

Entwicklung neuer NA-Zemente auf Basis von Zementen mit Hüttensand als Hauptbestandteil

Development of new low alkali cements based on cements with granulated blastfurnace slag as main constituent

Übersicht

Die Herstellung von Portlandzementen mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt (NA-Zement) ist in einigen Bereichen Deutschlands zum Teil nur unter erheblichem technischen und wirtschaftlich kaum vertretbarem Aufwand möglich.

Um neben den bislang in DIN 1164 genormten hüttensandreichen NA-Zementen auch weitere Zemente mit gleich niedrigem wirksamen Alkaligehalt anbieten zu können, wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie umfangreiche Untersuchungen durchgeführt, um die Palette der NA-Zemente auf Zemente mit Hüttensandgehalten von 21 M.-% bis 49 M.-%, d.h. CEM II/B-S- und CEM III/A-Zemente, auszudehnen. Die Untersuchungen wurden mit einer sehr alkaliempfindlichen Gesteinskörnung aus Norddeutschland durchgeführt, die Opalsandstein und Flint enthielt. Es wurden Betone mit 22 unterschiedlichen CEM II/B-S- und 9 unterschiedlichen CEM III/A-Zementen hergestellt, in eine 40 °C Nebelkammer eingelagert und anhand der Dehnung von Balken sowie der Rissbildung an 30-cm-Würfeln beurteilt. Es stellte sich heraus, dass CEM II/B-S-Zemente mit einem maximalen Gesamtalkaligehalt von 0,70 M.-% Na₂O-Äquivalent und CEM III/A-Zemente mit einem Gesamtalkaligehalt von 0,95 M.-% Na₂O-Äquivalent und einem Hüttensandgehalt von 36 M.-% bis 49 M.-% zur Vermeidung einer schädigenden Alkali-Kieselsäure-Reaktion auch mit sehr alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen verwendet werden können. Diese Zemente wurden als NA-Zemente in die DIN 1164 aufgenommen.

Abstract

In some parts of Germany the manufacture of Portland cements with low effective alkali content (low-alkali cement) is not really technically or economically justifiable.

Comprehensive investigations were carried out at the Research Institute of the Cement Industry in order to extend the range of low-alkali cements to include cements with blastfurnace slag contents of 21 wt.-% to 49 wt.-%, i.e. CEM II/B-S and CEM III/A cements. This allowed other cements with equally low effective alkali contents to be offered alongside the slag-rich low-alkali cements already standardized in DIN 1164. The investigations were carried out with a very alkali-sensitive aggregate from northern Germany which contained opaline sandstone and flint. Concretes were produced with 22 different CEM II/B-S and 9 different CEM III/A cements. They were stored in a fog chamber at 40 °C and assessed on the basis of the expansion of beams and the cracking in 30 cm cubes. It emerged that CEM II/B-S cements with a maximum total alkali content of 0,70 wt.-% Na₂O-equivalent and CEM III/A cements with a total alkali content of 0,95 wt.-% Na₂O-equivalent and a blastfurnace slag content of 36 wt.-% to 49 wt.-% can be used to avoid harmful alkali-silica reactions even with very alkali-sensitive aggregates. These cements have been accepted as low-alkali cements in DIN 1164.

1 Einleitung

Bei einer Alkali-Kieselsäure-Reaktion (AKR) reagieren alkaliempfindliche, kieselsäurehaltige Bestandteile der Gesteinskörnungen mit den Alkalien der Porenlösung im Zementstein. Diese Reaktion läuft in vielen Betonen ohne eine Schädigung ab. Unter bestimmten ungünstigen Voraussetzungen wie z.B. hoher Feuchte und hohem Alkaligehalt führt sie jedoch zu einer Rissbildung im Beton, die die Dauerhaftigkeit von Betonbauwerken vermindern kann. Das Ausmaß und der Ablauf der Reaktion hängen in erster Linie von der Menge, Porosität und Korngröße der alkaliempfindlichen Bestandteile, dem Alkaligehalt in der Porenlösung und dem Feuchteangebot im Beton ab [1, 2, 3, 4].

Maßnahmen zur Vermeidung solcher Schäden sind in der Alkali-Richtlinie [5] des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton (DAfStb) in Abhängigkeit verschiedener Faktoren festgelegt. Unter anderem kann danach die Verwendung von Zementen mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt (NA-Zemente) notwendig sein. Folgende Zemente waren in der DIN 1164-1:1994-10 als NA-Zemente genormt:

- alle Zemente mit einem Gesamtalkaligehalt $\leq 0,60$ M.-% Na₂O-Äquivalent ($\text{Na}_2\text{O} + 0,658 \text{ K}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O}$ -Äquivalent),

1 Introduction

In an alkali-silica reaction the alkali-sensitive constituents of aggregates which contain silica react with the alkalis in the pore solution in the hardened cement paste. This reaction takes place in many concretes without causing any damage. However, under certain unfavourable conditions, such as high moisture and high alkali content, it leads to cracking in the concrete which can reduce the durability of concrete structures. The extent and the course of the reaction depend primarily on the quantity, porosity and particle size of the alkali-sensitive constituents, the alkali content of the pore solution and the amount of available moisture in the concrete [1, 2, 3, 4].

Measures for avoiding such damage are laid down in the Alkali Guideline [5] issued by the DAfStb (German Committee for Reinforced Concrete) as a function of various factors. According to this it may, among other things, be necessary to use cements with low effective alkali content (low-alkali cements). The following cements were standardized in DIN 1164-1:1994-10 as low-alkali cements:

- all cements with a total alkali content ≤ 0.60 wt.-% Na₂O equivalent ($\text{Na}_2\text{O} + 0.658 \text{ K}_2\text{O} = \text{Na}_2\text{O}$ equivalent),

- CEM III/A-Zemente mit einem Hüttensandgehalt ≥ 50 M.-% und einem Gesamtalkaligehalt $\leq 1,10$ M.-% Na_2O -Äquivalent sowie
- CEM III/B-Zemente mit einem Gesamtalkaligehalt $\leq 2,00$ M.-% Na_2O -Äquivalent.

Bedingt durch die in Deutschland vorhandenen Rohstoffe zur Zementherstellung enthalten Portlandzemente mit wenigen Ausnahmen Alkaligehalte, die oberhalb der für NA-Zemente vorgeschriebenen Grenze liegen. Maßnahmen zur Verminderung des Alkaligehalts während der Zementherstellung sind zum Teil nur unter erheblichem technischen und kaum vertretbarem wirtschaftlichen Aufwand möglich. Zudem ist es für eine Reihe von Baumaßnahmen vorteilhaft, neben den hüttensandreichen NA-Zementen auch andere Zemente mit vergleichbar niedrigem wirksamen Alkaligehalt einsetzen zu können. Daher war es erforderlich, weitere NA-Zemente zur Vermeidung einer schädigenden AKR zu finden und auf ihre Wirksamkeit hin zu überprüfen.

Auf Grund der bisherigen Erfahrungen und Untersuchungen mit hüttensandhaltigen Zementen in Deutschland [6] und neueren Versuchsergebnissen [7] war anzunehmen, dass auch Zemente mit Hüttensandgehalten < 50 M.-% und begrenztem Alkaligehalt zur Vermeidung einer schädigenden AKR verwendet werden können. Daher wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm mit dem Ziel durchgeführt, die Palette der in DIN 1164-1:1994-10 aufgeführten NA-Zemente um CEM II/B-S- und CEM III/A-Zemente mit Hüttensandgehalten < 50 M.-% zu erweitern.

2 Stand der Technik

Veranlasst durch Schäden in Norddeutschland, die auf die Verwendung des sehr alkaliempfindlichen Kiessandes mit Opalsandstein und Flint aus diesem Gebiet und auf den Einsatz von Zementen mit höheren Alkaligehalten zurückzuführen waren, wurden in Deutschland in den späten sechziger und frühen siebziger Jahren umfangreiche Untersuchungen zur Alkali-Kieselsäure-Reaktion durchgeführt [6], deren Ergebnisse zu der Richtlinie „Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkaliereaktion im Beton (Alkali-Richtlinie)“ des Deutschen Ausschuss für Stahlbeton (DAfStb) führten. Die Richtlinie legt Prüfverfahren für die Alkaliempfindlichkeit von Gesteinskörnungen einschließlich deren Einstufung in Empfindlichkeitsklassen fest. Darüber hinaus enthält die Richtlinie betontechnologische Maßnahmen zur Vermeidung einer schädigenden AKR. Hierzu gehören der Austausch der Gesteinskörnung und die Verwendung eines NA-Zements, d.h. eines Zements mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt.

Auf Grund der insbesondere in den USA gewonnenen Erfahrung, die belegt, dass auch bei Verwendung alkaliempfindlicher Gesteinskörnungen kein Alkalitreiben mehr auftritt, wenn der Gesamtalkaligehalt des Zements höchstens $0,60$ M.-% Na_2O -Äquivalent beträgt, wurde damals dieser Grenzwert für Portlandzemente mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt festgelegt. Untersuchungen in Deutschland und die über fast drei Jahrzehnte gesammelte Erfahrung bestätigten diesen Wert.

Für hüttensandhaltige Zemente wurde wegen der glasigen Struktur und der langsameren Reaktion des Hüttensands angenommen, dass nicht die gesamten Alkalien des Hüttensands wirksam werden. Untersuchungen an Feinbetonprismen, die 600 kg/m^3 Zement und Durangas als alkaliempfindlichen Zuschlag enthielten und bei 40°C in feuchter Umgebung gelagert wurden, unterstützten diese Vermutung. Die Dehnungen der Prismen fielen bei höheren Hüttensandgehalten geringer aus. Außerdem bestand zwischen dem Endwert der Dehnungen und dem nach einem Vorschlag von Smolczyk [8] berechneten wirksamen Alkaligehalt ein linearer Zusammenhang. Der wirksame Alkaligehalt wurde dabei durch Multiplikation des Gesamtalkaligehalts mit einem vom Hüttensandgehalt abhängigen Faktor nach folgender Formel berechnet:

$$A_w = A_{\text{ges}} \cdot [1 - (S/S_0)^n]$$

mit A_w wirksamer Alkaligehalt in M.-% Na_2O -Äquivalent
 A_{ges} Gesamtalkaligehalt in M.-% Na_2O -Äquivalent
 S Hüttensandgehalt in M.-%
 $S_0; n$ Konstanten

- CEM III/A cements with a blastfurnace slag content ≥ 50 wt.-% and a total alkali content ≤ 1.10 wt.-% Na_2O equivalent, and
- CEM III/B cements with a total alkali content ≤ 2.00 wt.-% Na_2O equivalent.

With a few exceptions the Portland cements in Germany have alkali contents above the limit specified for low-alkali cements because of the raw materials available for cement manufacture. Procedures for lowering the alkali content during cement manufacture are sometimes possible only with substantial technical input and an economic expenditure that is hard to justify. For a number of construction projects it is also advantageous to be able to use not only the slag-rich low-alkali cements but also other cements with comparably low effective alkali contents. It was therefore necessary to discover other low-alkali cements that avoid the harmful alkali-silica reaction and to check their effectiveness.

Based on previous experience and investigations with cements containing blastfurnace slag in Germany [6] as well as on recent test results [7] it could be assumed that cements with slag contents < 50 wt.-% and limited alkali content could also be used for avoiding a harmful alkali-silica reaction. An extensive test programme was therefore carried out with the aim of widening the range of low-alkali cements listed in DIN 1164-1:1994-10 to include CEM II/B-S and CEM III/A cements with slag contents < 50 wt.-%.

2 Current state of the art

Extensive investigations into the alkali-silica reaction were carried out in Germany in the late sixties and early seventies [6] in response to damage in northern Germany which was attributed to the use of the very alkali-sensitive gravelly sand containing opaline sandstone and flint from this area and the use of cements with fairly high alkali contents. The results of these investigations led to the guideline “Preventive measures against harmful alkali reaction in concrete (Alkali Guideline)” issued by the DAfStb. The guideline lays down test methods for the alkali sensitivity of aggregates, including their classification into sensitivity classes. The guideline also contains concrete technology measures for avoiding a harmful alkali-silica reaction. These include replacement of the aggregate and the use of a low-alkali cement, i.e. a cement with low effective alkali content.

Experience, especially that gained in the USA, showed that no alkali expansion occurs if the total alkali content of the cement does not exceed 0.60 wt.-% Na_2O equivalent, even when using alkali-sensitive aggregates. This limit was then specified for Portland cements with low effective alkali content. Investigations in Germany and the experience gathered over almost three decades have confirmed this value.

For cements containing blastfurnace slag it was assumed that, because of the glassy structure and the slower reaction of the blastfurnace slag, not all the alkalis in the blastfurnace slag become effective. Investigations carried out on fine concrete prisms, which contained 600 kg/m^3 cement and Duran glass as an alkali-sensitive aggregate and were stored in a moist environment at 40°C , supported this supposition. The expansions of the prisms turned out to be lower with higher blastfurnace slag contents. There was also a linear relationship between the final value of the expansions and the effective alkali content calculated in accordance with a proposal by Smolczyk [8]. The effective alkali content was calculated by multiplying the total alkali content by a factor which depended on the blastfurnace slag content in accordance with the following formula:

$$A_w = A_{\text{total}} \cdot [1 - (S/S_0)^n]$$

where A_w = effective alkali content in wt.-% Na_2O equivalent
 A_{total} = total alkali content in wt.-% Na_2O equivalent
 S = blastfurnace slag content in wt.-%
 $S_0; n$ = constants

Because of the above-mentioned linear relationship the formula can be used to calculate the total alkali content (which rises with the blastfurnace slag content) of a cement that contains blastfurnace slag and has an effective alkali content of 0.60 wt.-% Na_2O and therefore behaves like a Portland cement with a total alkali

Mit der Formel ließ sich auf Grund der genannten linearen Abhängigkeit der mit dem Hüttensandgehalt ansteigende Gesamtalkaligehalt eines hüttensandhaltigen Zements berechnen, dessen wirksamer Alkaligehalt 0,60 M.-% Na₂O-Äquivalent beträgt und der sich demnach wie ein Portlandzement mit einem Gesamtalkaligehalt von 0,60 M.-% Na₂O-Äquivalent verhält. Dieser Zusammenhang ist in Bild 1 wiedergegeben, das den Gesamtalkaligehalt eines hüttensandhaltigen Zements in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt aufzeigt.

Für verschiedene in Deutschland durchgeführte Versuchsreihen ergaben sich geringfügig unterschiedliche Werte für S_0 und n . In Bild 1 ist daher der Bereich farblich gekennzeichnet, in dem alle Kurven verlaufen, die sich aus diesen unterschiedlichen Werten für S_0 und n ergeben hatten. Unterhalb des Bereichs wird die Bedingung für einen niedrigen wirksamen Alkaligehalt im Zement erfüllt, oberhalb nicht. In Bild 1 sind ebenfalls die Grenzen für NA-Zemente nach DIN 1164-1:1994-10 (vgl. Abschnitt 1) als durchgezogene Linie eingetragen. Bis heute sind bei Einsatz dieser NA-Zemente, auch wenn sehr alkaliempfindliche Gesteinskörnungen verwendet wurden, keine Schäden in der Praxis aufgetreten.

International wurde die Regelung für NA-Zemente mit höheren Hüttensandgehalten in zahlreichen Vorschriften – teilweise leicht abgewandelt – übernommen [9, 10]. Jedoch konnten bis heute die Wechselwirkungen, die die schädigende AKR vermeiden, nicht ausreichend geklärt werden. In aktuellen Untersuchungen im Forschungsinstitut [11] wird die Alkalifreisetzung und -bindung während der Hydratation der Zemente bis zu einem Alter von einem Jahr bilanzmäßig verfolgt. Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass Hüttensande i.d.R. den Alkaligehalt der Porenlösung proportional zum Hüttensandgehalt vermindern, bei hohen Alkaligehalten im Hüttensand jedoch geringfügig den Alkaligehalt in der Porenlösung erhöhen. Frühere Untersuchungen von Bakker [12] und anderen [13] belegen, dass neben einer verminderten Alkalikonzentration in der Porenlösung auch die Ionendiffusion bei hüttensandhaltigen Zementen deutlich kleiner ist als bei Portlandzementen. Als Ursache dafür wird neben einem dichteren Zementstein auch die Bildung von undurchlässigen Membranen in den Porenräumen des Zementsteins, die die Diffusion der Alkali-Ionen behindern, genannt.

3 Ziel und Umfang der Untersuchungen

Mit den Untersuchungen sollte die Palette der NA-Zemente nach DIN 1164 um CEM II/B-S-Zemente und CEM III/A-Zemente mit Hüttensandgehalten < 50 M.-% erweitert werden. Es sollte deshalb ermittelt werden, bei welchem Gesamtalkaligehalt dieser Zemente trotz Verwendung von alkaliempfindlichen Gesteinskörnungen eine schädigende AKR nicht mehr auftritt. In die Untersuchungen wurde eine für Deutschland repräsentative Auswahl von 22 CEM II/B-S-Zementen und 9 CEM III/A-Zementen mit bis zu 50 M.-% Hüttensand einbezogen.

Im Gegensatz zu den früheren Untersuchungen von Locher und Sprung mit Duranglas als alkaliempfindlichem Zuschlag [3, 6] wurden die Zemente an Betonen mit alkaliempfindlichem Kiessand mit Größtkorn 16 mm überprüft, die in einer 40 °C-Nebelkammer gelagert wurden. Die Dehnung und die Änderung des dynamischen E-Moduls von Balken sowie die Rissbildung an Würfeln dienten als Kriterien. Zum Vergleich wurden Betone mit Portlandzementen hergestellt, die einen besonders hohen bzw. niedrigen (NA-Zement) Gesamtalkaligehalt aufwiesen.

4 Versuchsdurchführung

4.1 Ausgangsstoffe

4.1.1 Zemente

Für die Vorversuche (siehe 4.2) wurden ein CEM I-Zement (Z-I-01) mit hohem Gesamtalkaligehalt, ein CEM I-NA-Zement (Z-I-02) und ein CEM II/B-S-Zement (Z-II-01) verwandt (siehe Tafel 1). Mit weiteren 4 CEM I-Zementen (Z-I-03 bis Z-I-06) und 2 Hüttensanden (S-01 und S-02) wurden im Labor 3 CEM II/B-S-Zemente (Z-II-20 bis Z-II-22) sowie 5 CEM III/A-Zemente (Z-III-05 bis Z-III-09) für die Hauptversuche gemischt. Die übrigen 23 hüttensandhaltigen Zemente wurden von Zementwerken aus verschiedenen Regionen Deutschlands geliefert (Z-II-01 bis Z-II-19 und Z-III-01 bis Z-III-04).

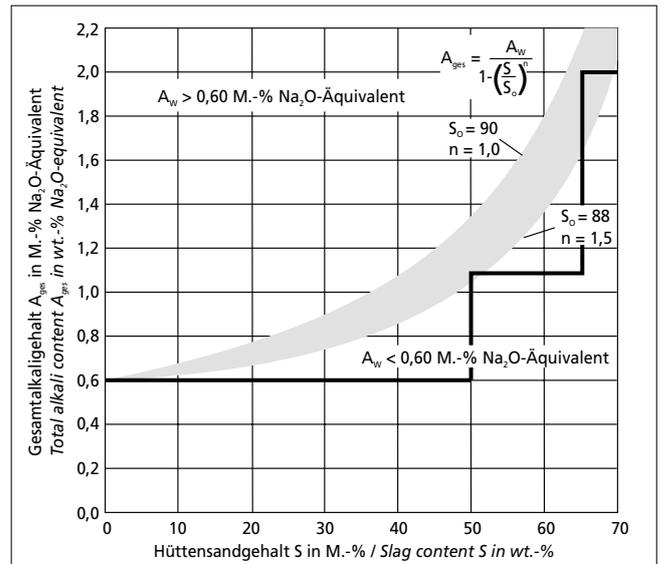


Bild 1: Grenzwerte für den Hüttensandgehalt und für den Gesamtalkaligehalt von Hochofenzementen mit niedrigem wirksamen Alkaligehalt

Figure 1: Limits for the slag content and the total alkali content of blastfurnace slag cements with low effective alkali content

li content of 0.60 wt.-% Na₂O equivalent. This relationship is reproduced in Figure 1 which shows the total alkali content of a cement which contains blastfurnace slag as a function of the blastfurnace slag content.

Various test series carried out in Germany resulted in slightly different values for S_0 and n . The region that contains all the curves which have been obtained from these different values for S_0 and n is therefore shown in colour in Figure 1. The requirement for a low effective alkali content in the cement is fulfilled below this region, but not above it. The limits for low-alkali cements as defined in DIN 1164-1:1994-10 (cf. Section 1) are also shown in Figure 1 as solid lines. So far no damage has occurred in practice when these low-alkali cements have been used, even with very alkali-sensitive aggregates.

The regulation for low-alkali cements containing high levels of blastfurnace slag has been adopted internationally in numerous specifications – in some cases with slight changes [9, 10]. Until now, however, the interactions which avoid the harmful alkali-silica reaction have not been adequately clarified. In current investigations at the Research Institute [11] balances are being used to follow the release and combination of alkalis during the hydration of the cements up to the age of one year. The results so far show that, as a rule, blastfurnace slags reduce the alkali content of the pore solution in proportion to the blastfurnace slag content, but with high alkali contents in the blastfurnace slag the alkali content in the pore solution is slightly increased. Earlier investigations by Bakker [12] and others [13] showed that in addition to a reduced alkali concentration in the pore solution the ion diffusion is also significantly lower in cements which contain blastfurnace slag than in Portland cements. The reason given for this is not only a denser hardened cement paste but also the formation of impermeable membranes in the pore voids of the hardened cement paste which impede the diffusion of the alkali ions.

3 Aim and extent of the investigations

The investigations were intended to extend the range of low-alkali cements defined in DIN 1164 to include CEM II/B-S cements and CEM III/A cements with blastfurnace slag contents < 50 wt.-%. The intention was therefore to determine the total alkali content of these cements at which a harmful alkali-silica reaction no longer occurred in spite of the use of alkali-sensitive aggregates. A selection of 22 CEM II/B-S cements and 9 CEM III/A cements containing up to 50 wt.-% blastfurnace slag which were representative of the situation in Germany were used in the investigations.

Einige chemische und physikalische Eigenschaften der großtechnisch hergestellten Zemente sowie der eingesetzten Hauptbestandteile wurden nach DIN EN 196 bestimmt. Der Hüttensandanteil der im Zementwerk hergestellten Zemente wurde entweder nach ENV 196-4 nachgewiesen oder nach [14] berechnet. Ebenso wurden die Alkaligehalte, die spezifische Oberfläche und die Dichte der labortechnisch gemischten hüttensandhaltigen Zemente über eine Mischungsrechnung aus den Daten der Ausgangsstoffe berechnet. Alle Ergebnisse sind in Tafel 1 zusammengestellt.

Bei einer Berechnung der Gesamtalkaligehalte der großtechnisch hergestellten Zemente aus den Werten der zugehörigen Hauptbestandteile fällt auf, dass die berechneten Werte für den Zement nicht in jedem Fall mit den angegebenen, chemisch bestimmten Werten übereinstimmen. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Proben der Hauptbestandteile nicht unmittelbar den jeweiligen Zementen zuzuordnen waren.

4.1.2 Gesteinskörnung

In allen Versuchen wurden bezogen auf die gesamte Gesteinskörnung in der Korngruppe 2/8 mm 15 Vol.-% eines norddeutschen Kiessandes mit Opalsandstein und Flint eingesetzt. Dieser Anteil von 15 Vol.-% führt nach [15] unter auch sonst ungünstigen Bedingungen zu den größten Schädigungen. Für die übrigen 85 Vol.-% wurde alkaliumempfindlicher Rheinkie sand aus der Umgebung von Düsseldorf mit einem Größtkorn von 16 mm verwendet. Die Sieblinie lag bei allen Versuchen in der Mitte des Bereichs B/C 16 nach DIN 1045.

4.2 Betonzusammensetzung

Die Untersuchungen wurden mit einem Zementgehalt von 500 kg/m³ durchgeführt. Mit diesem hohen Zementgehalt wird nahezu der gesamte Bereich des Betonbaus abgedeckt, sodass Grenzwerte für Gesamtalkaligehalte in Verbindung mit unterschiedlichen Hüttensandgehalten, die aus solchen Untersuchungen abgeleitet werden, allgemeingültig für die Betonbauweise gelten.

Bei einigen Untersuchungen u.a. in [16] hat sich gezeigt, dass bei Verwendung des sehr reaktiven Kiessandes mit Opalsandstein und Flint aus Norddeutschland und einem w/z-Wert von 0,55 größere Dehnungen an Balken und stärkere Rissbildungen an 30-cm-Würfeln auftraten als bei einem w/z-Wert von 0,45, wenn kein NA-Zement verwendet wurde. Um sicher zu gehen, dass auch bei diesen Untersuchungen der w/z-Wert von 0,55 zu größeren Schädigungen als der w/z-Wert von 0,45 führte, wurden Vorversuche mit beiden w/z-Werten durchgeführt.

4.3 Herstellung und Lagerung

Gesteinskörnung und Zement wurden mit dem Anmachwasser zwei Minuten intensiv in einem Tellermischer gemischt. Die Frischbetontemperatur nach dem Mischen betrug rd. 20 °C.

Die Probekörper für die Festbetonprüfungen wurden in Stahlformen hergestellt. Der Beton wurde auf Grund der fließfähigen Konsistenz i.d.R. durch Stochern, in Ausnahmefällen durch kurzes Rütteln auf einem Rütteltisch verdichtet. Zur Prüfung der Betondruckfestigkeit wurden 15-cm-Würfel und zur Erfassung einer ggf. schädigenden AKR zwei Balken 10 cm x 10 cm x 50 cm und ein 30-cm-Würfel hergestellt.

Nach der Herstellung wurden die Probekörper (24 ± 1) Stunde im Klimaraum bei 20 °C und 65 % relativer Luftfeuchte, abgedeckt mit feuchten Tüchern, in ihren Formen gelagert und anschließend entschalt. Die 10 cm x 10 cm x 50 cm-Balken erhielten an zwei gegenüberliegenden Seitenflächen Messmarken für die Messung der Längenänderung. Danach wurden die Balken zusammen mit dem zugehörigen 30-cm-Würfel in einer 40 °C-Nebelkammer und die 15-cm-Würfel gemäß DIN 1048-5 gelagert.

4.4 Prüfungen

4.4.1 Standardprüfungen

Zehn Minuten nach dem Mischen wurde das Ausbreitmaß a_{10} bestimmt. Gleichzeitig wurde der Luftgehalt und die Rohdichte des Frischbetons ermittelt. Alle Frischbetonprüfungen wurden nach DIN 1048-1 durchgeführt. Die Betondruckfestigkeit und die

In contrast to the earlier investigations by Locher and Sprung with Duran glass as the alkali-sensitive aggregate [3, 6] the cements were tested in concretes with alkali-sensitive gravelly sand with a maximum aggregate size of 16 mm which were stored in a 40 °C fog chamber. The assessment criteria used were the expansion and the change of dynamic modulus of elasticity of the beams as well as the occurrence of cracking in the cubes. For comparison, concretes were also produced with Portland cements with particularly high and low (low-alkali cement) total alkali contents.

4 Test procedure

4.1 Starting materials

4.1.1 Cements

A CEM I cement (Z-I-01) with high total alkali content, a CEM I low-alkali cement (Z-I-02) and a CEM II/B-S cement (Z-II-01) were used (see Table 1) for the preliminary trials (see 4.2). Three CEM II/B-S cements (Z-II-20 to Z-II-22) and five CEM III/A cements (Z-III-05 to Z-III-09) were mixed in the laboratory with a further four CEM I cements (Z-I-03 to Z-I-06) and two blastfurnace slags (S-01 and S-02) for the main trials. The other 23 cements containing blastfurnace slag were supplied by cement plants from different regions of Germany (Z-II-01 to Z-II-19 and Z-III-01 to Z-III-04).

Some chemical and physical properties of the cements produced industrially and of the main constituents used were determined in accordance with DIN EN 196. The blastfurnace slag fractions of the cements produced in cement plants were either confirmed by testing in accordance with ENV 196-4 or calculated as described in [14]. The alkali contents, the specific surface areas and the densities of the cements containing blastfurnace slag which had been mixed in the laboratory were also calculated from the data for the starting materials using a mix calculation. All the results are listed in Table 1.

When the total alkali contents of the cements produced industrially were calculated from the values of the relevant main constituents it was noticeable that the calculated values for the cement did not in every case agree with the specified, chemically determined, values. This is attributable to the fact that the samples of the main constituents were not associated directly with the respective cements.

4.1.2 Aggregate

15 vol.%, relative to the total aggregate, of a gravelly sand from northern Germany containing opaline sandstone and flint in the 2/8 mm size range were used in all trials. According to [15] this proportion of 15 vol.% leads to the greatest damage under conditions that are otherwise also unfavourable. Gravelly Rhine sand with a maximum size of 16 mm that was not sensitive to alkalis and was obtained in the Düsseldorf area was used for the remaining 85 vol.%. In all trials the grading curve lay in the middle of the B/C 16 range as defined in DIN 1045.

4.2 Concrete composition

The investigations were carried out with a cement content of 500 kg/m³. This high cement content covers virtually the entire range of concrete construction so that any limits for the total alkali content in conjunction with different levels of blastfurnace slag which are derived from these investigations would be universally valid for concrete construction.

In some investigations, including those in [16], it had been found that when using the very reactive gravelly sand containing opaline sandstone and flint from northern German greater expansion in beams and more severe cracking in 30 cm cubes occurred with a water/cement ratio of 0.55 than with a water/cement ratio of 0.45 when low-alkali cement was not used. Preliminary tests were therefore carried out with the two water/cement ratios to make sure that the water/cement ratio of 0.55 would also lead to greater damage than the water/cement ratio of 0.45 in these investigations.

4.3 Production and storage

The aggregate and cement were mixed intensively with the mixing

Tafel 1: Chemische Zusammensetzung und physikalische Daten der Zemente und Ausgangsstoffe sowie das Verhalten der Betone (w/z = 0,55) mit den jeweiligen Zementen

Table 1: Chemical composition and physical data of cements and main constituents as well as the characteristics of the concretes (w/c = 0.55) made with these cements

Bezeichnung für Zement / Hüttensand <i>Designation of cement / slag</i>	Zementart <i>Cement type</i>	Zement und dessen Hauptbestandteile <i>Cement and the main constituents</i>	Alkaligehalt <i>Alkali content</i>			Hüttensand-gehalt <i>Slag content</i>	spez. Oberfläche <i>spec. surface</i>	Druckfestigkeit <i>Compressive strength</i>		Dehnung ¹⁾ <i>Expansion¹⁾</i>	Rissweite ²⁾ <i>Crack width²⁾</i>
			K ₂ O	Na ₂ O	Na ₂ O-Äquivalent Na ₂ O-equivalent			2 d	28 d		
Nr./No.	-	-	M.-%/wt.-%			M.-%/wt.-%	cm ² /g	N/mm ²		mm/m	w ≥ 0,2 mm
Portlandzemente / Portland cements											
Z-I-01	CEM I 32,5 R	Zement	1,67	0,17	1,27	—	2990	32,2	48,6	0,889	X
Z-I-02	CEM I 32,5 R-NA	Zement	0,55	0,19	0,55	—	2910	17,4	44,5	0,291	O
Z-I-03	CEM I 42,5 R	Zement	1,50	0,23	1,22	—	4220	39,6	55,5	—	—
Z-I-04	CEM I 42,5 R	Zement	1,45	0,16	1,11	—	3230	24,1	54,3	—	—
Z-I-05	CEM I 32,5 R	Zement	0,93	0,12	0,73	—	2790	19,0	45,9	—	—
Z-I-06	CEM I 42,5 R	Zement	1,52	0,14	1,14	—	4150	32,0	56,0	—	—
Hüttensand / Slag											
S-01	Hüttensand	—	0,58	0,39	0,77	—	3740	—	—	—	—
S-02	Slag	—	1,18	0,39	1,17	—	4280	—	—	—	—
Portlandhüttenzemente / Portland slag cements											
Z-II-01	CEM II/B-S 32,5 R	Zement	1,10	0,34	1,06	21	3630	21,2	49,2	0,923	X
		Klinker	0,80	0,32	0,85	—	—	—	—	—	—
		HÜS ³⁾	1,10	0,40	1,12	—	—	—	—	—	—
Z-II-02	CEM II/B-S 32,5 R	Zement	1,31	0,24	1,10	26	3100	23,8	51,5	1,742	X
		Klinker	1,53	0,22	1,23	—	—	—	—	—	—
		HÜS ³⁾	0,44	0,30	0,59	—	—	—	—	—	—
Z-II-03	CEM II/B-S 32,5 R	Zement	0,94	0,32	0,94	28	3430	21,3	47,4	0,508	X
		Klinker	0,98	0,32	0,96	—	—	—	—	—	—
		HÜS ³⁾	1,11	0,41	1,14	—	—	—	—	—	—
Z-II-04	CEM II/B-S 32,5 R	Zement	1,21	0,23	1,03	35	2850	17,3	48,1	0,403	O
		Klinker	1,45	0,20	1,15	—	—	—	—	—	—
		HÜS ³⁾	0,37	0,29	0,53	—	—	—	—	—	—
Z-II-05	CEM II/B-S 32,5 R	Zement	0,81	0,26	0,79	26	3130	17,4	44,2	0,495	X
		Klinker	1,09	0,26	0,98	—	—	—	—	—	—
		HÜS ³⁾	0,37	0,28	0,52	—	—	—	—	—	—
Z-II-06	CEM II/B-S 32,5 R	Zement	0,93	0,26	0,87	30	3375	19,2	48,6	0,484	O
		CEM I 32,5 R	1,05	0,20	0,89	—	—	—	—	—	—
		HÜS ³⁾	0,74	0,45	0,94	—	—	—	—	—	—
Z-II-07	CEM II/B-S 42,5 R	Zement	0,95	0,26	0,89	31	4010	27,5	56,4	0,383	O
		CEM I 42,5 R	1,07	0,19	0,89	—	—	—	—	—	—
		HÜS ³⁾	0,70	0,41	0,87	—	—	—	—	—	—
Z-II-08	CEM II/B-S 32,5 R	Zement	0,88	0,17	0,75	30	3335	18,8	47,9	0,437	O
		CEM I 32,5/42,5 R	1,06	0,13	0,83	—	—	—	—	—	—
		HÜS ³⁾	0,45	0,25	0,55	—	—	—	—	—	—
Z-II-09	CEM II/B-S 42,5 R	Zement	0,85	0,18	0,74	30	3990	24,5	55,2	0,381	O
		CEM I 42,5/52,5 R	1,05	0,14	0,83	—	—	—	—	—	—
		HÜS ³⁾	0,45	0,25	0,55	—	—	—	—	—	—
Z-II-10	CEM II/B-S 32,5 R	Zement	0,96	0,21	0,84	31	3535	20,4	50,4	0,428	O
		CEM I 32,5/42,5 R	1,08	0,14	0,85	—	—	—	—	—	—
		HÜS ³⁾	0,66	0,35	0,78	—	—	—	—	—	—
Z-II-11	CEM II/B-S 42,5 R	Zement	0,93	0,21	0,82	30	4180	24,9	56,6	0,341	O
		CEM I 42,5/52,5 R	1,06	0,15	0,85	—	—	—	—	—	—
		HÜS ³⁾	0,66	0,34	0,77	—	—	—	—	—	—

Fortsetzung nächste Seite →

Z-II-12	CEM II/B-S 32,5 R	Zement	0,97	0,27	0,91	33	3190	14,5	49,2	0,435	O
		CEM I 32,5 R	1,22	0,16	0,96	-	-	-	-	-	-
		HÜS ³⁾	0,58	0,45	0,83	-	-	-	-	-	-
Z-II-13	CEM II/B-S 42,5 R	Zement	0,95	0,25	0,88	35	3500	19,8	54,4	0,377	O
		Klinker	1,24	0,16	0,98	-	-	-	-	-	-
		HÜS ³⁾	0,55	0,44	0,80	-	-	-	-	-	-
Z-II-14	CEM II/B-S 32,5 R	Zement	0,95	0,19	0,82	29	3380	20,4	57,6	0,366	O
		CEM I 32,5 R	1,17	0,17	0,94	-	-	-	-	-	-
		HÜS ³⁾	0,47	0,28	0,59	-	-	-	-	-	-
Z-II-15	CEM II/B-S 42,5 R	Zement	0,88	0,17	0,75	31	4615	26,5	58,9	0,304	O
		Klinker	1,08	0,15	0,86	-	-	-	-	-	-
		HÜS ³⁾	0,43	0,38	0,66	-	-	-	-	-	-
Z-II-16	CEM II/B-S 32,5 R	Zement	0,82	0,22	0,76	33	3080	15,0	45,8	0,381	O
		Klinker	1,16	0,22	0,98	-	-	-	-	-	-
		HÜS ³⁾	0,55	0,29	0,65	-	-	-	-	-	-
Z-II-17	CEM II/B-S 42,5 R	Zement	0,83	0,22	0,77	34	4270	28,0	63,2	0,317	O
		Klinker	1,03	0,22	0,90	-	-	-	-	-	-
		HÜS ³⁾	0,58	0,27	0,65	-	-	-	-	-	-
Z-II-18	CEM II/B-S 32,5 R	Zement	0,86	0,19	0,76	26	2970	18,3	50,4	0,416	O
		Klinker	0,96	0,14	0,77	-	-	-	-	-	-
		HÜS ³⁾	0,72	0,43	0,90	-	-	-	-	-	-
Z-II-19	CEM II/B-S 42,5 R	Zement	0,89	0,19	0,78	28	4400	28,0	62,8	0,341	O
		Klinker	1,15	0,15	0,91	-	-	-	-	-	-
		HÜS ³⁾	0,75	0,42	0,91	-	-	-	-	-	-
Z-II-20	CEM II/B-S	Zement ⁴⁾	1,22	0,28	1,08	30	4080	-	-	0,458	O
		Z-I-03	1,50	0,23	1,22	-	4220	39,6	55,5	-	-
		S-01	0,58	0,39	0,77	-	3740	-	-	-	-
Z-II-21	CEM II/B-S	Zement ⁴⁾	1,40	0,28	1,20	30	4240	-	-	0,384	O
		Z-I-03	1,50	0,23	1,22	-	4220	39,6	55,5	-	-
		S-02	1,18	0,39	1,17	-	4280	-	-	-	-
Z-II-22	CEM II/B-S	Zement ⁴⁾	1,28	0,21	1,05	20	3330	-	-	1,451	X
		Z-I-04	1,45	0,16	1,11	-	3230	24,1	54,3	-	-
		S-01	0,58	0,39	0,77	-	3740	-	-	-	-
Hochofenzemente / Blastfurnace slag cements											
Z-III-01	CEM III/A 32,5	Zement	1,10	0,25	0,97	42	3420	12,4	46,9	0,336	O
		CEM I 32,5 R	1,55	0,20	1,22	-	-	-	-	-	-
		HÜS ³⁾	0,39	0,31	0,57	-	-	-	-	-	-
Z-III-02	CEM III/A 32,5 R-NW	Zement	0,99	0,34	0,99	45	4030	12,2	45,6	0,396	O
		Klinker	0,80	0,32	0,85	-	-	-	-	-	-
		HÜS ³⁾	1,10	0,40	1,12	-	-	-	-	-	-
Z-III-03	CEM III/A 42,5 R	Zement	1,04	0,24	0,92	42	3600	23,5	57,4	0,508	O
		Klinker	1,53	0,22	1,23	-	-	-	-	-	-
		HÜS ³⁾	0,44	0,30	0,59	-	-	-	-	-	-
Z-III-04	CEM III/A 32,5 R	Zement	1,20	0,24	1,04	41	3710	24,4	57,7	0,347	O
		Klinker	1,45	0,20	1,15	-	-	-	-	-	-
		HÜS ³⁾	0,37	0,29	0,53	-	-	-	-	-	-
Z-III-05	CEM III/A	Zement ⁴⁾	1,13	0,29	1,03	40	4030	-	-	0,450	O
		Z-I-03	1,50	0,23	1,22	-	4220	39,6	55,5	-	-
		S-01	0,58	0,39	0,77	-	3740	-	-	-	-
Z-III-06	CEM III/A	Zement ⁴⁾	1,37	0,29	1,19	40	4240	-	-	0,364	O
		Z-I-03	1,50	0,23	1,22	-	4220	39,6	55,5	-	-
		S-02	1,18	0,39	1,17	-	4280	-	-	-	-

Fortsetzung nächste Seite →

Z-III-07	CEM III/A	Zement ⁴⁾	1,34	0,31	1,19	50	4250	–	–	0,362	0
		Z-I-03	1,50	0,23	1,22	–	4220	39,6	55,5	–	–
		S-02	1,18	0,39	1,17	–	4280	–	–	–	–
Z-III-08	CEM III/A	Zement ⁴⁾	1,06	0,26	0,96	50	3540	–	–	0,330	0
		Z-I-05	0,93	0,12	0,73	–	2790	19,0	45,9	–	–
		S-02	1,18	0,39	1,17	–	4280	–	–	–	–
Z-III-09	CEM III/A	Zement ⁴⁾	1,35	0,27	1,16	50	4220	–	–	0,328	0
		Z-I-06	1,52	0,14	1,14	–	4150	32,0	56,0	–	–
		S-02	1,18	0,39	1,17	–	4280	–	–	–	–

¹⁾ gemessen am Balken 10 cm x 10 cm x 50 cm / measured on the 10 cm x 10 cm x 50 cm beam

²⁾ gemessen am 30-cm-Würfel / measured on the 30 cm cube

³⁾ HÜS = Hüttensand / Slag

⁴⁾ berechnet aus Daten der Ausgangsstoffe / calculated from the data of the main constituents

Festbetonrohddichte der 15-cm-Würfel wurden im Alter von 28 d nach DIN 1048-5 bestimmt.

Die Ergebnisse der Prüfungen lagen alle in dem für die gewählte Betonzusammensetzung (s. Abschnitt 4.2 und 5.3) üblichen Bereich.

4.4.2 Prüfungen zur Erfassung einer schädigenden AKR

Die Nullmessungen des Abstands der Messmarken, der Länge, des Gewichts und des dynamischen E-Moduls der Balken wurden einen Tag nach der Herstellung bei rd. 20 °C durchgeführt.

Bestimmung der Dehnung

Der Abstand der Messmarken auf den Seitenflächen der Balken wurde mit einem Setzdehnungsmesser (Basislänge 400 mm) gemessen. Zu den jeweiligen Prüfterminen wurden die Abstände zwischen den Messmarken ermittelt und durch Bezug auf den Ausgangsabstand der Messmarken (Nullmessung) die Dehnung ϵ der Balken in mm/m berechnet. Die im Abschnitt 5 dargestellten Werte sind Mittelwerte von zwei Balken eines Betons.

Dynamischer E-Modul

Nach Impulsanregung der Balken wurde deren Eigenschwingzeit gemessen und hieraus der dynamische E-Modul nach [17] berechnet. Die Eigenschwingzeit der Balken wurde unmittelbar nach der Messung des Abstands der Messmarken ermittelt. Die dargestellten Werte sind Mittelwerte von zwei Balken eines Betons.

Augenscheinliche Beurteilung

Alle Probekörper wurden regelmäßig augenscheinlich beurteilt und das Rissbild sowie die Rissweiten aufgenommen.

5 Darstellung und Diskussion der Ergebnisse

5.1 Allgemeine Bewertungsgrundsätze

Hinweise für das Auftreten einer schädigenden AKR sind gegeben, wenn an Betonprobekörpern Rissbildungen und Treiberscheinungen festgestellt werden können. In Abhängigkeit von der Lagerungstemperatur können diese Erscheinungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten auftreten.

Auf Grund bisheriger Erfahrungen und Vergleichsversuche kann für die vorliegenden Untersuchungen davon ausgegangen werden, dass eine schädigende AKR unter baupraktischen Bedingungen nicht auftritt, wenn an Balken aus Laborbetonen, die in einer 40 °C-Nebelkammer gelagert werden, keine Dehnungen über 0,6 mm/m auftreten und 30-cm-Würfel keine starke Rissbildung mit Rissweiten $\geq 0,2$ mm aufweisen. Die Temperatur- und Feuchtedehnung von etwa 0,2 mm/m bis 0,4 mm/m ist in dem Grenzwert enthalten [18]. Ergänzende Hinweise auf eine innere Gefügeschädigung der Betonbalken wurden durch die Bestimmung des dynamischen E-Moduls gewonnen.

5.2 Vorversuche

In Bild 2 sind die Dehnungen von Betonbalken dargestellt, die sich in der Art der Zemente und im w/z-Wert unterscheiden.

water for two minutes in a pan mixer. The fresh concrete temperature after mixing was about 20 °C.

The test pieces for the hardened concrete tests were produced in steel moulds. Because of its free-flowing consistency the concrete was, as a rule, compacted by rodding, but in exceptional cases by brief vibration on a vibrating table. 15 cm cubes were produced for testing the concrete compressive strength and two 10 cm x 10 cm x 50 cm beams and one 30 cm cube were produced for assessing any possible harmful alkali-silica reaction.

After production the test pieces were stored for (24 ± 1) hours in their moulds covered with damp cloths in a climatic chamber at 20 °C and 65 % relative air humidity, and were then de-moulded. Test marks were made on two opposite side surfaces of the 10 cm x 10 cm x 50 cm beams for measuring the change in length. The beams, together with the associated 30 cm cube, were then stored in a 40 °C fog chamber and the 15 cm cubes were stored in accordance with DIN 1048-5.

4.4 Tests

4.4.1 Standard tests

The flow diameter a_{10} was determined ten minutes after mixing. The air content and the bulk density of the fresh concrete were measured at the same time. All fresh concrete tests were carried out in accordance with DIN 1048-1. The concrete compressive strength and the hardened concrete bulk density of the 15 cm cubes were determined at 28 d in accordance with DIN 1048-5.

The results of the tests all lay in the normal range for the chosen concrete composition (see Sections 4.2 and 5.3).

4.4.2 Tests for assessing harmful alkali-silica reactions

The reference measurements for the distance between the test marks (the length), the weight and the dynamic modulus of elasticity of the beams were carried out at about 20 °C one day after production.

Determination of the expansion

The distances between the test marks on the side faces of the beams were measured with a stress-probing extensometer (basic length 400 mm). The distances between the test marks were measured at each test age and the expansions ϵ of the beams were calculated in mm/m relative to the initial spacing of the test marks (reference measurement). The values shown in Section 5 are average values from two beams made from a given concrete.

Dynamic modulus of elasticity

The natural oscillation times of the beams after impulse excitation were measured and used to calculate the dynamic modulus of elasticity as described in [17]. The natural oscillation times of the beams were measured directly after measuring the distance between the test marks. The values shown are average values from two beams made from a given concrete.

Visual assessment

All test pieces were regularly assessed by eye and the cracking and crack widths were recorded.

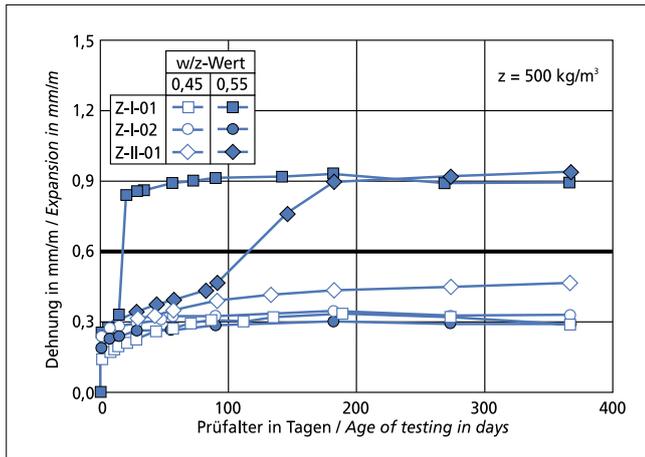


Bild 2: Dehnung von Betonen mit verschiedenen Zementen in Abhängigkeit vom w/z-Wert
Figure 2: Expansion of concretes made with different cements in relation to the w/c ratio

Erwartungsgemäß wurden bei Verwendung des Portlandzements mit NA-Eigenschaft (Z-I-02) keine erhöhten Dehnungen festgestellt.

Ebenso wiesen die Betonbalken mit dem alkalireichen Zement (Z-I-01) und einem w/z-Wert von 0,45 keine Dehnungen auf, die auf eine schädigende AKR hinweisen. Dagegen überschritt der Beton mit dem gleichen Zement bei einem w/z-Wert von 0,55 nach einem Monat den Grenzwert für die Dehnungen von 0,6 mm/m und erreichte nach drei Monaten eine Dehnung von über 0,9 mm/m. Außerdem wurden bei diesem Versuch bereits nach drei Wochen Lagerung in der 40 °C-Nebelkammer erste Risse am 30-cm-Würfel festgestellt. Im Laufe der Untersuchungen entwickelte sich ein starkes Rissnetz mit Rissweiten über 0,2 mm. Die Betone mit dem CEM II/B-S-Zement (Z-II-01), der einen relativ hohen Gesamtalkaligehalt von 1,06 M.-% Na₂O-Äquivalent aufwies, verhielten sich ähnlich. Während bei einem w/z-Wert von 0,45 Dehnungen von nur 0,46 mm/m und keine Rissbildung festgestellt wurden, stieg die Dehnung der Balken bei w/z = 0,55 nach drei Monaten deutlich an. Die Enddehnung betrug nach neun Monaten 0,92 mm/m und es trat eine starke Rissbildung an dem 30-cm-Würfel auf.

Demzufolge konnte davon ausgegangen werden, dass bei einem w/z-Wert von 0,55 und einem Zementgehalt von 500 kg/m³ mit dem verwendeten Kiessand mit Opalsandstein und Flint scharfe Bedingungen zur Überprüfung der hüttensandhaltigen Zemente vorlagen.

5.3 Hauptversuche

5.3.1 Betonzusammensetzung

Für die Hauptversuche wurde auf Grund der Voruntersuchungen die in Tafel 2 aufgeführte Betonzusammensetzung festgelegt.

5.3.2 CEM II/B-S-Zemente

Die Ergebnisse der Untersuchungen an Betonen mit CEM II/B-S-Zementen sind in Bild 3 zusammengefasst. Betone, die eine Dehnung über 0,6 mm/m und/oder deren Würfel eine Rissbildung aufwiesen, sind in diesem Bild gekennzeichnet.

Bei den Betonen mit den Zementen Z-II-01, Z-II-02 und Z-II-22 traten Dehnungen der Balken auf, die mit Werten von 1,74 mm/m, 0,92 mm/m und 1,45 mm/m nach neun Monaten deutlich über dem Grenzwert von 0,6 mm/m lagen. Ebenso wurden nach drei bzw. fünf Monaten erste Risse an den 30-cm-Würfeln dieser Betone festgestellt, die sich mit der Zeit zu einem starken Rissnetz weiter entwickelten. Der Abfall des dynamischen E-Moduls bestätigte die Schädigung der Balken. Der mit dem Alter der Betone wieder ansteigende E-Modul ist vermutlich auf ein Ausfüllen der Risse mit Gel und Reaktionsprodukten aus der fortschreitenden Hydratation zurückzuführen.

5 Representation and discussion of the results

5.1 General evaluation principles

The occurrence of a harmful alkali-silica reaction is indicated if cracking and expansion phenomena are observed in the concrete test pieces. These phenomena can occur at different times depending on the storage temperature.

On the basis of previous experience and comparison trials it can be assumed for these investigations that a harmful alkali-silica reaction will not occur under practical building conditions if the expansion in beams made from laboratory concretes stored in a 40 °C fog chamber does not exceed 0.6 mm/m and if 30 cm cubes do not exhibit severe cracking with crack widths ≥ 0.2 mm. The expansion of about 0.2 mm/m to 0.4 mm/m caused by temperature and moisture is included in the limit value [18]. Further indications of internal microstructural damage in the concrete beams were obtained by determining the dynamic modulus of elasticity.

5.2 Preliminary trials

The expansions of concrete beams made with different types of cement and water/cement ratios are shown in Figure 2. As expected, no increased expansions were observed when using Portland cement with low-alkali properties (Z-I-0 2).

The concrete beams made with the alkali-rich cement (Z-I-01) and a water/cement ratio of 0.45 also exhibited no expansions indicative of harmful alkali-silica reactions. On the other hand, the concrete made with the same cement with a water/cement ratio of 0.55 exceeded the limit for the expansion of 0.6 mm/m after one month and after three months reached an expansion of over 0.9 mm/m. Initial cracks in the 30 cm cube were also observed in this trial after only three weeks' storage in the 40 °C fog chamber. A severe network of cracks with crack widths of more than 0.2 mm developed during the investigations. Similar behaviour was exhibited by the concretes made with CEM II/B-S cement (Z-II-01) which had a relatively high total alkali content of 1.06 wt.-% Na₂O equivalent. Expansions of only 0.46 mm/m and no cracking were observed with a water/cement ratio of 0.45, but with water/cement = 0.55 the expansion of the beams increased significantly after three months. After nine months the final expansion was 0.92 mm/m and severe cracking occurred in the 30 cm cube.

It could therefore be assumed that a water/cement ratio of 0.55 and a cement content of 500 kg/m³ produce severe conditions for testing cements containing blastfurnace slag when using gravelly sand containing opaline sandstone and flint.

5.3 Main trials

5.3.1 Concrete composition

The concrete composition listed in Table 2 was specified for the main trials on the basis of the preliminary investigations.

5.3.2 CEM II/B-S cements

The results of the investigations on concretes made with CEM II/B-S cements are summarized in Figure 3. This diagram shows the concretes which exhibited an expansion of more than 0.6 mm/m and/or the cubes of which exhibited cracking.

With the concretes made with cements Z-II-01, Z-II-02 and Z-II-22 expansions occurred in the beams which had values of 1.74 mm/m, 0.92 mm/m and 1.45 mm/m after nine months and

Tafel 2: Betonzusammensetzung für die Hauptversuche

Table 2: Concrete composition for the main tests

Zementgehalt / Cement content	500 kg/m ³
w/z-Wert / w/c-ratio	0,55
Sieblinie / Grading curve	B/C 16 (DIN 1045)
Gesteinskörnung / Aggregate	<ul style="list-style-type: none"> • 15 Vol.-% Kiessand (2/8 mm) mit Opalsandstein und Flint 15 vol.-% gravel and sand (2/8 mm) with opaline sandstone and flint • 85 Vol.-% Rheinkiesand (0/16 mm) 85 vol.-% Rhine gravel and sand (0/16 mm)

Nach rd. neun Monaten wiesen auch die 30-cm-Würfel der Betone mit Zement Z-II-03 und Z-II-05 eine Rissbildung mit Rissweiten $w \geq 0,2$ mm auf. Im Vergleich zu den Balken war dies nicht erwartet worden, da diese keine erhöhten Dehnungen aufwiesen (Bild 3) und der stetig ansteigende Verlauf des dynamischen E-Moduls nicht auf eine innere Gefügeschädigung der Balken schließen ließ.

Die Dehnungen der übrigen 17 Betone verlaufen alle innerhalb des farblich gekennzeichneten Bereichs. Sie blieben mit Enddehnungen im Bereich von 0,3 mm/m bis 0,5 mm/m deutlich unterhalb des Grenzwerts von 0,6 mm/m. An den 30-cm-Würfeln der zugehörigen Betone wurden keine Hinweise auf eine Schädigung infolge einer AKR gefunden.

Insgesamt ist bei den Versuchen ab einem Hüttensandgehalt von rd. 30 M.-% eine schädigende AKR mit der sehr alkaliempfindlichen Gesteinskörnung unter den gewählten scharfen Versuchsbedingungen nicht aufgetreten. Bei geringeren Hüttensandgehalten und einem Gesamtalkaligehalt $\geq 1,05$ M.-% Na_2O -Äquivalent (Zemente Z-II-01, Z-II-02 und Z-II-22) wurde dagegen eine schädigende AKR festgestellt. Bei Gesamtalkaligehalten von 0,79 M.-% bis 1,05 M.-% Na_2O -Äquivalent kann aufgrund des unterschiedlichen Verhaltens der Betone keine eindeutige Entscheidung getroffen werden. Weitergehende Untersuchungen über den Beitrag des Hüttensands und des Portlandzementanteils zum wirksamen Alkaligehalt sind erforderlich.

5.3.3 CEM III/A-Zemente ($S \leq 50$ M.-%)

Die Dehnungen der Balken aus Betonen mit CEM III/A-Zementen sind in Bild 4 dargestellt. Sie liegen alle in dem farblich hinterlegten Bereich. Bei keinem Beton trat eine Dehnung $> 0,6$ mm/m auf. Außerdem gab der Verlauf des dynamischen E-Moduls in keinem Fall einen Hinweis auf eine innere Gefügeschädigung. Ebenfalls wurde an den 30-cm-Würfeln keine Rissbildung festgestellt.

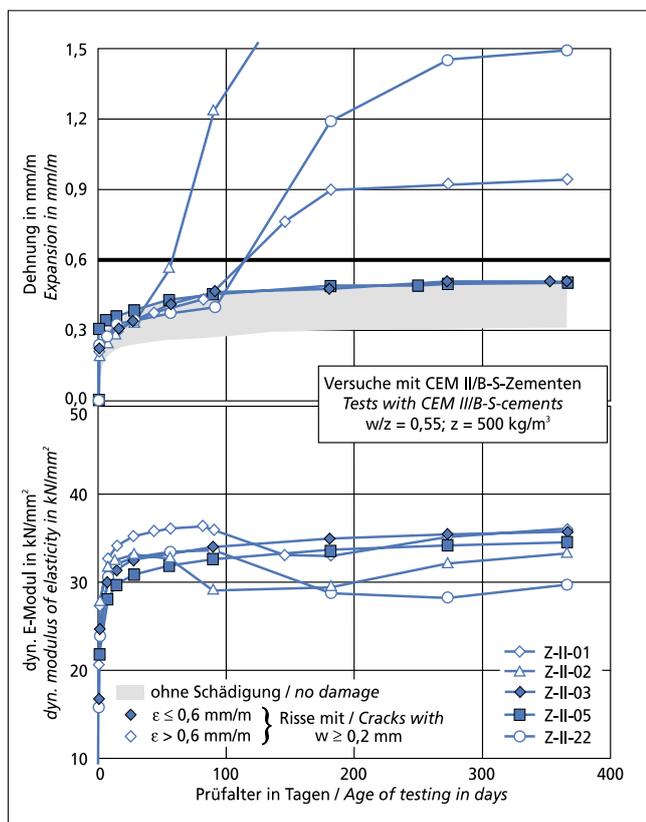


Bild 3: Dehnung und dynamischer E-Modul von Betonbalken mit CEM II/B-S-Zementen

Figure 3: Expansion and dynamic modulus of elasticity of concrete test pieces (beams) made with CEM II/B-S cements

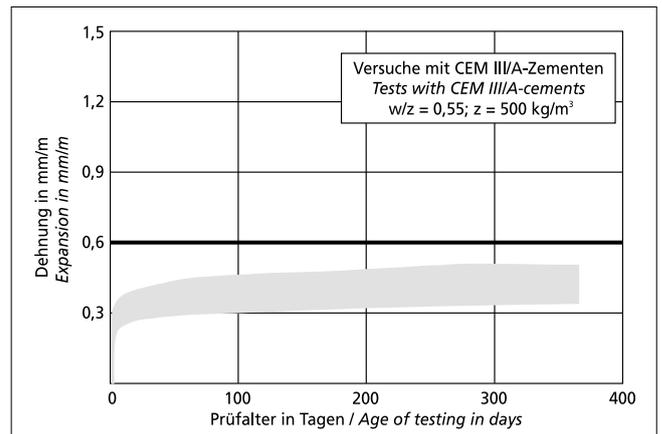


Bild 4: Dehnung von Betonbalken mit CEM III/A-Zementen (Hüttensandgehalt ≤ 50 M.-%)

Figure 4: Expansion of concrete test pieces (beams) made with CEM III/A cements (slag content ≤ 50 wt.-%)

lay significantly above the limit of 0.6 mm/m. After three or five months initial cracks were also observed in the 30 cm cubes made with these concretes; these developed further with time to form severe networks of cracks. The drop in the dynamic modulus of elasticity confirmed the damage to the beams. The subsequent increase in the modulus of elasticity with age of the concretes is presumably because the cracks become filled with gel and reaction products from the advancing hydration.

After about nine months the 30 cm cubes of the concretes made with cements Z-II-03 and Z-II-05 also exhibited cracking with crack widths $w \geq 0.2$ mm. This had not been expected from the results with the beams as these did not exhibit any increased expansions (Figure 3) and the continuously rising curve of the dynamic modulus of elasticity did not indicate any internal microstructural damage to the beams.

The expansions of the other 17 concretes all lay within the coloured region. With final expansions in the range from 0.3 mm/m to 0.5 mm/m they remained significantly below the limit of 0.6 mm/m. No indications of damage resulting from an alkali-silica reaction were found in the 30 cm cubes of the associated concretes.

As a whole, no harmful alkali-silica reactions occurred in the trials with the very alkali-sensitive aggregate under the chosen severe test conditions above a blastfurnace slag content of about 30 wt.-%. On the other hand, a harmful alkali-silica reaction was observed at lower blastfurnace slag contents and a total alkali content ≥ 1.05 wt.-% Na_2O equivalent (cements Z-II-01, Z-II-02 and Z-II-22). It is not possible to make a clear decision for total alkali contents of 0.79 wt.-% to 1.05 wt.-% Na_2O equivalent because of the varying behaviour of the concretes. More extensive investigations into the contributions of the blastfurnace slag and the Portland cement fraction to the effective alkali content are needed.

5.3.3 CEM III/A cements ($S \leq 50$ wt.-%)

The expansions of the concrete beams made with CEM III/A cements are shown in Figure 4. They all lay within the coloured region. None of the concretes had expansions > 0.6 mm/m and in no case did the behaviour of the dynamic modulus of elasticity give any indication of internal microstructural damage. Nor was any cracking observed in the 30 cm cubes.

5.4 New low-alkali cements

All the results are summarized in Figure 5. The degree of damage to the concretes is plotted as a function of the blastfurnace slag content and of the total alkali content of the cements examined. It can be seen from the diagram that in the range of blastfurnace slags examined no damage occurred to the concrete test pieces with blastfurnace slag contents between 35 wt.-% and 50 wt.-%. In the range of Portland slag cements with blastfurnace slag contents of 21 wt.-% to 35 wt.-% severe damage occurred with alkali contents in the cements ≥ 1.05 wt.-% Na_2O equivalent, and slight damage with

5.4 Neue NA-Zemente

Alle Ergebnisse sind in Bild 5 zusammengefasst. Der Schädigungsgrad der Betone ist in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt und vom Gesamtalkaligehalt der untersuchten Zemente aufgetragen. Dem Bild ist zu entnehmen, dass im Bereich der untersuchten Hochofenzemente mit Hüttensandgehalten zwischen 35 M.-% und 50 M.-% keine Schädigung der Betonprobekörper aufgetreten ist. Im Bereich der Portlandhüttenzemente mit Hüttensandgehalten von 21 M.-% bis 35 M.-% sind bei Alkaligehalten im Zement $\geq 1,05$ M.-% Na_2O -Äquivalent starke und bei Alkaligehalten zwischen 0,79 M.-% und 0,94 M.-% Na_2O -Äquivalent geringe Schäden aufgetreten. Unterhalb von 0,79 M.-% Na_2O -Äquivalent traten keine Schäden auf.

Wie die gestrichelte Linie für die Grenzen des Gesamtalkaligehalts der NA-Zemente der ehemaligen DIN 1164-1:1994-10 zeigt, lagen die Grenzwerte sehr weit auf der sicheren Seite. Auf Grund der Ergebnisse konnte daher nach Beratungen im NABau-Normenausschuss „Zement“ die Palette der NA-Zemente in DIN 1164-1:1994-10 um die folgenden Zemente erweitert werden:

- Portlandhüttenzement CEM II/B-S mit einem Gesamtalkaligehalt $\leq 0,70$ M.-% Na_2O -Äquivalent und
- Hochofenzemente CEM III/A mit einem Hüttensandgehalt von 36 M.-% bis 49 M.-% und einem Gesamtalkaligehalt $\leq 0,95$ M.-% Na_2O -Äquivalent.

Die neuen Regelungen sind in Bild 5 als durchgezogene Linie enthalten. Ein Abstand von rd. 0,1 M.-% Na_2O -Äquivalent im Gesamtalkaligehalt zu dem CEM II/B-S Zement, bei dessen Verwendung noch geringe Schäden aufgetreten sind, ist zu erkennen.

Außerdem wird anhand von Bild 5 erneut deutlich, dass ab einem Hüttensandgehalt des Zements von rd. 30 M.-% keine Schäden aufgetreten sind. Es ist zu vermuten, dass ab diesem Hüttensandgehalt für eine ggf. schädigende Alkalireaktion im Beton nicht nur der Alkaligehalt der Porenlösung maßgebend ist, sondern auch die mit ansteigendem Hüttensandgehalt zunehmende Dichte des Zementsteins eine Rolle spielt.

5.5 Ergänzende Untersuchungen

Die Dehnungen der Balken, die die ungeschädigten Betone mit hüttensandhaltigen Zementen nach einem Jahr aufwiesen, lagen im Mittel bei rd. 0,4 mm/m. Die Dehnung der Balken mit dem Portlandzement NA (Z-I-02) lag bei rd. 0,3 mm/m und war damit um 0,1 mm/m geringer. Es stellte sich die Frage, welche Ursache für die etwas höhere Dehnung von Betonen mit hüttensandhaltigem Zement verantwortlich ist.

Zemente mit höheren Hüttensandgehalten haben eine geringfügig geringere Frühfestigkeit als Portlandzemente. Um den Einfluss der Festigkeit und Dichte des Betons auf die Dehnung festzustellen, wurden je zwei Balken eines Betons mit einem

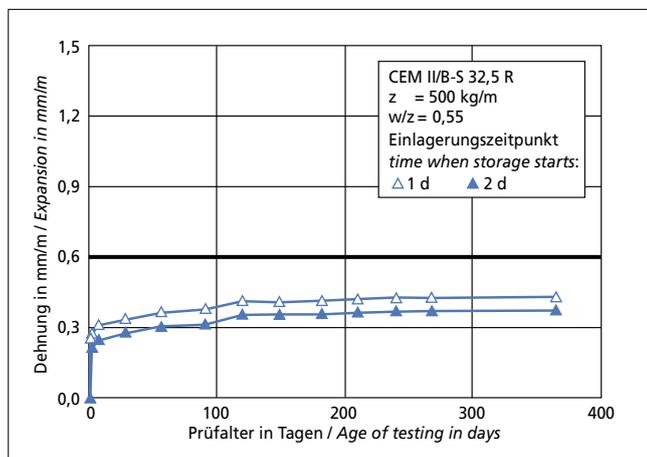


Bild 6: Dehnungen der Betonbalken mit einem hüttensandhaltigen Zement in Abhängigkeit vom Einlagerungszeitpunkt
Figure 6: Expansion of concrete test pieces (beams) made with a slag cement in relation to the time at when storage starts

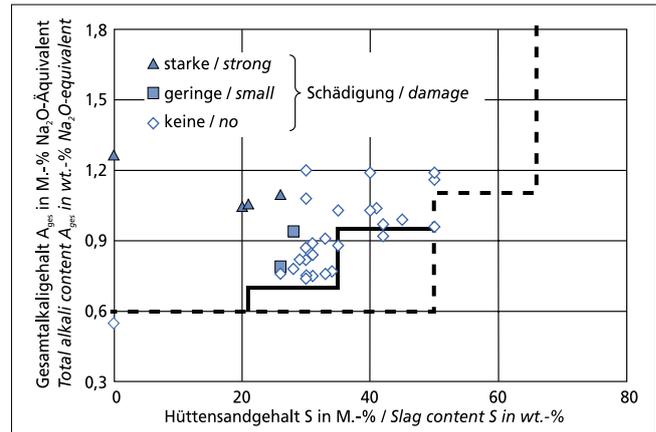


Bild 5: Schädigung der Betonprobekörper in Abhängigkeit vom Hüttensandgehalt und vom Gesamtalkaligehalt des Zements
Figure 5: Damage to concrete test pieces as a function of slag content and total alkali content of the cement

alkali contents between 0.79 wt.-% and 0.94 wt.-% Na_2O equivalent. No damage occurred below 0.79 wt.-% Na_2O equivalent.

The dotted line for the limits of the total alkali content of the low-alkali cements in the former DIN 1164-1:1994-10 shows that these limits lay a long way on the safe side. On the basis of these results and after discussions in the “Cement” NABau Standards Committee the range of low-alkali cements in DIN 1164-1:1994-10 has therefore been extended to include the following cements:

- CEM II/B-S Portland slag cement with a total alkali content $\leq 0,70$ wt.-% Na_2O equivalent, and
- CEM III/A blastfurnace cements with a slag content of 36 wt.-% to 49 wt.-% and a total alkali content $\leq 0,95$ wt.-% Na_2O equivalent.

The new regulations are shown in Figure 5 as a solid line. It can be seen that the total alkali content contains a safety margin of about 0.1 wt.-% Na_2O equivalent from the total alkali content of the CEM-II/B-S cement at which even slight damage occurred.

It is also clear from Figure 5 that no cases of damage occurred above a blastfurnace slag content of the cement of about 30 wt.-%. It is to be supposed that above this blastfurnace slag content any harmful alkali reaction in the concrete is decided not only by the alkali content of the pore solution but also by the density of the hardened cement paste, which increases with rising blastfurnace slag content.

5.5 Supplementary investigations

The beams of undamaged concrete made with cements containing blastfurnace slag exhibited average expansions after one year of about 0.4 mm/m. The expansion of the beams made with low-alkali Portland cement (Z-I-02) was about 0.3 mm/m and was therefore 0.1 mm/m lower. This gave rise to the question as to the cause of the somewhat greater expansion of concretes made with cement containing blastfurnace slag.

Cements with higher blastfurnace slag contents have a very slightly lower early strength than Portland cements. In order to establish the influence of the strength and the density of the concrete on the expansion, two beams of a concrete made with CEM II/B-S 32,5 R cement (Z-II-08) were stored in the 40 °C fog chamber after one day under moist conditions at 20 °C as scheduled, and two more beams were stored in the 40 °C fog chamber after two days under moist conditions. The expansions are shown in Figure 6, in each case as average values from two beams.

The expansions of the beams run parallel over the entire period, and the expansions of the beams which were stored in the fog chamber after only one day lie significantly above those stored after two days. This shows that the initial expansion, which is made up of moisture and temperature expansion, is greater for storage after one day. It can be assumed that the density and strength of the concrete have an influence on the initial expansion of the beams as a

CEM II/B-S 32,5 R (Z-II-08) zum einen planmäßig nach einem Tag und zum anderen nach zwei Tagen Feuchtlagerung bei 20 °C in die 40 °C-Nebelkammer eingelagert. Die Dehnungen sind als Mittelwerte aus jeweils zwei Balken in Bild 6 dargestellt.

Die Dehnungen der Balken verlaufen über den gesamten Zeitraum parallel, wobei die Dehnungen der Balken, die bereits nach einem Tag eingelagert wurden, deutlich über den nach zwei Tagen eingelagerten liegen. Demnach ist die Anfangsdehnung, die sich aus Feuchte- und Temperaturdehnung zusammensetzt, bei Einlagerung nach einem Tag größer. Es ist anzunehmen, dass die Dichte und Festigkeit des Betons einen Einfluss auf die Anfangsdehnung der Balken infolge von Temperaturänderung und Feuchteaufnahme haben. Dies sollte bei einer vergleichenden Bewertung von Betonen mit unterschiedlicher Festigkeits- und Dichteentwicklung berücksichtigt werden.

6 Zusammenfassung

Zur Vermeidung einer schädigenden AKR kann nach der Alkali-Richtlinie des DAfStb unter bestimmten Voraussetzungen wie großer Feuchte oder einer Alkalizufuhr von außen die Verwendung von NA-Zementen erforderlich sein. Portlandzemente mit NA-Eigenschaft – Na₂O-Äquivalent ≤ 0,60 M.-% nach DIN 1164-1: 1994-10 – können jedoch rohstoffbedingt nicht in allen Gegenden Deutschlands hergestellt werden. Für eine Reihe von Baumaßnahmen ist es zudem häufig notwendig, neben den in DIN 1164-1: 1994-10 als NA-Zement genormten Hochofenzementen CEM III/A mit Hüttensandgehalten ≥ 50 M.-% und einem Gesamtalkaligehalt ≤ 1,10 M.-% Na₂O-Äquivalent sowie CEM III/B-Zementen mit Gesamtalkaligehalten ≤ 2,00 M.-% Na₂O-Äquivalent weitere NA-Zemente mit schnellerem Festigkeitsbildungsvermögen einsetzen zu können.

Daher wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie umfangreiche Untersuchungen an 22 CEM II/B-S-Zementen und 9 CEM III/A-Zementen – Hüttensandgehalt ≤ 50 M.-% – mit dem Ziel durchgeführt, die Palette der NA-Zemente um die genannten Zemente zu erweitern. Mit den Zementen wurden Betone mit sehr alkaliempfindlichem Kiessand mit Opalsandstein und Flint hergestellt. Die Dehnung von Balken mit den Maßen 10 cm x 10 cm x 50 cm und die Rissbildung der 30-cm-Würfel, die in einer 40 °C-Nebelkammer lagerten, wurden bestimmt. Daneben wurde der Verlauf des dynamischen E-Moduls an den so gelagerten Betonbalken erfasst. Die Wirksamkeit der Zemente hinsichtlich der Vermeidung einer schädigenden AKR konnte auf der Grundlage der dabei gewonnenen Erkenntnisse beurteilt werden.

Die wesentlichen Ergebnisse der Untersuchungen führten zur vom NABau-Normenausschuss „Zement“ beschlossenen Erweiterung der in DIN 1164 genormten NA-Zemente um folgende Zemente:

- Portlandhüttenzemente CEM II/B-S mit einem Gesamtalkaligehalt ≤ 0,70 M.-% Na₂O-Äquivalent und
- Hochofenzemente CEM III/A mit einem Hüttensandgehalt von 36 M.-% bis 49 M.-% sowie einem Gesamtalkaligehalt ≤ 0,95 M.-% Na₂O-Äquivalent.

Darüber hinaus geht aus den Untersuchungen Folgendes hervor:

- Ab einem Hüttensandgehalt im Zement von rd. 30 M.-% sind keine Schädigungen aufgetreten. Die Regelungen der DIN 1164 für NA-Zemente liegen für diesen Bereich nach wie vor sehr weit auf der sicheren Seite. Es kann angenommen werden, dass hinsichtlich der Vermeidung einer schädigenden AKR neben dem wirksamen Alkaligehalt der Porenlösung die zunehmende Dichte des Zementsteins bei größeren Hüttensandgehalten eine wesentliche Rolle spielt.
- Die gegenüber Portlandzementen etwas geringere Frühfestigkeit hüttensandhaltiger Zemente führt zu einer etwas erhöhten Temperatur- und Feuchtedehnung der in der 40 °C-Nebelkammer gelagerten Betonbalken. Dies muss insbesondere bei vergleichenden Prüfungen berücksichtigt werden. Durch eine spätere Einlagerung der Betonprobekörper in die 40 °C-Nebelkammer könnte dieser Unterschied ausgeglichen werden.

result of temperature change and moisture absorption. This should be taken into account during any comparative evaluation of concretes in which the strengths and densities develop differently.

6 Summary

According to the DAfStb alkali guideline it can be necessary to use low-alkali cements to avoid a harmful alkali-silica reaction under certain conditions, such as high moisture level or an external supply of alkali. However, Portland cements with low-alkali properties – Na₂O-equivalent ≤ 0.60 wt.-% complying with DIN 1164-1: 1994-10 – cannot be manufactured in all areas of Germany due to the raw materials. In addition to the CEM III/A blastfurnace cements with a slag content ≥ 50 wt.-% and a total alkali content ≤ 1.10 wt.-% Na₂O-equivalent and CEM III/B cements with a total alkali content ≤ 2.00 wt.-% Na₂O-equivalent, standardized as low-alkali cements in DIN 1164-1:1994-10, it is also often necessary, for a number of building procedures, to be able to use low-alkali cements with more rapid strength-forming capabilities.

Extensive investigations were therefore carried out at the Research Institute of the Cement Industry on 22 CEM II/B-S cements and 9 CEM III/A cements – slag content ≤ 50 wt.-% – with the aim of extending the range of low-alkali cements to include the cements mentioned. The cements were used to produce concretes with very alkali-sensitive sand and gravel containing opaline sandstone and flint. The expansion of 10 cm x 10 cm x 50 cm beams and the cracking of 30 cm cubes which had been stored in a 40 °C fog chamber were determined. The behaviour pattern of the dynamic elastic modulus of the concrete beams stored in this way was also measured. The effectiveness of the cements with respect to avoidance of harmful alkali-silica reactions was assessed on the basis of the results obtained.

The essential results of the investigation led to the decision by the NABau “Cement” Standard Committee to extend the low-alkali cements standardized in DIN 1164 to include the following cements:

- CEM II/B-S Portland slag cements with a total alkali content ≤ 0.70 wt.-% Na₂O-equivalent, and
- CEM III/A blastfurnace cements with a slag content of 36 wt.-% to 49 wt.-% and a total alkali content ≤ 0.95 wt.-% Na₂O-equivalent.

The following facts also emerged from the investigations:

- No damage occurred above a slag content in the cement of about 30 wt.-%. The regulations in DIN 1164 for low-alkali cements in this sector continue to lie far on the safe side. As far as the avoidance of harmful alkali-silica reactions is concerned it can be assumed that the increasing density of the hardened cement paste at higher slag contents plays an important role alongside the effective alkali content of the pore solution.
- The somewhat lower early strength of cements containing slag when compared with Portland cements leads to a somewhat increased temperature and moisture expansion of the concrete beams stored in the 40 °C fog chamber. This must be taken into account, especially during comparison tests. It was possible to offset this difference by delaying the storage of the concrete test pieces in the 40 °C fog chamber.

Die vom Unterausschuss des DAfStb „Alkalireaktion im Beton“ betreuten Untersuchungen wurden im Forschungsinstitut der Zementindustrie durchgeführt und aus Haushaltsmitteln des Bundesministers für Wirtschaft über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ (AiF-Forschungsvorhaben Nr. 11424) gefördert.

The investigations supervised by the “Alkali reaction in concrete” subcommittee of the DAfStb were carried out at the Research Institute of the Cement Industry and were financed by the Federal Ministry for Economic Affairs through the “Otto von Guericke” Federation of Industrial Research Associations (AiF Research Project No. 11424).

Literatur / Literature

- [1] Zement-Taschenbuch 2000, Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.), Düsseldorf: Verlag Bau+Technik, 2000
- [2] Locher, F. W.; Sprung, S.: Ursache und Wirkungsweise der Alkalireaktion. In: beton 23 (1973), H. 7, S. 303–306, und H. 8, S. 349–353; ebenso: Betontechnische Berichte 1973, S. 101–124, Beton-Verlag, Düsseldorf 1974
- [3] Locher, F. W., Sprung, S.: Einflüsse auf die Alkali-Kieselsäure-Reaktion im Beton. In: Zement-Kalk-Gips 28 (1975), H. 4, S. 162–169
- [4] Sprung, S.; Sylla, H.-M.: Ablauf der Alkali/Kieselsäure-Reaktion im Beton bei unterschiedlichen Zuschlaggesteinen. In: Zement-Kalk-Gips 51 (1998), Nr. 6, S. 334–345
- [5] Vorbeugende Maßnahmen gegen schädigende Alkalireaktion 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, DAfStb (Hrsg.). – Berlin: Beuth, 1997 (DAfStb-Richtlinie)
- [6] Vorbeugende Maßnahmen gegen Alkalireaktion im Beton. Schriftenreihe der Zementindustrie, H. 40 (1973). Verein Deutscher Zementwerke e.V. (Hrsg.), Düsseldorf
- [7] Thomas, M. D. A.; Innis, F. A.: Effect of Slag on Expansion Due to Alkali-Aggregate Reaction in Concrete. In: ACI Materials Journal 95 (1998), Nr. 6, S. 716–724
- [8] Smolczyk, H. G.: Slag Cements and Alkalireactive Aggregates. Proceedings, The VI International Congress on the Chemistry of Cement, Moscow. Supplementary paper, Section III, 1974
- [9] Regional Specifications and Recommendations for the Avoidance of Damaging Alkali-silica Reactions in Concrete within Europe. CEN Report CR 1901, 1995 (updated 1999)
- [10] Fournier, B.; Bérubé, M.-A.; Rogers, C. A.: Proposed Guidelines for the Prevention of Alkali-Silica Reaction in New Concrete Structures. In: Transport Research Record 1668 – Concrete in Pavements and Structures, paper No. 99-1176, S. 48-53. Transportation Research Board, Washington, D.C., 1999
- [11] Schäfer, E.; Meng, B.: Einfluss von Zement und Zusatzstoffen auf das Alkaliangebot für eine Alkali-Kieselsäure-Reaktion. In: beton 51 (2001), H. 10, S. 577–584
- [12] Bakker, R.: Über die Ursache des erhöhten Widerstands von Beton mit Hochofenzement gegen die Alkali-Kieselsäurereaktion und den Sulfatangriff. Dissertation, Technische Hochschule Aachen, 1980
- [13] Supplementary Cementing Materials for Concrete. V.M. Malhotra (Hrsg.), Canada Centre for Mineral and Energy Technology, CANMET, Ottawa, 1987
- [14] Wierig, H.-J.; Winkler, H.: Zur quantitativen Bestimmung der Hauptbestandteile von Zementen. In: Zement-Kalk-Gips 37 (1984), H. 6, S. 308–310
- [15] Bonzel, J.; Dahms, J.: Alkalireaktion im Beton. In: beton 23 (1973), H. 11, S. 495–500, und H. 12, S. 547–554; ebenso: Betontechnische Berichte 1973, S. 153–190, Beton-Verlag, Düsseldorf 1974
- [16] Bonzel, J.; Krell, J.; Siebel, E.: Alkalireaktion im Beton. In: beton 36 (1986), H. 9, S. 345–349, und H. 10, S. 385–389; ebenso: Betontechnische Berichte 1986–1988, S. 57–77, Beton-Verlag, Düsseldorf 1989
- [17] Bunke, N.: Prüfung von Beton – Empfehlungen und Hinweise als Ergänzung zu DIN 1048. Berlin: Beuth, 1991 (DAfStb: Schriftenreihe 422)
- [18] Siebel, E.; Reschke, T.: Alkali-Reaktion mit Zuschlägen aus dem südlichen Bereich der neuen Bundesländer – Untersuchungen an Laborbetonen. In: beton 46 (1996), H. 12, S. 740–744, und beton 47 (1997), H. 1, S. 26–33; ebenso: Betontechnische Berichte 1995–97, S. 117–131, Verlag Bau+Technik, Düsseldorf 1998