

AKR-Schäden bei Bestandesbauten: Zustandsuntersuchungen, Beurteilung und Instand- setzungsmassnahmen – ein Erfahrungsbericht

Philipp Truffer, dipl. Bauing. ETH/SIA
Valtest AG, Lalden, Schweiz

Zusammenfassung

Bei der Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton handelt es sich um eine chemische Reaktion zwischen reaktiven Gesteinskörnungen und der alkalischen Zementmatrix im Beton. Der entsprechende Prozess ist an die Anwesenheit von Wasser gebunden. Während bei neuem Beton heute verschiedene Ansätze und Normvorgaben vorhanden sind, um einen genügenden dauerhaften Widerstand gegenüber AKR-Einwirkungen zu gewährleisten, stellt sich die Frage, wie geht man mit der AKR-Problematik bei Bestandesbauten um. Es werden Verfahren und Methoden der Zustandserfassung und Beurteilung von AKR-geschädigten Bauten aufgezeigt. Diese bilden die Grundlage für ein abgestütztes Instandsetzungskonzept. Die Ausführungen werden anhand eines Fallbeispiels aus der Praxis näher erläutert.

1. Der Mechanismus einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion

1.1 Was ist eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion AKR?

Bei einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion AKR reagieren reaktive Zuschlagstoffe im Beton mit den Alkalien der Porenlösung. Dabei entsteht ein quellfähiges Kieselgel, welches zu Ausdehnungen und Folgeschäden (Risse) in der Betonstruktur führt. Das durch die Wasseraufnahme verursachte Treiben kann Quelldrücke bis zu 20 N/mm^2 erreichen und zu Rissen und Abplatzungen im Beton führen. Es handelt sich dabei um eine latente und langsame Reaktion im Beton, wobei die ersten sichtbaren Anzeichen auf eine AKR-Schädigung normalerweise erst ab 10 bis 15 Jahre auftreten (mit dem Alter fortschreitende Schadensentwicklung). Mit zunehmendem Alter ist daher eine steigende Anzahl von AKR-geschädigten Bauwerken zu erwarten.

1.2 Das AKR-Produkt

Untersuchungen des Paul Scherrer Instituts PSI und der EMPA in der Schweiz haben die Struktur des Reaktionsprodukts von AKR herausgefunden. Während man bisher immer von einem Gel als Folgeprodukt von AKR gesprochen hat, haben nun die Forscher mittels Strukturanalyse na-

chgewiesen, dass es sich beim Alkali-Kalzium-Silikat-Hydrat um eine Silizium-Schichten-Kristallstruktur handelt [5]. Das durch eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion entstehende Folgeprodukt kann folglich in amorpher und kristalliner Form im Beton vorliegen.

1.3 Voraussetzungen

Damit eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton stattfindet, müssen folgende Voraussetzungen gleichzeitig erfüllt sein:

1.3.1 ausreichende Feuchtigkeit

Ein hoher Feuchtegehalt im Beton erleichtert den Transport von Alkalien zu den reaktiven Phasen (Wasser dient als Reaktionsmilieu). Kieselgel quillt infolge Wasseraufnahme und führt zu entsprechenden Treiberscheinungen. Diverse Untersuchungen zeigen, dass die AKR-bedingten Ausdehnungen direkt mit dem Feuchtegehalt im Beton korrelieren. Dabei spielt der Feuchtigkeitsgradient die wesentlichste Voraussetzung um die AKR auszulösen. Wo es immer trocken oder immer nass ist, finden keine bauwerksschädigenden AKR-Prozesse statt. Wichtig in diesem Zusammenhang ist zudem die Tatsache, dass bei einem Austrocknen des Betons reversible Schwindverformungen auftreten. Wogegen sich die irreversiblen AKR-bedingten Ausdehnungen bei jedem erneuten Feuchtigkeitseintrag kumulieren.

Was bedeutet feucht bzw. ab welcher Feuchtigkeit im Bauwerk ist mit AKR zu rechnen? Diverse Quellen sprechen von über 80 % r.F., welche für die Entwicklung einer AKR-Ausdehnung erforderlich sind (siehe u.a. [2]). Massige Bauteile wie z.B. Stützmauern trocken in der Regel nicht oder nur verzögernd aus und verfügen folglich über genügend Feuchte um einen AKR-Prozess auszulösen.

Offen bzw. noch nicht abschliessend geklärt ist noch der Einfluss von anderen Klimaparametern wie z.B. Trocken-Feuchtezyklen, Wärme, welche u.U. den Schädigungsverlauf massgebend beeinflussen könnten. Folgeschäden aus einer AKR-induzierten Schädigung z.B. Risse können zudem das AKR-Schadensbild noch zusätzlich verstärken (z.B. bei Frosteinwirkungen)

1.3.2. hoher wirksamer Alkaligehalt der Porenlösung

Die für den AKR-Prozess erforderlichen Alkalien werden über den Zement, Zusatzstoffe, (Zusatzmittel) oder eine Alkalienzufuhr von aussen z.B. Streusalz in den Beton eingebracht. Kieselsäure wird in starken Hydroxidlösungen aufgelöst. Die Löslichkeit von Kieselsäure nimmt mit steigendem pH-Wert zu.

Mit der Zugabe von bestimmten Zusatzstoffen wie z.B. Silikastaub kann der pH-Wert der Porenlösung soweit reduziert werden, dass es zu keiner (weiteren) AKR-Schädigung kommt.

1.3.3. reaktive Gesteinskörnung hinsichtlich Alkalien

Das Alkali-Kieselsäuregel wird bei der Reaktion von alkaliempfindlichen Bestandteilen in bestimmten Gesteinskörnungen mit den in der Porenlösung des Betons vorhandenen Alkalien (siehe 1.3.2) gebildet.

2. Zustandserfassung: Feststellung und Beurteilung von AKR und entsprechenden Schäden

2.1 Einleitung

Zur Festlegung des richtigen Zeitpunkts und von abgestützten Instandsetzungsmassnahmen bedarf es immer zuerst einer objektspezifischen Zustandserfassung und Zustandsbeurteilung. Die Zustandserfassung von AKR-geschädigten Bauwerken unterscheidet sich dabei von der Methodik und vom Vorgehen her nicht grundsätzlich von herkömmlichen Schadensbildern. Hingegen werden in diesem Zusammenhang z.T. andere Ansätze und Betrachtungsweisen zu Grunde gelegt. Zudem ist der eindeutige Nachweis einer AKR-

Schädigung vielfach aufwendiger als eine „normale“ Zustandserfassung.

Bei der Zustandserfassung von AKR-geschädigten Bauwerken stellen sich vielfach u.a. folgende Fragen:

- Handelt es sich beim vorliegenden Schadensbild effektiv um AKR (Diagnose der Schadensursache)?
- Wie gross ist der Umfang der Schädigung durch AKR (Zustandsbeurteilung)?
- Sind weitere Begleit- oder Folgeschäden z.B. durch Frosteinwirkungen am Bauwerk vorhanden?
- Ist das Schadensbild abgeschlossen bzw. die Schädigung abgeklungen?
- Mit welcher weiteren Schadensentwicklung ist zu rechnen (Prognose)?
- Was sind die Auswirkungen von Instandsetzungsmassnahmen?

2.2. Bauwerksakten

Das Studium der Bauwerksakten gibt vielfach schon erste Hinweise und Erkenntnisse über das Baujahr, die Exposition, die Bauteilabmessungen, konstruktive Eigenschaften sowie die zur Anwendung gekommenen Materialien (Mischungsentwurf Beton, Herkunft der Zuschlagstoffe, u.s.w.). Diese Informationen erlauben bereits eine erste grobe Einschätzung einer AKR-Gefährdung des Bauwerks.

2.3 Untersuchungen am Bauwerk

2.3.1. Visuelle Zustandserfassung

Eine wesentliche, visuell erkennbare Eigenschaft von AKR-Schäden sind die vorhandenen Risse am Bauwerk (siehe Abb. 2-1). Vielfach ist das Rissbild vergleichbar mit Schwindrissen (NetZRisse). Während bei den initial ausgelösten Schwindrissen die Ursache bei einem Verkürzen des Betons an der Oberfläche infolge Wasserverlust liegt, dehnt sich bei AKR der Beton im Innern (höhere Bauteilfeuchte, weniger Alkalienauslaugung) mehr aus als an der Oberfläche. Dies führt zu entsprechenden Rissen. Die durch AKR entstandenen Risse im Beton sind typischerweise 5 bis 50 Mikrometer breit. Vielfach werden schwindinduzierte Risse durch eine AKR-Schädigung im Beton zeitlich verzögert verstärkt.

Durch AKR-Schädigung hervorgerufene Risse an der Oberfläche können je nach Exposition zu einer weiteren Schädigung z.B. durch Frost-Tausalzeinwirkungen führen (chloridinduzierte Korrosion).



Abb. 2-1 typisches AKR-bedingtes Rissbild mit dunklen Riss säumen

Eine wichtige Charakterisierung bei AKR-bedingten Rissen sind deren Ablagerungen entlang der Risse. Dabei gilt es grundsätzlich zwischen AKR- verursachten Ablagerungen und zwischen Karbonatauslaugungen zu unterscheiden. Das Gel ist an und für sich durchsichtig, ist aber vielfach an der Oberfläche durch die Karbonatisierung oder durch die Aufnahme von Metallionen trüb und dunkel gefärbt. Die Rissausscheidungen aus AKR zeichnen sich typischer Weise durch dunklere Gelausscheidungen (Karbonatisierung), diejenigen aus Karbonatausfällungen durch eher hellere Verfärbungen aus. Neben feingliedrigen Netzris sen können aber auch klaffende Risse am Bau werk festgestellt werden.

Insgesamt reicht jedoch eine alleinige visuelle Zustandsuntersuchung nicht aus, um eine AKR- Schädigung vollständig zu diagnostizieren. Unter suchungen¹ in der Schweiz haben gezeigt, dass anhand der visuell feststellbaren Schadensphä nomene am Bauwerk das Ausmass der AKR ver ursachten Schäden um fast zur Hälfte überschätzt wird.

2.3.2 Rissindex

Der Ursprung von AKR-Schäden findet im Beton inneren statt. Die reaktiven Zuschlagkörner rea gieren zusammen mit Feuchte und mit der alkali schen Porenlösung des Betons. Es kommt zu einem Quellen in der Gesteins-Zementmatrix und zu Rissen im Bauteilinneren. Mit der Zeit pflanzen

sich die Risse bis an die Bauteiloberfläche fort und zeigen hier ein typisches Rissbild.

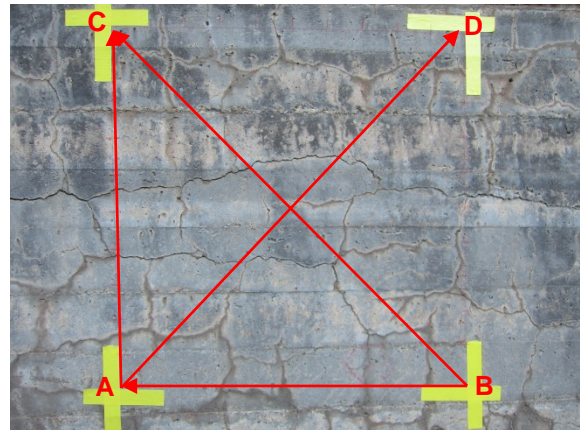


Abb. 2-2 Bestimmung des Rissindex mittels Rissbreitenmessungen entlang den ein gezeichneten Messlinien

Ein relativ einfaches und zerstörungsfreies Über wachungsinstrument bietet die Bestimmung des Rissindex am Bauwerk. Am Bauwerk wird ein Bereich mit dem möglichst grössten Schadens ausmass ausgewählt, wobei andere z.B. statisch bedingte Risse ausgeschlossen werden. Es wer den die Risse an der Bauteiloberfläche auf einer bestimmten Messstrecke oder einer Messfläche ausgemessen. Entlang der Messstrecken (siehe Abb. 2-2) werden die Rissbreiten mittels Risslupe ausgemessen. Bei der in der SIA 269/2 [2] auf geführten Methoden werden die kumulierten Rissbreiten innerhalb eines Quadratmeters ent lang von vier Richtungen bestimmt.

Wie eingangs erwähnt, bildet der Rissindex nicht das Schadensbild im Bauteilinneren ab (Messung an der Bauteiloberfläche). Er gibt jedoch, perio disch angewandt, Hinweise auf die Entwicklung der Rissentwicklung und erlaubt zusammen mit anderen Untersuchungen eine Gesamtbeurteilung der Schädigung und Schadensentwicklung durch AKR. Zudem erlaubt der Rissindex den Vergleich von AKR-betroffenen Bauwerken.

Aus den Rissbreitenbestimmungen können fol gende Messgrößen abgeleitet werden:

- Rissbreiten-Index: Verhältnis der kumulierten Rissbreiten zur ge samten Messstrecke in [mm/m]
- Rissbreitenentwicklung: Verhältnis der mittleren Rissbreite zum Alter des Bauwerks in [mm/Jahr]
- Ausdehnungsrate: Verhältnis der kumulierten Rissbreiten zur Messstrecke und Alter [mm/m a]

¹ Untersuchung AAR-Schäden an Kunstbauten des Tiefbauamtes Graubünden, 2007

Aus den so ermittelten Kennwerten können nach [2] folgende Schlüsse gezogen werden:

- Beurteilung des Schädigungsausmasses mit dem Rissbreitenindex RI
 - $RI \leq 1$: geringe Schädigung
 - $1 < RI < 3$ mittlere Schädigung
 - $RI \geq 3$ grosse Schädigung
- Beurteilung der bisherigen Schädigungsentwicklung
 - langsame AAR:
Rissbreitenentwicklung < 0.05 mm/Jahr
oder Ausdehnungsrate < 0.10 mm/m a
 - schnelle AAR
Rissbreitenentwicklung ≥ 0.10 mm/Jahr
oder Ausdehnungsrate ≥ 0.20 mm/m a

Das Schadensausmass bzw. das AKR-Risiko wird für jedes Bauteil einzeln beurteilt.

2.3.4 Bohrkerne

Für weitergehende materialtechnologische Untersuchungen müssen am Bauwerk Bohrkerne gezogen werden. Bei der Wahl der Bohrkernstandorte sollten vorgängig einige Überlegungen angestellt werden. Wo können überhaupt Bohrkerne gezogen werden (Zugänglichkeit, Spanngliedverlauf, usw.)? Werden die Bohrkerne im Bereich von oberflächlich erkennbaren Rissen gezogen, können dann, zumindest über die Bohrkerntiefe, Aussagen über den Rissverlauf gemacht werden. Zur Vermeidung von Feuchteverlusten und der Karbonatisierung empfiehlt es sich die Bohrkerne unmittelbar nach der Entnahme luftdicht in Plastiksäcke zu verpacken. Damit wird gleichzeitig auch ein Auslaugen von Alkalien aus dem Beton verhindert. Dies ist insbesondere bei der Verwendung der Bohrkerne für die Bestimmung des Restquellmasses (siehe 2.4.3) von entscheidender Bedeutung.

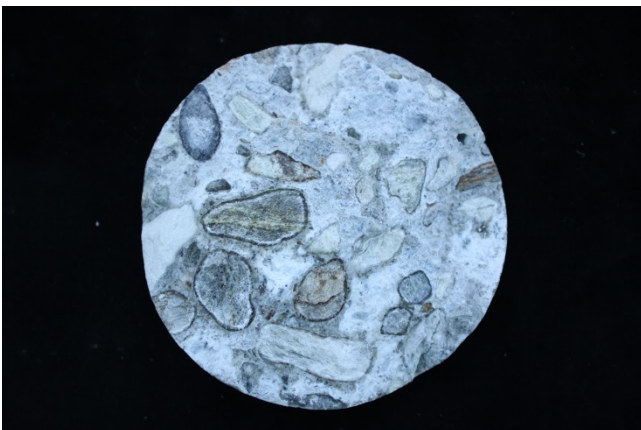


Abb. 2-3 *Bruchbild Bohrkernnahme
Gut zu erkennen sind die Reaktions-
säume rings um die Zuschlagskörner.*

Die Bohrkerne sind im Labor zu kennzeichnen und zu fotografieren und visuell zu untersuchen. Weissliche Ausscheidungen im Fehlstellen oder Lunkern im Beton sind dabei ein klares Indiz auf AKR-Produkte. Dies gilt auch für Reaktionssäume um Zuschlagskörner (siehe Abb. 2-3). Dabei gilt es zu beachten, dass Säume um Gesteinskörnungen u.U. auch auf Karbonatanwachsräume oder Karbonatverfüllungen entlang eines gestörten Korn-Zementsteinverbundes zurückzuführen sind.

2.3.5. Zerstörungsfreie Prüfverfahren

Risse sind bedingt durch den Quellvorgang im Beton eine Begleiterscheinung einer AKR-Schädigung. Für die Beurteilung der Tragsicherheit spielt der Rissverlauf im Bauteilinnern eine entscheidende Bedeutung. In der DAfStb-Empfehlung [6] steht hierzu folgende Aussage. Die durch die betonschädigende AKR entstandenen Risse im Beton knicken nach wenigen Zentimetern ab und verlaufen dann etwa parallel zur Oberfläche. Falls diese absolut formulierte Aussage zutrifft, müsste bei diesen Bauwerken grundsätzlich die Gefahr von grossflächigen, oberflächenparallelen Schalenbildungen und Betonablösungen gerechnet werden. Die durch den Autor gemachten Erfahrungen und Erkenntnisse lassen zumindest Zweifel an dieser allgemein formulierten Aussage aufkommen. Hier überwiegt die Feststellung, dass die Anzahl von Rissen, die im Innern senkrecht zur Bauteiloberfläche verlaufen vielfach gegenüber Rissen parallel dazu überwiegen.

Nichtsdestotrotz ist es im Zusammenhang mit der Zustandserfassung von AKR-geschädigten Bauwerken wichtig, Aussagen über mögliche Schalenbildungen und deren Gefährdung machen zu können. Bohrkerne aus dem Bauwerk können hierzu nur beschränkt und vor allem nur punktuelle Informationen liefern. Zur Beantwortung dieser Fragestellung bieten sich hierzu die modernen zerstörungsfreien Prüfverfahren ZfP an.

Eine physikalische Eigenschaft von akustischen Messverfahren wie Ultraschall oder Impact-Echo ist die Tatsache, dass sich die eingeleiteten elastischen Wellen am Übergang vom Beton zu Luft vollständig reflektieren. Es kommt zu einer Totalreflektion. Dabei reichen schon wenige tausendstel Millimeter Luftraum im Bauteil aus, um zu einer Totalreflektion zu führen. Einschränkend muss jedoch erwähnt werden, dass auf der anderen Seite nur schon minimale Ankoppelungen z.B. über Zuschlagskörner Schallbrücken darstellen und folglich nicht das gesamte Signal reflektiert wird. Insgesamt erlauben die erwähnten Messverfahren, empfehlenswerter Weise in Kombination mit ergänzenden Untersuchungen oder Pro-

benahmen, ein Bauteil flächig und zerstörungsfrei auf mögliche oberflächenparallele Schalenbildungen an Bauteilen zu detektieren und zu lokalisieren.



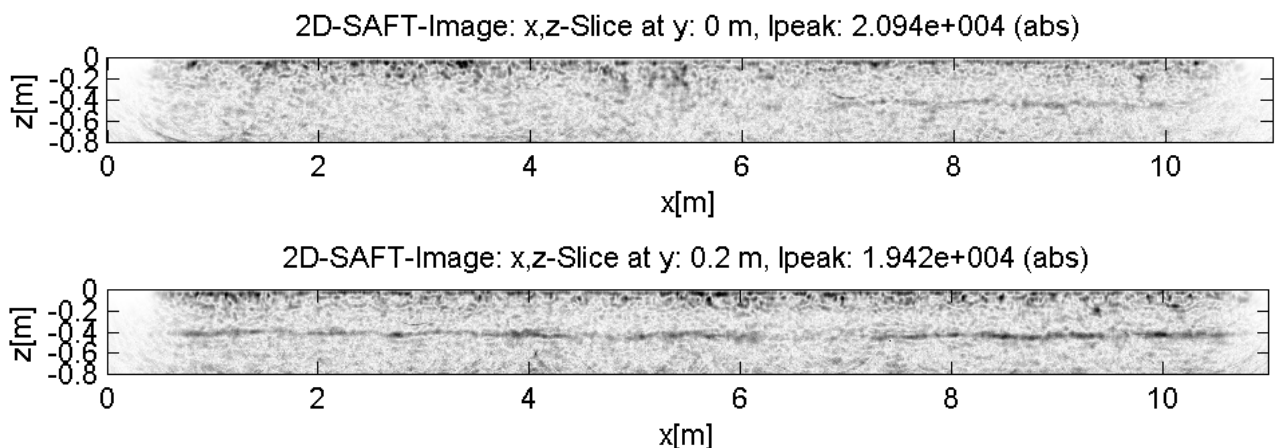
Abb. 2-4 klaffender Längsriss an der Oberseite der Brückenbrüstung

Die Anwendung einer Ultraschallmessung an einer AKR-geschädigten Eisenbahnbrücke soll am nachfolgenden Beispiel erläutert werden.



Abb. 2-5 Ultraschall-Tomografie bei einer AKR-geschädigten Eisenbahnbrücke

Abb. 2-6 Ultraschall-Tomogramme, oben ca. 20 cm, unten ca. 40 cm ab OK Brüstung



Beim Bauwerk handelt es sich um zwei Trogbrücken mit beidseitig angeordneten Brüstungen mit einer Wandstärke von 40 cm. Die Brüstungen sind u.a. durch oben liegende klaffende Längsrisse (Rissbreiten bis 6 mm) geschädigt (siehe Abb. 2-4).

An den Seitenflächen der Brüstungen wurden mittels Ultraschall auf zwei unterschiedliche Höhen zwei Messspuren gemessen (siehe Abb. 2-5). Ziel der Messungen war es festzustellen, wie tief die an der Oberfläche erkennbaren Risse in die Brüstungen reinreichen.

Die Abb. 2-6 zeigt zwei ausgewertete Ultraschall-Tomogramme. Das obere zeigt die Spur ca. 20 cm, das untere die Spur ca. 40 cm ab Oberkante Brüstung. Die Auswertung der unteren Spur zeigt bis auf den Bereich zwischen 6 und 7 Metern ein klares Rückwandecho, welches der effektiven Wandstärke entspricht. In der oberen Spur zeigt sich zwischen 1 und 7 Metern kein Rückwandecho. Das relative geringe Signal-Rausch-Verhältnis lies auf mögliche Gefügestörungen in diesen Bereichen schliessen. Die weiteren Untersuchungen bestätigten, dass in den Bereichen mit fehlendem Rückwandecho der an der Oberfläche erkennbare Riss bis in diese Tiefen durchschlägt.

2.4 Laboruntersuchungen

2.4.1 Mechanische Kennwerte

Die Bestimmung von mechanischen Kennwerten des zu untersuchenden Betons wie der Druckfestigkeit, der Zugfestigkeit, des E-Moduls, der Porrenkennwerte und weiteren kann im Rahmen der Zustandsuntersuchung von AKR-geschädigten Bauwerken Sinn machen und zusammen mit anderen Erkenntnissen die Diagnose vertiefen. So kann bei einem Beton durch eine AKR-Schädigung die Zugfestigkeit um 50 bis 70 %, die Druckfestigkeit zwischen 25 und 60 % und der Elastizitätsmodul bis zu 70 % vermindert werden.

Diese Untersuchungsverfahren werden im Rahmen des vorliegenden Vortrags nicht weiter behandelt.

2.4.2 Mikroskopische Gefügeanalysen an Dünnschliffen

Mikroskopische Untersuchungen an Dünnschliffen bilden die Grundlage für die Bestätigung und den Umfang (Schadensausmass) einer AKR-Schädigung und liefern zudem den Nachweis allfällig anderer Schädigungsmechanismen. Die Mikroskopie stellt ein wichtiges Instrument bei der Analyse von AKR-Schäden dar und erlaubt die korrekte Interpretation der Ergebnisse von anderen Prüfuntersuchungen.

Aus den Bohrkernen oder Handstücken werden ca. 30 x 50 mm grosse Proben für die Dünnschliffherstellung entnommen. Die Proben werden anschliessend mit fluoreszierendem Epoxidharz imprägniert und auf eine Dicke von rund 20 µm (20/1000 mm) heruntergeschliffen. Der Dünnschliff kann dann unter ultraviolettem Durchlicht zur Erkennung von Poren, Rissen, der Porosität des Zementsteins sowie der Verteilung des Zuschlags und des Bindemittels untersucht werden. Im polarisierten Durchlicht kann die Bindemittelart und die Gesteinsart der Zuschlagstoffe, bei zementhaltigen Bindemitteln die Karbonatisierung und der Hydratationsgrad ermittelt bzw. abgeschätzt werden.

AKR-geschädigte Betone zeigen häufig auch Etringit ausfällungen in Rissen oder in Poren. Dies kann mikroskopisch gut nachgewiesen werden. Dies ist zudem ein Hinweis auf eine erhöhte Feuchte im Beton.

2.4.3. Restquellmass

Nebst einem eindeutigen Nachweis einer AKR-Schädigung und deren Ausmass ist es insbesondere im Hinblick auf eine Instandsetzung wichtig zu wissen, ob künftig mit einer weiteren Zunahme der Schädigung infolge des Quellens im Beton zu rechnen ist oder ob allenfalls keine wirksamen Alkalien mehr zur Verfügung stehen.

Das verbleibende Ausdehnungspotenzials eines AKR-geschädigten Betons kann mittels dem Restquellmass bestimmt werden. Die aus dem Bauwerk entnommenen Bohrkern (D=100 mm) werden auf eine Länge von 200 mm zugeschnitten. An den Mantel- und Stirnflächen der Bohrkern werden Messmarken für Längenmessungen aufgeklebt. Mittels der Messbolzen an den Bohrkernenden werden die Ausdehnungen in Längs-

richtung (Bohrkernachse) bestimmt. Bei den an den Mantelflächen aufgebrauchten Marken werden insgesamt vier Messungen in zwei rechtwinklig zueinander liegenden Richtungen quer zur Bohrkernachse durchgeführt (Querdehnung).

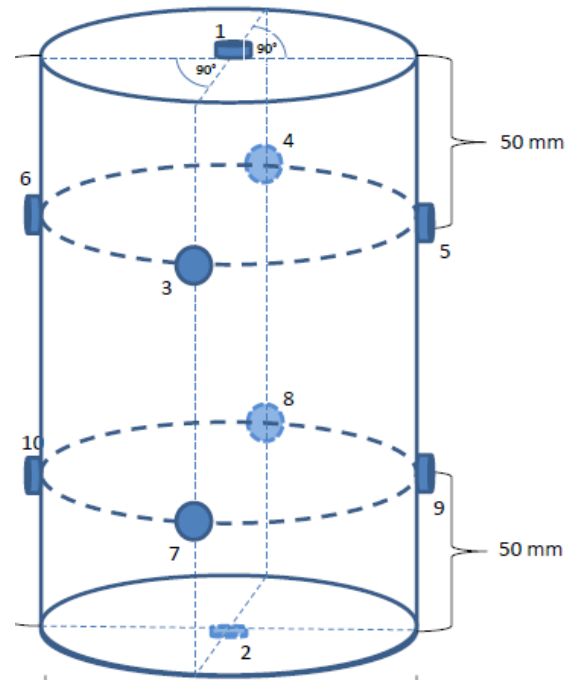


Abb. 2-7 Schema Messanordnung Restquellmessung am Bohrkern



Abb. 2-8 Abstichmessung am Bohrkern

Die so vorbereiteten und vorgelagerten (hierauf wird im Rahmen des Vortrags nicht eingegangen) Prüfkörper werden anschliessend in einem Reaktor bei 38 °C und 100 % relative Feuchte eingelagert. Danach erfolgt monatlich eine Gewichtsmessung sowie eine Messung der Ausdehnungen bei 20 °C.

Die Messung zur Bestimmung des Restquellmasses dauert normalerweise fünf Monate, kann aber bedarfsabhängig durchaus auf bis zu zwölf Monate verlängert werden.

3. Instandsetzung von AKR-Schäden

3.1 Ausgangslage und Ansatz

Grundsätzlich geht es bei der Instandsetzung von AKR-Schäden einerseits darum den AKR-Prozess zu unterbinden bzw. zu minimieren. Erst anschliessend geht es dann darum die entstandenen Schäden fachgerecht instanzzusetzen.

Wie unter 1.3 beschrieben, gibt es drei Voraussetzungen für eine AKR-Schädigung von Betonbauteilen

- ausreichende Feuchtigkeit
- hoher wirksamer Alkaligehalt der Porenlösung
- reaktive Gesteinskörnung hinsichtlich Alkalien

Die oben aufgeführten Voraussetzungen müssen gleichzeitig erfüllt sein, d.h. fehlt eine dieser Voraussetzungen findet keine AKR statt. Dies bildet folglich ein Ansatz um im Rahmen einer Instandsetzung eine weitere AKR-Schädigung zu unterbinden. Wo kann also bei einer der drei aufgeführten Bedingungen eingegriffen bzw. diese so verändert werden, dass der AKR-Prozess im Beton gestoppt wird?

3.2 Reduktion der Feuchtigkeit

Das bei einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion entstandene Gel bleibt bei einer Wasseraufnahme quellfähig. Bei diesem Instandsetzungsansatz geht es darum die Wasseraufnahme und damit auch die Quelldruckerhöhung im Beton zu minimieren oder gar zu unterbinden. Der in der Literatur oder Normen [2] aufgeführte Wert von 80 % r.F. im Beton ist wissenschaftlich nicht eindeutig belegt. Die Tatsache, dass vor allem wechselbewitterte Bauteile stark von AKR betroffen sind, lässt vermuten, dass nebst dem eigentlichen Feuchtwert noch zusätzliche Parameter bei der Alkali-Kieselsäure-Reaktion mitwirken. Hierzu zählen die Exposition des Bauwerks sowie der Feuchtigkeitsgradient, die Wärme, die Sonneneinstrahlung sowie dadurch verursachte Pumpeffekte bei einer Wiederbefeuchtung von ausgetrocknetem Beton.

Diverse Untersuchungen zeigen in diesem Zusammenhang, dass beispielsweise im Erdreich hinterfüllte Stützmauern, welche auf der Vorderseite von der Witterung geschützt sind, trotz dem hohen Feuchtegehalt keine AKR-Schäden aufweisen. Hingegen zeigen die wechselbewitterten Oberflächen der Stützmauern entsprechende Schäden. Dies lässt darauf schliessen, dass bei frei bewitterten Bauteilen der schädigende Prozess primär von der Vorderseite her ausgelöst wird. Die anhaltende Austrocknung sowie periodi-

sche Temperaturänderungen im Bauteil führen zu Pumpeffekten und zu einem latenten Feuchtigkeitsgradienten von der Oberfläche in die Tiefe.

Wenn es folglich darum geht, die Feuchtezufuhr von der Oberfläche her zu unterbinden, stehen hierzu verschiedene bewährte Instandsetzungskonzepte aus der herkömmlichen Betoninstandsetzung zur Verfügung. Die Reduzierung des Feuchtigkeitsgehalts im Beton soll dabei durch die Verhinderung oder Reduzierung der Wasseraufnahme erreicht werden. Grundsätzlich müssen dabei zwei unterschiedliche Herangehensweisen unterschieden werden.

Einerseits müssen die an der Oberfläche vorhandenen Risse verschlossen werden. Dabei geht es darum wasserführende Risse ab rund 0.2 mm dauerhaft zu verschliessen. Hierzu stehen verschiedene Verfahren von Rissinjektionen zur Verfügung. Im Zusammenhang mit Rissinjektionen bei AKR-Schäden sind folgende Punkte zu beachten. Bei AKR ist davon auszugehen, dass u.U. weiter mit entsprechenden Rissbreitenänderungen zu rechnen ist. Zudem sind die Risse vielfach noch feucht. Folglich macht ein kraftschlüssiges Verschliessen von AKR-bedingten Rissen keinen Sinn. PUR-Injektionen können in feuchte Risse durchgeführt werden, wobei darauf zu achten ist, dass keine Produkte eingesetzt werden, bei welchen es durch die vorhandene Bauteilfeuchte zu einer zusätzlichen Volumen- und Druckzunahme kommt. Injektionen mit Feinstzementen sind für diese Anwendungen eher nicht zu empfehlen, da hierbei einerseits zusätzliche Feuchte ins Bauteil gebracht wird und andererseits die Risse kraftschlüssig verschlossen werden.

Nebst dem Verschliessen der Risse geht es dann darum die Oberfläche vor dem Eindringen von Feuchte zu schützen. Auch hierzu gibt es verschiedene bewährte Oberflächenschutzsysteme. Bei der Wahl des Systems muss neben der Reduktion der Wasseraufnahme (z.B. über die Festlegung eines maximalen Wasseraufnahmekoeffizienten) auch auf die Gewährleistung einer genügenden Wasserdampfdiffusion geachtet werden. Die DAfStb-Empfehlung [6] empfiehlt hierzu beispielsweise einen Teildiffusionswiderstand von kleiner 2.5 m.

Für die entsprechenden Instandsetzungsmassnahmen bei AKR-Schäden liegen insgesamt noch wenige Erfahrungswerte insbesondere auf die weitere Schadensentwicklung nach der Instandsetzung vor. In der Praxis werden hierzu entweder Hydrophobierungen (OS 1) oder beschränkt rissüberbrückende Beschichtungen (OS 5) eingesetzt. Bei der Anwendung von Hydrophobierun-

gen empfiehlt sich der Einsatz von Tiefenhydrophobierungen. Schliesslich ist u.U. bei bestimmten Anwendungen auch eine zusätzliche Verkleidung bzw. Abdeckung des Bauteils zur Verhinderung der Wasseraufnahme denkbar.

3.3 Wirksamer Alkaliengehalt

Die wirksamen Alkalien werden bei einem AKR-Prozess verbraucht. Dabei handelt es sich um einen langfristigen Prozess. Sind die zur Verfügung stehenden Alkalien verbraucht, stoppt die AKR. Die Problematik liegt nun aber darin, dass man auf die Alkalien im Festbeton keinen Einfluss nehmen kann.

Zudem lassen Messergebnisse vermuten, dass bei den Alkali-Kieselsäure-Reaktionen selber u.U. weitere zusätzliche wirksame Alkalien freigesetzt werden und somit den Schädigungsprozess wieder antreiben.

Nebst den eigenen im Beton vorhandenen Alkalien können zusätzlich auch solche von aussen dazukommen. Dies betrifft vor allem Bauwerke wie Betonstrassen oder Betonkreisel, welche einer Taumittleinwirkung ausgesetzt sind. Eine Reduktion des Taumittleinsatzes ist hierbei vielfach aufgrund der vorgesehenen Nutzung nicht möglich.

Ist im Rahmen einer Zustandserfassung eine AKR-Schädigung nachgewiesen worden, stellt sich bei der Massnahmenevaluation eine wichtige Frage: Ist die AKR abgeschlossen oder ist mit einer weiteren Zunahme der entsprechenden Schäden zu rechnen? Diese Frage kann mittels der Bestimmung des Restquellmasses (siehe 2.4.3) beantwortet werden.

Die Kombination von Alkalien und reaktiven Zuschlagskörnern führt zusammen mit Wasser zu einem Quelldruck im Beton, welcher schliesslich zu den typischen, oben beschriebenen, Schäden führt. Insbesondere bei grossen, massigen Bauwerken wie Staumauern wurde auch schon der Ansatz der Druckentlastung ausgeführt. Dabei wurden die Spannungen im Bauwerk mit vertikalen Trennrissen reduziert und gleichzeitig ein Fortschreiten der Verformungen eingedämmt. Bei der Staumauer von Salfante im Kanton Wallis wurden mit diesem Ansatz im oberen Bereich der Mauer insgesamt zweiundzwanzig vertikale Trennschnitte (Entlastungsschnitte) mit einer Breite von 11 Millimetern und einer maximalen Höhe von 24 Metern ausgeführt. Die Schnitte wurden anschliessend abgedichtet [10]. Der Projektverfasser geht davon aus, dass sich aufgrund der

weiterhin stattfindenden AKR die Schnitte nach und nach wieder schliessen werden.

3.4 Reaktive Gesteinskörnungen

Zuschlagstoffe weisen eine unterschiedliche Reaktionsempfindlichkeit auf. Die Gesteinskörnungen sind in einem Beton eingearbeitet und können nachträglich nicht mehr verändert oder gar ersetzt werden. Folglich können bei dieser Randbedingung bei einem bestehenden Bauwerk keine Massnahmen eingeleitet werden.

3.5. Fazit

Die Ausführungen zeigen, dass es bei der Instandsetzung von AKR-Schäden nur wenige Ansätze gibt. Es fehlen noch Erfahrungen und Auswertungen aus durchgeführten Instandsetzungsmassnahmen. Vielfach macht u.U. ein Überwachungskonzept (Monitoring) Sinn.

4. Fallbeispiel

4.1 Ausgangslage

Bei der Felsenkirche in Raron (Kanton Wallis) handelt es sich um eine im Berginnern erbaute Kirche. Das Bauwerk wurde 1974 erbaut. Der Aussenbereich mit dem überdachten Eingangsbereich, dem Glockenjoch sowie zahlreichen Stützmauern wurde in Sichtbeton erstellt (siehe Abb. 4-1).



Abb. 4-1 Felsenkirche Raron, Aussenansicht mit Stützmauer (Vordergrund) und Glockenjoch

Die visuelle Zustandserfassung zeigte ein typisches AKR-bedingtes Schadensbild mit zahlreichen Netzzissen und einer Vielzahl von klaffenden

Rissen im Bereich der bewitterten Bauteile. Die gravierendsten Risschäden bei den Stützmauern wurden bereits einmal instandgesetzt (siehe Abb. 4-2). Nach dem Verschliessen der Risse mit einem Zementmörtel traten die Risse aber bereits nach kurzer Zeit wiederum auf. Die Instandsetzung musste insgesamt als misslungen eingestuft werden.



Abb. 4-2 Teilansicht Stützmauer mit durchgeführter Rissinstandsetzung

4.2 Zustandserfassung

Im Rahmen der Zustandserfassung wurden folgende Schritte durchgeführt:

- detaillierte visuelle Zustandserfassung
- Erfassung der Bewehrungsüberdeckungen
- punktuelle Bestimmung der Karbonatisierungstiefen
- Bestimmung des Rissindex
- mikroskopische Gefügeanalysen an Dünnschliffen
- Bestimmung des Restquellmasses AKR des bestehenden Betons mittels einem Auslagerungsversuch im Reaktor (38 °C, 100 % r.F.)
- zerstörungsfreie Untersuchungen mittels Radar und Ultraschall

Die Bauteile wiesen insgesamt eine genügende Bewehrungsüberdeckung auf. Die Karbonatisierungstiefe hatte trotz des Alters die Bewehrung noch nicht erreicht. Es konnten keine weiteren Betonschäden festgestellt werden. Die mikroskopischen Gefügeanalysen an den Dünnschliffen bestätigten eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton als Ursache für die erhebliche Rissbildung. Die durchgeführte Ultraschall-Tomografie zeigte keine oberflächenparallele Schalenbildungen bei den verschiedenen Stützmauern.

Die an den entnommenen Bohrkernen durchgeführten Auslagerungsversuche im Reaktor zur Bestimmung des Restquell-Masses zeigten unterschiedliche Resultate. Während beim Glockenjoch, welches visuell verhältnismässig wenige Schäden aufwies, wurde ein erhebliches Restquellmass festgestellt (siehe Abb. 4-2). Währendem konnte bei den stark geschädigten Stützmauern keine bzw. nur eine unbedeutende Restquellung mehr nachgewiesen werden. Es konnte folglich davon ausgegangen werden, dass bei den bewitterten Stützmauern das Alkaliendepot aufgebracht war und es somit zu keinen weiteren quellbedingten Gefügeschäden kommen würde.

Aufgrund dieser Ausgangslage wurde folgendes Instandsetzungskonzept gewählt. Beim Glockenjoch machte aufgrund des nachgewiesenen erhöhten Restquellmasses eine Rissinstandsetzung oder gar eine rissüberbrückende Beschichtung keinen Sinn. Hier wurde auf die Betonoberflächen eine Tiefenhydrophobierung (OS 1) appliziert.

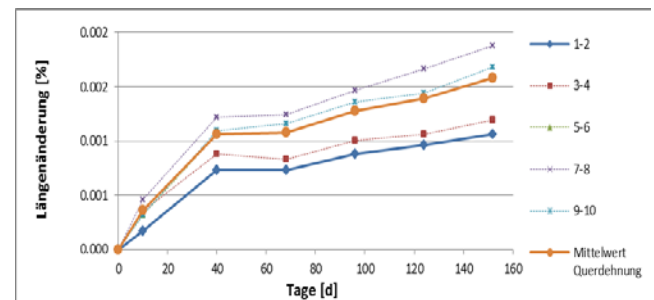


Abb. 4-2 Beispiel einer Restquellmass-Messung Die Nummerierung der einzelnen Messstrecken bezieht sich auf die Bezeichnungen im Schema in Abb. 2-7.

In Rücksprache mit dem Auftraggeber wurde beschlossen die das Ortsbild prägende Stützmauer vor der Kirche abzubauen und durch eine neue zu ersetzen. Eine ästhetisch befriedigende Instandsetzung der Risschäden auf dem Sichtbeton wurde im vorliegenden Fall eher ausgeschlossen. Dies vor dem Hintergrund, dass einzelne Bereiche der Bauten keine Instandsetzung erforderlich machten und die misslungene Instandsetzung nur schwer an die bestehende Bausubstanz anzugleichen war.

Der Abbruch der Stützmauer wurde benutzt, um vertiefte Informationen und Erkenntnisse über den Umfang der Risschädigung und vor allem über den Rissverlauf zu erhalten. Hierzu wurde die Stützmauer mittels Diamantsägeblättern in insgesamt vierzehn vertikale Schnitte vollständig durchtrennt (siehe Abb. 4-3). Die dadurch entstandenen Teilstücke der Mauer wurden anschliessend einzeln abgebrochen. Dabei wurden die entsprechenden Schnittflächen ausgemessen und doku-

mentiert sowie der Verlauf der an der Bauteiloberfläche sichtbaren Risse über die Bauteiltiefe erfasst (siehe Abb. 4-4).



Abb. 4-3 Einsatz der schienengeführten Wandsäge (Nassschnittverfahren)



Abb. 4-4 Ansicht Schnittfläche Wandelement
Gut zu erkennen ist der Verlauf der Risse von der Oberfläche in die Wand hinein.



Abb. 4-5 Ansicht Schnittfläche Wandelement
horizontaler Trennriss

Die Auswertung der entsprechenden Untersuchungen lässt sich wie folgt zusammenfassen:

- Auf den einsehbaren wechselbewitterten vertikalen Maueroberflächen waren zahlreiche Risse festzustellen. Praktisch alle diesbezüglichen Risse verliefen senkrecht in die Wand hinein. Es konnte nirgends eine oberflächenparallele Schalenbildung festgestellt werden.
- Die Risse verliefen zu einem grossen Teil horizontal bis rund einem Drittel der Mauerstärke. Vereinzelt waren Trennrisse, welche über die gesamte Bauteilstärke verliefen.
- Auf der Luft zugekehrten Rückseite der Stützmauer wurden wesentlich weniger Risse festgestellt.
- Auf den erdberührten Maueroberflächen wurden keine oder nur einzelne kleine Risse dokumentiert.
- Im Wandfussbereich waren an einzelnen Stellen durchgehende horizontal verlaufende Trennrisse vorhanden. Die Wandelemente konnten in diesen Bereichen ohne grossen Kraftaufwand umgestossen werden. Die Tragsicherheit der Wand war in diesen Bereichen nicht mehr gewährleistet.
- Die Untersuchungen bestätigten insgesamt die mittels den Ultraschallmessungen gemachte Beurteilung, dass keine Schalenbildung vorlag. Hingegen konnten die durchgehenden Trennrisse insbesondere im Wandfussbereich nicht vorgängig detektiert werden.

Literaturverzeichnis

- [1] Merkblatt SIA 2042 Vorbeugung von Schäden durch die Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) bei Betonbauten, Ausgabe 2012
Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [2] Norm SIA 269/2 (2011) Erhaltung von Tragwerken – Betonbau
Schweizerischer Ingenieur- und Architektenverein, Zürich
- [3] DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Massnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton (Alkali-Richtlinie), Ausgabe Oktober 2013
Deutscher Ausschuss für Stahlbeton e.V. – DAfStb, Berlin
- [4] Alkali-réaction du béton – Essai d'expansion résiduelle sur béton durci
Project de méthode d'essai LPS N°. 44
Laboratoire Central des Ponts et Chaussée, Paris Cedex
- [5] Application of micro X-ray diffraction to investigate the reaction products formed by the alkali-silica reaction in concrete structures
R. Dähn et al, Cement and Concrete Research 79 (2016) 49-56
- [6] Empfehlung für die Schadensdiagnose und Instandsetzung von Betonbauwerken, die infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion geschädigt sind
Arbeitskreis 2 "Bauwerksdiagnose" des DAfStb-Unterausschusses "Alkalireaktion"
Beton, 10/2015
- [7] Diagnosis of alkali-aggregate reactions in dams
SFOE-Project SI/500863-01
Andreas Leemann, Michele Griffa, EMPA Dübendorf
- [8] Betoninstandsetzung AKR-geschädigter Bauteile – Projekterfahrungen und Hinweise für die Praxis
4. Kolloquium Erhaltung von Bauwerken, Technische Akademie Esslingen, 27.-28. Januar 2015
Dr.-Ing. Martin Mangold
- [9] Vorgehen bei der Zustandserfassung und Beurteilung von AAR geschädigten Bauwerken
Bau und Wissen, Wildegg – Fachveranstaltung 114382
Dr. Heidi Ungricht
- [10] Entlastungsschnitte für die Staumauer von Salanfe
energeia Nummer 5, September 2013
Newsletter des Bundesamtes für Energie BFE
- [11] Wenn Staumauern altern
Fachbeitrag 06/2015 Bundesamt für Energie, Bern