

# Alkalireaktion im Beton \*)

Von Justus Bonzel und Jürgen Dahms, Düsseldorf

## Übersicht

*Der Betonzuschlag eines Teilgebietes Norddeutschlands enthält insbesondere mit dem dort vorkommenden Opalsandstein Bestandteile, die mit dem Alkalihydroxid in der Porenlösung des Betons reagieren können. Die mit der Alkalireaktion verbundene Volumenvergrößerung kann unter ungünstigen Umständen Schäden am Beton, wie z. B. Abplatzungen und Risse, zur Folge haben. Als Begleiterscheinungen können Gelausscheidungen und vorwiegend punkt- oder ringförmige weiße Ausblühungen auftreten. Die wesentlichsten Einflußgrößen der Alkalireaktion sind Menge, Korngröße und Reaktionsvermögen des reaktiven Zuschlags und der wirksame Alkaligehalt des Betons. Sie werden von den Ausgangsstoffen, von der Betonzusammensetzung und von den Umweltbedingungen bestimmt. Auf Entstehung und Umfang von Schäden wirken sich aber auch die Dichtigkeit, die Festigkeit und das Verformungsvermögen des Betons sowie die Beanspruchung, Konstruktion und Art und Anordnung der Bewehrung des Bauteils aus.*

*Zur Klärung der Frage, unter welchen Voraussetzungen und baupraktischen Bedingungen in dem Teilgebiet Norddeutschlands eine schädigende Alkalireaktion auftreten und vermieden werden kann, wurden eine Bestandsaufnahme über das Verhalten zahlreicher mit diesem Zuschlag hergestellter Betonbauwerke Norddeutschlands und im Forschungsinstitut der Zementindustrie umfangreiche auf die norddeutschen Verhältnisse abgestimmte Betonversuche durchgeführt. Die bisherigen Bauwerksuntersuchungen ergaben, daß bei allen untersuchten Schadensfällen, bei denen auch Kennzeichen der Alkalireaktion festgestellt wurden, stets ausreichend Feuchtigkeit vorhanden war, vom Zuschlag nur der Opalsandstein an wesentlichen Reaktionen beteiligt war und Schäden, die durch Alkalireaktion verursacht worden sein könnten, vorwiegend an massigen Bauteilen festgestellt wurden.*

*Bei den Betonversuchen wurden 30-cm-Würfel und Balken 10 x 10 x 50 cm aus Beton mit Zementgehalten zwischen 300 und 600 kg/m<sup>3</sup>, mit W/Z-Werten zwischen 0,40 und 0,60 und mit unterschiedlich zusammengesetztem Betonzuschlag des norddeutschen Raumes verschiedenartig gelagert und auf Alkalireaktion untersucht. Nennenswerte Schäden und Merkmale infolge Alkalireak-*

---

\*) Erweiterte Fassung von Vorträgen der beiden Verfasser auf der Vortragsveranstaltung des Forschungsinstituts der Zementindustrie über „Vorbeugende Maßnahmen gegen Alkalireaktion“ am 20. 2. 1973 in Hamburg.

*tion, wie Gelausscheidungen, Ausblühungen, Abplatzungen, Risse und entsprechend große Betondehnung, ergaben sich nur an dauernd oder zeitweise feucht gelagertem Beton mit opalsandsteinhaltigem Zuschlag und mit mindestens 400 kg/m<sup>3</sup> Zement mit hohem wirksamen Alkaligehalt. Aufgrund der nun insgesamt vorliegenden Erfahrungen und Erkenntnisse ist es möglich, für den norddeutschen Raum vorbeugende Maßnahmen zur Vermeidung von Schäden durch Alkali-reaktion anzugeben.*

## 1. Allgemeines

Unter Alkali-reaktion im Beton wird eine Reaktion zwischen bestimmten Bestandteilen des Zuschlags und dem Alkali-hydroxid in der Porenlösung des Betons verstanden. Das Alkali-hydroxid stammt in der Regel aus den Ausgangsstoffen des Betons, insbesondere aus dem Zement, es kann jedoch auch von außen in den Beton gelangen. Als alkaliempfindliche Zuschlagbestandteile gelten Kieselsäuremodifikationen, die mit bestimmten Alkali-hydroxidlösungen stark und schnell reagieren, nicht aber das bei uns als Betonzuschlag sehr häufig verwendete Quarzgestein. Hinweise über Ursache und Wirkungsweise der Alkali-Kieselsäure-Reaktion siehe u. a. [1].

Obwohl der chemische Vorgang bei der Alkali-Kieselsäure-Reaktion heute als geklärt gilt, ist der Gesamtvorgang sehr komplex und von zahlreichen Einflußgrößen abhängig. Die Reaktion setzt außer den reaktionsfähigen Zuschlagbestandteilen und dem Alkali-hydroxid unbedingt ausreichende Feuchtigkeit voraus, so daß im allgemeinen nur bei feuchten Umweltbedingungen eine stärkere Alkali-reaktion möglich ist. Im ungünstigen Fall kann mit der Alkali-reaktion eine Volumenvermehrung verbunden sein, die Schäden am Beton zur Folge hat. Solche schädliche Alkali-reaktion kann aber z. B. auch durch vorausgegangene Frostschäden gefördert werden, andererseits aber auch Schäden durch andere Ursachen, wie z. B. durch Frosteinwirkungen, auslösen.

Schäden am Beton durch Alkali-reaktion sind z. B. in den USA, Australien, Kanada und Dänemark teilweise schon über drei Jahrzehnte bekannt. Zum Teil wurden auch bereits umfangreiche Versuche zu dieser Frage durchgeführt und für die jeweiligen Verhältnisse Richtlinien und Empfehlungen zur Vermeidung einer schädlichen Alkali-reaktion herausgegeben. Besonders erwähnenswert ist jedoch, daß in diesen Ländern durchweg die Auffassung vertreten wird, daß eine plötzliche Gefährdung der Standsicherheit von Bauteilen als Folge einer Alkali-reaktion nicht zu erwarten ist. In einigen Fällen wurde allerdings die Nutzbarkeit eines Bauteils mit Schäden durch Alkali-reaktion in Frage gestellt, wenn gleichzeitig Witterungseinflüsse einwirkten und nicht rechtzeitig ausgebessert wurde.

Etwa bis 1965 wurde durchweg die Auffassung vertreten, daß in Deutschland eine Alkali-reaktion, durch die die Betonbauteile stark geschädigt würden, nicht auftritt. Damals wurde Alkali-reaktion als mögliche Schadensursache für Risse und Abplatzungen an Betonbauteilen des norddeutschen Raumes hin und wieder in Betracht gezogen, vermutlich angeregt durch entsprechende Feststellungen

im nördlich angrenzenden Dänemark. Die Schäden wurden aber durchweg auf andere Ursachen, wie z. B. Frosteinwirkungen, Schwinden oder Temperaturspannungen, zurückgeführt. Die Auffassung über die Möglichkeit von schädlicher Alkalireaktion in einem begrenzten Teil des norddeutschen Raumes änderte sich nach dem Neubau der Lachswehrbrücke in Lübeck, die in den Jahren 1965/66 erbaut und im Frühjahr 1968 wegen Gefährdung der Standsicherheit wieder abgerissen wurde. Als Schadensursache wurde dabei Alkalireaktion mitgenannt. In jüngerer Zeit sind Schäden an weiteren, meist noch sehr jungen Bauwerken (vorwiegend Brücken) bekanntgeworden, bei denen auch Merkmale einer Alkalireaktion festgestellt wurden und Alkalireaktion als Ursache der sichtbaren Schäden nicht auszuschließen war. Es wird zur Zeit umfassend untersucht, inwieweit Alkalireaktion als auslösende, maßgebliche oder Mitursache für diese Schäden anzusehen ist. Im folgenden soll der Frage nachgegangen werden, unter welchen Voraussetzungen und baupraktischen Bedingungen eine schädigende Alkalireaktion auftreten und wie sie am Beton vermieden werden kann.

## **2. Kennzeichen der Alkalireaktion und ihre Bewertung**

Für eine baupraktische Beurteilung stellt sich die Frage, ob und wie Alkalireaktion am Beton erkennbar ist. Hier muß zunächst zwischen der Gegebenheit einer Alkalireaktion an sich und einer Alkalireaktion mit Schäden am Beton unterschieden werden. Unter Alkalireaktion wird zwar stets eine Reaktion zwischen reaktionsfähigen Zuschlagbestandteilen und Kalihydroxid in der Porenlösung des Betons verstanden, aber – ähnlich wie die Sulfatreaktion im Beton bei der Hydratation des Zements – ist nicht jede Alkalireaktion eine den Beton schädigende Reaktion. Meist wird eine Alkalireaktion ohne wesentliche Schäden verlaufen. Hier interessiert jedoch besonders die Alkalireaktion, die Schäden am Beton zur Folge haben kann.

### **2.1 Merkmale**

Die für den Beton schädliche Alkalireaktion wird häufig von äußerlich erkennbaren Merkmalen bzw. Schäden, wie z. B. Ausscheidungen, Ausblühungen, Auswachsungen, Abplatzungen oder Rissen, begleitet, siehe u. a. [2]. Das sich bei der Alkalireaktion bildende Alkalisilicatgel, das in der Regel farblos, manchmal aber auch dunkel gefärbt ist, kann auf Betonflächen als Geltropfen (siehe Bild 1) ausgeschieden werden. Durch Verdunsten des Wassers und Einwirken der Luftkohlenensäure ( $\text{CO}_2$ ) bildet sich daraus zunächst ein milchig-trübes Gel und bei weiterem Austrocknen ein lockerer, sehr feinkörniger weißer Belag (Ausblühungen), dessen Zusammensetzung sich mit der Zeit ändert. Die weißen Ausblühungen (siehe Bild 2) sind oft punktförmig oder kreisförmig und treten häufig an Rissen und Stellen mit Abplatzungen auf. Geltropfen und Ausblühungen können durch Witterungseinflüsse abgetragen werden.

An der Oberfläche liegende reaktionsfähige Zuschlagkörner können durch Alkalireaktion auswachsen und zu sichtbaren Erhebun-



Bild 1  
Ausscheidung eines  
Geltropfens

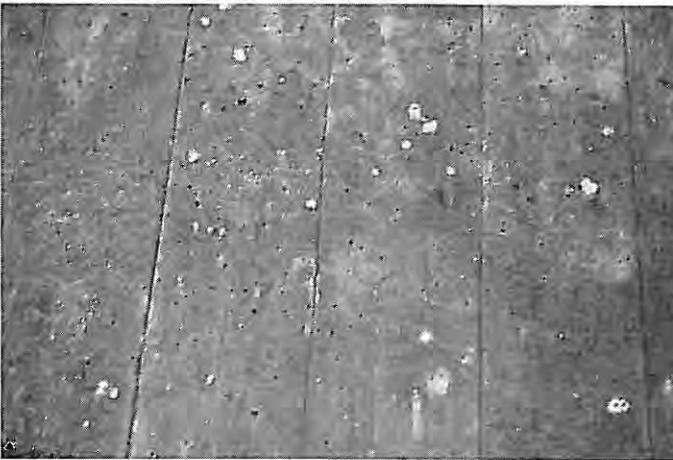


Bild 2 Weiße Ausblühungen

gen auf Betonflächen führen (siehe Bild 3). Die Mörtelschicht über einem nahe der Betonfläche liegenden reaktionsfähigen Zuschlagkorn kann infolge Alkalireaktion abplatzen. Diese Abplatzungen (siehe Bild 4), bei deren Entstehen häufig auch Ausblühungen

Bild 3  
Auswachsung  
eines reagierenden  
Zuschlagkorns



auftreten, sind für den Nichtfachmann allerdings leicht verwechselbar mit Abplatzungen über einem nichtfrostbeständigen Zuschlagkorn. Auch Abplatzungen größerer Betonteile sind möglich, z. B. über etwas tiefer liegenden, größeren reaktionsfähigen Zuschlagkörnern.

Bauteile mit schädlicher Alkalireaktion weisen in der Regel auch feine und/oder gröbere Risse auf (siehe Bilder 5 und 6), deren



Bild 4 Mörtelabplatzung über einem Zuschlagkorn aus Opalsandstein



Bild 5  
Risse und Aus-  
blühungen an einem  
Brückenwiderlager



Bild 6  
Risse und Aus-  
blühungen an einer  
Flügelmauer

Ursache Alkalireaktion sein kann. Feine Risse sind engmaschig und meist nicht tiefgehend, sie können sowohl netzartig als auch von einem Zuschlagkorn ausgehend strahlenförmig verlaufen. Größe, Verlauf und Abstand größerer Risse, die meist tiefergehen, werden in der Regel von den Festigkeitseigenschaften und den sonstigen Beanspruchungen des Betons und von den konstruktiven Gegebenheiten stark beeinflusst. Fast alle Risse, deren Ursache Alkalireaktion ganz oder teilweise ist, sind verwechselbar mit Rissen infolge anderer Ursachen. Bei Bauteilen mit schädlicher Alkalireaktion weisen Risse häufig zu Anfang Gelausscheidungen und später weiße Ausblühungen (siehe Bilder 5 und 6) auf, sofern diese nicht durch Witterungseinflüsse abgetragen worden sind.

## 2.2 Bewertung der Merkmale

Zusammenfassend ist festzustellen, daß die auf der Betonfläche feststellbaren Merkmale einer schädlichen Alkalireaktion meist dem Erscheinungsbild bei Schäden infolge anderer Ursachen sehr ähnlich sind. Risse und Abplatzungen können zwar durch Alkalireaktion verursacht worden sein, ebenso können dafür aber andere Ursachen, wie z. B. Frosteinwirkungen, Schwinden sowie konstruktive und Ausführungsmängel, in Frage kommen. Auch weiße Ausblühungen sind kein eindeutiger Hinweis auf Alkalireaktion, da sie auch durch andere Ursachen bedingt sein können und da sich ihre ursprüngliche, durch Alkalireaktion entstandene Zusammensetzung im Laufe der Zeit ändert und bei Untersuchungen meist vorwiegend Calcit und  $\text{SiO}_2$  festgestellt werden.

Eindeutige Anzeichen für Alkalireaktion sind in der Regel auf der Betonfläche ausgeschiedene Geltropfen und ringförmige weiße Ausblühungen, insbesondere wenn sie an einer Abplatzungsstelle auftreten. Diese Merkmale zeigen aber nur an, daß eine Alkalireaktion stattgefunden hat, sie sind jedoch noch kein Beweis dafür, daß ggf. vorhandene Schäden durch Alkalireaktion verursacht worden sind. Andererseits ist das Fehlen dieser eindeutigen Hinweise aber auch kein Beweis dafür, daß Alkalireaktion nicht aufgetreten oder nicht an der Schadensentstehung beteiligt ist, da Geltropfen nur kurze Zeit in dieser Form erhalten bleiben und da sowohl Geltropfen als auch Ausblühungen durch Witterungseinflüsse abgetragen worden sein können.

Dieser Sachverhalt macht deutlich, daß es in der Regel nicht möglich ist, allein aufgrund einer optischen Beurteilung des äußeren Erscheinungsbildes von Betonflächen zu entscheiden, ob Alkalireaktion als mitauslösende oder Hauptursache einer ggf. vorhandenen Schädigung des Betons anzusehen ist. Zur Klärung dieser Frage sind in der Regel eine genaue Kenntnis der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung sowie für den Einzelfall eingehende Untersuchungen und eine umfassende Begutachtung des Bauteilverhaltens unter Berücksichtigung der gesamten Verhältnisse notwendig. Dabei können die Ergebnisse von Druckfestigkeitsprüfungen und von Durchbiegungsmessungen am gerissenen Beton lediglich für die Beurteilung der Standsicherheit des Bauteils von Bedeutung sein, sofern der untersuchte Beton repräsentativ für den Beton des Bauteils ist.

### 3. Baupraktische Einflußgrößen

Voraussetzung für das Entstehen von Alkalireaktion ist das Vorhandensein von alkaliempfindlichem Zuschlag und von einer mit Alkalihydroxid angereicherten Porenlösung im Beton. Zu Schäden am Beton kann Alkalireaktion führen (siehe Abschnitt 2), wenn die als Folge der Alkalireaktion auftretenden Volumenvergrößerungen vom Beton nicht mehr aufgenommen werden können, d. h. Spannungen zur Folge haben, die ggf. zusammen mit den bereits im Beton vorhandenen Spannungen die Zugfestigkeit des Betons überschreiten und dadurch zu Abplatzungen bzw. zu Rissen führen. Aus diesem Sachverhalt lassen sich auch die wichtigsten baupraktischen Einflußgrößen ableiten. Es sind dies:

Menge, Korngröße und Reaktionsvermögen des reaktiven Zuschlags, Alkalihydroxidgehalt in der Porenlösung des Betons.

Sie werden im wesentlichen bestimmt von den Ausgangsstoffen, von der Betonzusammensetzung und von den Umweltbedingungen. Auf die Entstehung und den Umfang von Schäden wirken sich aber auch die Dichtigkeit, die Festigkeit und das Formänderungsvermögen des Betons sowie die Beanspruchung, Konstruktion, Art und Anordnung der Bewehrung des Bauteils aus.

#### 3.1 Menge, Korngröße und Reaktionsvermögen des reaktiven Zuschlags

Besonders alkaliempfindlich ist der Opal, der im wesentlichen aus sehr reaktionsfähiger amorpher Kieselsäure und aus Cristobalit, einer kristallinen Kieselsäuremodifikation, besteht. Der Opal ist auch ein wesentlicher Bestandteil des Opalsandsteins, der im Betonzuschlag eines Teilgebietes Norddeutschlands enthalten ist. Alkaliempfindlich kann auch künstlich hergestelltes und natürliches Glas sein, wie z. B. Pyrexglas, Duranglas, Bauglas bzw. vulkanische Gläser (Obsidian und glasige Bestandteile in schnell abgekühltem vulkanischem Gestein). Weniger empfindlich ist der Chalcedon, ein sehr feinfasrig ausgebildeter Quarz. Amorphe Kieselsäure und Cristobalit kommen auch in leichtem dichtem Flint vor, der ebenfalls alkaliempfindlich ist und häufig als poröser Flint bezeichnet wird. Nicht alkaliempfindlich ist dagegen die bei unseren Betonzuschlägen am häufigsten vorkommende Kieselsäureart, der Quarz, der auch ein wesentlicher Bestandteil des praktisch nicht alkaliempfindlichen, schweren dichten Flints ist. Siehe u. a. [1, 3, 4]. Für die Beurteilung der Brauchbarkeit alkaliempfindlicher Betonzuschläge eines begrenzten Gebietes des norddeutschen Raumes und ihre Einstufung siehe auch [5].

Die Alkalireaktion läuft bei Vorhandensein einer mit Alkalihydroxid angereicherten Porenlösung um so stärker und schneller ab, je reaktionsfähiger die alkaliempfindlichen Zuschlagbestandteile sind, je kleiner die reaktionsfähigen Zuschlagkörner sind und je größer ihre Menge ist. Die sich als Folge der Alkalireaktion ergebende Volumenvergrößerung (Betondehnung) nimmt jedoch nicht unbegrenzt mit der Stärke und der Geschwindigkeit der Alkalireaktion zu. Bei Vorhandensein einer mit Alkalihydroxid angereicherten Porenlösung nehmen die Betondehnungen mit abnehmender Korngröße und zunehmender Reaktivität und Menge des reaktiven Zuschlags zunächst zu und anschließend wieder ab.

Die Wiederabnahme wird damit erklärt, daß bei sehr hohen Gehalten an reaktionsfähigen Bestandteilen bzw. bei fein aufgeteilten reaktiven Bestandteilen ein sehr wesentlicher Anteil der Alkalireaktion bereits so früh auftritt, daß er eine Dehnung des erhärteten Betons nicht mehr bewirken kann. Aus diesem Grunde wird dem Beton, z. B. in den USA und in Dänemark, teilweise auch feinkörnige Kieselsäure zur Verringerung der Betondehnung infolge Alkalireaktion als vorbeugende Maßnahme zugegeben. Aufgrund praktischer Beobachtungen und Untersuchungen, wie sie z. B. von G. M. Idorn [6] an Betonbauwerken in großem Umfang durchgeführt wurden, dürften alkaliempfindliche Zuschläge mit Korngrößen unterhalb von 1 mm eine nennenswerte Schädigung des Betons durch Alkalireaktion nicht verursachen.

Die Verhältnisse bei Erreichen der für den Einzelfall größten Betondehnung werden als Pessimum bezeichnet. Das Pessimum kann je nach Korngröße und Reaktionsvermögen der alkaliempfindlichen Bestandteile bei sehr unterschiedlichen Mengen an reaktionsfähigen Bestandteilen liegen. Bei bisherigen Versuchen lag dieser Anteil je nach Korngröße und Reaktionsvermögen der alkaliempfindlichen Zuschlagbestandteile vorwiegend zwischen 5 und 20 Gew.-%. Dabei war auch der Absolutwert der Betondehnung unter sonst gleichen Voraussetzungen um so größer, je kleiner das Größtkorn und je größer das Reaktionsvermögen der alkaliempfindlichen Zuschlagbestandteile war. Siehe u. a. [1, 3, 7, 8, 9, 10].

Das Vorhandensein eines Pessimums ist jedoch nicht gleichbedeutend mit dem Vorhandensein von Schäden am Beton. Schäden am Beton treten stets nur dann auf, wenn die sich als Folge der Alkalireaktion ergebende Volumenvergrößerung bzw. Betondehnung so groß ist, daß die sich dadurch ergebenden Zugspannungen vom Beton nicht mehr aufgenommen werden können. Das ist auch beim Pessimum längst nicht immer der Fall.

### **3.2 Alkalihydroxidgehalt in der Porenlösung des Betons**

Bei Vorhandensein ausreichender Mengen alkaliempfindlicher Zuschlagbestandteile nehmen die Alkalireaktion und – soweit sie überhaupt entstehen – auch die Schäden am Beton infolge Alkalireaktion mit zunehmendem Alkalihydroxidgehalt (Natriumhydroxid und Kaliumhydroxid) in der Porenlösung des Betons zu. Die Alkalien in der Porenlösung des Betons stammen in der Regel vorwiegend aus dem Zement. Ein gewisser Anteil kann jedoch unter Umständen auch aus dem Betonzuschlag (z. B. bestimmte Granite) oder den Betonzusätzen kommen oder durch Alkalizufuhr von außen (z. B. durch Meerwasser) in den Beton gelangen. In der Regel ist jedoch der durch den Betonzuschlag oder die Betonzusätze in den Beton gelangende Gehalt an wirksamen Alkaliverbindungen gering.

#### **3.2.1 Wirksamer Alkaligehalt des Zementes**

Der durch den Zement an die Porenlösung des Betons abgebbare Alkaligehalt nimmt mit dem wirksamen Alkaligehalt des Zements und mit dem Zementgehalt des Betons zu. Der Alkaligehalt des

Zements wird in der Regel mit dem  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent ( $\text{Na}_2\text{O}\text{-Äq.} = \text{Na}_2\text{O} + 0,658 \cdot \text{K}_2\text{O}$ ) beurteilt. Zur Zeit wird zur Kennzeichnung des Zements meist der Gesamtalkaligehalt herangezogen, bei Hochofenzement mit mindestens 50 % Hüttensand allerdings unter Berücksichtigung des dabei günstig wirkenden Hüttensandgehaltes. In den meisten Veröffentlichungen über ausländische Erfahrungen und den entsprechenden Vorschriften bzw. Richtlinien wird die Auffassung vertreten, daß wesentliche Schäden am Beton bei Vorhandensein ausreichender Mengen alkaliempfindlichen Zuschlags praktisch nicht auftreten und auch nicht zu erwarten sind, wenn der Gesamtalkaligehalt bei Portlandzement 0,60 Gew.-%  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äq. nicht überschreitet, siehe u. a. [1, 3, 10, 11, 12, 13, 14]. Dieser Zement wird als low-alkali-cement, d. h. als Zement mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt, bezeichnet.

Aufgrund der für den begrenzten Teil Norddeutschlands zur Vermeidung von Schäden durch Alkalireaktion durchgeführten Versuche gelten in der Bundesrepublik Deutschland als Zemente mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt (NA-Zemente):

Portlandzement mit einem Gesamtalkaligehalt von höchstens 0,60 Gew.-%  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äq.,

Hochofenzement mit einem Hüttensandgehalt von mindestens 65 Gew.-% und einem Gesamtalkaligehalt von höchstens 2,00 Gew.-%  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äq. und

Hochofenzement mit einem Hüttensandgehalt von mindestens 50 Gew.-% und einem Gesamtalkaligehalt von höchstens 0,90 Gew.-%  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äq. (vorläufige, auf der sicheren Seite liegende Festlegung).

Siehe auch Ergänzung des Einführungserlasses von DIN 1164 sowie u. a. [1, 15, 16].

### 3.2.2 *Einfluß des Zementgehaltes*

Der vom Zement abgebbare Alkaligehalt nimmt unter sonst gleichen Voraussetzungen auch mit wachsendem Zementgehalt zu. Dadurch erhöht sich der Alkalihydroxidgehalt der Porenlösung und können auch die Alkalireaktion und – soweit sie entstehen – auch die durch Alkalireaktion bedingten Schäden am Beton zunehmen. Aufgrund von Versuchen an kleinen Betonprismen mit den Abmessungen 2,5 cm x 2,5 cm x 28,5 cm vertreten F. W. Locher und S. Sprung [1, 15] die Auffassung, daß für den Umfang von Schäden infolge Alkalireaktion in erster Linie der Gesamtalkalidhydroxidgehalt der Porenlösung maßgebend ist und daß es dabei gleichgültig ist, ob er sich vorwiegend z. B. durch einen hohen Alkaligehalt des Zements oder durch einen hohen Zementgehalt des Betons ergibt. Nach ihrer Auffassung ist Alkalitreiben bei ausreichenden Mengen alkaliempfindlicher Zuschlagbestandteile nur möglich, wenn der wirksame Alkaligehalt des Betons, der sich aus dem wirksamen Alkaligehalt des Zements und dem Zementgehalt des Betons ergibt, 3 kg  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äq. je  $\text{m}^3$  Beton überschreitet. Daraus wurde abgeleitet, daß kein Alkalitreiben auftritt, wenn der Zementgehalt des Betons bei einem wirksamen Alkaligehalt des Zements von 0,60 Gew.-%  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äq. etwa  $500 \text{ kg/m}^3$ , bei einem wirksamen Alkaligehalt des Zements von 0,80 Gew.-%  $\text{Na}_2\text{O}$ -

Äq. etwa 375 kg/m<sup>3</sup> und bei einem wirksamen Alkaligehalt des Zements von 1,00 Gew.-% Na<sub>2</sub>O-Äq. etwa 300 kg/m<sup>3</sup> nicht überschreitet. Bei einer Anwendung solcher Werte ist zunächst zu beachten, daß der wirksame Alkaligehalt von Hochofenzement als NA-Zement (siehe Abschnitt 3.2.1) geringer als der Gesamtalkaligehalt des Zements ist. Unseres Erachtens bedürfen aber sowohl die für den Zementgehalt genannten Grenzwerte als auch die Auffassung, daß sich ein bestimmter Alkaligehalt des Betons bei einer Alkalireaktion gleich auswirkt, unabhängig davon, ob er durch einen niedrigen Alkaligehalt des Zements und einen hohen Zementgehalt oder durch einen hohen Alkaligehalt des Zements und einen entsprechend geringen Zementgehalt zustande kam, noch einer eingehenden Überprüfung unter baupraktischen Verhältnissen. Denn bei solchen Unterschieden entstehen auch Betone mit unterschiedlichen Eigenschaften. So kann eine Erhöhung des Zementgehaltes des Betons im Gegensatz zur Erhöhung des Alkaligehaltes des Zements z. B. einen geringeren W/Z-Wert, eine größere Festigkeit und Dichtigkeit sowie ein anderes Verformungsverhalten des Betons zur Folge haben. Dadurch können sich Einflüsse auswirken, die möglicherweise bei den Versuchen mit den kleinen Prismen nicht erfaßt werden konnten, so daß diese Versuchsergebnisse nicht einfach auf das Verhalten des Betons im Bauteil übertragen werden können. Unseres Erachtens dürfte insbesondere die Begrenzung des Zementgehaltes von NA-Zement auf höchstens 500 kg/m<sup>3</sup> deutlich auf der sicheren Seite liegen. Untersuchungen von R. F. Blanks und H. S. Meissner [17] an Prismen 7,5 cm x 7,5 cm x 38 cm aus Beton gleicher Frischbetonkonsistenz, etwa gleichen Wassergehaltes von rd. 200 Liter/m<sup>3</sup> und aus Portlandzement mit einem Na<sub>2</sub>O-Äq. von 1,38 Gew.-% ergaben bei einer Erhöhung des Zementgehaltes von 225 auf 335 kg/m<sup>3</sup> etwa eine Verdoppelung der Betondehnung infolge Alkalireaktion, jedoch ergab eine weitere Erhöhung des Zementgehaltes auf 445 kg/m<sup>3</sup> keine Zunahme der Betondehnung mehr.

### 3.2.3 Alkalizufuhr von außen

Alkallen können auch nachträglich von außen in den Beton eindringen, wenn der erhärtete Beton mit Alkalisalzen oder alkalihaltigen Flüssigkeiten in Berührung kommt. Der Entstehung von Alkalireaktion ist dies nur förderlich, wenn damit eine weitere Anreicherung bzw. Nachlieferung von Alkalihydroxid in die Porenlösung des Betons verbunden ist. Dies ist bei Zutritt von Natrium- oder Kaliumhydroxid in der Regel der Fall, bei Zutritt anderer Natrium- oder Kaliumsalze, wie z. B. bei Meerwasser oder Tausalzen, aber nur in dem Maße, wie das Anion (z. B. das Chlorid von NaCl) vom Zement gebunden und dann weiteres Alkalihydroxid gebildet und an die Porenlösung abgegeben wird. Da der Zement aber nicht unbegrenzte Mengen, z. B. von Chlorid, binden kann, sind der Begünstigung der Alkalireaktion durch Alkalizufuhr von außen Grenzen gesetzt. Siehe u. a. [2].

### 3.3 Umweltbedingungen

Als baupraktische Einflußgröße haben die Umweltbedingungen für die Alkalireaktion und die ggf. dadurch bedingten Schäden am

Beton eine besondere Bedeutung. Die wichtigste Einflußgröße der Umweltbedingungen ist die Feuchtigkeit, da die für den Ablauf einer Alkalireaktion erforderliche Alkalihydroxidlösung in den Poren des Betons nur vorhanden ist, wenn genügend Feuchtigkeit zur Verfügung steht, der Beton also feucht ist. Nach bisherigen Erfahrungen begünstigen wechselnde Feuchtigkeit und Feuchtigkeitswanderung die Entstehung von Schäden infolge Alkalireaktion mehr als ständige starke Durchfeuchtung, bei der möglicherweise Teile der Reaktionsprodukte herausgelöst werden. Als gesicherte Erkenntnis gilt aber auch, daß eine den Beton schädigende Alkalireaktion an trockenen Betonbauteilen nicht auftritt, so daß bei Decken und anderen Betonbauteilen im Innern von Bauwerken, aber auch bei vor Feuchtigkeit geschützten Außenbauteilen mit schädlicher Alkalireaktion nicht zu rechnen ist. Noch nicht genügend geklärt sind aber die Fragen, wie sich dabei massige Bauteile in trockener Umgebung verhalten und ob dabei wegen der langsamen Austrocknung bereits die durch Herstellung und Nachbehandlung im Beton vorhandene Feuchtigkeit für eine Schädigung des Betons durch Alkalireaktion ausreicht.

Wegen des nachträglichen Eindringens von Alkaliverbindungen in bereits erhärteten Beton siehe Abschnitt 3.2.3.

Eine Einflußgröße der Umweltbedingungen ist schließlich auch die Temperatur. Wie bei den meisten chemischen Vorgängen nehmen auch Reaktionsgeschwindigkeit und Reaktionsprodukte der Alkalireaktion mit zunehmender Temperatur zu. Die den Beton schädigende Wirkung der Alkalireaktion nimmt jedoch nicht unbegrenzt mit wachsender Temperatur zu, sondern im allgemeinen nur bis zu einer Temperatur von etwa 40 °C und anschließend wieder ab. Bei wesentlich höheren Temperaturen wird der Vorgang so beschleunigt und bei sehr niedrigen Temperaturen wird er so verzögert, daß mit Schäden am Beton durch Alkalireaktion dann nicht mehr zu rechnen ist. Schädliche Alkalireaktion dürfte unter baupraktischen Bedingungen vorwiegend im Temperaturbereich von etwa 10 bis etwa 60 °C möglich sein, sich nach bisherigen Erfahrungen bei höheren oder niedrigeren Temperaturen aber kaum mehr auswirken.

### **3.4 Weitere Einflußgrößen**

Noch nicht genügend geklärt ist auch, in welchem Maße die Entstehung von Schäden an Betonbauteilen infolge Alkalireaktion z. B. von der Dichtigkeit, der Festigkeit und dem Verformungsvermögen des Betons sowie der Beanspruchung, der Konstruktion und der Art und Anordnung der Bewehrung des Bauteils beeinflusst wird. Ein etwas weniger dichter Beton kann zwar mehr Feuchtigkeit aufnehmen, was u. U. die Alkalireaktion fördert, in ihm baut sich möglicherweise aber nicht so leicht ein Druck auf, der ein Treiben zur Folge haben könnte. Das Verhalten des Betons wird dabei allerdings auch vom jeweiligen Durchfeuchtungsgrad und vom möglichen Wassersättigungsgrad des Betons abhängen.

Wenig bekannt ist auch über den Einfluß der Festigkeit und des Verformungsvermögens auf das Verhalten des Betons bei Alkali-

reaktion. Aufgrund theoretischer Überlegungen müßte sich unter sonst gleichen Voraussetzungen Beton mit hoher Festigkeit und großem Verformungsvermögen (kleiner E-Modul) dabei günstig verhalten. Dieser Hinweis ist jedoch praktisch wenig nutzbar, da beide Forderungen teilweise gegenläufig und daher kaum zusammen zu verwirklichen sind und da gerade solche Betone auch zementreicher sein können, was wiederum einen höheren Alkalihydroxidgehalt in der Porenlösung des Betons zur Folge hätte (siehe auch Abschnitt 3.2.2).

Es kann wohl als sicher angenommen werden, daß auch die übrige Beanspruchung das Verhalten der Betonbauteile beeinflusst. Spannungen infolge anderer Ursachen, wie z. B. infolge Belastung, Temperatur, Schwindens, können die Spannungen infolge Volumenvermehrung durch Alkalireaktion überlagern und dadurch die Entstehung von Schäden begünstigen. Dabei werden sich sicherlich auch die konstruktiven Gegebenheiten und u. U. auch die Abmessungen der Bauteile auswirken, letztere allerdings auch über den Einfluß der Temperatur und der langsameren Austrocknung bei massigen Bauteilen (siehe auch Abschnitt 3.3).

Von Einfluß auf die Ausbildung von Schäden durch Alkalireaktion kann sicherlich auch die Bewehrung des Betons sein. Aus bisher nicht veröffentlichten Arbeiten des Corps of Engineers (USA) geht hervor, daß durch die Bewehrung die Dehnung des Betons durch Alkalireaktion in Richtung der Bewehrung erheblich herabgesetzt werden kann. Wie Beobachtungen an Bauwerken gezeigt haben (siehe Bild 7), kann sich dabei aber rechtwinklig zur Bewehrung u. U. eine verstärkte Gefügebrauchung ergeben, so daß möglicherweise eine Bewehrung in nur einer Richtung den Umfang der Schäden begünstigt und nur eine räumlich angeordnete Bewehrung zur Vermeidung von Schäden durch Alkalireaktion beiträgt.



Bild 7 Verstärkte Gefügebrauchung rechtwinklig zur Bewehrung

### **3.5 Übertragbarkeit von Erfahrungen und Versuchen auf die baupraktischen Verhältnisse Norddeutschlands**

Wie bereits eingangs erwähnt, muß in Zukunft davon ausgegangen werden, daß aufgrund der Zuschlagvorkommen in einem begrenzten Teilgebiet Norddeutschlands Schäden infolge Alkalireaktion nicht sicher ausgeschlossen werden können, wenn nicht entsprechende Maßnahmen ergriffen werden. Natürlich stellt sich dann zunächst die Frage, ob zur Vermeidung von Schäden durch Alkalireaktion in Norddeutschland nicht die bisher im Ausland vorliegenden Erfahrungen, Richtlinien bzw. Empfehlungen übernommen werden können. Da die Alkalireaktion sehr komplex und vielschichtig ist und ihre Folgen sehr stark von den sehr unterschiedlichen örtlichen Gegebenheiten, insbesondere den in der Regel sehr unterschiedlichen alkaliempfindlichen Zuschlagbestandteilen abhängen, war es nicht möglich, die ausländischen Erfahrungen einfach auf die Verhältnisse Norddeutschlands zu übertragen. Natürlich hätte man weit auf der sicheren Seite liegende Regelungen der ausländischen Erfahrungen übernehmen können. So wären aber z. B. mit der Prüfung und Beurteilung des Zuschlags nach dem sehr strengen und nicht praxisingerechten Verfahren nach ASTM C 289-71 praktisch alle Zuschläge Schleswig-Holsteins und eines erheblichen Teils des übrigen norddeutschen Raumes zu verwerfen gewesen, d. h. Zuschläge, mit denen ohne besondere Maßnahmen seit vielen Jahrzehnten Betonbauten ohne schädigende Alkalireaktion errichtet worden sind.

Aus diesem Grunde war es notwendig, Ursachen und Entstehung von Schäden infolge Alkalireaktion und die Möglichkeiten zur Vermeidung solcher Schäden für den norddeutschen Raum eingehend zu untersuchen. Wegen der komplizierten und vielschichtigen Vorgänge bei der Alkalireaktion und der zahlreichen Einflußgrößen mußte eine Vielzahl von Fragen durch Kurzzeitversuche, bei denen in der Regel kleine Proben unter verschärften Bedingungen während kürzerer Zeit geprüft werden, und durch vereinfachte Prüfungen, wie z. B. die alleinige Prüfung des Zuschlags, geklärt werden, siehe dazu u. a. [1, 5, 15]. Kurzzeitversuche und vereinfachte Prüfungen führen aber – selbst bei weitgehender Nachahmung der praktischen Verhältnisse – allein nicht zu einer genügend sicheren Aussage, wenn die Übertragbarkeit ihrer Ergebnisse auf das baupraktische Verhalten entsprechender Betonbauteile nicht grundsätzlich untersucht worden ist.

Zu diesem Zweck wurden insbesondere während der letzten 6 Jahre auch umfangreiche Betonversuche über Alkalireaktion (siehe Abschnitt 5) im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, durchgeführt. Da auch bei Betonversuchen im Laboratorium nicht alle baupraktischen Einflußgrößen, wie z. B. die baustellenbedingten Einflüsse der Betonherstellung und der Bauausführung, sowie der Einfluß der Bauteilabmessungen, der Belastung bzw. der Beanspruchung, der Bewehrung und der konstruktiven Einzelheiten erfaßt werden, können u. U. auch die Ergebnisse der im Laboratorium durchgeführten Betonversuche noch vom baupraktischen Verhalten der Betonbauteile etwas abweichen. Aus diesem Grunde wurde, quasi zur Eichung der Betonversuche, in Zusammenarbeit mit anderen Stellen auch eine umfangreiche Bestands-

aufnahme über das baupraktische Verhalten von Betonbauten durchgeführt, die vor mehreren Jahren, teilweise vor Jahrzehnten, in Schleswig-Holstein mit dortigem Zuschlag errichtet wurden. Nur mit Hilfe von Betonversuchen im Laboratorium und von Untersuchungen am Bauwerksbeton können das Verhalten der Betonbauteile bei Alkalireaktion sowie die Entstehung von Schäden und ihre Beeinflussungsmöglichkeit unter baupraktischen Bedingungen grundsätzlich und zuverlässig beurteilt werden. Kurzzeitversuche und vereinfachte Prüfungen aber werden bei der grundsätzlichen Abklärung zur Erfassung der zahlreichen Einflußgrößen benötigt und später, um nach der grundsätzlichen Abklärung den Prüfaufwand möglichst gering halten zu können.

#### **4. Verhalten von Bauwerksbeton in Schleswig-Holstein**

In die Bestandsaufnahme der Jahre 1967/68, die sich über ganz Schleswig-Holstein erstreckte, wurden rd. 80 verschiedene Betonbauwerke einbezogen, darunter Industrieanlagen, Kaimauern, Schleusen, Deichsiele, vorwiegend aber Brücken. Hervorzuheben ist, daß es sich dabei um eine ausgesprochen negative Auswahl handelte, weil bevorzugt Bauteile bzw. Bauwerke einbezogen wurden, bei denen bereits Alkalireaktion als Schadensursache vermutet wurde. Es kommt hinzu, daß es in der Regel Bauteile waren, bei denen die Umweltbedingungen (Außenluft, Witterung, Wassernähe) das Entstehen von Alkalireaktion begünstigten. Die wichtigsten Kenndaten der Bauwerke waren:

Entstehungsjahr:	1949 bis 1967, vorwiegend 1957 bis 1964;
Betongüte:	B 160 bis B 600, vorwiegend B 300 und B 450;
Zement:	Portlandzement, Eisenportlandzement und Hochofenzement aller Festigkeitsklassen, auch Traßzement, vorwiegend aber Portlandzement 275, Portlandzement 375 und Hochofenzement 275;
Befonzuschlag:	aus den Räumen Hamburg, Lübeck, Kiel, Rendsburg, Eckernförde und Flensburg (Zuschlag mit Opalsandstein und flinthaltiger Zuschlag).

Aufgrund der Ergebnisse einer ersten Besichtigung ergaben sich bei rd. 40 % der 80 Bauwerke keine Anzeichen oder Hinweise auf Alkalireaktion. Rund 45 % der Bauwerke wiesen leichte Schäden auf (Ausblühungen, Abplatzungen und Risse), als deren Ursache Alkalireaktion ohne eingehendere Untersuchungen nicht sicher auszuschließen war. Bei rd. 15 % der Bauwerke wurden mittlere oder schwerere Schäden (besonders Risse, aber auch Ausblühungen und Abplatzungen) festgestellt, bei denen Alkalireaktion als Schadensursache ebenfalls zunächst nicht auszuschließen war. Bei einer weiteren eingehenden Untersuchung zeigten von den Bauwerken (rd. 60 %), bei denen Alkalireaktion zunächst nicht auszuschließen war, 7 Bauwerke leichte, aber eindeutige Hinweise und 4 Bauwerke starke eindeutige Hinweise auf Alkalireaktion. Abgesehen von einer Ausnahme lag aber eine Gefährdung der Standsicherheit nicht vor.

Vergleicht man die Häufigkeit des Auftretens von Schäden und eindeutigen Hinweisen auf Alkalireaktion unter Berücksichtigung der negativen Auswahl mit der allgemeinen Schadenshäufigkeit bei Bauwerken, so ergibt sich für diese Bestandsaufnahme kein ungünstigeres Bild hinsichtlich Häufigkeit und Stärke der Schäden.

Von Bauteilen mit eindeutigen Anzeichen für Alkalireaktion wurden Betonproben eingehender im Laboratorium untersucht. Dabei wurde festgestellt, daß bei allen untersuchten Schadensfällen mit Kennzeichen der Alkalireaktion stets ausreichende Feuchtigkeit vorhanden war, überwiegend ein vergleichsweise hoher Zementgehalt vorlag, vom Zuschlag durchweg nur der Opalsandstein (siehe Abschnitt 3.1) an wesentlichen Reaktionen beteiligt war und Schäden, die durch Alkalireaktion verursacht worden sein könnten, fast nur an massigen Bauteilen festgestellt wurden. Aus diesen Feststellungen lassen sich bereits entsprechende Folgerungen für das Vermeiden von Schäden ziehen. – Die Untersuchungen und Beobachtungen am Bauwerksbeton wurden auch in den Jahren nach 1968 fortgesetzt, zumal insbesondere an Betonbauteilen von Brücken aus jüngerer Zeit etwas häufiger Schäden und eindeutige Anzeichen für Alkalireaktion festgestellt worden sind. Diese Untersuchungen sind noch nicht abgeschlossen. Die bereits vorliegenden Ergebnisse führen jedoch zu den gleichen Folgerungen wie die der Bestandsaufnahme 1967/68. Auch nach diesen Untersuchungen war nur der Opalsandstein an wesentlichen Reaktionen beteiligt.

## **5. Betonversuche**

### **5.1 Zweck, Umfang und Durchführung**

Da bei den Untersuchungen über den Bauwerksbeton die Beteiligung an der Entstehung von Schäden nicht genügend abgegrenzt werden konnte, wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie, Düsseldorf, vorwiegend seit 1968 auch umfangreiche Betonversuche mit bisher insgesamt 175 verschiedenen Betonen durchgeführt, siehe auch [18]\*\*). Diese Versuche sollten das Bindeglied zwischen der Bestandsaufnahme am Bauwerksbeton (siehe Abschn. 4), den Kurzzeitversuchen mit den kleinen Prismen und den vereinfachten Prüfungen, z. B. des Zuschlags (siehe [1, 3, 15]), sein. Sie sollten insbesondere einen Aufschluß über die Beeinflussungsmöglichkeit der Alkalireaktion und der Schädigung des Betons durch Alkalireaktion bei definierter Änderung z. B. der Umweltbedingungen, der Ausgangsstoffe und der Betonzusammensetzung liefern – Fragen, die am Beton von Bauwerken nicht untersucht werden können. Dabei wurde zunächst versucht, in der Praxis beobachtete Betonschäden, als deren Ursache Alkalireaktion vermutet wurde, im Laboratorium unter definierten Bedingungen am Beton zu reproduzieren. Damit die Versuche möglichst praxisgerecht waren, wurden bei ihrer Durchführung die

---

\*\* ) An der Versuchsdurchführung war Herr Dipl.-Ing. E. Siebel wesentlich beteiligt.

Verhältnisse des norddeutschen Raumes möglichst weitgehend nachgeahmt.

### 5.1.1 Ausgangsstoffe

Aus diesem Grunde wurden in die Versuche vorwiegend Zemente und Zuschläge aus Norddeutschland einbezogen. Die Zuschläge stammten aus 8 verschiedenen Vorkommen (siehe Tafel 1). Verwendet wurden die Korngruppen 0/3 mm, 3/7 mm, 7/15 mm und 15/30 mm. An Gesteinsarten enthielten sie vorwiegend Sandstein, Kalkstein, Mergel, Quarzit, Quarzgestein, Flint und magmatisches Gestein. Bei den Zuschlägen B, K und S lag der Sandstein zu einem erheblichen Anteil als Opalsandstein vor (siehe Tafel 1). Sie gelten als typische Vertreter der Zuschlagvorkommen Schleswig-Holsteins, bei denen mit einem erhöhten Anteil an Opalsandstein gerechnet werden muß. Als Vertreter vorwiegend flinthaltiger Zuschlagvorkommen werden die Zuschläge I, E und T angesehen, die Zuschläge I und E enthielten außer dem Flint aber auch noch einen erheblichen Anteil an Opalsandstein (siehe Tafel 1).

Tafel 1 Art und Herkunft der Zuschläge

Nr.	Bezeichnung*)	Vorkommen in der Gegend von	verwendete Korngruppen mm	wesentliche Gesteinsarten	Beurteilung nach VDZ-Verfahren
1	B, K, S	Lübeck — Malente	0/3; 3/7; 7/15; 15/30	Granit + Gneis, Sediment (Kalk + Kalkmergel, Sandstein, insb. Opalsandstein), Flint	bedenklich
2	I	Schlgw. — Flensburg	0/3; 3/7; 7/15; 15/30	Granit + Gneis, Flint, Sediment (Kalk + Kalkmergel, Sandstein, auch Opalsandstein)	bedingt brauchbar bis bedenklich (je nach Lieferung)
3	E	Eckernförde	3/7; 7/15; 15/30	Granit + Gneis, Sediment (Kalk + Kalkmergel, Sandstein, auch Opalsandstein), Flint	bedingt brauchbar bis bedenklich (je nach Lieferung)
4	T	Themse (Mündung)	3/7; 7/15; 15/30	Flint, Quarz, Quarzit, Granit	bedingt brauchbar
5	G	Lübeck	0/3		bedingt brauchbar
6	R	Düsseldorf	0/3; 3/7; 7/15; 15/30	Granit + Gneis, Quarz, Quarzit, Sediment	unbedenklich

\*) von den Zuschlägen B, I, E und R wurden mehrere Lieferungen einbezogen

Nach Augenschein beurteilt, entsprachen die Zuschläge DIN 4226 Blatt 1. Ihre Alkaliempfindlichkeit wurde mit Hilfe des vom VDZ erarbeiteten Verfahrens untersucht und beurteilt. (Es wird zur Zeit von einem Ausschuß des DAfSt für die Übernahme in die Richtlinien „Vorbeugende Maßnahmen gegen Alkalireaktion im Beton“ beraten.) Hiernach wurde der Zuschlag aufgrund seines in Natronlauge löslichen Opalgehaltes und der Rohdichte seines Flints als „unbedenklich“, „bedingt brauchbar“ oder „bedenklich“ eingestuft, siehe u. a. Tafel 2 und [3]. Bei dieser Prüfung erwiesen sich die Zuschläge B, K und S aufgrund ihres Opalsandsteingehaltes als „bedenklich“, die Zuschläge I und E je nach Lieferung als „bedingt brauchbar“ bis „bedenklich“, die Zuschläge Z und G als „bedingt brauchbar“ und der zum Vergleich einbezogene Rheinkiessand erwartungsgemäß als „unbedenklich“ (siehe auch Tafel 1).

Tafel 2 Beurteilung von Zuschlag mit alkaliempfindlichen Bestandteilen nach [3]

Bestandteile	Grenzwerte in Gew.-% für die Empfindlichkeitsstufen		
	unbedenklich	bedingt brauchbar	bedenklich
Opalsandstein über 1 mm	< 0,5	0,5 bis 2,0	> 2,0
reaktionsfähiger Flint über 4 mm	< 3,0	3,0 bis 10,0	> 10,0
5mal Opalsandstein plus reaktionsfähiger Flint	< 4,0	4,0 bis 15,0	> 15,0

In die Versuche wurden 15 Zemente nach DIN 1164 einbezogen, die sich insbesondere nach Art, Festigkeitsklasse und wirksamem Alkaligehalt unterschieden. Dies waren zwei PZ 475 (PZ 550 nach der neuen DIN 1164), sechs PZ 375 (PZ 450 F), zwei PZ 275 (PZ 350 F), ein EPZ 275 (EPZ 350 F), ein HOZ 375 (HOZ 450 L), zwei HOZ 275 (HOZ 350 L) und ein TrZ 275 (TrZ 350 F). Ihre wesentlichsten Kenndaten, die hier von Bedeutung sind, gehen aus Tafel 3 hervor. Die 28-Tage-Druckfestigkeit lag zwischen 410 und 622 kp/cm<sup>2</sup>. Der Gesamtalkaligehalt betrug bei den Portlandzementen 0,43 bis 1,40 Gew.-% Na<sub>2</sub>O-Äq., beim Eisenportlandzement 0,89 Gew.-% Na<sub>2</sub>O-Äq., bei den Hochofenzementen 0,95 bis 1,29 Gew.-% Na<sub>2</sub>O-Äq. und beim Traßzement 1,72 Gew.-% Na<sub>2</sub>O-Äq. Der Hüttensandgehalt betrug beim Eisenportlandzement 29 Gew.-% und lag bei den Hochofenzementen zwischen 45 und 80 Gew.-%. Der Traßzement wurde im Institut aus 70 Gew.-% Portlandzement a nach Tafel 3 und 30 Gew.-% Traß aus dem Neuwieder Becken zusammengesetzt. Nach Abschn. 3.2.1 gelten die Portlandzemente b und b1 und die Hochofenzemente m und r als Zemente mit niedrigem wirksamem Alkaligehalt. Als Zemente mit hohem wirksamem Alkaligehalt dürften die Portlandzemente k, l und si anzusehen sein.

Tafel 3 Art, Festigkeitsklasse und Eigenschaften der verwendeten Zemente

Nr.	Bezeichnung	Art und Festigkeitsklasse	Mahl-	28-Tage-	Gesamtal-	Hütten-
			feinheit (Blaine) cm <sup>2</sup> /g	Druck- festigkeit nach DIN 1164 kp/cm <sup>2</sup>		
1	k	PZ 475 (PZ 550)	5390	572	1,40	
2	l	PZ 475 (PZ 550)	6590	622	1,06	
3	si	PZ 375 (PZ 450 F)	3540	519	1,03	
4	sch	PZ 375 (PZ 450 F)	3680	571	0,89	
5	n	PZ 375 (PZ 450 F)	4020	587	0,82	
6	a	PZ 375 (PZ 450 F)	3100	566	0,70	
7	b	PZ 375 (PZ 450 F)	3440	575	0,47	
8	bl	PZ 375 (PZ 450 F)	3280	575	0,43	
9	ki	PZ 275 (PZ 350 F)	2930	477	0,87	
10	s	PZ 275 (PZ 350 F)	3520	433	0,70	
11	e	EPZ 275 (EPZ 350 F)	3060	481	0,89	29
12	re	HOZ 375 (HOZ 450 L)	3900	585	0,95	45
13	m	HOZ 275 (HOZ 350 L)	3800	410	1,29	68
14	r	HOZ 275 (HOZ 350 L)	4040	426	1,0	80
15	t	TrZ 275 (TrZ 350 F)	4150	441	1,72	30

### 5.1.2 Betonzusammensetzung

Die Betone wurden so zusammengesetzt (siehe Tafel 4), daß sowohl Betone unterschiedlicher Festigkeit und Dichtigkeit als auch der unmittelbare Einfluß der Betonzusammensetzung, wie z. B. Unterschiede im wirksamen Alkaligehalt des Betons, sowie Menge und Korngruppe des alkaliempfindlichen Zuschlags erfaßt wurden. Da zunächst Schäden durch Alkalireaktion im Laboratorium zu reproduzieren und auch die Grenzen der Betonzusammensetzung, bei denen Schäden durch Alkalireaktion nicht mehr entstehen, zu suchen waren, wurden Betone mit größerem Zementgehalt und kleinerem W/Z-Wert, d. h. Betone höherer Festigkeit und größerer Dichtigkeit, in größerem Umfang untersucht. Insgesamt lag der Wasserzementwert zwischen 0,40 und 0,60 und der Zementgehalt zwischen 300 und 600 kg/m<sup>3</sup>. Beton mit einem Zementgehalt von 600 kg/m<sup>3</sup> wurde jedoch nur einbezogen, um einen Anschluß an die Versuche mit den kleinen Feinbetonprismen (siehe [1, 15]) zu bekommen.

Die Kornzusammensetzung der Zuschlaggemische 0/30 mm entsprach etwa der Sieblinie E von DIN 1045 (alt), der Anteil bis 0,2 mm war allerdings auf 3 bis 4 Gew.-% begrenzt. Bei den Anschlußreihen zu den Versuchen mit kleinen Feinbetonprismen, siehe [1, 15], wies das Zuschlaggemisch 0/15 mm folgende Kornzusammensetzung auf: 10 Gew.-% 0/0,2 mm, 30 Gew.-% 0,2/1 mm, 20 Gew.-% 1/3 mm, 20 Gew.-% 3/7 mm und 20 Gew.-% 7/15 mm.

Tafel 4 Zusammensetzung, Frischbetoneigenschaften und Druckfestigkeit der untersuchten Betone

Zeile Nr.	Zuschlag und verwendete Korngruppe entsprechend Tafel 1	Verwendete Zemente entsprechend Tafel 3	Zementgehalt kg/m <sup>3</sup>	Wassergehalt	Frischbetonrohichte kg/dm <sup>3</sup>	LP-Gehalt %	Konsistenz im Mittel; Aufschläge nach Powers	Rohdichte im Alter von 28 Tagen kg/dm <sup>3</sup>	Druckfestigkeit 28 Tagen kp/cm <sup>2</sup>
1	0/3 R und 65 % 3/30 B (E) 0/30 I	a, I, r, re, s	300	0,60	2,33 bis 2,41	0,8 bis 1,5	6	2,28 bis 2,35	401 bis 683
2	0/7 I und 40 % 7/30 R 0/30 I	b, r	330	0,60	2,36 bis 2,38	1,1 bis 1,2	4	2,28 bis 2,33	418 bis 422
3	0/30 R 3/3 R, 40 % 3/15 B, 20 % 15/30 R	b, e, ki, m	330	0,53	2,34 bis 2,41	1,4 bis 3,0	34 cm (Ausbreitm.)	2,30 bis 2,34	402 bis 557
4	0/3 R, 65 % 3/30 E	k	330	0,50	2,38	1,4	14	2,35	716
5	0/3 R und 65 % 3/30 B (K, S) 0/30 I	a, k, I, r, re, si	330	0,45	2,32 bis 2,41	1,6 bis 2,3	17	2,27 bis 2,39	499 bis 808
6	0/30 R (E, B, S, I) 0/30 R und 5, 10, 15, 20, 25 oder 35 % 3/7 B(I) 0/3 R und 65 % 3/30 B (S, E, K, T) 0/7 I und 40 % 7/30 R 0/3 R, 40 % 3/15 B und 20 % 15/30 R	a, b, e, k, I, r, re, s, sch, si, t	400	0,45	2,32 bis 2,42	0,8 bis 2,6	7	2,25 bis 2,38	450 bis 779
	0/30 B	k	400	0,45	2,29	4,4	9	2,26	601
7	0/3 R und 65 % 3/30 B (E, K)	a, I, r	500	0,40	2,33 bis 2,39	0,9 bis 1,7	9	2,32 bis 2,36	512 bis 796
8	0/30 R 0/30 R und 5, 10, 15, 20, 25, 30 und 35 % 3/7 B(I) 0/30 R und 65 % 3/30 B (S)	a, k, I, re, s, si	500	0,45	2,30 bis 2,40	0,7 bis 1,5	4	2,28 bis 2,36	598 bis 737
	0/30 R und 15 % 3/7 B	I	500	0,45	2,23	5,2	2	2,22	519
9	0/3 R, 20 % 3/7 B und 20 % 7/15 R	a, k, I	600	0,45	2,24 bis 2,29	1,0 bis 1,8	3	2,23 bis 2,27	619 bis 774

Das Zuschlaggemisch bestand bei einigen Betonen nur aus „bedenklichem“ bzw. „bedingt brauchbarem“ Zuschlag eines Vorkommens. Einige Betone enthielten diesen Zuschlag aber auch nur im Kornbereich 3/30 mm bzw. ganz oder teilweise im Kornbereich 3/7 mm. Zur Klärung der Frage, ob Schäden infolge Alkali-reaktion am Beton mit künstlich eingeführten Luftporen als Pufferraum vermeidbar sind, wurden einige Betone, die unter ungünstigen Umweltbedingungen starke Schäden durch Alkali-reaktion aufwiesen, auch unter Verwendung eines Luftporenbildners hergestellt.

### 5.1.3 Beton- und Probekörperherstellung

Die Betonausgangsstoffe wurden gewichtsmäßig zugegeben und im 150- bzw. 250-Liter-Tellerzwangsmischer (DIN 459) rd. 2 min gemischt. Je nach Zusammensetzung ergab sich dabei ein Beton steifer, plastischer oder weicher Frischbetonkonsistenz nach DIN 1045 mit Aufschlagzahlen nach Powers zwischen 3 und 17 (siehe Tafel 4). Die Frischbetonrohichte lag je nach Zusammensetzung zwischen 2,23 und 2,42 kg/dm<sup>3</sup>, der Gesamtluftporengehalt beim Beton ohne luftporenbildende Zusatzmittel zwischen 0,7 und 3,0 % und beim Luftporenbeton bei rd. 4,5 % und 5,2 %.

Um auch einen Aufschluß über den Einfluß der Probekörperabmessungen zu erhalten, wurden für die verschiedenen Prüfungen Betonbalken 10 cm x 10 cm x 50 cm sowie Betonwürfel mit 10 und 30 cm Kantenlänge gemäß DIN 1048 Blatt 1 hergestellt. Bei der Probekörperherstellung wurde der Beton in zwei Schichten unter Stochern in die Formen eingefüllt und auf einem Rütteltisch (Frequenz rd. 3000 U/min, Schwingungsbreite rd. 1 mm) je nach Probekörper und Frischbetonkonsistenz rd. 20 bis 80 sec lang verdichtet.

### 5.1.4 Lagerung und Prüfung

Alle Probekörper lagerten bis zum Entformen im Alter von 1 Tag unter feuchten Tüchern bei rd. 20 °C. Danach sind im wesentlichen folgende Lagerungen zu unterscheiden:

- a) Betonbalken 10 cm x 10 cm x 50 cm und 30-cm-Würfel wurden unmittelbar nach dem Entformen in einer Nebelkammer bei 40 °C und 100 % rel. Luftfeuchte gelagert (siehe Bild 8). Mit dieser Nebelkammerlagerung wurden definierte und Alkali-reaktion begünstigende Umweltbedingungen geschaffen; insbesondere war bei einer Temperatur von 40 °C mit einer Beschleunigung einer möglichen Reaktion zu rechnen.
- b) Gleiche Balken und 30-cm-Würfel lagerten bis zum Alter von 7 Tagen unter feuchten Tüchern und zur Nachahmung praktischer Verhältnisse anschließend ungeschützt im Freien auf einem Flachdach im dritten Obergeschoß des Forschungsinstituts (siehe Bild 9).
- c) Zur Beurteilung des Einflusses weiterer, definierter Feuchtigkeitsverhältnisse lagerten Würfel mit 10 cm Kantenlänge im Klimaraum bei rd. 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte (siehe Bild 10). Davon wurde jeweils ein Würfel je Beton nach 28 Tagen

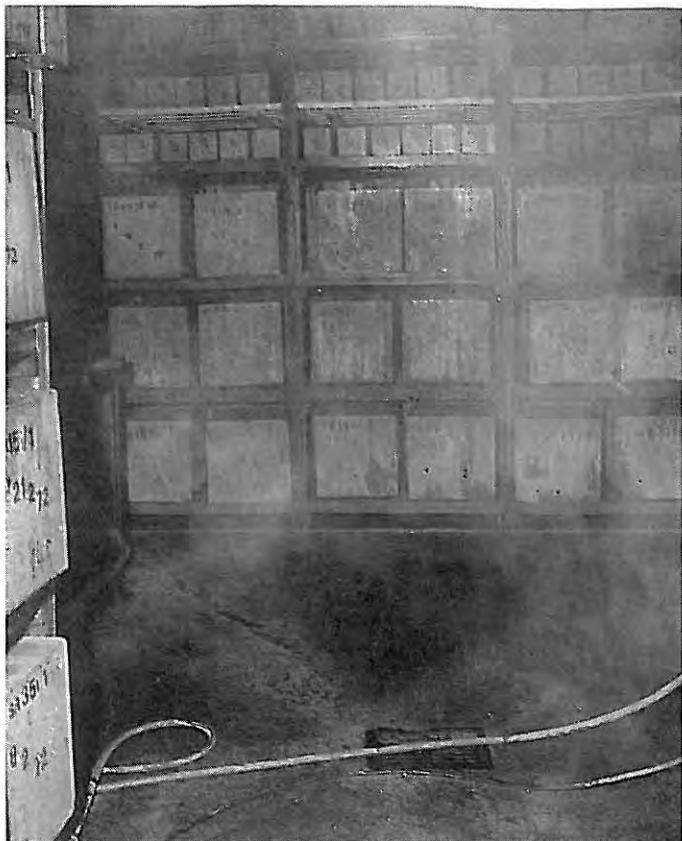


Bild 8 Lagerung in der Nebelkammer (40 °C und 100 % rel. Luftfeuchte)



Bild 9 Lagerung auf einem Dach des Instituts (Freiluftlagerung)



Bild 10 Trockenlagerung im Klimaraum (20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte)

und nach 6 Monaten mit der Unterseite etwa 1 cm tief in Wasser gestellt (Fußbadlagerung).

- d) Zur Erfassung des Einflusses einer langsamen Wasserabgabe bzw. einer weitgehenden Vermeidung von Wasserabgabe und -aufnahme wurden außerdem einige 30-cm-Würfel unmittelbar nach dem Entformen im Alter von 1 Tag bei 20 °C und rd. 97 % rel. Luftfeuchte oder mit Kupferfolie bzw. mit 2 Lagen Polyäthylenfolie dicht verpackt bei 20 °C gelagert.

Alle Probekörper wurden in angemessenen Zeitabständen auf sichtbare Veränderungen, wie z. B. Gelausscheidungen, Ausblühungen, Abplatzungen und Risse, untersucht. Zur Erfassung von Längenänderungen infolge Alkalireaktion wurde an den Balken der „Nebekammerlagerung“ außerdem laufend die Länge von zwei 40 cm langen Meßstrecken, die auf zwei gegenüberliegenden Seitenflächen angebracht waren, mit dem Setzdehnungsmesser gemessen. (Die als Folge der Alkalireaktion auftretende Verlängerung konnte direkt nur bei konstanter Temperatur und Vermeidung von Feuchtigkeitsänderungen erfaßt werden.)

Über weitere Prüfungen an den Probekörpern, wie z. B. eine zerstörende Festigkeitsprüfung, wird je nach Verhalten der Probekörper zu einem späteren Zeitpunkt befunden.

## 5.2 Erörterung der Versuche

Die sehr unterschiedlich zusammengesetzten Betone wiesen an den nach DIN 1048 Blatt 1 normal gelagerten 10-cm-Würfeln im Alter von 28 Tagen je nach Zusammensetzung eine Rohdichte von 2,22 bis 2,39 kg/dm<sup>3</sup> und eine Druckfestigkeit von 401 bis 808 kp/cm<sup>2</sup> auf (siehe Tafel 4).

An ungünstig zusammengesetzten und feucht gelagerten Betonen mit sehr alkaliempfindlichem Zuschlag traten Merkmale und Schäden infolge Alkalireaktion auf. Sie konnten durch das Einführen von Mikroluftporen mit Hilfe eines luftporenbildenden Zusatzmittels nicht vermieden werden. Als Merkmale und Schäden wurden Gelausscheidungen, Ausblühungen, Abplatzungen und Risse an Würfeln und Balken sowie unterschiedlich große Dehnungen in Längsrichtung von Balken der „Nebekammerlagerung“ festgestellt. Der jeweilige Schadenszustand wurde mit Hilfe der Kennwerte der Tafel 5 beurteilt. In Tafel 5 wurden die verschiedenen

Tafel 5 Beurteilung von Schäden

Schadensstufe	Rißbild von Balken oder Würfeln der Außen- oder der Nebekammerlagerung	Dehnungen in mm/m von Balken bei Nebel- kammerlagerung*)
0	keine Risse	bis 0,3
1	einzelne feine Risse	0,3 bis 0,5
2	mehrere feine Risse	0,5 bis 0,8
3	einige größere Risse (über 0,2 mm Rißweite), teilweise auch feine Risse	0,8 bis 1,5
4	mehrere größere und feine Risse	1,5 bis 3
5	sehr starke Rißbildung auf allen Flächen	> 3

\*) einschl. einer Dehnung von etwa 0,2 mm/m infolge Temperaturerhöhung von 20 auf 40 °C

Schadensarten (Risse, Dehnungen) den jeweiligen Schadensstufen auf der Grundlage etwa gleich starker Rißbildung zugeordnet. Für die Einstufung des Verhaltens eines bestimmten Betons in die Schadensstufen 0 bis 5 der Tafel 5 wurde die bei den verschiedenen Lagerungen (siehe Abschn. 5.2.1), Probekörperarten (Würfel, Balken) und Schadensarten (Risse, Dehnungen) festgestellte ungünstige Schadensstufe zugrunde gelegt. Sie war beim gleichen Beton u. a. wegen der Streuungen und wegen des Einflusses der Lagerungen und der Probekörperabmessungen (siehe Abschn. 5.2.1) meist nicht gleich.

Gelausscheidungen, Ausblühungen und Abplatzungen gingen in die Beurteilung nicht ein, sie nahmen jedoch im allgemeinen mit wachsender Schadensstufe zu. Eine Ausnahme machten die Probekörper der „Freiluftlagerung“. Hier traten Gelausscheidungen, Ausblühungen und Abplatzungen in deutlich geringerem Maße auf (siehe Abschn. 5.2.1).

Bild 11 zeigt den Dehnungsverlauf in Abhängigkeit von der Zeit für je ein Beispiel der Schadensstufen 0, 3 und 5. Bild 12 gibt einen Überblick über den Dehnungsverlauf aller bisher untersuchten Betone der „Nebekammerlagerung“. Über das übliche Maß hinausgehende Dehnungen wiesen nur feucht gelagerte Betone auf, die „bedenklichen“ Zuschlag und mindestens 400 kg/m<sup>3</sup> Zement mit hohem wirksamen Alkaligehalt enthielten. Bis-

her wurden — einschließlich einer Dehnung von rd. 0,2 mm/m infolge der Temperaturerhöhung in der Nebelkammer um rd. 20 grd — Dehnungen bis zu rd. 3,5 mm/m festgestellt. Bei den vorliegenden Untersuchungen waren Betone, die die Schadensstufe 1 nicht überschritten, als völlig unbedenklich anzusehen. Auch bei Beton der Schadensstufe 2 dürfte die Tragfähigkeit des Betons nicht nennenswert beeinträchtigt sein. Da-

Bild 12 Qualitativer Überblick über den Dehnungsverhalt aller bisher untersuchten Betone

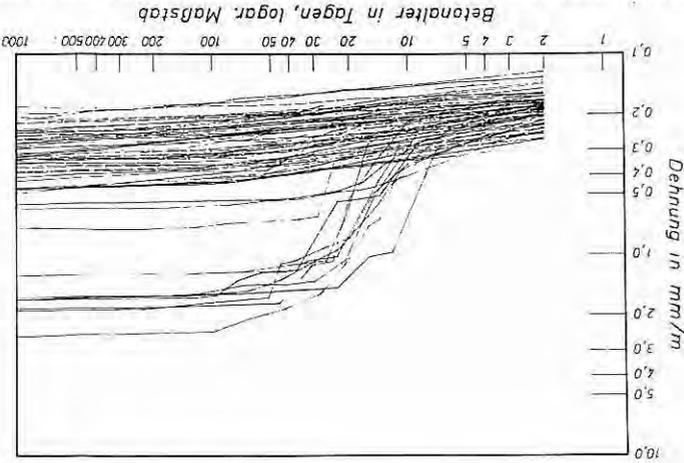
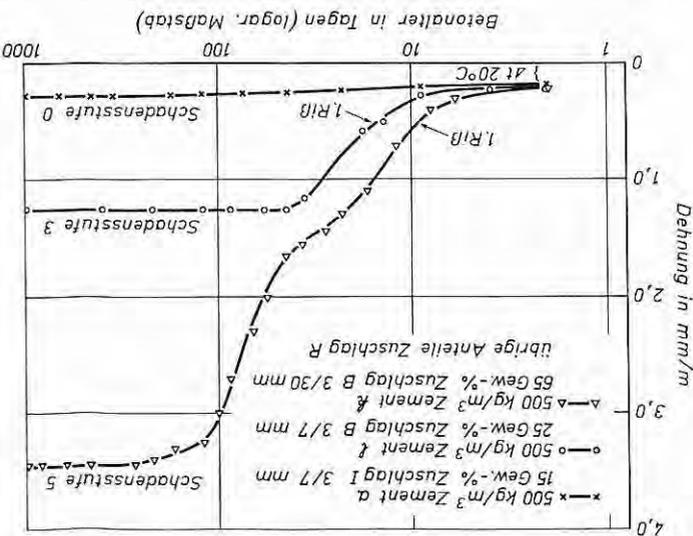


Bild 11 Dehnungsverhalt für je ein Beispiel der Schadensstufen 0, 3 und 5 nach Tafel 5



gegen muß bei Beton der Schadensstufe 3 bereits mit einer wesentlichen Festigkeitsbeeinträchtigung und bei Beton der Schadensstufen 4 und 5 mit so starker Festigkeitsminderung gerechnet werden, daß die Standsicherheit von Bauteilen in Frage gestellt sein kann.

### 5.2.1 *Einfluß der Lagerung und der Probekörperart*

Die vorliegenden Untersuchungen, deren älteste Betone zur Zeit rd. 6 Jahre alt sind, bestätigen die Erfahrungen, daß schädliche Alkalireaktion bei Beton entsprechender Zusammensetzung nur möglich ist, wenn genügend Feuchtigkeit zur Verfügung steht. An trocken gelagerten (20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte) Probekörpern aller Betone wurden Mängel und Schäden infolge Alkalireaktion nicht festgestellt. Dies war jedoch bei einigen Betonen der Feuchtlagerung der Fall. Erste Schäden infolge Alkalireaktion wurden frühestens etwa 2 bis 4 Wochen nach Beginn der Feuchtlagerung festgestellt, in der Regel bei der „Nebelkammerlagerung“ etwas früher als bei der „Freiluftlagerung“, aber niemals später als etwa 6 Monate nach Beginn der Feuchtlagerung. Die Schäden nahmen dann mit der Zeit zu und erreichten ihr Maximum spätestens etwa 1/2 bis 1 Jahr nach der ersten Schadensfeststellung. Die Dauer der Schadenzunahme war in der Regel bei der „Freiluftlagerung“ etwas größer als bei der „Nebelkammerlagerung“. Danach konnte eine wesentliche Zunahme der Schäden nicht mehr festgestellt werden, trotz der Witterungseinflüsse auch nicht bei der „Freiluftlagerung“. Dies sollte jedoch für Freiluftlagerungen nicht verallgemeinert werden, weil in Düsseldorf nicht mit wesentlichen Frostwirkungen zu rechnen ist.

Die Feststellungen über das zeitliche Auftreten von Schäden infolge Alkalireaktion gelten in etwa auch für die im Betonalter von 1 Monat und von 6 Monaten der „Fußbadlagerung“ (siehe Abschn. 5.1.4) ausgesetzten Probekörper. Dabei traten die Schäden allerdings etwas verzögert im Vergleich zur „Nebelkammerlagerung“ auf. Der im Vergleich zu den überwiegenden Feststellungen in anderen Ländern rasche Ablauf der Alkalireaktion, der im Grundsatz ja auch bei Bauwerken mit Alkalireaktion des norddeutschen Raumes festgestellt worden ist, scheint kennzeichnend für die Wirkung des sehr alkaliempfindlichen Opalsandsteins des Betonzuschlags zu sein (siehe auch Abschn. 3.1 und 5.2.2).

Auch das jeweilige Schadensbild war abhängig von der Art der Feuchtlagerung. Auf den Bildern 13 bis 17 sind typische Schadensbilder der „Nebelkammerlagerung“ (Bild 13), der „Freiluftlagerung“ (Bild 14), der „Fußbadlagerung“ (Bild 15) und der unmittelbar nach dem Entschalen während etwa 90 Tagen dichtverpackten 30-cm-Würfel (Bilder 16 und 17) dargestellt. Geschädigte Probekörper der „Nebelkammerlagerung“ wiesen im Anfangsstadium Gelausscheidungen, wenige Abplatzungen und wenige feine Risse auf und später Ausblühungen, unterschiedlich zahlreiche Abplatzungen und wenige feine und grobe Risse. An geschädigten Balken der „Nebelkammerlagerung“ wurden bisher — einschließlich einer Dehnung von rd. 0,2 mm/m infolge der Temperaturerhöhung um rd. 20 grad — Dehnungen bis zu maximal 3,5 mm/m festgestellt.

Das Schadensbild geschädigter Probekörper der „Freiluftlage- rung“ sah anders aus. Sie zeigten im Endstadium wenige große und viele feine, netzartig verlaufende Risse. Abplatzungen konnten dort nur vereinzelt, Ausblühungen und Gelausscheidungen praktisch nicht festgestellt werden (Ausblühungen und Gelausscheidungen konnten jedoch durch Witterungseinflüsse abgetragen worden sein). Geschädigte Probekörper der „Fußbadlagerung“ zeigten vorwiegend wenige Abplatzungen sowie wenige grobe und feine Risse. Die Risse verliefen bevorzugt im Bereich unterhalb und unmittelbar oberhalb des Wasserspiegels. Das Scha-

Bild 14 Schadensbild infolge Alkaliaktion von Balken und 30-cm-Würfeln der Freiluftlagerung (Schadensstufe 5)

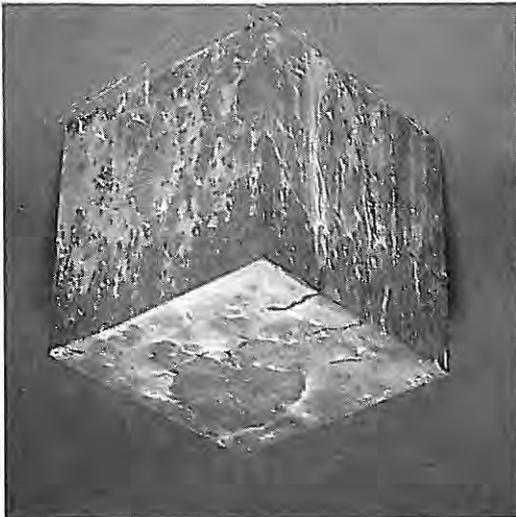
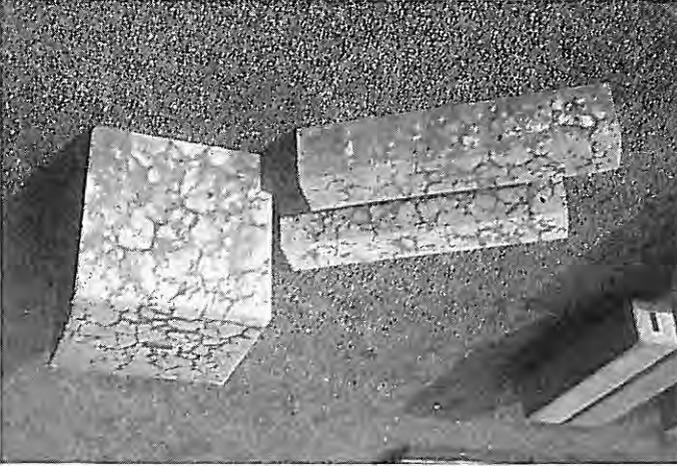


Bild 13 Schadensbild infolge Alkali-reaktion eines 30-cm-Würfels der Nebelkammerlage- rung (Schadens- stufe 5)

densbild der geschädigten, unmittelbar nach dem Entschalen der 30-cm-Würfel war gekennzeichnet bei Verpackung in Kunststoff-Folie (siehe Bild 16) vorwiegend durch zahlreiche Ausblühungen und Abplatzungen und bei Verpackung in Kupferfolie (siehe Bild 17) vorwiegend durch Risse. Der Ursache für das unterschiedliche Verhalten der in Kunststoff-Folie und in

Bild 16  
Schadensbild  
infolge Alkali-  
reaktion eines  
unmittelbar  
nach dem  
Entschalen in  
Kunststoff-Folie  
verpackten  
30-cm-Würfels



Eintauchtiefe



Bild 15  
Schadensbild  
infolge Alkali-  
reaktion eines  
10-cm-Würfels  
der Fußbad-  
lagerung

Bild 17  
Schadensbild  
infolge Alkali-  
reaktion eines  
unmittelbar  
nach dem  
Entschalen in  
Kupferfolie  
verpackten  
30-cm-Würfels



Kupferfolie verpackten 30-cm-Würfel konnte noch nicht weiter nachgegangen werden.

Sowohl die Versuche mit den dichtverpackten 30-cm-Würfeln als auch die entsprechenden Versuche der bei 20 °C und 97 % rel. Luftfeuchte und bei 20 °C und 65 % rel. Luftfeuchte gelagerten Probekörper (siehe Abschn. 5.1.4) weisen darauf hin, daß die Entstehung von Schäden infolge Alkalireaktion auch durch die Probekörperabmessungen bzw. die Bauteilabmessungen beeinflusst wird und daß bei massigen Bauteilen die im Beton durch Herstellung und Nachbehandlung vorhandene Feuchtigkeit für die Entstehung von Schäden infolge Alkalireaktion bereits ausreichend sein kann. Dies bedeutet, daß Schäden infolge Alkalireaktion bei massigen Bauteilen u. U. auch bei trockenen Umweltbedingungen auftreten können.

Allgemein ist noch anzumerken, daß die Schädigung der 30-cm-Würfel bei gleicher Feuchtlagerung und demselben Beton in der Regel sehr viel stärker und ausgeprägter war als die Schädigung der Balken 10 cm x 10 cm x 50 cm.

### 5.2.2 Einfluß des Zuschlags

Erwartungsgemäß erwies sich die Anwesenheit von alkaliempfindlichem Zuschlag als notwendige Voraussetzung für die Entstehung von Schäden am Beton infolge Alkalireaktion. Ungünstig zusammengesetzte (siehe auch Abschn. 5.2.3) und feucht gelagerte Betone mit als „bedenklich“ eingestuftem Zuschlag (siehe Abschn. 5.1.1) wiesen starke Schäden bis zur Schadensstufe 5 nach Tafel 5 auf (Risse, Abplatzungen, Ausblühungen und große Dehnungen). Dabei verhielten sich Betone mit den als „bedenk-

lich“ eingestuften Zuschlägen B, K und S (siehe Tafel 1) unter sonst gleichen Bedingungen praktisch gleich. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß bei den verschiedenen Lieferungen dieser Zuschläge sowohl die Menge als auch die Rohdichte und die Festigkeit des Opalsandsteins schwankten und daß auch dadurch der jeweilige Grad der Schädigung der aus verschiedenen Zuschlaglieferungen hergestellten gleichen Betone beeinflusst sein kann.

Unter sonst gleichen Bedingungen zeigten Betone mit den Zuschlägen I und E, die besonders flinhaltig waren, aber auch einen nennenswerten Anteil an Opalsandstein enthielten und als „bedenklich“ bis „bedingt brauchbar“ eingestuft wurden, etwas geringere Schäden als die Betone mit den Zuschlägen B, K und S. Mit den Zuschlägen I und E konnte höchstens die Schadensstufe 3 und nur einmal die Schadensstufe 4 nach Tafel 5 erreicht werden.

Bei weitergehender Untersuchung geschädigter Probekörper aus Beton mit den Zuschlägen B, K, S, I und E wurde – soweit prüfbar – stets festgestellt, daß vom Zuschlag vorwiegend der Opalsandstein an wesentlichen Reaktionen beteiligt war. Mit den als „bedingt brauchbar“ eingestuft Zuschlägen T und G (siehe Tafel 1), die beide nur in einer Lieferung vorlagen und nur zusammen zu wenigen Versuchen verwendet wurden, konnten bei den vorliegenden Versuchen an feucht gelagerten Betonen mit  $400 \text{ kg/m}^3$  Zement mit hohem wirksamen Alkaligehalt Schäden nicht erzeugt werden.

Erwartungsgemäß ergaben sich auch bei besonders ungünstig zusammengesetzten und feucht gelagerten Betonen mit Rheinkiesand, die nur zum Vergleich einbezogen worden waren, keine Merkmale, Schäden oder Dehnungen infolge Alkalireaktion.

Von wesentlicher Bedeutung für den jeweils erreichten Schadensgrad erwies sich aber auch die Zusammensetzung des Zuschlaggemisches. Mit den Zuschlägen B, K, S, I und E (siehe Tafel 1) konnten unter ungünstigen Verhältnissen die bereits vorher erwähnten Schäden infolge Alkalireaktion erzeugt werden, gleich ob der Zuschlag 0/30 mm oder der Zuschlag 3/30 mm aus dem jeweiligen alkaliempfindlichen Zuschlag bestand. Wie jedoch zusätzliche Versuche mit den Zuschlägen B und I zeigten, ergab sich unter sonst gleichen, ungünstigen Verhältnissen stets die jeweils höchste Schadensstufe, wenn sich nur in der Korngruppe 3/7 mm Zuschlag B bzw. I befand und der übrige Zuschlag aus nichtalkaliempfindlichem Zuschlag bestand. Dabei war auch der Anteil an alkaliempfindlichem Zuschlag in der Korngruppe 3/7 mm von wesentlicher Bedeutung. In Bild 18 ist der Grad der Schädigung des Betons infolge Alkalireaktion in Abhängigkeit von der Menge des Zuschlags B in der Korngruppe 3/7 mm aufgetragen, in Bild 19 das gleiche für den Zuschlag I. Der ungünstigste Fall, d. h. die größte Schädigung bzw. die größte Dehnung, ergab sich dabei meist für den Beton mit etwa 15 bis 25 Gew.-% alkaliempfindlichem Zuschlag in der Korngruppe 3/7 mm, bezogen auf den Gesamtzuschlag. Machte der alkaliempfindliche Zuschlag in der Korngruppe 3/7 mm mehr als 25 Gew.-% oder weniger als 15

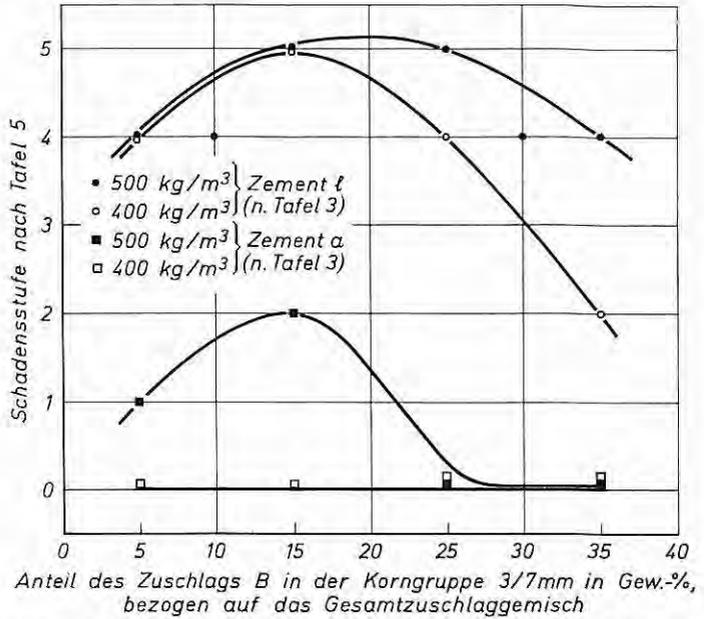


Bild 18 Schädigung des Betons infolge Alkalireaktion in Abhängigkeit von der Menge des Zuschlags B in der Korngruppe 3/7 mm

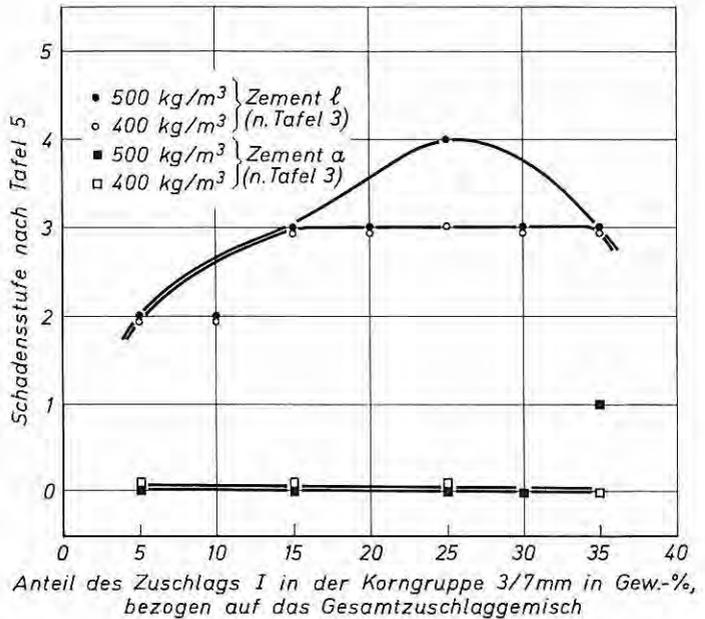


Bild 19 Schädigung des Betons infolge Alkalireaktion in Abhängigkeit von der Menge des Zuschlags I in der Korngruppe 3/7 mm

Gew.-% aus, so waren die Schäden und auch die Dehnung des Betons geringer. Wie aus den Bildern ebenfalls hervorgeht, war der jeweils erreichte Schädigungsgrad natürlich auch von der übrigen Betonzusammensetzung abhängig, siehe dazu Abschn. 5.2.3.

Mit wenigen Versuchen wurde auch der Frage nachgegangen, wie sich entsprechender Beton ohne alkaliempfindlichen Zuschlag der Korngruppe 3/7 mm verhält. Bestanden die Korngruppen 3/7 mm allein aus nichtalkaliempfindlichem Zuschlag und die übrigen Korngruppen des Gemisches 0/30 mm aus Zuschlag B, so zeigten die Probekörper aus den entsprechend ungünstig zusammengesetzten und feucht gelagerten Betonen nur geringe Schäden (Schadensstufe 2 nach Tafel 5 anstelle Schadensstufe 5, wenn die Korngruppe 3/7 mm aus Zuschlag B bestand).

### 5.2.3 Einfluß des Zements und des Zementgehalts

Das Entstehen von Schäden infolge Alkalireaktion war auch sehr wesentlich vom wirksamen Alkaligehalt des Zements und vom Zementgehalt des Betons abhängig. Bei feucht gelagertem Beton mit alkaliempfindlichem Zuschlag nahmen die Schäden, wenn sie auftraten, mit wachsendem Alkaligehalt des Zements (siehe Abschn. 3.2.1) und teilweise auch mit wachsendem Zementgehalt zu. Je nach den Gesamtverhältnissen stellten sich dabei die Schadensstufen 0 bis 5 nach Tafel 5 ein. Wesentliche Schäden infolge Alkalireaktion, d. h. Schäden der Schadensstufen 3 bis 5 nach Tafel 5, entstanden bisher nur an feucht gelagertem Beton mit sehr alkaliempfindlichem Zuschlag, der mit Portlandzementen k, l und si nach Tafel 3 und mit einem Zementgehalt von mindestens  $400 \text{ kg/m}^3$  hergestellt worden war. Betrug der Zementgehalt dabei jedoch nur  $330 \text{ kg/m}^3$ , so wurde die ganz unbedenkliche Schadensstufe 1 nicht überschritten. Ungünstig zusammengesetzte und feucht gelagerte Betone mit den Portlandzementen sch, n und a nach der Tafel 3 erreichten bei einem Zementgehalt von  $500 \text{ kg/m}^3$  höchstens die noch ungefährliche Schadensstufe 2 nach Tafel 5 und bei einem Zementgehalt von  $400 \text{ kg/m}^3$  und geringer höchstens die Schadensstufe 1. Das gleiche kann aufgrund ihres Alkaligehalts auch für entsprechende Betone mit den Portlandzementen ki und s angenommen werden, die allerdings nur mit Zementgehalten von  $330 \text{ kg/m}^3$  und von  $400 \text{ kg/m}^3$  hergestellt und untersucht wurden. Bei allen übrigen untersuchten Betonen, d. h. bei allen Betonen mit den Portlandzementen b und bl, mit dem Eisenportlandzement e, mit den Hochofenzementen r, re und m und mit dem Traßzement t (siehe Tafel 3) ergaben sich bei Zementgehalten von 300, 330, 400 und  $500 \text{ kg/m}^3$  praktisch keine Schäden infolge Alkalireaktion.

Zur Verdeutlichung der bei diesen Versuchen gewonnenen Zusammenhänge wurden die Ergebnisse über den Einfluß des wirksamen Alkaligehalts des Zements und des Zementgehalts des Betons in den Bildern 20 und 21 dargestellt. Die Bilder enthalten aus Gründen der Vergleichbarkeit des wirksamen Alkaligehalts der Zemente nur Ergebnisse der rd. 120 Betone mit Portlandzement. In Bild 20 ist die Schädigung infolge Alkalireaktion in Abhängigkeit vom Alkaligehalt des Zements aufgetragen. In diese Darstellung

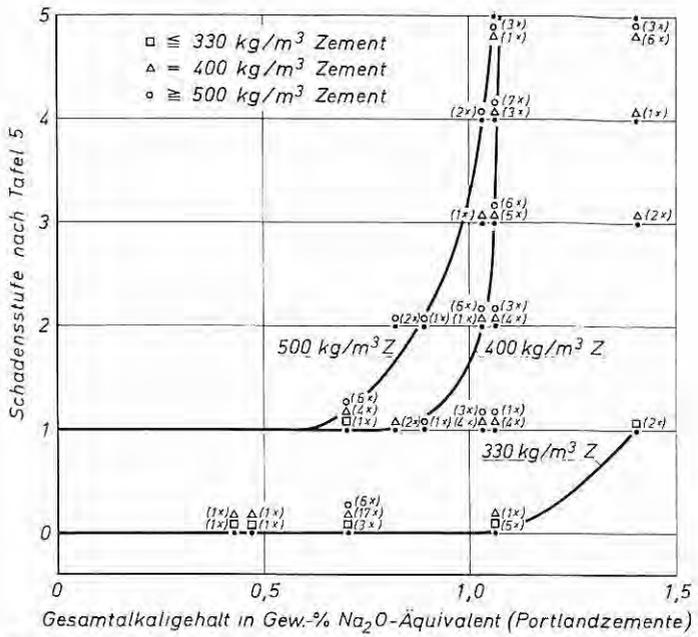


Bild 20 Schädigung infolge Alkaliaktion in Abhängigkeit vom wirksamen Alkaligehalt des Betons

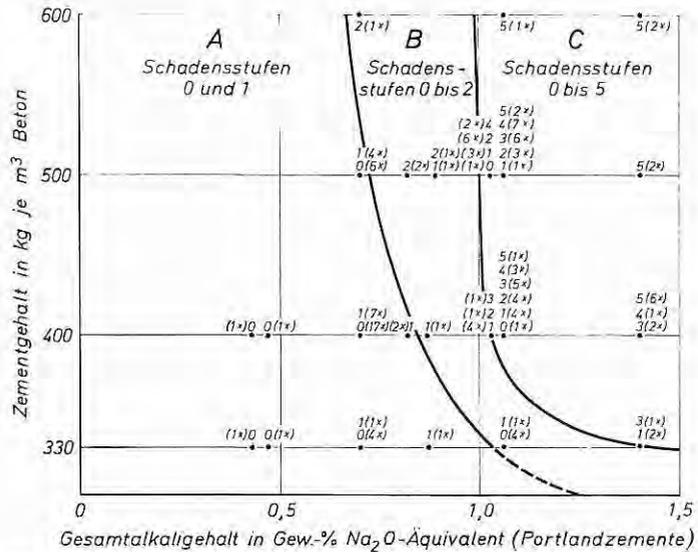


Bild 21 Zusammenhang zwischen wirksamem Alkaligehalt des Zements, Zementgehalt und Schadensstufe infolge Alkaliaktion geschädigter Betone

wurden auf der sicheren Seite liegende Kurven für den Zementgehalt eingezeichnet. In Bild 21, in das die bei den Versuchen erhaltenen Schadensstufen in Abhängigkeit vom Zementgehalt und vom Alkaligehalt des Zements aufgetragen worden sind, wurden die Ergebnisse durch auf der sicheren Seite liegende Kurven in die Bereiche A, B und C unterteilt. Während der Bereich A nur die Schadensstufen 0 und 1 und der Bereich B zusätzlich die Schadensstufe 2 enthält, kommen die wesentlichen Schadensstufen 3, 4 und 5 nur im Bereich C vor.

Beide Darstellungen mit den auf der sicheren Seite eingezeichneten Kurven besagen, daß bei solchen Versuchen mit feucht gelagertem Beton aus den hier untersuchten alkaliempfindlichen Zuschlägen nennenswerte Schäden infolge Alkalireaktion (Schadensstufen 3, 4 und 5 nach Tafel 5) auftreten können, wenn der Alkaligehalt von Portlandzement bei einem Zementgehalt von  $500 \text{ kg/m}^3$  etwa 0,90 Gew.-%  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent und bei einem Zementgehalt von  $400 \text{ kg/m}^3$  etwa 1,00 Gew.-%  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent überschreitet. Der in Bild 20 oberhalb dieser Grenze sehr steile Verlauf und das sich in diesem Bereich sehr starke Annähern der Kurven für die Zementgehalte von  $500$  und  $400 \text{ kg/m}^3$  macht deutlich, daß das Entstehen wesentlicher Schäden (Schadensstufen 3, 4 und 5) im Bereich oberhalb dieser Grenzen des wirksamen Alkaligehalts immer möglich und vom Zementgehalt praktisch unabhängig ist, siehe auch Bilder 18 und 19. Die sich ergebenden Streuungen sind u. a. von Art, Korngröße und Zusammensetzung des Zuschlags (siehe Abschn. 5.2.2) abhängig. Wie die Abschlußversuche zu den Versuchen mit den kleinen Prismen zeigten (siehe auch Bild 21), gelten die Feststellungen über den Einfluß des Zementgehalts auch für entsprechende Betone mit einem Zementgehalt von  $600 \text{ kg/m}^3$ . Zur Zeit wird der Einfluß des Zementgehalts zwischen  $330$  und  $400 \text{ kg/m}^3$  noch eingehender untersucht, der zunächst wegen des begrenzten Umfangs der Versuche vernachlässigt werden mußte.

## **6. Zusammenfassung und Folgerungen für die Praxis**

Die Ergebnisse der Betonversuche und der Untersuchungen über das Verhalten von Bauwerksbeton machen deutlich, daß bei Verwendung von bestimmtem Betonzuschlag eines Teilgebietes Norddeutschlands und bei Zusammentreffen mehrerer ungünstiger Einflüsse Schäden infolge Alkalireaktion am Beton auftreten können. Diese Erkenntnisse stimmen in der Tendenz mit den Ergebnissen der an anderer Stelle beschriebenen Kurzzeitversuche an Kleinprismen [1, 15] überein. Als Hauptursache für die Entstehung von Schäden infolge Alkalireaktion erwies sich der in diesem Teilgebiet vorkommende Opalsandstein. Erste Schäden traten frühzeitig, in der Regel im ersten halben Jahr, auf.

Schäden infolge Alkalireaktion wurden nur bei feucht gelagerten Betonprobekörpern bzw. Bauteilen mit Feuchtigkeitseinwirkung festgestellt. Aufgrund der Versuche an Betonprobekörpern mit behinderter Austrocknung muß jedoch damit gerechnet werden, daß bei massigen Bauteilen bereits die durch Herstellung und Nach-

behandlung im Beton vorhandene Feuchtigkeit für das Entstehen von Schäden infolge Alkali-reaktion ausreichend sein kann.

Der sich im Einzelfall ergebende Grad der Schädigung war sehr wesentlich von der Zusammensetzung des Zuschlaggemisches und des Betons abhängig. Als besonders ungünstig erwiesen sich bei den Betonversuchen Zuschlaggemische, bei denen sehr alkaliempfindlicher Zuschlag in einer Menge von etwa 15 bis 25 Gew.-% des Zuschlaggemisches in der Kornfraktion 3/7 mm (bzw. 2/8 mm nach der neuen Norm) vorhanden war. Bei den Betonversuchen traten wesentliche Schäden an feucht gelagertem Beton mit sehr alkaliempfindlichem Zuschlag auf, wenn der Zementgehalt bei Zement mit wirksamem Alkaligehalt von etwa 0,90 Gew.-%  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent  $500 \text{ kg/m}^3$  und bei Zement mit einem wirksamen Alkaligehalt von etwa 1,00 Gew.-%  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent  $400 \text{ kg/m}^3$  erreichte. Oberhalb dieser Grenzwerte, die etwas höher als bei den Kurzzeitversuchen an den Kleinprismen lagen, war der Grad der Schädigung vom Zementgehalt praktisch unabhängig.

Wenn auch mit den bisher durchgeführten Untersuchungen noch nicht alle Fragen zu dem sehr vielschichtigen Problem Alkali-reaktion abgeklärt sind, so lassen sich mit Hilfe der aus der Literatur bekanntgewordenen Erfahrungen und Erkenntnisse aller auf die deutschen Verhältnisse abgestimmten umfangreichen Untersuchungen auf der sicheren Seite liegende vorbeugende Maßnahmen ableiten, mit denen sich wesentliche Schäden infolge Alkali-reaktion im norddeutschen Raum mit großer Sicherheit vermeiden lassen. Empfehlungen für diese vorbeugenden Maßnahmen, die vom Grad der Alkaliempfindlichkeit des Zuschlags (siehe Tafel 2) und von den Umweltbedingungen (siehe Tafel 6) abhängig sind, enthält Tafel 7 [16]. Dabei wird vorausgesetzt, daß der wirksame Alkaligehalt des Betons durch Betonzuschlag und Betonzusätze nicht wesentlich vergrößert wird. Auf der Grundlage dieser

Tafel 6 Beurteilung der Umweltbedingungen

trocken	Betonbauteile, die während der Nutzung weitgehend trocken bleiben, wie z. B. in Innenräumen und bei Schutz vor Feuchtigkeitszutritt auch außen, jedoch nicht massive Bauteile
feucht	Betonbauteile, die während der Nutzung häufig oder lange Zeit feucht sind, wie z. B. ungeschützte Bauteile von Brücken, Wasserbauten, Gründungen, Außenflächen von Hochbauten, Hallenbädern, Wäschereien und anderen gewerblichen Feuchträumen, Bauteile mit häufiger Taupunktunterschreitung (Schornsteine, Filterkammern) und massive Bauteile
feucht + Alkalizufuhr von außen	Bauteile wie bei feucht, jedoch mit häufiger oder langzeitiger Alkalizufuhr von außen, wie z. B. Bauteile mit Meerwassereinwirkung, mit Tausalzeinwirkung oder mit Einwirkung entsprechender Stoffe

Tafel 7 Empfehlungen für vorbeugende Maßnahmen gegen Alkali-reaktion im Beton [16]

Alkaliempfindlichkeit des Zuschlags	Umweltbedingungen		
	trocken	feucht	feucht + Alkali-zufuhr von außen
unbedenklich	keine	keine	keine
bedingt brauchbar	keine	NA-Zement <sup>1)</sup>	NA-Zement
bedenklich	keine	NA-Zement	Austausch des Zuschlags <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup> nur bei Beton der Festigkeitsklassen Bn 350 und höher

<sup>2)</sup> nur bei Beton der Festigkeitsklassen Bn 350 und höher, andernfalls NA-Zement

Erkenntnisse und Empfehlungen wird zur Zeit von einem Ausschuß des DAFSt eine Richtlinie für vorbeugende Maßnahmen gegen Alkali-reaktion im Beton erarbeitet.

## SCHRIFTTUM

- [1] Locher, F. W., und S. Sprung: Ursache und Wirkungsweise der Alkali-reaktion. beton 23 (1973) H. 7, S. 303/306, und H. 8, S. 349/353; ebenso Betontechnische Berichte 1973, Beton-Verlag, Düsseldorf 1974, S. 101/123.
- [2] Bonzel, J.: Alkali-reaktion unter baupraktischen Bedingungen. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 40. Beton-Verlag, Düsseldorf 1973, S. 23/35.
- [3] McConnell, D., R. C. Mielenz, W. Y. Holland und K. T. Greene: Cement-aggregate reaction in concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 44 (1947/48) S. 93/128.
- [4] Niemeyer, E. A.: Betonzuschlag in Schleswig-Holstein. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 40. Beton-Verlag, Düsseldorf 1973, S. 37/55.
- [5] Smolczyk, H.-G.: Prüfung und Beurteilung von Betonzuschlag. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 40. Beton-Verlag, Düsseldorf 1973, S. 57/67.
- [6] Idorn, G. M.: Durability of concrete structures in Denmark. Eigenverlag, Kopenhagen 1967.
- [7] Vivian, H. E.: Studies in cement-aggregate reaction. X. The effect on mortar expansion of amount of reaction component in the aggregate. Commonwealth Sci. Ind. Res. Org. Australia, Bulletin Nr. 256, Melbourne 1950, S. 13/20.
- [8] Gaskin, A. J., R. H. Jones und H. E. Vivian: Studies in cement-aggregate reaction. XXI. The reactivity of various forms of silica in relation to the expansion of mortar bars. Austr. Journ. Appl. Sci. 6 (1955) Nr. 1, S. 78/87.
- [9] Pike, R. G.: Pressures developed in cement pastes and mortars by the alkali-aggregate reaction. Highway Research Board Bull. Nr. 171, Washington D. C. 1958, S. 34/36.
- [10] Lerch, W.: Studies of some methods of avoiding the expansion and pattern cracking associated with the alkali-aggregate reaction. Amer. Soc. Test. Mat. Spec. Techn. Publ. Nr. 99, Philadelphia 1950, S. 153/177.

- [11] Stanton, T. E.: Expansion of concrete through reaction between cement and aggregate. Proc. Amer. Soc. Civ. Engrs. 66 (1940) S. 1781/1811 und 107 (1942) S. 54/84.
- [12] Powers, T. C., und H. H. Steinour: An interpretation of published researches on the alkali-aggregate reaction. Part I. The chemical reactions and mechanism of expansion. Part II. A hypothesis concerning safe and unsafe reactions with reactive silica in concrete. Proc. Amer. Concr. Inst. 51 (1954/55) S. 497/516 und S. 785/812; ebenso PCA Res. Dep. Bull. 55.
- [13] Hesler, I. A., und O. F. Smith: The alkali-aggregate phase of chemical reactivity in concrete — Teil II. ASTM Special Technical Publication Nr. 205, Ballimore 1958, S. 74/88.
- [14] Forum, C. S.: Alkali-Reaktion der Zuschlagstoffe im Beton. Beton- und Stahlbetonbau 60 (1965) H. 7, S. 163/168.
- [15] Sprung, S.: Einfluß von Zement und Zusätzen auf die Alkalireaktion. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 40. Beton-Verlag, Düsseldorf 1973, S. 69/78.
- [16] Wischers, G.: Vorbeugende Maßnahmen gegen Alkalireaktion im Beton. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 40. Beton-Verlag, Düsseldorf 1973, S. 91/98.
- [17] Blanks, R. F., und H. S. Meissner: The expansion test as a measure of alkali-aggregate reaction. Proc. Amer. Concr. Inst. 42 (1945/46) S. 517/539.
- [18] Dahms, J.: Betonversuche zur Alkalireaktion. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 40. Beton-Verlag, Düsseldorf 1973, S. 79/90.