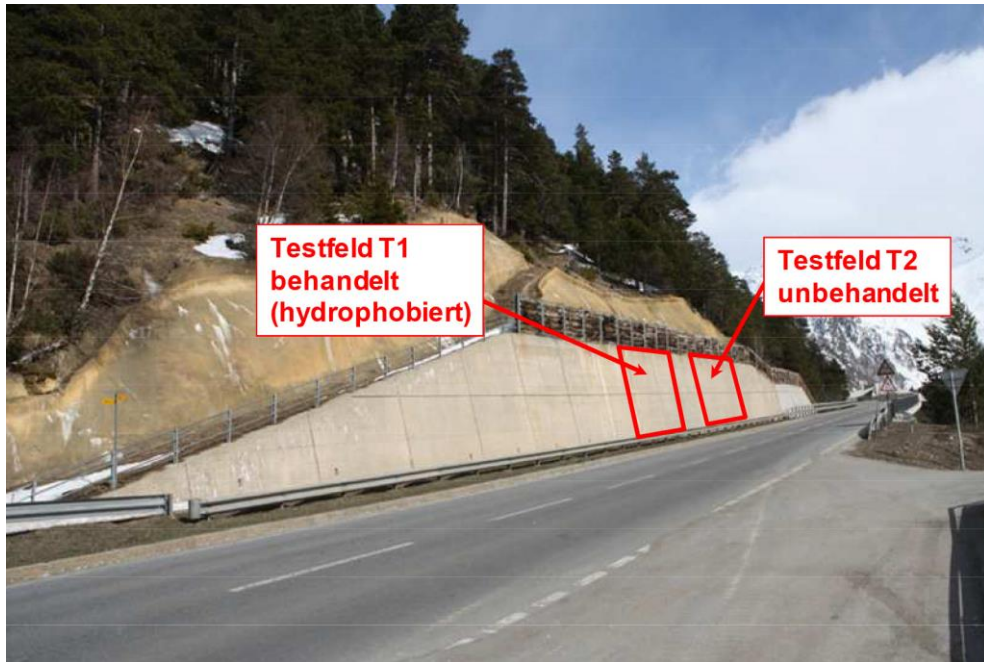


Abbildung 5: Stützmauer Eisten an der Simplonstrasse mit Lage der Testfelder

Instrumentierung und Messungen

Rorbachbrücke

Für das AAR-Monitoring an der Rorbachbrücke wurden in 8 Messflächen an den Stirn- bzw. Seitenflächen der Endquerrahmen und der Verschiebebahnen Messbolzen für Deformiermessungen versetzt. Seit der Nullmessung am 19.6.2008 wurden bis zur letzten Messung im August 2014 insgesamt 9 weitere Messungen der Längenänderung, der Betonfeuchtigkeit und der Beton- und Umgebungstemperaturen vorgenommen. Es ist vorgesehen, im Intervall von zwei Jahren weitere Messungen vorzunehmen.

Stützmauer Eisten

Die Testfelder T1 und T2 wurden u.a. mit automatischen Wegaufnehmern, so genannten Oberflächenextensometern der Firma Solexperts AG, Mönchaltorf CH, bestückt. Sie wurden im Labor im Wasserbad kalibriert, so dass die Daten vom Objekt temperaturkompensiert dargestellt werden können. Diese aus Fiberglas bestehenden Instrumente werden an einem Endpunkt fix befestigt, während das andere Ende in einem Extensometer mit einem Gesamtmessbereich von 50 mm (+/- 25 mm Weg) befestigt wird. Das Fiberglasgestänge wird in einem Edelstahlrohr geführt. Dieses ist mit Abstandshaltern fix an die Betonoberfläche montiert. Es wurde pro Testfeld je ein vertikales Extensometer mit einer Länge von 5.5 m und je ein horizontales Extensometer mit einer Länge von 3 m.

Um allfällige Veränderungen der Betonfeuchtigkeit zu erkennen und um die gemessenen Längenänderungen interpretieren zu können, wurden Temperatur- und Widerstandssensoren Typ CS-322 der TFB Diagnostic Systems AG, Wildegg CH, eingebaut. Die Betonfeuchtigkeit wird dabei indirekt über den elektrischen Widerstand des Betons ermittelt. Die Sensoren wurden in eine Höhe von 0.4 m und ca. 2.5 m ab OK Terrain eingebaut.

Ergebnisse und Auswertung

Rorbachbrücke

Die Abbildung 6 zeigt die seit der Nullmessung vom 19.6.2008 gemessenen Längenänderungen der vertikalen Deformermessstrecken (bezogen auf 1 m).

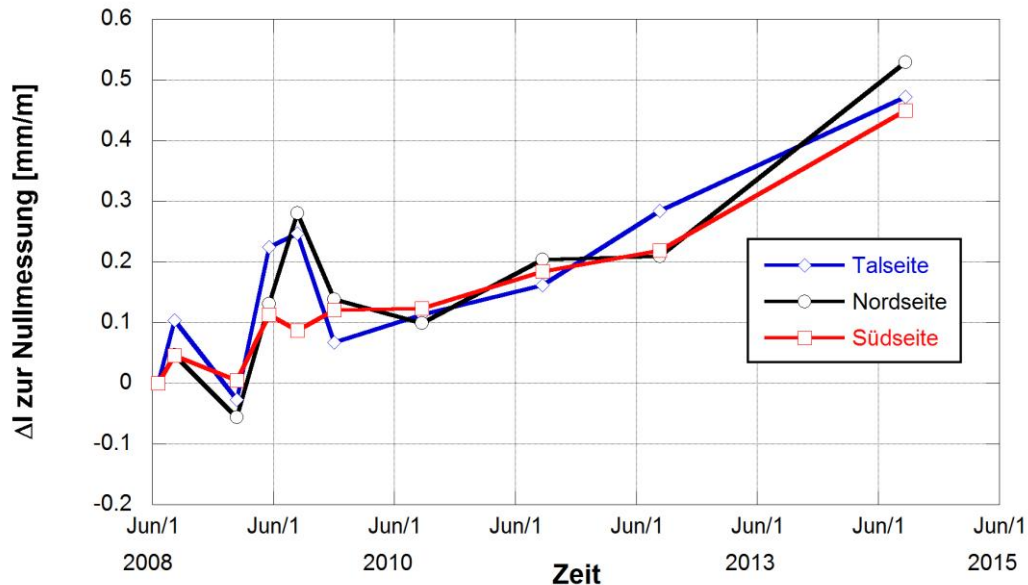


Abbildung 6: Längenänderungen der vertikalen Deformermessstrecken über die Zeit. Der unstete Verlauf der Kurven in der Anfangsphase ist auf klimatische Einflüsse (Messungen während unterschiedlichen Jahreszeiten) zurückzuführen. Die letzten Messungen wurden jeweils im August durchgeführt

Die messtechnische Überwachung der Rorbachbrücke seit 2008 lässt momentan folgendes Fazit zu:

- Der oberflächennahe Beton aller Bauteile trocknete in den letzten Jahren stark aus, die Tal- und Südseite stärker als die Nordseite. Die Hydrophobierung erweist sich als wirksame Barriere gegen den Wassereintrag. Dies gilt für den ungerissenen Beton bzw. für den Beton mit stabilen Rissbreiten.
- Der oberflächliche Beton dehnt sich generell mit ca. 0.05 bis 0.09 mm/m Jahr aus. Da für den Vorsatzbeton ein AAR-beständiger Beton eingesetzt wurde, muss dieser Befund auf die weitere Ausdehnung des alten Kernbetons zurückgeführt werden.
- Die beobachteten Ausdehnungsraten liegen in der gleichen Größenordnung wie die Werte vor der Instandsetzung. Sie sind zu hoch, um gänzlich auf eine Überwachung zu verzichten.
- Mit der Ausdehnung des Betons ist eine Rissbildung im neuen Vorsatz-Beton verbunden. Dies wird mit der Zeit dazu führen, dass die Wirkung der Hydrophobierung verloren geht (keine Schutzwirkung in neuen oder stark verbreiterten Rissen) und gegebenenfalls nachhydrophobiert werden muss.

Stützmauer Eisten

Für die Analyse der Längenänderung wurden nur temperaturkompensierte Werte verwendet. Mit der Kompensation wird die temperaturbedingte Längenänderung des Sensors eliminiert. Die verbleibende Längenänderung ist auf die variable Betontemperatur und die AAR zurückzuführen. Die Differenz zwischen den gemessenen und berechneten Längenänderungen ist auf die AAR-bedingte Ausdehnung zurückzuführen (Abbildung 7). Diese beträgt ca. 0.15 mm/m Jahr und ist bei beiden Testflächen praktisch gleich. Daraus ist zu folgern, dass die Hydrophobierung zumindest bis Mitte Juni 2012, d.h. nach ca. 3 Jahren, noch keine erkennbare Wirkung entfalten konnte.

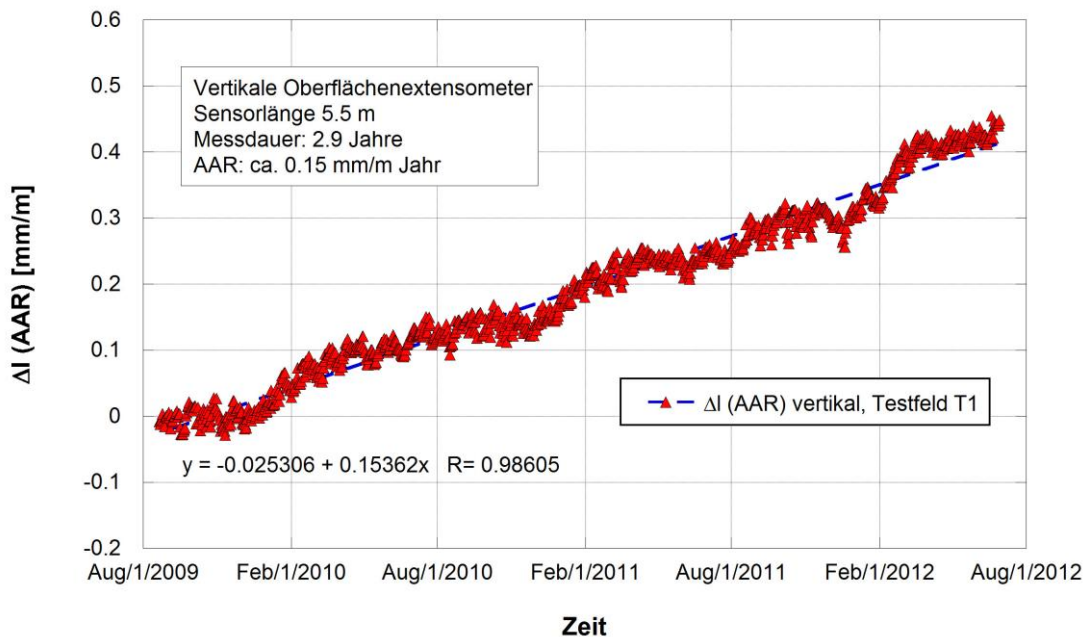


Abbildung 7: AAR-bedingte Längenänderung (=Differenz zwischen gemessener und berechneter Längenänderung) beim vertikalen Extensometer im Testfeld T1

Der elektrische Betonwiderstand des Betons dient als Mass für die Betonfeuchtigkeit im Beton bzw. deren Veränderung. Die mit den Sensoren gemessenen elektrischen Betonwiderstände wurden mit den entsprechenden Formfaktoren in spezifische elektrische Betonwiderstände in Ωm umgerechnet. Der Verlauf für die zwei im unteren Bereich der Stützmauer eingebauten Sensoren ist in der Abbildung 8 dargestellt. Die Widerstände sind zu Beginn sehr niedrig, da das für das Einmörteln der Sensoren eingesetzte, zementöse Material elektrisch gut leitend ist und dieses zudem auch Feuchtigkeit in den Beton eingebracht hat. Mit dem Aushärten und Trocknen des Einbettmaterials und des Betons steigt der Widerstand rasch an und folgt danach den saisonalen Temperaturänderungen. Beim Testfeld 1 ist beim Betonwiderstand der Randzone ein Trend zu höheren Werten erkennbar. Beim Testfeld 2 ist dies nicht der Fall. Die Werte liegen zudem auf einem deutlich tieferen Niveau. Zum Vergleich wurden die spezifischen Betonwiderstände bei 20 °C ermittelt. Daraus geht hervor, dass die Widerstände der Betonrandzone der hydrophobierten Testfläche um den Faktor 2 bis 3 höher sind als in der nicht hydrophobierten Messfläche. Dies ist auf die wasserabhaltende Wirkung der Hydrophobierung zurückzuführen.

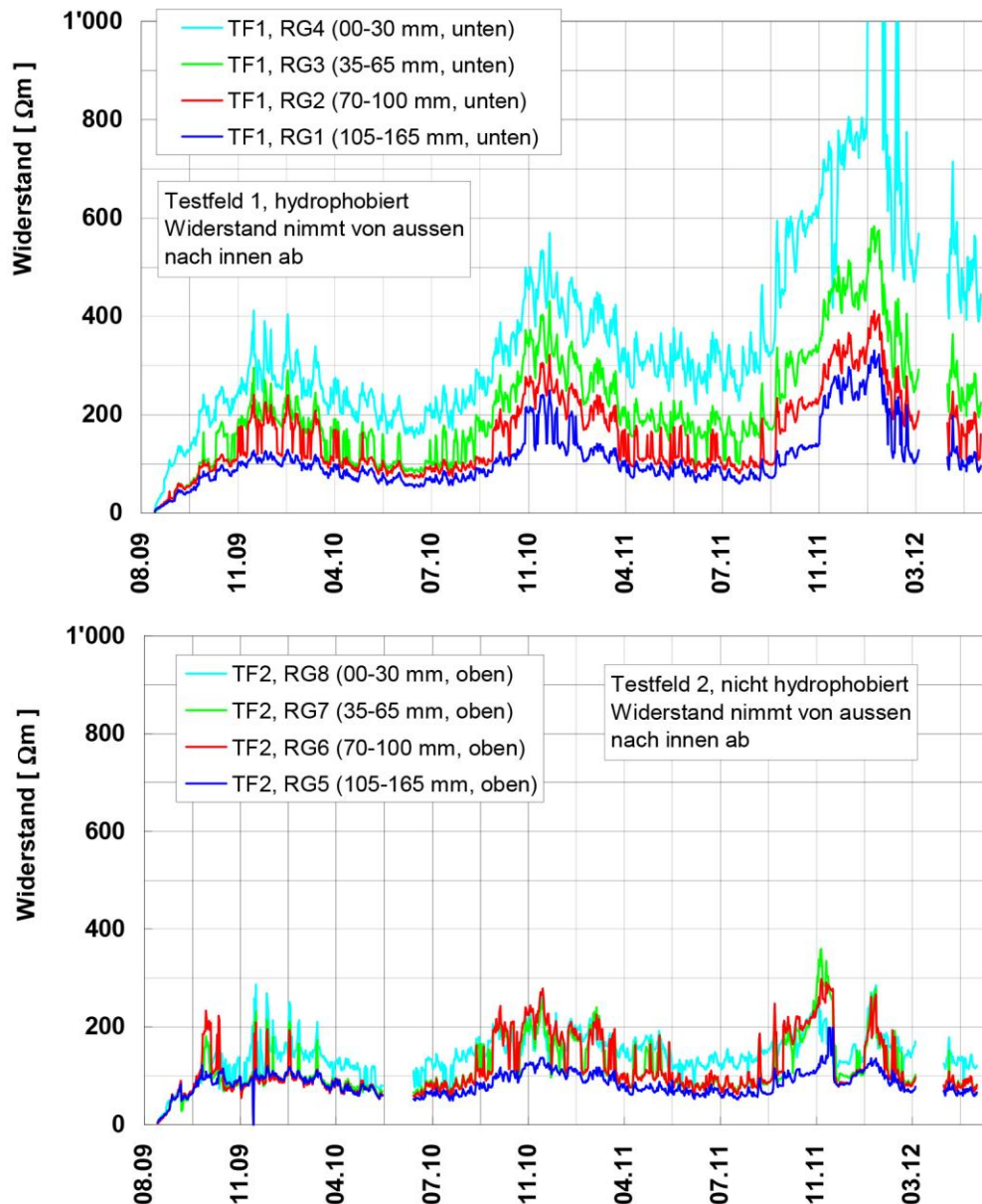


Abbildung 8: Verlauf der spezifischen elektrischen Betonwiderstände (Werte um 02:00 Uhr nachts) für das Testfeld 1 (oben) und das Testfeld 2 (unten)

Die messtechnische Überwachung der Stützmauer Eisten seit 2009 lässt momentan folgendes Fazit zu:

- Die Hydrophobierung zeigt die erwartete wasserabhaltende Wirkung. Der Randbeton konnte dadurch austrocknen, wie mit der Messung der Oberflächenfeuchte und des elektrischen Betonwiderstandes bestätigt werden konnte
- Die kontinuierlichen Messungen mit den Extensometern ergeben ein viel klareres Bild als die übrigen Messungen (Deformeter, Rissbreitenindex). Der Hauptgrund liegt an der Möglichkeit, bei den kontinuierlichen Messungen den starken Temperatureinfluss herauszurechnen. Die (scheinbaren) Wärmeausdehnungskoeffizienten α_{Beton} variieren in einem weiten Bereich (2 bis $20 \times 10^{-6} \text{ m/m } ^\circ\text{C}$). Sie sind abhängig vom Grad der Einspannung bzw. der Behinderung der temperatur- oder AAR-bedingten Längenänderung. Hier beträgt α_{Beton} ca. $10 \times 10^{-6} \text{ m/m } ^\circ\text{C}$.

- Mit den kontinuierlichen Extensometermessungen war es möglich, die AAR-bedingte Ausdehnung der Stützmauer in vertikaler und in horizontaler Richtung sowie über den Querschnitt abzuschätzen. Die ermittelten Werte variieren zwischen 0.02 bis 0.2 mm/m Jahr. Die höchsten Werte wurden über den Querschnitt im Testfeld 2, die tiefsten Werte in horizontaler Richtung im Testfeld 1 festgestellt.

Schlussfolgerungen

Die Alkali Aggregat Reaktion (AAR) verursacht eine Ausdehnung des Betons und ist mit einer mehr oder weniger intensiven Rissbildung verbunden. Die Wasseraufnahme und die Feuchtigkeit des Betons, insbesondere die Kernfeuchte bei massigen Bauteilen, sind ganz entscheidende Grössen für die Entwicklung von AAR-Schäden. Eine Instandsetzung betroffener Bauwerke kann die Reaktion meist nicht wesentlich aufhalten. Eine Überwachung der Ausdehnung ist deshalb in vielen Fällen unerlässlich.

Bei der **Rorbachbrücke** wurden seit 2008 periodische Deformetermessungen durchgeführt. Sie zeigen, dass die Ausdehnung infolge AAR nicht bzw. noch nicht zum Stillstand gekommen ist, obwohl die Betonfeuchtigkeit wegen der nach wie vor wirksamen Hydrophobierung und der belüfteten Bedachung in den letzten Jahren stetig abnahm. Da für den Vorsatzbeton ein AAR-beständiger Beton eingesetzt wurde, muss dieser Befund auf die weitere Ausdehnung des alten Kernbetons zurückgeführt werden. Die bei der **Stützmauer Eisten** berechneten AAR-bedingten Längenänderungen variieren stark. Die Wirkung der Hydrophobierung auf die Entwicklung der AAR kann noch nicht schlüssig beurteilt werden.

Periodische Deformetermessungen, periodische Bestimmungen der Rissbreitenindices oder geodätische Messungen eignen sich nur beschränkt für die Überwachung der Längenänderung bzw. der AAR-bedingten Ausdehnung von Bauteilen. Die Hauptschwierigkeit liegt bei der schwierigen bzw. fast nicht möglichen Temperaturkompensation und/oder ungenügenden Präzision. Voraussetzung für den Einsatz dieser Methoden ist, dass a) die Ausdehnungsrate relativ gross ist oder die Messungen über einen sehr langen Zeitraum erfolgen und b) die Messungen immer zur gleichen Jahreszeit durchgeführt werden. In der Schweiz ist dazu der Spätsommer (August) geeignet. Weiter haben händische Messungen den Nachteil, dass die Zugänglichkeit zum Bauwerk gewährleistet sein muss. Dies kann v.a. bei alpinen Bauwerken in steilem Gelände zusätzliches Sicherheitspersonal benötigen. Ausserdem ist das Risiko für Messfehler unter solchen Bedingungen erhöht.

Die kontinuierliche Bestimmung der Längenänderung mit Extensometern ist zielführend. Bei einer ausreichenden Messfrequenz erlaubt die Auswertung die Bestimmung des "scheinbaren" Wärmeausdehnungskoeffizienten. Damit ist es möglich, die Längenänderungen nachzurechnen und die AAR-bedingte Längenänderung zu ermitteln. Ein weiterer Hauptvorteil der kontinuierlichen Messungen besteht darin, dass eine erste Beurteilung der Entwicklung der AAR bereits nach 1 bis 3 Jahren möglich ist, während bei periodischen Messungen normalerweise eine wesentlich längere Messdauer von mehreren Jahren notwendig ist.

Literatur

- [1] Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) in der Schweiz, cemsuisse (Verband der Schweizerischen Cementindustrie), 2005. Verfügbar unter:
http://www.cemsuisse.ch/cemsuisse/forschung/projekte_aar_cemsuisse/index.html?lang=de
- [2] F. Hunkeler, Ch. Merz und P. Kronenberg, „Alkali-Aggregat-Reaktion: Grundlagen und Massnahmen bei neuen und bestehenden Kunstbauten“, Dokumentation 8213, Bundesamt für Strassen ASTRA, 2007 pp. 132 (unter www.admin.astra.ch als pdf erhältlich)
- [3] Ch. Merz, F. Hunkeler und A. Griesser: Schäden durch Alkali-Aggregat-Reaktion an Betonbauten in der Schweiz, Forschungsauftrag AGB 2001/471, Bericht VSS Nr. 599 (2006). Bericht kann über <http://www.tfb.ch/de/Publikationen/Publikationsliste.html> herunter geladen werden
- [4] Ch. Merz und A. Leemann, Validierung der AAR-Prüfungen für Neubau und Instandsetzung, Forschungsaufträge AGB 2005/023 und AGB 2006/003, Bericht VSS Nr. 648 (2012)
- [5] Merkblatt SIA 2042, Vorbeugung von Schäden durch die Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) bei Betonbauten (2012)
- [6] C. Bühlmann, Instandsetzung der Rorbachbrücke der SBB im Kanton Uri, Veranstaltung Bau und Wissen, Nr. 894621/22, Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) bei Betonbauten: Aktueller Stand der Kenntnisse und Massnahmen zur Vermeidung (2010)
- [7] F. Hunkeler, P. Kronenberg, U. Püschner, C. Merz, Instandsetzung und Monitoring von AAR-geschädigten Stützmauern und Brücken, VSS Bericht Nr. 651 (2013)

.