

Alkali-reaktion mit Zuschlägen aus dem südlichen Bereich der neuen Bundesländer

Untersuchungen an geschädigten Bauwerken

Alkali reaction with aggregates from southern region of the new federal states

Investigation of damaged structures

Eberhard Siebel, Thorsten Reschke, Heinz-Martin Sylla; Düsseldorf

Übersicht

Bei der Verwendung alkaliempfindlicher Zuschläge kann der Beton durch Treiben infolge einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) geschädigt werden. Im norddeutschen Raum sind solche Schäden mit Opalsandstein und Flint seit etwa drei Jahrzehnten bekannt. Eine Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton regelt die Anwendung dieser Zuschläge. Ob Zuschlag aus dem südlichen Bereich der neuen Bundesländer ebenfalls zu einer schädigenden AKR führen kann, sollte durch die Untersuchung einer Reihe geschädigter Bauwerke in den Bundesländern Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen geklärt werden. Neben einer augenscheinlichen Beurteilung wurden aus 17 Bauwerken Bohrkern entnommen und im Labor untersucht. Eine Einlagerung der Bohrkern in eine 40 °C-Nebelkammer und eine Untersuchung von Dünnschliffen vor und nach der Nebelkammerlagerung gaben Aufschluß über das Ausmaß einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion. Anhand der Untersuchungsergebnisse konnte abgeschätzt werden, inwieweit eine AKR an den Schäden verschiedener Bauwerke beteiligt war und welche Zuschläge außer Opalsandstein und Flint zu einer schädigenden AKR führen können.

1 Einleitung

Zwischen der löslichen Kieselsäure einiger Zuschläge und den Alkalien aus der Porenlösung des Betons kann es zu einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) kommen. Unter bestimmten Voraussetzungen, wie z.B. hoher Feuchtigkeitsgehalt des Betons, kann diese Reaktion zu einer Betonschädigung durch Treiben führen.

Seit mehreren Jahren werden in den neuen Bundesländern und wurden in der ehemaligen DDR an verschiedenen Bauwerken Schäden beobachtet, die auf eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion hindeuten. Die Alkaliempfindlichkeit der im Bereich Mecklenburg-Vorpommern und Brandenburg nördlich einer gedachten Linie Wittenberge-Berlin-Frankfurt/Oder vorkommenden Zuschläge mit Opalsandstein und Flint ist bekannt. Welche Maßnahmen zu treffen sind, damit mit solchen Zuschlägen, die auch im nördlichen Bereich der alten Bundesländer vorkommen, Beton hergestellt werden kann, ist in der Richtlinie „Alkali-reaktion“ [1] geregelt. Es traten aber auch an Bauwerken mit Zuschlägen aus dem südlichen Bereich der neuen Bundesländer ähnliche Schäden auf. Genannt wurden in diesem Zusammenhang Grauwacke, Quarzporphyr und Kieselschiefer. Auch in anderen europäischen und außereuropäischen Ländern wurden schädigende Reaktionen mit diesen Zuschlägen festgestellt [2 bis 9].

Durch die im folgenden Beitrag beschriebene Untersuchung geschädigter Bauwerke sollte geklärt werden, inwieweit Zuschläge, die nicht in den Geltungsbereich der Alkali-Richtlinie fallen, zu einer schädigenden AKR im Beton führen können. Zu ermitteln waren die Art der alkaliempfindlichen Zuschläge sowie die Betonzusammensetzung und insbesondere der Gesamtalkaligehalt des Betons. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen bildeten die Basis für gezielte Zuschlag- und Betonuntersuchungen [10, 11], über die ausführlich in einer später erscheinenden Veröffentlichung berichtet wird.

Abstract

Concrete can be damaged through expansion caused by an alkali-silica reaction (ASR) if aggregates are used which are sensitive to alkalis. This type of damage with opaline sandstone and flint has been known in northern Germany for about three decades. The use of these aggregates is regulated by a code of practice issued by the German Association for Reinforced Concrete. The intention was to investigate a number of damaged structures in the federal states of Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt and Thüringen to decide whether aggregate from the southern region of the new federal states could also lead to a harmful ASR. In addition to a visual assessment drill cores were taken from 17 structures and investigated in the laboratory. Information about the extent of any alkali-silica reaction was to be obtained by storing the drill cores in a 40 °C fog chamber and investigating thin sections before and after the fog chamber storage. With the aid of the results of the investigation it was possible to estimate the extent to which an ASR had been involved in the damage to various structures and which aggregates besides opaline sandstone and flint could lead to a harmful ASR.

1 Introduction

An alkali-silica reaction (ASR) can occur between the soluble silica in some aggregates and the alkalis from the pore solution of the concrete. Under certain conditions, such as a high moisture content of the concrete, this reaction can damage the concrete by expansion.

For a number of years instances of damage which pointed to an alkali-silica reaction were observed in various structures in the former East Germany and are being observed in the new federal states. The sensitivity to alkalis of aggregates containing opaline sandstone and flint which occur in the Mecklenburg, Western Pomerania and Brandenburg regions north of an imaginary line passing through Wittenberge, Berlin and Frankfurt-on-Oder is well known. The measures to be taken so that concretes can be produced with such aggregates, which also occur in the northern part of the old federal states, are laid down in the „Alkali reaction“ code of practice [1]. However, similar cases of damage have also occurred in structures containing aggregates from the southern region of the new federal states. Greywacke, quartz-porphyr and chert have been mentioned in this connection. Harmful reactions with these aggregates have also been observed in other countries inside and outside Europe [2 to 9].

The investigation of damaged structures which is described below is intended to clarify the extent to which aggregates which do not come under the terms of the alkali code of practice can lead to harmful ASRs in concrete. It was necessary to determine the nature of the alkali-sensitive aggregates and the composition of the concrete, especially its total alkali content. The results of these investigations formed the basis for the specific aggregate and concrete investigations [10, 11] which will be described in detail in a later publication.

The structures were investigated under the direction of the Research Institute of the Cement Industry in Düsseldorf working jointly with the

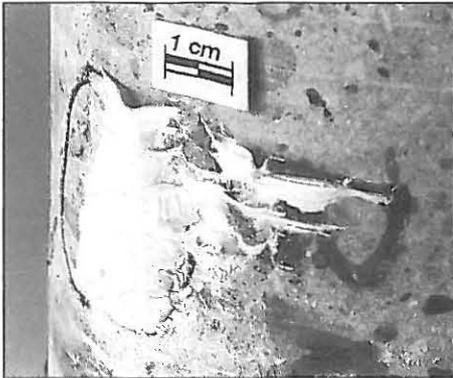


Bild 1 Ausscheidung auf der Oberfläche eines Bohrkerns infolge AKR

Fig. 1 White deposit on the surface of a drilled core caused by ASR

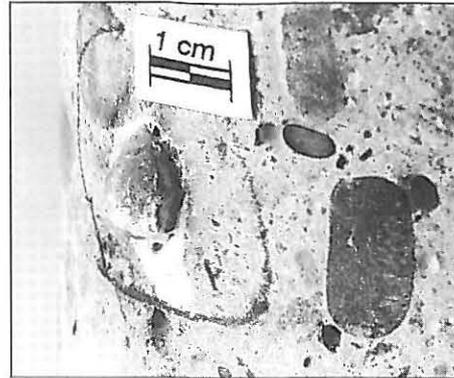


Bild 2 Aus dem Beton „herausgewachsenen“ Zuschlagkörner infolge AKR

Fig. 2 Aggregate „growing out“ of the surface as a result of ASR

Die Bauwerksuntersuchungen wurden unter Federführung des Forschungsinstituts der Zementindustrie Düsseldorf gemeinsam mit dem Institut für Zement Dessau¹⁾ (Dr. Ilgner, Dr. Uschold), dem Institut für Baustoffe Weimar²⁾ (Dr. Hempel) sowie der Materialprüfanstalt Eckernförde (Prof. Aue, Prof. Dahms) durchgeführt.

2 Stand der Erkenntnisse

Ursache und Ablauf der AKR sind weitgehend geklärt und wurden in zahlreichen Veröffentlichungen dargestellt [u.a. 12 bis 17]. Die lösliche Kieselsäure einiger Zuschläge kann mit der alkalischen Porenlösung eines Betons zu einem Alkali-Kieselsäure-Gel reagieren, das bei weiterer Feuchtigkeitsaufnahme quillt. Die Alkalien stammen in erster Linie aus dem Zement, können jedoch auch durch die Verwendung von Zusatzstoffen oder Zusatzmitteln oder von außen, z.B. durch Tausalz oder Meerwasser, in den Beton gelangen. Unter ungünstigen Voraussetzungen, wie z.B. hohem Feuchtigkeitsgehalt, kann sich die Alkali-Kieselsäure-Gel bei Wasseraufnahme zum Treiben führen. Außerlich erkennbare Merkmale am Beton sind neben einer Rißbildung weiße Ausscheidungen. Sie sind aus zunächst klarem Alkali-Kieselsäure-Gel entstanden, das sich durch Aufnahme von Kohlenstoffdioxid aus der Luft eintrübt. Dabei bildet sich Kaliumcarbonat und Kieselgel. Kaliumcarbonat wird mit der Zeit ausgewaschen, so daß hauptsächlich weißes amorphes Kieselgel zurückbleibt (Bild 1). Außerdem sind Abplatzungen (pop-outs) und das „Herauswachsen“ einzelner Zuschlagkörner aus der Betonoberfläche möglich (Bild 2).

Zur Vermeidung von Schäden in Norddeutschland wurde vom Deutschen Ausschuß für Stahlbeton (DAfStb) 1974 eine Richtlinie „Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton“ erstellt [18]. Die 1986 neu gefaßte Richtlinie [1, 19], die z.Z. überarbeitet wird, regelt sowohl die Prüfung und Überwachung des Zuschlags als auch die notwendigen Maßnahmen bei der Herstellung des Betons, wie z.B. die Verwendung von Zementen mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt. Auch für den nördlichen Bereich der ehemaligen DDR wurden Anfang der 80er Jahre mehrere Vorschriften erlassen, die inhaltlich den Regelungen der Alkali-Richtlinie entsprachen [20 bis 23]. Nach der Wiedervereinigung wurde anstelle dieser Vorschriften die Alkali-Richtlinie für den nördlichen Bereich der neuen Bundesländer eingeführt, so daß nunmehr auch Zuschlag mit Opalsandstein und Flint aus diesen Gewinnungsgebieten ohne Einschränkungen nach der Richtlinie geprüft und angewendet werden kann [1, 24 bis 26].

In der ehemaligen DDR war – wie aus nichtveröffentlichten Schadensgutachten hervorgeht – bekannt, daß es im südlichen Bereich Zuschläge gibt, die ebenfalls zu einer Reaktion führen können, aber nicht von der Richtlinie erfaßt werden. Um Schäden mit diesen Zuschlägen zu vermeiden, wurde ab 1985 zunächst nur für bedeutende Bauwerke, wie z.B. Brücken und Autobahnen, der Einsatz alkaliarmer Zemente vorgeschrieben [27]. Ab 1989 wurde im südlichen Bereich der ehemaligen DDR der Gesamtalkaligehalt des Betons generell auf $\leq 3600 \text{ g/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}$ -Äquivalent begrenzt [28]. Um die Zusammenhänge eingehend zu klären, wurden nach der Wieder-

Dessau Institute for Cement¹⁾ (Dr. Ilgner, Dr. Uschold), the Weimar Institute for Building Materials²⁾ (Dr. Hempel) and the Eckernförde Materials Testing Laboratory (Prof. Aue, Prof. Dahms).

2 Present state of knowledge

The cause and progress of the ASR have to a large extent been explained, and have been described in a number of publications [including 12 to 17]. The soluble silica in some aggregates can react with a concrete's alkaline pore solution to form an alkali-silica gel which swells on further absorption of water. The alkalis come primarily from the cement, but can also enter the concrete through the use of additions or additives or from outside, e.g. through de-icing salt or sea water. Under unfavourable conditions, such as high moisture content, the alkali reaction can have a harmful effect on the concrete, as the alkali-silica gel with its ability to swell can cause expansion when water is absorbed. Besides the formation of cracks the externally recognizable features on the concrete are white secretions. They originate from initially clear alkali-silica gel, which becomes cloudy through absorption of carbon dioxide from the air and forms potassium carbonate and silica gel. With time the potassium carbonate is washed out leaving mainly white amorphous silica gel (Fig. 1). Pop-outs and the protrusion of individual aggregate grains from the concrete surface are also possible (Fig. 2).

The DAfStb (German Committee for Reinforced Concrete) drew up a code of practice „Alkali reaction in concrete“ in 1974 to avoid damage in northern Germany [18]. The code of practice [1, 19] which was rewritten in 1986, and is currently being revised, regulates the testing and the inspection of the aggregate as well as the procedures required when producing the concrete, such as the use of cements of low effective alkali content. At the start of the 80s several instructions were also issued for the northern region of the former East Germany which corresponded in content with the regulations in the alkali code of practice [20 to 23]. After German reunification the alkali code of practice was adopted for the northern region of the new federal states instead of these instructions, so that aggregates with opaline sandstone and flint quarried from this region can now be tested and used in accordance with the code of practice without any reservations [1, 24 to 26].

In the former East Germany it was known – from unpublished surveyors' damage reports – that there are aggregates in the southern region which can also lead to a reaction but are not covered by the code of practice. In order to avoid damage with these aggregates the use of low-alkali cements was specified from 1985, initially only for important structures such as bridges and motorways [27]. From 1989 the total alkali content of the concrete was limited in the southern region of the former East Germany to $\leq 3600 \text{ g/m}^3 \text{ Na}_2\text{O}$ equivalent [28]. The investigation of structures described here, as well as extensive aggregate and concrete investigations, were carried out after the reunification of Germany in order to provide a comprehensive explanation of the relationships involved before a provisional recommendation on the avoidance of damage when using certain greywackes was issued by the DAfStb at the start of 1993 [29].

¹⁾jetzt: Baustoff-Service GmbH Dessau

²⁾jetzt: Materialforschungs- und Prüfanstalt (MFPA) Weimar

¹⁾ now: Baustoff-Service GmbH Dessau

²⁾ now: Materialforschungs- und Prüfanstalt (MFPA) Weimar

vereinigung Deutschlands die hier dargestellten Bauwerksuntersuchungen und zusätzlich umfangreiche Zuschlag- und Betonuntersuchungen durchgeführt, bevor Anfang 1993 vom DAfStb eine vorläufige Empfehlung zur Vermeidung von Schäden bei Verwendung bestimmter Grauwacken herausgegeben wurde [29].

3 Ziel der Untersuchungen

Anhand von Bauwerksschäden im südlichen Bereich der neuen Bundesländer war zu untersuchen, in welchem Maße die dort gewonnenen Zuschläge in der Praxis zu einer schädigenden AKR im Beton führen können.

Zunächst war eine Bestandsaufnahme verschiedener möglicherweise durch eine AKR geschädigter Bauwerke vorzunehmen. Um zu klären, inwieweit und unter welchen Bedingungen Zuschläge außer Opalsandstein und Flint an der Entstehung einer schädigenden AKR und damit auch der Entstehung von Schäden eines Bauwerks beteiligt sein können, sollte der Beton dieser Bauwerke möglichst keinen Zuschlag mit Opalsandstein und/oder Flint enthalten, und er sollte auch nicht wärmebehandelt sein, um andersartige Schadensursachen auszuschließen. Nach Feststellung des Schadensbildes waren aus geschädigten und nicht geschädigten Bereichen der Bauwerke Bohrkern zu entnehmen und im Labor auf eine mögliche AKR hin zu untersuchen. Eine umfassendere Gesamtbewertung der Schädigungseinflüsse unter Einbeziehung weiterer möglicher Schadensursachen, wie z.B. konstruktiver Mängel, konnte im Rahmen dieser Untersuchung nicht durchgeführt werden.

4 Bauwerksauswahl und Schadensaufnahme

4.1 Auswahl der geschädigten Bauwerke

Die für die Bauwerksauswahl erforderlichen Angaben über das Baujahr, die Betonherstellung, Betonzusammensetzung und den Schadensverlauf wurden mit Unterstützung der jeweiligen Bauherren sowie unter Verwendung bereits vorhandener Schadensgutachten soweit wie möglich ermittelt. Unter Beachtung der hinsichtlich Zuschlagart und Wärmebehandlung geforderten Einschränkungen wurden insgesamt 17 Betonbauwerke in den Ländern Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen untersucht, bei denen Schäden aufgetreten waren, an deren Entstehung augenscheinlich eine AKR beteiligt sein konnte. Es handelt sich bei diesen Bauwerken um acht Brücken, eine Schleuse sowie um jeweils vier Verkehrsflächen auf Flugplätzen bzw. Autobahnen. Eine Übersicht über alle Bauwerke sowie ihre geographische Zuordnung enthält Tafel 1.

4.2 Aufnahme der Schäden und Bohrkernentnahme

Die an einzelnen Bauteilen der ausgesuchten Bauwerke aufgetretenen Schäden wurden nach Augenschein und mit einfachen Hilfsmitteln wie Reißbreitenlehre und Meßlupe beurteilt. Hierzu wurden die einzelnen Bauteile in überschaubare Flächen aufgeteilt und diese entsprechend der Anzahl und Breite der Risse den Schadensstufen 0 bis 5 (siehe Tafel 2) zugeordnet. Die maximal erreichte Schadensstufe sowie entsprechende Anmerkungen zum Schaden (Art, Umfang, Lage und Verlauf der Risse) wurden für jedes Bauwerk erfaßt und sind ebenfalls in Tafel 1 zusammengestellt.

Parallel zur Schadensaufnahme wurden in Abhängigkeit vom Umfang des Schadens je Bauwerk 10 bis 15 Bohrkern mit einem Durchmesser von 10 cm aus möglichst ungeschädigten Bereichen für die Laboruntersuchungen entnommen. Zusätzlich wurden rd. zehn Bohrkern mit einem Durchmesser von 5 cm und einer Länge bis zur halben Bauteildicke vornehmlich aus dem Bereich der sichtbaren Risse herausgebohrt. Erfahrungsgemäß reichen Kerne mit 5 cm Durchmesser aus, um das Ausmaß der Gefügeschäden beurteilen zu können.

5 Untersuchungsmethoden

5.1 Gefüge und Festigkeit

Im Labor wurden zunächst sämtliche Bohrkern nach Augenschein beurteilt. Die Kerne aus ungeschädigten Bereichen (\varnothing 10 cm) wurden zur Beurteilung der Kornzusammensetzung, der Gesteinsarten, des Betongefüges sowie der Lage und des Zustands der Bewehrung herangezogen. An den Kernen aus geschädigten Bereichen (\varnothing 5 cm)

3 Aim of the investigations

The intention was to investigate the damage to structures to discover the extent to which the aggregates quarried in the southern region of the new federal states could in practice lead to a harmful ASR in the concrete.

Firstly, an inventory had to be made of various structures which had possibly been damaged by an ASR. In order to clarify the extent to which, and under what conditions, aggregates other than opaline sandstone and flint could be involved in producing a harmful ASR, and hence also in damaging a structure, the intention was that the concrete of these structures should as far as possible contain no aggregate with opaline sandstone and/or flint and also (to rule out other causes of damage) should not have been steam cured. After the appearance of the damage had been established test cores had to be taken from damaged and undamaged parts of the structure and examined in the laboratory for a possible ASR. It was not possible, within the limits of this investigation, to carry out a more comprehensive, overall, evaluation of the factors influencing the damage, including other possible causes of damage, such as faulty design.

4 Selection of structures and recording the damage

4.1 Selection of the damaged structures

The information about the year of construction, the concrete production, concrete composition and the course of the damage, which was needed for selecting the structures, was as far as possible established with the aid of the respective building owners and by making use of existing surveyors' damage reports. Taking account of the restrictions required with respect to type of aggregate and to steam curing a total of 17 concrete structures which had suffered damage in which an ASR could apparently have been involved were investigated in the states of Brandenburg, Saxony, Saxony-Anhalt and Thuringia. These structures were eight bridges, one navigation lock, four runways on airfields and four carriageway surfaces on motorways. Table 1 provides a summary of all the structures and their geographical locations.

4.2 Recording the damage and taking test cores

The damage which had occurred to the individual components of the selected structures was assessed by visual inspection and with simple aids such as crack width gauge and a measuring magnifier. For this purpose the individual components were divided into reasonable small areas and assigned damage levels 0 to 5 (see Table 2) on the basis of the number and width of the cracks. The maximum damage level reached and the corresponding comments on the damage (type, extent, position and path of the cracks) were recorded for each structure and are also summarized in Table 1.

At the same time as recording the damage 10 to 15 test cores (depending on the extent of the damage), with diameters of 10 cm and wherever possible from undamaged areas, were taken from each structure for the laboratory investigations. About 10 test cores with diameters of 5 cm and lengths of up to half the component thickness were also drilled, mainly from regions with visible cracks. Experience has shown that cores with diameters of 5 cm are adequate for assessing the extent of the damage to the microstructure.

5 Investigative methods

5.1 Microstructure and strength

All the test cores were first assessed visually in the laboratory. The cores from undamaged areas (10 cm diameter) were used for assessing the grain size composition, the types of rock, the concrete microstructure, and the position and state of the reinforcement. The cores from damaged areas (5 cm diameter) were used mainly for recording the course of the cracks and possible damage to the microstructure.

For each structure the bulk density and compressive strength were determined on three cores from undamaged areas following the procedure in DIN 1048-2. For this purpose samples about 10 cm long were cut from cores with diameters of 10 cm by wet sawing and then tested after three days' storage at about 20 °C and 65% relative humidity.

Tafel 1 Beschreibung der Bauwerke
Table 1 Description of the structures

Bauwerk Structure		geographische Zuordnung Geographical location	Ort / Funktion Locality / function	Konstruktion Construction	Bauzeit Date of building	bekannt gewordene Schäden ¹⁾ Damage reported ¹⁾	Schadensstufe nach Tafel 2 ²⁾ Stage of damage acc. to Table 2 ²⁾
B1	Herrenkrugbrücke	Magdeburg (Sachsen-Anhalt)	Eisenbahnbrücke über die Elbe	Stahlüberbau auf Stahlbetonpfeilern	1974	1984/86 großmaschige Netzrisse, besonders stark im Pfeiler 2 und im oberen Bereich der Pfeiler 3 bis 6	5
B2	Fußgängerbrücke	Magdeburg (Sachsen-Anhalt)	Fußgängerbrücke über die B 71	Spannbetonbrücke	1974	ab 1989 stärkere Netzrisse in den Widerlagern, geringer im Mittelpfeiler	4
B3	Knoten Lobeda	Jena (Thüringen)	Straßenbrücke über die Stadtrödaer Straße	Dreifeld-Spannbetonbrücke	1972/74	ab 1985 Netzrisse in Widerlagern, Überbau und Kappe	3
B4	Neue Havelbrücke	Potsdam (Brandenburg)	Straßenbrücke Humboldtstraße über die Havel	Dreifeld-Spannbetonhohlkastenbrücke	1978/81	Anfang 1992 feine Netzrisse in den Flügelmauern	2
B5	Stadtauto- bahnbrücke	Magdeburg (Sachsen-Anhalt)	Straßenbrücke B 71 über die Halberstädter Straße	Spannbetonbrücke	1974	ab 1988/89 engmaschiges feines Rißnetz in den Widerlagern und im Mittelpfeiler	3
B6	Spreetalbrücke	nördlich von Bautzen (Sachsen/Lausitz)	Autobahnbrücke BAB 4 über die Spree	Stahlüberbau auf Stahlbetonpfeilern	1973/77	1991 Rißnetz in Widerlagern und Pfeilern, größere horizontale Risse	2
B7	Baumgartenbrücke	westlich von Potsdam (Brandenburg)	Straßenbrücke B 1 über den Schwielowsee/Havel	Dreifeld-Spannbetonhohlkastenbrücke	1988/89	Vertikalriß im Widerlager	2
B8	Brücke Niederwartha	westlich von Dresden (Sachsen)	Eisenbahnbrücke über die Elbe	Stahlüberbau auf Stahlbetonpfeilern	1984	1988 in Pfeilervorköpfen starke Netzrisse, 1991 Vorköpfe zerstört	5
S1	Schleuse	Eisenhüttenstadt (Brandenburg)	Mündungstrecke des Oder-Spree-Kanals in die Oder	Doppelschachtschleuse aus Stahlbeton	1925/27	Beginn nicht festgehalten, 1992 Netzrisse und Ausscheidungen in beiden Schleusenammern	5
F1	Fliegerhorst Simmersdorf	südlich von Forst (Brandenburg/Lausitz)	Flugbetriebsfläche, Nähe Vorstartplatz	Ortbetonplatten	1977	ab 1984 Netzrisse, zunehmende Rißbreiten	3
F2	Fliegerhorst Jänschwalde	zwischen Cottbus und Guben (Brandenburg/Lausitz)	Flugbetriebsfläche, Start- und Landebahn	Ortbetonplatten	1975	ab 1976 erste Haarrisie, zunehmende Rißbreiten und Plattenaufwölbung	4
F3			Vorstartplatz (Erneuerung)	Ortbetonplatten	1986	ab 1992 Haarrisie	1
F4	Fliegerhorst Briest	nordwestlich von Brandenburg (Brandenburg)	Flugbetriebsfläche, Rollbahn quer zur Start- u. Landebahn	Ortbetonplatten	1984	ab 1986 netzförmig angeordnete, feinmaschige Haarrisie	2
A1	Autobahnabschnitt BAB 24	nordwestlich von Berlin (Brandenburg)	5 km Richtung Hamburg vom Dreieck Havelland	Betonfahrbahnplatten 22 cm auf HGT (unverdübelt)	1976	etwa ab 1987 viele Netzrisse, längsorientierte größere Risse, Kantenschäden	5
A2	Autobahnabschnitt BAB 10	nördlich von Berlin (Brandenburg)	Berliner Nordring, Ausfahrt Velten	Betonfahrbahnplatten 22 cm / 24 cm auf HGT (unverdübelt)	1970/72	etwa ab 1985 feine Netzrisse, ab 1990 stark zunehmend, Kantenschäden im Bereich der Querfugen	5
A3			Berliner Nordring, km 156,5				5
A4			Berliner Nordring, km 159,0				5

¹⁾ erste Beobachtung / first observation

²⁾ höchste am jeweiligen Bauwerk festgestellte Schadensstufe / worst stage of damage found in the particular structure

wurden insbesondere der Rißverlauf und mögliche Gefügeschäden aufgenommen.

Je Bauwerk wurde an drei Kernen aus nichtgestörten Bereichen die Rohdichte und die Druckfestigkeit in Anlehnung an DIN 1048-2 ermittelt. Dazu wurden aus den Kernen mit einem Durchmesser von 10 cm Proben mit einer Höhe von rd. 10 cm durch Naßsägen herausgeschnitten und nach einer dreitägigen Lagerung bei rd. 20 °C/65 % relativer Feuchte geprüf.

5.2 Betonzusammensetzung

Die Betonzusammensetzung wurde in Anlehnung an DIN 52170 bestimmt. Bei augenscheinlich erkennbaren Unterschieden im Betongefüge verschiedener Bauteile eines Bauwerks wurde die Bestim-

5.2 Concrete composition

The concrete composition was determined using the procedure in DIN 52170. The determination was carried out for each individual component where there were visibly recognizable differences in the concrete microstructure of different components in a structure. Samples were taken from every two test cores with diameters of 10 cm, and these were ground, analyzed chemically, and the residues which were stable at red heat and insoluble were determined. Elevated levels of silicon and aluminium indicated that parts of the aggregate had been dissolved. The measured chemical composition was therefore corrected for the calculation of the concrete composition. This correction was carried out by taking account of the chemical compositions of the cements produced in the former East Germany known from existing documents. In this way it was possible to estimate the

mung für jedes einzelne Bauteil durchgeführt. Dazu wurden aus je zwei Bohrkerne mit einem Durchmesser von 10 cm Proben entnommen, zerkleinert und chemisch analysiert sowie Glühbeständiges und unlöslicher Rückstand bestimmt. Erhöhte Silicium- und Aluminiumgehalte wiesen darauf hin, daß Anteile des Zuschlags gelöst worden waren. Für die Berechnung der Betonzusammensetzung wurde deshalb die ermittelte chemische Zusammensetzung korrigiert. Diese Korrektur wurde unter Berücksichtigung der aus vorhandenen Unterlagen bekannten chemischen Zusammensetzung der in der ehemaligen DDR produzierten Zemente durchgeführt. Somit konnten der Anteil des Zuschlags, das Verhältnis von Zement zu Zuschlag und der Zementgehalt abgeschätzt werden.

5.3 Nebelkammeruntersuchungen

Erfahrungsgemäß kann eine noch nicht eingetretene Alkali-Kieselsäure-Reaktion durch die Lagerung des Betons bei erhöhter Temperatur und sehr hoher Feuchte beschleunigt werden [14]. Deshalb wurden je Bauwerk vier Bohrkerne – ϕ 10 cm – aus augenscheinlich ungeschädigten Bereichen über einen Zeitraum von mindestens einem halben Jahr in einer 40 °C-Nebelkammer gelagert. Während der Lagerung wurde in regelmäßigen Abständen die Längenänderung der Bohrkerne mit dem Setzdehnungsmesser bestimmt. Außerdem wurden augenscheinliche Veränderungen wie Ausscheidungen, Abplatzungen und Rißbildungen festgehalten.

5.4 Dünnschliffuntersuchungen

Dünnschliffe aus dem Beton geschädigter Bauwerksteile sowie aus den in die Nebelkammer eingelagerten Bohrkerne wurden untersucht, um Aufschluß über Reaktionsprodukte und Gefügeänderungen infolge einer AKR und über Phasenneubildungen zu erhalten. Hierzu wurden je Bauwerk mehrere Proben aus unterschiedlichen Abschnitten der Bohrkerne, d.h. Bereiche nahe der Bauteiloberfläche und weiter im Bauteilinneren, entnommen. Diese wurden bei 40 °C getrocknet und unter Vakuum mit einem fluoreszierenden Gießharz imprägniert. Aus den imprägnierten Proben wurden Dünnschliffe hergestellt, an denen unter einem Polarisationsmikroskop mit Fluoreszenzeinrichtung das Gefüge, insbesondere Rißausbreitung, Phasenneubildungen sowie Gelausscheidungen, beurteilt werden konnten.

6 Darstellung der Ergebnisse

6.1 Schadensverlauf und Schadensbild

Aus der in Tafel 1 zusammengestellten Beschreibung der Bauwerke geht hervor, daß die Mehrzahl der geschädigten Bauwerke zwischen 1970 und 1989 errichtet wurden. Wesentlich älter ist die Schleuse in Eisenhüttenstadt (S1), die bereits in der Vorkriegszeit (1925 bis 1927) gebaut wurde [30]. Bei den Brücken (B1 bis B8) wurden erste Schäden nach ca. 5 bis 15 Jahren beobachtet. Die Flugplätze (F1 bis F4) wiesen Schäden zum Teil bereits ein Jahr nach der Herstellung, spätestens nach sieben Jahren auf. An den Betonfahrbahnen (A1 bis A4) traten die ersten Schäden nach etwa zehn Jahren auf, wobei der Schädigungsfortschritt – bedingt durch die in den letzten Jahren sprunghaft angestiegene Verkehrsbelastung – besonders ausgeprägt ist. Sehr spät wurde der Schaden an der Schleuse (S1) festgestellt. Zu welchem Zeitpunkt an diesem Bauwerk erste Schäden aufgetreten sind, ließ sich nicht mehr ermitteln.

Für das Auftreten eines Schadens und den Schadensbeginn spielt nicht nur die Betonzusammensetzung eine Rolle, sondern es sind auch die Nutzungsbedingungen, wie z.B. der Zutritt von Feuchtigkeit und die Beanspruchung des Bauwerks, von erheblichem Einfluß. Anhand der Schadensbilder mußte vermutet werden, daß bei den untersuchten Bauwerken neben einer AKR auch anderweitig verursachte Quell- und Treiberscheinungen sowie behinderte Schwindverformungen und Konstruktionsmängel als Schadensursache in Frage kamen. Bei der Mehrzahl der Bauwerke kann man davon ausgehen, daß die Schäden im Laufe der Zeit durch witterungs- und nutzungsbedingte Beanspruchungen verstärkt wurden.

6.2 Betonzusammensetzung und -eigenschaften

Als möglicherweise alkaliempfindliche Zuschläge wurden aufgrund augenscheinlicher Beurteilung sowie anhand der Dünnschliffunter-

Tafel 2 Einteilung in Schadensstufen
Table 2 Classification of the stage of damage

Schadensstufe Stage of damage	Merkmal Characteristics	Rißbreite Crack width
0	keine Schäden no damage	—
1	vereinzelt feine Risse isolated fine cracks	< 0,2 mm
2	einzelne größere Risse single fairly coarse cracks	0,2...0,5 mm
3	mehrere größere Risse several fairly coarse cracks	0,2...1,0 mm
4	starkes Rißbild severe cracking	bis/up to 2 mm
5	sehr starkes Rißbild very severe cracking	> 0,5 mm

proportion of aggregate, the ratio of cement to aggregate, and the cement content.

5.3 Fogchamber investigations

Experience shows that an alkali-silica reaction which has not yet taken place can be accelerated by storing the concrete at elevated temperature and very high moisture [14]. Four test cores with diameters of 10 cm from apparently undamaged parts of each structure were therefore stored for a period of at least six months in a 40 °C fog chamber. The changes in length of the test cores were measured with a stress-probing extensometer at regular intervals during the storage. Visible changes, such as secretions, pop-outs and cracking were also recorded.

5.4 Thin-section investigations

Thin sections taken from the concrete of damaged parts of a structure and from the test cores stored in the fog chamber were examined to obtain information about the reaction products and changes in microstructure resulting from an ASR and about the formation of new phases. For this purpose several samples from different sections of the test core, i.e. in areas close to the surface of the component and further into the component, were taken from each structure. These were dried at 40 °C and impregnated under vacuum with a fluorescent casting resin. Thin sections were prepared from the impregnated samples and were used for assessing the microstructure, especially crack propagation, formation of new phases, and gel secretions under a polarizing microscope with fluorescent equipment.

6 Presentation of the results

6.1 Course and appearance of the damage

From the descriptions of the structures summarized in Table 1 it can be seen that most of the damaged structures were built between 1970 and 1989. The lock in Eisenhüttenstadt (S1), which was built in the pre-war period (1925 to 1927), is substantially older [30]. With the bridges (B1 to B8) initial instances of damage were observed after about 5 to 15 years. Some of the airfields (F1 to F4) exhibited damage only one year after production, and after seven years at the latest. On the concrete carriageways (A1 to A4) the first damage appeared after about ten years, and the progress of the damage – caused by the sharp increase in traffic loading in recent years – is particularly pronounced. The damage to the lock (S1) was observed at a very late stage, and it is no longer possible to determine when the first damage occurred to this structure.

The occurrence of damage and the time when it starts are influenced not only by the concrete composition but also to a great extent by the conditions of use, such as the admission of moisture and the stresses applied to the structure. From the appearance of the damage it had to be suspected that in addition to ASRs the possible causes of damage in the structures under investigation included swelling and

suchung Grauwacke, Quarzporphyr oder Kieselschiefer bzw. auch Mischungen dieser Gesteinsarten festgestellt. Die Angaben sind in Tafel 3 enthalten. Die Zementgehalte – es wurden in erster Linie Portlandzemente (PZ) und in einem Fall Eisenportlandzement (EPZ) ermittelt – lagen im allgemeinen zwischen rd. 400 und 450 kg/m³, bei der Brücke B6 bei rd. 550 kg/m³ (siehe Bild 3). In der ehemaligen

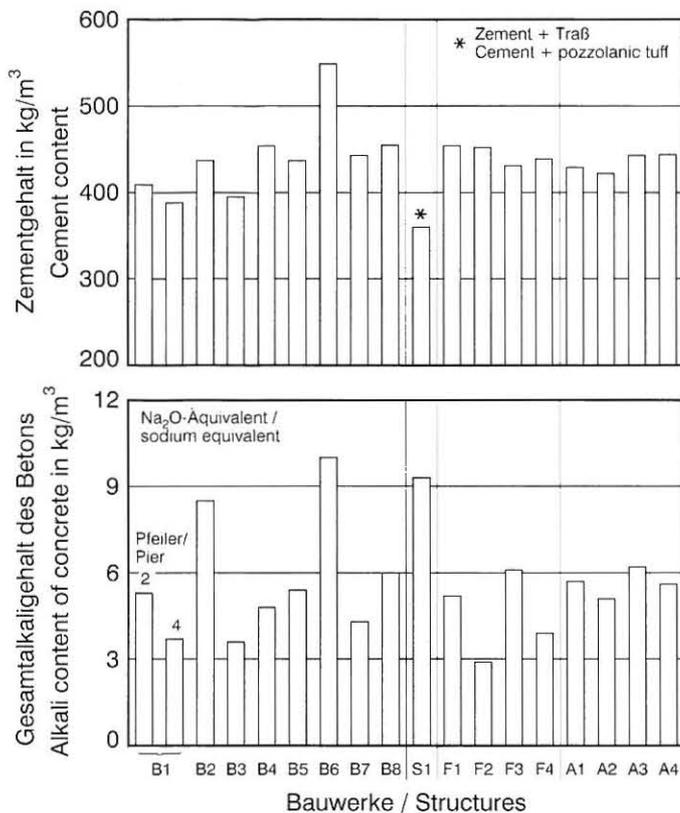


Bild 3 Anhand der chemischen Analyse des Betons ermittelte Zementgehalte (oben) und Gesamtalkaligehalte (unten)

Fig. 3 Cement content (top) and total alkali content (bottom) of the concrete determined by chemical analysis

DDR wurden häufig Betone mit verhältnismäßig hohen Zementgehalten hergestellt, um mit den daraus resultierenden hohen Zementleimgehalten eine ausreichende Verarbeitbarkeit zu erreichen. Da die Zuschläge i.d.R. nicht ausreichend aufbereitet wurden und verflüssigende Zusatzmittel kaum zur Verfügung standen, war dies eine technologische Konsequenz, die sich im Hinblick auf die AKR jedoch ungünstig auswirkte.

Bei der in der Vorkriegszeit gebauten Schleuse S1 wurde ein Bindemittelgehalt (Traß + Zement) von rd. 360 kg/m³ bestimmt. Aus der Dokumentation dieses Bauwerkes [30] geht hervor, daß für die Herstellung der untersuchten Bauteile in etwa 135 kg Traß und 270 kg Zement je m³ Beton verwendet wurden.

Der Gesamtalkaligehalt der Betone, ausgedrückt als Na₂O-Äquivalent, lag zwischen 2,9 und 10,2 kg/m³ (siehe Tafel 3 und Bild 3). Außergewöhnlich hohe Alkaligehalte von > 8 kg/m³ wurden bei den Betonen der Brücken B2 und B6 sowie der Schleuse S1 festgestellt. Vermutlich ist der hohe Gesamtalkaligehalt bei der Schleuse auf den Einsatz eines alkalireichen Trasses, bei der Brücke B2 auf eine Tausalzbelastung und bei der Brücke B6 auf den sehr hohen Zementgehalt sowie eine zusätzliche Tausalzbelastung zurückzuführen. Die Ursache für den höheren Gesamtalkaligehalt des Pfeilers 2 gegenüber dem des Pfeilers 4 der Brücke B1 ließ sich anhand der vorliegenden Untersuchungsergebnisse nicht eindeutig klären.

Die Druckfestigkeiten der Bohrkern aus den Brücken lagen mit Werten zwischen 36 und 57 N/mm² in einem für Widerlager und Pfeiler üblichen Bereich. Die Bohrkern aus den Autobahndecken A1 bis A4 und der Flugplatzdecke F1 wiesen höhere Festigkeiten von rd. 60

expansion phenomena caused by other means, as well as constricted shrinkage deformation and design faults. With the majority of structures it can be assumed that with the course of time the damage was intensified by stresses caused by weather and usage.

6.2 Concrete composition and properties

Greywacke, quartz-porphry and chert, as well as mixtures of these rocks, were established as possible alkali-sensitive aggregates on the basis of visual assessment and examination of thin sections. The data are contained in Table 3. The cement levels – the cements found were primarily Portland cements and in one case Portland slag cement – lay in general between about 400 and 450 kg/m³, and about 550 kg/m³ for the bridge B6 (see Fig. 3). Concretes with relatively high cement levels were often produced in the former East Germany so that the resulting high levels of cement paste would provide adequate workability. This was a technical consequence of the fact that, as a rule, the aggregates were not adequately processed and there were hardly any plasticizing admixtures available; it also had an unfavourable effect as far as the ASR was concerned.

A binder content (trass + cement) of about 360 kg/m³ was established for the lock S1 built in the pre-war period. The documentation for this structure [30] showed that about 135 kg trass and 270 kg cement per m³ concrete were used for producing the components under investigation.

The total alkali levels of the concretes, expressed as Na₂O-equivalent, lay between 2.9 and 10.2 kg/m³ (see Table 3 and Fig. 3). Unusually high alkali levels of more than 8 kg/m³ were found in the concretes of bridges B2 and B6 and of the lock S1. The high total alkali level in the lock is presumably attributable to the use of an alkali-rich trass, in the bridge B2 to the exposure to de-icing salt and in bridge B6 to the very high cement content as well as the exposure to de-icing salt. The cause of the higher alkali level in pier 2 than in pier 4 of bridge B1 cannot be explained clearly from the present investigative results.

With values between 36 and 57 N/mm² the compressive strengths of the test cores from the bridges lay in the usual range for abutments and piers. The test cores from the motorway surfaces A1 to A4 and the airfield surface F1 exhibited higher strengths of about 60 to 70 N/mm². The compressive strengths of the cores from the airfields F2 to F4 of about 38 to 47 N/mm² achieved relatively low values for such structures (see Fig. 4).

6.3 Expansion of the test cores

The maximum expansions of the test cores after completion of the fog chamber storage lay between about 0.5 and 1.8 mm/m (see Figs. 5 a to d). A potentially harmful alkali-silica reaction can be inferred if the expansion during the fog chamber storage is significantly higher than 0.5 mm/m and/or if significant gel formation is observed. Due to the nature of the trial an expansion of 0.3 to 0.4 mm/m is caused by the initial temperature and moisture input. Even if only small expansions were observed with the test cores in the fog chamber it cannot be inferred from this that no ASR has occurred in the structure. The reaction, and the expansion produced by it, may already have occurred in the structure and possibly also died away there.

Expansions of ≥ 1.0 mm/m were measured and gel secretions were observed (pointing to an ASR) with the test cores from bridges B1 to B4 and from motorway sections A1 to A3. With the test core from lock S1 the expansion continued to increase even after a year, quite large quantities of gel appeared, and clearly visible cracks were formed. This points to an ASR. Appreciable gel secretions were also observed with the cores from the airfields F1 and F2 and from the bridge B5. Neither severe expansions nor significant gel secretions occurred with the test cores from the structures B6, B7, F3, F4 and A4.

6.4 Assessment of the thin sections

6.4.1 General

The results of the thin-section investigations are contained in Table 3. In essence it was possible to establish three mechanisms which could have been involved in the damage to the concrete: alkali-silica reaction, swelling pressure due to water absorption by clay min-

Tafel 3 Untersuchungsergebnisse und Beurteilung hinsichtlich der Beteiligung einer AKR an den Schäden
 Table 3 Test results and assessment with regard to the involvement of an ASR in the damage

Bauwerk structure	Betonanalyse concrete analysis		Nebelkammerlage- rung von Bohrkernen fogroom storage of cores		Dünnschliffuntersuchungen examination of thin sections				Beurteilung / Assessment xxx AKR erheblich beteiligt/ ASR heavily involved xx AKR beteiligt/ ASR involved x geringe Beteiligung einer AKR nicht aus- zuschließen/ slight involvement of ASR cannot be ruled out - AKR nicht beteiligt/ ASR not involved
	Zementart cement type	Na ₂ O-Äq. Bet Na ₂ O-eq. concrete kg/m ³	maximale Dehnung maximum expansion mm/m	Gelaus- scheidung gel excretion	möglicherweise alkaliempfindlicher Zuschlag potentially alkali- sensitive aggregate	beobachtete Gelmengen an der Ausgangs- probe nach der Nebel- kammer- lagerung quantity of gel observed in the original sample after cloud- chamber		weitere Beobachtungen other observations	
B1 2 ¹⁾	EPZ	5,3	1,8	x	Kieselschiefer	mittel	stark	Quellen einiger Zuschlag- bestandteile (verwitterte Feldspäte und Glimmer)	xxx
4 ²⁾	PZ	3,7	0,9	x					
B2	PZ	8,5	1,2	x	Kieselschiefer, Grau- wacke, Quarzporphyr	mittel	mittel	-	xx
B3	PZ	3,6	1,1	x	Grauwacke, Quarzpor- phyr, Kieselschiefer	keine	nicht untersucht	Quellen einiger Zuschlagbestandteile	xx
B4	PZ	4,8	1,8	x	Kieselschiefer	keine	gering	-	xx
B5	PZ	5,4	0,8	x	Kieselschiefer, Quarzporphyr	keine	gering	Quellen einiger Zuschlagbestandteile	x
B6	PZ	10,2	0,7	-	Quarzporphyr, Kieselschiefer	mittel	keine	Quellen einiger Zuschlagbestandteile	x
B7	PZ	4,3	0,6	-	Kieselschiefer, Grau- wacke, Quarzporphyr	gering	keine	Quellen einiger Zuschlagbestandteile	-
B8	PZ	6,0	0,9	-	Kieselschiefer	keine	nicht untersucht	-	nicht beurteilt
S1	PZ	9,3	0,7	x	Grauwacke	stark	stark	-	xxx
F1	PZ	5,2	0,6	x	Grauwacke, Kieselschiefer	gering	stark	sekundäre Ettringitbildung	xx
F2	PZ	2,9	0,8	x	Grauwacke, Kieselschiefer	gering	mittel	sekundäre Ettringit- bildung, Quellen einiger Zuschlagbestandteile	x
F3	PZ	6,1	0,9	-	Grauwacke, zusätz- lich Kieselschiefer	gering	gering	einige Luftporen mit Ettringit gefüllt	x
F4	PZ	3,9	0,7	-	Grauwacke, Quarzporphyr	gering	mittel	Quellen einiger Zuschlagbestandteile	x
A1	PZ	5,7	1,5	x	hauptsächlich Quarzporphyr, zusätzlich Grau- wacke und Kiesel- schiefer	gering	mittel	-	xx
A2	PZ	5,1	1,0	x		gering	mittel	einige Luftporen mit Ettringit gefüllt	xx
A3	PZ	6,2	1,0	x		gering	mittel		xx
A4	PZ	5,6	0,8	-		gering	mittel		xx

¹⁾ Pfeiler 2 / pier 2 ²⁾ Pfeiler 4 / pier 4

bis 70 N/mm² auf. Die Druckfestigkeiten der aus den Flugplätzen F2 bis F4 entnommenen Kerne erreichten mit rd. 38 bis 47 N/mm² für derartige Bauwerke verhältnismäßig geringe Werte (siehe Bild 4).

6.3 Dehnung der Bohrkern

Die maximalen Dehnungen der Bohrkern lagen nach Abschluß der Nebelkammerlagerung zwischen rd. 0,5 und 1,8 mm/m (siehe Bilder 5 a bis 5 d). Auf eine u.U. schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion läßt sich schließen, wenn die Dehnung während der Nebelkammerlagerung deutlich über 0,5 mm/m hinausgeht und/oder eine deutliche Gelbildung festzustellen ist. Versuchsbedingt wird durch die anfängliche Temperatur- und Feuchtezufuhr eine Dehnung von 0,3 bis 0,4 mm/m hervorgerufen. Selbst wenn bei den Bohrkernen in der Nebelkammer nur geringe Dehnungen festgestellt wurden, darf daraus nicht geschlossen werden, daß im Bauwerk keine AKR aufgetreten ist. Die Reaktion und eine dadurch hervorgerufene Dehnung kann bereits im Bauwerk aufgetreten und ggf. dort abgeklungen sein.

An den Bohrkernen der Brücken B1 bis B4 und der Autobahnabschnitte A1 bis A3 wurden Dehnungen von $\geq 1,0$ mm/m gemessen sowie Gelausscheidungen beobachtet, die auf eine AKR hinweisen.

erals, and expansion phenomena as a result of the formation of new phases in the hardened cement paste.

6.4.2 Alkali-silica reaction

The ASR does not generally start from the aggregate surface but from inside the aggregate. Taken as a whole the quantities of gel formed were small. However, even these quantities were sufficient to produce cracks in the aggregate which usually continued into the surrounding matrix. The small quantities of gel often remained within the aggregate. On the other hand, with bridge B1 and lock S1 quite large quantities of gel appeared which emerged from the aggregate and completely or partially filled the adjacent cracks and voids. From the investigations it is suspected that only locally restricted parts of a certain material composition in a grain of greywacke, chert or quartzporphyr exhibit alkali-sensitive reactions. So far there have been no clues for definite identification of such aggregates before they are used in the concrete.

In the thin sections from bridges B1, B2, B4 and B5 the gel formations caused by ASRs were found mainly in chert aggregates. With the airfields F1 and F2 the gel formations observed in the thin sec-

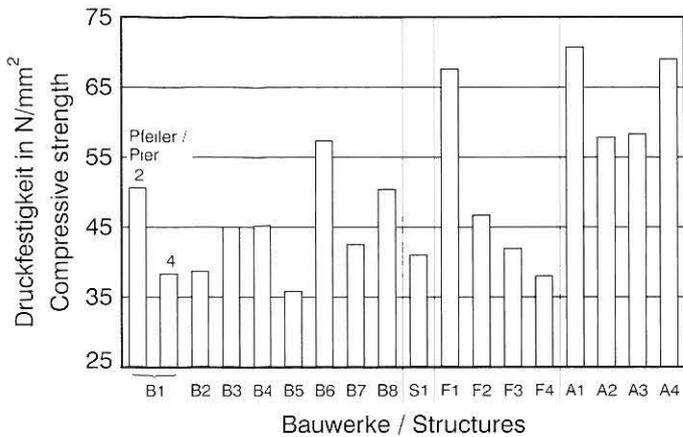


Bild 4 Druckfestigkeiten der Bohrkern mit einem Durchmesser von rd. 10 cm und einer Höhe von rd. 10 cm

Fig. 4 Compressive strength of drilled cores with diameters of about 10 cm and heights of about 10 cm

Bei dem Bohrkern der Schleuse S1 nahm die Dehnung auch nach einem Jahr weiter zu, es traten größere Gelmengen aus, und es bildeten sich deutlich sichtbare Risse. Dies weist auf eine AKR hin. Nennenswerte Gelausscheidungen wurden auch an den Kernen der Flugplätze F1 und F2 sowie der Brücke B5 beobachtet. An den Bohrkernen der Bauwerke B6, B7, F3, F4 und A4 traten weder stärkere Dehnungen noch deutliche Gelausscheidungen auf.

6.4 Beurteilung der Dünnschliffe

6.4.1 Allgemeines

Die Ergebnisse der Dünnschliffuntersuchungen sind in Tafel 3 enthalten. Im wesentlichen ließen sich dabei drei Mechanismen feststellen, die an der Schädigung des Betons mitbeteiligt sein könnten: Alkali-Kieselsäure-Reaktion, Quelldruck durch Wasseraufnahme von Tonmineralen und Treiberscheinungen infolge von Phasenneubildungen im Zementstein.

6.4.2 Alkali-Kieselsäure-Reaktion

Die AKR ging im allgemeinen nicht von der Zuschlagoberfläche, sondern vom Innern des Zuschlags aus. Die gebildeten Gelmengen waren insgesamt gesehen gering. Bereits solch geringe Mengen genügten jedoch, um einen Riß im Zuschlag zu erzeugen, der sich meistens in die umgebende Matrix hinein fortsetzte. Die geringen Gelmengen verblieben oft innerhalb des Zuschlags. Bei der Brücke B1 und der Schleuse S1 traten dagegen größere Gelmengen auf, die aus den Zuschlägen austraten und angrenzende Risse und Poren ganz oder teilweise ausfüllten. Aufgrund der Untersuchungen ist zu vermuten, daß nur lokal begrenzte Bereiche bestimmter stofflicher Zusammensetzung in einem Grauwacke-, Kiesel-schiefer- oder Quarzporphyrkorn alkaliempfindlich reagieren. Bisher fehlen Anhaltspunkte, solche Zuschläge vor der Verwendung im Beton eindeutig zu identifizieren.

An den Dünnschliffen der Brücken B1, B2, B4 und B5 wurden die Gelbildungen infolge einer AKR hauptsächlich an Kiesel-schieferzuschlägen festgestellt. Bei den Flugplätzen F1 und F2 gingen die am Dünnschliff beobachteten Gelbildungen von Grauwacke und Kiesel-schiefer, bei den Flugplätzen F3 und F4 sowie der Schleuse S1 hauptsächlich von Grauwacke und bei der Brücke B6 und den Autobahnabschnitten A1 bis A4 vorrangig vom Quarzporphyr, aber auch von Grauwacke und Kiesel-schiefer aus. Am Dünnschliff der Ausgangsprobe der Brücke B7 wurden nur sehr geringe Mengen an Kieselgel ermittelt, obwohl die als reaktionsfähig bekannten Grauwacken, Kiesel-schiefer und Quarzporphyre vorhanden waren.

An den Dünnschliffen der aus ungeschädigten Bereichen der Bauwerke B6 und B7 entnommenen und in einer Nebelkammer gelagerten Proben wurden, im Gegensatz zu den aus geschädigten Bereichen stammenden Ausgangsproben, keine Gelbildungen beobachtet. Die Brückenbetone B3 und B8 wurden nach der Nebelkammerlagerung mikroskopisch nicht untersucht.

tions started from the greywacke and chert, with airfields F3 and F4 and the lock S1 they started mainly from greywacke, and with the bridge B6 and the motorway sections A1 to A4 they started predominantly from the quartz-porphyr, but also from the greywacke and chert. In the thin section of the initial sample from bridge B7 only very small quantities of silica gel were found although greywackes, cherts and quartz-porphyr which were known to be reactive were present.

In contrast to the initial samples coming from the damaged parts, no gel formations were observed in the thin sections of samples taken from the undamaged parts of structures B6 and B7 and stored in a fog chamber. The concretes from bridges B3 and B8 were not submitted to microscope examination after storage in the fog chamber.

6.4.3 Physical swelling processes

Varying levels of microcracking which started from inside a grain of aggregate of certain minerals and continued into the matrix was observed in the thin sections of the samples from some structures. This involved partially decomposed micas and weathered feldspars. As no gel was detected in these cracks it was assumed that the damage must have occurred through swelling of the aggregate. The clay minerals, especially montmorillonites derived from micas and feldspars can take up water and foreign ions in the intermediate layers of the crystal lattice, and the clay minerals then expand. If the swelling pressure exceeds the tensile strength of the aggregate the aggregate then cracks and so does the matrix. According to the investigations to date this reaction may in fact be a contributory factor in concrete damage but is hardly the main cause of the damage. The thin section samples from structures B1, B3, B5, B7, F2 and F4

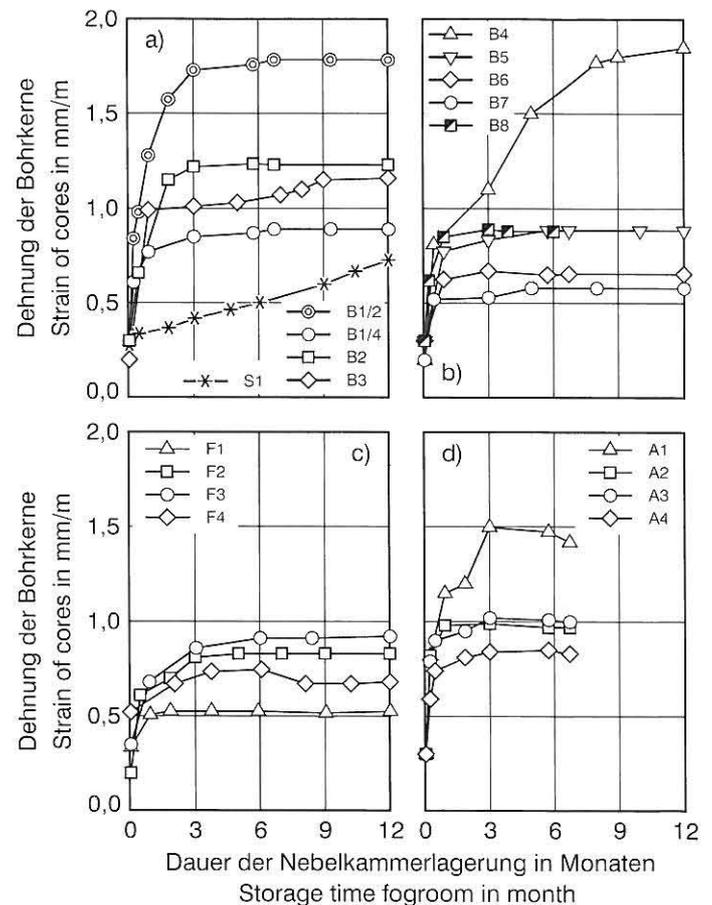


Bild 5 Dehnung von Bohrkernen bei einer 40 °C-Nebelkammerlagerung für: a) Schleuse und Brücken b) Brücken c) Flugbetriebsflächen d) Autobahnabschnitte

Fig. 5 Expansion on storage in a 40 °C fogroom of drill cores from: a) lock and bridges b) bridges c) airfields d) autobahn sections

6.4.3 Physikalische Quellvorgänge

Bei den Proben einiger Bauwerke wurden am Dünnschliff unterschiedlich stark ausgeprägte Mikrorisse beobachtet, die von bestimmten Mineralen innerhalb eines Zuschlagkorns ausgingen und sich in die Matrix hinein fortsetzten. Es handelte sich dabei um teilweise zersetzten Glimmer und angewitterte Feldspäte. Da in diesen Rissen kein Gel nachgewiesen wurde, wird vermutet, daß eine Schädigung durch Quellen des Zuschlags eingetreten sein muß. Die aus Glimmern und Feldspäten entstandenen Tonminerale, insbesondere Montmorillonite, können Wasser und Fremdionen in Zwischenschichten des Kristallgitters aufnehmen. Die Tonminerale dehnen sich dabei aus. Übersteigt der Quelldruck die Zugfestigkeit des Zuschlags, reißt der Zuschlag und mit ihm die Matrix auf. Diese Reaktion kann nach den bisherigen Untersuchungen zwar zu einer Betonschädigung beitragen, wird jedoch kaum die Hauptursache für einen Schadensfall sein. Insbesondere an den Dünnschliffproben der Bauwerke B1, B3, B5, B6, B7, F2 und F4 konnten stärker ausgeprägte Mikrorisse ohne Gelbildung nachgewiesen werden (siehe Tafel 3).

6.4.4 Phasenneubildungen

Poren und Risse, die vollständig mit Phasenneubildungen ausgefüllt sind, weisen auf zusätzliche Treiberscheinungen infolge sekundärer Ettringitbildung hin. Nennenswerte Mengen an Ettringit in Verbindung mit Rissen wurden an den Dünnschliffproben der Flugplätze F1 und F2 gefunden, an denen des Flugplatzes F3 und der Autobahndecken A2, A3 und A4 wurde Ettringit vorwiegend in den Luftporen festgestellt (siehe Tafel 3).

7 Diskussion der Ergebnisse

7.1 Allgemeines

Eine Beurteilung der Schäden hinsichtlich der Beteiligung einer schädigenden AKR ist nur bei einer zusammenfassenden Betrachtung der Ergebnisse aller durchgeführten Untersuchungen möglich:

- Das am Bauwerk vorhandene **Schadensbild** gab zunächst nur erste Anhaltspunkte für mögliche Schadensursachen. Neben den Anzeichen einer AKR, wie z.B. typischer Rißbildung oder Gelausscheidung, müssen auch weitere mögliche Mechanismen, wie z.B. Schwinden, Frost- und Frost-Tausalz-Angriff oder bestimmte nutzungsbedingte Beanspruchungen, die zu Schäden führen können, bei der augenscheinlichen Beurteilung berücksichtigt werden.
- Anhand der **chemischen und petrographischen Analyse des Betons** konnte für jedes Bauwerk überprüft werden, ob die stofflichen Voraussetzungen für eine AKR, d.h. alkaliempfindliche Zuschläge und ein hoher Gesamtalkaligehalt des Betons, gegeben waren.
- **Dehnungen und Gelausscheidungen** an den in der Nebelkammer bei 40°C gelagerten Bohrkernen, ggf. verbunden mit einer Rißbildung, gaben einen wichtigen Hinweis auf eine AKR.
- An **Dünnschliffen** konnte anhand des Rißursprungs, des Rißverlaufes und den im oder in der Umgebung eines Risses gefundenen Reaktionsprodukten auf die Rißursachen wie eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion, eine sekundäre Ettringitbildung oder – bei Fehlen jeglicher Reaktionsprodukte – auf ein Quellen bestimmter Zuschlagbestandteile geschlossen werden.

Die Ergebnisse dieser Untersuchungen sind in Tafel 3 zusammengefaßt. Hierbei ist zu berücksichtigen, daß jeweils nur einige Bereiche der Bauwerke eingehend untersucht wurden. Um weiteren Aufschluß zu erhalten, müßten einige Untersuchungen zu einem späteren Zeitpunkt wiederholt und die Bauwerke weiter beobachtet werden.

7.2 Beurteilung

Unter Berücksichtigung der genannten Kriterien wurde die folgende Beurteilung vorgenommen:

An den überwiegend geringfügigen Schäden der Brücke B7 war, soweit erkennbar, eine **AKR nicht beteiligt**. Stärker ausgeprägte Mikrorisse im Gefüge weisen auf das Quellen einiger Zuschlagbestandteile (Tonminerale) hin.

in particular exhibited quite strongly marked microcracks without any gel formation (see Table 3).

6.4.4 Formation of new phases

Voids and cracks which are completely filled with newly formed phases also exhibited expansion phenomena as a result of secondary ettringite formation. Appreciable quantities of ettringite were found in association with cracks in the thin section samples from airfield F1 and F2, while ettringite was found predominantly in the air voids in the thin sections from airfields F3 and the motorway surfaces A2, A3 and A4 (see Table 3).

7 Discussion of the results

7.1 General

Assessment of the damage with respect to the involvement of a harmful ASR is possible only with a comprehensive examination of the results of all the investigations carried out:

- At first the **appearance of the damage** to the structure only provided initial clues for possible causes of damage. In addition to the signs of an ASR, such as typical cracking or gel secretion, other possible mechanisms, such as shrinkage, freeze-thaw attack or freeze-thaw attack with de-icing salt, or certain stresses and strains caused by the application, which could have resulted in damage, also had to be considered during the visual assessment.
- From the **chemical analysis of the concrete** it was possible to check whether each and petrographical structure satisfied the material preconditions for an ASR, i.e. alkali-sensitive aggregates and a high total alkali content in the concrete.
- **Expansion and gel secretion** in the test cores stored in the fog chamber at 40°C, possibly combined with cracking, provided important evidence of an ASR.
- With **thin sections** it was possible with the aid of the crack origin, the path of the crack and the reaction product found in, or in the surroundings of, a crack to draw inferences about the causes of the crack, such as alkali-silica reaction, secondary ettringite formation or – in the absence of any reaction products – the swelling of certain aggregate constituents.

The results of these investigations are summarized in Table 3. It must be borne in mind that in each case only some areas of the structure were investigated in detail. In order to obtain further information some investigations would have to be repeated at a later date and observation of the structures continued.

7.2 Assessment

Bearing in mind the above-mentioned criteria the following assessment was made:

As far as could be seen, an **ASR was not involved** in the predominantly slight damage to bridge B7. Quite strongly marked microcracks in the microstructure pointed to swelling of some components of the aggregate (clay minerals).

Slight involvement of an ASR cannot be ruled out in the occurrence of damage to five structures – the bridges B5 and B6 and the airfields F2, F3 and F4. With bridge B5 the fog chamber storage led to gel formation which was also observed externally on the test core and on the thin section. With bridge B6 alkali-silica gel was only detected in the initial sample. With airfields F2 and F4 gel formation was observed during the fog chamber storage which, for airfield F2, was also observed in the form of gel excretions in the test cores. With airfields F2, F3 and F4 cracks also appeared to have been caused as a result of temperature shock stressing caused by a thermal thawing procedure – in winter the surfaces were thawed with spray units – in which secondary ettringite had then formed in some places. The swelling of some constituents of the aggregate was also another possible cause of damage to these structures.

A harmful **ASR was involved** in the cracking in eight structures, the bridges B2, B3 and B4, the airfield F1 and the four motorway sections A1 to A4. Quite severe expansion and gel secretion were observed with the test cores from the bridges and motorways during the fog chamber storage. With the exception of bridge B3 some gel formation, indicating an ASR, was also found in the thin sections from

An der Entstehung von Schäden kann bei fünf Bauwerken – den Brücken B5 und B6 sowie den Flugplätzen F2, F3 und F4 – eine **geringfügige Beteiligung einer AKR nicht ausgeschlossen** werden. Bei der Brücke B5 führte die Nebelkammerlagerung zu Gelbildungen, die sowohl äußerlich am Bohrkern als auch am Dünnschliff festgestellt wurden. Bei der Brücke B6 wurde nur an der Ausgangsprobe Alkali-Kieselsäure-Gel nachgewiesen. Bei den Flugplätzen F2 und F4 wurde während der Nebelkammerlagerung eine Gelbildung festgestellt, die sich beim Flugplatz F2 auch in Form von Gelausscheidungen an den Bohrkernen beobachten ließ. Bei den Flugplätzen F2, F3 und F4 scheinen zusätzlich auch Risse infolge einer Temperaturschockbeanspruchung durch einen thermischen Auftauvorgang – im Winter wurden die Flächen mit Düsenaggregaten aufgetaut – entstanden zu sein, in denen sich dann z.T. sekundärer Ettringit gebildet hat. Als weitere mögliche Schadensursache kommt auch für diese Bauwerke das Quellen einiger Zuschlagbestandteile in Frage.

Bei acht Bauwerken, den Brücken B2, B3 und B4, dem Flugplatz F1 sowie den vier Autobahnabschnitten A1 bis A4, war an der Rißbildung eine schädigende **AKR beteiligt**. An den Bohrkernen der Brücken und Autobahnen wurden während der Nebelkammerlagerung stärkere Dehnungen und Gelausscheidungen beobachtet. Auch an den Dünnschliffen dieser Bauwerke wurden, außer bei der Brücke B3, Gelbildungen festgestellt, die auf eine AKR hinweisen. Eine besonders deutliche Zunahme der Gelbildung während der Nebelkammerlagerung wurde an den Dünnschliffproben des Flugplatzes F1 beobachtet. Als alkaliempfindliche Zuschläge wurden in den genannten Bauwerken Grauwacke, Kieselschiefer und Quarzporphyr festgestellt. Beim Flugplatz F1 wurde in Rissen, die vermutlich infolge einer ähnlichen thermischen Beanspruchung wie bei F2 und F3 entstanden sind, zusätzlich sekundärer Ettringit gefunden. An der Schädigung der Brücke B3 können Quellvorgänge einiger Zuschlagbestandteile beteiligt gewesen sein.

Bei zwei der insgesamt 17 untersuchten Bauwerke – der Brücke B1 und der Schleuse S1 – war an der Entstehung der Schäden eine **AKR in erheblichem Maße beteiligt**. Sowohl anhand des Schadensbildes, der Nebelkammerlagerungen der Bohrkern als auch der an den Dünnschliffen gefundenen Mengen an Alkali-Kieselsäure-Gel konnte eine schädigende AKR eindeutig festgestellt werden. Als alkaliempfindliche Zuschläge waren in der Brücke B1 ein Kies mit Anteilen von Kieselschiefer aus dem Raum Magdeburg und in der Schleuse S1 eine präkambrische Grauwacke aus der Lausitz verwendet worden. An den Dünnschliffen der Brücke B1 wurden viele Mikrorisse neben den mit Gel gefüllten Rissen festgestellt, die von verwitterten Feldspäten und Glimmerpaketen ausgingen und kein Gel enthielten. Es ist anzunehmen, daß diese an der Gesamtschädigung nicht unerheblich beteiligte Rißbildung durch Quellvorgänge der genannten Mineralen verursacht wurde.

Für die Brücke B8 wurde anhand der vorliegenden Ergebnisse keine Bewertung hinsichtlich einer AKR vorgenommen. Die stark geschädigten Bauteile (Pfeilervorköpfe) wurden während des Untersuchungszeitraumes abgetragen, so daß eine für die endgültige Beurteilung notwendige weitere Probenahme nicht erfolgen konnte.

8 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Die vorliegende Untersuchung geschädigter Bauwerke sollte klären, ob im südlichen Bereich der neuen Bundesländer Zuschläge existieren, die mit den Alkalien des Zementes zu einer schädigenden AKR im Beton führen können. Insgesamt wurden siebzehn Bauwerke untersucht, bei denen Zuschläge aus dem genannten Bereich verwendet wurden. Bei den folgenden Ausführungen ist zu berücksichtigen, daß alle Bauwerke Schäden aufwiesen. An den Schäden von zehn Bauwerken war eine AKR in unterschiedlichem Maße beteiligt. Bei fünf weiteren Bauwerken war eine geringfügige Beteiligung nicht auszuschließen. Bei einem Bauwerk konnten keine Hinweise auf eine schädigende Alkalireaktion gefunden, bei einem weiteren konnte keine Bewertung vorgenommen werden.

Der Beton der Bauwerke enthielt als alkaliempfindliche Zuschläge Grauwacke, Quarzporphyr und Kieselschiefer. Eine Schädigung wurde jedoch nur dann festgestellt, wenn die beiden folgenden im Hinblick auf eine AKR ungünstigen Umstände gemeinsam auftraten:

these structures. A particularly significant increase in gel formation during fog chamber storage was observed in the thin section samples from airfield F1. Greywacke, chert and quartz-porphyr were established as the alkali-sensitive aggregates in the structures mentioned. With airfield F1 secondary ettringite was also found in cracks, which had presumably resulted from similar thermal stressing to that with F2 and F3. Swelling processes from some constituents of the aggregate may have been involved in the damage to bridge B3.

With two of the total of 17 structures investigated – bridge B1 and lock S1 – an **ASR was heavily involved** in producing the damage. A harmful ASR was clearly established not only from the appearance of the damage and the fog chamber storage of the test cores but also from the quantities of alkali-silica gel found in the thin sections. The alkali-sensitive aggregates used were a gravel containing chert from the Magdeburg region in bridge B1 and a precambrian greywacke from Lusatia in the lock S1. In addition to the cracks filled with gel large numbers of microcracks were observed in the thin sections from bridge B1; these started from weathered feldspars and clumps of mica and contained no gel. It is to be presumed that this cracking, which had a not inconsiderable involvement in the overall damage, was caused by the swelling of the minerals mentioned.

The available results were not used for evaluating the bridge B8 with respect to an ASR. The severely damaged components (pier heads) were demolished during the investigative period so that it was not possible to take the additional samples needed for the final assessment.

8 Summary and conclusions

The present investigation of damaged structures was intended to clarify whether there are any aggregates in the southern region of the new federal states which, together with the alkalis in the cement, can lead to harmful ASRs in the concrete. A total of seventeen structures were investigated in which aggregates from the named region had been used. In the following comments it should be borne in mind that all the structures exhibited damage. ASRs were involved to varying extents in the damage to ten structures. Slight involvement could not be ruled out in five other structures. No indication of a harmful ASR could be found in one structure, and in another one it was not possible to make an evaluation.

The alkali-sensitive aggregates contained in the concrete of the structures were greywacke, quartz-porphyr and chert. However, damage was only discovered when the two following conditions, which are unfavourable with regard to ASRs, occurred simultaneously:

1. A high alkali content in the concrete, usually attributable to a high cement content such as was frequently used in the former East Germany.
2. Ambient conditions which promote reactions, in the form of an adequate supply of moisture while the structure is in use.

The very high levels of cement appear to be primarily responsible for the occurrence of damage with the above-mentioned alkali-sensitive aggregates. It can be assumed that no further cases of damage will occur provided the rules given in DIN 1045 for the production of concrete are observed and the provisional recommendations of the DAfStb (German Association for Reinforced Concrete) for the use of Precambrian greywacke from the southern region of the new federal states [29] are complied with. The classification of greywacke, chert and quartz-porphyr with respect to harmful ASRs is currently being established in continuing laboratory examinations of concrete and aggregates. So far these laboratory tests [10, 11, 31], which will be reported in detail at a later date, have indicated that if very unfavourable conditions are present then it is primarily the Precambrian greywacke which can lead to a harmful reaction with very high levels of alkali in the concrete. Chert is far less affected by comparable reactions. Laboratory examinations of concrete with quartz-porphyr have so far not shown any damage at all.

The investigations under the direction of the Research Institute of the Cement Industry of the alkali-silica reaction at engineering structures in the new federal states have been supported by the AiF (Federation of Industrial Research Associations) as AiF Research Project No. 273-D with funds from the Ministry for Economic Affairs.

1. Ein hoher Alkaligehalt des Betons, der meist von einem hohen Zementgehalt, wie er in der ehemaligen DDR häufiger verwendet wurde, herrührt.
2. Reaktionsfördernde Umgebungsbedingungen in Form eines ausreichenden Feuchteangebotes während der Nutzung sowie einer Alkalizufuhr von außen.

Für das Auftreten der Schäden mit den o.g. alkaliempfindlichen Zuschlägen scheinen in erster Linie die sehr hohen Zementgehalte verantwortlich zu sein. Es ist anzunehmen, daß bei Beachtung der in DIN 1045 gegebenen Regeln für die Herstellung von Beton und bei Einhaltung der überarbeiteten Alkalirichtlinie, deren Grenzwerte gegenüber den vorläufigen Empfehlungen des DAfStb für die Verwendung präkambrischer Grauwacken aus dem südlichen Bereich der neuen Bundesländer [29] etwas schärfer gefaßt wurden, in Zukunft keine weiteren Schäden auftreten. In weiterführenden labormäßigen Beton- und Zuschlaguntersuchungen wird z.Z. festgestellt, wie Grauwacke, Kieselschiefer und Quarzporphyr hinsichtlich einer schädigenden AKR einzustufen sind. Bisher haben diese Laborversuche [10, 11, 31], über die zu einem späteren Zeitpunkt ausführlich berichtet wird, gezeigt, daß bei Vorliegen sehr ungünstiger Bedingungen in erster Linie die präkambrische Grauwacke bei sehr hohen Alkaligehalten des Betons zu einer schädigenden Reaktion führen kann. Kieselschiefer ist von vergleichbaren Reaktionen weit weniger betroffen. Betonuntersuchungen im Labor mit Quarzporphyr brachten bisher keinerlei Schäden.

Die unter Federführung des Forschungsinstituts der Zementindustrie durchgeführten Untersuchungen zum Einfluß unterschiedlicher Zuschläge auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion bei Ingenieur-Bauwerken in den neuen Bundesländern sind von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) in dem AiF-Forschungsvorhaben Nr. 273-D aus Mitteln des Bundesministers für Wirtschaft gefördert worden.

9 SCHRIFTTUM/LITERATURE

- [1] Richtlinie Alkalireaktion im Beton. Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton, Fassung Dezember 1986. Ergänzt um den Anwendungsbereich Mecklenburg-Vorpommern und die nördlichen Bereiche von Sachsen-Anhalt und Brandenburg mit Erläuterungen von J. Dahms, Eckernförde, „Die Herstellung von Beton in Norddeutschland unter Beachtung der Alkalivorschriften für den Zuschlag“. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, Berlin (Neufassung in Vorbereitung).
- [2] Grattan-Bellew, P.E.: Concrete Alkali-Aggregate Reactions. Proceedings of the 7th International Conference. Ottawa, Canada 1986.
- [3] Hobbs, D.W.: Alkali-Silica Reaction in Concrete. Thomas Telford, London 1988.
- [4] Okada, K.; Nishibayashi, S. und Kawamura, M.: Alkali-Aggregate Reaction – Proceedings of the 8th International Conference. Kyoto, Japan 1989.
- [5] French, W.J.: Report of the Proceedings of the Seminar on Alkali-Aggregate – The European Dimensions. The Geomaterials Unit, Queen Mary and Westfield College. University of London, September 1990.
- [6] Swamy, R.N.: The Alkali-Silica Reaction in Concrete. Blakie and Son Ltd., Glasgow and London 1992.
- [7] The 9th International Conference on Alkali-Aggregate Reaction in Concrete 1992 – Conference Papers. Concrete-Society Publication CS.104 (Two Volumes), London 1992.
- [8] Bielak, G.; Hempel, G.; Rudert, V. und Weh, S.: Differenzierende Betrachtung von betonschädigenden Treibreaktionen unter besonderer Berücksichtigung der Alkali-Zuschlag-Reaktion. Betonwerk + Fertigteil-Technik (1993) H. 8, S. 103/106.
- [9] Fournier, B.: CANMET/ACI International Workshop on Alkali-Aggregate Reactions in Concrete. Dartmouth, N.S. October 1995.
- [10] Forschungsinstitut der Zementindustrie – Tätigkeitsbericht 1990-93, S. 115/118, Beton-Verlag, Düsseldorf 1993.
- [11] Dahms, J.: Alkalireaktion im Beton – Vorbeugende Maßnahmen und neuere Versuchsergebnisse. Beton 44 (1994) H. 10, S. 588/593.
- [12] Vorbeugende Maßnahmen gegen Alkalireaktion im Beton (Beiträge mehrerer Autoren). Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 40, Beton-Verlag, Düsseldorf 1973.
- [13] Locher, F.W. und Sprung, S.: Ursache und Wirkungsweise der Alkalireaktion. beton 23 (1973) H. 7, S. 303/306, und H. 8, S. 349/353.
- [14] Bonzel, J. und Dahms, J.: Alkalireaktion im Beton. beton 23 (1973) H. 11, S. 495/500, und H. 12, S. 547/554.
- [15] Alkalis in Concrete. 6. Intern. Konferenz, Kopenhagen, Juni 1983. Konferenzbericht von Krell, J.: Alkalireaktion im Beton. beton 33 (1983) H. 8, S. 306/307.
- [16] Bonzel, J.; Krell, J. und Siebel, E.: Alkalireaktion im Beton. beton 36 (1986) H. 9, S. 345/349, und H. 10, S. 385/389.
- [17] Henoch, Th.: Beitrag zur Verhinderung von Betonschäden infolge Alkali-Kieselsäure-Reaktion mit Zuschlagstoffen aus dem Norden der DDR. Dissertation Wismar 1987.
- [18] Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton. Vorläufige Richtlinie, Fassung Februar 1974. beton 24 (1974) H. 5, S. 179/185.
- [19] Bonzel, J.; Dahms, J. und Krell, J.: Erläuterungen zur Richtlinie Alkalireaktion im Beton – Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton, Fassung Dezember 1986. Deutscher Ausschuß für Stahlbeton, H. 400, S. 187/201. Beuth-Verlag Berlin/Köln, Berlin 1989.
- [20] Vermeidung von betonschädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktionen. Vorschrift 96/80. Ministerium für Bauwesen, StBA, Berlin 1980.
- [21] Prüfung von Gesteinsbaustoffen und Leichtzuschlagstoffen – Bestimmung des Gehaltes an alkaliempfindlichen Bestandteilen in schweren Zuschlagstoffen. TGL 24 336/41. Ministerium für Bauwesen, StBA, Berlin 1980.
- [22] Vermeidung von betonschädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktionen. 1. Änderung der Vorschrift 96/80. Ministerium für Bauwesen, StBA, Berlin 1986.
- [23] Vermeidung von betonschädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktionen. Vorschrift 96/87. Ministerium für Bauwesen, StBA, Berlin 1987.
- [24] Dahms, J.: Die Herstellung von Beton in Norddeutschland unter Beachtung der Alkalivorschriften für den Zuschlag. In Liste der Träger der Überwachungszeichen, Liste 91, Baustoffüberwachungsverein Nord (BÜV Nord) e.V., 1. Juli 1991.
- [25] Erlaß der Landessprecher über die Einführung von Technischen Baubestimmungen in den Bundesländern Brandenburg, Mecklenburg-Vorpommern, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen vom 22.10.1990. Bundesanzeiger 43 (1991) Nr. 14a, S. 97/134.
- [26] Liste von Baustoffnormen und anderen technischen Richtlinien für die Überwachung. Mitteilungen des Instituts für Bautechnik (1990) H. 6, S. 212/213.
- [27] Weisung Nr. 49/85 über die Festlegung des Alkaligefährdungsgrades S für ausgewählte Betonbauwerke und -bauteile des Industrie-, Hafen- und Verkehrsbaus. Minister für Bauwesen, Berlin 1985.
- [28] Erhöhung der Lebensdauer von Betonbauwerken. Vorschrift 215/88, Abschnitt 5: TGL 33 412/01. Ministerium für Bauwesen, StBA, Berlin 1988.
- [29] Vorläufige Empfehlungen des DAfStb zur Vermeidung möglicher schädigender Alkalireaktionen bei der Verwendung präkambrischer Grauwacke aus den Ländern Brandenburg, Sachsen, Sachsen-Anhalt und Thüringen als Betonzuschlag. Mitteilungen des IfBt 24 (1993) H. 3, S. 89, und H. 5, S. 155.
- [30] Möller, U. und Albrecht, F.: Erfahrungen im Gußbetonbau bei der Herstellung der Zwillingschachtschleuse bei Fürstenberg/Oder. Der Bauingenieur (1928) H. 20, S. 363/370.
- [31] Forschungsinstitut der Zementindustrie – Tätigkeitsbericht 1993-96, S. 46/47, Beton-Verlag, Düsseldorf 1996.