

Eberhard Siebel, Matthias Böhm, Ingmar Borchers, Christoph Müller, Düsseldorf, Jürgen Bokern, Mannersdorf, Elke Schäfer, Holderbank

AKR-Prüfverfahren – Vergleichbarkeit und Praxis-Relevanz*

ASR test methods – comparability and practical relevance*

Übersicht

In den vergangenen Jahren sind einige Schäden an Betonfahrbahndecken aufgetreten, die auf reaktive Gesteinskörnungen, die bisher in der Alkali-Richtlinie nicht enthalten waren, zurückgeführt werden konnten. Die auf Veranlassung der Industrie vom Bundesminister für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung (BMVBS) herausgegebenen Allgemeinen Rundschreiben Straßenbau Nr. 15/2005 und Nr. 12/2006 fordern deshalb für einige gebrochene Gesteinskörnungen und Betonzusammensetzungen, die in Betonfahrbahndecken eingesetzt werden sollen, ein Gutachten hinsichtlich der Gefahr einer schädigenden AKR von hierfür anerkannten Prüfstellen. Weiterhin wurde der Alkaligehalt der Straßenbauzemente weiter begrenzt. In den Entwurf der Alkali-Richtlinie [1] wurden diese Forderungen des Rundschreibens übernommen. Ein wesentlicher Bestandteil der Alkali-Richtlinie ist die Prüfung und Überwachung der Gesteinskörnungen. In dem vorliegenden Entwurf wurden erstmals Schnellprüfverfahren aufgenommen. Darüber hinaus wird die Möglichkeit geschaffen, dass die Eignung spezieller Betonzusammensetzungen durch einen Gutachter anhand von Performance-Prüfungen beurteilt werden kann. Im Forschungsinstitut der Zementindustrie wurden umfangreiche Untersuchungen zu den einzelnen Prüfverfahren zur Feststellung der Alkalireaktivität von Gesteinskörnungen und zur Bewertung von Betonzusammensetzungen in so genannten Performance-Prüfungen durchgeführt und die Ergebnisse mit den Erfahrungen aus Auslagerungsversuchen und aus der Praxis verglichen. Die Untersuchungen müssen fortgesetzt werden, um die Eignung von Gesteinskörnungen und Betonen für bestimmte Bauteile besser beurteilen zu können und sie einerseits nicht unnötig von der Verwendung auszuschließen sowie andererseits die Sicherheit der Betonbauweise zu gewährleisten.

1 Einleitung

Eine schädigende Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) kann in der Praxis bei sehr reaktiven Gesteinskörnungen (in Deutschland i. Allg. Kies mit porösem Opalsandstein und Flint), hohem Alkaligehalt im Beton und feuchter Umgebungsbedingung – ggf. mit einer Alkalizufuhr von außen – verhältnismäßig schnell auftreten, und zwar innerhalb von ein bis drei Jahren. Bei langsam reagierenden dichten Gesteinskörnungen ohne Pessimium (in Deutschland z.B. einige Quarzporphyre, Grauwacken und Kiessplitt des Oberrheins) kann sie jedoch auch erst nach 10 bis 30 Jahren zu sichtbaren Schäden führen. Prüfungen im Labor hinsichtlich einer schädigenden AKR sind deshalb besonders schwierig. Mit den Prüfungen soll innerhalb von zwei bis sechs Monaten eine Aussage getroffen werden, ob nach 10 bis 30 Jahren in der Praxis eine Schädigung eintreten kann. Die Entwicklung eines Prüfverfahrens ist deshalb nur möglich, wenn Langzeituntersuchungen von ausge-

Abstract

Some cases of damage to concrete pavements have occurred in Germany in recent years that were attributable to reactive aggregates that had not yet been included in the German Alkali Guidelines. For some crushed aggregates and concrete compositions that are to be used in concrete pavements the Circulars "Allgemeines Rundschreiben Straßenbau" No. 15/2005 and No. 12/2006, published by the Federal Minister for Traffic, Construction and Housing at the instigation of the industry, therefore require an expert report on the danger of a harmful alkali silica reaction by testing agencies that are approved for this purpose. Further restrictions are also placed on the alkali content of the cements used for concrete roads. These requirements of the Circulars have been adopted in the draft of the Alkali Guidelines [1]. The testing and monitoring of the aggregates form an important element of the Alkali Guidelines. Accelerated test methods have been included for the first time in the present draft. Furthermore, it is permissible for the suitability of specific concrete compositions to be assessed by an expert on the basis of performance tests. Extensive investigations of the individual test methods for determining the alkali reactivity of aggregates and for evaluating concrete compositions in "performance tests" have been carried out at the Research Institute of the Cement Industry. The results have been compared with the experience gained from exposure tests and from practice. The investigations will have to be continued to enable better assessments to be made of the suitability of aggregates and concretes for specific structural elements. This will ensure that they are not excluded unnecessarily from application but will still guarantee the safety of the concrete construction.

1 Introduction

In practice a deleterious alkali silica reaction (ASR) can occur relatively rapidly. In fact it can occur within one to three years with very reactive aggregates (in Germany these are generally gravels that contain porous opaline sandstone and flint), high alkali content in the concrete and moist ambient conditions – possibly with external supply of alkalis. However, with dense, slow-reacting, aggregates without pessimal behaviour (in Germany, for example, these are rhyolites, greywackes and crushed Upper Rhine gravel) it may only lead to visible damage after 10 to 30 years. Laboratory tests for a deleterious ASR are therefore particularly difficult. The tests should provide information within two to six months as to whether any damage will occur in practice after 10 to 30 years. The development of a test method is therefore only possible if there have been long-term investigations with test specimens stored outdoor at an exposure site and if investigations on structures with known concrete composition can be used for comparison.

* Erweiterte Fassung eines bei der 16. Internationalen Baustofftagung ibausil am 22. 9. 2006 in Weimar gehaltenen Vortrags.

* Expanded version of a lecture given at the 16th ibausil International conference on Building Materials in Weimar on 22.09.2006

lagerten Probekörpern vorliegen und wenn Untersuchungen an Bauwerken, bei denen die Betonzusammensetzung bekannt ist, zum Vergleich herangezogen werden können.

2 Prüfverfahren

2.1 Allgemeines

Zur Beurteilung der Reaktivität von Gesteinskörnungen einerseits und des Betons hinsichtlich der Gefahr des Auftretens einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion andererseits, wurden zahlreiche Prüfverfahren entwickelt. Eine genaue Modellierung der in der Praxis im Einzelfall vorliegenden Bedingungen durch ein einziges Prüfverfahren ist nicht möglich. Ein geeignetes Verfahren sollte jedoch das praktische Verhalten widerspiegeln. Darüber hinaus sollte es zu möglichst geringen Streuungen führen. Im Prinzip ist ein solches Prüfverfahren eine Konvention. Prüfverfahren für Gesteinskörnungen sollen ermöglichen, die Reaktivität von Gesteinskörnungen in nicht reaktiv, potenziell reaktiv und sehr reaktiv einzuteilen. Die Prüfungen zur Charakterisierung der Reaktivität einer Gesteinskörnung werden in Mörtelschnellprüfverfahren und Betonprüfungen unterteilt. Performance-Prüfverfahren sollen eine Beurteilung ermöglichen, ob der jeweilig zu verwendende Beton auch langfristig in der Praxis keine schädigende AKR aufweisen wird.

2.2 Prüfung der Gesteinskörnung

Bei der Prüfung der Alkaliempfindlichkeit einer Gesteinskörnung muss unterschieden werden zwischen porösen Gesteinskörnungen mit gegebenenfalls pessimalem Verhalten und dichten Gesteinskörnungen. Die im Folgenden dargestellten Prüfverfahren können nur für dichte Gesteinskörnungen, die kein Pessimum aufweisen, angewendet werden. Bei porösen Gesteinskörnungen müssen gesonderte Rahmenbedingungen beachtet werden.

2.2.1 Schnellprüfverfahren (Mörtelprüfung)

Schnellprüfverfahren haben einerseits den Vorteil, dass mit ihnen innerhalb kurzer Zeit eine Beurteilung von Gesteinskörnungen ermöglicht wird, andererseits jedoch den Nachteil, dass einige Gesteinskörnungen zu scharf beurteilt und dann ggf. zu Unrecht von der Verwendung ausgeschlossen werden. Schnellprüfverfahren können insbesondere zu einer falschen Beurteilung der Alkaliempfindlichkeit von Kiesen führen. Durch die für diese Prüfverfahren erforderliche Zerkleinerung der Kieskörner wird eine andere Reaktivität bestimmt als sie bei nicht gebrochenen Körnern vorhanden ist. Für Oberrheinkies wurde dies von J. Stark [2] festgestellt. Während der aufbereitete, d.h. gebrochene Oberrheinkies die Prüfung nicht bestand, wurde der nicht gebrochene Kies weitaus weniger empfindlich eingestuft. Vergleichsuntersuchungen mit gebrochenem und ungebrochenem Kies aus Mitteldeutschland zeigten im Gegensatz dazu, dass die Prüfungen von gebrochenem und nicht gebrochenem Kies zu den gleichen Ergebnissen führten [3]. Eine genauere Klärung der Ursachen ist erforderlich.

In Deutschland werden zwei Verfahren angewendet: der DAfStb-Mörtelschnelltest [4], der auf Oberholster und Davies [5] sowie RILEM [6] zurückgeht, und der LMPA-Mörtelschnelltest, der von Philipp [7] entwickelt wurde. Beide wurden leicht modifiziert in den aktuellen Entwurf der Alkali-Richtlinie [1] aufgenommen.

a) DAfStb-Mörtelschnelltest

Die Gesteinskörnung wird auf 0,125 mm bis 4 mm zerkleinert und mit dem zerkleinerten Material ein Mörtel hergestellt (drei Mörtelprismen 4 cm x 4 cm x 16 cm). Die Dehnung der Prismen wird nach einer 13-tägigen (bisher 14-tägigen) Lagerung in 80 °C heißer, 1 molarer NaOH-Lösung bestimmt. Der Grenzwert für die Dehnung der Mörtelprismen beträgt 1,0 mm/m. Die Längenmessung der Prismen erfolgt bei 80 °C [1].

b) LMPA-Mörtelschnelltest

Die Gesteinskörnung wird auf 0,5 mm bis 2 mm zerkleinert. Für die Herstellung des Mörtels wird der Alkaligehalt durch Zugabe einer NaOH-Lösung auf ein Na₂O-Äquivalent von 2,5 M.-% be-

2 Test methods

2.1 General

Numerous test methods have been developed for assessing the reactivity of aggregates on the one hand and for assessing concrete with respect to the risk of the occurrence of a deleterious alkali silica reaction on the other. Accurate modelling of the conditions actually present in an individual instance is not possible with a single test method. However, a suitable model should reflect the practical behaviour. It should also lead to the smallest possible variance. In principle, any such test method is a convention. Test methods for aggregates should make it possible to classify an aggregate as non-reactive, potentially reactive or very reactive. The tests for characterizing the reactivity of an aggregate are divided into accelerated mortar bar test methods and concrete prism tests. Performance test methods should make it possible to assess whether or not the concrete to be used in a particular instance would in practice exhibit any deleterious ASR, even in the long term.

2.2 Aggregate assessment

During the testing of the alkali reactivity of an aggregate it is necessary to differentiate between porous aggregates, possibly with pessimal behavior, and dense aggregates. The test methods described below can only be used for dense aggregates without pessimal behavior. Special framework conditions must be considered for porous aggregates.

2.2.1 Accelerated mortar bar tests

On the one hand, accelerated test methods have the advantage that they can assess aggregates within a short period but, on the other hand, they have the disadvantage that some aggregates are assessed too severely and then may be incorrectly excluded from use. In particular, accelerated test methods can lead to incorrect assessment of the alkali reactivity of gravels. The comminution of the grains of gravel that is necessary for these test methods means that the tests indicate a reactivity that is different from that of uncrushed gravel. This was established by J. Stark [2] for Upper Rhine gravel. The processed, i.e. crushed, Upper Rhine gravel did not pass the test but the uncrushed gravel was classified as far less reactive. However, comparison investigations with crushed and uncrushed gravel from Central Germany showed that the tests on crushed and uncrushed gravel gave identical results [3]. More precise clarification of the causes is needed.

Two methods are used in Germany – the DAfStb accelerated mortar bar test [4], which originated from Oberholster and Davies [5] as well as from RILEM [6], and the LMPA accelerated mortar bar test that was developed by Philipp [7]. Both have been adopted in slightly modified form in the current draft of the German Alkali Guidelines [1].

a) DAfStb accelerated mortar bar test

The aggregate is ground down to 0.125 mm to 4 mm and the comminuted material is used to produce a mortar (three 4 cm x 4 cm x 16 cm mortar prisms). The expansion of the prisms is measured after storage for 13 days (formerly 14 days) in 1 molar NaOH solution at 80 °C. The limit value for the expansion of the mortar bars is 1.0 mm/m. The lengths of the bars are measured at 80 °C [1].

b) LMPA accelerated mortar bar test

The aggregate is ground down to 0.5 mm to 2 mm. For production of the mortar the alkali content is raised to an Na₂O equivalent of 2.5 mass % relative to the cement by addition of NaOH solution. The test is carried out on three mortar bars (4 cm x 4 cm x 16 cm) that are stored for 28 days at 70 °C over water in closed containers. The limit value for the expansion after 28 days is 1.5 mm/m. The lengths of the bars are measured at 20 °C [1]. The measurements were previously carried out at 70 °C, and the limit value then was 2.0 mm/m after 21 days [7].

2.2.2 Long-term test methods (concrete prism tests)

Comprehensive investigations have been carried out over the past few years in Germany with the 40 °C fog chamber method.

zogen auf den Zement angehoben. Es werden drei Mörtelprismen (4 cm x 4 cm x 16 cm) geprüft, die 28 Tage lang bei 70 °C über einem Wasserbad in geschlossenen Behältern gelagert werden. Der Grenzwert für die Dehnung nach 28 Tagen liegt bei 1,5 mm/m. Die Längenmessung der Prismen erfolgt bei 20 °C [1]. Bisher wurde die Messung bei 70 °C durchgeführt. Hierbei lag der Grenzwert bei 2,0 mm/m nach 21 Tagen [7].

2.2.2 Langzeitprüfverfahren (Betonprüfungen)

In Deutschland wurden in den vergangenen Jahren umfangreiche Untersuchungen mit dem 40 °C-Nebelkammerverfahren durchgeführt. Dieses Verfahren hat Eingang in die deutsche Alkali-Richtlinie [8] gefunden und entspricht in etwa dem RILEM-Verfahren AAR-3 [9]. Nachteil des Verfahrens ist die lange Dauer von neun Monaten. Inzwischen wird zusätzlich der international häufig angewendete 60-°C-Betonversuch eingesetzt, mit dem eine Beurteilung der Gesteinskörnung bereits nach drei Monaten möglich ist. Bei beiden Verfahren kann die vorhandene Körnung im Lieferzustand verwendet werden.

a) 40-°C-Nebelkammerlagerung

Die Prüfung der Fraktionen 2/16 mm bzw. 2/22 mm erfolgt an drei Betonbalken (10 cm x 10 cm x 50 cm) und einem Würfel (30 cm), die neun Monate bei 40 °C und rd. 100 % r. F. in einer Nebelkammer gelagert werden. Die Gesteinskörnung gilt als unbedenklich, wenn die Dehnung der Balken 0,6 mm/m nicht überschreitet und die maximale Rissweite des Würfels unter 0,2 mm liegt. Es ist zu berücksichtigen, dass in der Dehnung die Temperaturdehnung und die Feuchtedehnung enthalten sind.

b) 60-°C-Betonversuch

Der 60-°C-Betonversuch wurde in Anlehnung an das Verfahren der französischen Norm NF P 18-454 [10] und das RILEM-Verfahren AAR-4 [11] festgelegt. Mit der groben Fraktion 2/16 mm bzw. 2/22 mm der Gesteinskörnung werden drei Betonprismen mit den Abmessungen 7,5 cm x 7,5 cm x 28 cm hergestellt, die nach dem Ausschalen bei 60 °C über Wasser in dicht verschlossenen Behältern in einer Prüfruhe gelagert werden. Die Länge der Prismen wird nach 0, 4, 8, 12, 16 und 20 Wochen nach Herstellung der Probekörper bei 20 °C gemessen und hieraus die Dehnung ermittelt. In Anlehnung an das RILEM-Verfahren wird der Grenzwert voraussichtlich bei 0,3 mm/m nach zwölf Wochen liegen.

2.3 Performance-Prüfungen

Ist eine Gesteinskörnung gemäß Alkali-Richtlinie als bedenklich (E III) eingestuft, so wird in Abhängigkeit von der Feuchtigkeitsklasse des Bauteils und dem Zementgehalt des Betons der Austausch der Gesteinskörnung oder der Einsatz von Zementen mit einem niedrigen wirksamen Alkaligehalt (NA) als Maßnahme gefordert. Um Gesteinskörnungen oder Zemente nicht unnötigerweise von der Verwendung auszuschließen und ggf. auch eine Alkalizufuhr von außen zu simulieren, sind Performance-Prüfungen unerlässlich. Das Performance-Verfahren soll Auskunft geben, ob eine vorgesehene Betonzusammensetzung insbesondere mit vorgegebener Gesteinskörnung und vorgegebenem Zement für eine bestimmte Feuchtigkeitsklasse eingesetzt werden kann. In Deutschland werden hierfür zzt. der 60-°C-Betonversuch und das Verfahren der Klimawechsellaagerung [3] weiterentwickelt. Die Verfahren sollen in einem zukünftigen Teil 4 der Alkali-Richtlinie aufgenommen werden.

2.3.1 60-°C-Betonversuch ohne Alkalizufuhr

Der 60-°C-Betonversuch (siehe Kapitel 2.2.2) kann ebenfalls als Performance-Prüfverfahren verwendet werden. Hierfür gilt zzt. in Anlehnung an [12] ein Grenzwert von 0,2 mm/m nach zwölf Wochen.

2.3.2 60-°C-Betonversuch mit Alkalizufuhr

Mit dem 60-°C-Betonversuch als Basis können außerdem Betone für Fahrbahndecken mit der Lagerung nach Tafel 1 mit einer Alkalizufuhr von außen (3 %ige oder 10 %ige NaCl-Lösung) geprüft

This method was included in the German Alkali Guidelines [8] and corresponds approximately to the RILEM AAR-3 method [9]. The disadvantage of this method is its long duration of nine months. The 60 °C concrete prism test that is frequently used internationally and that can assess the aggregate after only three months is now also being used. With both methods it is possible to use the aggregate as delivered.

a) 40 °C fog chamber storage

The 2/16 mm or 2/22 mm fraction is tested using three concrete prisms (10 cm x 10 cm x 50 cm) and one cube (30 cm), which are stored in a fog chamber for nine months at 40 °C and about 100 % r.h. The aggregate can be classified as non-reactive if the expansion of the prisms does not exceed 0.6 mm/m and the maximum crack width in the cube is less than 0.2 mm. It should be borne in mind that the expansion includes the temperature expansion and the moisture expansion.

b) 60 °C concrete prism test

The 60 °C concrete prism test was defined on the basis of the procedures in the French standard NF P 18-454 [10] and the RILEM AAR-4 method [11]. The 2/16 mm or 2/22 mm coarse fraction of the aggregate is used to produce three 7.5 cm x 7.5 cm x 28 cm prisms, which, after removal from the mould, are stored at 60 °C over water in tightly sealed containers in a test reactor. The expansion is determined by measuring the lengths of the prisms at 20 °C at 0, 4, 8, 12, 16 and 20 weeks after production of the test specimens. Based on the RILEM method the limit value is provisionally set at 0.3 mm/m after twelve weeks.

2.3 Performance testing

If an aggregate is classified as reactive (E III) in accordance with the German Alkali Guidelines then, depending on the moisture class of the structural component and the cement content of the concrete, the aggregate has to be replaced or cements with a low effective alkali content (low-alkali cements) have to be used. Performance tests are essential if aggregates or cements are not to be unnecessarily excluded from use and also, if necessary, for simulating an external supply of alkalis. The performance method should provide information about whether an intended concrete composition with a particular aggregate and particular cement can be used for a specific moisture class. The 60 °C concrete prism test and the cyclic climate storage [3] are currently being refined in Germany for this purpose. These methods are to be included in a future Part 4 of the German Alkali Guidelines.

2.3.1 60 °C concrete prism test without alkali supply

The 60 °C concrete prism test (see Section 2.2.2) can also be used as a performance test. In this case a limit value of 0.2 mm/m after twelve weeks based on [12] applies at present.

2.3.2 60 °C concrete prism test with alkali supply

Using the 60 °C concrete prism test as the basis it is also possible to test concretes for pavements using the storage system shown in Table 1 with external supply of alkalis (3 % or 10 % NaCl solution). In this test the amount of expansion is affected not only by the external supply of alkalis but also by the modified preliminary storage and the drying phase that differ from the original 60 °C concrete prism test described in Section 2.2.2 b). If concretes for airfields are being investigated then a solution based on potassium acetate or formate is used instead of an NaCl solution. With this method it is important that the concrete has sufficient time to form a dense microstructure (at least seven days under moist conditions and 14 days at 20 °C/ 65 % r.h.) before it is exposed to attack by a de-icing agent.

2.3.3 Cyclic climate storage

After sealed storage up to the 7th day, three prisms (10 cm x 10 cm x 40 cm) are exposed to at least six cycles in the climate simulation chamber. One cycle of the cyclic climate storage consists of a 4-day drying phase at 60 °C and < 10 % r.h., a 14-day moistening phase

Tafel 1: Lagerung bei der Performance-Prüfung mit Alkalizufuhr von außen
Table 1: Storage during the performance test with external alkali supply

	Lagerungsdauer <i>Duration of storage</i>	Klima <i>Climatic conditions</i>
Vorlagerung: <i>Preliminary storage:</i> 28 d	1 d	in der Schalung <i>in the mould</i>
	6 d	20 °C und/and 100 % r.F./r.h.
	14 d	20 °C und/and 65 % r. F./r.h.
	6 d	60 °C und/and 100 % r.F./r.h.
	1 d	20 °C und/and 100 % r.F./r.h.
Wechselagerung: <i>Alternating storage:</i> Turnus 14 d <i>14 d rotation</i>	5 d	60 °C im Trockenschrank <i>in drying cabinet</i>
10 Wiederholungen <i>10 repetitions</i>	2 d	20 °C eingetaucht in Prüflösung <i>immersed in test solution</i>
	6 d	60 °C und/and 100 % r.F./r.h.
	1 d	20 °C und/and 100 % r.F./r.h.

werden. Bei dieser Prüfung haben neben der Alkalizufuhr im Vergleich zu dem ursprünglichen 60-°C-Betonversuch nach Abschnitt 2.2.2 b) auch die veränderte Vorlagerung und die Trocknungsphase einen Einfluss auf die Höhe der Dehnungen. Werden Betone für Flugplätze untersucht, wird anstelle einer NaCl-Lösung eine Lösung auf Kaliumacetat- oder Formiat-Basis eingesetzt. Wichtig ist bei diesem Verfahren, dass der Beton, bevor er einer Taumittel-Beaufschlagung ausgesetzt wird, ausreichend Zeit hat, ein dichtes Gefüge auszubilden (mindestens sieben Tage feucht und 14 Tage bei 20 °C/65 % r. F.).

2.3.3 Klimawechselagerung

Nach der konservierten Lagerung bis zum 7. Tag werden drei Balken (10 cm x 10 cm x 40 cm) für mindestens sechs Zyklen in der Klimasimulationskammer beansprucht. Ein Zyklus der Klimawechselagerung besteht aus einer 4-tägigen Trocknungsphase bei 60 °C und < 10 % r.F., einer 14-tägigen Befeuchtungsphase durch Nebel bei 45 °C und einer 3-tägigen Frost-Tau-Wechselphase mit Temperaturen zwischen -20 °C und +20 °C und unter Verwendung einer aufstehenden Taumittelösung. Als Grenzwert wurde 0,5 mm/m nach mindestens sechs Wechselagerungszyklen (18 Wochen) bei der Einwirkung von Taumitteln festgelegt. Bei der Verwendung von Wasser liegt der Grenzwert bei 0,4 mm/m [3].

2.4 Außenlagerung

Um die Grenzwerte für AKR-Prüfverfahren festzusetzen, ist eine langfristige Außenlagerung unerlässlich. Auf dem Dach des Forschungsinstituts werden seit über 30 Jahren Auslagerungsversuche durchgeführt. Diese Außenlagerung gibt gute Hinweise, inwieweit ein Prüfverfahren geeignet ist. Anhand der Außenlagerung wurde festgestellt, dass mit der 40-°C-Nebelkammerlagerung Gesteinskörnungen, die in der Praxis zu Schäden führen, erkannt werden können (40-°C-Nebelkammerlagerung als Gesteinskörnungsprüfung), die 40-°C-Nebelkammerlagerung aber als Performance-Verfahren nicht geeignet ist [13, 15]. Für die Außenlagerung werden zwei Balken (10 cm x 10 cm x 50 cm) und ein Würfel (30 cm) verwendet (Bild 1).

2.5 Untersuchungen von Bauwerken

Neben der gezielten Außenlagerung, die belastbare, detaillierte Erkenntnisse bringt, da die Ausgangsstoffe und die Betonzusammensetzung genau bekannt sind, ist das Verhalten von Bauwerken eine wichtige Quelle für die Beurteilung eines Prüfverfahrens. Als Beispiel werden in Bild 2 verschiedene Lose (Alter zwischen 10 und 14 Jahren – Die geschädigten Lose hatten bei Feststellung der Schäden ein Alter von 10 Jahren) von zwei Autobahnen dargestellt, die alle mit einer reaktiven Gesteinskörnung (Grauwacke aus dem Sauerland), jedoch mit unterschiedlichen Zementen hergestellt wurden. Das Bild enthält den Alkali-Gehalt (Na₂O-Äquivalent) der verschiedenen verwendeten Zemente. Es bestätigt sich, dass

by fog at 45 °C and a 3-day alternating freeze-thaw phase with temperatures between -20 °C and +20 °C while immersed in a de-icing agent solution. The limit value has been set at 0.5 mm/m after at least six storage cycles (18 weeks) with exposure to de-icing agents. The limit value is 0.4 mm/m if water is used [3].

2.4 Outdoor storage

Long-term outdoor storage is essential in order to establish the limit values for ASR test methods. Outdoor storage tests have been carried out on the roof of the Research Institute for over 30 years. This outdoor storage provides a good indication of the suitability of a test method. By using the outdoor storage it was established that aggregates that in practice lead to damage can be detected with the 40 °C fog chamber storage (as an aggregate test) but that the 40 °C fog chamber storage is not suitable as a performance test [13, 15]. Two prisms (10 cm x 10 cm x 50 cm) and one cube (30 cm) are used for the outdoor storage (Fig. 1).

2.5 Examination of structures

In addition to the carefully controlled outdoor storage, which provides dependable, detailed findings because the starting materials and the concrete composition are accurately known, the behaviour of structures is also an important source of information for assessing a test method. As an example, Fig. 2 shows different sections (ages between 10 and 14 years – the damaged sections were 10 years old when the damage was detected) from two concrete roads that were all produced with a reactive aggregate (greywacke from the Sauerland) but with different cements. The diagram shows the alkali contents (Na₂O equivalents) of the different cements used. It confirms that the alkali content stipulated in Germany for pavement cements of, for example, Na₂O equivalent ≤ 0.80 mass % for Portland cements (CEM I) would not lead to damage with this reactive aggregate.

3 Investigations

Different starting materials and concrete compositions were used for comparing different test methods and for the comparison be-



Bild 1: Balken und Würfel im Außenlager des Forschungsinstitutes in Düsseldorf

Figure 1: Prisms and cubes at the outdoor exposure site at the Research Institute in Düsseldorf

der in Deutschland festgelegte Alkaligehalt für Fahrbahndecken- zemente von z.B. Na_2O -Äquivalent $\leq 0,80$ M.-% für Portlandze- mente (CEM I) mit dieser reaktiven Gesteinskörnung nicht zu Schäden führte.

3 Untersuchungen

Für den Vergleich verschiedener Prüfverfahren und den Vergleich zwischen Prüfverfahren und Außenlagerung bzw. dem Verhalten von Bauwerken wurden unterschiedliche Ausgangsstoffe und Betonzusammensetzungen verwendet. Unter anderem wurden folgende grobe Gesteinskörnungen eingesetzt:

- Splitt des Oberrheins
- Grauwacke
- Quarzporphyr
- Kies mit Quarzporphyr
- Rheinkies (Düsseldorf)

Als feine Gesteinskörnung wurde ein Rheinsand (Düsseldorf) verwendet. Als Zemente wurden eingesetzt:

- Portlandzemente mit einem Alkaligehalt zwischen 0,6 und 1,3 M.-% (Na_2O -Äquivalent)
- Portlandkompositzemente CEM II/B-S und CEM II/B-M (S-LL)

Der Zementgehalt der Betone lag zwischen 300 kg/m^3 und 500 kg/m^3 .

Die eingesetzten Prüfverfahren sind in Abschnitt 2 beschrieben.

4 Ergebnisse

4.1 Gesteinskörnungsprüfungen

4.1.1 Schnellprüfung (Mörtelprüfung)

Verschiedene Fraktionen von 16 unterschiedlichen Gesteinskör- nungen wurden mit dem LMPA-Mörtelschnelltest (Messung bei 70°C) und dem DAfStb-Mörtelschnelltest untersucht. Die Dehnungen der Mörtelprismen zum Beurteilungszeitpunkt des je- weiligen Verfahrens sind in den Bildern 3 und 4 zusammengefasst. Aus den Untersuchungen kann zwar keine strenge Korrelation abgeleitet werden, es ergibt sich aber bei beiden Prüfverfahren mit Ausnahme von drei Fällen (s. Bild 3) dieselbe Einstufung hinsichtlich der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnung. Der DAfStb-Mörtelschnelltest ist tendenziell etwas schärfer als der LMPA-Mörtelschnelltest.

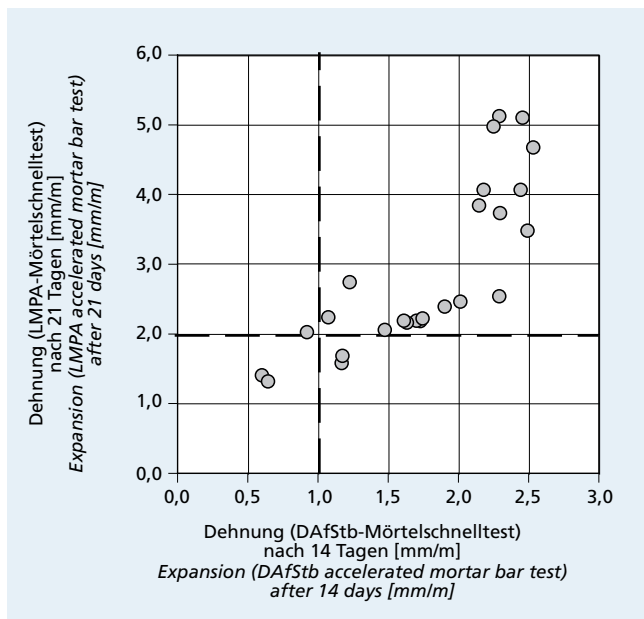


Bild 3: Dehnungen von Mörtelprismen mit verschiedenen Gesteins- körnungen im LMPA- und DAfStb-Mörtelschnelltest
Figure 3: Expansion of mortar bars made with various aggregates in the LMPA and DAfStb accelerated mortar bar tests

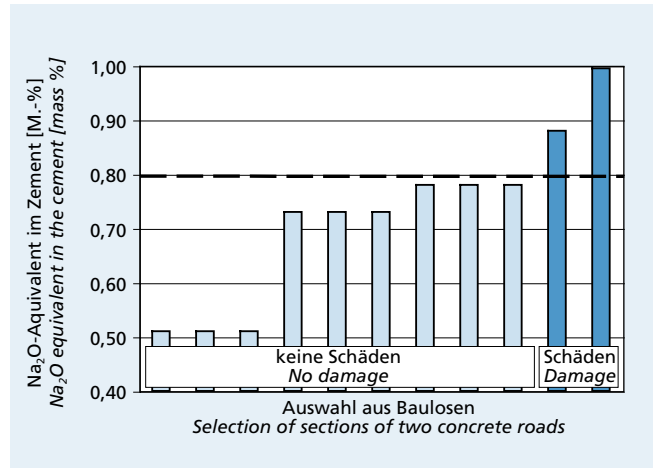


Bild 2: Verschiedene 10 bis 14 Jahre alte Lose von zwei Autobahnen mit und ohne AKR-Schäden. Beginn der Schädigung nach zehn Jahren.

Figure 2: Various 10- to 14-year-old sections of two concrete roads with and without ASR damage. The damage started after ten years.

tween test methods and outdoor storage or the behaviour of struc- tures. The following coarse aggregates, among others, were used:

- crushed Upper Rhine gravel
- greywacke
- rhyolite
- gravel with rhyolite
- Rhine gravel (Düsseldorf)

A Rhine sand (Düsseldorf) was used as the fine aggregate. The ce- ments used were:

- Portland cements with alkali contents between 0.6 and 1.3 mass % (Na_2O equivalent)
- CEM II/B-S and CEM II/B-M (S-LL) Portland composite cements

The cement content of the concrete lay between 300 kg/m^3 and 500 kg/m^3 .

The test methods used are described in Section 2.

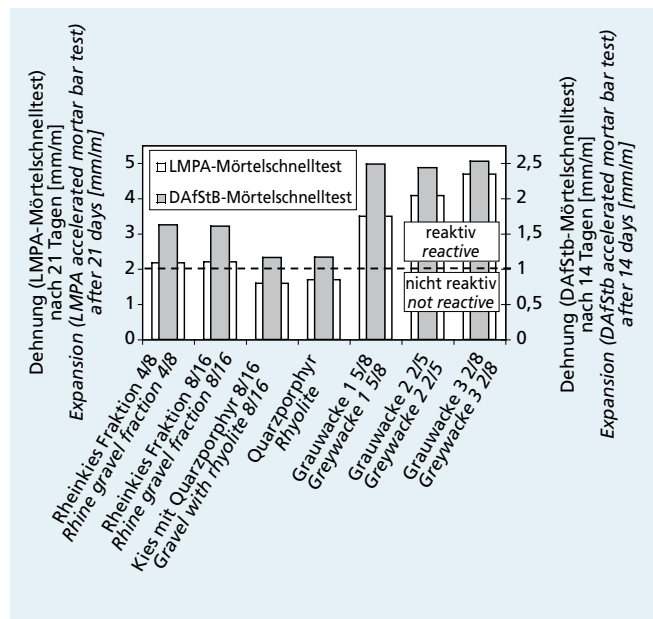


Bild 4: Dehnungen von Mörtelprismen mit einer Auswahl von Ge- steinskörnungen zum Prüfzeitpunkt im LMPA- und DAfStb-Mörtel- schnelltest

Figure 4: Expansion of mortar bar made with a selection of aggre- gates at the time of testing in the LMPA and DAfStb accelerated mortar bar tests

4.1.2 Langzeitprüfung (Betonprüfung)

In Bild 5 sind die Dehnung und die Rissentwicklung von Betonen mit sieben verschiedenen Gesteinskörnungen, die nach Teil 3 der Alkali-Richtlinie in der 40-°C-Nebelkammer geprüft wurden, dargestellt. Drei Gesteinskörnungen sind als reaktiv einzustufen, da die Grenzwerte für die Dehnung und/oder die Rissweite überschritten wurden. Die Pfeile im Bild zeigen, zu welchem Zeitpunkt an einem Würfel Risse mit Rissweiten $\geq 0,2$ mm/m aufgetreten sind.

Fünf der sieben Gesteinskörnungen (Grauwacke 1 und 3 wurden nicht untersucht) wurden mit der gleichen Betonzusammensetzung zusätzlich mit dem 60-°C-Betonversuch geprüft (Bild 6). Er liefert die gleiche Aussage nach drei Monaten hinsichtlich der Alkaliempfindlichkeit wie die 40-°C-Nebelkammerlagerung nach neun Monaten.

Ein Vergleich der Ergebnisse des DAfStb-Mörtelschnelltests (Bild 4) mit denen der Untersuchung in der 40-°C-Nebelkammer (Bild 5) zeigt, dass Gesteinskörnungen, die den Schnelltest mit Dehnungen zwischen 1,0 mm/m und 2,0 mm/m nicht bestehen, dennoch den Betonversuch bestehen können. Der DAfStb-Mörtelschnelltest, der mit zerkleinerten Gesteinskörnungen durchgeführt wird, ist schärfer als die Prüfung der Gesteinskörnung in ihrem Ausgangszustand in einem Betonversuch.

Die Bilder 7 und 8 zeigen die Ergebnisse von Untersuchungen, die im Rahmen des europäischen PARTNER-Projekts [14] mit sechs verschiedenen europäischen Gesteinskörnungen durchgeführt wurden. Die Gesteinskörnungen wurden mit Ausnahme des Zements (CEM I 42,5 R anstelle eines CEM I 32,5 R) gemäß Teil 3 der Alkali-Richtlinie [8] und mit dem RILEM-Verfahren AAR-4 [11] geprüft, auf dessen Grundlage der 60-°C-Betonversuch in Deutschland entwickelt wurde. Obwohl sich die Betonzusammensetzungen zwischen RILEM AAR-4 (Zementgehalt 440 kg/m³, w/z = 0,50) und Alkali-Richtlinie (Zementgehalt 400 kg/m³, w/z = 0,45) geringfügig unterscheiden, liefern beide Verfahren übereinstimmende Beurteilungen der Alkaliempfindlichkeit der Gesteinskörnungen. Beim Versuch mit der 40-°C-Nebelkammerlagerung liegt das Ergebnis der Gesteinskörnung N5 im Grenzbereich. Mit der Methode RILEM AAR-4 wird sie hingegen eindeutig als reaktiv identifiziert.

4.1.3 Außenlager

Die Prüfung der Gesteinskörnung in der 40-°C-Nebelkammer nach Teil 3 (Bild 9a) wurde im Forschungsinstitut der Zement-

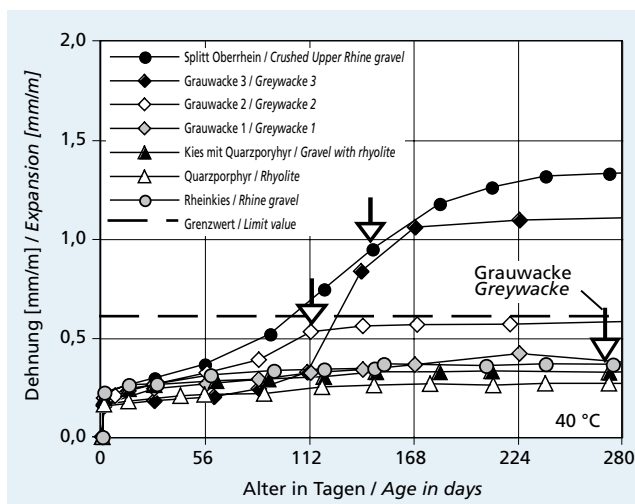


Bild 5: Dehnung und Rissentwicklung $\geq 0,2$ mm (siehe Pfeile) von Betonen mit verschiedenen Gesteinskörnungen in der 40-°C-Nebelkammer, $z = 400$ kg/m³, w/z-Wert = 0,45, CEM I 32,5 R mit Na₂O-Äqu. = 1,3 M.-%

Figure 5: Expansion and crack development ≥ 0.2 mm (see arrows) of concretes made with various aggregates in the 40 °C fog chamber, $c = 400$ kg/m³, w/c ratio = 0.45, CEM I 32,5 R cement with Na₂O equiv. = 1.3 mass %

4 Results

4.1 Aggregate assessment

4.1.1 Accelerated mortar bar test

Various fractions of 16 different aggregates were investigated with the LMPA accelerated mortar bar test (measurement at 70 °C) and the DAfStb accelerated mortar bar test. The expansions of the mortar bars at the assessment times of the respective methods are summarized in Figs. 3 and 4. It is not in fact possible to derive any strict correlation from the investigations but, with the exception of three cases (see Fig. 3), the two test methods led to the same classification with respect to the alkali reactivity of the aggregate. The DAfStb accelerated mortar bar test tended to be somewhat more severe than the LMPA accelerated mortar bar test.

4.1.2 Long-term testing (concrete testing)

The expansion and crack development of concretes made with seven different aggregates that had been tested in the 40 °C fog chamber in accordance with Part 3 of the Alkali Guidelines are shown in Fig. 5. Three aggregates are classified as reactive because the limit values for the expansion and/or the crack width were exceeded. The arrows in the diagram show the times at which cracks with widths ≥ 0.2 mm appeared in a cube.

Five of the seven aggregates (greywackes 1 and 3 were not investigated) were also tested with the 60 °C concrete test using the same concrete composition (Fig. 6). After three months it provided the same information with respect to alkali reactivity as the 40 °C fog chamber storage did after nine months.

A comparison of the results of the DAfStb accelerated mortar bar test (Fig. 4) with those of the investigations in the 40 °C fog chamber (Fig. 5) shows that aggregates which have expansions between 1.0 mm/m and 2.0 mm/m in the accelerated mortar bar test can still pass the concrete prism test. The DAfStb accelerated mortar bar test, which is carried out with comminuted aggregates, is more severe than the test on the aggregate in its original state in a concrete test.

Figs. 7 and 8 show the results of investigations that were carried out as part of the European PARTNER project [14] with six different European aggregates. The aggregates were tested in accordance with Part 3 of the Alkali Guidelines [8], with the exception of the cement (CEM I 42,5 R instead of CEM I 32,5 R), and by the RILEM AAR-4 [11] method, which formed the basis for the development of the 60 °C concrete test in Germany. Although the compositions differ

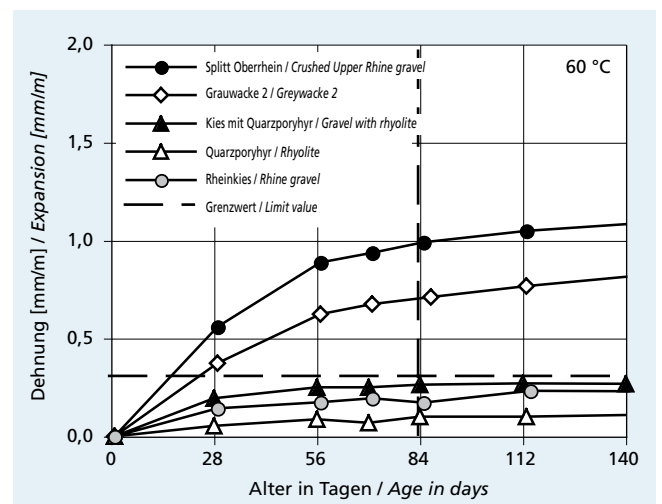


Bild 6: Dehnung von Betonen mit verschiedenen Gesteinskörnungen (ohne Grauwacke 1 und 3) im 60-°C-Betonversuch, $z = 400$ kg/m³, w/z-Wert = 0,45, CEM I 32,5 R mit Na₂O-Äqu. = 1,3 M.-%

Figure 6: Expansion of concretes made with various aggregates (without greywacke 1 and 3) in the 60 °C concrete prism test, $c = 400$ kg/m³, w/c ratio = 0.45, CEM I 32,5 R cement with Na₂O equiv. = 1.3 mass %

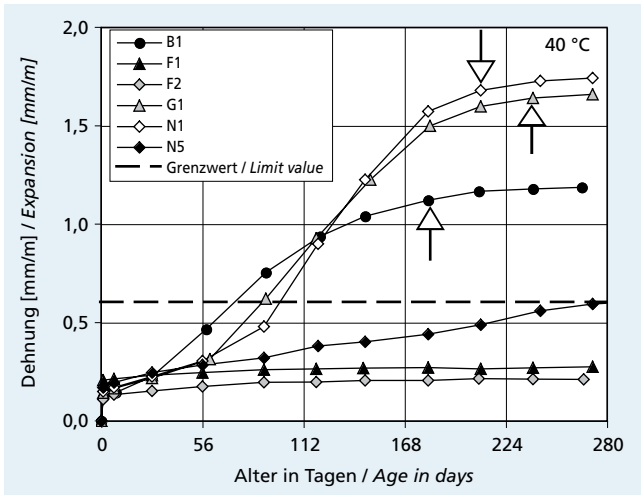


Bild 7: Dehnung (Grenzwert 0,6 mm/m) und Rissentwicklung $\geq 0,2$ mm (siehe Pfeile) von Betonen mit verschiedenen europäischen Gesteinskörnungen in der 40°C-Nebelkammer, $z = 400 \text{ kg/m}^3$, w/z-Wert = 0,45, CEM I 42,5 R mit Na_2O -Äqu. = 1,3 M.-%
Figure 7: Expansion (limit value 0.6 mm/m) and crack development ≥ 0.2 mm (see arrows) of concretes made with various European aggregates in the 40 °C fog chamber, $c = 400 \text{ kg/m}^3$, w/c ratio = 0.45, CEM I 42,5 R cement with Na_2O equiv. = 1.3 mass %

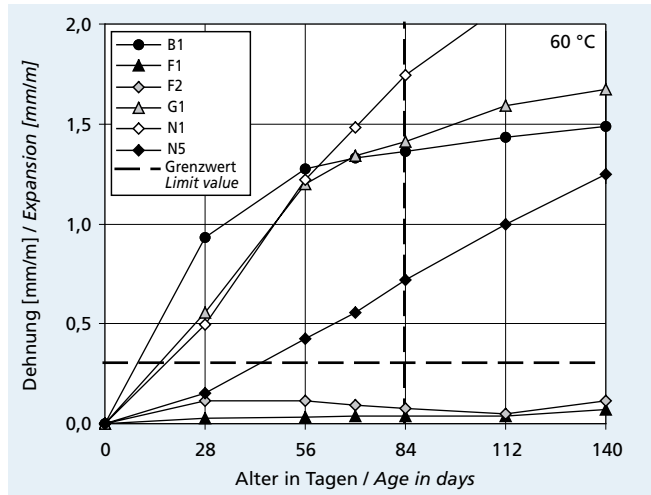


Bild 8: Dehnung (Grenzwert 0,3 mm/m) von Betonen mit verschiedenen europäischen Gesteinskörnungen im 60°C-Betonversuch nach RILEM AAR-4 mit $z = 440 \text{ kg/m}^3$, w/z-Wert = 0,50, CEM I 42,5 R mit Na_2O -Äqu. = 1,3 M.-%
Figure 8: Expansion (limit value 0.3 mm/m) of concretes made with various European aggregates in the RILEM AAR-4 60 °C concrete prism test with $c = 440 \text{ kg/m}^3$, w/c ratio = 0.50, CEM I 42,5 R cement with Na_2O equiv. = 1.3 mass %

industrie mit der Außenlagerung (Bild 9b) von Probekörpern auf dem Dach des Instituts überprüft [15]. Die Gesteinskörnungen wurden bis auf eine Gesteinskörnung durch den 40°C-Nebelkammer-Versuch richtig eingestuft. Nur bei einer Gesteinskörnung – in Bild 9 nicht dargestellt – wurden am Würfel der Außenlagerung nur drei Risse $\geq 0,2$ mm festgestellt, die in der Nebelkammer nicht aufgetreten waren. An Dünnschliffen muss festgestellt werden, ob diese Risse infolge einer schädigenden AKR aufgetreten sind. An Bauwerken, die Betone mit dieser Gesteinskörnung enthielten, sind keinerlei Schäden aufgetreten.

slightly between RILEM AAR-4 (cement content 440 kg/m^3 , w/c = 0.50) and the German Alkali Guidelines (cement content 400 kg/m^3 , w/c = 0.45) the two methods agree in their assessments of the alkali reactivity of the aggregates. In the test with the 40 °C fog chamber storage the result for aggregate N5 is borderline, but with the RILEM AAR-4 method it is clearly identified as reactive.

4.2 Performance-Prüfung

4.2.1 Performance-Prüfung ohne Alkalizufuhr

In Frankreich [10] und der Schweiz [16] wird der 60°C-Betonversuch als Performance-Verfahren angewendet. Umfangreiche

4.1.3 Outdoor storage

The testing of the aggregate in the 40 °C fog chamber as described in Section 3 (Fig. 9a) was checked at the Research Institute of the Cement Industry by outdoor storage (Fig. 9b) of the test specimens on the roof of the Institute [15]. With the exception of one the aggregates were correctly classified by the 40 °C fog chamber test. Only with one aggregate – not shown in Fig. 9 – just three cracks

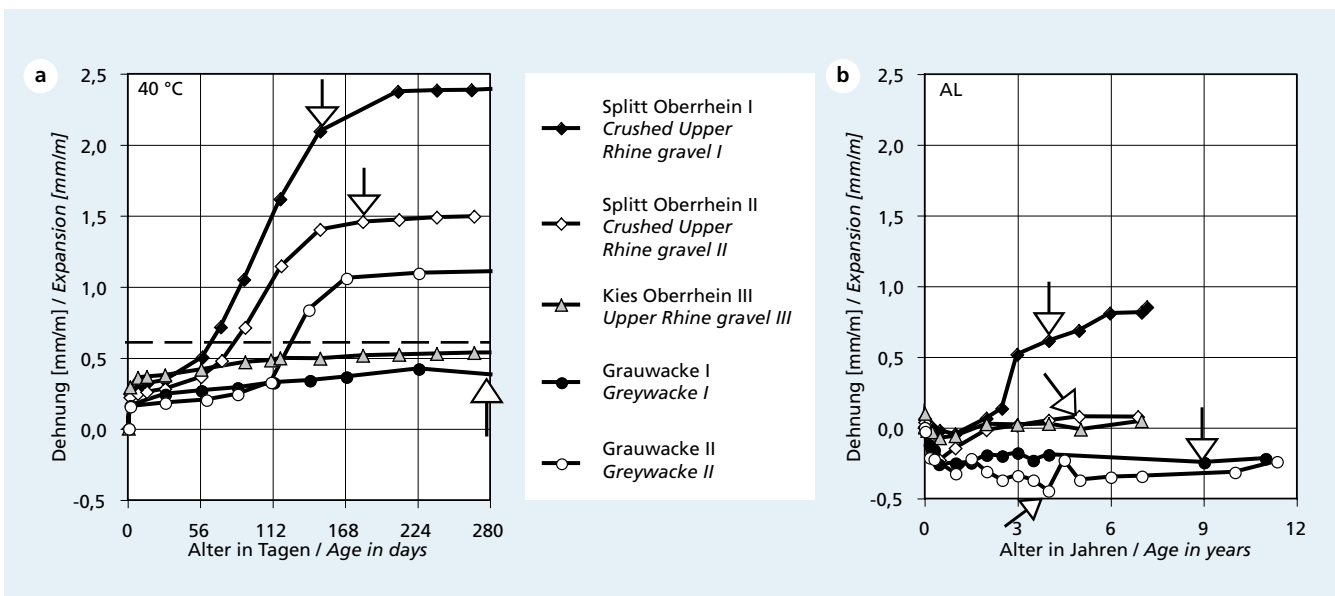


Bild 9: Dehnung (Grenzwert 0,6 mm/m) und Rissentwicklung $\geq 0,2$ mm (siehe Pfeile) von Betonen mit verschiedenen Gesteinskörnungen in der 40°C-Nebelkammer (Bild 9a) und im Außenlager (AL) (Bild 9b), $z = 400 \text{ kg/m}^3$, w/z-Wert = 0,45, CEM I 32,5 R mit Na_2O -Äqu. = 1,3 M.-%
Figure 9: Expansion (limit value 0.6 mm/m) and crack development ≥ 0.2 mm (see arrows) of concretes made with various aggregates in the 40 °C fog chamber (Fig. 9a) and in the outdoor storage (AL) (Fig. 9b), $c = 400 \text{ kg/m}^3$, w/c ratio = 0.45, CEM I 32,5 R cement with Na_2O equiv. = 1.3 mass %

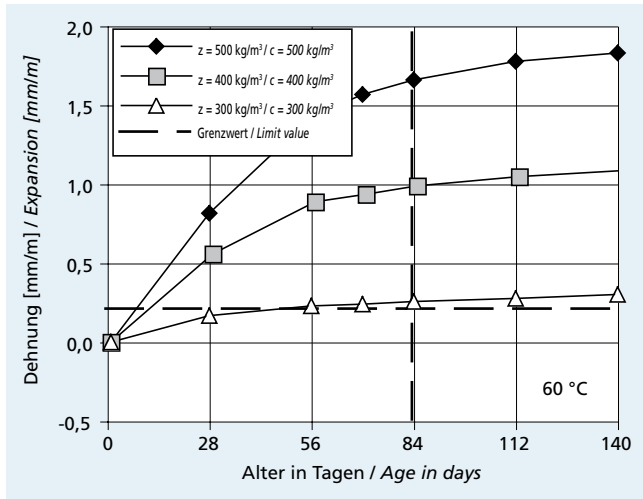


Bild 10: Dehnung von Betonen mit verschiedenen Zementgehalten im 60°C-Betonversuch mit 70 % Splitt Oberrhein, CEM I 32,5 R mit Na_2O -Äqu. = 1,3 M.-%, w/z-Wert = 0,45
Figure 10: Expansion of concretes with different cement contents in the 60 °C concrete prism test with 70% crushed Upper Rhine gravel chippings, CEM I 32,5 R cement with Na_2O equiv. = 1.3 mass %, w/c ratio = 0.45

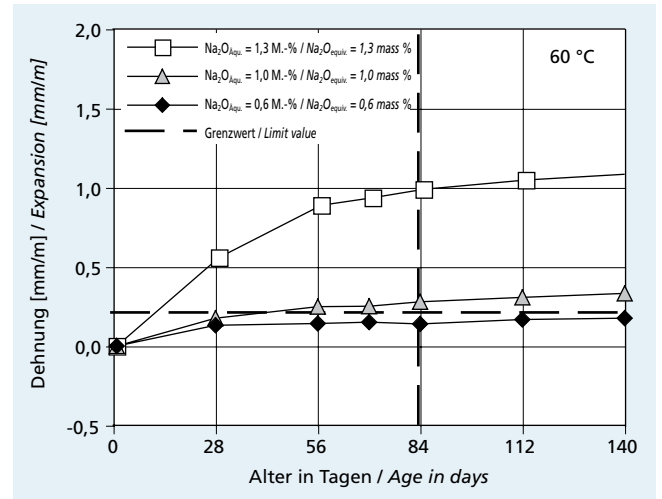


Bild 11: Dehnung von Betonen mit verschiedenen Alkaligehalten (Na_2O -Äqu.) der Portlandzemente im 60°C-Betonversuch mit 70 % Splitt Oberrhein, z = 400 kg/m³, w/z-Wert = 0,45
Figure 11: Expansion of concretes with different alkali contents (Na_2O equiv.) of the Portland cements in the 60 °C concrete prism test with 70 % crushed Upper Rhine gravel, c = 400 kg/m³, w/c ratio = 0.45

Untersuchungen zu diesem Performance-Prüfverfahren zur Beurteilung von Betonzusammensetzungen in Deutschland wurden im Rahmen eines AiF-Forschungsvorhabens durchgeführt. Als Grenzwert wird bisher 0,2 mm/m (gegenüber 0,3 mm/m bei der Gesteinskörnungsprüfung) vorgeschlagen. Bild 10 zeigt die Abhängigkeit der Dehnung eines Betons mit einer reaktiven Gesteinskörnung von dem Zementgehalt.

Auch der Einfluss des wirksamen Alkaligehaltes des verwendeten Zements lässt sich eindeutig aus den Ergebnissen des Prüfverfahrens ableiten. Mit einem NA-Zement bleibt die Dehnung des Betons mit reaktiven Gesteinskörnungen auch bei einem Zementgehalt von 400 kg/m³ unter dem Grenzwert von 0,2 mm/m (Bild 11).

Die Verwendung eines CEM II/B-S bzw. eines CEM II/B-M (S-LL) führte zu ebenso guten Ergebnissen wie der NA-Portlandzement (Bild 12). Die verwendete reaktive Gesteinskörnung – Splitt des Oberrheins – kann mit einem CEM I-NA oder den

≥ 0.2 mm were found in the cube with outdoor storage that did not occur in the fog chamber. Thin sections will have to be used to determine whether these cracks have occurred as the result of a deleterious ASR. No damage has occurred in structures that contain concretes made with this aggregate.

4.2 Performance testing

4.2.1 Performance testing without external supply of alkalis

The 60 °C concrete prism test is used in France [10] and Switzerland [16] as a performance test method. Extensive investigations into this performance test method for assessing concrete compositions have been carried out in Germany as part of an AiF research project. So far a limit value of 0.2 mm/m has been recommended (compared with 0.3 mm/m for the aggregate test). Fig. 10 shows how the expansion of concrete made with a reactive aggregate depends on the cement content.

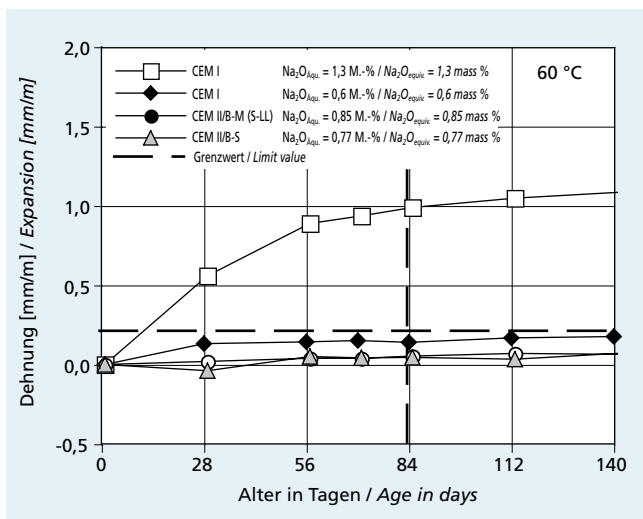


Bild 12: Dehnung von Betonen mit verschiedenen Zementen und mit unterschiedlichen Gesamtalkaligehalten (Na_2O -Äqu.) im 60°C-Betonversuch mit 70 % Splitt Oberrhein, z = 400 kg/m³, w/z-Wert = 0,45
Figure 12: Expansion of concretes made different cements and with different total alkali contents (Na_2O equiv.) in the 60 °C concrete prism test with 70 % crushed Upper Rhine gravel, c = 400 kg/m³, w/c ratio = 0.45

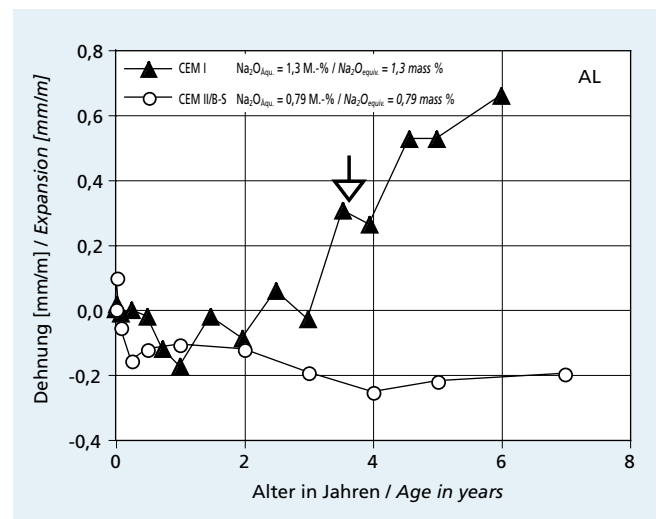


Bild 13: Dehnung und Rissentwicklung ≥ 0,2 mm (siehe Pfeil) von Betonen mit verschiedenen Zementen im Außenlager mit 70 % Splitt Oberrhein. CEM II/B-S 32,5 R: z = 400 kg/m³, w/z-Wert = 0,45. CEM I 32,5 R: z = 500 kg/m³, w/z-Wert = 0,45
Figure 13: Expansion of concretes made different cements in the outdoor exposure site with 70 % crushed Upper Rhine gravel. CEM II/B-S 32,5 R cement: c = 400 kg/m³, w/c ratio = 0.45. CEM I 32,5 R cement: c = 500 kg/m³, w/c ratio = 0.45

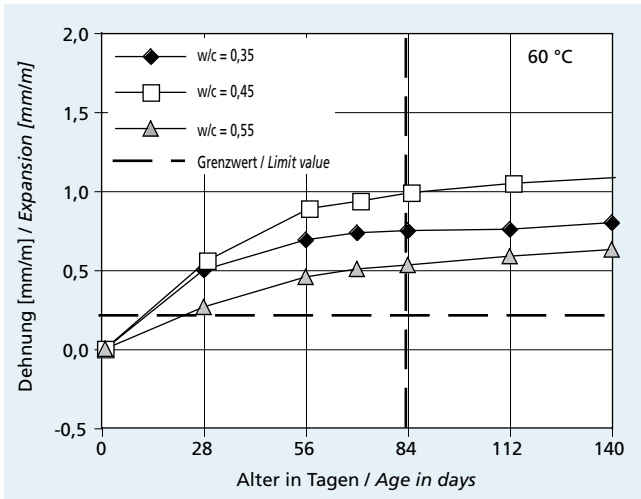


Bild 14: Dehnung von Betonen mit verschiedenen w/z-Werten im 60-°C-Betonversuch mit 70 % Splitt Oberrhein, $z = 400 \text{ kg/m}^3$, CEM I 32,5 R mit Na_2O -Äqu. = 1,3 M.-%
Figure 14: Expansion of concretes with different w/c ratios in the 60 °C concrete prism test with 70 % crushed Upper Rhine gravel, $c = 400 \text{ kg/m}^3$, CEM I 32,5 R cement with Na_2O equiv. = 1.3 mass %

Zementen CEM II/B-S oder CEM II/B-M (S-LL) bedenkenlos z.B. für Beton in feuchter Umgebung eingesetzt werden. Das bestätigen die Ergebnisse eines vergleichbaren Betons, der mit einem CEM II/B-S hergestellt wurde und seit sieben Jahren im Außenlager lagert (Bild 13). Bisher sind keine größeren Dehnungen oder Risse aufgetreten. Der Vergleichsbeton, der ebenfalls mit reaktivem Kies-Edelsplitt vom Oberrhein aber mit 500 kg/m^3 Prüfzement (Na_2O -Äquivalent 1,29 M.-%) hergestellt wurde, zeigt erwartungsgemäß große Dehnungen und Risse $\geq 0,2 \text{ mm}$ im Außenlager.

Auch der Einfluss des w/z-Werts wird durch den 60-°C-Betonversuch wiedergegeben (Bild 14). Mit abnehmendem w/z-Wert steigt die Alkalikonzentration in der Porenlösung an. Gleichzeitig nimmt die Dichte des Zementmörtels zu. Diese beiden gegenläufigen Tendenzen führen dazu, dass bei einem w/z-Wert von 0,45 ein Pessimum auftritt.

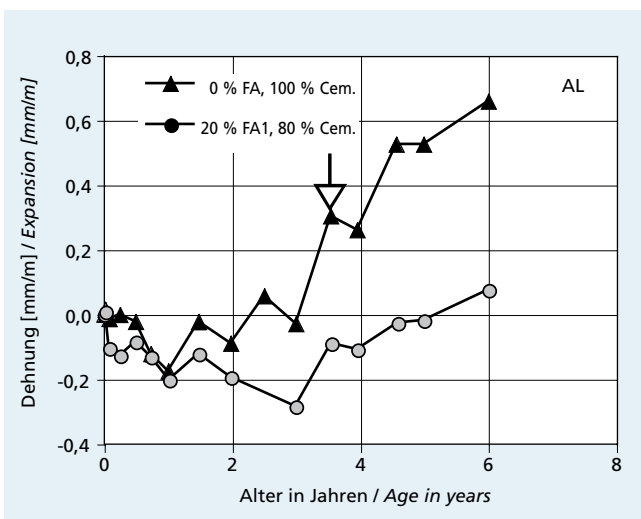


Bild 16: Dehnung und Rissentwicklung $\geq 0,2 \text{ mm}$ (siehe Pfeil) von Betonen mit und ohne Flugasche im Außenlager mit 70 % Splitt Oberrhein, CEM I 32,5 R mit Na_2O -Äqu. = 1,3 M.-%, $w/(z+f) = 0,45$, $z + f = 500 \text{ kg/m}^3$
Figure 16: Expansion of concretes with and without fly ash in the outdoor exposure site with 70 % crushed Upper Rhine gravel, CEM I 32,5 R cement with Na_2O equiv. = 1.3 wt.%, $w/(c+f) = 0.45$, $c + f = 500 \text{ kg/m}^3$

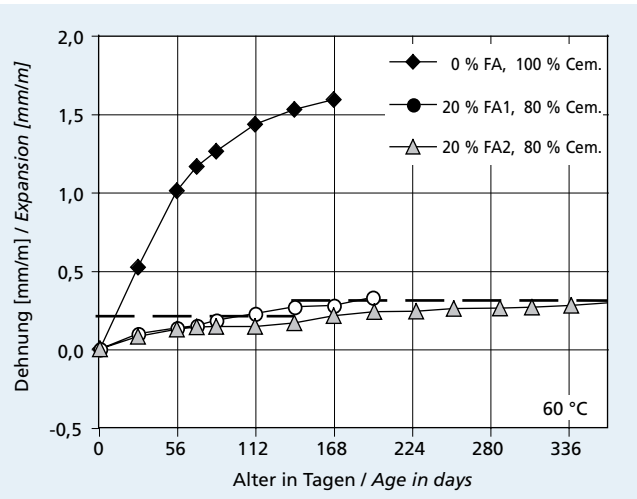


Bild 15: Dehnung von Betonen mit und ohne Flugasche im 60-°C-Betonversuch mit 70 % Splitt Oberrhein, CEM I 32,5 R mit Na_2O -Äqu. = 1,3 M.-%, $w/(z+f) = 0,55$, $z + f = 500 \text{ kg/m}^3$
Figure 15: Expansion of concretes with and without fly ash in the 60 °C concrete prism test with 70 % crushed Upper Rhine gravel, CEM I 32,5 R cement with Na_2O equiv. = 1.3 mass %, $w/(c+f) = 0.55$, $c + f = 500 \text{ kg/m}^3$

The influence of the effective alkali content of the cement used can be deduced clearly from the results of the test method. With a low-alkali cement the expansion of concrete made with reactive aggregates remains below the limit value of 0.2 mm/m (Fig. 11), even for a cement content of 400 kg/m^3 .

The use of a CEM II/B-S or a CEM II/B-M (S-LL) cement led to results that were equally as good as those with the low-alkali Portland cement (Fig. 12). The reactive aggregate used – crushed Upper Rhine gravel – can be used with a CEM I-NA (low alkali) cement or with CEM II/B-S or CEM II/B-M (S-LL) cement, e.g. for concrete in a moist environment, without causing any damage. This is supported by the results with a comparable concrete that had been produced with a CEM II/B-S cement and has been stored at the outdoor exposure site for seven years (Fig. 13). So far no major expansion or cracking has occurred. As expected, the reference concrete, which was also pro-

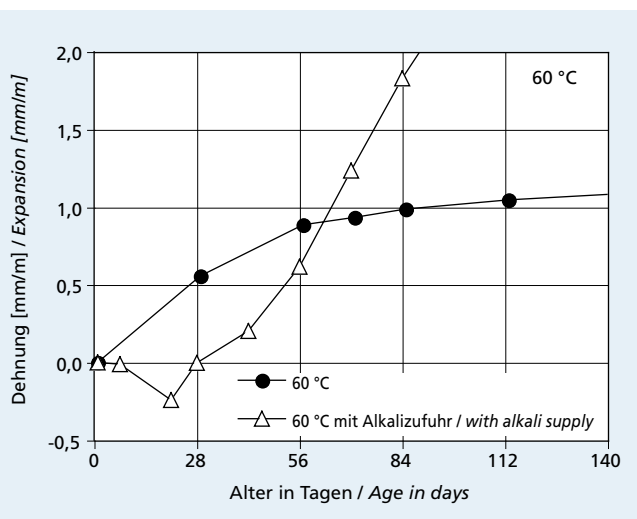


Bild 17: Dehnung eines Betons im 60-°C-Betonversuch (Gesteinskörnungsprüfung) und in der Performance-Prüfung bei 60 °C mit Alkalizufuhr (10 % NaCl-Lösung), 70 % Splitt Oberrhein, $z = 400 \text{ kg/m}^3$, w/z-Wert = 0,45, CEM I 32,5 R mit Na_2O -Äqu. = 1,3 M.-%
Figure 17: Expansion of a concrete in the 60 °C concrete prism test (aggregate test) and the performance test at 60 °C with external supply of alkalis (10 % NaCl solution), 70 % crushed Upper Rhine gravel, $c = 400 \text{ kg/m}^3$, w/c ratio = 0.45, CEM I 32,5 R cement with Na_2O equiv. = 1.3 mass %

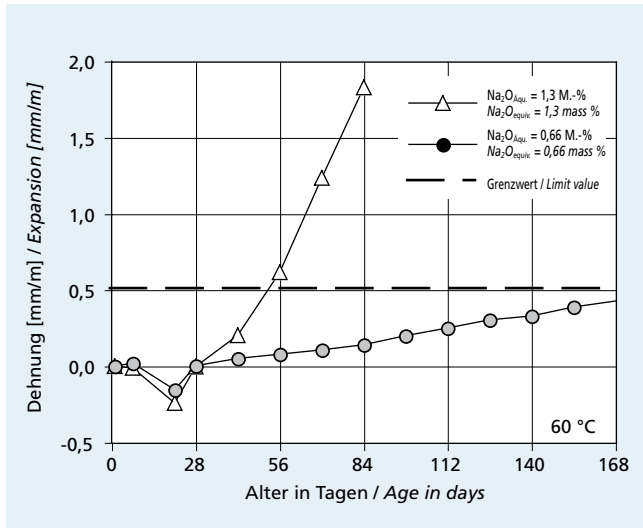


Bild 18: Dehnung von Betonen mit verschiedenen Zementen im 60-°C-Betonversuch (Performance-Prüfung) mit Alkalizufuhr von außen (10 % NaCl-Lösung), 70 % Splitt Oberrhein. Na₂O-Äqu. = 1,3 M.-%: z = 400 kg/m³, w/z-Wert = 0,45. Na₂O-Äqu. = 0,66 M.-%: z = 385 kg/m³, w/z-Wert = 0,42

Figure 18: Expansion of concretes made with different cements in the 60 °C concrete prism test (performance test) with external supply of alkalis (10 % NaCl solution), 70 % crushed Upper Rhine gravel. Na₂O equiv. = 1.3 mass %, c = 400 kg/m³, w/c ratio = 0.45. Na₂O equiv. = 0.66 mass %, c = 385 kg/m³, w/c ratio = 0.42

Inwieweit Betone, die puzzolanische Zusatzstoffe oder Zemente mit puzzolanischen Hauptbestandteilen enthalten, mit diesem Verfahren geprüft werden können, wurde noch nicht hinreichend geklärt. In der Schweiz wird in diesem Fall die Prüfung auf ein Jahr bei gleichzeitiger Anhebung des Grenzwerts auf 0,3 mm/m verlängert [16]. Die Erhöhung des Grenzwerts ist wegen der längeren Prüfdauer und der damit verbundenen höheren Feuchtedehnung erforderlich. Bild 15 zeigt Untersuchungen mit jeweils 20 M.-% der Flugasche FA1 und der Flugasche FA2. Die Flugasche FA1 wies einen Alkaligehalt von 3,1 M.-% Na₂O-Äquivalent und die Flugasche FA2 einen Wert von 1,6 M.-% Na₂O-Äquivalent auf. Beide Flugaschen verminderten die Dehnung infolge einer AKR deutlich, die Flugasche FA2 etwas mehr als die Flugasche FA1. Weitere Untersuchungen werden zeigen, ob der 60-°C-Betonversuch zur Prüfung von Betonen mit Flugasche geeignet ist.

Die Dehnung des Betons mit Flugasche FA2 liegt nach einem Jahr unter dem Grenzwert von 0,3 mm/m und gilt als unbedenklich. Der Beton mit Flugasche FA1 überschreitet jedoch den Grenzwert innerhalb der Prüfdauer und ist als bedenklich einzustufen. Zwischenergebnisse von Versuchen im Außenlager mit zwei Betonen mit einer vergleichbaren Zusammensetzungen belegen die dehnungsvermindernde Wirkung von Flugasche (Bild 16). Ob die Zugabemenge von 20 M.-% Flugasche bei Zement mit einem hohen Alkaligehalt ausreicht, um eine schädigende AKR im Beton mit reaktiven dichten Gesteinskörnungen zu verhindern, kann derzeit noch nicht beantwortet werden. Nach sechs Jahren Außenlagerung deutet sich die Entwicklung einer schädigenden AKR durch einen leichten Anstieg der Dehnung seit dem 4. Jahr an. Möglicherweise wird durch die gewählte Dosierung von Flugasche eine schädigende AKR nur verzögert und nicht verhindert. Die Untersuchungen werden weitergeführt.

4.2.2 Performance-Prüfung mit Alkalizufuhr

Einige AKR-Schäden an Betonfahrbahndecken, die in letzter Zeit in Deutschland aufgetreten sind, lassen vermuten, dass eine Alkalizufuhr von außen eine schädigende AKR ggf. verstärken kann. Dies gilt insbesondere für Kalium- und Natriumacetate bzw. -formate, die auf Flugplätzen als Auftaumittel verwendet werden. Aber auch Natriumchlorid, das auf Betonfahrbahndecken einge-

duziert mit reaktive, double-crushed, Upper Rhine gravel but with 500 kg/m³ of the test cement (Na₂O equivalent of 1.29 mass %), exhibited serious expansion and cracks ≥ 0.2 mm in the outdoor exposure site.

The influence of the w/c ratio is also reflected by the 60 °C concrete test (Fig. 14). The alkali concentration in the pore solution increases with decreasing w/c ratio, while at the same time there is an increase in the density of the cement mortar. These two opposing tendencies produce the worst situation at a w/c ratio of 0.45.

The extent to which concretes that contain pozzolanic additions, or cements with pozzolanic main constituents, can be tested by this method has not yet been adequately clarified. To deal with this situation in Switzerland the test has been extended to a year with a simultaneous increase in the limit value to 0.3 mm/m [16]. The increase in the limit value is necessary because of the longer test duration and the associated higher moisture expansion. Fig. 15 shows investigations with 20 mass % of fly ash FA1 or fly ash FA2. Fly ash FA1 has an alkali content of 3.1 mass % Na₂O equivalent and fly ash FA2 has a value of 1.6 mass % Na₂O equivalent. Both fly ashes significantly reduced the expansion caused by ASR – fly ash FA2 by somewhat more than fly ash FA1. Further investigations will show whether the 60 °C concrete test is suitable for testing concrete made with fly ash.

After one year the expansion of the concrete that contained fly ash FA2 was below the limit value of 0.3 mm/m and was rated as innocuous. The concrete that contained fly ash FA1, however, exceeded the limit value within the test period and was rated as critical. Interim results from tests in the outdoor exposure site with two concretes with comparable compositions confirm the expansion reducing effect of fly ash (Fig. 16). It is not yet known whether the substitution of 20 mass % of cement by fly ash is sufficient to prevent a deleterious ASR in concrete made with reactive, dense, aggregates and cement with a high alkali content. After six years of outdoor storage the development of a deleterious ASR is indicated by a slight increase in expansion since the 4th year. The chosen dosage for the fly ash has possibly only delayed a deleterious ASR, and not prevented it. The investigations are being continued.

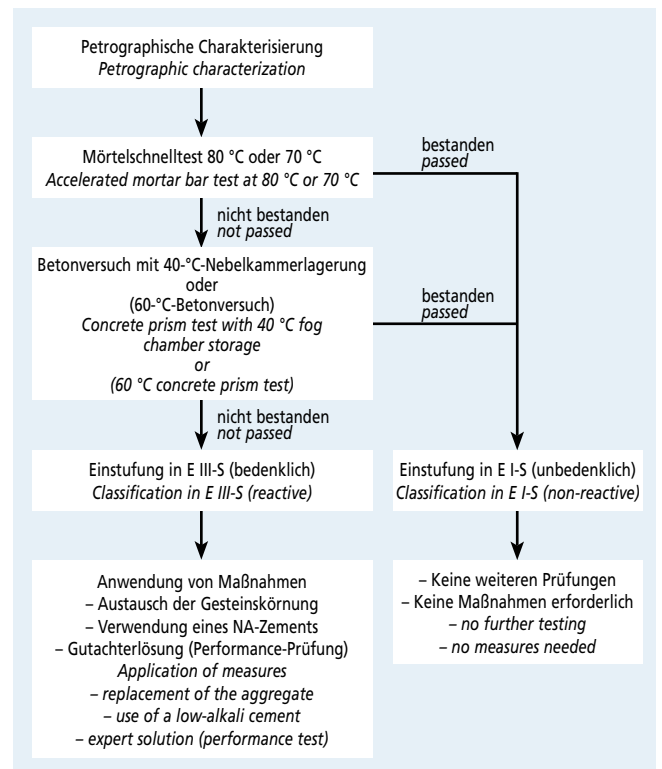


Bild 19: Ablaufschema der Gesteinskörnungsprüfung nach Teil 3 des Entwurfes der Alkali-Richtlinie [1]
Figure 19: Flow chart for the aggregate test described in Part 3 of the draft of the German Alkali Guidelines [1]

setzt wird, verstärkt die schädigende AKR. Welches Ausmaß dies hat, ist bisher nicht hinreichend bekannt und wird zzt. untersucht.

Der Grenzwert für die Performance-Prüfung mit Alkalizufuhr von außen wurde zunächst anhand von Praxiserfahrungen auf 0,5 mm/m festgelegt. Bild 17 zeigt Ergebnisse einer normalen 60-°C-Lagerung (nur über Wasser) und eine Wechsellagerung mit Alkalizufuhr (NaCl). Die Probe der Wechsellagerung mit Alkalizufuhr (s. Tafel 1) zeigte deutlich größere Dehnungen als die der normalen Lagerung bei 60 °C. Die Versuche zeigen außerdem, dass diese Kombination aus einer reaktiven Gesteinskörnung (Reaktivität im mittleren Bereich) und einem Straßenbauzement für Betonfahrbahndecken eingesetzt werden kann (Bild 18). Auf Betone für Flugplätze, die mit anderen Aufbaumitteln behandelt werden (Natrium- und Kaliumacetate bzw. -formiate) können diese Untersuchungen jedoch nicht übertragen werden.

5 Konzept für die Prüfung

5.1 Gesteinskörnungsprüfung

Bild 19 zeigt das Konzept der Gesteinskörnungsprüfung gemäß Teil 3 des Entwurfs der Alkali-Richtlinie [1]. Im Einzelnen sollten folgende Punkte berücksichtigt werden:

Nach der petrographischen Untersuchung der Gesteinskörnung wird im Rahmen einer Erstprüfung an drei Proben je Lieferkörnung ein Schnelltest durchgeführt. Bei gebrochenen Festgesteinen ist die Prüfung der Lieferfraktion 8/16 mm ausreichend. Bei gebrochenem Kies werden die Körnungen 2/8 und 8/16 gemeinsam geprüft, indem ein Gemisch aus beiden Körnungen gemeinsam gebrochen wird. Die Proben sind hierfür vom Prüfinstitut oder vom Fremdüberwacher im Abstand von etwa vier Wochen zu entnehmen.

Wird der Schnelltest bestanden, sind keine weiteren Prüfungen und keinerlei Maßnahmen erforderlich. Wird der Schnelltest nicht

4.2.2 Performance testing with external supply of alkalis

Some cases of ASR damage in concrete pavements that have occurred recently in Germany indicate that external supply of alkalis may intensify a deleterious ASR. This is particularly true of the potassium and sodium acetates and formates that are used as de-icing agents on airfields, but sodium chloride, which is used on concrete pavements, also intensifies the deleterious ASR. The extent to which this occurs is not yet sufficiently understood and is currently being investigated.

The limit value for the performance test with external supply of alkalis was initially set at 0.5 mm/m on the basis of practical experience. Fig. 17 shows results from 60 °C concrete prism test with and without external supply of alkalis (NaCl). The prisms in the 60 °C concrete prism with external supply of alkalis (see Table 1) exhibited significantly greater expansions than the conventionally stored prisms at 60 °C. The tests also showed that this combination of a reactive aggregate (reactivity in the middle range) and a cement for road paving can be used for concrete pavements (Fig. 18). However, these investigations are not applicable to concretes for airfields that are treated with different de-icing agents (sodium and potassium acetates or formates).

5 Testing strategy

5.1 Aggregate assessment

Fig. 19 shows the strategy for aggregate testing as described in Part 3 of the draft of the German Alkali Guidelines [1]. The specific points that should be taken into account are described below.

After the petrographic investigation of the aggregate an accelerated mortar bar test is carried out as part of an initial test on three samples per aggregate. For crushed rock it is sufficient to test the 8/16 mm fraction. For crushed gravel the 2/8 and 8/16 fractions are tested together by crushing a mixture of the two fractions. The

Tafel 2: Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion im Beton bei Verwendung von Gesteinskörnungen nach Teil 3 des Entwurfs der Alkali-Richtlinie [1]

Table 2: Measures to prevent deleterious ASR in concrete when using aggregates described in Part 3 of the draft of the German Alkali Guidelines [1]

Alkaliempfindlichkeitsklasse Reactivity class	Zementgehalt Cement content [kg/m ³]	Erforderliche Maßnahmen für die Feuchtigkeitsklasse Measures required for moisture class			
		WO ⁵⁾	WF ⁶⁾	WA ⁷⁾	WS ⁸⁾
E I-S	ohne Festlegung Not stipulated	Keine/none	Keine/none	Keine/none	Fahrbahndeckenzemente ⁴⁾ Cements for road paving ⁴⁾
E III-S ¹⁾	$z \leq 300$ $c \leq 300$	Keine/none	Keine/none	Keine/none	Fahrbahndeckenzemente ⁴⁾ Cements for road paving ⁴⁾
	$300 < z \leq 350$ $300 < c \leq 350$	Keine/none	Keine/none	Performance Prüfung ²⁾ oder NA-Zement Performance test ²⁾ or low-alkali cement	Fahrbahndeckenzemente ⁴⁾ sowie Austausch der Gesteinskörnung oder Gutachten ³⁾ Cements for road paving ⁴⁾ and replacement of the aggregate or expert report ³⁾
	$z > 350$ $c > 350$	Keine/none	Performance Prüfung ²⁾ oder NA-Zement Performance test ²⁾ or low-alkali cement	Performance Prüfung ²⁾ oder Austausch der Gesteinskörnung Performance test ²⁾ or replacement of the aggregate	Fahrbahndeckenzemente ⁴⁾ sowie Austausch der Gesteinskörnung oder Gutachten ³⁾ Cements for road paving ⁴⁾ and replacement of the aggregate or expert report ³⁾

¹⁾ Gilt auch für nicht beurteilte Gesteinskörnungen/also applies for aggregates that have not been assessed.

²⁾ Die Performance-Prüfung wird in einem zukünftigen Teil 4 der Richtlinie beschrieben werden. Bis auf Weiteres erfolgt die Festlegung von vorbeugenden Maßnahmen auf Grundlage eines Gutachtens./The performance testing will be described in a future Part 4 of the German Alkali Guidelines. Until further notice the stipulation of preventive measures will be based on an expert report.

³⁾ Für die Erstellung von Gutachten sind sachkundige Fachgutachter einzuschalten/Experienced technical experts must be called in for issuing expert reports.

⁴⁾ siehe [1]/see [1]

⁵⁾ trocken/dry

⁶⁾ feucht/humid

⁷⁾ feucht + Alkalizufuhr von außen/humid + external supply of alkalis

⁸⁾ feucht + Alkalizufuhr von außen + starke dynamische Beanspruchung/humid + external supply of alkalis + high dynamic loads

bestanden, ist ein Betonversuch anzuschließen. Führt dieser Betonversuch zu einem positiven Ergebnis, sind wiederum keine weiteren Prüfungen oder Maßnahmen erforderlich, auch nicht bei einer Alkalizufuhr von außen. Wird der Betonversuch nicht bestanden, sind folgende Maßnahmen zu ergreifen (Tafel 2):

Wird kein Gutachter eingeschaltet und keine Performance-Prüfung durchgeführt so gilt die generelle Regelung: Bei Betonen, die einer feuchten Umgebung mit einer Alkalizufuhr von außen ausgesetzt sind, muss die Gesteinskörnung ausgetauscht werden. Ist der Beton einer feuchten Umgebung ohne Alkalizufuhr von außen ausgesetzt, kann die Gesteinskörnung zusammen mit einem NA-Zement im Beton eingesetzt werden. Da durch diese Maßnahmen eine Reihe von Gesteinskörnungen oder Zementen in einigen Gebieten nicht eingesetzt werden können, ist es zweckmäßig, speziell die zu verwendende Betonzusammensetzung durch ein Gutachten anhand einer Performance-Prüfung beurteilen zu lassen.

5.2 Performance-Prüfung

Das Performance-Prüfung ist mit dem für das Bauwerk vorgesehenen Beton durchzuführen. Zur Sicherheit ist bei dem Performance-Verfahren ein um 5 % bis 10 % erhöhter Zementgehalt zu verwenden. Da Performance-Verfahren verhältnismäßig aufwendig sind, kann es zweckmäßig sein, die Gesteinskörnung mit dem Schnellprüfverfahren zu überwachen. Ändern sich das Ergebnis des Schnellprüfverfahrens und die Zusammensetzung der Gesteinskörnung nicht wesentlich und wird ein Zement mit einem Alkaligehalt verwendet, der in etwa dem im Performance-Verfahren eingesetzten entspricht (d.h. dessen Na_2O -Äquivalent nicht mehr als 0,05 M.-% höher ist), so kann der Beton eingesetzt werden.

6 Zusammenfassung

Mit AKR-Prüfverfahren muss innerhalb von zwei bis sechs Monaten eine Aussage getroffen werden können, ob ein Beton auch langfristig keine schädigende AKR aufweist. Da diese Schäden zum Teil erst nach zehn bis 30 Jahren auftreten, ist es dringend erforderlich, dass Grenzwerte für die Prüfverfahren an Außenlagerungen und an Untersuchungen von Bauwerken kalibriert werden. Hierfür stehen im Forschungsinstitut der Zementindustrie Ergebnisse langjähriger Auslagerungsversuche ohne Alkalizufuhr von außen und von Untersuchungen an Bauwerken zur Verfügung.

Die Prüfungen werden unterteilt in Gesteinskörnungsprüfungen, mit denen die Reaktivität der Gesteinskörnungen generell festgestellt wird, und in Performance-Prüfungen, bei denen die Eignung des Betons für eine bestimmte Anwendung überprüft wird.

In Deutschland steht für dichte Gesteinskörnungen das 40-°C-Nebelkammerverfahren zur Verfügung, mit dem eine sichere Einstufung der Gesteinskörnung möglich ist. Das Verfahren dauert jedoch lange und sollte daher in den nächsten Jahren durch den 60-°C-Betonversuch ersetzt werden.

Schon jetzt ermöglichen Schnellprüfverfahren eine kurzfristige Einstufung der Gesteinskörnung. Die Verfahren sind sehr scharf und liegen deutlich auf der sicheren Seite. Bei Bestehen der Prüfung kann die Gesteinskörnung als alkaliunempfindlich eingestuft werden. Bei Nichtbestehen können Betonversuche zur Klärung der Empfindlichkeit der Gesteinskörnung angeschlossen werden. Darüber hinaus können die Schnellprüfverfahren zur Überwachung von Gesteinskörnungen eingesetzt werden.

Performance-Prüfungen können mit dem 60-°C-Betonversuch sowohl ohne als auch mit Alkalizufuhr von außen durchgeführt werden. Grenzwerte werden anhand der im Forschungsinstitut der Zementindustrie vorliegenden Praxiserfahrungen festgelegt.

Die Untersuchungen wurden überwiegend aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) gefördert (AiF-FV-Nr.: 14013 N).

samples have to be taken by the testing institute or by the third-party inspector at intervals of about four weeks.

If the accelerated mortar bar test is passed then no further tests or measures are necessary. If the accelerated mortar bar test is not passed then a concrete test should be carried out. If this concrete test leads to a positive result then again no further tests or measures are necessary, not even if there is external supply of alkalis. If the concrete test is not passed then it is necessary to take the measures described below (Table 2).

If no expert is engaged and no performance test is carried out then the following general rule applies: for concretes that are exposed to a moist environment with external supply of alkalis the aggregate must be replaced. If the concrete is exposed to a moist environment without external supply of alkalis then the aggregate can be used in the concrete in combination with a low-alkali cement. These measures mean that a number of aggregates or cements cannot be used in specific areas so it is advisable to have the concrete composition to be used specially assessed by an expert report using a performance test.

5.2 Performance test

The performance test should be carried out with the concrete intended for the structure. For safety the cement content should be increased by 5 % to 10 % for the performance test. The performance test is relatively expensive so it can be advisable to use the accelerated test method to monitor the aggregate. If the results of the accelerated test method and the composition of the aggregate do not change substantially and if a cement is used with an alkali content that corresponds approximately to that used in the performance test (i.e. its Na_2O equivalent is not more than 0.05 mass % higher) then the concrete can be used.

6 Summary

ASR test methods must provide information within two to six months as to whether any deleterious ASR will occur in a concrete, including in the long term. In some cases this damage only appears after 10 to 30 years so it is absolutely essential that the limit values for the test methods are calibrated against outdoor exposure tests and investigations carried out on structures. The Research Institute of the Cement Industry has results from long-term outdoor exposure tests without external supply of alkalis and from the examination of structures.

The investigations are subdivided into tests on aggregates, in which the reactivity of the aggregates is determined, and performance tests that assess the suitability of the concrete for a specific application.

The 40 °C fog chamber method, with which the aggregate can be classified reliably, is available in Germany for dense aggregates. However, the method takes a long time and is therefore to be replaced in the next years by the 60 °C concrete prism test.

Accelerated test methods already enable a short-term classification of aggregates. The methods are very severe and lie significantly on the safe side. If the aggregate passes the test it can be classified as non-reactive to alkalis. If the test is not passed then it can be followed by concrete tests to clarify the reactivity of the aggregate. The accelerated test methods can also be used for monitoring aggregates.

With the 60 °C concrete test it is possible to carry out performance tests with and without external supply of alkalis. Limit values are stipulated on the basis of the practical experience available at the Research Institute of the Cement Industry.

The investigations were predominantly funded by the BMWi (Federal Ministry for Commerce and Technology) through the AiF (the "Otto von Guericke" Federation of Industrial Research Associations) (AiF FV No.: 14013 N).

Literatur / Literature

- [1] Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Draft, Beuth Verlag, Berlin 2007.
- [2] Stark, J.: Beurteilung der Alkali-Reaktivität von Gesteins-körnungen und AKR-Performance-Prüfung Beton. Presentation at the 16. Internationale Baustofftagung ibausil, Weimar 2006.
- [3] Stark, J.; Seyfarth, K.; Giebson, C.: Beurteilung der -Alkali-Reaktivität von Gesteinskörnungen und AKR-Performance-Prüfung Beton. 16. Internationale Baustofftagung ibausil, Tagungsband 2, Weimar 2006, pp. 399–426.
- [4] Franke, L.; Witt, S.: Schnelltest auf Alkali-reaktion: Übertragbarkeit eines international anerkannten Schnelltests auf deutsche Verhältnisse. Betonwerk und Fertigteil-Technik 70 (2004) No. 5, pp. 14–21.
- [5] Oberholster, R. E.; Davies, G.: An accelerated method for testing the potential alkali reactivity of siliceous aggregates. Cement and Concrete Research 16 (1986) No. 2, pp. 181–189.
- [6] RILEM Recommended Test Method AAR-2 (formerly TC 106-2), Detection of Potential Alkali-Reactivity of Aggregates – The Ultra-accelerated Mortar-bar Test. Materials and Structures 33 (2000) 229, pp. 283–289.
- [7] Philipp, O.; Eifert, K.: Bestimmung der Alkali-reaktivität von Kies und Splitten für die Betonherstellung: Praxis-orientiertes beschleunigtes Verfahren. Betonwerk und Fertigteil-Technik 70 (2004) No. 10, pp. 6–19.
- [8] Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkali-reaktion im Beton (Alkali-Richtlinie). Deutscher Ausschuss für Stahlbeton, Beuth Verlag, -Berlin 2001.
- [9] RILEM Recommended Test Method AAR-3 (formerly TC 106-3), Detection of Potential Alkali-Reactivity of Aggregates – Method for Aggregate Combinations Using Concrete Prisms. Materials and Structures 33 (2000) 229, pp. 290–293.
- [10] Standard NF P-18-454 May 2004. Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction (essai de performance).
- [11] RILEM Recommended Test Method: AAR-4.1 : Detection of potential alkali-reactivity – 60 °C accelerated method for testing aggregate combinations using -concrete prisms. RILEM TC191-ARP (Ed.), Bagnaux 2006.
- [12] Standard ND P 18-456 November 2004. Béton – Réactivité d'une formule de béton vis-à-vis de l'alcali-réaction (Critères d'interprétation des résultats de l'essai de performance).
- [13] Siebel, E.; Sylla, H.-M.; Bokern, J.: Einfluss von puzzolanischen Betonzusatzstoffen auf die Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion. 14. Internationale Baustofftagung ibausil, Tagungsband 1, Weimar 2000, pp. 959–967.
- [14] Jensen, J. C.; Bokern, J.; Nixon, P.: The “partner” project: “European standard tests to prevent alkali reactions in aggregates”, EU-project: GRD1-CT-2001-40103. 15. Internationale Baustofftagung ibausil, Tagungsband 2, Weimar 2003, pp. 1083–1090.
- [15] Bokern, J.: Betonprüfungen zur Beurteilung einer AKR: Auswirkung der Prüfbedingungen auf die Voraussetzungen für eine AKR und die Übertragbarkeit der Prüfergebnisse. Dissertation (in preparation).
- [16] Alkali-Aggregat-Reaktion (AAR) in der Schweiz: Stand des Wissens, Neue experimentelle Erkenntnisse, Empfehlungen für Neubauten. Verband der Schweizerischen Zementindustrie (Cemuisse), Bern 2005.