

Roland Pierkes, Jörg Rickert, Düsseldorf

# Auswirkung von Sanden auf die Bewertung potenziell alkalireaktiver Gesteinskörnungen

## Effect of sand on the evaluation of potentially alkali-reactive aggregates

### Übersicht

Die Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen in Beton“ (Alkali-Richtlinie) des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton sieht in Teil 3 die Prüfung von Gesteinskörnungen in Mörteln und Betonen vor, in denen die Sieblinie der zu prüfenden Körnung mit einem „inerten“ Sand zu ergänzen ist. Bislang fehlten systematische Untersuchungen zur Eignung eines einzusetzenden Prüfandes hinsichtlich des Einflusses seiner natürlichen Alkalireaktivität auf die Betonprüfungen. In einem von der AiF geförderten Forschungsvorhaben wurde anhand von Untersuchungen an Prüfanden sowie an daraus hergestellten Mörteln und Betonen unter Verwendung von alkalireaktiven und inerten Splitten der Einfluss quarzhaltiger Sandkörnungen auf die Prüfergebnisse untersucht. Ziel war es, eine mögliche Fehlerquelle in den zurzeit angewendeten Prüfverfahren in ihrer tatsächlichen Bedeutung aufzudecken, um einerseits die Notwendigkeit von Prüfungen an der Sandfraktion zu beurteilen und andererseits fehlerhafte Bewertungen von Gesteinskörnungen oder von Betonzusammensetzungen im Hinblick auf eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion zu vermeiden. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens belegen, dass der Einfluss von ungebrochenen, quarzitischen Sanden auf eine schädigende AKR in Beton vergleichsweise gering ist. Bei einer ausreichenden Charakterisierung der groben Gesteinskörnung nach den Vorgaben der Alkali-Richtlinie kann auf eine separate Prüfung dieses Ausgangsstoffs verzichtet werden.

### 1 Anlass für den Forschungsantrag / Ausgangssituation

Seit den 1970er Jahren sind im Forschungsinstitut der Zementindustrie (FIZ) umfangreiche Untersuchungen zu dem Ablauf und der Vermeidung von schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktionen (AKR) durchgeführt worden. Sie umfassten sowohl die Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen als auch die Beschreibung von Zementeigenschaften, die zur Vermeidung einer AKR notwendig sind. Die Ergebnisse dieser Untersuchungen haben maßgeblich zur Entwicklung und Fortschreibung der Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktionen in Beton“ (Alkali-Richtlinie) des DAfStb [1] beigetragen. Entsprechend der verstärkten Nachfrage aus der Bauwirtschaft, konzentrieren sich die Forschungen des FIZ und anderer Forschungsinstitute in den letzten Jahren unter anderem auf die schnelle und praxisgerechte Einstufung von Gesteinskörnungen, die Bewertung des AKR-Schädigungspotenzials projektspezifischer Betonzusammensetzungen sowie die Entwicklung neuer Prüfverfahren, die die Prüfdauer und den Prüfaufwand in einem für die Baupraxis vertretbaren Rahmen halten sollen ([2] bis [8]).

Teil 3 der Alkali-Richtlinie sieht für bestimmte grobe Gesteinskörnungen Betonversuche vor, bei denen die Fraktionen  $> 2$  mm der Gesteinskörnung eingesetzt werden. Als Kornfraktion  $< 2$  mm ist ein „inertes Natursand“ zu verwenden. Aus dem Beton werden Prismen hergestellt, die einer neunmonatigen Nebelkammerlagerung bei  $40^\circ\text{C}$  ausgesetzt und deren durch Treibreaktionen bedingte Dehnungen untersucht werden. Parallel erfolgt die Lagerung eines Betonwürfels der Kantenlänge von 300 mm, um eine

### Abstract

Part 3 of the Alkali Guidelines “Preventive measures against harmful alkali reactions in concrete” issued by the German Committee for Structural Concrete provides for the testing of aggregates in mortars and concretes in which the grading curve of the particulate material to be tested has to be supplemented with an “inert” sand. So far there have been no systematic investigations into the suitability of the test sand to be used with respect to the influence of its natural alkali reactivity on the concrete tests. The influence of quartzitic sands on the test results was examined in a research project promoted by the AiF (Federation of Industrial Research Associations) with the aid of investigations carried out on test sands and the mortars and concretes produced from them using alkali-reactive and inert crushed aggregate. The aim was to discover the actual importance of any possible sources of error in the test methods currently used in order not only to assess the need for tests on the sand fraction but also to avoid false evaluations of aggregates or concrete compositions with respect to their harmful alkali-silica reactions. The results of the research project confirm that the influence of uncrushed quartzitic sand on a harmful alkali-silica reaction in concrete is comparatively slight. Separate testing of this constituent can be dispensed with if the coarse aggregate has been adequately characterized in accordance with the provisions of the Alkali Guidelines.

### 1 Reason for the research request / initial situation

Extensive investigations into the progress and avoidance of harmful alkali-silica reactions (ASR) have been carried out at the FIZ (Research Institute of the Cement Industry) since the 1970s. They covered not only the assessment of the alkali sensitivity of aggregates but also the description of the cement properties that are needed to avoid an ASR. The results of these investigations have contributed significantly to the development and updating of the guidelines “Preventive measures against harmful alkali reactions in concrete” (Alkali Guidelines) issued by the DAfStb (German Committee for Structural Concrete) [1]. In line with the intensified demands from the construction industry the research work by the FIZ and other research establishments has concentrated in recent years on rapid and practical classification of aggregates, evaluation of the ASR damage potential of concrete compositions for specific projects and development of new test methods that could keep the test duration and amount of testing within limits that are acceptable for practical construction work ([2] to [8]).

Part 3 of the Alkali Guidelines provides for concrete tests for certain coarse aggregates in which the fractions  $> 2$  mm of the aggregate are used. An “inert natural sand” has to be used for the particle fraction  $< 2$  mm. Prisms produced from the concrete are exposed to nine months’ storage in a fog chamber at  $40^\circ\text{C}$  and their changes in length caused by expansive reactions are investigated. A concrete cube with an edge length of 300 mm is stored at the same time so that any cracking by a harmful alkali reaction can be observed.

Another test method for concretes that is being used increasingly in Europe is a method that was originally developed in France

eventuelle Rissbildung durch eine schädigende Alkalireaktion beobachten zu können.

Als weitere Prüfmethode an Betonen wird in Europa vermehrt ein Prüfverfahren angewendet, das ursprünglich in Frankreich als Performance-Prüfung zur Bewertung der Alkaliempfindlichkeit von Betonzusammensetzungen entwickelt wurde und von RILEM als Methode AAR-4.1 zur Untersuchung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen empfohlen wird [15]. Die Lagerung der Betone erfolgt hier bei 60 °C über Wasser (60 °C-Betonversuch), um so die Prüfdauer zu verkürzen. Ebenfalls in diese Richtung zielen Schnelltests an Mörtelprismen (Schnellprüfverfahren und Mörtelschnelltest nach Alkali-Richtlinie). In Deutschland wurde das Schnellprüfverfahren als Referenzverfahren in die Alkali-Richtlinie aufgenommen. Bei diesem auf dem NBRI-Verfahren basierenden Test wird die zu prüfende Gesteinskörnung auf definierte Sandfraktionen gebrochen und in Mörtelprismen verarbeitet, die nach einer Lagerung in 80 °C heißer Natronlauge auf Dehnung geprüft werden. Ähnlich ausgelegt ist der Mörtelschnelltest (Alternativverfahren), bei dem die Prüfkörper mit NaOH-Lösung hergestellt und dann über Wasser bei 70 °C gelagert werden. Die zu prüfende Gesteinskörnung wird in beiden Mörtelverfahren erst ab einer Korngröße größer 0,5 mm eingesetzt. Sowohl der 60 °C-Betonversuch als auch der Mörtelschnelltest (Alternativverfahren) sind informativ im Anhang von Teil 3 der Alkali-Richtlinie beschrieben.

In der Literatur wird vereinzelt über Untersuchungen berichtet, bei denen das Dehnungsverhalten von Betonen mit unterschiedlich alkalireaktiven groben Gesteinskörnungen von den eingesetzten Sandkörnungen beeinflusst wurde (z.B. [9] bis [11]). [10] berichtet z.B. von der Prüfung einer unbedenklichen groben Gesteinskörnung in Kombination mit verschiedenen Sanden, bei der verschieden starke Dehnungen verzeichnet wurden. Andererseits ist aber auch bekannt, dass reaktive silikatische Bestandteile als Feinstkorn das für eine schädigende AKR zur Verfügung stehende Alkalitätspotenzial eines Betons reduzieren können (z.B. [12] bis [14]). Bei Verwendung eines feinkörnigen Sandes könnte somit das Schädigungspotenzial eines alkalireaktiven Splittes in der Betonprüfung nicht vollständig zur Wirkung kommen.

## 2 Untersuchungsprogramm

Im ersten Schritt der Untersuchungen erfolgte eine Auswahl und Charakterisierung von Prüfsanden. Der Schwerpunkt lag auf quarzreichen Natursanden verschiedener Provenienzen, die sich z.B. in ihrer Mineralogie oder Korngrößenverteilung unterschieden und die in bisherigen Untersuchungen Anzeichen einer Reaktivität zeigten. Weiterhin wurde Normensand<sup>\*)</sup> und punktuell der Prüfsand des Mörtelschnelltests (Anhang des Teils 3 der Alkali-Richtlinie, „Prüfsand LMPA“) eingesetzt. Als definiert inerte bzw. alkalireaktive Gesteinskörnungen wurden ein aus reinem Kalkstein hergestellter Brechsand bzw. ein Grauwackebrechsand verwendet. Die Charakterisierung umfasste die petrographische und granulometrische Beschreibung sowie die Bestimmung der Alkalireaktivität nach ASTM C 289 an verschiedenen Fraktionen der Sande. Weiterhin wurde an Mörtelprüfkörpern aus Portlandzementen und den Sanden nach verschiedenen Lagerungsdauern die Porenlösung gewonnen und auf ihren pH-Wert sowie die Ionengehalte (Natrium, Kalium, Sulfat) analysiert.

Im zweiten Schritt wurden die Sande in Kombination mit dem vorgeschriebenen Prüfzement (CEM I mit einem Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von 1,3 ± 0,1 M.-%) Schnelltests in Anlehnung an das Schnellprüfverfahren (Referenzverfahren) nach der Alkali-Richtlinie unterzogen, wobei die Gesamtlagerungsdauer von 13 Tagen auf 28 Tage ausgedehnt wurde. Proben, die eine signifikante Dehnung aufwiesen, wurden anhand von Dünnschliffen lichtmikroskopisch auf mögliche Schadensbilder untersucht. Ausgewählte Sande wurden im weiteren Verlauf des Forschungsvorhabens auch in Kombination mit einem CEM I (st) und einem CEM II/B-S geprüft, um die Aussagefähigkeit des Prüfverfahrens im Hinblick auf die Bewertung von Straßendeckenbeton zu überprüfen.

as a performance test for evaluating the alkali sensitivity of concrete compositions; it is recommended by RILEM as method AAR-4.1 for investigating the alkali sensitivity of aggregates [15]. In this case the concretes are stored at 60 °C above water (60 °C concrete test) in order to shorten the testing time. Accelerated tests on mortar prisms (accelerated test methods and accelerated mortar tests as described in the Alkali Guidelines) have the same objective. The accelerated mortar test method has been adopted in Germany as a reference method in the Alkali Guidelines. In this test, which is based on the NBRI method, the aggregate to be tested is crushed down to defined sand fractions and processed into mortar prisms that are tested for expansion after storage in hot caustic soda solution at 80 °C. The accelerated mortar test (alternative method), in which the mortar bars is produced with NaOH solution and then stored above water at 70 °C, has a similar structure. In both mortar methods the aggregate to be tested is only used in a particle size larger than 0.5 mm. Both the 60 °C concrete test and the accelerated mortar test (alternative method) are described for information in the appendix of Part 3 of the Alkali Guidelines.

There have been occasional reports in the literature about investigations in which the expansion behaviour of concretes made with coarse aggregates with different alkali activities was influenced by the sand particles used (e.g. [9] to [11]). In [10], for example, there is a report on the testing of a harmless coarse aggregate in combination with different sands in which different degrees of expansion were recorded. On the other hand, it is also known that reactive siliceous constituents used as the very fine material can reduce the alkalinity potential of a concrete that is available for a harmful ASR (e.g. [12] to [14]). This means that the harmful potential of alkali-reactive aggregates might not be able to exert its full effect in the concrete test if fine-grained sand is used.

## 2 Investigation programme

The first step of the investigation was to select and characterize the test sands. The emphasis was on quartzitic natural sands of varied provenance that differed in, for example, their mineralogy or particle size distribution and that had shown signs of reactivity in earlier investigations. Standard sand<sup>\*)</sup> and, on occasions, the test sand from the accelerated mortar test (appendix of Part 3 of the Alkali Guidelines, “Test sand LMPA”) were also used. Crushed sand produced from pure limestone and from a greywacke were used as the defined inert and alkali-reactive aggregates respectively. The characterization covered the petrographic and granulometric description and determination of the alkali reactivity as defined in ASTM C 289 on different fractions of the sands. Pore solutions were also obtained from mortar test bars made with Portland cements and the sands after different storage times and were analyzed for pH value and ionic content (sodium, potassium, sulfate).

In the second step the sands were combined with the above-mentioned test cement (CEM I with an Na<sub>2</sub>O equivalent of 1.3 ± 0.1 mass %) and submitted to accelerated tests using the accelerated mortar test method (reference method) described in the Alkali Guidelines, although the total storage time was extended from 13 days to 28 days. Thin sections of the samples that exhibited significant expansion were examined under a light-optical microscope for possible appearance of damage. In a continuation of the research project selected sands were also tested in combination with CEM I (st) and CEM II/B-S cements in order to check the informative value of the test method for evaluating road paving concrete.

It was necessary to make a selection of coarse aggregates of varying reactivity that were combined with the test sands to form concrete grading curves for the concrete trials. Once again pure limestone was used as the inert aggregate. Reactive greywacke, double-crushed gravel and an only slightly reactive aggregate (“slow late” material, designated “G4”) were also used. The combination with selected test sands was made on the basis of the results of the first two working steps. All the concretes were first produced with the test cement in accordance with the Alkali Guidelines and in-

<sup>\*)</sup> Gemäß DIN 1164:1958 (im Folgenden als “Normensand” bezeichnet)

<sup>\*)</sup> According to DIN 1164:1958 (further on designated as “standard sand”)

Für die Betonversuche war eine Auswahl von unterschiedlich reaktiven, groben Gesteinskörnungen zu treffen, die mit den Prüfsanden zu Betonsieblinien kombiniert wurden. Als inerte Gesteinskörnung wurde wiederum reiner Kalksteinsplitt verwendet. Weiterhin wurde reaktiver Grauwacke- und Kies-Edelsplitt sowie punktuell ein nur geringfügig reaktiver Splitt (sogenannte „slow/late“-Körnung, bezeichnet als „G4“) eingesetzt. Die Kombinationen mit ausgewählten Prüfsanden erfolgten auf Basis der Ergebnisse der ersten beiden Arbeitsschritte. Alle Betone wurden zunächst mit dem Prüfzement nach Alkali-Richtlinie hergestellt und mit dem Betonversuch bei 40 °C-Nebelkammerlagerung sowie dem 60 °C-Betonversuch gemäß Teil 3 der Alkali-Richtlinie untersucht. Aus den Betonversuchen wurde eruiert, ob und in welchem Umfang die Reaktivität des Prüfsandes die Prüfergebnisse im Betontest beeinflusst. Wenn das Dehnungsverhalten eines Betons deutlich von dem der Referenzmischung mit dem inerten Kalksteinbrechsand abwich, wurde an Dünnschliffen lichtmikroskopisch das Schadensbild bestimmt. Weiterhin wurden Betonversuche mit dem Portlandzement CEM I (st) mit einem Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von 0,78 M.-% durchgeführt, um die Auswirkung eines verringerten Alkaliangebotes auf die Reaktivität des Sandes im Beton zu ermitteln. Im Hinblick auf die zunehmende Anwendung von hüttensandhaltigen Zementen im Straßenbau erfolgten ergänzende Versuche an Betonen mit einem CEM II/B-S, der ein Na<sub>2</sub>O-Äquivalent von etwa 0,9 M.-% aufwies. Die Zusammensetzung der Zemente ist in Tafel 1 aufgeführt. Die Mischungszusammensetzung aller Betone entsprach den Vorgaben des Teils 3 der Alkali-Richtlinie.

investigated with the concrete test using the 40 °C fog chamber storage and the 60 °C concrete test as described in Part 3 of the Alkali Guidelines. Whether, and to what extent, the reactivity of the test sand affected the test results in the concrete tests was determined from the concrete trials. If the expansion behaviour of a concrete differed from that of the reference mix made with inert limestone crushed sand the appearance of the damage was examined in thin sections under a light-optical microscope. Concrete trials were also carried out with the Portland cement CEM I (st) with an Na<sub>2</sub>O equivalent of 0.78 mass % in order to determine the effect of a reduced supply of alkali on the reactivity of the sand. In view of the increasing use of cements containing granulated blastfurnace slag for road construction, supplementary trials were carried out on concretes made with a CEM II/B-S cement that had an Na<sub>2</sub>O equivalent of about 0.9 mass %. The compositions of the cements are given in Table 1. The mix compositions of all the concretes conformed to the specifications in Part 3 of the Alkali Guidelines.

The extent to which the possible alkali reactivity of the fine sand fraction < 0.5 mm of the test sands affects the test results in the accelerated mortar test (alternative method) as described in Part 3 of the Alkali Guidelines was investigated as a supplement to the concrete trials. The results of the corresponding mortar trials that were carried out using the 0.5 mm to 2 mm fraction from the selected coarse aggregates were used for this purpose. Comparison of the results with the accelerated test method (reference method) and the concrete trials should indicate whether one of the accelerated tests (alternative and reference methods) would possibly also be suitable for characterizing test sands.

**Tafel 1: Chemische Zusammensetzung der eingesetzten Zemente**  
**Table 1: Chemical compositions of the cements used**

Parameter	Einheit Unit	Z 1	Z 2	Z 3
		CEM I 42,5 R (Prüfzement) (test cement acc. Alkali Guidelines)	CEM I 32,5 R (st) (Straßenbauzement) (road-building cement)	CEM II/B-S 32,5 R
Silizium(IV)-oxid Silicon(IV) oxide	M.-% Mass %	19,53	20,48	24,43
Aluminiumoxid Aluminium oxide		5,19	3,92	6,40
Titandioxid Titanium dioxide		0,25	0,27	0,36
Eisen(III)-oxid Iron(III) oxide		3,62	3,30	1,79
Mangan(III)-oxid Manganese(III) oxide		0,11	0,05	0,13
Phosphor(V)-oxid Phosphorous(V) oxide		0,26	0,10	0,15
Calciumoxid Calcium oxide		61,17	63,48	56,23
Magnesiumoxid Magnesium oxide		2,00	1,39	4,00
Sulfat als SO <sub>3</sub> Sulfate as SO <sub>3</sub>		2,98	3,13	2,97
Kaliumoxid Potassium oxide		1,54	0,89	0,67
Natriumoxid Sodium oxide		0,19	0,18	0,31
Natriumequivalent Sodium equivalent		1,19	0,77	0,75
Kohlendioxid Carbon dioxide		2,07	2,04	1,01
Wasser Water		1,20	0,76	1,07
Sulfid Sulfide				0,32
Hüttensandgehalt Granulated Blastfurnace slag content				30,9

Ergänzend zu den Betonversuchen wurde untersucht, inwieweit sich eine mögliche Alkalireaktivität der Feinsandfraktion < 0,5 mm von Prüfsanden auf die Prüfergebnisse im Mörtelschnelltest (Alternativverfahren) nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie auswirkt. Dazu wurden die Ergebnisse der entsprechenden Mörtelversuche herangezogen, die unter Verwendung von Gesteinssplitt 0,5 mm bis 2 mm der ausgewählten groben Gesteinskörnungen durchgeführt wurden. Der Abgleich der Ergebnisse mit dem Schnellprüfverfahren (Referenzverfahren) und den Betonversuchen soll Anhaltspunkte liefern, ob einer der Schnelltests (Alternativ- und Referenzverfahren) gegebenenfalls auch zur Charakterisierung von Prüfsanden geeignet ist.

### 3 Untersuchungsergebnisse

#### 3.1 Charakterisierung der Prüfsande

Die Petrographie der im Forschungsvorhaben verwendeten natürlichen Prüfsande geht aus Tafel 2 hervor. Die Sande stammten vom Niederrhein und aus Mitteldeutschland und bestanden überwiegend aus Quarz, der monomineralisch als auch als Bestandteil verschiedener Gesteinskörnungen auftrat. Untergeordnet fanden sich verschieden hohe Anteile an Feldspäten, Schichtsilikaten, Karbonat und verschiedene Spurenbestandteile wie vulkanische Gläser oder Schwerminerale. Zusätzlich zu natürlichen Prüfsanden wurden auch quarzitisches Prüfsande mit gebrochenem Feinsandanteil (z.B. Normensand) untersucht. Der eingesetzte Kalksteinsplitt bestand in allen Kornfraktionen aus Kalksteinpartikeln, die teilweise als Kornindividuen (Bruchstücke großer Kristalle) oder als feinkörnige Kalksteinaggregate vorlagen. Als Nebengemengteil waren nur vereinzelte Quarz- und Quarzitkörner sowie in Spuren Feldspäte und opake Minerale zu beobachten. Der Grauwackebrechsand wies in allen Kornfraktionen Anteile von grob- und feinkörn-

### 3 Results

#### 3.1 Characterization of the test sands

The petrography of the natural test sands used in the research project is shown in Table 2. The sands came from the Lower Rhine and central Germany and consisted predominantly of quartz, which occurred both monomineralic and as a constituent of various aggregates. Varying proportions of feldspar, phyllosilicates, carbonates and various trace constituents, such as volcanic glasses and heavy minerals, occurred in small quantities. Quartzitic test sands with a proportion of crushed fine sand (e.g. standard sand) were also investigated in addition to the natural test sands. All the grain size fractions of the limestone used consisted of limestone particles, some of which were present as individual grains (fragments of large crystals) or as fine-grained limestone aggregations. The only subsidiary constituents observed were individual grains of quartz and quartzite and traces of feldspar and opaque minerals. All the particles of the crushed greywacke sand contained varying proportions of coarse- and fine-grained greywacke. There were also monomineralic quartz grains and opaque grains in the finer size groups.

Classification of the alkali reactivity of the sands in accordance with ASTM C289 proved to be unusable because, on the one hand, no differentiation between the sands was achieved and, on the other hand, even the alkali-reactive greywacke was not identified clearly as “reactive”. During the investigations of the pore solutions in mortars made with sands in combination with the CEM I test cement only small differences were recorded between the quartz sands. At most, the standard sand containing crushed quartz exhibited signs of an alkali reaction during the 90-day hot storage that was indicated by, for example, a drop in the pH of the pore solution of the test mortar (Fig. 1).

Tafel 2: Petrographie der Sande (Zählergebnisse aus Dünnschliffmikroskopie, Vol.-%)  
Table 2: Petrography of the sands (count results from thin-layer microscopy, vol. %)

Minerale/Gesteine <i>Minerals/rocks</i>	Kalkstein- brechsand <i>Limestone crushed sand</i> S5	Grauwacke- brechsand <i>Greywacke crushed sand</i> S8	Quarzitischer Prüfsand <i>Quartzitic test sand</i> S1	Quarzitischer Prüfsand <i>Quartzitic test sand</i> S2	Quarzitischer Prüfsand <i>Quartzitic test sand</i> S3	Normen- sand <i>Standard sand</i> S6
Quarz <i>Quartz</i>	3,7	2,9	58,2	80,4	60,3	87,4
Quarzit <i>Quartzite</i>	0,4	–	22,1	10,3	23,8	4,9
Sandstein, feinkörnig <i>Sandstone, fine</i>	–	–	8,2	2,0	9,1	2,3
Siltstein <i>Silt stone</i>	–	–	1,1	0,8	–	2,1
Chert, mit Chalcedon <i>Chert with chalcedony</i>	–	–	1,2	–	4,3	0,1
Grauwacke, feinkörnig <i>Greywacke, fine</i>	–	36,5	1,0	–	–	–
Grauwacke, grobkörnig <i>Greywacke, coarse</i>	–	57,6	–	–	–	–
Feldspäte, serizitisch <i>Feldspar, serizitic</i>	0,6	–	6,4	5,1	0,9	2,9
Glimmerschiefer <i>Mica schist</i>	–	–	0,4	–	0,5	–
Vulkanite <i>Vulcanite</i>	–	–	0,9	0,1	0,1	–
Karbonat <i>Carbonate</i>	94,9	2,7	0,6	–	0,5	0,1
Glaukonit <i>Glauconite</i>	–	–	–	1,0	–	–
Schwerminerale <i>Heavy minerals</i>	0,4	0,2	0,0	0,4	0,3	0,2



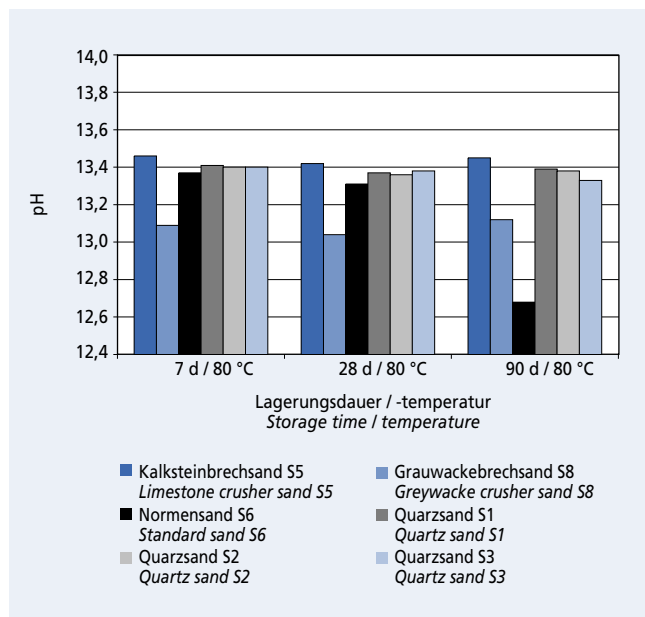
niger Grauwacke auf. In den feineren Korngruppen waren zudem monomineralische Quarzkörner und opake Körner vorhanden.

Die Einstufung der Alkalireaktivität der Sande nach ASTM C289 erwies sich als unbrauchbar, weil einerseits keine Differenzierung der Sande erreicht wurde, andererseits selbst der alkalireaktive Grauwackebrechtsand nicht eindeutig als „reaktiv“ ausgewiesen wurde. Bei den Untersuchungen der Porenlösungen an Mörteln aus den Sanden in Kombination mit dem CEM I-Prüfzement waren nur geringe Unterschiede zwischen den Quarzsanden zu verzeichnen. Allenfalls der brechsandhaltige Normensand zeigte bei 90 tägiger Warmlagerung Anzeichen einer Alkalireaktion, die sich z.B. durch eine Absenkung des pH-Wertes in der Porenlösung des Prüfmörtels bemerkbar machte (Bild 1).

### 3.2 Schnellprüfverfahren

In Bild 2 sind die Dehnungen der Mörtelprismen bei Anwendung des Schnellprüfverfahrens (Referenzverfahren nach Alkali-Richtlinie, Teil 3) dargestellt. Für die Prüfsande ergaben sich divergierende Dehnungswerte aufgrund unterschiedlicher Alkalireaktivitäten. Die Prismen aus Mörtel mit Normensand, der in den Untersuchungen nach Abschnitt 3.1 die höchste chemische Reaktivität aufwies, zeigten im Schnellprüfverfahren aber nicht die stärksten Verformungen. Innerhalb der üblichen Prüfdauer von 13 Tagen blieb der Mörtel mit Kalkbrechsand nahezu dehnungsfrei, während der Mörtel mit dem Grauwackebrechtsand eine Dehnung von fast 2 mm/m erreichte. Alle geprüften quarzitischen Sande lagen mit Dehnungen von 0,7 mm/m bis 1,4 mm/m zwischen diesen beiden Varianten. Bei Verlängerung der Warmlagerung zeigten alle quarzitischen Prüfsande eine weitere, stetige Dehnungszunahme, so dass die nach 28 Tagen Lagerung resultierende Dehnungswerte bei einigen Sanden sogar über denen des Mörtels mit dem reaktiven Grauwackebrechtsand lagen. Die anschließenden Dünnschliffuntersuchungen der Mörtel ließen mit zunehmender Lagerungsdauer unter den extremen Prüfbedingungen Schädigungen von quarzitischen Sandpartikeln erkennen.

Vergleichende Mörtelversuche mit CEM I (st), CEM II/B-S und ausgewählten Sanden dargestellt in Bild 3, belegen geringere Dehnungen bei Verwendung dieser Zemente. Eine besonders deutliche Reduzierung der Dehnung wurde bei der Kombination aus CEM II/B-S und dem reaktiven Grauwackebrechtsand festgestellt.



**Bild 1:** pH-Werte in Porenlösung aus Mörtelprismen mit Prüfzement und verschiedenen Prüfsanden nach unterschiedlich langer Warmlagerung

**Figure 1:** pH values in pore solutions from mortar prisms made with test cement and different test sands after varying periods of hot storage

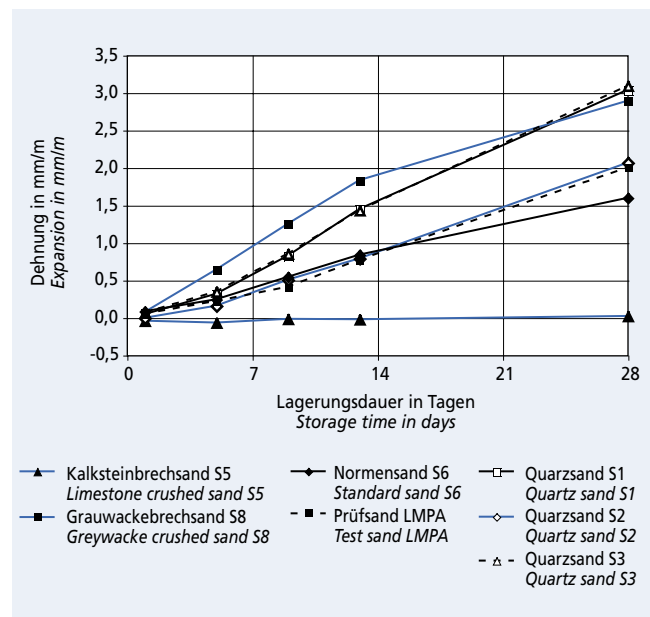
### 3.2 Accelerated test method

The expansions of the mortar prisms when using the accelerated mortar test method (reference method as specified in the Alkali Guidelines, Part 3) are shown in Fig. 2. Divergent expansion values caused by the different alkali reactivities were obtained for the test sands. However, the mortar prisms made with standard sand that exhibited the highest chemical reactivity in the investigations described in Section 3.1 did not show the largest deformation in the accelerated test method. Within the usual test duration of 13 days the mortar made with limestone sand remained virtually free from expansion while the mortar made with greywacke crushed sand reached an expansion of almost 2 mm/m. All the quartzitic sands tested lay between these two variants, with expansions of 0.7 mm/m to 1.4 mm/m. When the storage was extended all the quartzitic test sands exhibited a further, continuous, increase in expansion, with the result that for some sands the expansion values obtained after 28 days' storage were even higher than those of the mortar made with reactive greywacke crushed sand. Subsequent examination of the thin sections of the mortar indicated damage to the quartzitic sand particles with increasing storage time under the extreme test conditions.

Comparative mortar tests with CEM I (st) and CEM II/B-S cements and selected sands shown in Fig. 3 verify the smaller expansions when using these cements. A particularly clear reduction in the expansion was established with the combination of CEM II/B-S cement and reactive greywacke crushed sand.

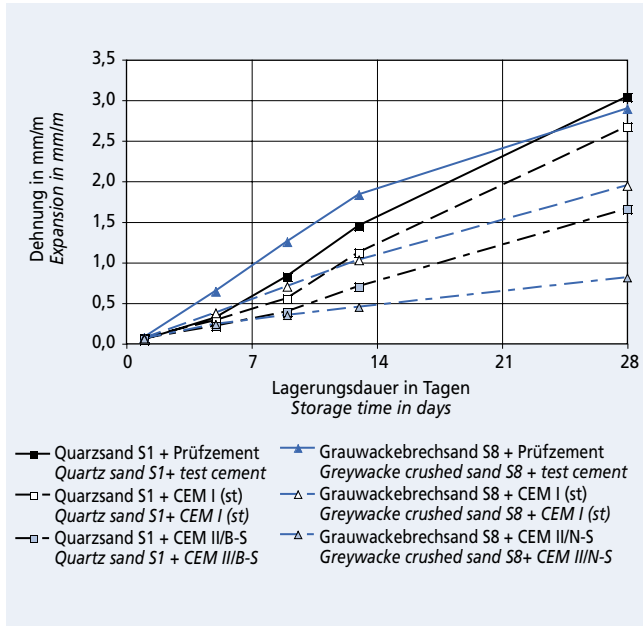
### 3.3 Concrete investigations

Mixtures of the test cement described in the Alkali Guidelines with test sands and the defined reactive and inert aggregates were investigated in the concrete tests. The results from the 60 °C concrete test are shown in Fig. 4. The expansions of the concretes made with limestone (grey curves) were low, as expected. The use of uncrushed quartzitic sands (S1, S2) led to only slightly higher expansions than the inert reference sample made with limestone sand (S5). Correct classification of the coarse aggregate as "not reactive" was therefore achieved regardless of the test sand used. One exception was the mixture with the reactive greywacke crushed sand S8 that, in spite of combination with inert limestone aggregates, slightly exceeded the limit.



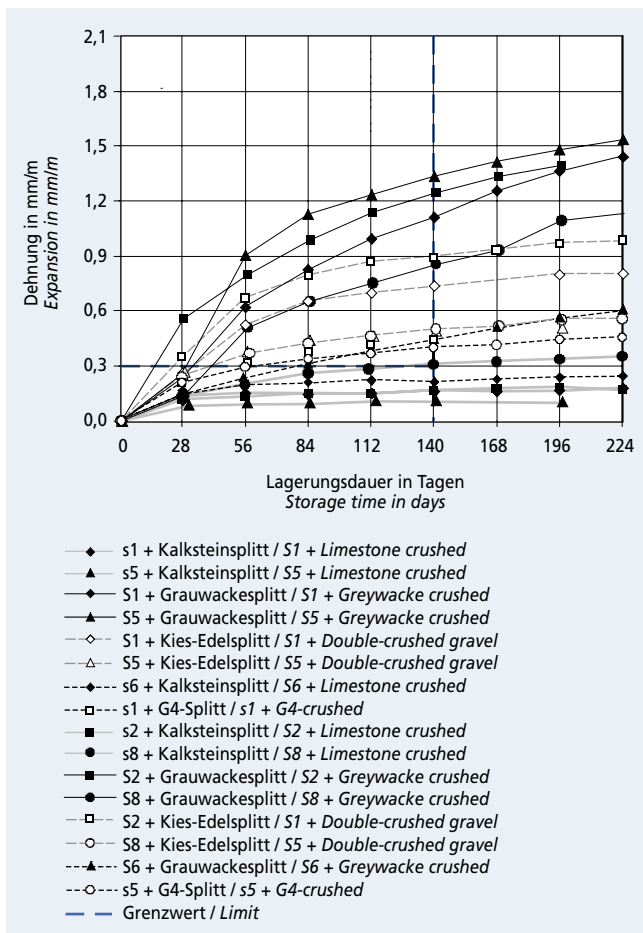
**Bild 2:** Dehnungen der Mörtelprismen mit Prüfsanden im Schnellprüfverfahren (Referenzverfahren), Kombinationen mit Prüfzement (CEM I mit Na<sub>2</sub>O-Äqu. = 1,2 M.-%)

**Figure 2:** Expansion of the mortar prisms made with test sands in the accelerated test method (reference method), combinations with test cement (CEM I with Na<sub>2</sub>O-equiv. = 1.2 mass %)



**Bild 3:** Dehnungen der Mörtelprismen mit den Prüfsanden S1 und S8 im Schnellprüfverfahren (Referenzverfahren), Kombinationen mit CEM I (st) ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äqu. = 0,78 M.-%) und CEM II/B-S ( $\text{Na}_2\text{O}$ -Äqu. = 0,90 M.-%)

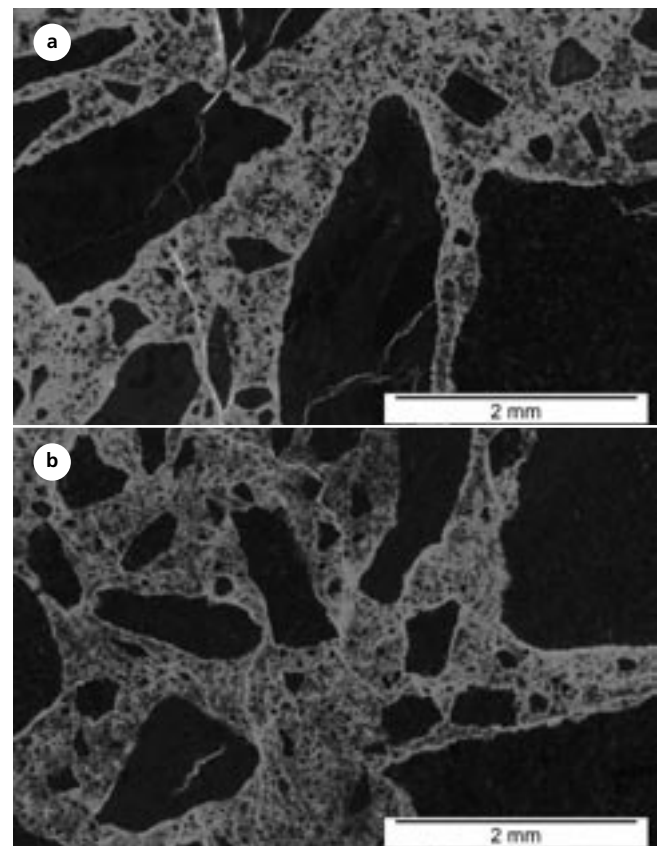
**Figure 3:** Expansion of the mortar prisms made with test sands S1 and S8 in the accelerated test method (reference method), combinations with test CEM I (st) ( $\text{Na}_2\text{O}$ -equiv. = 0.78 mass %) and CEM II/B-S ( $\text{Na}_2\text{O}$ -equiv. = 0.90 mass %)



**Bild 4:** Dehnungen der Betonproben im 60 °C-Betonversuch  
**Figure 4:** Expansion of the concrete samples in the 60 °C concrete test

All the concretes made with the alkali-reactive greywacke as the coarse aggregate (black continuous curves in Fig. 4) were significantly above the expansion limit of 0.3 mm/m after 140 days. The concrete made with the inert sand S5 exhibited the largest expansions, while the concrete made with reactive greywacke as sand S8 and coarse aggregate exhibited significantly lower expansions. With the latter mixture, part of the available alkalinity in the concrete was presumably consumed by largely non-damaging reactions at the comparatively large particle surfaces of the reactive sand. This effect occurred even more clearly with the concrete made with greywacke aggregates and the chemically reactive standard sand S6 (dotted line). On the other hand, with the concrete made with inert limestone sand S5 the entire alkalinity of the test cement was available for reaction with the greywacke aggregates, which led to comparatively large expansions in the concrete. Examination of the thin sections under a light-optical microscope pointed to different cracking patterns in the samples (Figs. 5a and 5b). With the combination of greywacke coarse aggregates and limestone crushed sand S5 (Fig. 5a) the cracks are concentrated in the aggregates. Only a few continuations of the cracks pass through the otherwise undamaged matrix. When greywacke was used as sand S8 and coarse aggregates (Fig. 5b) a system of finely branched microcracks appeared in the hardened cement matrix and there was only slight damage in the greywacke grains. Any significant correlation of the cracking pattern with the order of magnitude of the concrete expansions is still being investigated by comparison with series of thin sections from other concretes damaged by ASR.

The expansion values of the concretes made with uncrushed quartzitic test sands varied within the range covered by the inert limestone crushed sand S5 and the reactive greywacke crushed sand S8. The correct assessment of the coarse greywacke aggre-



**Bild 5:** Betone mit Grauwackesplitt nach dem 60 °C-Betonversuch (Dünnschliff unter UV Beleuchtung): oben (5a): mit Kalksteinbrechsand und unten (5b): mit Grauwackebrechsand

**Figure 5:** Concretes made with crushed Greywacke after the 60 °C concrete test (thin film under UV light: above (5a): with limestone crusher sand and below (5b): with Greywacke crusher sand)

### 3.3 Betonuntersuchungen

In Betonversuchen wurden Mischungen aus dem Prüfzement nach Alkali-Richtlinie, Prüfanden und definiert reaktiven und inerten Gesteinskörnungen untersucht. Die Ergebnisse aus dem 60 °C-Betonversuch sind in Bild 4 dargestellt. Die Dehnungen der Betone, die mit Kalksteinsplitt hergestellt wurden (graue Kurven), waren erwartungsgemäß niedrig. Die Verwendung von ungebrochenen quarzitären Sanden (S1, S2) führte zu nur geringfügig höheren Dehnungen als die inerte Referenzprobe mit inertem Kalksteinbrechsand (S5). Unabhängig vom Prüfand erfolgte somit eine korrekte Einstufung der groben Gesteinskörnung als „nicht reaktiv“. Eine Ausnahme bildete die Mischung mit dem reaktiven Grauwackebrechsand S8, die trotz Kombination mit dem inerten Kalksteinsplitt den Grenzwert geringfügig überschritt.

Alle Betone mit der alkalireaktiven Grauwacke als grobe Gesteinskörnung (schwarze, durchgezogene Kurven in Bild 4) überschritten den Dehnungsgrenzwert von 0,3 mm/m nach 140 Tagen deutlich. Dabei wies der Beton mit dem inerten Sand S5 die höchsten Dehnungen auf, während der Beton mit der reaktiven Grauwacke als Sand S8 und Splitt deutlich geringere Dehnungen zeigte. Vermutlich wurde bei letzterer Mischung ein Teil der verfügbaren Alkalität im Beton durch weitgehend nicht schädigende Reaktionen an der vergleichsweise großen Kornoberfläche des reaktiven Sandes verbraucht. Dieser Effekt trat noch deutlicher beim Beton mit Grauwackesplitt und dem chemisch reaktiveren Normensand S6 (gepunktete Linie) auf. Beim Beton mit inertem Kalksteinbrechsand S5 stand hingegen die gesamte Alkalität des Prüfzements für die Reaktion mit dem Grauwackesplitt zur Verfügung, was zu vergleichsweise hohen Dehnungen im Beton führte. Die lichtmikroskopischen Dünnschliffuntersuchungen deuteten auf ein unterschiedliches Rissbild in den Proben hin (Bilder 5a und 5b). Bei der Kombination Grauwackesplitt/Kalksteinbrechsand S5 (Bild 5a) konzentrieren sich die Risse auf die Splittkörner. Nur wenige Rissfortsetzungen durchlaufen die ansonsten ungeschädigte Matrix. Bei Verwendung von Grauwacke als Sand S8 und Splitt (Bild 5b) zeigt sich in der Zementsteinmatrix ein System aus feinverzweigten Mikrorissen und nur geringe Schädigungen im Grauwackesplitt und -sand. Eine eindeutige Zuordnung des Rissbildes zur Größenordnung der Betondehnungen durch Abgleich mit Dünnschliffserien anderer AKR-geschädigter Betone wird noch untersucht.

Die Dehnungswerte der Betone mit den ungebrochenen quarzitären Prüfanden bewegten sich innerhalb der Spanne, die durch den inerten Kalksteinbrechsand S5 und den reaktiven Grauwackebrechsand S8 vorgegeben wurde. Die korrekte Beurteilung der groben Gesteinskörnung Grauwackesplitt als „alkali-reaktiv“ wurde durch die verschiedenen Sande nicht beeinträchtigt. Die Betone mit dem reaktiven Kiesedelsplitt (gestrichelte Kurven in Bild 4) zeigten auf einem niedrigeren Dehnungsniveau qualitativ die gleichen Ergebnisse. Auch diese Gesteinskörnung wurde in allen getesteten Kombinationen mit Prüfanden korrekt beurteilt.

Der Dehnungsverlauf der mit dem G4-Splitt hergestellten Betone ist in Bild 4 als gepunktete Linien mit offenen Symbolen dargestellt. Beim Einsatz mit Kalksteinbrechsand wurde der Dehnungsgrenzwert geringfügig überschritten, wodurch das Potenzial der Gesteinskörnung zu einer schädigenden AKR erkennbar wurde. Der Ersatz des Kalksteinbrechsandes durch den quarzitären Prüfand S1 führte zu leicht höheren Dehnungswerten und damit zu einer auf der sicheren Seite liegenden Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung.

Die Ergebnisse der Betonversuche mit Nebelkammerlagerung, die in Bild 6 dargestellt sind, führten mit Ausnahme von Gesteinskörnung G4 zu identischen Bewertungen der untersuchten Gesteinskörnungen wie der 60 °C-Betonversuch. Da sich durch Rissbildungen keine von den Dehnungswerten abweichenden Interpretationen ergaben, wurde auf die Darstellung des Risskriteriums in Bild 6 verzichtet.

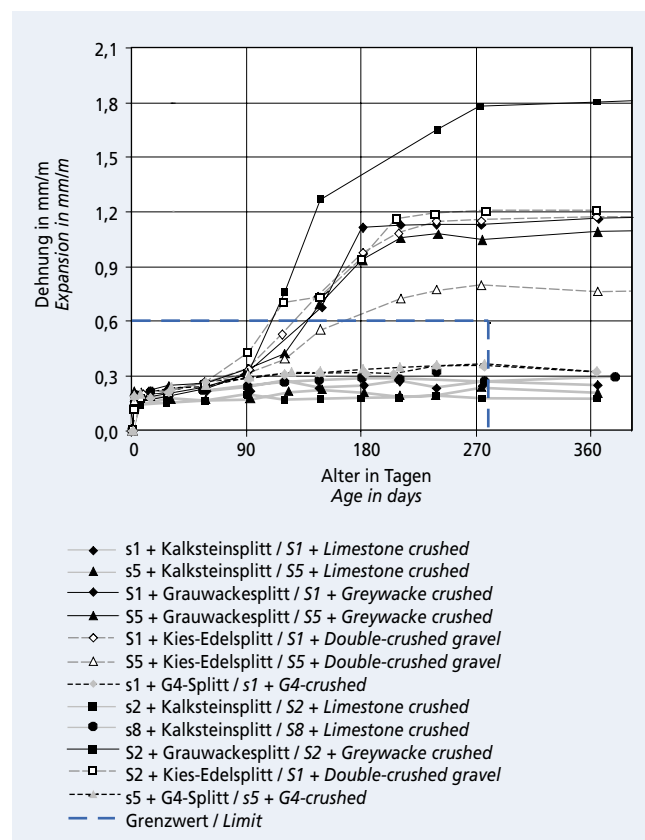
Der Einfluss der untersuchten Sandfraktion auf die Dehnungswerte der Betone war vergleichsweise gering und wurde eindeutig durch die Reaktivität der groben Gesteinskörnung überlagert. Es

gate as “alkali-reactive” was not adversely affected by the different sands. The concretes made with the reactive double-crushed gravel (dashed curves in Fig. 4) showed the same qualitative result but at a lower expansion level. These aggregates were also correctly evaluated in all the combinations tested with standard sands.

The expansion behaviour patterns of the concretes produced with G4 are shown in Fig. 4 as dotted lines with hollow symbols. When limestone crushed sand was used the expansion limit was just exceeded, which meant that the potential of the aggregate to undergo a harmful ASR was identifiable. Replacement of the limestone crushed sand by the quartzitic test sand S1 led to slightly higher expansion values and therefore to an evaluation of the alkali sensitivity of the aggregate that lay on the safe side.

The results of the concrete tests with fog chamber storage that are shown in Fig. 6 led, with the exception of aggregate G4, to evaluations of the aggregates tested that were identical to those of the 60 °C concrete test. The cracking criterion has not been shown in Fig. 6 as the cracking did not produce any interpretations that differed from the expansion values.

The sand fractions investigated had comparatively little influence on the expansion values of the concretes and this was significantly blanketed by the reactivity of the coarse aggregate. The limits were not exceeded when reactive quartz sands were used with the aggregate defined as inert (limestone) nor were the expansions of concretes made with clearly reactive aggregates reduced by natural quartz sands to such an extent as to give a false evaluation of the coarse aggregate. Only when standard sand S6, which contains very fine crushed quartz, was used significant reductions were achieved in the expansion values of concretes made with reactive aggregates. The concrete made with the moderately reactive aggregate (aggregates G4) exhibited slightly increased expansions when using quartzitic sand S1. Evaluation of this aggregate, which with inert limestone crushed sand lies in the border region of permissible expansion, would therefore lie on the safe side when using a slightly reactive quartz sand.



**Bild 6: Dehnungen der Betonproben in der Nebelkammer**  
**Figure 6: Expansion of the concrete samples in the fog chamber**



kam weder bei der als inert definierten Gesteinskörnung (Kalksteinsplitt) durch reaktive Quarzsande zu Überschreitungen von Grenzwerten, noch wurden Dehnungen von Betonen mit eindeutig reaktiven Gesteinskörnungen durch natürliche Quarzsande soweit verringert, dass es zu einer falschen Bewertung der groben Gesteinskörnung gekommen wäre. Nur bei Verwendung vom Normsand S6, der feinstkörnigen Brechsand enthält, ließ sich eine signifikante Verringerungen der Dehnungswerte von Betonen mit reaktiven Splitten erreichen. Der Beton mit der mäßig reaktiven Gesteinskörnungen (Splitt G4) zeigte bei Verwendung vom quarzischen Sand S1 leicht erhöhte Dehnungen. Die Bewertung dieser Gesteinskörnung, die mit inertem Kalksteinbrechsand im Grenzbereich der zulässigen Dehnung liegt, würde bei Verwendung von geringfügig reaktivem Quarzsand somit auf der sicheren Seite liegend erfolgen.

Es bestand keine Korrelation zwischen den Dehnungswerten des auf Sande angewendeten Schnellprüfverfahrens (Referenzverfahren, Bild 2) und den ermittelten Betondehnungen (Bilder 5 und 6). Dementsprechend ist das Schnellprüfverfahren nicht zur Beurteilung einer möglichen Alkalireaktivität von Sandkörnungen in Betonen geeignet.

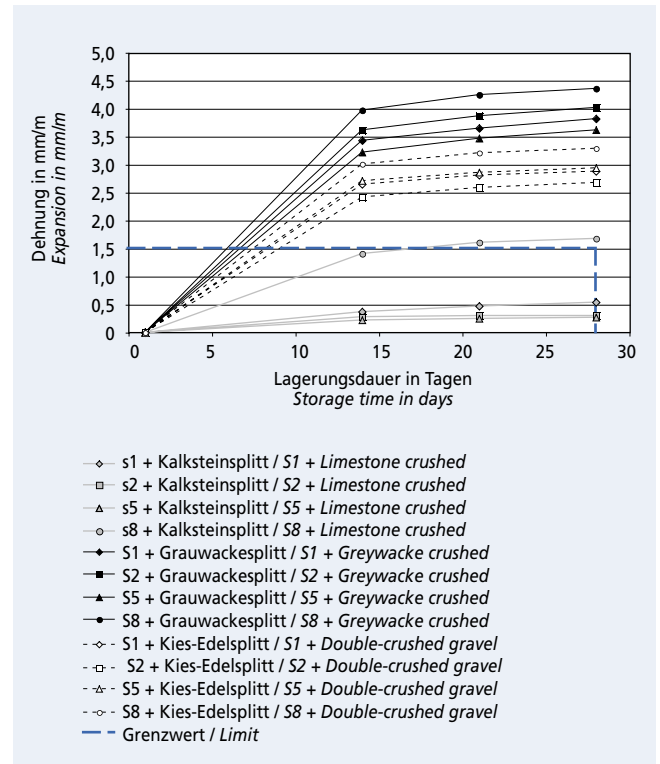
Die Mörtelschnelltests (Alternativverfahren, dargestellt in Bild 7) führten zu einer ähnlich scharfen Trennung in der Beurteilung der inerten und reaktiven groben Gesteinskörnungen wie die Betonversuche. Ein signifikanter Einfluss des Feinkornanteils < 0,5 mm von natürlichen quarzischen Gesteinskörnungen war nicht festzustellen. Da bei diesem Prüfverfahren eine Alkalidotierung des Zementes auf ein  $\text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent von 2,5 M.-% vorgegeben ist und es nur in diesem Fall differenzierbare Ergebnisse liefert, ist es als Performance-Prüfung nicht anwendbar.

#### 4 Zusammenfassung

Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurde die Auswirkung der Alkalireaktivität von Prüfsanden auf die Bewertung verschiedener alkalireaktiver Gesteinskörnungen untersucht. Die Alkali-Richtlinie des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) sieht zur Prüfung der Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen u.a. Betonversuche vor, bei denen die zu prüfende grobe Körnung mit einer inerten Sandfraktion zu ergänzen ist. Quarzische Sandkörnungen weisen jedoch im Allgemeinen naturbedingt eine geringe eigene Alkalireaktivität auf. Ziel der Untersuchungen war es, den Einfluss verschiedener quarzischer Prüfsande auf die Bewertung von inerten und reaktiven Gesteinskörnungen zu quantifizieren.

Im Schnellprüfverfahren (Referenzverfahren) zeigten die untersuchten Prüfsande divergierende Dehnungswerte. Auch die Löslichkeit im alkalischen Milieu war unterschiedlich, ohne mit den Dehnungswerten der Mörtel im Schnellprüfverfahren zu korrelieren. Auch zwischen den Dehnungswerten im Schnellprüfverfahren und den Dehnungen, die in Betonuntersuchungen erzielt wurden, konnte keine Korrelation festgestellt werden. Somit ist das Schnellprüfverfahren nicht zur Beurteilung einer Alkalireaktivität von Sandkörnungen in Betonen geeignet. Gleiches gilt für den Mörtelschnelltest (Alternativverfahren).

In den Betonversuchen wurden Kombinationen von Prüfsanden und definiert reaktiven und inerten groben Gesteinskörnungen untersucht. Sowohl im 60 °C-Betonversuch als auch im Betonversuch mit Nebelkammerlagerung (40 °C) war der Einfluss der Sandfraktion auf die Dehnungswerte der Betone gering und wurde eindeutig durch die Reaktivität der groben Gesteinskörnung überlagert. Es kam weder bei inerten Gesteinskörnungen durch reaktive Quarzsande zu Überschreitungen von Grenzwerten, noch wurden Dehnungen von Betonen mit eindeutig reaktiven Gesteinskörnungen durch natürliche Quarzsande soweit vermindert, dass es zu einer fehlerhaften Bewertung der Alkaliempfindlichkeit der groben Gesteinskörnung gekommen wäre. Die Bewertung von Gesteinskörnungen, die mit Inertsand im Grenzbereich der Dehnung liegen, würde bei Verwendung von geringfügig reaktivem Quarzsand auf der sicheren Seite liegend erfolgen.



**Bild 7: Dehnungen der Proben in Mörtelschnelltests (Alternativverfahren)**

**Figure 7: Expansion of the samples in the accelerated mortar test (alternative method)**

There was no correlation between the expansion values of the accelerated mortar test method (reference method, Fig. 2) applied to sands and the measured concrete expansions (Figs. 5 and 6). This means that the accelerated test method is not suitable for assessing the possible alkali reactivity of sands in concrete.

The accelerated mortar test (alternative method, shown in Fig. 7) led to a distinction in the assessment of the inert and reactive coarse aggregates with a sharpness similar to that of the concrete tests. No significant influence of the fine fraction < 0.5 mm of the natural quartzitic aggregates could be established. Addition of alkalis to the cement to give an  $\text{Na}_2\text{O}$  equivalent of 2.5 mass % is specified for this test method and it is only in this case that it gives differentiable results so it cannot be applied as a performance test.

#### 4 Summary

The effect of the alkali reactivity of test sands on the evaluation of aggregates with different alkali-reactivities was examined at the Research Institute of Cement Industry. The Alkali Guidelines issued by the DAfStb (German Committee for Reinforced Concrete) provides for the testing of the alkali reactivity of aggregates including concrete tests in which the coarse aggregate to be tested has to be supplemented with an inert sand fraction. Due to the nature of the material, quartzitic sands generally exhibit their own slight alkali reactivity. The aim of the investigations was to quantify the influence of different quartzitic test sands on the evaluation of inert and reactive aggregates.

In the accelerated mortar test method (reference method) the test sands examined exhibited divergent expansion values. Their solubilities in an alkaline medium also differed without correlating with the expansion values of the mortars in the accelerated test method. Nor could any correlation be established between the expansion values in the accelerated test method and the expansions that were obtained in the concrete investigations. This means that the accelerated test method is not suitable for assessing the alkali reactivity of sands in concretes. The same applies to the accelerated mortar test (alternative method).



Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens belegen, dass der Einfluss von ungebrochenen, quarzitischen Sanden auf eine schädigende AKR in Beton vergleichsweise gering ist. Bei einer ausreichenden Charakterisierung der groben Gesteinskörnung nach den Vorgaben der Alkali-Richtlinie kann auf eine separate Prüfung dieses Ausgangsstoffes verzichtet werden.

Das IGF-Vorhaben 15323 N der Forschungsvereinigung Verein Deutscher Zementwerke e.V. wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestags gefördert.

Combinations of test sands with coarse aggregates of defined reactivity and inert coarse aggregates were examined in the concrete tests. The influence of the sand fraction on the expansion values of the concretes was low both in the 60 °C concrete test and in the concrete test with fog chamber storage (40 °C) and was clearly blanketed by the reactivity of the coarse aggregates. Inert aggregates were not caused to exceed any limits by reactive quartz sands nor were the expansions of concretes made with significantly reactive aggregates reduced by natural quartz sands to such an extent that the alkali-sensitivity of the coarse aggregate would be wrongly evaluated. The evaluation of aggregates that, with inert sands, lie in the limit range of accepted expansion, would lie on the safe side if quartz sand with a low reactivity were used.

The results of the research project confirm that the influence of uncrushed quartzitic sands on the harmful alkali-silicate reaction in concrete is comparatively slight. Separate testing of this constituent can be dispensed with if the coarse aggregate has been adequately characterized in accordance with the provisions of the Alkali Guidelines.

The IGF research project 15323 N of the Research Association of the German Cement Works Association was supported by the AiF (Federation of Industrial Research Associations) as part of the programme to promote joint industrial research and development (IGF) of the Federal Ministry for Economic Affairs and Technology based on a resolution by the German Bundestag.

## Literatur / Literature

- [1] DAfStb-Richtlinie Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende AKR im Beton (Alkali-Richtlinie): Teil 1: Allgemeines; Teil 2: Betonzuschlag mit Opalsandstein und Flint, Teil 3: Betonzuschlag aus präkambrischer Grauwacke oder anderen alkaliempfindlichen Gesteinen. Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Fassung Februar 2007
- [2] Siebel, E.; Sylla, H.-M.; Bokern, J.: Einfluss von puzzolanischen Bestandteilen auf die Vermeidung einer schädigenden AKR. Tagungsband 14. Ibausil Weimar 2000, Band 1, S. 959–965
- [3] Franke, L.: Schnelltest auf Alkalireaktion. Beiträge zum 42. Forschungskolloquium des DAfStb (2003), S. 71–78
- [4] Philipp, O.; Eifert, K.: Bestimmung der Alkalireaktivität von Kiesen und Splitten für die Betonherstellung. Beton- und Fertigteiltechnik 70 (2004) H. 10, S. 6–19
- [5] Hüniger, K.-J.; Hill, S.: Chemischer Schnelltest zur praxiskonformen Prüfung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen für Beton. Beton- und Fertigteiltechnik 71 (2005) H. 7, S. 36–47
- [6] Siebel, E.; Böhm, M.; Borchers, I.; Müller, Ch.; Bokern, J.; Schäfer, E.: ASR test methods – Comparability and practical relevance. CEMENT INTERNATIONAL 5 (2007) H.1, S. 84–93
- [7] Bachmann, R.; Hüniger, K.-J.; Scholz, Y.; Hahn, U.: BTU-SP-Schnelltest zur Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen. beton 59 (2009) H. 4, S. 138–143
- [8] Müller, Ch.; Borchers, I.; Stark, J.; Seyfarth, K.; Giebson, C.: Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Betonzusammensetzungen – Vergleich von Performance-Prüfverfahren. Tagungsband 17. Internationale Baustofftagung ibausil, Weimar 2009, S. 2–0261 bis 2–0266
- [9] Fournier, B.; Nkinamubanzi, P.-C.; Lu, D.; Thomas, M. D. A.; Folliard, K. J.; Ideker, J. H.: Evaluating potential alkali-reactivity of concrete aggregates, how reliable are the current and new test methods? Proc. 8<sup>th</sup> CANMET International Conference on Recent Advances in Concrete technology, Montreal 2006, S. 21–44
- [10] Ideker, J. H.; Folliard, K. J.; Fournier, B.; Thomas, M. D. A.: The role of “non-reactive” aggregates in the accelerated (60 °C) concrete prism test. Proc. 8<sup>th</sup> CANMET International Conference on Recent Advances in Concrete technology, Montreal 2006, S. 45–70
- [11] Lukschova, S.; Prikryl, R.; Pertold, Z.: Evaluation of the alkali-silica reactivity potential of sands. Magazine of Concrete Research 61 (2009) H. 8, S. 645–654
- [12] Kuroda, T. et al: Effects of the particle size of reactive fine Aggregate and accelerated test conditions on ASR expansion of mortar bar. Japan Concrete Institute: Transactions 22 (2000), S. 113–118
- [13] Pedersen, B.: Alkali-reactive and inert fillers in concrete – Rheology of fresh mixtures and expansive reactions. Trondheim 2004, Doctoral Thesis at Norwegian University of Science and Techniques
- [14] Fasseu, P.; Lebon, B.; Vecoven, J.: Utilisation de l'essai de performance sur béton pour la prévention du risque lié à la réaction alcali-silice. BLPC n° 266 (2007)
- [15] Lindgard, J.; Nixon, P.-J.; Borchers, I.; Schouenborg, B.; Wigum, B.-J.; Haugen, M.; Akesson, U.: The EU “PARTNER” project – European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates: final results and recommendations. Cement and Concrete Research 40 (2010) 4, S. 611–635