

Beurteilung von Bauwerken hinsichtlich einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Diagnosis of a harmful alkali-silica reaction in concrete structures

Eberhard Siebel, Düsseldorf; Jürgen Dahms, Eckernförde

Übersicht

Schäden an Betonbauwerken können durch unterschiedliche Ursachen hervorgerufen werden. In einigen Fällen kann hieran eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) beteiligt sein. Eine sorgfältige Analyse dieser Schäden ist unerlässlich, wenn eine Instandsetzung durchgeführt werden soll. Besteht der Verdacht, daß eine AKR an den Schäden beteiligt ist, ist zur Klärung neben der eingehenden Schadensaufnahme am Bauwerk und den normalen Betonuntersuchungen im Labor, wie z.B. der Bestimmung der Rohdichte, der Festigkeit und der Carbonatisierungstiefe, eine Lagerung von Probekörpern in der 40°C-Nebelkammer mit Beobachtung der Riß- und Gelbbildung und mit der Bestimmung der Längenänderung der Probekörper unerlässlich. Darüber hinaus ist die innere Rißstruktur an Anschliffen, die vor und nach der Nebelkammerlagerung aus Bohrkernen entnommen wurden, zu untersuchen. Alle Ergebnisse müssen sorgfältig zusammengestellt und ausgewertet werden, um beurteilen zu können, ob und inwieweit eine AKR einen Einfluß auf die Entstehung eines Schadens hatte.

1 Einleitung

Die Ermittlung der Ursachen von Bauwerksschäden erfordert umfangreiche Untersuchungen, da häufig mehrere Vorgänge einen Schaden auslösen und die Schadensbilder auch bei unterschiedlichen Ursachen zum Teil sehr ähnlich sind. Dies gilt besonders für Bauwerke, bei denen eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) als Schadensursache vermutet wird, da das äußere Erscheinungsbild der Schäden – d.h. Rißbildung, Absprengungen und Ausblühungen – nur erste Hinweise auf die Schadensursache gibt. So unterscheidet sich z.B. die durch eine AKR verursachte Rißbildung (siehe Bild 1) nur wenig von dem Rißbild, das durch Spannungsüberschreitung infolge von Schwinden (siehe Bild 2), Quellen und Temperaturänderung verursacht wird. Eine zuverlässige Schadensbeurteilung ist nur nach einer sorgfältigen Schadensaufnahme am Bauwerk und eingehenden Laboruntersuchungen möglich.

Eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion tritt in zahlreichen Betonen auf. Meistens bleibt sie ohne Bedeutung für die Eigenschaft des Betons.

Abstract

Damage to concrete structures may have different causes. In some cases, an alkali-silica reaction (ASR) can be the reason. A careful analysis of the damage is indispensable when repair works are to be carried out. In the case of suspected ASR, it is imperative that, apart from a precise assessment of damage on the structure and the usual concrete investigations in the laboratory, e.g. the determination of density, strength and depth of carbonisation, test pieces have to be stored in the 40°C fog-chamber to observe the formation of cracks and alkali-silica gel and to determine their lengthchange. Additionally, the internal structure of the cracks has to be evaluated on finely ground sections taken from drilled cores before and after storage in the fog-chamber. All results must be recorded and evaluated with care in order to judge if or how far ASR is involved in the damage of a structure.

1 Introduction

Extensive investigations are required to determine the causes of damage in structures as the damage is frequently initiated by several processes and the signs are sometimes very similar even when the causes are different. This is especially true of structures where it is suspected that an alkali-silica reaction (ASR) is a cause of damage because the external appearance of the damage – i.e. cracking, splintering and efflorescence – gives only an initial indication of the cause of damage. The cracking pattern caused by an ASR, for example, (see Fig. 1) differs only slightly from the cracking caused by overstressing as a result of contraction (see Fig. 2), swelling, or temperature change. Reliable assessment of the damage is only possible after careful survey of the damage on the structure and thorough laboratory investigations.

ASR occurs in a great many concretes, but in most cases it has no significant effect on the properties of the concrete. An ASR can only be described as **harmful** if it is the cause of disruption to the in-

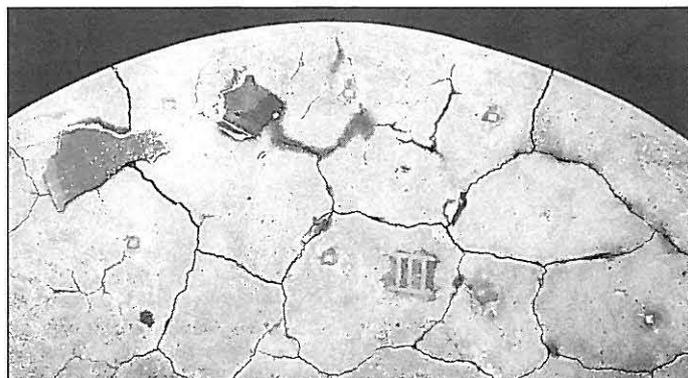


Bild 1 Rißbildung, an der eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion beteiligt war.

Fig. 1 Cracking showing a harmful ASR involved.

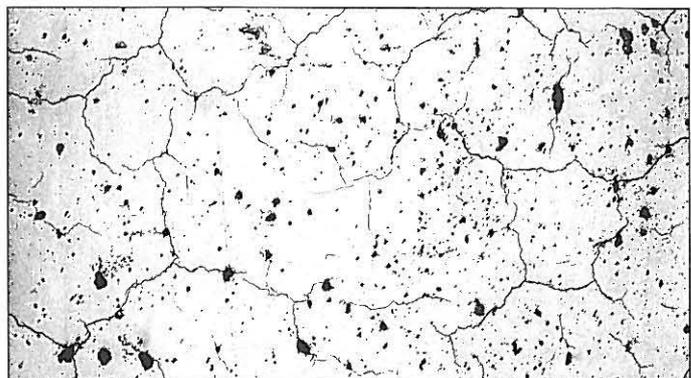


Bild 2 Rißbildung durch Zwangsspannungen infolge von Schwinden des Betons.

Fig. 2 Cracking due to stresses caused by restrained shrinkage deformation.

Von einer **schädigenden** AKR kann nur gesprochen werden, wenn durch sie innere Gefügestörungen des Betons mit nachfolgender erheblicher Rißbildung ausgelöst werden und diese Gefügeschäden zu einer Gefährdung der Standsicherheit und/oder deutlichen Minderung der Dauerhaftigkeit führen.

Eine genaue Schadensanalyse ist gerade bei Verdacht auf eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion unbedingt erforderlich, weil nur bei zutreffender Kenntnis der Schadensursache eine erfolgreiche Instandsetzung möglich ist. Zahlreiche auch in jüngster Zeit nicht sachgerecht durchgeführte Instandsetzungsmaßnahmen, wie z.B. Beschichtungen von geschädigtem Beton, der von der Rückseite oder von unten weiter durchfeuchtet werden kann, können bei einem Beton, der potentiell reaktionsfähig ist, eine weitere intensive schädigende AKR bewirken.

Die Schadensanalyse muß es ermöglichen, gegebenenfalls unter Beteiligung eines Tragwerksplaners, festzustellen, ob und in welchem Ausmaß die Standsicherheit, die Gebrauchsfähigkeit und die Dauerhaftigkeit beeinträchtigt sind, oder ob nur die Ästhetik eines Bauteils oder Bauwerks gelitten hat. Auch die möglichen Instandsetzungsmaßnahmen sollten sich aus der Bauwerksuntersuchung und der Schadensanalyse ableiten lassen.

Bauwerke, bei denen eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion auftreten kann, sind wegen der für die Schädigung erforderlichen Feuchtigkeit zuzufuhr in der Regel Außenbauteile wie Brücken, Parkdecks, Wasserbauwerke, Küstenschutzanlagen, Betonstraßen- und Flugplatzdecken.

Verschiedene Institute, insbesondere die Materialprüfanstalt Eckernförde und das Forschungsinstitut der Zementindustrie, haben sich in den vergangenen Jahren eingehend mit der Analyse von Schäden infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktion bei Betonbauwerken auseinandergesetzt [1]. In diesem Beitrag werden die dabei gewonnenen Erfahrungen dargestellt und Anregungen für eine zielführende Schadensanalyse gegeben. Dabei fließen auch Erfahrungen ein, die in den europäischen Nachbarländern [u.a. 2, 3] und Amerika [4, 5] bei Untersuchungen an AKR-geschädigten Bauwerken gesammelt wurden.

Als grobe Leitlinie für eine Schadensuntersuchung kann das in Bild 3 dargestellte Flußdiagramm dienen.

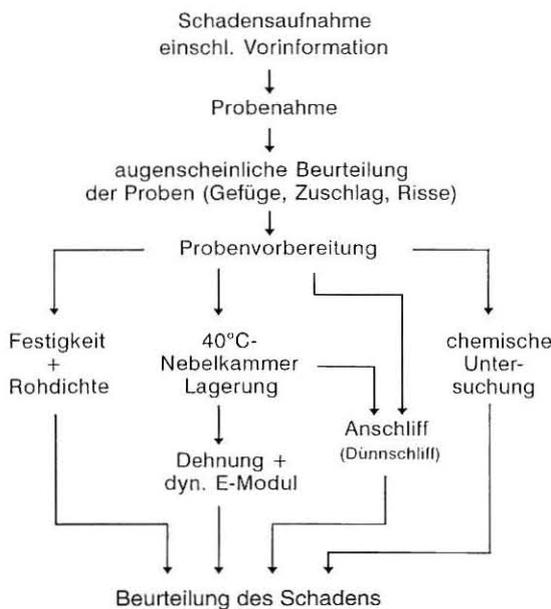


Bild 3 Vorgehensweise für die Schadensanalyse

2 Schadensaufnahme

Vor der eigentlichen Schadensaufnahme am Bauwerk sind alle zur Verfügung stehenden Informationen über das Bauwerk und den Beton zusammenzutragen. Hierfür sind Auskünfte von Planern, Bauherren, bauausführenden Firmen und Baustofflieferanten unerlässlich.

ternal microstructure of the concrete resulting in substantial cracking, and if this damage to the microstructure poses a threat to stability and/or leads to a significant reduction in durability.

Accurate damage analysis is absolutely essential if a harmful ASR is suspected; successful repair work is only possible if the cause of damage is correctly understood. Even recently much repair work has been carried out incorrectly, e.g. coating damaged concrete where moisture can penetrate again from the rear or from below, and can produce a further, intensive, harmful ASR in concrete which is potentially reactive.

Analysis of the damage must make it possible, if necessary with the participation of a designer of loadbearing members, to determine whether and to what extent the stability, serviceability and durability have been impaired or whether it is only the aesthetics of a component or structure which have suffered. From the investigation of the structure and the damage analysis it should also be possible to work out the possible measures for reinstatement.

Structures in which an alkali-silica reaction can occur are normally external components like bridges, parking areas, hydraulic engineering structures, sea defences, concrete carriageways, and airport runways because of the moisture input needed to create the damage.

In the past various institutes, especially the Materials Testing Laboratory in Eckernförde and the Research Institute of the German Cement Industry, have made a thorough analysis of damage caused by the alkali-silica reaction in concrete structures [1]. This article describes the findings obtained and makes some suggestions for a carefully directed analysis of the damage. This includes information which was gathered in neighbouring European countries [including 2, 3] and America [4, 5] during investigations of structures damaged by ASR.

The flow diagram shown in Fig. 3 can serve as a rough guideline for damage investigation.

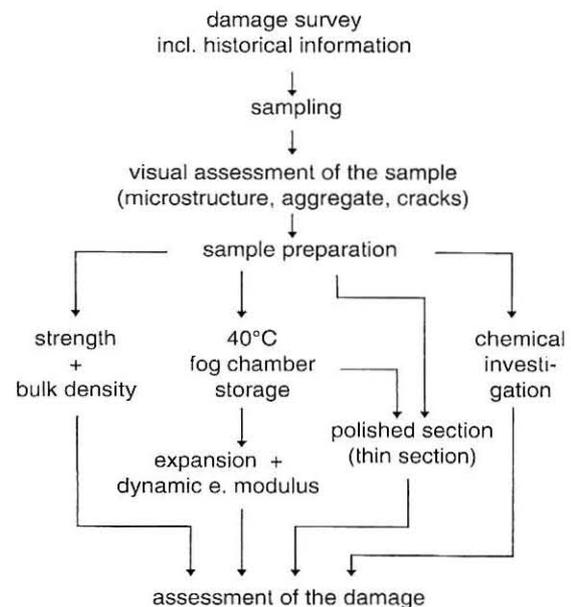


Fig. 3 Procedure for damage analysis

2 Damage survey

All the available information on the structure and the concrete must be gathered before surveying the actual damage to the structure. For this purpose it is essential to obtain information from the consultants, clients, contractors and building materials suppliers.

The information should be listed as shown in Table 1. After this information has been obtained, which may have to be completed while the other investigations are taking place, the damage is surveyed visually on site. For this purpose the structure is divided into individual

Die Informationen sollten entsprechend Tafel 1 zusammengestellt werden. Nach Erhalt dieser Informationen, die u.U. während der weiteren Untersuchungen zu vervollständigenden sind, erfolgt die Schadensaufnahme nach Augenschein vor Ort. Hierzu wird das Bauwerk in einzelne Bauteile aufgeteilt. Die Aufteilung einer Brücke erfolgt zum Beispiel nach Pfeilern, Überbau und Widerlagern und diese wiederum in einzelne Abschnitte, wobei die Himmelsrichtung zu berücksichtigen ist.

Tafel 1 Informationen über den Beton und das zu untersuchende Bauwerk, die vom Planer, Bauherrn, bauausführender Firma und Baustofflieferant anzufordern sind.

1	Bauwerk
2	Planer, ausschreibende Stelle
3	ausführende Firma
4	Bauzeit von / bis
5	Art der Konstruktion
6	Witterungsverhältnisse während der Bauzeit
7	Beanspruchung des Bauwerkes seit Erstellung (z. B. Salzbeaufschlagung im Winter)
8	Schadensverlauf, z. B. wann erste Risse festgestellt
9	Betonfestigkeitsklasse <u>geplant, lt. Leistungsverzeichnis</u>
10	<u>nachgewiesen bei Güteprüfung</u>
11	Beurteilung lt. Bericht der Fremdüberwachung
12	besondere Betoneigenschaften
13	<u>Art</u>
14	Zement <u>Gehalt in kg/m³</u>
15	<u>Na₂O-Äquiv.</u>
16	<u>Vorkommen, Art</u>
17	Beton- Zuschlag <u>Gehalt in kg/m³</u>
18	zusammen- <u>Alkaliempfindlichkeitsklasse</u>
19	setzung <u>Zusatzmittel</u>
20	<u>Art</u>
21	<u>Gehalt in mg/kg Zement</u>
22	<u>Zusatzstoffe</u>
23	<u>Art</u>
24	<u>Gehalt in kg/m³</u>
25	<u>Sieblinie</u>
26	<u>w/z-Wert</u>
25	Nachbehandlung lt. Tagebuch
26	Sonstige Angaben

Jeder Teilfläche ist eine Schadensstufe zuzuordnen. Bewährt hat sich die Einteilung in sechs Stufen (siehe Tafel 2). Schadensstufe 0 bedeutet, daß an dieser Teilfläche praktisch keinerlei Schäden sichtbar sind, während die Schadensstufe 5 für die Fläche gewählt wird, die eine erhebliche Rißbildung aufweist. Bei einigen Bauwerken, bei denen erhebliche Rißbildungen, d.h. die Stufen 4 und 5, nicht aufgetreten sind, kann eine Untersuchung trotzdem erforderlich sein, um frühzeitig eine Weiterentwicklung des Schadens beurteilen zu können. Im Hinblick auf eine mögliche AKR sind neben Rissen zusätzlich Abplatzungen, Ausscheidungen und Ausblühungen zu vermerken. Sichtbare Korrosionsschäden müssen unbedingt festgehalten werden. Alle Flächen sind in einer tabellarischen Übersicht nach Schadensstufen unterteilt zusammenzustellen. Diese Übersicht erleichtert nicht nur die Beurteilung der Schadensursache, sondern bietet auch eine wertvolle Hilfe bei der späteren Aufstellung eines Leistungsverzeichnisses für die Instandsetzung.

Table 1 Information which has to be obtained from the consultant, client, contractor and building materials supplier about the concrete and the structure under investigation

1	structure
2	consultant, office issuing tender documents
3	contractor
4	building period from / to
5	nature of the design
6	weather conditions during the building period
7	stresses on the structure after erection (e.g. salt attack in winter)
8	course of damage, e.g. when first cracks were detected
9	concrete strength class <u>planned, acc. to bill of quantities</u>
10	<u>as shown by quality control check</u>
11	assessment acc. to report from third-party inspection
12	special concrete properties
13	<u>type</u>
14	concrete cement <u>content in kg/m³</u>
15	<u>Na₂O equivalent</u>
16	<u>deposit, type</u>
17	concrete aggregate <u>content in kg/m³</u>
18	com- <u>alkali sensitivity class</u>
19	position admixture <u>type</u>
20	<u>content in mg/kg cement</u>
21	<u>type</u>
22	<u>content in kg/m³</u>
23	<u>grading curve</u>
24	<u>w/c ratio</u>
25	curing acc. to daybook
26	other information

components. A bridge, for example, is divided into piers, superstructure and abutments, and these are again divided into individual sections, for which the points of the compass should be noted.

A stage of damage should be assigned to each subsidiary area. Division into six stages (see Table 2) has proved appropriate. Damage stage 0 means that there is practically no damage visible on this subsidiary area, while damage stage 5 is chosen for areas which exhibit substantial cracking. For some structures in which substantial cracking, i.e. stages 4 and 5, does not occur it may still be necessary to carry out an investigation so that any further development of the damage can be assessed at an early stage. As well as cracks any

Table 2 Stages of damage for visual inspection of the individual components

damage stage	feature
0	no damage
1	isolated cracks hair cracks
2	individual larger cracks up to 0.5 mm
3	several larger cracks > 0.5 mm
4	severe cracking with numerous cracks > 0.5 mm
5	very severe cracking with numerous cracks > 1.0 mm

Tafel 2 Schadensstufen für die augenscheinliche Beurteilung der einzelnen Bauteile

Schadensstufe	Merkmal	
0	keine Schäden	
1	vereinzelt Risse	Haarrisse
2	einzelne größere Risse	bis 0,5 mm
3	mehrere größere Risse	> 0,5 mm
4	starkes Rißbild mit zahlreichen Rissen	> 0,5 mm
5	sehr starkes Rißbild mit zahlreichen Rissen	> 1,0 mm

3 Entnahme von Betonproben

Parallel zur Schadensaufnahme sind für die Laboruntersuchungen Bohrkerns sowohl aus geschädigten als auch aus nicht geschädigten Bauteilbereichen zu entnehmen. Die Anzahl der Bohrkerns ist je nach dem vorhandenen Schadensumfang und der Bauteilgröße festzulegen. Anhaltswerte für die Mindestabmessungen der Bohrkerns und den Entnahmebereich gehen aus Tafel 3 hervor.

Tafel 3 Durchmesser der zu entnehmenden Bohrkerns in Abhängigkeit von den Laborprüfungen

Prüfung	Bohrkerne		
	Entnahmebereich		Durchmesser (mindestens) cm
	geschädigt	nicht geschädigt	
Betongefüge (augenscheinlich)	+	+	10
Rißbreite/-tiefe	+		5
Anschliff, ggf. Dünnschliff	+	+	10 (15)
Lagerung in der 40°C-Nebelkammer	+	+	10
Carbonatisierung		+	5
Chloridgehalt in unterschiedl. Tiefen		+	5
chem. Untersuchung (Alkaligehalt)		+	10

Bei der Entnahme ist auf Besonderheiten zu achten, wie z.B. auf ein mögliches Zerfallen eines Bohrkerns in mehrere Abschnitte infolge von Schalenrissen senkrecht zur Bohrkernachse. Schalenrisse sind ein typisches Merkmal für Schäden infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Die Entnahmestellen der Bohrkerns sind in einen Lageplan einzuzichnen und die Bohrkerns sorgfältig und dauerhaft zu kennzeichnen. Bewährt hat sich die Kennzeichnung von kleinen und größeren Bohrkerns mit unterschiedlichen Ziffern, z.B. mit römischen und arabischen. Bohrkernabschnitte erhalten von der Herstellungsoberseite aus gesehen fortlaufende Numerierungen. In den Transportbehältern sind sie durch Plastikhalbschalen vor mechanischer Beschädigung zu schützen.

4 Laboruntersuchungen

4.1 Beschreibung und Vorbereitung der Probekörper

Unmittelbar nach Einlieferung der Bohrkerns ins Labor sind Abmessungen, Rißbreiten und Rißiefen zu bestimmen und tabellarisch festzuhalten. Weiterhin ist das Betongefüge zu erfassen. Auch un-

spalling, secretion or efflorescence should be noted in the light of a possible ASR. Visible corrosion damage should definitely be recorded. All areas must be listed by damage stage in tabular form. This list not only makes it easier to assess the cause of damage but also provides valuable assistance during the subsequent preparation of a schedule for repair work.

3 Taking concrete samples

At the same time that the damage is being surveyed drill cores should be taken from the damaged and undamaged sections of the component. The number of drill cores should be specified to suit the extent of the existing damage and the size of the component. Reference values for minimum dimensions of the drill cores and the sampling area are given in Table 3.

Table 3 Diameters of the drill cores to be taken, depending on the laboratory examinations involved

test	drill cores		
	sampling areas damaged	undamaged	diameter (minimum) cm
concrete microstructure (visual)	+	+	10
crack width/depth	+		5
polished section possibly thin section	+	+	10 (15)
storage in 40°C fog chamber	+	+	10
carbonation		+	5
chloride content at different depths		+	5
chemical examination (alkali content)		+	10

During sampling attention must be paid to any special feature, such as the possible collapse of a drill core into several sections as a result of shell cracks perpendicular to the axis of the drill core. Shell cracks are a typical feature of damage caused by an alkali-silica reaction. The sampling position of the drill core should be marked on a location plan, and the drill cores labelled carefully and durably. Labelling small and large drill cores with different numerals, e.g. Roman and Arabic, has proved worthwhile. Drill core sections are numbered progressively from the outer surface. They should be protected from mechanical damage in the transport containers by plastic half-shells.

4 Laboratory investigations

4.1 Description and preparation of the test pieces

Immediately after a drill core has been delivered to the laboratory its dimensions, crack widths and crack depths must be measured and recorded in tabular form. The microstructure of the concrete should also be recorded. Colour differences of the mortar matrix in a drill core or between different drill cores must be recorded in order, for example, to establish whether the cement was changed during the concreting. A petrographical determination of the nature of the stone is also important; in every case it is necessary to establish whether all drill cores contain the same aggregate. If possible the drill cores should be photographed and all findings recorded in tabular form. A record must be made of which tests were carried out on the respective drill cores.

4.2 Bulk density and compressive strength

The bulk density and compressive strength have to be measured to assign the concrete to different classes. This requires drill cores taken from undamaged areas of the component and brought down to a diameter to height ratio of 1. It is also permissible to use undama-

terschiedliche Farbe der Mörtelmatrix eines Bohrkerns oder zwischen verschiedenen Bohrkernen muß dokumentiert werden, um z.B. festzustellen, ob während des Betonierens der Zement gewechselt wurde. Wesentlich ist auch eine petrographische Bestimmung der Gesteinsart; auf alle Fälle ist festzustellen, ob alle Bohrkern denselben Zuschlag enthalten. Nach Möglichkeit sind die Bohrkern zu fotografieren und alle Feststellungen tabellarisch zu erfassen. Dabei ist festzuhalten, welche Prüfungen an dem jeweiligen Bohrkern durchgeführt werden.

4.2 Rohdichte und Druckfestigkeit

Zur Einordnung des Betons in verschiedene Klassen ist die Rohdichte und die Druckfestigkeit zu bestimmen. Hierfür sind Bohrkern aus ungeschädigten Bereichen des Bauteils zu verwenden und auf ein Verhältnis von Durchmesser zu Höhe von 1 zu bringen. Zur Ermittlung der Rohdichte und Druckfestigkeit können auch ungeschädigte Teile von oberflächlich geschädigten Bohrkernen herangezogen werden. Es ist darauf zu achten, daß die Bohrkern möglichst keine Bewehrung enthalten (siehe auch DIN 1048 Teil 2). Die an den entsprechend vorbereiteten Probekörpern ermittelte Druckfestigkeit erlaubt keinen zuverlässigen Rückschluß auf die noch vorhandene Resttragfähigkeit des geschädigten Bauteils.

4.3 Nebelkammerlagerung (40°C/100% rel. Luftfeuchtigkeit)

Für die Beurteilung einer AKR ist die Lagerung von Bohrkern in einer 40°C-Nebelkammer unbedingt erforderlich, um ggf. eine beschleunigte Reaktion auszulösen. Hierfür sollten Bohrkern mit mindestens 10 cm Durchmesser und einer Länge von mindestens 20 cm, besser 30 cm, verwendet werden. Vor Einlagerung sind Meßzapfen auf zwei gegenüberliegenden Mantellinien anzubringen, und der Bohrkern ist rd. 5 Minuten in Wasser zu tauchen. Vor der Einlagerung sowie während der Nebelkammerlagerung, und zwar nach einem Tag und dann in angemessenen Zeitabständen, wird die Länge der Bohrkern gemessen und hieraus die Dehnung berechnet. Wenn möglich, ist die Änderung des dynamischen E-Moduls, z.B. mit der Resonanzfrequenzmethode, abzuschätzen. Eine Abnahme des E-Moduls gibt Hinweise für eine beginnende oder zunehmende innere Gefügeschädigung des Betons (siehe Bild 4). Weiterhin müssen augenscheinliche Veränderungen wie Ausblühungen, Abplatzungen und Ribbildungen festgehalten werden. Wenn die Dehnung der Bohrkern über einen längeren Zeitraum von ein bis zwei Monaten nicht mehr wesentlich zunimmt, können die Bohrkern aus der Nebelkammer entnommen werden.

Von ausgewählten Bohrkern sind nach der Nebelkammerlagerung Anschliffe herzustellen und mikroskopisch zu beurteilen (siehe Abschnitt 4.4). Als Vergleich sind Beurteilungen von Anschliffen heranzuziehen, die von zugehörigen Bohrkern vor der Nebelkammerlagerung hergestellt wurden. So können Rückschlüsse auf die weitere Entwicklung der AKR im Bauwerk gezogen werden.

Bohrkerne eines Bauteils können sich bei der Nebelkammerlagerung sehr unterschiedlich verhalten. Hierfür sind folgende Ursachen zu nennen:

- Die Betone können sehr verschieden zusammengesetzt sein. Dies läßt sich häufig am Betongefüge erkennen.
- Die Bewehrung kann die Längenänderung beeinflussen.
- Bei unterschiedlicher Lage im Bauwerk, unterschiedlicher Beanspruchung und unterschiedlicher Durchfeuchtung kann eine AKR den Beton im Bauwerk unterschiedlich stark vorgeschädigt haben. Selbst wenn an geschädigten Bohrkern keine nennenswerte Dehnung in der Nebelkammer festgestellt wird, kann eine vorherige AKR nicht ausgeschlossen werden. Vielmehr ist anhand ungeschädigter Bohrkern der gleichen Zusammensetzung zu prüfen, ob die Voraussetzungen für eine AKR gegeben waren.
- Einige wenige reaktive Zuschläge können bei Bohrkern mit kleinen Abmessungen zu erheblichen Dehnungen führen, während diese im Bauteil u.U. keinerlei Auswirkungen zeigen.

Auf eine AKR kann nur geschlossen werden, wenn die Dehnungen während der Nebelkammerlagerung deutlich die Anfangsdehnung infolge der Temperaturerhöhung bzw. infolge von Quellen durch Feuchtigkeitsaufnahme übersteigen (siehe Bild 4). Diese Anfangsdehnung liegt in der Größenordnung von rd. 0,2 bis 0,4 mm/m.

ged parts of superficially damaged drill cores for measuring the bulk density and compressive strength. Care should be taken that the drill cores contain as little reinforcement as possible (see also DIN 1048, Part 2). The compressive strengths measured on appropriately prepared test pieces do not allow any reliable conclusions to be drawn about the remaining load bearing capacity of the damaged component.

4.3 Fog chamber storage (40°C/100% relative humidity)

Storage of drill cores in a 40°C fog chamber to initiate an accelerated reaction, if applicable, is absolutely essential for diagnosing an ASR. The drill cores used for this purpose should have diameters of at least 10 cm and lengths of at least 20 cm, preferably 30 cm. Before storage measuring pegs should be fixed on two opposite generating lines and the drill core should be immersed in water for about 5 minutes. The length of the drill core is measured before storage and during the fog chamber storage – after one day and then at suitable time intervals – and the expansion is calculated. If possible the change in the dynamic modulus of elasticity should be estimated, e.g. with the resonance frequency method. A decrease in elastic modulus gives an indication of incipient or increasing damage to the internal microstructure of the concrete (see Fig. 4). Any visual changes, such as efflorescence, spalling or cracking, must also be recorded. When there is no longer any substantial increase in the expansion of the drill core over a fairly long period of one to two months the drill core can then be removed from the fog chamber.

After the fog chamber storage ground sections should be produced from selected drill cores and assessed by microscope (see Section 4.4). Assessments of ground sections which were produced from matching drill cores before fog chamber storage should be used as a basis for comparison. This makes it possible to draw conclusions about any further development of the ASR in the structure.

Drill cores from a component can behave very differently during fog chamber storage. This can be due to the following causes:

- The concretes can have very different compositions. This can often be identified in the concrete microstructure.

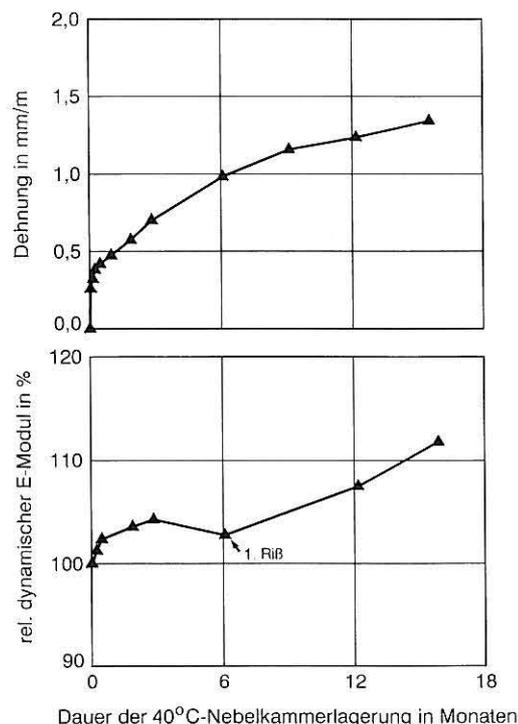


Bild 4 Längenänderung (oben) und dynamischer E-Modul (unten) eines Bohrkerns aus einer Betonfahrbahndecke mit Grauwacke während der Lagerung in einer 40°C-Nebelkammer

Fig. 4 Change in length (above) and dynamic modulus of elasticity (below) of a drilled core from a concrete road with greywacke during the storage in a 40°C fog-chamber

Weitere Ursachen für eine über die Anfangsdehnung hinausgehende Dehnungszunahme der Bohrkerne können neben einer AKR auch quellende Zuschläge sein. Auch ein langsames Rückkriechen (Quellen) des Betons, der im Bauteil unter Druck gestanden hat, muß mit in Betracht gezogen werden.

4.4 Mikroskopische Untersuchungen

Für die Erkennung einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion ist die mikroskopische Untersuchung von Anschliffen und in einigen Fällen von Dünnschliffen sehr hilfreich. Für die Anschliffe sollten größere Proben mit einer zu beurteilenden Fläche von mindestens rd. 10 cm x 10 cm geschliffen und poliert werden. Zweckmäßig können hierfür ein in Längsrichtung halbmäßig 10-cm-Bohrkern oder – noch besser – in Längsrichtung abgesägter Abschnitt eines 15-cm-Bohrkerns verwendet werden. Die Anschliffe sind vor der Einlagerung in die Nebelkammer herzustellen. Der übrige Teil dieser Bohrkerne ist anschließend in die Nebelkammer einzulagern. Bei 15-cm-Bohrkernen können daran auch die Untersuchungen nach Abschnitt 4.2 durchgeführt werden. Günstig ist es, wenn mehrere Anschliffe – verteilt von der Oberfläche bis zum Kernbeton – hergestellt werden können, um unterschiedlich tiefe Bereiche vergleichen zu können. Werden bei den Untersuchungen gleichzeitig auch die Luftporenkennwerte bestimmt [6], so können dazu diese Schliffe verwendet werden. Bei etwa 50-facher Vergrößerung sind die Anschliffe zu begutachten. Hierbei ist besonders auf Risse zu achten. Risse können z.B. infolge von Schwinden, von nicht ausreichendem Frostwiderstand oder infolge einer AKR auftreten. Auf eine AKR weisen Risse hin, die sich vom Innern des Zuschlags oder vom Zuschlagsrand in die Matrix hinein fortsetzen (siehe Bild 5), und von Gelbildungen (Alkali-Kieselsäure-Gel) begleitet werden. Bei sehr reaktiven Zuschlägen, wie z.B. Opalsandstein, ist i.d.R. sehr viel Gel zu finden. Bei weniger reaktiven Zuschlägen, wie z.B. Grauwacke, wird teilweise nur wenig Gel gebildet.

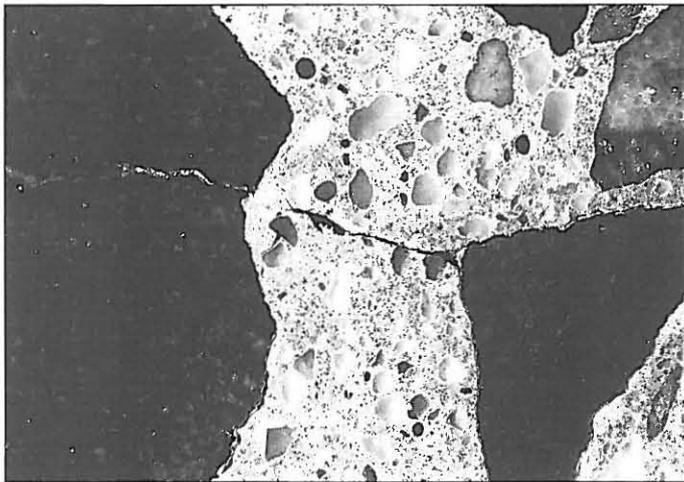


Bild 5 Riß durch ein Grauwackekorn, der sich in die Matrix hinein fortsetzt.

Fig. 5 Crack through a greywacke grain which grows into the matrix.

Ein für AKR typisches Rißbild liegt selten vor, da die Risse auch durch gleichzeitig wirkende Last- und Zwangsbeanspruchungen im untersuchten Bauwerksteil geprägt sein können. Im allgemeinen sind jedoch bei einer AKR im oberflächennahen Bereich Risse senkrecht zur Oberfläche zu finden, während in tieferliegenden Bereichen sehr unterschiedlich gerichtete Risse auftreten (siehe Bild 6). Wenige kleine Risse in und an einzelnen Zuschlägen, die sich nicht zu langen Rissen vereinigen, können zwar von einer AKR herrühren, müssen aber nicht zu einer Schädigung des Betons geführt haben.

Lassen sich Risse und Gel im Anschliff nicht eindeutig erkennen, so sind ggf. Dünnschliffe herzustellen, mit denen auch reaktive Zuschläge besser identifiziert werden können. Die Herstellung der

- The reinforcement can affect the change in length.
- With different positions in the structure, different stresses and different degrees of wetting an ASR can have caused differing degrees of preliminary damage to the concrete in the structure. Even if no appreciable expansion of a damaged drill core is detected in the fog chamber it is not possible to rule out an earlier ASR. It is then a matter of using undamaged drill cores of the same composition to check whether the preconditions for an ASR had been present.
- A few reactive aggregates can produce substantial expansions in small drill cores although they may not exhibit any effects at all in the component.

An ASR can only be inferred if the expansion during fog chamber storage is significantly greater than the initial expansion caused by the increase in temperature or by swelling caused by absorption of moisture (see Fig. 4). This initial expansion is of the order of 0.2 to 0.4 mm/m.

Another reason apart from an ASR for an increase in expansion of the drill core beyond the initial expansion can be aggregates which swell. Gradual return creep (swelling) of concrete which has been under pressure in the component must also be taken into account.

4.4 Microscopic investigations

Microscopic investigations of ground sections and, in some cases, of thin sections are very helpful for identifying alkali-silica reactions. Quite large samples with surfaces to be assessed of at least about 10 cm x 10 cm should be ground and polished for the ground sections. For this purpose it is appropriate to use as 10 cm drill core halved lengthwise or – even better – a section of a 15 cm drill core sawn lengthwise. The ground sections should be prepared before storage in the fog chamber. The other part of this drill core should then be stored in the fog chamber. With 15 cm drill cores the investigations can then be carried out as described in Section 4.2. It is an advantage if several ground sections – distributed from the surface to the central concrete – can be prepared to allow comparison of areas at different depths. If the air void characteristics [6] are also determined during the investigations then these ground sections can be used for this purpose. The ground sections should be examined at about 50x magnification. Particular attention should be paid to cracks. Cracks can occur as a result of, for example, contractions, inadequate freeze-thaw resistance or because of an ASR. An ASR is indicated by cracks which continue into the matrix from the inside of the aggregate or the edge of the aggregate (see Fig. 5), and are accompanied by gel formation (alkali-silica gel). With very reactive aggregates, such as opaline sandstone, there is generally a great deal of gel to be found, but the less reactive aggregates such as greywacke sometimes only form small quantities of gel.

A cracking pattern typical of an ASR is rarely found as the cracks can also be affected by the simultaneous action of load and constraint stresses in the component under investigation. However, cracks perpendicular to the surface are generally found in the region close to the surface with an ASR, while in the deeper regions the cracks occur in a variety of directions (see Fig. 6). A few small cracks in and at individual aggregate grains which do not join to form long cracks can in fact stem from an ASR without necessarily having damaged the concrete.

If cracks and gel cannot be clearly identified in the ground section then thin sections, in which reactive aggregates are easier to identify, should be prepared if possible. The preparation of thin sections and their assessment can only be carried out by laboratories with specialists who have had specific training [2, 7].

4.5 Chemical investigations

The determination of the concrete composition, and especially of the alkali content, using the procedure in DIN 52 170 should be evaluated very critically as the concrete composition measured is affected by carbonatic aggregates and the total alkali content is affected by aggregates which contain alkalis.

Alkalis which have penetrated into the concrete through the use of sodium chloride as deicing salt are difficult to determine directly. It can therefore be advisable to measure the chloride content at different depths and use this to infer the introduced alkali content. A 5 cm

Dünnschliffe und die Beurteilung kann nur von Labors mit hierfür ausgebildetem Fachpersonal durchgeführt werden [2, 7].

4.5 Chemische Untersuchungen

Die Bestimmung der Betonzusammensetzung und insbesondere des Alkaligehalts in Anlehnung an DIN 52 170 ist sehr kritisch zu bewerten, da die dabei ermittelte Betonzusammensetzung durch carbonatische Zuschläge und der Gesamtalkaligehalt durch alkalihaltige Zuschläge beeinflusst wird.

Alkalien, die durch Verwendung von Natriumchlorid als Streusalz in den Beton eingedrungen sind, lassen sich nur schwer direkt bestimmen. Es kann deshalb zweckmäßig sein, den Chloridgehalt in unterschiedlicher Tiefe festzustellen und hiermit auf den eingeführten Alkaligehalt zu schließen. Hierzu kann ein 5-cm-Bohrkern der Länge nach gespalten und die eine Hälfte dann von der Oberfläche aus in ca. 2-cm-Scheiben ebenfalls durch Spalten unterteilt werden, an denen der Chloridgehalt bestimmt wird. Die Carbonatisierung kann dann an der 2. Hälfte des 5-cm-Bohrkerns durch Ansprühen mit Phenolphthalein nach [6] ermittelt werden.

Zur qualitativen Bestimmung einer Alkali-Zuschlag-Reaktion wird teilweise auch die sogenannte Uranyl-Acetat-Methode [4] angewendet. Die Uranylionen werden von dem Alkali-Kieselsäure-Gel aufgenommen und bringen das Gel unter Einstrahlung von ultraviolettem Licht zum Leuchten. Die Untersuchung sollte nur von geübten Fachleuten durchgeführt werden. Bei unsachgemäßer Probenpräparation, z.B. einer zu langen Einwirkung des Uranyl-Acetats, kann das Erscheinungsbild falsch interpretiert werden. Selbst wenn Gel mit dieser Methode nachgewiesen wird, kann daraus nicht auf eine schädigende AKR geschlossen werden.

5 Beurteilung

Für die Beurteilung, ob und ggf. in welchem Maße eine AKR an den Schäden eines Bauwerks beteiligt war, können einzelne Ergebnisse irreführend sein und zu falschen Schlüssen führen. Es sind deshalb alle Untersuchungen zusammenzustellen und zu gewichten. Hierbei sind die in Tafel 4 aufgeführten Kriterien heranzuziehen.

Tafel 4 Notwendige Beurteilungskriterien zur Feststellung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Schadensaufnahme	Rißbild Absprengungen
Ausgangsstoffe	Zuschlagart und -menge Zementart und -menge
40°C-Nebelkammerlagerung	Gelausscheidung Rißbildung maximale Dehnung weitere Zunahme der Dehnung
Anschliff (ggf. Dünnschliff)	Rißstruktur Gel alkaliempfindliche Zuschläge weitere Beobachtungen (z.B. sekundäres Ettringit)

Aus den Vorinformationen über die ursprüngliche Betonzusammensetzung und die Ausgangsstoffe muß zuerst geschlossen werden, ob die stofflichen Voraussetzungen für eine AKR vorhanden sind. Wurde z.B. ein nicht reaktiver Splitt oder ein NA-Zement verwendet, so kann eine schädigende AKR ausgeschlossen werden. Es ist natürlich an dem Bohrkern die Übereinstimmung der geplanten und dokumentierten Betonzusammensetzung mit der tatsächlichen anhand von Bohrkernen zu überprüfen.

Wesentliche Erkenntnisse liefert die 40°C-Nebelkammerlagerung. Auch bei dieser Untersuchung müssen alle Einzelergebnisse bewertet werden. Neben Gelausscheidung und Rißbildung muß die Entwicklung der Dehnung in die Bewertung miteinbezogen werden. Besser als am Bohrkern selbst kann die Rißbildung an Anschliffen,

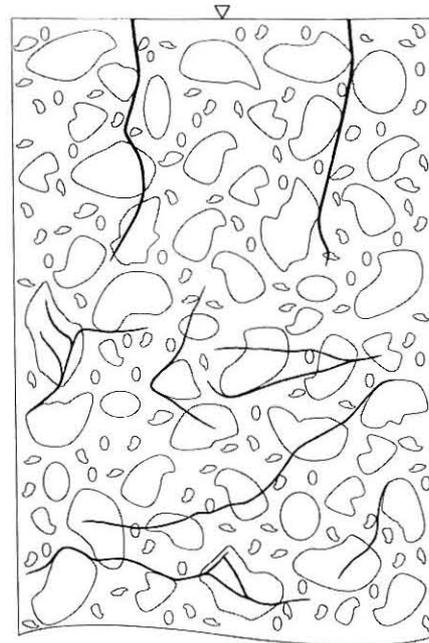


Bild 6 Systembild für die Rißbildung infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Fig. 6 Typical structure of crack formation due to ASR

drill core can be split lengthwise for this purpose; half of it is then subdivided into approximately 2 cm slices from the surface, also by splitting, for determining the chloride content. The carbonation can be measured on the 2nd half of the 5 cm drill core by spraying with phenolphthalein as described in [6].

In some cases the so-called uranyl acetate method [4] is also used for qualitative determination of an alkali-aggregate reaction. The uranyl ions are absorbed by the alkali-silica gel and cause the gel to luminesce when it is irradiated with ultraviolet light. The investigation should only be carried out by proficient experts. The image can be misinterpreted if the sample has not been prepared correctly, e.g. with excessively long exposure to the uranyl acetate. Even if gel is detected by this method it is not possible to infer a harmful ASR.

5 Assessment

Individual results can be misleading and lead to false conclusions when assessing whether and, if appropriate, to what extent an ASR has been involved in the damage. All the investigations should therefore be combined and weighted. The criteria listed in Table 4 should be used for this purpose.

From the historical information concerning the original concrete composition and the starting materials a decision must first be made as

Table 4 Evaluation criteria needed for establishing a harmful ASR

damage survey	cracking pattern splintering
starting materials	type and quantity of aggregate type and quantity of cement
40°C fog chamber storage	gel secretion cracking maximum expansion further increase in expansion
ground section (thin section if applicable)	crack structure gel alkali-sensitive aggregates further observations (e.g. secondary ettringite)

die aus Bohrkernen vor und nach der Nebelkammerlagerung entnommen wurden, beurteilt werden. Gegebenenfalls sind Dünnschliffe herzustellen.

Nur alle Ergebnisse zusammen führen zu einer weitgehend gesicherten Beurteilung, ob eine AKR an dem Schaden: **nicht beteiligt**, **beteiligt** oder **erheblich beteiligt** ist. Ob eine AKR allein zu einem Schaden geführt hat, läßt sich in den meisten Fällen nicht eindeutig klären.

Eine Hilfe für weitere Erkenntnisse kann es sein, mit dem verwendeten Zuschlag und dem eingesetzten Zement im Labor nachträglich den Beton noch einmal herzustellen und an entsprechenden Probekörpern das Verhalten in der 40°C-Nebelkammer zu überprüfen.

6 Zusammenfassung

Für die Beurteilung eines Bauwerks hinsichtlich einer schädigenden AKR sollten nur Fachinstitute eingeschaltet werden, die sich seit längerer Zeit mit AKR beschäftigt haben. Folgende Vorgehensweise wird empfohlen:

6.1 Am Bauwerk ist für jedes Bauteil eine ausführliche Schadensaufnahme durchzuführen. Verbunden mit der Bauwerksaufnahme ist eine Dokumentation über die wesentlichen Informationen, die von dem Bauwerk vorliegen, z.B. über Ausgangsstoffe, Betonzusammensetzung, Betonherstellung, Konstruktion und zeitlichen Schadensverlauf, anzufertigen.

6.2 Es ist eine ausreichende Zahl an Bohrkernen aus sorgfältig ausgewählten Bauteilbereichen zu entnehmen. Dazu sind sowohl geschädigte als auch nicht geschädigte Bereiche zu berücksichtigen.

6.3 Die Bohrkern sind augenscheinlich zu beurteilen, wobei das Gefüge des Betons, die Rißtiefe und -breite und der verwendete Zuschlag als Kriterien heranzuziehen sind.

6.4 Einige Bohrkern aus geschädigten und nicht geschädigten Bereichen sind in die Nebelkammer einzulagern. An ihnen sind die Gelbfärbung, die Rißbildung, die Längenänderung und – wenn möglich – die Änderung des dynamischen E-Moduls zu ermitteln.

6.5 Die Beurteilung von Anschliffen und ggf. von Dünnschliffen aus Bohrkernen vor und nach der 40°C-Nebelkammerlagerung liefert Erkenntnisse über die innere Gefügezerstörung.

6.6 Nur nach Bewertung aller Ergebnisse kann eine Aussage über eine Beteiligung einer AKR an dem Bauwerksschaden gemacht werden.

to whether the material preconditions exist for an ASR. If, for example, a non-reactive stone or a low-alkali cement have been used then a harmful ASR can be ruled out. A check will of course be made on whether the designed and documented concrete composition matches the actual composition of the drill cores.

The 40°C fog chamber storage provides essential information. Here again it is necessary to evaluate all the individual results. The evaluation must include not only the gel secretion and cracking but also the development of the expansion. The cracking can be assessed better on ground sections taken from the drill cores before and after fog chamber storage than on the drill core itself. Thin sections should be prepared if appropriate.

A substantially reliable diagnosis as to whether an ASR is **not involved**, is **involved** or is **heavily involved** in the damage can only be obtained by combining all the results. In most cases it is not possible to determine unequivocally whether the damage is caused solely by an ASR.

Further information can be obtained if the concrete is produced again in the laboratory with the aggregate and cement used and its behaviour in the 40°C fog chamber is checked using appropriate test pieces.

6 Summary

Only specialized institutes with long-term experience in the field of harmful ASR should be charged with the judgement of a structure where damage by ASR is suspected. The following procedure is recommended:

6.1 A detailed list of damage for each area of the structure is to be established on site. Simultaneously information on concrete constituents, concrete composition, concrete production, construction and chronological development of the damage are to be reported.

6.2 A sufficiently large number of drilled cores must be taken. Damaged and not damaged areas should be taken into account.

6.3 The cores are to be judged by visual inspection, such as the structure of the concrete, the depth and width of cracking and the aggregate used.

6.4 Some drilled cores taken from damaged and undamaged areas are to be stored in the fog-chamber to detect the formation of cracks, the alkali-silica gel, the change in length and if possible the change of the dynamic modulus of elasticity.

6.5 The assessment of finely ground sections and possibly thin sections from drilled cores before and after storage in the 40°C-fog chamber supplies knowledge on the internal deterioration of the structure.

6.6 The evaluation of all the results is to be carried out with the aim to obtain a statement of an ASR involved in the damage of a structure.

SCHRIFTTUM/LITERATURE

- [1] Siebel, E.; Reschke, Th.; Sylla, H.M.: Alkali-Reaktion mit Zuschlägen aus dem südlichen Bereich der neuen Bundesländer – Untersuchungen an geschädigten Bauwerken. Beton 46 (1996) H. 5, S. 298-301 und H. 6, S. 366-370.
- [2] The Diagnosis of Alkali-Silica-Reaction – Report of a working party (Second edition 1992). British Cement Association. Crowthorne 1992.
- [3] Courtier, R.H.: The Assessment of ASR-Affected Structures. Cement and Concrete Composites (1990) H. 12, S. 191-201.
- [4] Handbook for the Identification of Alkali-Silica Reactivity in Highway Structures. Strategic Highway Research Program. SHRP-C315. Washington, DC 991.
- [5] Grattan-Bellew, P.E.: Laboratory Calculation of Alkali-Silica Reaction in Concrete from Saunders Generating Station. ACI Materials Journal 92 (1995) H. 2, S. 126-134.
- [6] Prüfung von Beton-Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton H. 422. Berlin 1991.
- [7] Sylla, H.M.; Sprung, S.: Ablauf der Alkali/Zuschlag-Reaktion im Beton aus unterschiedlichen Zuschlaggesteinen. Zement-Kalk-Gips, in Vorbereitung.